

Okok és következmények az energetikában

Vajda György

Okok és következmények az energetikában



AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST

A kiadvány a Paksi Atomerőmű és a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával készült



ISBN 978 963 05 9495 0

Kiadja az Akadémiai Kiadó,
az 1795-ben alapított
Magyar Könyvkiadók és Könyvterjesztők Egyesülésének tagja
1117 Budapest, Prielle Kornélia u. 21–35.
www.akademiaikiado.hu

Első magyar nyelvű kiadás: 2014

© *Vajda György*, 2014

A kiadásért felelős
az Akadémiai Kiadó Zrt. igazgatója
Szerkesztette: Vajda Ambrus
Felelős szerkesztő: Tárnok Irén
Termékmenedzser: Egri Róbert
Nyomdai előkészítés: BIRD
A nyomdai munkálatokat a Prime Rate Kft. végezte
Felelős vezető: Tomcsányi Péter
Budapest 2014
Kiadványszám: TK130053
Megjelent 30,04 (A/5) ív terjedelemben

Minden jog fenntartva, beleértve a sokszorosítás, a nyilvános előadás,
a rádió- és televízióadás, valamint a fordítás jogát,
az egyes fejezeteket illetően is.

Printed in Hungary

Tartalom

BEVEZETÉS.....	9
1. Miről van szó?.....	11
1.1. A probléma.....	11
1.2. Az energetika felelőssége.....	18
1.2.1. Egészségkárosítás.....	20
1.2.2. Környezetkárosítás.....	31
1.2.3. Gazdasági kölcsönhatások.....	37
1.2.4. Politikai kölcsönhatások.....	42
1.3. Kinek higgyünk?.....	44
1.4. A megítélés nehézsége.....	49
I. ENERGIAFORRÁSOK.....	55
2. Kimerülnek az erőforrásaink?.....	59
2.1. Számbavétel.....	61
2.2. Az időhorizont.....	66
2.3. Véget ér az olajkor?.....	68
2.4. A kőolaj helyettesítése.....	71
2.5. Tüzelőanyag-ellátás.....	74
2.5.1. Biomassza.....	74
2.5.2. Szén.....	77
2.5.3. Szénhidrogének.....	80
2.6. Meddig elég az atomenergia?.....	83
2.7. És a geotermikus energia?.....	85
2.8. Ahol a cipő szorít.....	87
3. Hagyatkozzunk a természetre?.....	94
3.1. Megújuló energiaforrások.....	94
3.2. Napsugárzás.....	97
3.3. Biomassza.....	103
3.4. Bioenergia.....	107
3.5. Szélenergia.....	110
3.6. Vízenergia.....	113
4. Mit nyerünk a föld mélyéből?.....	120

4.1. Ásványi energiahordozók	120
4.2. Széntermelés	121
4.3. A kőolajtermelés szerepe	131
4.4. A kőolajtermelés technikája	142
4.5. Földgáztermelés	149
4.6. Hasadóanyag-bányászat	153
4.7. A földhő kinyerése	156
5. A természet kihasználása	159
5.1. Megújuló energiák	159
5.2. Napenergia-hasznosítás	161
5.3. A szél hasznosítása	169
5.4. A vízenergia kiaknázása	175
II. ENERGIAÁTALAKÍTÁSOK	185
6. Energiaátalakítások kémiai energiából	187
6.1. Biomasszából nyert energiahordozók	187
6.1.1. Faszén	188
6.1.2. Biogáz	188
6.1.3. Bioüzemanyagok	191
6.2. Energiahordozók szénből	195
6.2.1. Kokszyártás	196
6.2.2. Brikettálás	198
6.2.3. Cseppfolyósítás	198
6.2.4. Gyártott gázok	199
6.2.5. Hulladékgázok	203
6.3. Kőolajtermékek	204
6.3.1. Kőolajfeldolgozás	204
6.3.2. Üzemanyagok	207
6.3.3. Tüzelőanyagok	209
6.4. Földgázból nyert termékek	210
6.4.1. Cseppfolyósítás	210
6.4.2. Folyékony üzemanyag előállítása	211
6.5. Tüzelőanyagok endoterm reakciókból	211
6.5.1. Hidrogéngazdaság	211
6.5.2. A metanol szerepe	216
6.6. Hőfejlesztés	218
6.6.1. A tűz meghódítása	218
6.6.2. Tüzelőanyagok égése	222
6.6.3. Tüzelőberendezések	227
6.6.4. Az égéstermékek	230
6.6.4.1. A karbon égéstermékei	231

6.6.4.2. Üvegházhatás	232
6.6.4.3. Szilárd égéstermékek	237
6.6.4.4. A víz mint égéstermék	240
6.6.4.5. Savas szennyezők	241
6.7. Kémiai energiából mechanikai munka	246
6.7.1. Robbantások	247
6.7.2. Sugárhajtás	248
6.8. Kémiai áramforrások	249
6.9. Kémiai eredetű sugárzás	256
6.10. Nukleáris üzemanyciklus	257
7. Energiaátalakítás hőből	260
7.1. Kémiai változások előidézése	260
7.2. Hőátszármaztatás	261
7.2.1. Légnemű hőhordozók	262
7.2.2. Folyékony hőhordozók	265
7.3. Mechanikai munka hőből	271
7.4. Áramfejlesztés hővel	283
7.5. Sugárzások	285
8. Mechanikai munka átalakítása	288
8.1. Gépek hajtása	288
8.1.1. Mozdásformák	288
8.1.2. Vízgépek	290
8.1.3. Léggépek	296
8.2. Áramforrások	301
9. Villamos energia átalakítása	303
9.1. Villamosenergia-ellátás	305
9.2. Elektrolízis	315
9.3. Villamos hőfejlesztés	316
9.4. Mechanikai munkavégzés	318
9.5. Elektromágneses hullámok	322
9.5.1. Világítás	322
9.5.2. Információtechnika	326
9.10. Élettani hatások	327
10. Energiaátalakítás elektromágneses sugárzásból	329
11. Nukleáris energia átalakítása	330
11.1. Az atommag mint energiaforrás	330
11.2. Lakossági elfogadtatás	337
11.3. Kémiai változások	340
11.4. Hőfejlesztés	341
11.5. Erőműépítés	345
11.6. Atomenergia Magyarországon	349
11.7. A hulladékprobléma	351
11.8. Mechanikai munka	354

11.9. Villamosenergia-fejlesztés	355
11.10. Elektromágneses hullámok	355
III. ENERGIASZÁLLÍTÁS	359
12. Energiahordozók külkereskedelme	361
13. Energiaforgalom a tengereken	364
14. Energiaforgalom a szárazföldön	368
14.1. Hagyományos energiaszállítási módszerek	368
14.2. Szállítás csővezetéken	370
14.2.1. Folyékony energiahordozó szállítás	371
14.2.2. Földgázellátás	372
15. Villamosenergia-átvitel	378
IRODALOM	383

Bevezetés

Frusztrált világban élünk, politikai, gazdasági, társadalmi konfliktusok közepette, és általunk előidézett természeti fenyegetésekkel szembesülünk. Egyesek szerint túlságosan elszaporodtunk, meghaladva a Föld eltartóképességét, nem elég a termőföld és a vízbázis a növekvő lakosság táplálására. Mások szerint túlságosan bonyolulttá vált az életünk, és életmódunkkal magunk alatt vágjuk a fát, tönkretéve életkörülményeinket. Az üvegházgázok kibocsátása feltehetőleg megváltoztatja a klímát, ezért felmelegedéssel, kedvezőtlenebb időjárással, a tengerszint emelkedésével fogunk szembesülni. Olyan vélemények is vannak, hogy az igényeink nőttek nagyra, meghaladva a lehetséges erőforrásokat. Elfognak a nyersanyagok, főleg a kőolaj és a földgáz, és a civilizációt energiahiány fenyegeti. Szörnyűséges kataklizmát is jósolnak néhányan, mert a fejlődésnek indult elmaradt régiók csak háborúban, a fejlettek legyőzésével érhetik utol azok életszínvonalát. Néhányan vészharangokat kongatnak, elérkeztünk a Föld tűrőképességének a határára, az emberiség fennmaradása van veszélyben, még az emberiség pusztulását feltételező jóslatok is előfordulnak, ha Földünk ősanijának Gaiának – aki bolygónkat élőlényként szimbolizálja – elege lesz belőlünk.

Kétségtelenül vannak aggasztó jelek. Káros anyagok kibocsátása a légtérbe, a termőtalaj tönkretétele, a vízbázisok elszennyezése, erdők kipusztítása és sok más hatás teszi tönkre az emberek egészségét és életfeltételeit. Megtapasztalhattuk, hogy viszonylag kis emberi beavatkozásokkal nagy zavarokat lehet előidézni a természet rendjében, erre élővizek kipusztulása, az ózonlyuk növekedése, az üvegházhatás erősödése és hasonló folyamatok figyelmeztetnek. A problémáknak többnyire az a gyökere, hogy az emberi tevékenységek olyan léptéket értek el, hogy azok következményei összemérhetők a természeti eredetűekkel. Az ilyen folyamatokban jelentős szerepet játszik az energiaellátás. A tudomány nem tud egyértelmű válaszokat adni arra, hogy mit hoz a jövő, csupán feltételezett lehetőségeket képes felvázolni. A kutatók egy része a pesszimista kimenetet vallja, mások kiutat remélnék.

Meg fogjuk találni a kiutat. Arra a tapasztalatra lehet alapozni, hogy az emberiség mindig talált megoldást a létét fenyegető veszélyekre. Kiemelkedett az állati létből, túlélte az ellenséges környezetet, átvészelte a jégkorszakot és a nagy hőség időszakát. Kibírt szörnyűséges járványokat, háborúkat, természeti csapásokat. Van ugyanis a túlélésre egy hatalmas erőforrása, az emberi munka, tudás és leleményesség. Ez mindig megteremtette a kiutat, gyakran teljesen váratlan módon. A keresztes lovagok úgy vélték, hogy az ellenséget csak karddal lehet lekaszabolni, gondolták volna, hogy távolról is megölhetők egy csőből kilőtt kis fémdarab segítségével? Az idősebbek még emlékeznek arra, milyen sok időre, utánjárásra, sőt protekcióra volt szükség egy telefonvonal

beszereléséhez, és mennyi vesződséggel járt a telefonálás a túlterhelt hálózaton. Nem reméltük, hogy egyszer mindenki zsebében ott lesz az olcsó kis mobil, amivel bárki bárhol, bármikor elérhető. A kiút iránya többnyire még csak nem is volt sejthető. Vagy 150 évvel ezelőtt Párizs magisztrátusa prognózis készítésével bízott meg tudós elméket. Megállapították, hogy a fejlődés a forgalom lehetetlenülésére vezet, olyan magasan fogja elborítani a lovak ürüléke az utcákat. Gondolták volna, hogy egy-két fiáker csak mutatóba marad a nosztalgiazó turisták kedvéért? Lehet, hogy egy évszázad múlva egy benzinmotoros autóra úgy fognak nézni, mintha valaki ma lóháton indulna szabadságra a Balatonhoz. Az új megoldások szinte észrevétlenül lopakodnak be az életünkbe. Jó példa az internet, ami mindenféle tevékenységet – levelezés, vásárlás, ügyintézés, szórakozás, tájékoztatás, flash mob (vagy akár felkelés) szervezése stb. – vállalt magára, anélkül, hogy ezt kértük volna.

Energia valamilyen formában eljut minden háztartásba, gazdasági szervezetbe, intézménybe, átszövi a társadalmi és egyéni létnek szinte minden mozzanatát. Az energiaellátás azonban nemcsak egy szolgáltatás, létesítményeinek és technológiáinak más jellegű – kedvező és kedvezőtlen – hatásai is vannak a környezetükre, és a környezet vissza is hat az energiaellátás feltételeire és mozgásterére, megszabva az energiaellátás gazdasági és műszaki lehetőségeit, fejlesztésének irányait. Az energiaellátás léptéke, hatósugara, súlya révén e kölcsönhatások hordereje jelentős. Kölcsönhatások nemcsak a műszaki és gazdasági reálfolyamatokban, valamint a környezeti kapcsolatokban érvényesülnek, hanem gyakran komoly társadalmi kihatásuk is van.

Az energetika kedvezőtlen hatásai körül gyakran alakulnak ki konfliktusok, melyek háttérben burkoltan vagy nyíltan jelentős érdekek is szerepet játszanak. Az ellentétes nézetek és javaslatok között nemcsak a laikus állampolgár számára nehéz eligazodni, hanem az illetékes döntéshozóknak is. Nem könnyű megkülönböztetni a valós és a vélt veszélyeket, hogy véges erőforrásaikat melyekre koncentráljuk. Talán még nehezebb az eligazodás az energiaellátás célszerű útjának megválasztását befolyásoló körülmények között.

A történelem nagy tanítómester. Az energetikában is segíti annak megértését, mi miért történt úgy, ahogy történt. Az okok és okozatok közötti kapcsolat azonban nem mindig egyértelmű, de már a lehetőségek számbavétele is elősegíti az előrelátást, és az okosabb döntéseket.

Jelen munka a tájékozódáshoz kíván néhány fogódzót nyújtani, a kölcsönhatásokat az energiaszolgáltatás oldaláról tekintve át. Ugyanez az energiafelhasználás területén egy későbbi munka tárgya. Önhittség lenne feltételezni, hogy e könyv szerzője jobban érti az energetika problémáit, mint az évente megjelenő tengernyi irodalom szerzői. Csupán a tények és kölcsönhatások elfogulatlan összerendezésével próbál segítséget nyújtani az eligazodáshoz a rengetegben.

1. Miről van szó?

1.1. A probléma

Nagyon leegyszerűsítve arról van szó, biztosítható-e az emberiségnek a civilizált élethez szükséges energia. A nagyon leegyszerűsített válasz csak igenlő lehet, hiszen nem akarhatjuk feladni a jövő reményét. De a realista válasz bonyolultabb, tele buktatókkal.

A természetben minden változáshoz, minden folyamathoz energiabefektetés szükséges. Vonatkozik ez természetesen az emberek életére és tevékenységére is. Energia kell életünk minden mozzanatához, az életkörülmények biztosításához, munkánk végzéséhez és szabadidőnk eltöltéséhez. Az energiaellátás úgy szövi át a társadalom életét, ahogy a vérkeringés az emberi testet. Minél fejlettebb egy társadalom, annál több energiára van szüksége a gazdaság működéséhez, az emberek jólétének biztosításához. Az energiaellátás egy civilizált társadalom működésének egyik legfontosabb feltétele. Rendelkezésre állása és ára minden tevékenységet befolyásol. Gyakran hallani, hogy az emberiség energiaellátása válságban van. Közben minden működik, és aki meg tudja fizetni, annak rendelkezésre áll a szükséges mennyiségben. De meddig?

Az emberiség igényeinek kielégítéséhez iszonyatosan sok energiára van szükség. Olajegyenértékben kifejezve évente mintegy 11 milliárd tonnára, amihez az elmúlt évben 3,5 milliárd t kőolajat, 4,5 milliárd t szenet 2,6 billió m³ földgázt kellett kitermelni, és az egyéb forrásokból fedezett ellátás 2,5–3,0 milliárd t olajjal volt egyenértékű. A világ ipari termékeinek 15–20%-át az energiatermelés és energiafogyasztás területén használják fel, a képződő jövedelmek több mint 10%-át energia vásárlására fordítják.

Az idő során a világ energiaszükséglete szinte folyamatosan nőtt. Ebben a nagy katalizmák – háborúk, gazdasági válságok, természeti katasztrófák – is csak átmeneti visszaesést okoztak, a fejlődés hamar helyreállt. A becslések szerint az emberiség energiafelhasználása a 19. század folyamán mintegy tízszeresére nőtt, a 20. században felgyorsult a fejlődés és a szükséglet a hússzorosára bővült. A 20. század világháborúi és világgazdasági válságai is az energiafelhasználásnak csupán néhány éves átmeneti visszaesését okozták.

A növekedés legfőbb hajtóereje minden ember természetes törekvése, hogy magának és családjának életminőségét javítsa, szükségleteit minél teljesebben elégítse ki, kellemes és kényelmes életkörülményeket biztosítson. Az is fokozza a szükségletet, hogy egyre többen vagyunk a Földön, egyre tovább élünk, és életvitelünk mind összetettebbé válik. Biztosítható-e ennek az egyre növekvő energiaigénynek a fedezete? És ha ki is tudjuk csikarni a természetből a szükséges energiaforrásokat, nem jár-e ez több kárral, mint haszonnal?

A 21. században az emberiség energiaszükséglete bizonyosan tovább fog nőni, annak alakulását két ellentétes körülmény szabja meg. Az egyik az energiafelhasználás növekedési ütemének lényeges lassulása a korábbi időszakhoz képest.

Ezt önvédelemnek is minősíthetjük az előbbieken feltett két kérdésben rejlő fenyegetéssel szemben. A lassulás már a 20. század utolsó negyedében is jelentkezett, az olajkrízis, a klímaváltozástól való félelem és főleg a kőolaj drágulásának a hatására. A fejlett országokban ez a visszafogott ütem továbbra is érvényesülni fog, mert a magas energiaárak kikényszerítik az energiatakarékosságot, a hatékonyságjavítást, az energiaszerkezet módosítását, és más hasonló lépéseket. Ezek azonban aligha ellensúlyozzák a feszítő hatásokat a növekedésre.

A feszítő hatások egyike a fejlődő világ gyors növekedése, ami egyre nagyobb szerephez jut a világ energiafelhasználásának alakulásában. Néhány elmaradt nagy ország már elindult a gyors fejlődés útján, és példájuk követésre fog találni. Kína évek óta közel kétszámjegyű növekedést mutat fel a GDP-ben és az energiafelhasználásban. Indiát majdnem hasonló mutatók jellemzik, és a nyomukban Brazília, Oroszország, Indonézia, Dél-Afrika és mások. Csupa hatalmas lélekszámú állam. A világ energiafelhasználásának már a fele esik a fejlődő világra, és ez az arány rohamosan nő.

Ugyanezt támasztja alá a demográfiai prognózis is, ami szerint bolygónk lakossága évszázadunk első felében mintegy 50%-kal fog nőni, és ez a növekmény lényegében a fejlődő világban fog bekövetkezni. Földünk minden új lakosát táplálni és ruházni kell, valamiféle fedél is kell a fejük fölé, és még iparcikkekre is igényük lehet, mindehhez energiabefektetésre van szükség. Az urbanizáció is együtt jár a fajlagos energiafelhasználás növekedésével, a városi életvitel, valamint az infrastruktúra működtetése miatt. Az előrejelzések szerint két évtizeden belül a világ népességének legalább 60%-a városi lakos lesz, és a fejlődő világban is hatalmas megalopoliszok jönnek létre.

De ennél sokkal többről van szó. Jelenleg a világ energiafelhasználásának felét a Föld lakosságának egy negyede veszi igénybe. A fennmaradó három negyed is szeretne az egynegyedhez hasonlóan élni, a megélhetését biztosító munkából, kellemes otthonban, egészségesen táplálkozva, és szeretne részesülni a technika vívmányaiból is. A világ egy főre eső évenkénti átlagos energiafelhasználása ~70 GJ/fő (1,6–1,7 t kőolaj). E mögött az átlag mögött szörnyűségeken nagy különbségek húzódnak meg. A fejlett világban az átlag sokszorosa érvényesül, az Egyesült Államok fajlagosa a világátlag ötszöröse (még Magyarországé is másfélszeres), a fejlődő világot viszont alacsony értékek jellemzik. Kína a világátlag felénél tart, India mintegy a tizedénél, fekete Afrika pedig a századánál. A legszegényebb országokban még ennél is alacsonyabb az energiafelhasználás, ami primitív gazdaságot és nyomorúságos életkörülményeket jelez, és alig haladja meg az életben maradáshoz szükséges mértéket. Az elmaradás nagy hajtóereje a fejlődésnek, és gerjesztője a feszültségeknek. A hátrány csökkentése nemcsak az érintett országok érdeke, hanem a fejlett világé is, mert az elmaradás a táptalaja a gazdasági migrációnak, az etnikai konfliktusoknak, a fundamentalizmusnak, a terrorizmusnak, vagyis mindazon folyamatoknak, amiktől a fejlett világ retteg. A fejlődő világ felemelkedésének támogatása és ösztönzése számukra is elemi érdek, de ehhez energia is szükséges.

Mindezt támasztja alá, hogy a 21. században sem kerülheti el a világ az energia-szükséglet nagyarányú növekedését. Gyakran vetődik fel, nem lehet-e megállítani ezt a folyamatot, mivel súlyos kihatásai vannak? Hiszen így elpazaroljuk az erőforrásokat, veszélyeztetjük az emberek egészségét, mérgezzük a légkört, klímaváltozást idézünk

elő, és még sorolhatók a káros következmények. Mindezek ellenére a növekedés megállítása kilátástalan, a kérdés az, hogyan lehet azt fedezni? A 19. században a növekedés zömét a széntermelés biztosította, a szén világtermelése 100 év alatt százszorosára nőtt. A 20. században a domináns energiahordozó a kőolaj volt, aminek a világtermelése a század során ezerszeresére emelkedett. Valószínűtlen, hogy a fosszilis tüzelőanyagok termelésében még egy nagyságrendi növekedés elérhető, így a 21. század energiafelhasználását más forrásból kell fedezni. Az ehhez szükséges hatalmas potenciállal – jelenlegi ismereteink szerint – csupán az atom- és a napenergia rendelkezik, de korai lenne ezek dominanciáját prognosztizálni. A távolabbi jövő kilátásai meglehetősen bizonytalanok, nehéz megjósolni, mivel járul hozzá a részecskefizika, a mikrobiológia, vagy az űrkutatás az energiaellátáshoz. Még az sem zárható ki, hogy a tudomány valamilyen teljesen új lehetőséggel lepi meg az energetikát. Kutatóintézetek tömege, kutatók hatalmas hadserege foglalkozik világszerte a jövő útjának keresésével. A tét hatalmas, hiszen az energiaigény fedezése az emberi civilizáció fenntartásának egyik kulcskérdésévé vált. De milyen forrásokra lehet alapozni az energiaellátást, egyáltalán lesz-e elegendő energiaforrásunk? A kormányok, a nemzetközi szervezetek, az ipar vezetői felismerték a tét nagyságát, és rengeteget áldoznak az útkeresésre. Rá fogunk találni, ahogy ez mindig megtörtént a múltban is, de megfizethető lesz-e az ára? Már jelenleg is van példa arra, hogy az energia drágasága társadalmi forrongást váltott ki, amibe kormányok is belebuktak.

Az energiaellátás konkrét módjára a technika sokféle, részben egymást kiegészítő, részben egymással versenyző lehetőséget kínál. A választás a lehetséges műszaki megoldások között mindig összefonódik a létesítés és működtetés költségeinek mérlegelésével. Nem könnyíti meg ezt a feladatot, hogy a berendezések és létesítmények hosszú élettartama miatt jelentős előretekintésre van szükség, amit befolyásolnak a változékony gazdasági körülmények (konjunktúra, adópolitika, árak, infláció, kamatláb, devizaárfolyamok). Ma már elengedhetetlen a társadalmi khatások figyelembevétele, beleértve a környezetvédelmet, és az emberi együttélés elvárásait, az ezekkel kapcsolatos ismeretek és követelmények gyakran változnak. Nem mellőzhető politikai tényezők megfontolása sem, aminek a nagy khatású energetikai döntéseknél meghatározó szerepe lehet. Az energiainportnál pl. meg kell győződni az exportáló ország energiavagyonáról, politikai és gazdasági stabilitásáról, a szállítási infrastruktúra rendelkezésre állásáról az országok közötti, illetve országon belüli konfliktusok vagy terrorveszély idején, és más kérdésekről. De az is politikai szempont, amikor egy mosógép vásárlásánál informálódunk a származási ország technikai színvonaláról, munkakultúrájáról, minőségbiztosítási szokásairól.

Hosszú távon a fejlődés kiválasztja a leggazdaságosabb, leghatékonyabb, legcélszerűbb megoldásokat. A fejlődés útja azonban kacsaringós, rossz emberi döntések sok veszteséggel járó tévutakra vezethetnek. A döntéseket nemcsak a sok bonyolult kölcsönhatás nehezíti, hanem a meglévő rendszer nagy visszahúzó ereje is. Az energetika a legtökeigényesebb szakma, a bányák, erőművek, kőolaj-finomítók, villamos hálózatok, csővezetékek, az energiatermelő, -átalakító és -fogyasztó berendezések óriási mennyisége hatalmas értéket reprezentál. Nyilvánvaló érdek ezek minél hosszabb ideig tartó kihasználása, műszaki változtatások csak lassan érvényesülnek.

Bonyolítja az ügyet, hogy nagy előretartással gondoskodni kell a rendszer jövőbeli működéséről is, miközben változni fognak a szükségletek és a működési feltételek is. A hosszú idejű előretekinést egyrészt az alapvető létesítmények több évtizedes élet-tartama, másrészt a berendezések generációváltásának ugyancsak nagy időállandója indokolja. A jövőre vonatkozó döntésekkel egymással kölcsönhatásban levő műszaki, gazdasági, ökológiai, társadalmi, stratégiai és politikai követelményeket kell kielégíteni, nemritkán nemzetközi kölcsönhatások figyelembevételével. Sokan úgy vélik, az energetika alakulását a piac értékítélete automatikusan meghatározza. Kétségtelen, hogy az árak és költségek lényeges szerepet játszanak a lehetséges változatok megítélésében, de alapvetően csak a jelen viszonyairól tájékoztatnak. A piaci mechanizmus még a legfontosabb gazdasági paraméterek (pl. kamatláb, diszkonttényező, infláció mértéke, olajár, fejlődés üteme) távlati alakulásának becsléséhez sem tud kapaszkodókat kínálni, nem beszélve a gazdaságon kívüli körülményekről.

Ahhoz, hogy energia a kívánt formában, mindig és mindenütt a fogyasztók rendelkezésére álljon, nagyszámú különböző profilú vállalatokból álló, szövetvényes rendszerek összehangolt működésére van szükség. Ezek a rendszerek ma már szinte az egész Földet behálózzák. Az energiának nagyon hosszú utat kell megtenni a természet szolgáltatja energiaforrásoktól a végső felhasználókig. Esetenként vonatkozik ez a földrajzi távolságokra is, amikor az ellátás érdekében óceánokon és kontinenseken átívelő, sok ezer km-es távolságokat kell áthidalni. És vonatkozik a hosszú út a technikai megoldásokra, mivel sokféle módosító és átalakító technológián keresztül vezet a fogyasztónak szükséges energiafajtaához. Ehhez sok szakma (bányászat, kőolaj-feldolgozás, villamosenergia-termelés, szállítás, energia elosztás és szolgáltatás stb.) nagyon sok szervezetének pontos és jól koordinált együttműködésére van szükség, nemcsak műszaki kapcsolatokban, hanem pénzügyi és jogi vonatkozásokban is. Tulajdonképp csoda, hogy működik ez a bonyolult mechanizmus. De működik, felkattintunk egy kapcsolót, és szobánk fénybe borul, kinyitunk egy csapot, és működik a fűtés, fogytán van autónkban az üzemanyag, de a közelben vár ránk a töltőállomás. Nem meglepő, hogy átgondolatlan beavatkozás ebbe a bonyolult rendszerbe működési zavart okozhat.

Az állami és vállalati döntésekhez, a felkészüléshez elkerülhetetlen az előretekinés, hogyan alakul az energiaszükséglet, és hogyan lehet azt kielégíteni. Az energiaprognózisokat többnyire a nemzeti jövedelem feltételezhető növekedési üteméhez illesztve készítik. A 20. század közepén a gazdasági színvonal és az energiafelhasználás között, különösen a növekedési ütem tekintetében, korrelációt tapasztaltak, mind nemzetközi összehasonlításban, mind az egyes országok fejlődésében. Már akkor felmerült a kérdés, hogy ez a gazdaság belső összefüggéseit tükrözi-e, vagy növekvő tevékenységek mutatóinak véletlen egybeesése jelentkezik.

A gazdasági színvonal és az energiafelhasználás közötti kapcsolat nem szükségszerű, azt sok körülmény befolyásolja, mögöttük nagyon eltérő viszonyok húzódnak meg. Azonos GDP-t hozhat létre a gazdaság nagyon különböző termelési és fogyasztási szerkezettel, és nagyon sokféle energiaszerkezet biztosíthat azonos energiafelhasználást. A korreláció ellen hatnak az országok sajátos adottságai is. Ilyen szerepe van a klímának, Magyarországon erősen fűteni kell a kemény téli hónapokban (erre megy el az összes

energiafelhasználás 40%-a), Európa legdélibb területein fűtőtesteket sem építenek be a lakásokba. Hasonlóan nagy egy ország földrajzi kiterjedésének a szerepe is, Észak-Amerikában a közlekedésben és szállításban ezer km-es távolságok is szokványosak, a sűrűn lakott Közép Európában az országok kiterjedését is csak száz kilométerekben mérik. Érzékelteti az energiaszerkezet szerepét, hogy amikor a nagyon energiaigényes alapanyag-termelő vállalatok (kohászat, építőanyag-ipar, nehézszerkezet) a rendszerváltást követően Magyarországon tönkrementek, lényegesen csökkent az ország fajlagos energiaigényessége.

Az 1973. évi olajkrízist követően a GDP és az energiafelhasználás kapcsolata megbomlott. Az energiahelyzetet stabilizáló intézkedések hatására az energiafelhasználás növekedése lelassult, stagnáló, sőt csökkenő időszakok is előfordultak. Az olajellátás zavarainak hatására a közbizalom az energia biztonságos rendelkezésre állásában megingott, és fokozódó figyelem irányult az energiaellátást befolyásoló és kísérő körülményekre.

Az energiaellátás helyzetét és jövőbeli lehetőségeit sokrétű műszaki, gazdasági, jogi, társadalmi, politikai és egyéb körülmények alakítják. A kapcsolatok nem egyirányúak, az energiaellátás helyzete befolyásolja is a gazdasági, társadalmi, politikai viszonyokat, hatása van az emberek egészségére, a környezet állapotára, és más körülményekre. Nem egyszerű e szövevényes kölcsönhatásokat figyelembe venni, nem beszélve arról, hogy az élet állandóan új helyzeteket teremt, amik eltérő következményekre vezetnek. A fokozatosan érvényesülő hatások szerepét – a korábbi tapasztalatokra támaszkodva – többé-kevésbé meg lehet becsülni, de előfordulnak váratlanul érvényesülő, brutális események is, melyek következményei gyakran előreláthatatlanok. Az olajkrízis, a szocialista rendszer összeomlása, a világgazdasági válság drasztikusan visszavetette az energiafelhasználást, az atomerőművi katasztrófák nyomán sok ország radikálisan megváltoztatta energiapolitikáját, az Európai Unió joganyagának átvétele csatlakozásunk után alaposan átrendezte az energiaszolgáltatás rendszerét és módját.

Nyilván kilátástalan a sokféle tényező jövőbeli alakulását megítélni, ezért az energiaszükségletek prognózisával foglalkozó intézmények, a legfontosabb kérdésekben feltételezésekkel élve, optimista és pesszimista pályát jelölnek ki. Az idő függvényében általában folytonos növekedést tételeznek fel, a fejlődés a maximális és minimális növekedési ütem görbéi közötti sávban várható. Az időhorizonttal nő a becslés bizonytalansága, ezért indokolt a prognózist rendszeresen korrigálni. Az IEA¹ például évente felújítva publikálja a világ energiahelyzetére és kilátásaira végzett vizsgálatának eredményét (World Energy Outlook).

Stratégiai jelentősége miatt az energiaellátás biztosításában jelentős feladat hárul az államra. Ennek hazai gyakorlata még nem igazán alakult ki. A tervezés állami funkcióinak jelentős része (az energetika irányítása, finanszírozása, fejlesztésének meghatározása, a tulajdonosi szerep zöme) megszűnt, a piacgazdaságban az ilyen típusú

¹ International Energy Agency, Nemzetközi Energiaügynökség (kormányközi OECD-szervezet, Magyarország is tagja).

döntések legnagyobb részét vállalati hatáskörbe tartoznak. A magyar energiapiac jelenlegi főszereplői közül sokan Európa legnagyobb energiaszolgáltató vállalatai közé tartoznak, melyek nagy anyagi és szellemi erővel és az érdekérvényesítés terén sok évtizedes gyakorlattal rendelkeznek. Ezért az állam szerepében hangsúlyosabbá vált a társadalmi érdekek képviselője és a működési feltételek meghatározása, jogszabályokkal, valamint a felügyeletet gyakorló független hatóságok működtetésével. Az utóbbiba tartozik többek között a fogyasztói érdekvédelem, a minőségellenőrzés, az élet és vagyonvédelem, a munkavédelem, a piacfelügyelet, az árelőellenőrzés. Bizonytalanságot okoz, hogy a jelenlegi kormány az energiaellátás centralizálására és állami irányítására törekedve a piaci viszonyok lazítására törekszik.

Állami feladat az energiapolitika fő irányainak meghatározása, de a tapasztalatok szerint az érdekek és a hatalom birtoklásának kényszere gyakran elbizonytalanítja a szándékokat. Pedig vannak hosszú időre meghatározó ügyek, pl. mi legyen az atomenergia, vagy a megújuló szerepe, erőltessük-e a hazai energiaforrások kiaknázását, hogyan kell biztosítani az ellátás biztonságát. Az államra hárul az energiaszerkezet formálása, a geopolitikai adottságok figyelembevétele, és a nem energetikai nemzeti prioritások (hónvédelem, környezetvédelem, iparpolitika, szociálpolitika, területfejlesztés stb.) érvényesítése.

A vállalati döntéseket, amelyek kialakítják az energiaellátás helyzetét, egy komplex feltételrendszerben kell meghozni. Vannak nagy horderejű, és hosszú ideig érvényesülő döntések, ilyenek az energetika nagy beruházásait – pl. bányákat, erőműveket, kőolajfinomítókat, energiaszállító vezetékeket – érintők. A döntések nem kizárólag az energiaellátásért felelős intézmények és vállalatok kezében vannak, azokban valamilyen módon – mint állampolgárok, munkavállalók, munkaadók, lakosok, a közlekedés résztvevői stb. – mindannyian egyénileg is részt veszünk, ha ez nem is tudatos. Ki gondol arra, hogy megszokott hétköznapi cselekedeteivel, amikor reggel tevizet forral, gépkocsival a munkahelyére megy, bekapcsolja a munkaeszközeit stb., energetikai kérdésekben dönt, energiaellátási módok között választ, erősíti vagy gyengíti egyes energiahordozók pozícióját. Tartós fogyasztási cikkek vásárlásánál is előrettekintő döntéseket hozunk, milyen energiahordozóra alapozzuk lakásunk fűtését, milyen üzemanyag-fogyasztású gépkocsit vásárlunk, kifizetődőnek tartjuk-e energiatakarékos kompakt fényforrások beszerzését, kicseréljük-e a mosógépet, milyen munkaeszközöket használjunk stb. A sok kis egyéni döntés eredője, az azokban tükröződő feltételezések a jövőről befolyásolják az energetika globális alakulását. A személyes fogyasztókészülékeinkre vonatkozó elhatározások szerepe nem lebecsülendő, mert azok eredője energiapolitikát alakító erejű lehet. Így zsugorodott össze a lakossági szénpiac, így vált Magyarországon a fűtés szinte kizárólagos bázisává a földgáz, és esetleg így válhat a villanyautó, vagy a gázüzem a közlekedés alakítójává.

Sajnos a természet semmit sem ad ingyen, minden emberi tevékenység elkerülhetetlenül veszélyekkel jár együtt. Az energia hasznosítása is szükségszerűen együtt jár kedvezőtlen hatásokkal, balesetekkel, egészségkárosítással, környezetszennyezéssel, anyagi károkkal, kellemetlen társadalmi következményekkel. Úgy kell tehát az energiaellátást megoldani, hogy ne okozzon több kárt, mint hasznot. Ez nagyon bonyolult lecke,

kérdések tömegével kell szembesülni, melyekre a válaszok nem mindig egyértelműek. Hogyan értékeljük a kedvezőtlen hatásokat, mik a valós veszélyek, és melyek csak megalapozatlan hiedelmek? Lehetőségeink és erőforrásaink végesek, hogyan soroljuk a teendőket? Mely veszélyek elhárítása, vagy mérséklése kapjon prioritást, és miket lehet későbbre halasztani? A beavatkozások ellenére hogyan biztosítható az energiaellátás szükséges mértéke? Hogyan szerezhető meg a lakosság egyetértése a tervezett beavatkozásokhoz, és hogyan kezelhető a társadalmi nyugtalanság? Biztosítható-e a tervezett lépésekhez a szükséges anyagi fedezet? A válaszok újabb és újabb nehéz kérdéseket vetnek fel, a megoldások nemcsak szakmai hozzáértést kívánnak meg, hanem jó ítélőképességet és empátiát is.

Vajon biztosítható-e az emberiség energiaszükséglete a jövőben, elviselhetetlen következmények nélkül? Szaporodnak a negatív válaszok, de szükségszerű-e a kudarc? Általánosan érvényes megoldás nem létezik, legfeljebb néhány olyan magától értetődő követelményt lehet ismételtetni, mint az energiatakarékosság, az energiahatékonyság növelése, ember- és környezetbarát megoldások alkalmazása. Már csak azért sem létezik univerzális megoldás, mert az energiaellátást befolyásoló körülmények és lehetőségek hely- és időfüggőek. Így minden országnak, minden kisebb vagy nagyobb régióknak önállóan kell megoldást kiizzadnia, figyelemmel a sajátosságaira, de nem elszigetelten a külvilágtól.

A globalizáció alaposan összekuszálta az energetika ügyeit. Egyrészt a folyamatok közötti kölcsönhatások egyre komplexebbé váltak. A műszaki döntéseket befolyásolják gazdasági, politikai, környezeti körülmények, és fordítva a műszaki lépések hatással vannak a gazdasági, politikai, környezeti és egyéb viszonyokra. Másrészt a nemzetek sem függetlenek egymástól, a világ energiahelyzete az egyes országok energiaviszonyainak eredője. Mérete miatt Magyarország szerepe a világ energiaviszonyaiban marginális. Ez könnyen alakíthat ki olyan provinciális szemléletet, hogy a külső körülmények hatása sem jelentős a mi viszonyainkra, és szabad kezünk van energiahelyzetünk alakításában, vagy a tulajdonviszonyok átrendezésében.

Ilyen hamis feltételezés, hogy az állam tetszőlegesen alakíthatja a fogyasztói energiaárakat. Politikai szimpátia szerzése, szociálpolitikai indokok, költségvetési bevételek biztosítása, téves energiapolitikai megfontolások készíthetnek ilyen lépésekre. A valós költségviszonyok torzítása azonban rendszerint megbosszulja magát, hibás energiapolitikai és gazdálkodási döntéseket idéz elő, a veszteségeket a fogyasztókat megkárosító lépésekkel ellentételezik, a fejlődés lefékeződik (pl. elmaradnak beruházások), minőségromlás következik be (létszámcsökkentés vagy a karbantartás hiányosságai miatt), stb.

Ugyancsak visszaüt a kompetenciák önkényes átalakítása, akár szervezeti, akár személyi kérdésekben. Ez bekövetkezhet az államigazgatásban, vagy a vállalati szférában, a feladatok és felelőségek helytelen kialakításában, politikai indíttatásból hozzá nem értő vezetők kinevezésében.

1.2. Az energetika felelőssége

A legtöbb ember kapcsolata az energiaellátással csak addig terjed, hogy sokallja az üzemanyag árát, esetleg gondolkodik azon, hogyan csökkentse a fűtés költségét, vagy a villanszámlát. Magától értetődően kapcsolgatja fogyasztó készülékeit, és csak akkor hökken meg, amikor homok kerül a fogaskerekek közé, és az energiaellátás megszakad; a lakás sötétbe borul és semmi sem működik, a fűtőtestek kihűlnek. A modern társadalmakban szerencsére viszonylag hamar elhárítják az ilyen zavarokat, és az élet visszatér a megszokott kerékvágásba. A képzettebbeknek van némi ismerete az ellátás mögött meghúzódó bonyolult technológiai rendszerről, a villany-, gáz-, és üzemanyag-ellátásról, a távfűtésről, vagy munkavégzésük energetikai feltételeiről. De csak keveseknek van fogalmuk arról, milyen sokrétű műszaki, gazdasági, társadalmi, politikai körülmények szabják meg az energiaellátás helyzetét és működését.

Nehéz túlbecsülni az energiaellátás hozzájárulását az emberek életminőségének jobbá tételéhez. Egészségesebb táplálkozás, kulturáltabb lakásviszonyok, kedvezőbb munkakörülmények, több lehetőség a szükségletek kielégítésére, a fizikai munka megkönnyítése, nagyobb mobilitás, a szabad idő kellemes eltöltése és még hosszan lehetne sorolni az energetika szerepét az egészségesebb és kellemesebb életkörülmények megteremtésében.

Az energiahasznosítás azonban nemcsak pozitív szerepet játszik az emberiség életében, hanem kedvezőtlen hatásokkal is együtt jár. Az energiaellátás előnyeivel kapcsolódó kedvezőtlen következmények veszélyeztethetik az emberek egészségét és életkörülményeit, károsíthatják a természeti környezetet, tönkretelhetik anyagi javainkat, megzavarhatják a gazdasági kapcsolatokat, befolyásolhatják a társadalmi és politikai viszonyokat. A negatív hatások egy részét a társadalom magától értetődőnek tartja, azok veszélyét szinte önként vállalja. Viszont érzelmeket és indulatokat, félelmet és haragot ébresztenek az olyan kockázatok, amelyeket – megítélésük szerint – külső kényszer hatására kénytelenek elviselni. Az emberek különösen az egészségüket és az életkörülményeiket veszélyeztető hatásokra, valamint az anyagi helyzetüket befolyásoló kérdésekre érzékenyek. Szubjektív veszélyérzetüket sok körülmény befolyásolja (*1.1. táblázat*).

A veszélyekkel kapcsolatos döntések át vannak szöve etikai problémákkal. Kényes kérdés, hogy a társadalom az ártalmak és kockázatok milyen mértékét tekinti elfogadhatónak. Tökéletes védettség nem létezik, azt még egy tevékenység eltiltása sem biztosítja, mert akkor a társadalmi szükséglet kielégítetlensége okoz kedvezőtlen következményeket. Az egészségi ártalmakat okozó hatások megengedett határértékei a kockázatnak egy társadalmilag elfogadható szintjére kialakított kompromisszumot tükröznek, a reális műszaki és gazdasági lehetőségek figyelembevételével, így nem zárják ki a károsodás bizonyos valószínűségét. A legveszélyeztetettebbek a legkevésbé ellenálló szegény, beteg, öreg populációk lesznek. Ez egyben egy komoly morális problémát is jelent, hiszen a határértékkel valószínűségi alapon, burkoltan tulajdonképp kijelölik a károsítható személyek számát is. Van-e erre a társadalomnak jogosítványa?

1.1. táblázat. A szubjektív veszélyérzetet befolyásoló tényezők

Megítélés szempontja	Szubjektív veszélyérzet	
	növeli	csökkenti
Hatás megfigyelhetősége	bizonytalan	egyértelmű
Következmények mértéke	ismeretlen	ismert
Okok és következmények	alig érthetők	közérthetők
Tájékoztató technológiáról	nincs	részletes
Következmény kimenete	azonnali	kései
Katasztrófa lehetősége	reális	kizárható
Következmény befolyásolhatósága	csekély	jelentős
Halálos kimenet	lehetséges	kizárt
Tömeges következmény	lehetséges	nincs
Globális hatás	van	nincs
Jövőbeli kihatás	jelentős	kicsi
Kockázatvállalás	kényszerű	önkéntes
Személyes érintettség	van	nincs
Személyes ráhatás	csekély	jelentős
Személyes anyagi hozam	veszteség	nyereség
Média magatartása	ellenző	pártoló
Bizalom az üzemeltetőben	kevés	jelentős
Bizalom a hatóságban	kevés	jelentős
Korábbi személyes tapasztalat	kedvezőtlen	kedvező
Felelősség hozzárendelhető	emberekhez	természethez
Kockázat jellege	indokolatlan	méltányos
Közhangulat	negatív	pozitív

Az is morális dilemma: elvárhatja-e a társadalom, hogy emberek – esetleg egyenes tiltakozásuk ellenére – elviseljék mások által rájuk kényszerített veszélyeket, környezetszennyező vagy veszélyes létesítmények miatt? (A probléma ellentettje sem érdektelen, szabad-e védeni az embereket saját magukkal szemben, kitelepíthető-e valaki akarata ellenére egy veszélyes övezetből, betilthatók-e a veszélyes szórakozások, kötelezhető-e a biztonsági öv használata, ha az frusztrálólag hat stb.). Az ilyen típusú problémák feloldása mindig az, hogy az egyéni érdeket alá kell rendelni a közösség érdekének, a közösségtől pedig elvárható az egyéni érdekek optimális figyelembevétele.

A legtöbb kockázatvizsgálat az életvesztésre van exponálva, de vajon néhány elhalálozás elkerülésében van-e a társadalmi optimum és nem a sokkal több embert érintő más következmények visszaszorításában. Olyan dilemmákkal kell szembesülni, hogy egy emberélet elvesztése nagyobb kár-e, mint sok ember súlyos megbetegedése, vagy hogy egy technológia bevezetéséhez hány halálos áldozat „engedhető meg”. Nem akadémikus kérdés, hogy a jelen vagy a jövő kockázatainak van-e nagyobb súlya, hogy az egyén vagy a társadalom biztonsága fontosabb-e. Csernobilban a tűzoltók, az olvadt zónára sugárzáselnyelő anyagokat leszóró helikopterpilóta vagy a hűtővízbe beúszó bűvár a biztos halált vállalta, hogy megmentsen néhány ezer vagy tízezer embert a ké-

sőbbi rákos megbetegedéstől. Gyakran azt kell eldönteni, mekkora ráfordítást érdemel egy emberélet megmentése, vagy hány ember veszélyeztetése indokolja a társadalmi beavatkozást.

A technika mindig képes lesz egy adott műszaki megoldás veszélyességének csökkentésére, ha erre elegendő a társadalmi és gazdasági készlet és a felhasználók vállalják ennek többletköltségét. A költségek nem jelentéktelenek, pl. a füstgáz-kénmentesítés ára az erőművek beruházási és üzemeltetési költségeinek negyedét is eléri, a CO₂-lekötés árát tonnánként 15–25 USD-re becsülik.

1.2.1. Egészségkárosítás

Az energiaellátáshoz szükséges technológiák és berendezések legnagyobb része potenciális veszélyforrás (1.2. táblázat).

A veszélyes hatások fenyegethetik közvetlenül az emberek egészségét, testi épségét és életét, vagy érvényesülhetnek közvetve a természeti környezet, az anyagi javak és a társadalmi viszonyok károsításával befolyásolva az életkörülményeket. Az így kialakuló következmények fontosabb típusait tekinti át az 1.3. táblázat.

1.2. táblázat. Közvetlen hatású veszélyforrások

Veszélyes anyagok		
<i>Fizikai hatásúak</i>	<i>Kémiai hatásúak</i>	<i>Biológiai hatásúak</i>
Tüzelőanyagok Motorhajtó anyagok Robbanóképes anyagok Éghető anyagok Radioaktív anyagok	korrozív anyagok reakcióképes anyagok maró anyagok oldószerek aeroszolok	ingeranyagok mérgek rákkeltő anyagok mutagén ² anyagok teratogén ³ anyagok
Energiaforrások		
<i>Hőforrások</i>	<i>Mechanikai energiaforrások</i>	<i>Áramforrások</i>
Tüzelőberendezések Kazánok Kemencék Hőcserélők Forró közegek Nukleáris reaktorok	nyomástartó edények rugós berendezések szivattyúk, sűrítők, fűvők nagy nyomású közegek hidraulikus rendszerek forgó tömegek felfüggesztett testek leeső, kilökött testek	generátorok kémiai áramforrások töltött kondenzátorok statikus feltöltődés radioaktív sugárforrások

² Génkárosító.

³ Magzatkárosító.

Berendezések		
<i>Mechanikai hatások</i>	<i>Termikus és kémiai hatások</i>	<i>Villamos hatások</i>
Gépek és részek mozgása Anyagok és termékek mozgása Szerkezetek egyensúlyának megbomlása Síkos, éles, sorjás egyenetlen felületek, szélek, sarkok, éles, hegyes szerszámok Szintkülönbség Súlytalanság Erős áramlások Nagy vagy kis nyomás Gyors nyomásváltozás Levegő abnormális állapotjellemzői Rossz megvilágítás Rezgések (zaj, ultrahang, infrahang)	szélsőséges hőmérséklet gyors hőmérséklet-változás hőszugárzás tűz robbanás anyagok öregedése, kifáradása kémiai disszociáció	áramütés villamos ív, szikra zárlat véletlen bekapcsolás áramkimaradás melegedés elektromágneses sugárzás ionizáló sugárzás ibolyántúli sugárzás nagy térerősség

Az emberi egészséget károsító ártalmakat okozhatják akut traumatikus hatások, a szervezetbe került anyagok, a testszövetekben elnyelt energia és az idegrendszert érő ingerek. A technikai eredetű baleseteket közvetlenül érzékeljük, a betegségeknel és az idegrendszer túlterhelésénél az oksági kapcsolatok már nem mindig nyilvánvalóak. Az életkörülményeket befolyásoló természetkárosító folyamatok részleteiről ismereteink még bizonytalanok, a társadalmi következményekhez vezető szálak pedig gyakran rejtve vannak. Az egészségkárosító ártalmaknak sokféle kimenete lehetséges (1.4. táblázat).

Az egészségkárosító hatások következményeinek időbeli alakulása meglehetősen változatos. A balesetek egy részénél a következmény gyorsan bekövetkezik, időben majdnem egybeesik a hatással, más részénél viszont a kimenet a szervezet ellenálló képességétől és a gyógykezelés sikerétől függően jelentős késéssel alakul ki. A szervezetbe kerülő anyagok nem kívánatos kölcsönhatásai okozhatják a sejtek sérülését, módosulását, működésének változását vagy a sejt pusztulását is. A következmények az anyagcsere-folyamatok rendellenességében, az idegműködés és az érzékszervek funkciózavaraiban, szervek részleges vagy teljes működésképtelenségében nyilvánulhatnak meg, bekövetkezhet a szövetek elroncsolódása, vagy kóros burjánzása. A genetikai következmények az utódok fejlődési zavaraiban, illetve rendellenességeiben jelentkeznek.

1.3. táblázat. A következmények fontosabb típusai

Következmények típusa	Következmények jellege	Példák a lehetséges kimenetekre	Példák kiváltó hatásokra
Egészségi ártalom	szervezet károsodása	életvesztés, rokkantság, életidő csökkenés, tartós egészségromlás, személyiségzavar, utódok károsodása, regenerálódó betegség	baleset, munkahelyi ártalom, környezetszennyezés, stressz
Életkörülmények romlása	létfeltételek romlása tevékenység korlátozása	egészségi állapot romlása, ellenálló képesség csökkenése, rossz közérzet, csökkent munkaképesség, devianciák anyagi kár, életszínvonal csökkenés, munkanélküliség	egészségtelen táplálék és ivóvíz, rossz lakáskörülmények, kedvezőtlen munkakörülmények, leromlott infrastruktúra, hiányos higiénia, frusztráló környezet területhasználat, élelmiszerfogyasztás, ivóvíz használata korlátozása; tevékenységek tilalma, forgalomkorlátozás, munkalehetőség csökkenése átmeneti vagy tartós kitelepítés, elvándorlás
Természeti környezet károsodása	áttelepülés erőforrások túlterhelése meteorológiai változások	életforma módosulás, egyéni és társadalmi anyagi terhek erőforrások kimerítése, talaj termőerejének csökkenése, biomassa képződés visszaesése, tápláléklánc zavarai, tájrombolás, nyersanyagok drágulása időjárás, mikroklima, globális klíma módosulása, növényzet átalakulása, változások a hidroszférában, egészségi konzekvenciák, csökkent mezőgazdasági produkció	túlhajtott területfelhasználás és nyersanyag-kitermelés, légszennyezés, vízbázisok túlterhelése, talajkárosítás, hulladékellhelyezés, deforésztiáció, elsvatagosodás, karsztosodás légszennyezés, hőszennyezés, savas eső, ózonlyuk, áramlatok módosulása, inszoláció változása
	biológiai degradáció	állat- és növényfajok kipusztulása, genetikus degradáció, emberi létfeltételek romlása	környezetszennyezés, túlzott vegyszerhasználat, természetes egyensúlyok felbomlása, értékes fajok kipusztítása

Következmények típusa	Következmények jellege	Példák a lehetséges kimenetekre	Példák kiváltó hatásokra
	közvetlen anyagi károk	berendezések, létesítmények sérülése, tönkremenetele, ingatlanok értékvesztése, infrastruktúra leromlása, termékek minőségromlása, elmaradt haszon, kármentesítés, kártérítés, keresetkiesés, védekezés vagy gyógyítás költsége	tűz, robbanás, baleset, korrózió, erózió, anyagkiáradás, környezetszennyezés
Anyagi értékek eróziója	közvetett anyagi károk	forgalomcsökkenés, vállalatok elsorvadása, munkanélküliség, elszegényedés, nemzeti jövedelem kiesés, fizetésimérleg-hiány, eladósodás, exportképesség visszaesése	gazdasági tevékenység korlátozódása, gazdasági potenciál csökkenés, piac beszűkülése, beruházások visszaesése, munkalehetőség csökkenése, áttételek más vállalatokra, ágazatokra, településekre
	hibás döntések	ellátási zavar, gazdasági torzulás, nemzeti jövedelem kiesés, hiány a külkereskedelmi és fizetési mérlegben, elégedetlenség, politikai feszültség	rossz helyzetmegítélés, kényszerhelyzet, parciális érdekvényesítés, érdekképviselők pressziója
Társadalmi károk	rossz közhangulat	félelem, rossz közérzet, bizalmatlanság, politikai feszültség, konfrontációk	rossz döntések, veszélyhelyzet, feloldatlan konfliktusok
	közösségek degradációja	elidegenedés, romló munkakultúra, devianciák, pauperizáció, agresszivitás térhódítása, közösségek szétesése, elvándorlás	gazdasági leszakadás, környezet pusztulása, leépülés, vonzerővesztés

1.4. táblázat. Ártalmak lehetséges kimenete

Ártalom típusa	Károsodás jellege	Következmények	Példák a kiváltó okra
Elhalálozás	azonnali	gyors elhalálozás	traumatikus sérülés, égés, áramütés, mérgezés, sugárbaleset, fulladás
	későbbi	meghatározott időn belül	
		hosszú idővel a hatás után	rák, krónikus szervi betegség
Nem halálos baleseti sérülés	maradandó	csonkulás, mozgáskorlátozás, érzékszervek sérülése, feltűnő torzulás	traumatikus sérülés, áramütés, égés
	múló	átmeneti munkaképtelenség	gyógyuló sérülés
Egészség-károsodás	maradandó	rák, krónikus szervi betegség, mozgásszervi ártalom, csökkent érzékelőképesség, csökkent teljesítőképesség	foglalkozási ártalom, környezetszennyezés, rossz minőségű táplálék és ivóvíz
	múló	gyógyítható ártalom	regenerálódó betegség
Pszichés zavar	maradandó	elmezavar, személyiségváltozás, tudatzavar, frusztráció, agresszivitás, kooperativitás hiánya	trauma, szélsőséges és tartós ingerek (fény, zaj, bűz, rezgés), környezetszennyezés
	múló	szorongás, félelem, pánik, csökkent ítélő- és cselekvőképesség	stressz, sokkhatás
Utódok károsodása	tartós állapot	fejlődési rendellenesség, szervi elváltozások, értelmi fogyatékoság, csökkent képességek	magzatkárosodás (teratogén hatás), ivarsejtek károsodása (genetikus mutáció)

Az ártalom kis dózisoknál csak ingerek vagy átmeneti funkciózavarok formájában jelentkezik, nagyobb dózis betegséget okoz. A rák és néhány foglalkozási ártalom hosszú – esetleg több évtizedes – lappangási idő után mutatkozik. Vannak kumulált hatásokra kifejlődő következmények, ilyen számos betegség (pl. légzőszervi ártalmak), ez jellemzi a mérgek felhalmozódását is. Más esetben a következmény feltétele, hogy hosszú időn keresztül érvényesüljön a hatás (pl. az idegrendszer terhelése). A megbetegedés vezethet az életidő csökkenéséhez és szervek elkorcsosulása esetén rokkantsághoz is, bizonyos dózison felül pedig gyors halált is okozhat.

Az energetikai létesítmények építőit és üzemeltetőit a szokásos ipari balesetek és foglalkozási ártalmak veszélyeztetik. A baleseti statisztikák a megkívánt szakmai felkészültségnek és fegyelmezett munkavégzésnek köszönhetően jobbak is az átlagnál – eltekintve a felszín alatt dolgozó bányászoktól. A veszélyek ismeretében az üzemi dolgozók számára adott a célszerű védekezés lehetősége, viszont a kívülállókat kiszolgáltatott helyzetben vannak. Ezért a lakosság ártalmait a társadalom súlyosabban ítéli meg, a kívülállókat szigorúbb követelmények védik a károsodás ellen. Jogsabályok,

üzemviteli utasítások, a veszélyes berendezések rendszeres ellenőrzése szolgál a balesetek megelőzésére, de sajnos tökéletes biztonság nem létezik, szélsőséges természeti hatások, emberi hibák, anyagok és berendezések tönkremenetele, tűz, robbanás, veszélyes anyagok kiszabadulása stb. miatt bekövetkezhetnek balesetek. A legtöbb balesetet mechanikai erőhatások idézik elő: emberek vagy tárgyak esése, mozgó tárgyak ütése, fluidumok nagy sebességű áramlása, nagy nyomás vagy nyomáskülönbség, sérülés éles vagy hegyes eszközöktől. Sérülések előidézője lehet sokféle más fizikai és kémiai hatás is: magas hőmérséklet, égés, fagyás, mérgezés, sugárbaeset, vegyi behatások, nagyon erős fény vagy zaj stb., sőt még a stressz is előidézhethet balesetet.

Energetikai berendezések veszélyesek lehetnek a szélsőségesen nagy állapotjellemzők következtében, illetve ha a tárolt nagy energia hirtelen felszabadul, robbanást, tüzet, áramütést, eszközök tönkremenetelét okozva. Balesetek és foglalkozási ártalmak elsősorban az energiaipari vállalatok dolgozóit veszélyeztetik, de a gázrobbanások és áramütések legtöbb áldozata a lakosság laikus köréből kerül ki, az energiahordozók szállítási baleseteinek áldozatai is gyakran kívülállók. Sok balesetet okoznak a lakosság körében a fogyasztóberendezések. A mentőknek Magyarországon évente kereken ötszáz áramütésnél kell elsősegélyt nyújtaniuk, melyekből mintegy 80 halálos kimenetű, a balesetek 70–80%-a a lakásokban következik be. Évenként sok száz azoknak a tűz, láng, robbanás, fulladás okozta háztartási baleseteknek a száma, melyek a fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből származnak kályhákban és más tüzelőberendezésekben. Ezek jellege a füstgázmérgezésről az égési sérüléseken keresztül a gázrobbanások okozta balesetekig terjed.

Szerencsére ritkán, de előfordulnak sok áldozatot követelő katasztrófák, melyek a lakosságot is veszélyeztetik. Néhány lehetséges esemény valószínűségét és az áldozatok feltételezett számát mutatja modell számítások alapján az 1.5. táblázat.

1.5. táblázat. Katasztrófák valószínűsége

Katasztrófa jellege	Valószínűség/ év	Gyors haláleset	Kései elhalálozás
PWR ⁴ atomerőmű nagy balesete	10^{-5}	0	10–100
PWR atomerőmű katasztrófája	10^{-7} – 10^{-9}	10–500	10^3 – 10^4
Olajfinomító nagy balesete	10^{-5} – 10^{-6}	1500	
Olajfinomító katasztrófája	10^{-6} – 10^{-7}	18 000	
Kisikló szénzállító vonat ütközése személyvonattal	$3 \cdot 10^{-5}$	10–50	
Szénhidrogén-szállító vonat összeütközése alagútban	10^{-8}	600	
Vízterőmű gátszakadása	10^{-3} – 10^{-4}	10–2000	

⁴ Pressurized water reactor, nyomottvízes atomreaktor.

Az energetika legsúlyosabb katasztrófái atomerőművekben (Csernobil, Fukushima) következtek be, a kivülállók között a legtöbb akut baleseti áldozatot gátak átszakadása vagy a tározótó átbukása okozta vízerőműveknél. Egy-két esetben a távolsági földgázvezetékek robbanásai a lakosság köréből is szedtek áldozatot. Előfordulhatnak extrém fejlemények is, pl. Angliában egy szénbánya meddőhányójának megcsúszása idézett elő tömegszerencsétlenséget. Magyarországon az energetikai nagylétesítmények eddig nem okoztak akut baleseteket a lakosság körében, és ez a jövőben is valószínűtlen.

A katasztrófák megelőzését, illetve a bekövetkezett események következményeinek minimalizálását sokrétű műszaki megoldások, jogszabályok, nemzetközi megállapodások, és az érintett üzemekben rendszeres gyakorlatok szolgálják.

Az energetikában sok hulladék képződik, amik kikerülnek a környezetbe. Ezek legfontosabb válfajai az 1.6. táblázatban láthatók.

1.6. táblázat. Jelentősebb környezeti kibocsátások

Levegőbe	Vízbe	Talajra	Egyéb
CO ₂	szennyvíz	meddőhányók	zaj
CO	oldott sav, lúg, só	iszap, zagy	bűz
SO ₂	fémek	salak, pernye	sugárzások
NO _x	oldott szerves anyagok	szemét	láthatóság csökkentése
N ₂ O	szuszpendált részecskék	radioaktív hulladékok	látványt rongáló
CH ₄	radionuklidok	agresszív hulladékok	hatások
HCl	emulziók (olaj, zsír, szerves anyagok)	nehézfémek	
por, pernye, korom	hő	mérgek	
fémek radionuklidok	talajból, hulladékokból	törmelékek, bontási anyagok	
szerves vegyületek	kihordott, kilúgozott szennyezés*	levegőből és vízből kiülepedő szennyezés*	
hő			
szulfátok*			
H ₂ SO ₄ *			
nitrátok*			
HNO ₃ *			
NH ₄ Cl*			
O ₃ *			
szmog*			
porzás*			
savas eső*			

* Másodlagos szennyezők.

Az antropogén eredetű CO₂, CO, SO₂, NO_x légszennyezőknek több mint 90%-a, a szilárd szennyezés (korom, pernye, koks, nyomelemek és vegyületeik) és a NMVOC-emisszió⁵ több mint fele energetikai eredetű, a CH₄- és radionuklid-kibocsátásnak mintegy negyedéért az energetika felelős. A legtöbb kén-dioxid-, por- és NMVOC-kibocsátás a széntü-

⁵ Non-methane volatile organic compounds, illékony szerves vegyületek a metánon kívül.

zelésből származik, a legtöbb CO- és NO_x-szennyezés forrása a folyékony szénhidrogének eltüzelése, a gáztüzelésből sok NO_x származik. A szén-dioxid-kibocsátás majdnem egyenletesen oszlik meg a tüzelőanyagok három halmazállapota között. Az erőművek a legfőbb SO_x-kibocsátók, a közlekedés okozza a szén-monoxid-emisszió zömét és a NO_x-kibocsátás többségét, a por és a NMVOC-szennyezés legfontosabb forrása a lakások fűtése. A környezetszennyezéssel kapcsolatban megkülönböztetett figyelem irányul a gépkocsiforgalomra és az erőművekre. A gépkocsik kipufogógázából a talajszinten terülnek szét az emberek egészségét és a természetet közvetlenül veszélyeztető égéstermékek (CO, NO_x, NMVOC és aeroszolok), ami különösen sűrű forgalmú térségekben (nagyvárosok, autópályák) kritikus. A kibocsátást különféle beavatkozásokkal (pl. katalizátoros utóégető, az égés számítógépes szabályozása) sikerült mérsékelni. Az erőművek magas kéményekből koncentráltan bocsátanak ki nagy mennyiségű szennyező anyagokat, amik a magasban felhígulnak, de a légáramlatok nagy távolságra is elszállíthatják.

Hulladékokban előfordulnak mérgek, biokémiai reagensek, radioizotópok, Ezek továbbá, az embereket veszélyeztető, anyagokat hozhatnak létre kémiai reakciók révén, illetve katalizátorként. Nem kívánatos hatásuk megelőzésére a legjobb módszer célirányos hasznosításuk. Ez még az energetikai határfokot is javíthatja, pl. az éghető hulladékgázok eltüzelése, vagy a hulladékhő hasznosítása közegek melegítésére. Gazdasági hatékonyságot ígér a vegyszerek visszanyerése és újbóli felhasználása a technológián belül, esetleg az éghető anyagok kinyerése a meddőhányókból. A nemzetgazdaság más területén történő hasznosításra példa a széntüzelésből származó salak és pernye alkalmazása bányatömedékelésre, útépitésre, adalékanyagként cement, beton, habarcs, téglá és cserép gyártásához, vagy a füstgáz kénmentesítésénél keletkező gipsz felhasználása építőanyagként. Néhány országban a szilárd erőművi hulladékok nagy részét hasznosítják, de többnyire viszonylag szűk a felhasználás lehetséges mértéke, viszont a keletkező mennyiség nagy. Korlátozza a lehetőségeket, ha a maradványokban számottevő a veszélyes alkotók (pl. egyes hazai salakokban a radionuklidok és nehézfémek) aránya.

A hulladékok egy részét hígítva kibocsátják a légtérbe, illetve a környező vizekbe. A kibocsátásra megszabott korlátokat a hatóságok azzal a célkitűzéssel állapítják meg, hogy az emisszió emberközelségben ne változtassa meg számottevően a természetes állapotot. Ha ez nem teljesíthető, a hulladékot vissza kell tartani, és ha a biztonság megkívánja, a környezettől elszigetelve kell tárolni. A visszatartás oka lehet a keletkező hulladék nagy mennyisége (pl. meddőhányók) vagy veszélyessége (pl. radioaktívak).

A legtöbb szennyező anyagot a környező légtérbe bocsátják ki, elsősorban gázokat és aeroszolokat, továbbá folyadékok gőzeit. A legnagyobb légszennyező az energetika. A fosszilis tüzelőanyagok elégekor keletkező szén-dioxid mellett a tüzelőberendezések füstgázaiban kén-dioxid, nitrogén-oxidok és szilárd részecskék (korom, pernye, olajkocsz, nyomelemek, radioizotópok) kerülnek ki. Nehéz olajok füstgázában szállópor formájában V₂O₅ és Ni is található. A belső égésű motorok kipufogógázaiban szén-monoxid, nitrogén-oxid és policiklusos aromás szerves vegyületek (PAH) távoznak, a roszszul beállított dízelmotorok kipufogógáza sok kormot tartalmaz. A kibocsátott légnemű anyagok között vannak akut vagy krónikus betegségek előidézői (CO, SO₂, NO₂, H₂S, C_xH_y, aromás szénhidrogének), savas esőt okozók (SO₂, NO_x), üvegházgázok (CO₂,

CO, CH₄, N₂O), ózoncsökkentők (N₂O, freonok), katasztrófaútnál kikerülő mérgek és radioizotópok. Az aeroszolok többnyire egészségkárosítók, gyakran szerepet játszanak a levegőben különféle kölcsönhatásokban mint kondenzációs magok, reagensek, katalizátorok vagy szinergikus hatású komponensek.

A kémiai technológiák (kőolajfeldolgozás, koksizálás, nukleáris üzemanyagciklus stb.) összességében kevesebb anyagot bocsátanak ki, mint a tüzelőanyagok égése, de nagyon sokfélé, illékony frakciókat, szerves és szervetlen reakciótermékeket, lepárlási melléktermékeket, oldószereket, hulladékokat, elfáklázott vagy icinerátorból kilépő égéstermékeket. Nem jelentéktelen a tartályokból, szállítóeszközökből tárolás vagy szállítás során elpárolgó vagy kiszivárgó anyagok mennyisége sem. A kőolaj-finomítók bonyolult technológiai folyamatainak sokféle szennyező hulladéka van. A levegőbe sok SO_x, H₂S, NO_x, CO, CO₂, NH₃ és illó szénhidrogén kerül ki. Az éghető hulladékgázokat elfáklázzák, de ez önmagában csak a berobbanás ellen véd, nem gátolja meg káros, sőt mérgező anyagok kikerülését. Ezek kiszűrésére a környezetvédelmi előírások különféle eljárások kifejlesztését eredményezték, így a veszélyes emissziók fokozatosan visszaszorultak. A levegőbe kerülő kénhidrogén és merkaptánok kellemetlen szagukkal zavarják a környezetet.

A bányászkodás a porok (szén-, kő-, ércpor) mellett a földkéregből kiszabadított gázokkal (metán, szén-dioxid, szénhidrogének, radon) és a meddőből, zagyából kiülepedő ásványi sókkal járul hozzá a környezet terheléséhez.

A légtérbe kibocsátott anyagok sűrűségük szerint rendeződnek, a levegőnél könnyebb anyagok – pl. a hidrogén – a magasabb légrétegekbe emelkednek, a nehezebbek – mint a szén-dioxid, metán – inkább a talajszint felé rendeződnek. A diffúzió az emittált gázokat elkeveri a levegőben, majd azok a légáramokban tovább terjednek. A légáramlatok a levegőhöz hasonló sűrűségű anyagokat (kén-oxidok, finom por) rendkívül nagy – akár 1000 km-nyi – távolságra is elszállítják. A transzport során fizikai és kémiai átalakulások következhetnek be, kondenzáció, adszorpció, disszociáció, aggregáció, kiülepedés, kémiai és fotokémiai reakciók, a radioaktív anyagok bomlása és ennek nyomán a kémiai összetétel, valamint a sugárzási viszonyok változása. Tartózkodásukat a légtérben egyrészt az ülepedés szabja meg, amiben nemcsak a gravitáció hatása érvényesül, hanem a részecskéket a levegőből kimosó csapadéké is. Másrészt kémiai folyamatok vannak ki komponenseket (pl. az OH-gyökök oxidáló és felbontó hatásukkal mindenképp a CO- és CH₄-molekulákat). A tartózkodási időn múlik, hogy a szennyezők milyen távolságra terjednek, az NO_x hatósugara lokális, a SO₂, CO, O₃ terjedése regionális, a CO₂-é és CH₄-é globális. A szilárd vagy folyadék részecskék terjedését a méretük befolyásolja, a nagyobb szemcsék gyorsan kiülepednek, az 1 mm-nél kisebb szemcsékre alig hat a gravitáció, lebegve aeroszolt alkotnak, így a légáramokban nagy távolságra is eljuthatnak. A szilárd részecskék egyben kondenzációs magok, kémiai reakciók közvetítő közegei, esetenként katalizátorai is.

Szennyező anyagok a vizekben is nagy távolságra juthatnak el. A víz oldja a bekerült anyagok jelentős részét, oldatba kerülve sok anyag – főleg a sók, az erős savak és lúgok – disszociálnak. A szerves anyagok jó részét a mikroorganizmusok szervesen ásványi sókra bontják, ha ehhez az öntisztuláshoz a feltételek (hőmérséklet, kellő mennyiségű

oldott oxigén) teljesülnek. Néhány szerves anyag azonban nagyon lassan vagy egyáltalán nem bomlik le (pl. policiklusos aromás szénhidrogének); ha ezek koncentrációja nagyon megnő, az élet kipusztul a vízből. A kisméretű, nem oldódó, szilárd anyagok szuszpendálódnak, a nagyobb méretű darabok fajsúlyuktól függően a felszínen lebegnek, vagy idővel leülepednek a fenékre. A víz egyes folyadékokat old, más folyadékok fajsúlyuk szerint rétegződnek. Az élővizekre különösen veszélyesek a felszínen összefüggő hártát képező anyagok (ilyen a benzol, a fenol, az olaj), mert az oxigénfelvétel útját elzárva az élőlények anyagcseréjét akadályozzák. Különösen veszélyesek az olyan szerves anyagok, melyeket a vizek öntisztulását biztosító mikrobiológiai folyamatok nem tudnak lebontani.

A kőolajfinomítókból a szennyvízbe olaj, zsír, fenol, ammónia, kloridok, szuszpendált és oldott szilárd anyag, kisebb mennyiségben savak és lúgok, foszfátok, szulfidok, króm és más fémek nyomelemei kerülnek. Ma már magától értetődő követelmény ezek kivonása a szennyvízből és megfelelő deponálásuk.

Az oldás, a disszociáció és a hidratáció révén a vízben kedvező feltételek alakulnak ki a különféle anyagok kémiai és fizikai-kémiai kölcsönhatásaihoz. Az élővizekben ezeken túlmenően az élővilág is jelentős szerepet játszik: a vízbe került anyagok az anyagcserében, illetve mikrobiológiai folyamatokban vehetnek részt. A folyamatok visszahatnak az élőlények életfeltételeire, a vízben honos növény- és állatvilág át is alakulhat, sőt teljesen ki is pusztulhat.

A szennyezők anyagcsere útján az emberi szervezetbe is bejuthatnak, veszélyeztetve az egészséget. A szennyező anyagok 85%-a belégzéssel, 15% táplálkozással jut be, és csak nagyon kis hányada a bőrön keresztül. A szervezetbe került káros anyagok következménye a dózistól, és az érintett személyek szervezetének ellenálló képességétől függ. Az utóbbi sok paraméter – genetikus adottság, életkor, nem, egészségi állapot, táplálkozás, életmód, anyagi helyzet, életkörülmények stb. – függvénye, így az ártalmak kimenete személyfüggő. Ezért mérvadó információkat csak nagyszámú eset statisztikai feldolgozása szolgáltat.

A levegőben levő gáz- és gőzmolekulák akadálytalanul terjednek a légutakban, a szilárd vagy folyadék részecskék terjedését a méretük befolyásolja. Az alsó légutakba csak a néhány mm-nél kisebb részecskék jutnak el, a nagyobbakat a száj és orrüreg nyálkahártyái megkötik. A légszennyezők többsége, köztük a savas kémhatásúak, vagy a kisméretű aeroszolok, elsősorban a légzőszerveket támadja meg, kisebb koncentrációnál a kialakuló biokémiai és élettani hatások csak ingerkeltők (köhögést, váladékképződést, nehézlégzést okozva). Nagyobb koncentráció csökkenti az oxigénfelvételben és a biokémiai reakciókban szerepet játszó felületeket, tartós terhelés hatására a légutak részbeni elzáródásával járó betegségek – bronchitisz, asztma, tüdőtágulás – fejlődhetnek ki, egészen súlyos esetek szövetek degradációjára vagy a sejtek burjánzására vezethetnek. Vannak karcinogén légszennyezők, pl. a benzpirén vagy a PAH,⁶ mások prompt ártalmakat okoznak (pl. a sejteket roncsoló erősen oxidáns ózon), gyakran letális kimenettel, mint a szén-monoxid (gyakori halálos baleset oka a füstgáz, vagy kipufogógáz rossz elvezetése). Egyes

⁶ Polycyclic aromatic hydrocarbon, többgyűrűs aromás szénhidrogén.

anyagok – főleg a nehézfémek és a radioizotópok – az oxigénfelvételhez kapcsolódva a véráramban más szervekhez is eljutva okozhatnak károsodást. Az emésztőrendszerbe szennyezők legnagyobb részben az ivóvízzel jutnak. Szennyezés kerülhet a növényi táplálékba a levegőből kiülepedve, vagy a talajból felszívódva.

1.7. táblázat. A fontosabb légszennyezők hatása az emberi szervekre

Szerv	Ártalmat okozó anyagok
Légzőszervek	SO ₂ , NO ₂ , O ₃ , HCHO ⁷ , Pb, Cd, Cr, Mn, Ni, H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , por, azbeszt, korom, kipufogógáz
Szív és érrendszer	CO, PCH ⁸ , As, Pb, Sb, Ba, Co, szálképzők (szerves por, fémpor, azbeszt, kvarc)
Immunrendszer	Cd, Pb, Hg, Ni, Co, Cr, PCH, NO ₂ , O ₃
Vérképzés	Pb, Co, NO ₂ , As, benzol
Nyelőcső	fémek
Máj	As, Sb, Be, Cd, Pb, Cr, Co, Cu, Hg, Sn, Zn és oxidjaik, alifás, ciklusos és poliklórozott szénhidrogének
Vese	As, Cd, Cr, Pb, Ni, Hg, Bi, Tl, Va és oxidjaik, alifás és ciklusos szénhidrogének
Bőr	HCHO, halogének, fémek, PCH
Idegrendszer	Pb, Cd, Hg, Mn, Tl, Sn szerves vegyületei, CO, poliklórozott szerves vegyületek
Ivarszervek	Cd, egyes szerves vegyületek
Csontok, kötőszövet	Cd

1.8. táblázat. Nehézfémek hatása

Fém	Feldúsulás főbb helye	Fontosabb ártalmak
As	bőr, haj, körmök	agyvelőgyulladás, bőrrák, csökkent teherbírás, pigmentzavar, tüdőrák*, májrák*
Cd	máj, vese, csontok, herék	májműködés zavara, vesekiválasztás romlása, vérszegénység, tüdőgyulladás, prosztatatarák*, csontvelő-, enzimizavarok*
Hg	központi idegrendszer, magzat légzőszervek, bőr	idegrendszer sorvadása
Ni	tüdő	légzőszervi rák
Cr	csontok, vér, bőr, agy,	tüdőrák*
Pb	bélrendszer, mozgó idegek	vérbizonytalanságok
		idegműködés romlása, emésztőszervi ártalmak, vérszegénység, eszméletvesztés, halálos mérgezés, immunrendszer hibái*, hallásromlás*, gyermekek értelmi fejlődésének visszamaradása*
Th	bőr	bőr, nyálkahártyák, idegrendszer degradációja

* Valószínű, de nem egyértelműen bizonyított.

⁷ Formaldehid.

⁸ Poliklórozott szénhidrogének.

Elsősorban a kisméretű részecskékhez kapcsolódva kerülnek ki a környezetbe a nehézfémek (1.8. táblázat), melyek egy része rákkeltő (Cd, Cu, Pb, Zn, As), mások katalizátorként mozdítanak elő nemkívánatos reakciókat, pl. a kén-dioxidból kénessav képződését, vagy biológiailag reaktív kompaundokat alkotnak a szulfátokkal (As, Cr, Mn, V, Fe, Be). Ugyancsak a finom frakcióra kondenzálódhatnak rákkeltő szerves vegyületek is (pl. PAH). A nehézfémek molekulákba beépülve létfontosságú biokémiai folyamatokat (oxigénfelvétel, fotoszintézis, fehérjelebontás) zavarhatnak meg. A nehézfémek legfőbb szállítója az ivóvíz. Más fémek is szerephez juthatnak élettani folyamatokban, izomműködésben (Ca, Mg), ingervezetésben (Na, K, Ca), véralvadásban (Ca), érzékelési mechanizmusokban (Ca, Ba, Fe). Nagy koncentrációnál valószínű a szív és tüdő működésével összefüggő betegségek súlyosbodása, valamint zavarok kialakulása a vérképző szervek működésében és az anyagcserében.

Sokféle szénhidrogén is bekerülhet a levegőbe. A benzol a vérképző szerveket támadja meg és leukémiát is okozhat, a toluol a központi idegrendszerre hat, a xilol az emésztőszervekre. Az oldószerek, festékek és más szerves gőzök (alkoholok, észterek, halogénezett szénhidrogének stb.) főleg a belső szervekre és az idegrendszerre hatnak, a többgyűrűs policiklusos aromás szénhidrogének – például az égéstermékek közül a benzpirén, benzantracén, dibenzantracén, az aromás nitrovegyületek – rákkeltők. A táplálékból felszívódó anyagok az anyagcsere folyamatokkal a szervezetnek jóformán minden részébe eljuthatnak.

1.2.2. Környezetkárosítás

Természetesen a környezetszennyezés az élő és élettelen környezetet is veszélyezteti. Az ipari tevékenységek közül az energiaellátás jár a legnagyobb mértékű beavatkozással a természeti környezetbe. A legkorábban a széntüzelés kormozó füstjére figyeltek fel, ezért a 13–14. században több városban szigorúan tiltották a széntüzelést. Angliában I. Edvárd általános tilalmával szemben I. Erzsébet csak a parlament ülésének az időszakára tiltotta be azt. A technikai eredetű környezetszennyezés kezdetben csak lokális jellegű volt. Füst, por, korom, pernye, bűz, lárma, szemét gyötörték szinte sorscsapászerűen az ipartelepülések lakosságát. Az ipari fejlődésnek szinte velejárója volt a környéket beszennyező fekete füst, ami ellen időnként megmozdulások is jelentkeztek. A termelő tevékenység dimenziójának bővülésével arányosan nőtt a szennyezés mértéke és hatósugara, a hatás esetenként már regionális léptékűvé vált. A biológiai élet kipusztulása folyókban és tavakban, savas esők, a mikroklíma módosulása és hasonló katasztrofális jelenségek döbbsentették rá az 1970-es években az emberiséget a veszély mértékére. A hatások gyakran az országhatárokat is átlépték, egyes folyamatok már a Föld természetes egyensúlyi viszonyait megzavaró következményekre vezettek. Az „ózonlyuk” már kontinensnyi területeket érintett, az „üvegházhatás” pedig az egész Föld globális klímaviszonyait befolyásolhatja. A természet az eredeti egyensúly helyreállítására törekszik, de sajnos a terhelés sok vonatkozásban már meghaladja a természet regenerálódó képességét. Ez azon múlik, hogyan aránylik az antropogén kibocsátás mértéke a termé-

szetes eredetű emissziókhöz (1.9. táblázat). Az energetika környezetszennyezésében a legjelentősebb a légtér terhelése, egyes technológiák az élővizeket is károsítják és a hulladékok talajszennyezése sem jelentéktelen.

1.9. táblázat. Antropogén eredetű gázok szerepe a légkörben

Gáz	Fő kibocsátó	Kibocsátás* Mt/év	Arány** %	Legfontosabb hatás
CO ₂	energetika	25 000	7	üvegházhatás
CO	közlekedés	1 000	90	redukálás
CH ₄	rizstermesztés, állattartás	300	70	üvegházhatás
NO ₂	műtrágyázás	1	6	üvegházhatás
SO ₂	energetika	150	70	savanyítás
NO	közlekedés	60	70	redukálás, savképzés
NH ₃	állattartás	25	50	savanyítás
C _x H _y	közlekedés	90	10	oxidáns
CFC	hűtés, hajtógáz	1	100	ózonlyuk, üvegházhatás

* Antropogén kibocsátás.

** Az antropogén és légkörbe kibocsátott összes mennyiség viszonya.

Nem véletlenül születtek elsőként a poremisszióra és -immisszióra vonatkozó előírások a légminőség védelmében. A légszennyezés csökkentésére az EGB⁹ kezdeményezésére 1979-ben nemzetközi megállapodás született Genfben, amit később jegyzőkönyvekben konkretizáltak és szigorítottak az egyes kibocsátásfajtákra. Ezek többsége érzékenyen érintette az energetikát, a por-, kén-dioxid- és nitrogén-oxid-emisszió előírányzott csökkentése a villamosenergia-fejlesztésben követelt jelentős technológia-korszerűsítést és anyagi ráfordításokat. A szén-monoxid, ózon, nitrogén-oxid, policiklusos aromás szerves vegyületek, valamint más illó szerves anyag kibocsátásának visszaszorítása elsősorban a közúti közlekedésre hárul. Ebben mind az üzemanyaggyártóknak, mind a gépkocsi konstruktőröknek jelentős feladatai vannak, amit a szabványok fokozatos szigorítása is ösztönöz. A gépkocsik emissziójának csökkentésében sokat használt a katalizátoros utóégetők kötelező alkalmazása, az ólomszennyezést pedig szinte teljesen kiküszöbölte az ólommentes benzín forgalmazása. Az egyezményekben előírányzott csökkentés érvényesült a nemzeti szabványokban, ami a gépgyártó ipart környezetvédelmi berendezések kifejlesztésére, az üzemanyaggyártókat pedig technológiájuk korszerűsítésére készítette. A környezetvédelmi intézkedések hatására jelentősen csökkentek a kibocsátások az utolsó negyedszázadban.

A természet veszélyeztetettségére folyók (Rajna, Temze, Hudson) élővilágának kipusztulása volt az első riasztó jel. Az európai erdőpusztulást is részben a környezet-szennyezés számlájára írják, az Andrássy út fáit is az autók kipufogógáza sorvasztja. Az energetika jócskán beavatkozik a természeti környezet viszonyaiba. A természete-

⁹ Európai Gazdasági Bizottság (ENSZ-szervezet).

ti környezet emberi beavatkozás nélkül is folytonos átalakulásban van természetes eredetű hatásokra, ezért irreális követelmény az eredeti állapot megőrzése. Ezekre a változásokra szuperponálódnak az antropogén hatások, melyeket jelentős részben az energetika okoz. Egyrészt a természetből nyerjük a primer energiaforrásokat (bányászat, megújuló kinyerése), másrészt oda juttatjuk vissza a hulladékokat (emissziók a légtérbe, élővizetekbe, talajra, meddőhányók, zagyterek, hulladéktárolók). És nem szabad elfeledkezni a tájrombolásról, valamint a pusztuló elhagyott ipari létesítmények, valamint az elhasznált berendezések kidobált roncsainak lehangoló látványáról. Sorra születtek a nemzetközi megállapodások és a nemzeti előírások a kibocsátások és az imissziók megengedett mértékére. A vállalatok sokat áldoznak a környezetvédelemre, egy korszerű szénművek beruházásának harmada a környezet védelmét szolgálja. Ennek 40%-át teszi ki a füstgáz kénmentesítése, 30%-át a nitrogén-oxid kivonás, 7%-át a porleválasztás, 6%-át a zajvédelem, 5%-át a hulladékkezelés, 3%-ot a vízminőségvédelem, a fennmaradó részt pedig monitoringra és egyéb célokra fordítják. És ehhez hozzá fog jönni a szén-dioxid kivonás és tárolás költsége. Atomerőművek létesítési költségének közel a felét indokolja a környezetvédelem. A szigorú előírások hatására a kibocsátások radikálisan csökkentek.

A légszennyezők befolyásolják a légkör állapotát és az abban lejátszódó fizikai és kémiai folyamatokat, kihatnak a csapadékképződésre, alapvető szerepük van a savas eső és a szmogok kialakulásában. Az aeroszolidok csökkentik az inszolációt és a látótávolságot, kondenzációs magokat alkotnak előmozdítva a csapadékot és ködöt, szinergikusan erősítenek kémiai és fizikai-kémiai átalakulásokat. Egyes gáznemű égéstermékek elnyelik és szórják a beeső napsugárzást, mások ugyanezt teszik a felszínről kisugárzott infravörös sugárzással, fokozva az üvegházhatást. A fotooxidánsok (elsősorban NO_x és egyes szerves égéstermékek) az ózonképződés legfőbb okozói a troposzférában.

A növényvilág alakulását elsősorban a légkör és a talaj állapota, az állatvilág viszonyait főleg a víz és a táplálék minősége befolyásolja. A légköri szennyezés sokféleképp hat a növényekre: pl. a levelekre kiülepedő por a fotoszintézist akadályozva teszi tönkre a növényzetet, az égéstermékek egy része biológiai kölcsönhatásokba lép, az aeroszolidok és a savas eső a talaj, valamint a talajvíz savasodása révén befolyásolja a növényvilág alakulását, a toxikus hatású fémek (Al, Hg, Cd, Pb stb.) vízben oldott vegyületei vagy disszociált ionjai a gyökereken keresztül felszívódva és biológiailag aktív vegyületekbe beépülve fejtik ki hatásukat, a radionuklidok sugárzása ionizálja a sejtek atomjait stb. A természetes növényekben a legjelentősebb változásokat a talaj savasodása idézi elő, mindenekelőtt a SO_2 -emisszió hatására. A haszonnövények terméshozamát leginkább a levélzetre ható tartós légköri szennyezés csökkenti. Számottevő a nitrogén-oxidok és nitrátok szerepe is. A tápanyagot jelentő nitrogén felvételének képessége fajtanként eltérő, a több nitrogént feldolgozó növények nagyobb mértékben terjedhetnek el, kiszorítva más fajtaikat.

A növényvilág károsodásának egyik legszembetűnőbb válfaja az erdőpusztulás. A jelenségre az 1970-es években figyeltek fel. Az északi féltekén az utóbbi évtizedekben 20 nagy kiterjedésű erdőpusztulás fordult elő. A károsodás sokféle egyidejűleg érvényesülő hatás következménye, de az egyes hatások szerepének mértéke még vitatott. A folya-

matokban a légköri emissziók is érdemleges szerepet játszanak, a legnagyobb hatása bizonyos küszöbérték felett az ózonnak van.

Különösen érzékenyek a szennyeződésre az élővizek. Az energetika legdrasztikusabb beavatkozása a vízrendszerbe a vízerőművek építése. Ez nemcsak a vízjárást változtatja meg, hanem az élőlények életfeltételeit is. Ugyancsak súlyos kihatása van az élőlényekre az olajszennyezésnek a tengereken, szállítási vagy termelési balesetknél. A vizek kémiai szennyezésében a bányászat és a kémiai technológiák (szénkezelés és nemesítés, kőolaj-finomítás, nukleáris fűtőelemciklus stb.) játsszák a főszerepet. Mennyiség tekintetében a legjelentősebb a bányavizek szerepe (fémek, kloridok), a legtöbb ammóniával az uránércdúsítás és a kőolaj-finomítás szennyez, a bányák meddőhányóiból kimosott szennyezők (foszfátok, szulfátok, nitrátok) is számottevők.

A frissvíz-hűtésű hőerőművek fontos problémája a vizek hőszennyezése a visszavezetett felmelegedett hűtővízzel. A víztestek túlmelegedése okozta hőszennyezés kritikus, mert egyrészt az élőlények életfunkciói hőfokfüggők, és a túl magas hőmérséklet sok élőlény számára kedvezőtlen. Másrészt a vízben az oldott oxigén mennyisége a hőmérséklet növekedésével csökken, a túlmelegedés hatására oxigénhiány következhet be, ami kedvezőtlenül befolyásolja az élőlények anyagcseréjét és a víz öntisztulását, ezért részletes előírások korlátozzák a hő bevezetésének mértékét és módját.

A folyóvízbe koncentráltan bevezetett folyadék keveredését és terjedését az áramlás jellege és sebessége szabja meg, a diffúzió csak a forrástól távol vagy nagyon lassú áramlásnál jut jelentős szerephez. Állóvízben viszont a diffúzió a meghatározó folyamat, a beáramlás kezdő sebességének lecsengése után. A vízbe juttatott folyadékok lassan keverednek el a környező víztömegben, a híguláshoz hosszabb idő szükséges, mivel a diffúzió lassú folyamat. Az áramlási viszonyoktól függ, hogyan keveredik el a bevezetett melegvíz csóva a befogadó víztesttel, és milyen távolsáig érvényesül hőmérsékletemelkedés. A bebocsátott melegvíz csóva lassú elkeveredése miatt folyókban a visszahülés hosszú szakaszon következik be, ami korlátozza a vízkivétel lehetőségeit. A hőszennyezés szabja meg, hogy a teljes hazai Duna-szakasz mellé még 4–5 GW-nyi frissvíz-hűtésű erőmű-kapacitás, a Tisza mellé pedig ~1 GW telepíthető.

Ha a hőmérséklet-növekedésre megszabott határérték nem tartható be, a hőelvonást hűtőtoronnyal lehet megoldani. Valószínű, hogy egy paksi bővítés második blokkjánál erre lesz szükség. Ha a hűtőtorony vízigénye sem biztosítható, a feladat léghűtéssel valósítható meg (pl. a Heller–Forgó-féle légkondenzációs rendszerrel), ezt alkalmazzák a Mátrai Erőműben. Ma már magától értetődő, hogy a technológiai célra igénybe vett vizet a veszélyes és káros anyagoktól megtisztítva lehet csak visszavezetni a befogadóba.

A talaj szennyeződésének is sokféle útja van. Legnagyobb a savas eső hatósugara, gyakori előfordulása csökkenti a talaj pH-ját és módosítja a talajban zajló kémiai és mikrobiológiai folyamatokat. A levegőből a szilárd részecskék részben a gravitáció hatására, részben a csapadékkal ülepedhetnek ki a talajra. A csapadék nagy szerepét tükrözte, hogy a csernobili katasztrófa után bekövetkezett esők – hazánkban is – a radioizotópok nagy részét kimosták a levegőből, viszont megnövelték a talaj és a növényzet radioaktivitását.

A talajra a legnagyobb terhelést a különféle hulladékok lerakása jelenti (meddőhányók, zagyterek, hulladékártalók), a levegőből, illetve vizekből kiülepedő szennyezők

szerepe másodlagos. Legnagyobb mennyiségben az energiahordozók kitermelésénél és osztályozásánál keletkeznek deponálandó meddő frakciók. Egy nagyságrenddel kisebb a széntüzelésű erőművek égéstermékeinek és füstgáztisztításnál képződő termékeinek a mennyisége. A deponálásra kerülő anyag nemcsak szilárd lehet, hanem folyadék, iszap vagy zagy is. Különösen ártalmas hulladékok (nehézfémek, néhány egyéb fém és metalloid vegyületek, mérgező szerves anyagok és ásványok) veszélyességét gyakran kezeléssel csökkentik, pl. szűréssel, ülepitéssel, pihentetéssel, égetéssel, agresszív kémiai hatás közömbösítésével, biológiai bontással stb. A szállítást és tárolást szükség szerint szilárdítással, csomagolással, burkolással, takarással segítik elő.

A lokális porszennyezésben szerepe van a bányászkodásnak, főleg a külfejtésnek. A kőzetek megbontása, a porlékony anyagok mozgatása és szállítása, az előkészítő művekben a darabolás és aprítás sok por képződésével jár, amit a légmozgás magával ragad. Porzással jár a különféle nagy mennyiségű egyéb ömlesztett anyagok (mész, pernye, salak, gipsz) rakodása, szállítása, kezelése, tárolása, végső elhelyezése.

Zöldmezős beruházásoknál az élőhelyek felszámolása az eredeti növény- és állatvilág kiszorítását jelenti egy adott térségből. Óhatatlanul ilyen következménye van a nagy terület megbolygatásával járó vezetéképítésnek is. Ez nemcsak a létesítmény által elfoglalt területre terjed ki, hanem annak környezetére is, egyrészt a kapcsolódó közlekedési és egyéb infrastrukturális rendszerek révén, másrészt a környezeti feltételek módosulása (zaj, forgalom, szennyezés stb.) miatt.

A környezet változását a hulladékok elhelyezése is befolyásolja: a meddőhányók, zagyterek, ülepitő medencék és bányatavak által lefedett területeken a változások a biocönózisban belátható időn belül visszafordíthatatlanok. Az ezekről széthordott anyagok, kilúgozott savas alkotók és kioldott nyomelemek pedig nagyobb távolságban módosíthatják az életfeltételeket.

Anyagi értékeinket sokféle hatás veszélyeztetheti. Tönkremehetnek tűz vagy robbanás hatására, megbomolhat szerkezetek mechanikai egyensúlya, károsodhatnak mozgó tárgyak vagy kiáramló közegek ütközése következtében. Csökkentheti értéküket korrózió, erózió, kopás, ami teljes tönkremenetelüket is előidézhetheti. Anyagi kár az értékcsökkenés is, ami nemcsak ingatlanoknál és berendezéseknél következhet be, hanem terület, termőtalaj vagy élővíz használatának korlátozása miatt, pl. építési tilalom, szennyezett területek használatának hatósági korlátozása, termékek forgalmazásának tilalma. A tájrombolás közvetett kárt is okozhat, a térség vonzerejének csökkentésével.

A környezetszennyezés – elsősorban a légszennyezés – az épített környezetben is jelentős anyagi károkat okoz. Egyrészt a külső felületekre kiülepedő szilárd szennyezés, valamint az azokon képződő rétegek elszínezik a felületeket. Ez csökkentheti a használati értéket (pl. romlik az ablakok átláthatósága), rontja az esztétikai benyomást, az elhasználódás jele csökkenti a forgalmi értéket. A légszennyezés egyes alkotói (főleg a SO_x , O_3) erodálják és korrodálják az épületeket, műtárgyakat, szabadtéri berendezéseket és szerkezeteket. Nedvesség jelenléte gyorsítja a folyamatokat. Az így keletkezett anyagvesztést a karbantartás során pótolni vagy ellensúlyozni kell a szerkezetek használhatóságának megőrzése érdekében. Kezdetben csak a felületi védőréteg sérül, hosszabb idő után szerkezeti hibák is kialakulnak, és a romlás olyan mértékűvé válik,

hogyan a szerkezet ellenálló képességét elvesztve tönkremegy, esetleg katasztrófális körülmények között.

A környezetkárosítás egyik módja a tájrombolás. Egy zöldmezős beruházás, vagy egy távvezeték létesítése nemcsak a talaj fizikai vagy biológiai jellegének megváltoztatását jelenti, hanem a növény és állatvilág életfeltételeinek a tönkretételét is. A legnagyobb mértékű tájrombolást a külfejtések okozzák. A hatalmas kiterjedésű kifejtett térség riasztó látványú, súlyos seb a tájon.

A társadalmi megítélésben növekvő szerephez jut a terület esztétikai benyomásának alakítása. A nagyvarosi vízerőmű elleni társadalmi felzúdulás egyik mozgatórugója a Dunakanyar eredeti képének megőrzésére irányuló igény volt. A harmonikus képi benyomás befolyásolja az ott élők közérzetét, szerepe van a térség megtartó erejében, hozzájárul a terület vonzerejéhez mind lakónegyedek és vállalatok telepítésénél, mind a rekreációs lehetőségek megítélésénél.

A képi hatást különösen befolyásolják a terepszintről kiemelkedő létesítmények, magas szabadvezeteki oszlopsorok, szélerőművek, kémények. Egy időben az erőművek környezetvédelmét 150–200 m magas kéményekkel vélték megoldani. A magasban kilépő füst szétoszlik és felhígul, így a talajszinten nem érvényesülnek kedvezőtlen hatások. A savas esők alaposan megcáfolták ezt a megközelítést. A képi benyomást nemcsak létesítmények alakítják, hanem az erőművekből kilépő füst- és ködzászlók is.

Egy új létesítmény építése szükségszerűen megváltoztatja a terület jellegét, de a képi hatás kellő körültekintéssel lényegesen javítható. A zavaró hatású létesítmények növényzettel takarhatók, az erősen kiemelkedő kontúrok beilleszthetők a domborzatba, színezéssel tompíthatók az éles különbségek stb. A felszíni építményeknél ez az építészek tudatos tevékenységévé vált, amit a legsikeresebben az erőműveknél valósítanak meg. A legkönnyebb a geometriai testekbe foglalt építményekből álló atomerőművek beillesztése a tájba. A lignit- és szénerőműveknél ez nehezebb feladat, mivel a magas kémények, a nagy kiterjedésű széntér, a zagytér, a különféle anyagszállító rendszerek létesítményei (oszlopok, kötélpályák, csővezetékek, szállítószalagok) nagyon elütnek a környezettől. A szénhidrogén-erőművek képét is terhelik a magas kémények, a nagy tárolótartályok és csővezetékek takarása sem mindig sikeres. A lignit- és szénerőművek tájromboló hatásához hozzátartozik, hogy környezetükben a növényzetet, az építményeket és egyéb létesítményeket gyakran a széntérről, a zagytérről vagy a füstgázból származó por lepi be, ami kémiai és biológiai hatásán túl látványával is megkeseríti az emberek közérzetét.

A felhalmozott deponált anyagok, a száraz nyarakon a szél által messzire hordott porral belepert térségek, a technológia gépmonstrumai sem keltenek kellemes benyomást. A szállítórendszerek, vasszerkezetek, meddőhányók a mélybányák környezetére is rányomják bélyegüket. Különösen nyomasztó látvány a felhagyott bányák otffelejtt maradványa, lepusztult építmények, rendezetlen felszíni utak és tárolóterek, ócskavas-ként rozsdásodó vasszerkezetek, céltalan kötélpályák, hasznavehetetlen berendezések. A bányászati tevékenység maradandó nyomai a meddőhányók is. A jogszabályok a felszámolás során a terület rendezését is megkívánják, de erre ritkán van pénz, gyakran már megszűnt a vállalat, a tulajdonos és felelős azonosítása is nehézségekbe ütközik.

Kénmentesítés esetén a domborzatot elcsúfító kőfejtések is a szénbázisú energiatermelés számláját terhelik. A kőolaj-kitermelést a bólogató kútállványok jellemzik. Ha a leművelt rezervoárt nem hasznosítják pl. föld alatti gáztárolásra, a kutak és csővezetékek könnyen eltávolíthatók, és alkalmasak másutt történő hasznosításra. A kőolaj-finomítók magas tartályai, a csővezetékek kusza hálózata ipartelep benyomását keltik (ami éjszakai ki-világításban még színes látványnak is felfogható). Az uránbányának a szénbányákhoz hasonló tájromboló hatásai vannak.

A 20. század második felében felerősödött a törekvés a kedvezőtlen hatások vissza-szorítására. Nemzetközi ajánlások és kötelező erejű nemzeti előírások születtek. Első körben az élet szempontjából legfontosabb közegek tisztaságára koncentráltak, előírások születtek a légszennyezők emissziójára és imissziójára, valamint az ivóvíz tisztaságára. Később az élővizek és a talaj megóvása következtek. Viszonylag korán létrejöttek a radioaktivitással foglalkozó előírások, a koncentrációkra és a dózisokra, az atomerőművek megjelenése a nukleáris biztonságra vonatkozó szabályzatok kialakítására vezetett.

Kivételesen hatásos volt a nemzetközi összefogás az ózonlyukkal kapcsolatban. Az üvegházhatás visszaszorítása már nem volt ilyen sikeres, a Kiotói megállapodás ratifikálása évekig húzódott, mert jelentős kibocsátók – pl. USA – nem írták alá az egyezményt, félve, hogy a korlátozások rontják országuk versenyképességét, és növelik a munkanélküliséget. Az Európai Unió viszont vállalásával az életminőséget részesítette előnyben, de azt maradéktalanul nem sikerült teljesíteni, viszont gazdaságilag lemaradt versenytársaitól. A folytatásról éles viták zajlanak, az EU a szigorítások élharcosa, a zöldek még annál is többet követelnek, sok ország viszont az ambíciók fékezésére törekszik, amit az erős ipari lobbik is támogatnak. Kompromisszumként a korábbi megállapodás meghosszabbítását fogadták el, meghatározatlan időtartamra.

A káros hatások mérséklése, a környezet védelme pénzbe kerül. A viták jórészt a körül zajlanak, ki fedezze ezeket a költségeket. A fejlett országok egymás között is huzakodnak, ki mennyiben idézte elő a nem kívánatos fejleményeket, hogyan oszlik meg a felelősség a kialakult helyzetért. A fő frontvonal azonban a fejlett és a fejlődő (magyarul elmaradt) országok között húzódik. A fejlődők nem kívánnak osztozni a felelőségben, hiszen a kialakult helyzetet a fejlett világ hozta létre, és élvezte az abból származó előnyöket.

1.2.3. Gazdasági kölcsönhatások

Bonyolult kölcsönhatások érvényesülnek az energetika és a gazdaság között. Az energiaellátás számottevő szerepet játszik az ország makrogazdasági viszonyainak alakításában. Az energiaigények növekedése erősíti a konjunktúrát, visszaesése a recessziót. Tükrözi az energetika súlyát, hogy a fogyasztók Magyarországon évente több ezer milliárd forintot költöttek energiavásárlásra, ami nemzeti jövedelmünk 9–10%-át teszi ki, ebből a lakosság energiaszámlája sok százmilliárd. Az energiaköltségek természetesen kihatnak a gazdasági tevékenységek hatékonyságára és a lakosság életszínvonalára. Az energiavállalatok állóeszközeinek értéke a hazai nemzeti vagyon 6–7%-a. Magyar-

ország legnagyobb adófizetői energetikai vállalatok. Az állami adóbevételek jelentős hányada származik az energiahordozók forgalmából és az energiaipari vállalatok nyereségéből, aminek nem elhanyagolható hatása van a költségvetés alakulására, a legnagyobb tétel az üzemanyagok forgalmi adója. Megrendeléseik a konjunktúrát befolyásolja, az energiaiparok beruházásai az évenkénti ipari beruházások 10–15%-át teszik ki (ami nem tartalmazza a fogyasztókészülékek forgalmát). Európában átlagosan e beruházások kétharmadát a villamos energetikára fordítják, 15–20% az olajiparra, 7,5% a földgázrendszerre, 10% a szén szektorra jut. Egy-egy nagyberuházás (pl. erőműépítés) régiók gazdasági felemelkedését mozdítja elő, munkaalalmak teremtésével és az infrastruktúra fejlesztésével. Az energiahordozók behozatala az import 10%-a körül mozog, ami a külkereskedelmi és a fizetési mérlegünk fontos tétele. Az energiaárak emelkedése erősíti az inflációt. A közvetlenül foglalkoztatottak létszáma nem nagy (a munkavállalók ~2%-a), de a megrendeléseik révén közvetve nagyságrenddel több embernek adnak munkát.

A gazdaságra a legnagyobb hatása az energiaáraknak van, mivel azok minden termékben és szolgáltatásban megjelennek. A legtöbb energiahordozó ára a kőolajárhoz igazodik (szén és urán esetében a kapcsolat laza). A világpiaci olajár kiszámíthatatlanul alakul, politikai, gazdasági, társadalmi, stratégiai, ökológiai körülmények és spekuláció befolyásolják a változását. A kőolaj világpiaci árának hatása alól egyetlen nemzetgazdaság sem vonhatja ki magát. Jól példázta ezt az olaj ugrásszerű drágulása az 1970-es években, ami az egész világ gazdaságát megrázta, recessziót indított el, és a kormányokat rákényszerítette a gazdaságpolitika megváltoztatására (tulajdonképp ez ébresztett rá egy új jelenségre, a globalizációra).

Az energiaköltségek növekedése érzékenyen érinti a lakosságot, azt sokan szinte társadalmi igazságtalanságnak érzik. A magas energiaárak az alacsony jövedelmű háztartások egyensúlyát fel is boríthatják, egyesek képtelenné válnak a fűtés-, gáz-, villanyszámlák kifizetésére. Ezért az energiaárak nemritkán politikai kérdéssé válnak, kiváltva a kormány nem mindig szakszerű beavatkozását. A voluntarista beavatkozás az árakba rendszerint megbosszulja magát. Az eltérítés a reális értékviszonyoktól csak átmenetileg lehet hatásos, a piac idővel kikényszeríti a valós értékrend helyreállítását. Például amikor a földgáz drágulása szociális problémákat idézett elő, a politikai pártok felkarolták a lakosság terheinek csökkentését. A parlamenti választások kampányának egyik fontos témájává vált, ki tud olcsóbb gázt biztosítani a lakosságnak. Kormányra kerülve az árak lenyomásával, bonyolult támogatási rendszerekkel és keresztfinanszírozással igyekeztek a gázszámlákat mérsékelni, ami végül senkinek sem volt hasznos. Az ilyen kényszereket a gazdaság tartósan nem viseli el, és az energiapolitika is torzul. Az árak hamisan orientálják a fogyasztókat, a mesterségesen alacsonyan tartott ár az energiatakarékosság ellen hat, a keresztfinanszírozás következtében az ipar versenyképessége romlik. Az energiaszolgáltatóknál jelentős veszteség, vagyonszerzés, a részvények értékvesztése (beleértve az állami tulajdont is) volt a következmény, és beszűkült a fejlesztés és karbantartás lehetősége. A költségvetés terhe idővel elviselhetetlenné vált, a lakosság pedig hozzászokott az olcsó gázhoz, és nem tudott más fűtési módra váltani, amikor elkerülhetetlenné vált a magas piaci ár megfizetése.

Az energiaárak gyakran neuralgikus kérdései a magyar belpolitikának, ami körül ismétlődő politikai, gazdasági és érdekegyeztetési konfliktusok, médiaviták és szociális feszültségek keletkeztek. Az energiaiparok vállalatainak természetes igénye, hogy az árak ne csak a tevékenység folyó költségeit térítsék meg, a bevételek biztosítsák a befektetett tőke elég gyors megtérülését és fedezzék a fejlesztés terheit is. Magától értetődő törekvésük, hogy minél drágábban értékesítsék termékeiket, megfelelő nyereséget biztosítva a tulajdonosoknak. A társadalomnak viszont általános érdeke, hogy a minden emberi tevékenységet átszövő energiaellátás olcsó legyen, mivel az befolyásolja az ország gazdaságának versenyképességét, valamint a lakosság életszínvonalát. Az ellentét feloldását az állam feladatának tekintik, de azt egy szinte megoldhatatlan dilemma nehezíti. Áru vagy szolgáltatás-e az energia? Bizonyára áru, hiszen meg kell vásárolni. De kötelező szolgáltatás is, mert a rendelkezésre állását biztosítani kell, a nélkül egy civilizált társadalom működésképtelen. A kérdés nem akadémikus, más szabályok vonatkoznak egy piaci tevékenységre, és mások egy kötelező ellátásra. A kétféle jelleg összeötvözése ellentmondásoktól terhes, mégis meg kell oldani a működőképesség érdekében. Ez nem független a tulajdonviszonyoktól. A Horn-kormány az energiavállalatokat privatizálta, mert a költségvetésből nem tudta biztosítani a fejlesztésükhöz szükséges tőkét, és a tulajdonért kapott bevétel kiegyenlítette a költségvetés hiányát. Az Orbán-kormány a visszaállamosításra törekszik, mert a centralizált irányítással jobban tudja befolyásolni az energiapolitikát, és a vállalatok nyereségével csökkenthető a költségvetés hiánya. Az első esetben a jogszabályoknak a piaci viszonyokat kell rendezni, a másodikban a centralizált irányítási rendszert. Az államosítás sikere kérdéses, a működtetéshez és beruházásokhoz szükséges tőke híján. Bonyolítja a viszonyokat az Európai Unió törekvése a piaci viszonyok erősítésére, mert a versenytől remélnék olcsóbb energiát a gazdasági fellendülés támogatásához, és a világgazdaság élmezőnyének megközelítéséhez. Az Orbán-kormány stratégiai célkitűzése a lakosság rezsijének csökkentése, ezen belül az energiaárak mérséklése. Az energiaárak voluntarista csökkentése az energiaellátás tényleges költségeinek ellentételezése nélkül összekuszálja nemcsak a költséggazdálkodást, hanem a tényleges tevékenységeket is.

Az energetika vállalatainak működéséhez likvid pénzeszközökre és hitelre van szükség. Recesszió idején visszaesik az energiaszükséglet, működési zavarok lépnek fel, a beruházásokat elhalasztják, csökkentik a vállalati létszámokat, a műszaki fejlesztési elképzeléseket befagyasztják. A zavartalan energiaellátásnak feltétele a gazdasági viszonyok stabilitása, különösen fontos a fejlesztés biztosítása. Ha a fellendülés időszakára nem áll rendelkezésre elegendő kapacitás, az energiahiany korlátozhatja a gazdasági fejlődés lehetőségeit.

Az energetika a gazdaság egyik legnagyobb megrendelője, sok iparvállalat léte és fejlődésének lehetősége függ ettől. Az energiaellátáshoz szükséges termékek (gépek, készülékek, vezetékek, műszerek és más eszközök) előállítására üzemek sokaságában történik. Ezen vállalatok többsége a technikai fejlődés élvonalába tartozik, egyesek a világ legnagyobb iparvállalatai (pl. General Electric, Siemens, ABB, Westinghouse, Toshiba). A létesítmények létrehozásához erős építő- és szerelőiparra is szükség van. Az energetikai létesítmények megvalósításához a kapcsolatok nem korlátozódnak a re-

álfolyamatokra, bankműveletek, biztosítási ügyletek, kereskedelem, jogi tevékenység, és sok más szolgáltatás a piaci szereplők széles körét érinti.

Az energetikai gépgyártást mint húzóágazatot a legfejlettebb országokban is ösztönzik. A szektor színvonala országos jelentőséggel bír, fejlődése az iparpolitika lényeges eleme, mivel termékei a műszaki élvonalba tartoznak, azok előállításuk sok más vállalat tevékenységét és műszaki színvonalát is befolyásolja. A magyar iparpolitika magatartása az energetikai gépgyártással kapcsolatban meglehetősen változékony volt a múltban. Időnként központi fejlesztési programokkal és nagy állami beruházásokkal alátámasztott protekcionizmus érvényesült, más időszakokban teljesen nyitott versenynek tették ki a hazai vállalatokat. A magyar gépipar termelési spektruma korábban is csak az igények egy részének kielégítésére volt alkalmas. Ugyanakkor az energetikai gépgyártó vállalatok többségének hazai lehetőségeit behatárolja, hogy a magyar piac kicsi és a rendelések időben egyenetlenül jelentkeznek, ezért gazdaságos tevékenység csak számottevő export mellett alakulhat ki.

Az energetikai és a gazdasági hatékonyság növeléséhez egyre korszerűbb gyártmányok szükségesek, melyek háttérbe szorítják a korábbi konstrukciókat, nem egyszer módosítva az energiaellátás technológiáját is. Az energetika számos berendezése csúcstechnológiát képvisel, egy-egy új találmánynak az energetikán kívül is nagy hatása van. De ki látta előre a gőzgép szerepét az ipari forradalom létrejöttében, vagy a belső égésű motorokét a mobilitás kialakulásában, az életvitel és a hadviselés átalakításában? A fejlődés átlépi a szakmai határokat, az atomerőmű a hadiipar szülötte, a korszerű gázturbina a repüléstechnikának köszönheti a létét, a jó hatásfokú napelem az űrhajózás terméke. Az igények kielégítése érdekében a hazai gyártó vállalatok az embargó időszakában is törekedtek szakmai kapcsolataik megőrzésére a fejlett nyugati vállalatokkal. Versenyképességük kulcskérdése volt élenjáró licencek biztosítása és korszerű technológiák megszerzése. Energetikai nagyvállalataink ösztönözték ezek adaptálását, emellett célratörő politikával anyagi és szellemi támogatást is nyújtottak a korszerű hazai konstrukciók és technológiák kifejlesztéséhez, valamint lehetőséget teremtettek az új megoldások kipróbálásához is. Erre a háttérre alapozva energetikai gépgyártásunk számos terméke nem sokkal maradt el a világszínvonalától, sőt születtek nemzetközi viszonylatban élenjáró magyar gyártmányok is, pl. turbógenerátorok, 400 és 750 kV-os transzformátorok, 400 kV-os gáztöltésű tokozott kapcsoló-berendezések, villamos hálózatvédelmek, tüzelőberendezések. Érdemes külön kiemelni az atomerőmű-építés minőségi követelményeinek húzó hatását, ami számos élenjáró technológia meghonosítását eredményezte még az építőipar és a vegyipar területén is, nem beszélve a gépipari kihatásokról (rozsdamentes edényzet és armatúra, vízkezelés, irányítástechnika, robottechnika stb.).

Az energetika szigorú minőségi követelményeivel jelentős hajtóerőt gyakorol a műszaki fejlesztésre. A recesszió a műszaki fejlesztésben is megtorpanást okozott. Anyagi erőforrások híján a szellemi műhelyek leépültek mind a gyárakban, mind az ipari kutató intézményekben. Ez a folyamat irreverzibilisnek tűnik, a privatizáció következtében a műszaki színvonalat a külföldi vállalatok szabják meg, hazai fejlesztésre egy új fellendülés időszakában is kevés igény lesz, a magyarországi leányvállalatok csekély önállóságra számíthatnak. Ennek kedvező ellentétele viszont a korszerű technológiák és

konstrukciók beáramlása az országba. A külföldi megoldások honosításában, a részegységek beszállításában, a speciális hazai feladatok teljesítésében remélhetőleg azért marad tér a magyar vállalatok számára is. A külföldi tulajdonlás megszüntette a preferenciák indokoltságát, a piaci módszerek pedig a lehetőségét. Az energiaipar feladta korábbi patronáló szerepét, erőforrásait közvetlenül saját érdekeinek érvényesítésére hasznosítja, és miután a piaci korlátok leomlottak, beszerzéseinél a piaci versenyre támaszkodik. A hazai gyártóiparnak csak némi előnyt biztosít a vámentesség, az azonos nyelv, a gyors és egyszerű kapcsolattartás, a könnyű elérhetőség berendezések javításához, vagy karbantartásához.

Korábban az energetikai gépgyártás területén számos magyar vállalat erősödött meg a hazai lehetőségek révén (pl. Ganz, Láng, Röck, VBKM, Kábelgyár). Ezek a magyar ipar vezető tényezőivé váltak, tekintélyüket jelentős exporttevékenységgel is alátámasztották, gyakran erős nemzetközi konkurenciával versenyezve. Húzó hatásuk számos kisebb beszállító vállalatra is kiterjedt. E nagy tradícióval rendelkező gyárak a rendszerváltást követő privatizációban elvéreztek, helyüket a nagy multinacionális cégek vették át. Nem véletlen, hogy a privatizáció kezdetén a külföldi tőke figyelme elsősorban e vállalatok felé irányult, és legtöbbjük élenjáró multinacionális vállalatok részévé vált. Ekkorra azonban lehetőségeik már erősen lecsökkentek: a recesszió, a piac beszűkülése, a pénzügyi nehézségek, a hatékonyságnövelés kényszere és a szervezeti átalakulások következtében a vállalatok összezsugorodtak, gazdasági erejük megrendült, jelentős kapacitások épültek le, és értékes szakemberek távoztak el. E vállalatok egy része csupán a külföldi anyavállalat lerakatává vált, ami a hazai fejlesztés és az önálló konstrukciók megszűnését jelentette. A külföldi tulajdonlás ellenére a makrogazdaság szintjén viszont előny, hogy e vállalatok a magyar nemzeti jövedelmet gyarapítják, a magyar exportképességet és külkereskedelmi mérleget javítják.

Nem lebecsülendő az a katalizáló hatás, amit az energetika új fejleményei más tudományokra és iparágakra gyakorolnak. Számos új tudományos diszciplína első hazai alkalmazására is az energetika területén került sor, említhető a törésmechanika, a véges elemek alkalmazása a szilárdsági számításokban, a bonyolult rendszerek modellezése, a számítógépes tervezés és folyamatirányítás, vagy a robotokkal végzett karbantartás. A nukleáris problémák nagy lendületet adtak a matematikai modellezés, az anyagtudomány, az áramlástechnika, a kockázatszámítás, a minőségbiztosítás fejlődésének, a Paksi Atomerőmű földrengésviszonyainak tisztázása, valamint a telephelykeresés a radioaktív hulladékok elhelyezésére a földtudományok képviselőinek nyitott páratlan kutatási lehetőségeket. De nem egyszer szembesültek a szociológia, a jogtudomány, a közgazdaság hazai szakemberei is az energetika megoldandó újszerű problémáival. Gyakori a kisugárzás más iparokra is, az atomenergetikai ismeretek talaján bontakozódott ki a nukleáris medicina, a radioizotópok sokrétű alkalmazása, a besugárzásos élelmiszer-ipari és műanyagipari technológiák stb. A gyenge minőségű hazai szenek égése terén szerzett, és más szakmákban is hasznosuló ismeretek világszerte tekintélyt szereztek a magyar kutatóknak. Az energetika műszaki követelményeinek kielégítésére kifejlesztett igényes anyagok és technológiák sok vállalatot alkalmassá tettek más jellegű megrendelések kielégítésére, ami gyakran játszott szerepet a vállalat fennmaradásában a piacgazdaság körülményei között.

1.2.4. Politikai kölcsönhatások

Az energiaellátást az államok stratégiai kérdésnek tekintik. Az energiavállalatok tevékenységét és lehetőségeit az állami politika sok csatornán keresztül tudja befolyásolni. A gazdasági terelésre az eszköztár sokrétű, adók, vámok, illetékek, bírságok megállapítása, preferenciák és diszpreferenciák alkalmazása, kedvezményes hitelek nyújtása, engedélyezési rendszer bevezetése, árszabályozás stb. Sok vitával jár az energiapolitikai célok közvetlen ösztönzése (pl. a megújuló energia hasznosítása, az energiatakarékosság előmozdítása, a kapcsolt energiatermelés támogatása), mivel erősen érint érdekeket. Rendelkezésre állnak adminisztratív eszközök (jogszabályok, engedélyek, tilalmak) és nem utolsósorban informális kapcsolatok is a különféle testületekben (társadalmi szervezetek, szakmai egyesületek, vállalatok igazgatóságai). Mindezek ellenére nem könnyű érvényt szerezni az állami szándékoknak, mert az energetika vállalatai többnyire nagy tőkével és hatalmas gazdasági erővel rendelkező társaságok. A nagy anyagi erő nagy gazdasági és politikai befolyással, valamint érdekérvényesítő képességgel párosul. Lobbijukkal gyakran közömbösíteni tudják a számukra kedvezőtlen kormányzati szándékokat. A *Forbes* magazin évente közli a világ legnagyobb vállalatainak rangsorát, ennek az élbolyában mindig energiavállalatok (Exxon, Shell, BP, Chevron stb.) és energetikai gépgyártók (pl. General Electric) találhatók. Az ilyen korporációk éves forgalma sokszorosát teszi ki egy közép-európai ország nemzeti jövedelmének. A magyar viszonyok részben hasonlóak, az energiaipar vállalatai (MOL, MVM, EON, RWE, EdF, GdF-Suez stb.) vezető szerepet játszanak, de az energetikai gépgyártók (Ganz, Láng, Röck, VBKM) – melyek korábban az ipar húzóerejét képviselték – a rendszerváltás-kor elvéreztek, szerepüket nagy multinacionális cégek (pl. Siemens, ABB) vették át. Az energetikai vállalatok gazdasági erejük, kiszámítható üzletpolitikájuk és szakmai kompetenciájuk révén a saját vonzásterületükön többnyire vezető szerepet játszanak. A kisebbek a saját régiójukban, a nagyok országos jelleggel, a multinacionális társaságok nemzetközi viszonylatban is érvényesülnek.

Az energiaszolgáltatás sok kérdését jogilag is szabályozni kell. A törvényektől a kormány- és miniszteri rendeleteken keresztül a hatósági állásfoglalásokig terjedő jogszabályok az energetika töméntelen sok kérdésével foglalkoznak. A jogszabályokat karban kell tartani, illeszkedve a műszaki, társadalmi és gazdasági körülmények változásaihoz. Különösen bonyolult feladat illeszkedésünk az Európai Unió szövevényes jogrendjéhez, ami nem csupán jogszabályalkotást követel meg, hanem a követelményeknek meg nem felelő eljárások és berendezések módosítását is. Nemcsak eligazodni nehéz e jogszabály rengetegben, hanem azok összehangolása sem mindig sikeres. Ez sok kibúvóra ad lehetőséget, elvégre minél sűrűbb egy háló, annál több benne a lyuk.

A jogszabályok foglalkoznak a vállalatok jogaival és kötelelességeivel, a szolgáltatások minőségi követelményeivel és a fogyasztóvédelemmel. Mivel az energetikában alkalmazott technológiák potenciálisan veszélyesek, az emberek életének, testi épségének, egészségének, életkörülményeinek, környezetének és anyagi javainak védelme is megköveteli a jogi szabályozást. A veszélyeket a legkörültekintőbb magatartással sem lehet tökéletesen kiküszöbölni, csökkentésük lehetséges mértéke a védekezés technikai

lehetőségétől és a társadalom gazdasági teherbíró képességétől függ. Így a társadalom biztonsága tulajdonképp egy a műszaki és gazdasági körülményektől függő társadalmi megállapodás függvénye, e kompromisszumra támaszkodnak a jogszabályok és előírások is.

Sok példa említhető, amikor nem eléggé átgondolt törvények, kormányzati vagy vállalati lépések váratlan hatásokkal jártak. Megzavarták az ellátás folyamatosságát, ösztönözték vagy gátolták a beruházási szándékokat, előmozdították vagy fékeztek a fejlesztést, a karbantartást, növelték az árakat, kiváltottak társadalmi elégedetlenséget, okot adtak a tiltakozás különféle formáira, médiavitákra, interpellációkra. Kemény hazai és nemzetközi vitákat váltott ki az Orbán-kormány politikája az energetikai vállalatok jövedelmének korlátozására, egyrészt bevételeik visszafogásával (adókkal és árszabályozással), másrészt reprivatizálással. Ezt azzal indokolják, hogy az energetikai vállalatok nagy profithoz jutottak, és annak nagy része külföldre került, ugyanakkor a magyar energiaárak lényegesen alacsonyabbak az EU-átlagnál. Az ellentmondást a lakosság alacsony jövedelmi szintje és az ország gyenge nemzeti jövedelemtermelő képessége okozza, viszont a rezsicsökkentés növeli a kormány népszerűségét.

A pártoknak anyagi és szellemi támogatásra is szükségük van. Ellentételként kénytelenek a támogatók érdekeinek a képviselőit is felvállalni. Az erőviszonyoktól függően a nagyipar, a pénzügyi körök, a zöldek, társadalmi rétegek szervezetei (pl. a szénbányászok szakszervezete, a kisgazdákat tömörítő koalíciós partner), területi régiók, ideológiai intézmények stb. juthatnak érdekérvényesítéshez a hatalmon levő párt(ok) útján. Nehéz elhatárolni, hogy az aktuális döntésekben hol ér véget a valós társadalmi érdek képviselője és hol kezdődik a politikai taktika.

A gazdaság szereplői érdekeik érvényesítéséhez keresik a hatalom támogatását, az együttműködés lehetőségeit. Elsősorban a nagyvállalatoknak és a pénzintézeteknek kifinomult technikája van a politikusok és a döntéshozók megnyerésére – befolyásolásra módot adó kapcsolatok és barátságok teremtése, hasznos információk szolgáltatása, a személyes karrier elősegítése, szívességek és anyagi juttatások példái a sokszínű eszköztáraknak. A nagy korporációk – különösen külföldi piacszerzésnél – az állami szervek támogatására is számíthatnak, állami garanciák, kormányhitelek, a gazdasági diplomácia, a külképviseletek imázssteremtése révén, jelentős ügyekben gyakran az ország legmagasabb rangú vezetői is szerepet vállalnak a piacteremtésben. A fejlett országok nyújtotta segélyek és adományok mögött ritkán hiányoznak az üzleti érdekek, de még az emberbaráti szándékú juttatások realizálása is bizton üzletté válik. E kölcsönös függés könnyen válik a korrupció melegágyává.

Tanulságos, hogyan változott a technika értékéről vallott felfogás a 20. században. Az első évtizedeket a szinte beláthatatlan lehetőségekkel az emberiség problémáinak megoldását ígérő eufória jellemezte. A II. világháború időszakában az önmagát elpusztító emberiség víziója váltott ki általános irtózatot és félelmet a technikától. A háború után a szinte lehetetlen feladatok megoldására is képes technika a jólét és fellendülés zálogának tűnt. Az utolsó évtizedek a megszeppenés kora: nem tesszük-e tönkre életfeltételeinket. És változott a természet értéke is: a természet kínálta lehetőségek maximális kiaknázására való törekvést mind több országban váltja fel a természet védelme. Aligha

születhetett volna nemzetközi megállapodás 100 évvel ezelőtt az Antarktisz eredeti állapotának megőrzésére vagy állatfajok kihalásának megakadályozására. Az értékrend módosulását ösztönző fejlődés mellett vannak stabilizáló hatások is, mindenekelőtt a hagyományok és a hajlam mások példájának követésére.

Az energiaellátást nemcsak az országon belüli hatások befolyásolják. A világpolitika és a világgazdaság nagy horderejű fejleményei gyakran jártak lényeges energetikai következményekkel is. A hidegháború a saját energiaforrásokra támaszkodó önellátást ösztönözte. Az ezt követő enyhülési időszak kedvező feltételeket teremtett az energia-hordozók külkereskedelmének, ami együtt járt a műszaki fejlődéssel és az árszínvonal csökkenésével. A közel-keleti háborúskodások megingatták a régió stabilitásába vetett bizalmat, és a beszerzési források diverzifikálására ösztönöztek. A Szovjetunió összeomlása kiszámíthatatlanná tette az egyik legnagyobb energiaexportőr magatartását. A KGST szétesésével megszűnt az abban részt vevő kis országok – köztük Magyarország – energiaellátását hosszú távra biztosító konstrukció. A piaci viszonyok erősítése érdekében világszerte megindult privatizációs és deregulációs hullám hazánkban is átszabta a vezetékes energiaellátási rendszerek struktúráját és működési módját, az ellátási felelősséggel terhelt szolgáltatásból kereskedelmi tevékenység vált. A hazai rendszerváltás alapvetően átalakította az energetika politikai, társadalmi, jogi és gazdasági feltételrendszerét, az energiaiparok szerkezetét és tulajdonformáját.

Az energiahelyzet vissza is hat a politika alakulására. Az energiaforrások birtoklása jó néhány háború indítékai között szerepelt. Az olajárak eszkalációja az 1970-es években nemcsak az energiapolitika, hanem a világpolitika alapvető módosulását is eredményezte. A csernobili atomerőmű katasztrófájának lélektani és politikai hatása még ma is érvényesül, nem beszélve az atomenergetika diszkreditálásáról.

Nem jelentéktelenek a társadalmi intézményrendszerrel kialakuló kölcsönhatások sem. Az energiaszektor sok embert foglalkoztat, szerepe van a régiók fejlesztésében, a nagylétesítményeket környező települések anyagi és szellemi fejlődésének előmozdításában és a közösségi szükségletek támogatásában. Az energiaellátáson túlmenően más társadalmi követelményeket is ki kell elégíteni, pl. ellátásbiztonság, környezetvédelem, élet- és vagyónbiztonság. Jelentős érdekek ütközése sem ritka az energiaellátás kérdéseiben, amiben érintve lehetnek politikai, közigazgatási, gazdasági, regionális, szakmai, érdekvédelmi stb. szervezetek és intézmények. Energetikai létesítmények időnként társadalmi nyugtalanságot váltanak ki, a viták néha politikai és társadalmi konfliktusokra vezetnek. A feszültségek enyhítését célozza a társadalom érintett részének részvételi lehetősége a döntésekben, amire egyre gyakrabban kerül sor.

1.3. Kinek higgyünk?

Az energiaellátás ügyeihez mindenki ért. Ha máshogy nem, ahogy drágálljuk a benzin árát, vagy soknak tartjuk a fűtés számláját. Jóformán mindenkinek van véleménye a környezeti hatásokról, és sokan bírálják az energiaszolgáltató vállalatokat. Gyakran hallani magabiztos véleményeket, mit kellene tenni az államnak, de a hatalmat gyakorló

politikusoknak ritkán van kellő áttekintésük az energetika szövevényes összefüggéseiről. A voluntarista beavatkozások megbosszulják magukat: szabályozzák az árakat – megtorpan a fejlődés és romlik az ellátás minősége; magatartási normákat írnak elő – drágul a szolgáltatás és bürokratikusá válik az ügyintézés; állami kezelésbe vesznek tevékenységeket – romlik a hatékonyság és drágul a működés. De a szabadjára engedett piacon a vállalati érdekek érvényesítése figyelmen kívül hagyja az emberek szükségleteit és kiszolgáltatottságát. Valami nagyon érzékeny szabályozásra van szükség, ami össze tudja hangolni a szükségleteket és az érdekeket. Van igény az állami szabályozásra, de félelem is van annak a túlburjánzásától. A szabályozás elkerülhetetlen, egyrészt a fogyasztók túlnyomó többsége nem tudja megítélni, hogy megfelelő minőségű ellátásban részesül-e, másrészt védelmet kell biztosítani az energiaellátással együtt járó veszélyekkel szemben.

Nem egyszerű eligazodni a sok kölcsönhatás között, mérlegelni azok befolyását és jövőbeli kihatását. Nem meglepő, hogy még a szakemberek között is éles véleménykülönbségek alakulnak ki az energetika sok kérdésében. Ez tapasztalható az egyes energia-hordozók szerepének és jövőjének megítélésében, a műszaki és gazdasági körülmények jövőbeli alakulásának becslésében, az új technológiák alkalmazhatóságáról alkotott véleményekben és sok más kérdésben. Nehezíti az eligazodást, hogy a vállalatok a piaci versenyben igyekeznek saját elképzeléseiket a másokénál kedvezőbb színben feltüntetni és a lehetőségek sokasága között nem könnyű a tájékozódás. A vitákat tovább bonyolítják a gazdasági, politikai, társadalmi, regionális stb. érdekkellentétek megnyilvánulásai.

Az energetika kérdéseivel kapcsolatban gyakran bontakozódnak ki széles körű viták, sőt éles konfliktusok is, melyekre esetenként intenzív társadalmi figyelem irányul. Sok kérdésben még a szakemberek között is késhegyre menő viták zajlanak: áldás vagy átok az atomenergia alkalmazása; a fosszilis tüzelőanyagok égetése tényleg katasztrofális klímaváltozást okoz-e, vagy pedig egy tudományos tévedés áldozatainak vagyunk; a környezetet a vízerőművek tönkreteszik, vagy inkább sok probléma komplex megoldását jelentik; a bioüzemanyagok gyártása hasznos energetikai lépés, vagy inkább növeli a Földön éhező milliók számát? És a példák még sorolhatók.

A környezetvédelmi teendőkről töménytelen sok szakmailag alátámasztott elemzés, és tengernyi megalapozatlan állásfoglalás árasztja el a világot. Az utóbbiakban az érdemi vizsgálódást sokszor nagy hangerővel helyettesítik, a „szakértőknek” titulált szerzőkről pedig könnyen kiderül, hogy nézeteiket inkább a hitre alapozzák, mint a hozzáértésre. Az ilyen „szakértőkről” az érdemi ellenvélemények leperegnek, viszont magabiztos és lehengerlő fellépésük gyakran meggyőző erejű a kevésbé tájékozottaknak.

A viták körül többnyire sokféle érdek érvényesítése is meghúzódik. Személyes törekvések, megélhetésük biztosítására törekvő szakmai (szemes, olajos, atomos, vizes stb.) lobbik, haszonra törekvő gazdasági társaságok, helyi igényeket képviselő önkormányzatok, munkavállalói érdekképviselők (szakszervezetek, kamarák), piacra éhes szállítók, szavazatokra aspiráló politikai pártok, nagyobb nézettségre vagy olvasottságra törő média, nyomásgyakorló szervezetek (zöldek, jogvédők, antinukleárisok stb.), befolyásra vágyó szakértők stb. nézetei és ütköző javaslatok között kell eligazodni. A laikusok számára ez túl nehéz, állásfoglalásukat inkább érzelmek, indulatok és szimpátiák

befolyásolják. A közvélemény-formálásban nagy befolyása van kisebb településeken a helyi értelmiségnek (polgármester, tanító, orvos, pap), országos vonatkozásban a közszereplőknek (politikuskok, államférfiak, művészek, tudósok, sportolók) is.

A közhangulat alakításában fontos szerepe van a médiának, ami nagyon jelentős a társadalmi elfogadtatást befolyásoló vitákban, az érdekek érvényesítésében, a veszélyek visszaszorításának ösztönzésében, a döntések kialakulásában. A média vevő az energiaellátás veszélyeivel összefüggő hírtétekü eseményekre és nézetekre. Az energia világa gyakran szolgáltat ehhez anyagot, mivel az anomáliák sok embert érintenek, és veszélyeket rejtenek magukban. Csernobil, Fukusima, vagy a mexikói-öbölbeli olajkatasztrófa sok év múltán is sokkoló hatású, de a kisebb üzemzavarok és balesetek is hatásosan találhatók. Egy tengeri olajkatasztrófa következtében kátránnyal borított madár fényképe szálnalmat ébreszt, egy erőmű hűtőtornyából kiáramló fehér gőz nyugtalanító (pedig az csak nedves levegő, ami nem tartalmaz káros szennyezőket), egy gázrobbanás törmelékei félelmet keltenek. A kisebb események hangulatkeltőek, egy súlyosabb havária már akciók gerjesztésére is alkalmas. A hatalmas földrengés és cunami által megrongált japán atomerőmű képei gyorsan felélesztették az atomerőművek létjogosultságát vitató mozgalmakat. A tömeghangulat kialakítására és akciók szervezésére különösen hatásos eszközzé vált az internet; a Facebook, a YouTube szerepet kapott még az észak-afrikai felkelések szervezésében is, a mobiltelefon pedig különféle terrorakciók bonyolításában.

A mértéktartó, felelősségteljes sajtóorgánumok elsősorban a közérdekű információk tárgyilagos terjesztését tekintik feladatuknak, és fórumot biztosítanak a társadalom figyelmét érdemlő véleményeknek. De a média üzlet is, érdeklődést kiváltó hírtéke főleg a negatívumoknak van – a veszélyeknek, a kedvezőtlen eseményeknek, a károknak. Only the bad news are good news (csak a rossz híreknek van jó hírtéke) – vallja az amerikai sajtó; egy tudósítás egy üzem eseménytelen működéséről nem növeli a példányszámot, egy erdő akkor válik igazán érdekessé, ha kipusztul. Ezért a médiának a tárgyilagos és kiegyensúlyozott magatartásra törekvő része is szelektálásra kényszerül, a kedvezőtlen események előtérbe állításával befolyásolva a közhangulatot. A sajtó másik, elsődlegesen az üzleti haszonra törő része a szenzációt hajhássza, forgalmát a veszélyek, katasztrófák, szörnyűségek színes tálalásával igyekszik növelni. Ezen irányzat szélsőséges termékei – a bulvár – a háttorzongató híreknek már a valóságtartalmára sem igazán kényes. Így a médiaerdőben a frusztrálás, a veszélyek, a következmények túlbecsülésének irányába befolyásolja a közhangulatot. Különösen könnyen befolyásolható és hangolható a színesebb, szórakoztatóbb, ingergazdag információt igénylő kevésbé iskolázottak népes rétege. Többnyire a média közvetítésével ismeri meg a nagyközönség a külföldi példákat is, aminek – nálunk különösen – megkülönböztetett súlya van a közhangulat formálásában.

Veszélyes jelenség, amikor a média nem elégszik meg a kétirányú információközvetítő funkcióval, hanem döntéshozó szerepet igényel, vagy legalábbis erőteljes nyomást gyakorol a döntéshozókra. Ilyen módon – egy-két újságíró személyes felfogásán keresztül felerősítve – felszínes és részrehajló nézetek mint megalapozott, perdöntő érvek kerülhetnek a köztudatba. Előfordul, hogy a média rossz ügy szolgáltatába áll, az

állampolgárokat félretájékoztatják, a döntéshozókat pedig megfélemlítik, komoly kárt okozva a társadalomnak. Nagy kár, hogy a tudomány rangos képviselői ritkán vállalkoznak a szakmai összefüggések közérthető és figyelmet felkeltő megvilágítására.

Sokféle szervezet és mozgalom foglalkozik a károsnak minősülő hatásokkal. Vannak hasznos, szakszerű tevékenységet folytatók, melyek indokoltan hívják fel a figyelmet veszélyekre, és közreműködnek azok mérséklésében. Ugyanakkor vannak felesleges riadalmat okozók, vélt veszélyeket hirdetők, nem egyszer komoly kárt okozva a társadalomnak, megakadályozva hasznos tevékenységeket, és elvonva az erőforrásokat fontosabb feladatoktól.

A nyugtalan közhangulatot, a társadalom félelmeit jól ki tudják aknázni a különféle környezetvédő, zöld mozgalmak. Helyenként jelentős politikai súlyhoz is jutottak, önálló pártként, vagy meglévő politikai szervezetek vállalták nézeteik képviselését. Többek között törvényt erőszakoltak ki például Németországban, Svédországban, Svájcban és Belgiumban a kitűnően működő atomerőművek időelőtti leállítására, Franciaországban elérték az előrehaladt szaporítóreaktor-program felfüggesztését. De jócskán vannak magyar példák is, a Duna Kör meg tudta akadályozni a nagymarosi gát és erőmű megvalósítását, Ófalunál meggátolták radioaktív hulladéktároló létesítését, lehetetlenítettek több erőműépítési elképzelést, kikényszerítették villamos távvezetékek és gázvezetékek nyomvonalának áthelyezését, megakadályozták az akkumulátorok hulladékait feldolgozó üzem megépítését, és még lehetne sorolni az energetika területén megghiúsított beruházásokat. Voltak indokolt akcióik, de nem mindegyik szolgálta a társadalom érdekét.

Egyes mozgalmak a durva erőszaktól sem riadnak vissza. Példa erre, amikor a Greenpeace aktivisták a sínekhez láncolták magukat, és szimpatizálók pár ezer fős csoportja vette őket körül. Céljuk a vonat haladásának megakadályozása volt, ami a németországi atomerőművek kiegészítő fűtőelemeinek franciaországi újrafeldolgozásából származó hulladékokat szállította Gorlebenbe, a radioaktív hulladékok átmeneti tárolójába. A tüntetőket a rendőrség erőszak alkalmazásával szétoszlatta, az aktivistákat letartóztatta, miután megszabadította őket láncoktól. Senki sem gondolta, hogy a happeningnek bármi konkrét következménye lesz az atomerőművek működtetésében. De az eseménynek hírértéke volt, azt ismertette a média, és az antinukleáris érzelmeknek ez a szenvedélyessége talán megnyert néhány embert ennek a törekvésnek.

De vajon a jól végzett munka örömeivel hazatérő tüntető fel tudja-e mérni, hogy fellépése hasznos volt-e a társadalomnak, vagy káros? Aligha, mert ennek megítélésébe még a szakemberek bicskája is bele szokott törni. Érvekkel az is indokolható, hogy tekintsünk el az atomenergia használatától, mert veszélyes, és sokba kerül az erőmű, de az is alátámasztható, hogy célszerű az alkalmazása, mert az energetika sok problémáját megoldja, és nem veszélyesebb más megoldásoknál. A dilemmát Németországban végül nem a szakmai érvek, nem a társadalmi megmozdulások döntötték el, hanem a politika, a hatalom megőrzése érdekében.

A veszélyérzet megnyergelésével aktív fellépésre lehet ingerelni az embereket, ha megfelelő szervezőerő találkozik a frusztrációval. Petíciók, tiltakozó gyűlések, médiakampányok, demonstrációk alakulhatnak ki, esetenként még erőszakos akciók is

bekövetkezhetnek. A támogatottságon múlik, sikerre vezet-e a megmozdulás, elég nagy részvétellel ki lehet kényszeríteni változásokat (még a kormány bukását is).

Magyarországon is előfordult, hogy a politika beletenyeredt a környezetvédelem dolgaiba. Az 1980-as évek végén a bős–nagymarosi létesítmény ellenzése tulajdonképp burkolt tiltakozás volt a politikai rendszer ellen. A megmozdulásoktól megrettent kormány elállt a beruházástól. A Duna Kör szerint a nagymarosi gát megépítése ökológiai katasztrófát idézett volna elő, a projekt védelmezői szerint pont ellenkezőleg, sok hasznot hajtott volna. Mindkét nézetet tekintélyes tudósok támogatják, a részvétel a vitában politikai állásfoglalásnak minősül. Az építés elvetése évente növekvő hatalmas gazdasági kárt okoz az országnak, és súlyosan megterheli a szlovák–magyar viszonyt. A kompromisszumot célzó javaslatokat ma is heves kritika fogadja a médiában, még a nemzetietlen megbélyegzéstől sem riadva vissza.

Az energetika vitakérdéseit gyakran szövi át a politika. Szavazatszerző az emberek egészségének és érdekeinek védelmét képviselni. A magyar politika inkább a gazdasági vetületekben érdekelt. A 2000-es években a parlamenti választási kampányok egyik fő témája volt, ki tud olcsóbban gázt biztosítani a lakosságnak. Hatásos téma volt a külföldi multik visszaszorítása is, a „luxus” profitot kisajtoló energiavállalatokat megregulázó kormány népszerűsége és szavazatokat nyert mint a kisemberek védelmezője (ellentételként az érintett vállalatok visszafogták a műszaki fejlesztést és a beruházásokat).

A társadalom jelentős része eleve bizalmatlan az energiaellátásban szerepet játszó vállalatokkal szemben, azok gazdasági túlereje miatt. Nálunk az utóbbi években felerősítették ezt a hangulatot az állami vállalatok magánosítását kísérő botrányok, valamint a félelem, hogy az új tulajdonosok érdekei háttérbe fogják szorítani a társadalom érdekeit. Az ellenézés legfőbb oka azonban az utóbbi 1–2 évtizedben kialakult félelem az energiaellátás nem kívánatos hatásaitól, amit az érintett vállalatok kezdetben elbagatellizáltak. Ez csak növelte az ellenéризést, aminek a békés formákon (gyűlések, petíciók, médiakampányok, népszavazások) túlmenően időnként erőszakos fellépésekkel (tüntetések, tömegdemonstrációk, létesítmények megrongálása stb.) is hangot adnak. Az ellenézés indítéka lehet valós veszélyesség (környezetszennyezés, sugárzás, robbanásveszély), zavaró hatás (zaj, bűz, járműforgalom), gazdasági kár (ingatlan értékvesztése, település vonzerővesztése, használat korlátozása) stb., de kiválthatja vélt veszélyek okozta érzelmekre és indulatokra alapuló közhangulat is.

Egy demokratikus társadalomban a lakosság ellenzését nem lehet adminisztratív vagy jogi eszközökkel közömbösíteni, kizárólag a megnyerés vezethet célhoz. Ehhez elengedhetetlen az őszinte, nyílt és tárgyyszerű tájékoztatás a vitatott létesítmények jellegéről és a működésükkel együtt járó kockázatokról, különös tekintettel a lakosság esetleges veszélyeztettségére. Ezt szolgálják a veszélyes létesítményekről készített hatástanulmányok, melyekben be kell mutatni a létesítmények környezetében az emberek egészségét és a természeti környezetet érintő hatásokat, és igazolni kell, hogy azok következményei a megengedett határokon belül maradnak.

A nyugtalan társadalmi közhangulat kezelése világszerte probléma. Sok országban rendszeresítették a közmeghallgatás intézményét, ahol feltehető kérdések és kifejtethe-

tők vélemények az energetika vitatott kérdéseivel kapcsolatban. A lakossági beleszólás bonyolult folyamatának világszerte rövid a múltja, az eljárások egyike sem bizonyult sokkal hatékonyabbnak a többinél, esetenként viták is kibontakoztak a társadalmi részvétel hasznosságáról. Egyesek szerint az eddigi tapasztalatok negatívak (a viták ritkán segítik elő a jó döntést, „felesleges nyűg”, a „valóságot elkendőző szemfényvesztés”), sőt új konfliktusokat kreálnak. A többségi vélemény azonban a feszültségek levezetésére más lehetőséget nem lát, mert a társadalmi viták hiánya nemcsak a közhangulatot rontaná, hanem a gazdasági fejlődésben is komoly görcsöket okozna.

Magyarországon is beiktattak közmeghallgatást jelentős beruházások engedélyezési eljárásába. Még kevés a tapasztalat annak megítélésére, hogy ezek érdemben befolyásolják a döntéseket, vagy csak az ellenzés formális levezetésére szolgálnak. A hazai körülmények között figyelembe kell venni, hogy a nyíltszíni viták jóformán minden kérdésben polarizált felfogást vallók konfrontációjába torkollnak, gyakran politikai töltettel, és a tartós társadalmi feszültségek miatt egyhamar nem várható ennek oldása. Ezért nem elég a viták kereteit kialakítani, annak stílusát is befolyásolni kell, hogy közös útkeresés jellemezze a procedúrát.

Kinek higgyünk? Bármilyen tekintélyes, vagy megnyerő is egy nézet képviselője, nem hinni kell neki, hanem csak igazolt tények alapján szabad állást foglalni. Hit és bizalom helyett a tárgyilagos elemzés következtetéseire kell támaszkodni. Ilyenek híján a kérdés nyitva marad, amíg nem állnak rendelkezésre meggyőző erejű ismeretek. Tárgyilagos vélemény kialakítása nem könnyű lecke a laikusoknak, pedig állampolgári kötelesség a részvétel a döntésekben. Erre fel kellene az embereket készíteni, már az iskolai oktatásban, a természettudományos és gazdasági alapismeretek oktatásával. Sajnos nagy a lemaradás, a hiányt ismeretterjesztéssel és el nem kötelezett szervezetek, vagy testületek működtetésével pótolni kell. Az elemzés csak úgy kerülheti el a részrehajlás vádját, ha mindenféle nézetet figyelembe vesz, függetlenül attól, hogy készítői számára melyik oldal véleménye szimpatikusabb. Természetesen feltüntetve az ellentétes érveket, de kiszűrve a vitákban gyakran érvényesülő érzelmeket és indulatokat. Figyelmet azonban csak azoknak a tényezőknek és hatásoknak szabad szentelni, amelyeket hiteles mérések, vagy megbízható statisztikai adatok támasztanak alá.

1.4. A megítélés nehézsége

Már az elhatárolás sem egyszerű: mi hasznos és mi káros. Szakmai felfogások, üzleti érdekek, politikai nézetek, presztízszempontok ütköznek a megítélés körül. Sok előítélet kapcsolódik ezekhez, indokolt és indokolatlan félelmek, a véleménynyilvánítást érzelmeik és indulatok befolyásolják. Így volt ez a kezdetektől napjainkig. Szinte hallani véli az ember a neandervölgyi oppozíciót: ne hozzátok be a tüzet a barlangba, mert mindannyian meg fogunk fulladni a füstjétől, vagy beleesve elégünk, és az őseink is megélték tűz nélkül. Napjainkban szenvedélyes viták zajlanak az atomerőművek és a vízerőművek előnyei és hátrányai körül, tudományos iskolák ütköznek össze az üveg-házhatás kérdéseiben, háttérben az erős szén-, olaj-, autóiipari lobbikkal.

A múlt rengeteg példát szolgáltat arra, hogy hasznos dolgokat elutasítottak, és fordítva, előnyösnek tartott megoldásokról utólag kiderült káros voltak. A 13–14. században kormozó füstje miatt még több városban szigorúan tiltották a széntüzelést, Angliában egy 1273-ban kiadott királyi rendelet intézkedett erről, aminek megszegése miatt I. Edvárd állítólag le is fejeztetett egy londoni polgárt. Az ipari forradalom azonban aligha bontakozott volna ki a szén használata nélkül. A kőolaj-finomítás első évtizedeiben a benzint még káros és értéktelen hulladéknak tekintették, nem sejtve, mekkora stratégiai jelentőségre fog szert tenni.

Az energetika új megoldásainak az útjai rögösek, minden új megoldást értetlenség és gyanakvás kíséri, vannak szenvedélyes ellenzői, és elkötelezett támogatói. A munkanélküliségtől félve az első szélmalom hajtotta fűrésztelepet a tömeg szétverte (Limehouse, 1768), az első gőzhajókat a vitorlás hajók kenyerüket féltő matrózai törték össze. Az angliai csatornákon a tulajdonosok társasága környezetvédelmi indokokkal tiltotta be az első gőzhajók forgalmát. Az angol parlament az autók megjelenésekor a közúti közlekedés óránkénti sebességét városban 2, azon kívül 4 mérföldre korlátozta, és előírta, hogy a kocsi előtt 60 yarddal vörös zászlót, vagy vörös lámpát lengető ember figyelmeztessen a veszélyre.

A maguk idejében tudományosan megalapozottnak tekintett érvek mai szemmel gyakran nevetségesek. A bajor legfelsőbb egészségügyi kollégium 1838-ban kinyilvánította, hogy az utazás a vasúttal agykárosodást okoz, sőt még a vonat mozgásának a megfigyelése is hasonló következménnyel jár. Az angol „szakértők” szerint a vasúttól megrémült tehének teje el fog apadni, a mozdony füstje megöli a madarakat, a szikrák felgyújtják a házakat, a felrobbanó kazán megöli az utasokat.

A motorizáció hajnalán az amerikai Kongresszusban a szenvedélyes viták hatására majdnem betiltották a benzin szabad forgalmazását tűzveszélyessége miatt, és sokan a mezőgazdaságot a tönkremeneteltől féltették, ha a trágyát szolgáltató lovakat kiszorítják az autók.

Az ellenzésre még teológiai érveket is találtak. A *Kölnische Zeitung* 1828-ban érélyesen kikelt az utcák közvilágítása ellen, mondván: „nem megengedett dolog, hogy az isten által sötétnek rendelt éjszaka megvilágíttassék”. A 20. század elején pedig a villanyvilágítást tekintették Skóciában az ördög művének. És még hosszan lehetne sorolni az utólag értelmetlennek, sőt ostobának minősülő véleményeket és előírásokat.

Minden műszaki megoldásnak a haszna mellett vannak nem kívánatos hatásai, sőt gyakran súlyos veszélyei is. A hátrányokat, a káros hatásokat, a veszélyeket hozzáértéssel és leleménnyel csökkenteni lehet, de tökéletesen kizárni nem. Tökéletes biztonság nem létezik, mindig előfordulhatnak emberi hibák, váratlan természeti hatások, anyagok előre nem látható változásai. Így csak arra lehet törekedni, hogy csökkentsük a káros, veszélyes hatások előfordulásának valószínűségét. A kockázatok valószínűsége nagyon ingoványos talaj, csak remélni lehet, sikerül-e társadalmi megegyezést elérni egy-egy tevékenység elfogadható kockázatának mértékéről. Az *1.10. táblázatban* látható, hogy az emberek önként milyen nagy kockázatokat hajlandók vállalni, viszont a kényszerűen elviselt veszélyek tűréshatára milyen alacsonyan van. Az atomerőművek minden újabb generációja egy teljes nagyságrenddel csökkenti az olyan üzemzavarok valószínűségét,

melyek radioaktív részecskék kibocsátásával járhatnak a környezetbe. Ma már ezek a kockázatok jóval kisebbek, mint a természeti katasztrófáké, a társadalom mégsem elégedett ezzel a biztonsággal.

1.10. táblázat. Letális egyéni kockázatok $10^{-7}/\text{év}$, fő léptékben

Önként vállalt veszélyek		Kényszerűen elviselt veszélyek	
Jelleg	Kockázat	Jelleg	Kockázat
Dohányzás, napi 20 cigaretta	50 000	természetes elhalálozás 40 évesen	12 000
Motorkerékpározás	20 000	influenza	2 000
Autóversenyzés	12 000	leukémia	800
Borivás, napi 1 liter	7 500	gázolás közúton	500
Háztartási baleset	3 800	gyilkosság	400
Autóvezetés	1 700	tűzeset	150
Üzemi baleset	1 400	árvíz	22
Sziklamászás	400	tornádó	20
Repülőgép-szerencsétlenség	100	vasúti baleset	17
Röntgendiagnosztika	100	földrengés	8
Passzív dohányzás	100	szélvihar	1
		villámcsapás	1
		gátszakadás	1
		repülőgép-rázuhanás	1
		veszélyes állatok	1
		atomerőmű kibocsátása a telephely kerítésénél	1–0,1
		veszélyes anyagok szállítása	0,5
		nyomástartó edény robbanása	0,5
		meteorit becsapódása	$6 \cdot 10^{-4}$
		szupernóva kitörése	$1 \cdot 10^{-4}$

A veszélyes hatások palettája nagyon széles. Bányaszerencsétlenségek, kazánrobbanások, áramütések, tüzelőberendezések égéstermék, gázrobbanások, a közlekedés emissziója, tengerek olajszenyyezése, a fizetési mérleg romlása és nagyon sok más hatás írható az energiaellátás rovására.

Komoly hozzáértést kíván a mérvadó hatások megválasztása. Ami az egyik technikai megoldásnál kritikus, a másikonál jelentéktelen lehet. A nukleáris technológiáknál megkülönböztetett figyelemmel kell lenni az ionizáló sugárzásokra, a fosszilis tüzelőanyagoknál az égéstermék – és manapság különösen a szén-dioxid-kibocsátás – a legfontosabb, az éghető gázoknál foglalkozni kell a robbanásveszéllyel, a mobil belső égésű motoroknál a szmogképződéssel stb. A hulladékok sorsa sem közömbös, az atomreaktoroknál pl. a kiégett fűtőelemek, a napelemeknél a mérgező komponensek okoznak gondot.

A veszélyes hatások megítéléséhez azok objektív rangsorolására van szükség, hogy elkerüljük a legnagyobb veszélyt, a szubjektivitást. Ebben csak ténylegesen tapasztalt adatok, vagy általánosan elfogadott tudományos nézetek lehetnek mértékadóak. Ilyenek híján nem lehet megalapozott véleményt nyilvánítani, a kérdés nyitva marad. Gyakran

még a hiteles minősítést is nehéz elfogadtatni. Például a mértékadó nemzetközi szakmai szervezetek (WHO,¹⁰ IAEA,¹¹ WMO¹²) a dózisosok alapján hiába becsülték meg, hogy Európában a csernobili katasztrófa okozta rákos megbetegedések száma legfeljebb néhány ezer lehet (ez is iszonyatosan sok), mégis az antinukleáris mozgalmak néhány millió áldozatról beszélnek. A média ezt szívesen közzéteszi, mert számára hírértéke a meghökkentő információnak van.

A megítélés nagy problémája, hogyan kell minősíteni a következményeket. Vannak nem minősíthető következmények, pl. a tájrombolásnak, egy növény- vagy állatfaj kihalásának nincs mércéje, ezeket csupán regisztrálni lehet. A külső költségek¹³ vizsgálatánál értelemszerűen mindent pénzben fejeznek ki, de ezt nagyon sok bizonytalanság terheli. Mi fejezi ki az emberi élet értékét, az életkereset, a biztosítások tarifája, vagy az egy főre eső nemzeti jövedelem és az átlagéletkor szorzata? Hogyan magyarázható, hogy az élet értéke a jövedelmi szinttől függ, vagy, hogy az országhatár két oldalán más az értéke? Mít ér az emberi egészség és miben mérjük, pénzben, élettartamban, az egészségügyi ellátás költségeiben, vagy közvélemény-kutatási statisztikai felmérésben? Hosszan sorolhatók a minősítés problémái, pl. hogyan kezeljük az üvegházhatást vagy a nukleáris fűtőelemciklus lezárását?

És hogyan kell a nagyon eltérő jellegű következményeket közös nevezőre hozni, együttesen megítélni? Hogyan lehet összehasonlítani az almát a körtével? Kérdés kérdés hátán, állandóan belebotlunk abba, hogy nem tudunk objektív mérőszámokat kialakítani, az értékelésnél a józan ítélőképességre kell hagyatkozni, amitől nincs nagyon messze a szimpátia, és kicsit odébb a véleményalkotás érzelmek és indulatok alapján. Visszajutottunk ugyanoda, ahonnan elindultunk.

Talán tovább jutunk, ha eltekintünk attól, hogy egyetlen megoldás előnyeit és hátrányait próbáljuk kvantifikálni, és áttérünk két, vagy több megoldás összehasonlítására. Természetesen követelmény, hogy az összehasonlított megoldások képesek legyenek ugyanazon feladat ellátására. Az összehasonlításnál megmaradhatunk a naturáliák (természetes mértékegységek) alkalmazásánál, a leggyakrabban használt közös mérce, a pénzben kifejezett érték helyett. Így nem kell azon töprengeni, mennyi az emberi élet értéke, mekkora pénzben mért kárt okoz az élővizek felmelegedése, vagy a kén-dioxid-emisszió. A naturáliák alkalmazása biztosabb fogódzókot szolgáltat a vizsgálatokhoz, stabilabb talajon lehet véleményt formálni. A heterogén mutatórendszer együttes kezelésére matematikai módszert is kidolgoztak. Az irodalomban többféle elnevezés használatos, attól függően, hogy a cél csak minősítés vagy sorrend felállítása is, többparaméteres hasznosság, MAU¹⁴ Analysis, Multy Criteria Analysis, vagy Multy Criteria Outranking Technique) elnevezéssel.

¹⁰ World Health Organization, Egészségügyi Világszervezet.

¹¹ International Atomic Energy Agency, Nemzetközi Atomenergia-ügynökség.

¹² World Meteorological Organization, Meteorológiai Világszervezet.

¹³ Az áruk és szolgáltatások társadalmat terhelő költségei.

¹⁴ Multi Attribute Utility.

Megkönnyíti a kérdés kezelését a következmények jellegének elhatárolása, mire vagyunk kíváncsiak, az emberi életkörülményekre, a társadalom viszonyaira, a természetre gyakorolt hatásokra, a gazdasági vagy politikai következményekre? Így csak azt kell vizsgálni, melyik megoldás okoz kevesebb egészségkárosodást, melyik kíméli jobban a természeti környezetet, melyik felel meg jobban a gazdaságpolitikai célkitűzéseknek stb. Sajnos a szubjektivitást így sem lehet teljesen kiküszöbölni, hiszen már az is szubjektív, hogy milyen paramétereket vonunk be az összehasonlításba, vagy, hogy az ellentmondó tudományos szakvélemények közül melyiket fogadjuk el.

Az energetika káros hatásait négy területen célszerű vizsgálni. A legfontosabb maga az ember, hogyan befolyásolják a hatások életbiztonságát, egészségét, idegállapotát, lelki világát. A hatásoknak sokféle következménye lehet, feszült idegállapot, betegség, rokkantság, halál. A veszélyek egy részét az emberek önként vállalják, másokat viszont kívülről kényszerítenek rájuk. Különösen a pszichés folyamatoknál az emberek közötti kölcsönhatások is szerepet kaphatnak.

A legösszetettebb a természeti környezet, ami magába foglalja a tájat, a felettünk elterülő légkört (atmoszféra), az alattunk található kőzeteket (litoszféra), a vízrendszereket (hidroszféra), és a bennük található élőlényeket, a növény- és állatvilágot. Az utóbbiak élőhelyeit biztosító térség a bioszféra. A természeti környezetből nyerjük az energiaellátáshoz szükséges forrásokat, és oda jutnak vissza az energiafelhasználás szükségtelen maradványai, hulladékok, égéstermékek, veszteség-hő stb. alakjában. A természetnek nagy a regenerálódó képessége, de az energetika egyes hatásai már irreverzibilis következményekre vezetnek.

A környezetvédelmi viták gyakran csak az elsőként említett két kérdésre – az emberi és természeti kihatásokra – koncentrálnak. A kép teljességéhez még két terület vizsgálatát is be kell vonni, az épített, valamint a társadalmi környezetet.

Az energiahasznosítás sokféle módon károsíthatja az emberiség által létrehozott épített környezetet. Ezen túlmenően a civilizált élet fenntartásához szükséges építmények, berendezések, gépek, eszközök létesítéséhez és működtetéséhez nagyon sok energia kell, ami többnyire sok energiavesztéssel, és számottevő negatív következményekkel jár.

A társadalmi környezet kölcsönhatásai sokszor közvetettek, és nehezen áttekinthetők. A globalizált világban különösen nehéz előre látni a gazdasági és politikai következményeket, sőt néha még katonai konfrontáció sem zárható ki. A társadalom életében sokféle intézmény és szervezet is szerepet játszik, melyek befolyásolhatják az energetika szerepét és következményeit. Az emberi közösségek viselkedésére gyakran irracionális tényezők hatnak, energetikai hatások kiváltotta érzelmek és indulatok befolyásolhatják a tömegek viselkedését és megnyilvánulásait.

A nemkívánatos következmények rangsorolásának nemcsak tájékozódás a célja, hanem a szükséges beavatkozások meghatározása. A cél lehet a következmények korlátozása, csökkentése, vagy megszüntetése. Hogy ezek közül mi valósítható meg, az két körülmény függvénye. Az egyik a beavatkozás szándékának ereje, ami lehet külső nyomás, pl. társadalmi követelés, vagy belső elhatározás, pl. a veszélyes hatást okozó üzem presztízsének megőrzése. A másik a beavatkozáshoz szükséges pénz és technológia rendelkezésre állása. A siker a lokális hatásoknál a legvalószínűbb, ahol a következmény

a hatást előidéző tevékenység közelében következik be. Erre példa a bányakár, vagy a munkahelyi ártalmak. Bonyolultabbak a regionális hatások, ahol az nagyobb régiót, esetleg több országot érint. Jellegzetes példája ennek, hogy az 1960-as években 1750 norvég tó teljes élővilágát pusztította ki a savas eső, aminek a forrása a nyugat-európai füstgázemisszió volt, mintegy 2000 km távolságban. A regionális hatások mérséklésének hatásos eszközei a nemzetközi megállapodások, ha azokat végrehajtják. Ilyen sikeres szerepet játszott az ENSZ Európai Gazdasági Bizottságának kezdeményezésére létrejött egyezmény a légkör szennyezésének csökkentésére, valamint az élővizek tisztaságára vonatkozó megállapodás. A legnehezebb a globális hatások visszaszorítása, melyek Földünk egészét érintik. Ilyen a légkörbe kibocsátott üvegházgázok, vagy a radioaktív nemesgázok hatása. Az elsőt a Kiotói Egyezmény, a másodikat a légköri atomrobbantások tilalma korlátozza.

Vannak jelenlegi ismereteinkkel egyelőre megoldhatatlan problémák. Példázza az Európai Unió küszködése, hogy összeegyeztesse a biztonságos energiaellátást a környezet védelmével, a gazdasági stabilitással és a politikai függetlenséggel.

Az energiaellátás befolyása többféle metszékben vizsgálható. Tárgyalható felhasználói szektorok (háztartások, ipar, szolgáltatások, közlekedés stb.) szerint, a csoportosítás történhet funkcióknak (fűtés, világítás, gépek hajtása, termikus technológiák stb.) megfelelően. A leggyakoribb a megkülönböztetés energiahordozók (szilárd-, folyékony-, gáznemű energiahordozók, megújulók, villamos energia stb.) alapján történik.

Az energetika veszélyeinek megítélésénél figyelembe kell venni, hogy minden emberi tevékenység kockázattal jár együtt, ennek következtében nem léteznek tökéletesen veszélytelen technikai megoldások sem. Civilizált világunkban szinte mindig és mindenütt technikai eredetű veszélyforrások tömege vesz bennünket körül. A paletta rendkívül széles, az elromlott vasúti fénysorompótól (mert kilopták az akkumulátort) egy nukleáris katasztrófaig, a táplálékunkba felszívódott növényvédő szerektől a Föld légköri egyensúlyának megbomlásáig. A veszélyes hatások fenyegethetik közvetlenül az emberek egészségét, testi épségét és életét, vagy érvényesülhetnek közvetve a természeti környezet, az anyagi javak és a társadalmi viszonyok károsításával befolyásolva az életkörülményeket.

Az energetika veszélyei az utóbbi időben a társadalmi figyelem középpontjába kerültek, elsősorban a környezeti ártalmak és néhány katasztrófa hatására. A társadalom igyekszik az ártalmak kockázatát minél lejjebb szorítani, az egészségkárosító hatások megfelelő anyagi ráfordításokkal az energiaellátás minden módjánál csökkenthetők. A társadalom gazdasági erejétől függ, mekkora erőforrásokat képes erre fordítani. A gazdag országok sokat áldoznak az emberek egészségének megőrzésére, a biztonság növelésére, a balesetek elkerülésére, törekvünk a tiszta levegő, a jó minőségű ivóvíz biztosítása, még az üvegházhatás mérséklését is finanszírozzák. A legszegényebb országokban még az elemi életfeltételek megteremtése is gond, a környezeti katasztrófák megakadályozására sem jut erő, gyakran önpusztító gazdálkodással felégetik az erdőket, az energiaigények fedezésére eltűzelik a humuszréteget megtartó cserjéket, a talaj termőerejét fokozni képes trágyát. A hazai erőfeszítések az ártalmak csökkentésére jelentősek, de korlátozott anyagi lehetőségeink miatt lemaradásunk – elsősorban a környezetszennyezés csökkentésében – még számottevő.

I. RÉSZ

Energiaforrások

A 21. században az emberiség nagy kihívással szembesül: hozzá tud-e jutni elegendő élelmiszerhez, édesvízhez és energiához. Ez civilizációnk fennmaradásának feltétele. Sokan az energiaellátást helyezik első helyre, mert energia kell az élelmiszertermeléshez és a vízellátás biztosításához is. De a sorolástól függetlenül korunk egyik kulcskérdése, tudunk-e elegendő energiaforrást biztosítani az emberiség növekvő energiaszükségletének kielégítéséhez. Nemcsak olajtonnákról és kilowattórákról van szó, hanem minőségi feltételekről is.

Mindenekelőtt elviselhető áron kell az energiához hozzájutni. Ha a nemzetek jövedelméből aránytalanul sokat költünk energiára, nem jut pénz ennivalóra és ivóvízre. Pedig a Föld lakosságából mintegy egymilliárdnyian éheznek, és azok aránya is hasonló, akik nem jutnak hozzá egészséges ivóvízhez. De ennél többről is szó van, a drága energia – eltekintve az olajországoktól – fékezi a fejlődő országokat felzárkózási törekvésekben, ami társadalmi, politikai és fegyveres konfrontációk forrása. Az is lényeges, hogy az energia megbízhatóan álljon rendelkezésre. Az energiaellátás zavarai kedvezőtlenül hatnak a gazdaság működésére, az életkörülmények alakulására.

Szinte magától értetődő, hogy úgy kell az energiaellátást biztosítani, hogy az ne járjon elviselhetetlenül káros következményekkel. Ezt a legnehezebb kielégíteni, mert ismereteink bizonytalanok és változnak, és a megítélést sokféle érdek befolyásolja. Társadalmi megegyezésre kell jutni abban, hogy mi káros és mi nem az, hol a határ az elviselhető és az elviselhetetlen között. E kérdések a társadalom erős megosztottságát hozhatják lére, bár országok közötti ellentétek sem ritkák. Az energiaellátás története mindig tele volt konfliktusokkal, de azokat mindig sikerült áthidalni, mindig sikerült megnyugtató megoldást találni. Remélhetőleg így lesz ez a jövőben is, csak most sokkal nagyobb a tét: az emberiség fennmaradása.

Az energiagazdálkodás talán azzal kezdődött, hogy egy kőkorszakbeli ősünk segítségül hívta egy társát egy súlyos préda elvontatására. És megtörtént a csoda, amivel egyedül nem boldogult, kettesben játszva megoldották, elindultak a kooperatív törzsfelődés irányába. De rögtön jelentkeztek a problémák is, hogyan részesüljenek a zsákmányból a gyengébbek, az ügyetlenebbek, a lusták? Évtízezredekig az ember csak a két keze – meglehetősen szerény – fizikai munkájára szorítkozhatott, bár a keze egyre ügyesebbé vált, és sok kis szerszámmal növelte a képességeit. Ennek kiegészítésére igyekezett kiaknázni a természet kínálta lehetőségeket.

A nagy áttörést a tűz meghódítása jelentette, ami feltehetőleg azzal kezdődött, hogy egyik ősünk egy erdőtűz szélén odébb piszkált egy izzó fadarabkát, és rájött, hogy azzal bárhol kialakítható egy tűzrakás. De a barátkozás a tűzzel sok áldozattal is járhatott.

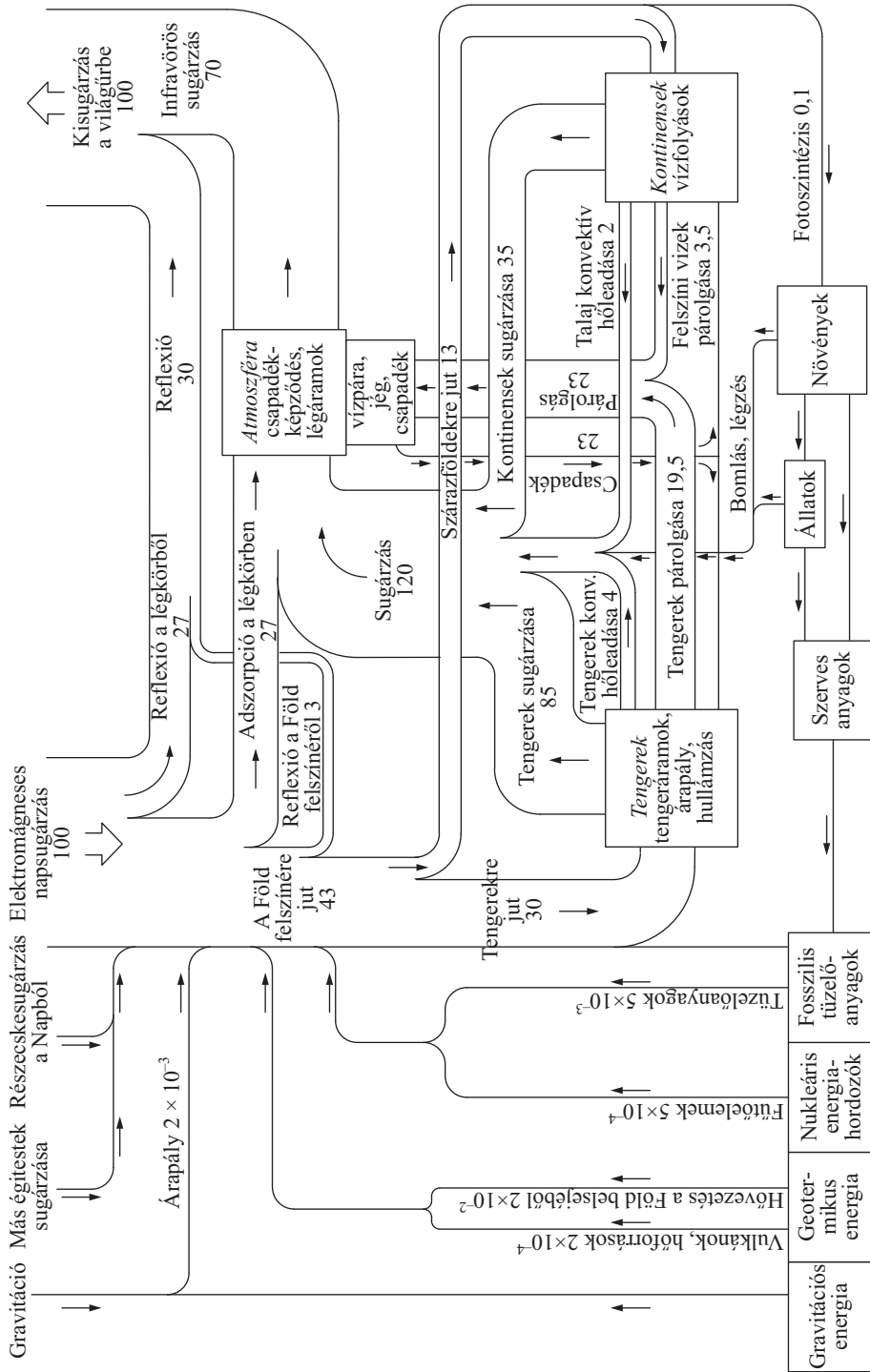
Uralhatatlan tűzvészek, megégett és abba belepusztult emberek kísérték e folyamatot, amíg meg nem tanulták e veszélyes erő kezelését. De ez már törzsi ügyé lépett elő, mert a tűz fenntartása, táplálása közösségi feladattá vált. Ugyanis hosszú ideig csak fenntartani tudták a tüzet, éleszteni nem, szinte folyamatos feladat volt az éghető hulladékok gyűjtögetése. Sokáig a biomassa maradt az emberiség fő tüzelőanyaga, egyes elmaradt térségekben ma is ezzel biztosítják a legfontosabb életszükségleteket (főzés, vízmelegítés, fűtés). Ázsia és Afrika sok településén az asszonyok naponta sok órát töltenek ma is a rözse, a tehénlepény és más éghető hulladékok összegyűjtésével.

Ahogy később is gyakran a „haditechnika” volt a műszaki fejlődés hajtóereje, ez történt vagy 40–50 ezer éve is. Rájöttek, hogy egy rugalmas faággal messzebb lehet hajtani egy követ, mint kézzel. És ha a faágot megfeszítik egy bédarabbal, ki lehet löni egy kihegyezett vesszőt, amivel halálra sebezhető egy ellenséges állat, vagy ember. A puska feltalálásáig a nyíl maradt a leghatásosabb fegyver. A kivitelét fokozatosan tökéletesítették, a honfoglaló magyaroknak valószínűleg sikerült messzebb ható megoldást kialakítani, ezért jelent meg az akkori szerzetesek imájában, hogy „a magyarok nyilaitól ments meg Uram minket!”

A nyíllal sikerült hasznosítani a mechanikai energia egyik formáját, és ez ösztönzőleg hatott más lehetőségek kiaknázására, pl. súlyok emelésére és továbbítására a nagy építkezéseknél. De ehhez energia kellett, amit csak a rabszolgákból lehetett kigyötörni. A rabszolgák megszerzéséhez le kellett igázni a szomszédos törzseket, háborút kellett viselni más népekkel. A Biblia is beszámol arról, hogyan hajtották el rabszolgának a zsidókat Babilonba, meg Egyiptomba. Az ókori krónikás, Diodorus Seculus írta a rabszolgák helyzetéről a spanyol ezüsbányákban: „a legerősebb munkások a legszerencsétlenebbek, mert ők lassabban halnak meg”.

A műszaki fejlődés azután túllépett a rabszolgamunkán, hatékonyabb természeti erőforrások – mindenekelőtt a szél és a vízfolyások – hasznosítására került sor. A vízenergia a manufaktúrák létrejöttét segítette elő, a nagyipar megszületésének minden szülési fájdalmával. A vitorlás hajók alapvető szerephez jutottak az ókori és az újkori gyarmatbirodalmak létrehozásában és működtetésében, és az ezekkel együtt járó zsákmányszerzésben és háborúban. Mellesleg a nagy felfedezésekkel megteremtették a Föld egységes rendszerét, de rögtön megindultak a tulajdonviták is, hol kit mi illet meg.

A műszaki fejlődés fokozatosan módosította a tüzelőanyagok szerepét. Az erdős térségekben a biomasszán belül a tűzifa domináns szerephez jutott. A 16–17. században a gyorsan növekvő vas- és acéligények biztosításához hatalmas erdőségeket kellett kipusztítani, hogy biztosítsák a kohók redukáló anyagaként használt faszenet. Ennek következtében Angliában és Hollandiában heves faválság bontakozódott ki. A fahiány megakadályozására, az erdők védelmében rendeletekkel korlátozták a kohók létesítését (akkor ezt még nem nevezték környezetvédelemnek), az új kohókat az erdőkben bővelkedő Svédországba és Oroszországba telepítették. A tűzifa árának emelkedése és a visszatérő ellátási zavarok megnyitották az utat a szén használata előtt, ami nagyobb használati értéke révén fokozatosan háttérbe szorította a fát. Idejében, mert az ipari forradalom kibontakozásához szükség volt egy nagy mennyiségben rendelkezésre álló, magas hőmérsékleten koncentráltan sok hőt fejlesztő tüzelőanyagra. A szén használata



I.1. ábra. A Föld energiaviszonyai

vált az iparosodás és a gazdagság szimbólumává. A szén bányászata és eltüzelése sok veszéllyel és ártalommal jár, ezért a szénhidrogének gyorsan háttérbe tudták szorítani. De azokhoz is sok hátrányos következmény kapcsolódik, nem beszélve a politikai és hadászati kihatásokról.

Az energetika története azt mutatja, hogy amikor egy energiaforrás meghatározó szerephez jutott, kiderültek alkalmazásának hátrányos következményei és veszélyei. Ezek ellensúlyozása közben mindig megjelent egy előnyösebb adottságú új energiaforrás, ami fokozatosan háttérbe szorította az elődjét. Az emberiség kezdetben a természet kínálta megújuló energiaforrásokra alapozta a tevékenységét. Amikor azok diffúz jellege már kevés volt az egyre koncentráltabbá váló gazdasági tevékenység és települési forma ellátásához, át kellett térni a fajlagosan nagy energiatartalmú ásványi energiahordozók használatára. Ezeket fáradtságos munkával kell kitermelni a Föld kérgéből, elvileg egy idő után akár ki is apadhatnak.

Most az energetika ismét válaszúthoz érkezett. Felgyűltek a kedvezőtlen hatásokkal kapcsolatos tapasztalatok, terjed a félelem az energetika veszélyeitől és az energiaforrások kiapadásának lehetőségétől. Nagy a bizonytalanság, mi vár ránk? Még csak tapogatódzunk, mi lehet a megoldás útja, talán az atomenergia, vagy a megújulók egy új alkalmazása, esetleg egy ismeretlen, teljesen új lehetőség? Garmadával készülnek prognózisok, akcióprogramok, cselekvési tervek, de ezek a régi tudás kalodájába zárva gondolkodnak, az igazi lehetőség ismeretének híján, így csak átmeneti szükségmegoldásokra jutnak.

Az 1.1. ábra jelenlegi ismereteink alapján vázlatosan áttekinti a Föld energiaviszonyait, szemléltetve az energiaforrások választékát. Az energiarezervoárokat négyzetek, a napsugárzás teljesítményéhez (177 PW) viszonyított energifolyamokat sávok jelzik. Az emberiség számára kínálkozó mozgástér elég széles, de vajon mivel jár annak kihasználása?

2. Kimerülnek az erőforrásaink?

A 20. század közepén a Római Klub¹⁵ megnyomta a vészcsengőt, a civilizáció rövidesen zsákutcába jut, mert el fognak fogyni az ásványi nyersanyagok. A prognózis nem teljesült, de a figyelmeztetés hatott. A környezet és a gazdasági fejlődés összefüggéseinek feltárására az ENSZ által alakított Bruntland Bizottság¹⁶ jelentésében már nem jelölt meg határidőt, csupán leszögezték, hogy az emberiséget krízis fenyegeti, különösen a globális hatások miatt, és javaslatokat tettek a katasztrófát megelőző intézkedésekre, a „fenntartható fejlődés” stratégiájára. Állásfoglalásuk szerint az erőforrásokat úgy kell kiaknáznunk, hogy ne korlátozzuk az utánunk következő generációk lehetőségeit. A közös cselekvési készséget demonstráló fórumnak szánt Környezet és Fejlődés Konferencia (1993, Rio de Janeiro) a magas szintű képviselet és a monstre részvétel ellenére csak nagyon szerény sikerrel járt. A nagy kihatású közös akciók fennakadtak a gazdasági érdekellentétek olyan zátonyain, mint a gazdasági versenyképesség féltése, az ellentét a szegény és gazdag országok között, a huzavona az előnyök, hátrányok és pénzügyi terhek megosztása körül. A fenntartható fejlődés gondolata azonban fokozatosan áttörte az érdekhálókat, és kis lépésekkel, részmegállapodásokban sikerült elfogadtatni a szemléletet.

A társadalom energiaellátása sokféle erőforrás hasznosítására támaszkodik, ezek nagy részét a természet bocsájtja rendelkezésünkre. Az emberiség a természeti erőforrásokat hosszú ideig korlátozás nélkül és gátlástalanul aknáztta ki. Idővel kiderültek hasznosításuk kedvezőtlen következményei is az emberi életfeltételekre, a környezetre, sőt magára a társadalomra is. Ez azonban nem befolyásolja a kiaknázás mértékét, azt kizárólag a gazdasági szempontok határozzák meg. Az erőforrások kímélésére, a jövő nemzedékek érdekeinek figyelembevételére vonatkozó kívánságok jámbor óhajok maradnak, mindezt felülírják az üzleti érdekek. De a szemlélet azonnal megváltozik, ha a környezet védelme, az erőforrások kímélése hasznot hajtó üzleti vállalkozássá válik.

Az energiaellátás számára a legfontosabb erőforrások az energiaforrások. A természet sokféle energiaforrást kínál. Egy részük a Föld keletkezésével jött létre. Vannak hipotézisek, hogyan és miért jött létre bolygónk, de biztos választ erre valószínűleg sohasem fogunk kapni. Szerencsére a keletkezésnek vannak energetikai hozományai is. Mindenekelőtt az a hatalmas energia, ami a Föld mozgásában (forgás, keringés, haladás a csillagrendszerrel stb.) halmozódott fel. Ugyancsak hozomány a bolygó anyagában

¹⁵ Az emberiség kilátásait elemző társaság.

¹⁶ World Commission on Environment and Development, vezetőjének neve után Bruntland Bizottság.

rejlő hő, ami a belső magban több ezer fokos hőmérsékletet hoz létre. A Föld keletkezése során jutottunk hozzá azokhoz a nagyon hosszú felezési idejű radioizotópokhoz (U, Th, K) is, melyek bomlása hasadóanyagokat és sokféle más radioizotópot szolgáltat. A hozományok idővel elszoktak fogyni, ez főleg a hőre és a radioaktivitásra vonatkozik, de szerencsére ez csak évmilliárdok múlva válik időszerűvé.

A gravitáció révén más égitestektől is hozzájutunk valamihez, az árapályt elsősorban a Hold vonzása hozza létre, de a Nap is besegít. Energiaforrásaink legnagyobb részét – a megújuló energiaforrásokat – a napsugárzás hozza létre. Attól származik a légáramlások és a tengeri áramlások energiája, a tengerek hullámzása, az tartja fenn a víz körforgását, és az hozza létre a biomasszát. A fotoszintézis révén a napsugárzás élteti a növényvilágot és a tápláléklánc figyelembevételével végső fokon a teljes földi életet. De lehet, hogy a Nap nincs monopolhelyzetben, a tengerek mélyén – ahova nem hatol le a napsugárzás – másfajta élet nyomára is bukkantak, ami nem a fotoszintézisre alapul, hanem vulkanikus eredettel a magas hőmérséklet, valamint kénalapú mikrobiológiai folyamatok hozzák létre. Nem tudni, lesz-e ennek valamilyen gyakorlati kihatása.

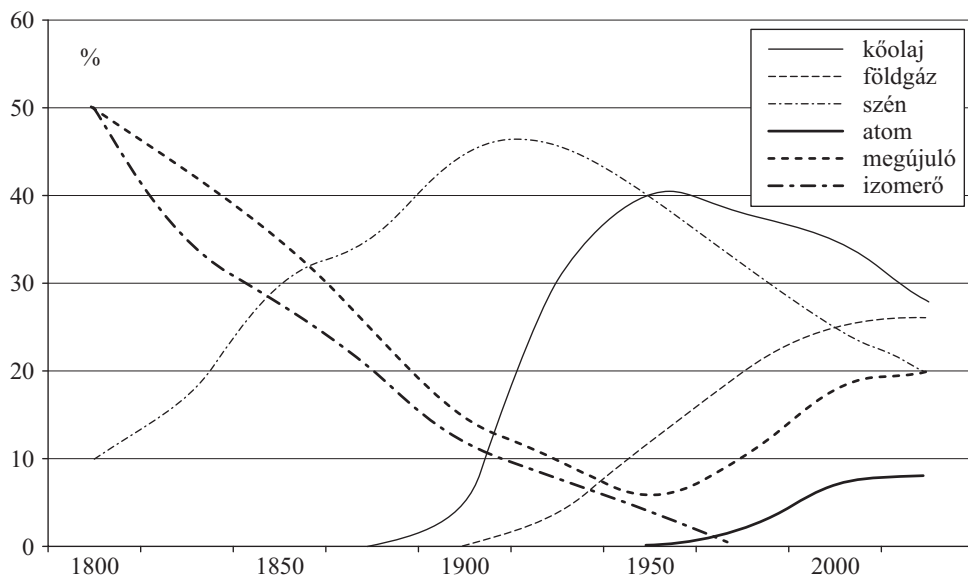
Tulajdonképp a földkéregben található fosszilis tüzelőanyagok (szén, kőolaj, földgáz stb.) napenergia-konzervek, hiszen olyan elpusztult élő szervezetek üledékéből képződtek, melyeket a Nap hívott életre. Az ásványi tüzelőanyagokat kimerülő energiaforrásnak tekintik, bár a kimerülés és a megújulás időfüggő, relatív kategóriák. Ásványi tüzelőanyagok jelenleg is képződnek, de sok nagyságrenddel lassabban, mint ahogy kitermeljük azokat. A megújuló források is csak addig újulnak meg, amíg a Nap a jelenlegi módon működik, ha néhány évmilliárd múlva sugárzása elapad, az energiaforrásoknak is vége. Az emberiség a természeti erőforrásokat – köztük az energiaforrásokat is – hosszú ideje korlátozás nélkül és gátlástalanul aknáztta ki. Csak néhány évtizedes az a felismerés, hogy lehetőségeink nem korlátlanok.

Nemcsak a médiában, de a szakkörökben is gyakran tárgyalt aggály, hogy a világ ásványi energiahordozó-vagyona – különösen a kőolaj és a földgáz – rövidesen el fog fogyni. Az ilyen kilátásoknak – sokak szerint – súlyos következményei lehetnek, krízis a világgazdaságban, életvitelünk átalakulása, talán még az ipari korszak vége is.

Az még nem fordult elő a Földön, hogy elapadt egy természeti erőforrás, de az nem zárható ki, hogy feltárása és kinyerése egyre több munkát és költséget kívánjon meg, ami idővel gátjává válhat a kitermelésnek. Az energiaellátáshoz szükséges erőforrások biztosítása erősen megdrágult, vajon el lehet-e hárítani egy apokaliptikus következményekkel járó energiakrízist? Az energiaprognózisokban többnyire szerepel egy BAU = „Business as usual” változat, vagyis a jelenlegi gyakorlat változatlan folytatása. Ez biztosan nem megoldás, új utakat kell keresnünk az energiaellátáshoz. Eddig ez mindig sikerült, bízhatunk abban, hogy a jövőben sem lesz másként.

Az energiahordozók aránya a világ energiamérlegében folyamatosan módosult, ezt a 2.1. ábra szemlélteti.

Egy energiahordozó szerepe azonban sohasem azért csökkent, vagy szorult háttérbe, mert elfogyott az energiavagyon, hanem az igény mérséklődött, mert egy műszakilag és gazdaságilag előnyösebb vette át a helyét (a kőkorszak sem a kőhiány miatt ért véget). Ez fogja jellemezni a jövőt is.



2.1. ábra. A világ primer energiaszerkezetének alakulása

Az energiaiparoknak sok más erőforrásra is szükségük van, mindenekelőtt területre és vízre, valamint a létesítmények és eszközök létrehozásához sokféle nyersanyagra, és természetesen a működtetésükhöz energiára is. De minden erőforrás hasznosításához elsődleges feltétel szakemberek tudásának és tevékenységének a rendelkezésre állása.

2.1. Számbavétel

Vitathatatlan, hogy a földkéregben található energiahordozók mennyisége véges. Az is tény, hogy egyre nehezebben megközelíthető, és kedvezőtlenebb adottságú szénhidrogén-előfordulásokat kell termelésbe vonni, aminek árfelhajtó hatása van. De ez nem az energiaellátás lehetetlenülését, hanem csak az olcsó energia szerepének végét jelenti (bár már jelenleg sem olcsó), ami kikényszeríti más megoldások keresését. Ez nem új feladat, mert a jelenleg használt energiahordozók pótlására, helyettesítésére már ma is számos lehetőséggel rendelkezünk.

Bizonytalan eleme a jövőre vonatkozó prognózisoknak a figyelembe vett ásványvagyon nagysága. Sok intézmény, pl. az IEA,¹⁷ a NEA¹⁸ a BP-Amoco olajtársaság, az Egyesült Államok Geológiai Szolgálat (USGS) és számos más szervezet és szakértő tesz

¹⁷ International Energy Agency, Nemzetközi Energiaügynökség (OECD-szervezet).

¹⁸ Nuclear Energy Agency, Atomenergia-ügynökség (OECD-szervezet).

közzé statisztikákat a világ energiahordozó-vagyonáról, de ezek adatai között meglehetősen nagy a szórás, egyes kategóriáknál még nagyságrendi különbségek is előfordulnak. A 2.1. táblázat a 2010–2012-ben publikált statisztikák, valamint a Magyar Bányászati és Földtani Hivatal adatai alapján tájékoztató jelleggel áttekintést ad a világ és Magyarország ásványi energiahordozó-vagyonáról, a számok kerekített és becslött értékek.

Az ásványvagyon számbavételének sok a bizonytalansága, hiszen a felszín alatt, ismeretlen körülmények között fekvő, tisztázatlan kiterjedésű és minőségű anyagról kell képet kialakítani. A tudományos ismeretek gyors fejlődése, a geofizikai és geológiai mérési eljárások érzékenységének növekedése ugyan csökkenti a bizonytalanságot, mégis gyakran kell feltételezésekkel élni. A geológiai formációkra a terep alakulásából, fúrólukakból vett kőzetmintákból és a műholdakról készített felvételekről lehet következtetni. A geokémia ma már olyan kis koncentrációk elemzésére is képes, ami a mélyből a felszínre vándorolt kis mennyiségű anyagok nyomainak kimutatásához szükséges. A kőzetmintákban található ősmaradványok előfordulásának gyakoriságából következtetni lehet az adott térségben a tüzelőanyag-képződés valószínűségére. A felszínen, illetve a fúrólukakból vett mintákban végzett fizikai, kémiai, őslénytani és egyéb vizsgálatokból a geológusok következtetni tudnak a földkéreg összetételére, szerkezetére, az abban feltételezhetően lejátszódott térbeli és időbeli mozgásokra. Ezek figyelembevételével elméleti megfontolások és analógiák alapján ki tudják jelölni, hogy mely területeken van remény a keresett energiahordozók előfordulására.

Bár a talaj felszínén végzett vizsgálatok is sok információt nyújtanak, az ezekből levonható következtetések mégis csak közvetettek, és feltételezéseken alapulnak.

Az ilyen területeken a földkéreg szerkezetének részletesebb elemzésére számos geofizikai módszer áll rendelkezésre, amelyek különféle fizikai jellemzők vizsgálatán alapulnak. A gravitációs erőter változásai és anomáliái a felszín alatti kőzetek sűrűségviszonyait érzékeltetik. A robbanással vagy ütéssel kiváltott szeizmikus rezgéshullámok terjedési viszonyaiból a rétegek jellegére és elhelyezkedésére kapunk információt. A hőmérséklet felszíni eloszlásából a hőt fejlesztő oxidálódó (pl. szén) vagy radioaktívan bomló anyagok helyére lehet következtetni. Ugyancsak fontos információkat szolgáltat a hőmérséklet- és nyomáseloszlás a mélység függvényében is. A villamos vezetőképesség a kőzetek anyagán kívül főleg porozitásuktól és folyadéktartalmuktól függ. A spontán kialakuló villamos potenciálokat az előző paramétereken kívül a határfelületi effektusok és a folyadékáramlások is befolyásolják. A mágneses mérések a szuszceptibilitás változásait indikálják, ami főleg fémes alkotók kimutatásához fontos. A kőzetekből kiinduló radioaktív sugárzás vizsgálata a radioaktív anyagok észlelésén kívül a rétegek összetételéről és sűrűségéről ad felvilágosítást, ezért a sugárzások elnyelési és visszaverődési viszonyait a fúrásokba helyezett sugárforrásokkal is vizsgálják. A geofizikusok méréseiket ma már nemcsak a talajszinten vagy a fúrólukakba lebocsátott távmérő műszerekkel (karottázs) végzik, hanem repülőgépekről, hajókról, műholdról is. A geológiai körülmények tisztázásához a hidrológiának is hozzá kell járulnia a mélységbeli vizek mennyiségének, összetételének, állapotjellemzőinek és mozgásának megállapításával.

Meggyőző erejű adatokat csak a földkéregbe mélyített fúrások szolgáltatnak. A leválasztott kőzetdarabokból álló furadékot száraz fúrásnál mechanikai úton emelik ki,

a nagyobb átmérőjű mélyfúrásoknál alkalmazott öblítéses fúrásnál pedig az öblítő folyadékkal alkotott iszap szállítja a felszínre. Az öblítőközeg lehet víz, agyagszuszpenziót tartalmazó iszap, polimer oldat, hab, olaj vagy néha légnemű közeg is. A legegyszerűbb esetben az öblítőközeg az üreges fúrórudazatban áramlik az egyik irányba, a rudazat és a béléscső közötti térben pedig a másikba. A fúrásokat céljuktól függően is megkülönböztetik. A földtanilag ismeretlen terület felépítésének megismerésére szolgál az alapfúrás; a kőzetek tulajdonságainak meghatározására, a geofizikai mérésekhez paraméterfúrást végeznek; a földtani alakulat felépítésének megállapítására több helyen szerkezetkutató fúrást mélyítenek le. Az ásványi nyersanyag jelenlétének kiderítését célozza a felderítő fúrás, az így megtalált lelet készletének megállapítására körülhatároló, más néven előzetes kutató fúrásokat a bányatelepítés tervezéséhez pedig részletes kutatófúrásokat végeznek, végül a folyékony vagy gáznemű anyagok bányászásához szükséges a termelő kutak fúrása. E részletes megkülönböztetésnek azért van jelentősége, mert a fúrás jellegétől függ a rendelkezésre álló információk mennyisége, amin a leletek jelentőségének megítélése és a készletek nagyságának minősítése is múlik. Egy-egy új energiahordozó-forrás kiaknázására vonatkozó energiapolitikai döntés nagymértékben múlik az előzetes felmérés részletességén. Túl korán hozott döntéseknél nemegyszer előfordult, hogy a részletes kutatófúrások nem igazolták az előzetes kutatófúrások eredményeit. A legmegbízhatóbb adatokat a fúrások lyukszelvényeiből vett rétegminták szolgáltatják. Ezeket legszabadosabban az e célra kialakított magfúrókkal lehet nyerni, amelyekkel a mintát a felszínre emelik. A minták ásványtani összetételét petrográfiai vizsgálatokkal, anyagjellemzőit különféle fizikai és kémiai mérésekkel határozzák meg. A kőzetminták vizsgálata a fúrólukban végzett geofizikai mérésekkel együtt alapot ad az ásvány-előfordulás térbeli helyzetének, mennyiségének és minőségének becslésére, ami természetesen annál pontosabb, minél több fúrás adataira támaszkodik. E vizsgálatok nemcsak a készletbecsléshez szükségesek. A tájékozódás a lelet elhelyezkedéséről a kísérőkőzetek között, valamint a leművelést kísérő várható körülmények tisztázása (kísérőkőzetek szilárdsága, nyomásviszonyok változása, a környezetben található víz vagy gáz mozgása stb.) alapvető a kiaknázás technológiájának megválasztásához és a kitermelés gazdaságosságának megítéléséhez is. Mindezek ellenére még a művelés-bevétel során is előfordulnak meglepetések.

A legösszetettebb kutatómunkát a szénhidrogénkészletek felderítése igényli, mert egyrészt ezek nem elkülönült, összefüggő fázist alkotnak, hanem más kőzetekben diszpergáltan helyezkednek el, másrészt a lelőhelyek gyakran sok kilométeres mélységben fekszenek a felszín alatt. A szénlencsék a felszínhez közelebb találhatóak és összefüggő szerkezetet alkotnak, ami megkönnyíti felkutatásukat. A hasadóanyagot nagyobb koncentrációban tartalmazó kőzetek felderítését nagyban előmozdította a radiológiai mérés technika fejlődése a második világháború után. A geotermikus energiaviszonyok tisztázásához sok információt szolgáltatnak a mélyből feltörő vizek, az infravörös fényképfelvételek és főleg a más célból végzett mélyfúrások.

2.1. táblázat. Ásványi energiahordozó-vagyon, kerekített, becslött értékek.

Energiaforrás ¹⁹	Műrevaló ²⁰		Feltételezett	
	Világ	Magyarország	Világ	Magyarország
Konvencionális kőolaj, Gt	240	0,018	500–600	0,209
Nem konvencionális olaj, Gt	170–340	–	1000–2000*	?
Konvencionális földgáz, Tm ³	208	0,056	500	0,3
Nem konvencionális földgáz, Tm ³	50	?	1000–2000**	0,7–0,8****
Szén, Gt	860	8,4	5000	11,5
Hasadóanyag, U bázison Mt	3–210***	0,027	10–700***	0,027
Hasadóanyag, Th bázison Mt	2	–	15–20	–

* CTL és GTL technológiákkal +1500.

** Hidrátban +20–50 Pm³.

*** Tenyésztéssel.

**** A makói lelőhely figyelembevételével.

Az ásványvagyon minősítésére és számbavételére többféle nemzeti és nemzetközi módszer használatos, melyek eltérő módon határozzák meg az osztályozás kritériumait. Az elvégzett földtani kutatás mértékétől függően a bizonyított, a valószínű és a lehetséges készletek sok válfaját különböztetik meg, ami nehezíti az áttekintést. Ráadásul a figyelembe veendő körülmények az idő során is változnak. Így például műrevalónak azt az előfordulást minősítik, ami megfelelő részletességgel meg van kutatva, és a jelenlegi technológiával gazdaságos a kitermelése. A földtani kutatás módszerei változnak, sokféleképp lehet értelmezni, hogy annak eredményei mikor tekintendők megfelelő részletességűnek. A technológia is folyamatosan változik, művelésbe vehetők korábban elérhetetlen előfordulások, pl. a mély tengerek alatt, vagy a sarkvidéken. A gazdaságosság pedig sok tényező függvénye (pl. kamatláb, infláció, diszkonttényező, valutakulcs), a világgpiaci olajár emelkedése növeli a műrevaló vagyont, a kereslet növekedése ösztönzi a földtani kutatást. Zavarhatják a tisztánlátást érdekek is, a szénhidrogén iparokban üzleti érdekek (pl. az 1980-as évek második felében a legtöbb OPEC²¹ ország megnövelte a műrevaló kategóriába sorolt vagyont, mert a termelési kvótákat annak alapján határozták meg). A hasadóanyagoknál hadászati szempontok is közrejátszanak. Vannak törekvések egységesítésre, pl. az ENSZ Európai Gazdasági Bizottsága dolgozott ki ilyen

¹⁹ A mennyiségek jellemzésére a mértékegységek előtt az SI-rendszer (Système International d'Unités, Nemzetközi Mértékegységrendszer) szabványos előtagjait fogjuk alkalmazni, a leggyakrabban használt prefixumok: m (milli) = 10⁻³, k (kilo) = 10³, M (mega) = 10⁶, G (giga) = 10⁹, T (tera) = 10¹², P (peta) = 10¹⁵, E (exa) = 10¹⁸, Z (zeta) = 10²¹, Y (yota) = 10²⁴

²⁰ Nemzetközi szóhasználatban „reserve”, a magyar gyakorlatban ipari vagyon.

²¹ Organization of Petroleum Exporting Countries, Kőolaj Exportáló Országok Szervezete.

rendszert, amit a kőolajipari szervezetek továbbfejlesztettek²² a kritériumok teljesülésének valószínűségét figyelembe véve, de ezek használata még nem vált kizárólagossá. Az Egyesült Államok Geológiai Szolgálat a feltárára váró vagyont valószínűségi kategóriákba sorolja, és az eloszlás átlagát tekinti mértékadónak.

Hazánkban a kutatási eredmények alapján megismert előfordulásokat tekintik földtani vagyonnak, ami megfelel a nemzetközi gyakorlatban használt vagyon (resource) kategóriának. Ezen belül az ismertség foka szerint osztályozzák a készleteket. A kutatókkal még nem igazolt, de földtani meggondolások alapján feltételezett a reménybeli vagyon. A földtani vagyon kitermelésre érdemes része az ipari vagyon, ez a nemzetközi gyakorlatban alkalmazott műrevaló (reserve) kategóriának felel meg.

Műrevalónak a geológiailag részletesen megkutatott és az adott időben rendelkezésre álló technológiákkal gazdaságosan kitermelhető ásványvagyont tekintik. A műrevaló energiahordozó vagyon mértéke gyakran módosul, többnyire nő, mert a földtani kutatások rendszeresen újabb ásványvagyont előfordulásokat tárnak fel, és a technológia fejlődése is bővíti a kitermelhető előfordulások körét. Jelentős a világpiacon határkölség (a még kitermelésre érdemes legkedvezőtlenebb előfordulás költsége) szerepe is, növekedése szintén bővíti a műrevaló vagyon körét. A feltárt ásványvagyont geológiai és technológiai okokból nem lehet teljes mértékben kitermelni. Fluid energiahordozóknál a mélységben uralkodó rétegyomás, valamint az áramlást akadályozó hatások, szilárd bányatermékeknel a munkahely stabilitása és a munkavégzés biztonsága korlátozza a kitermelhetőséget. Ezt jellemzi a kihozatali tényező, amit a felszínre hozható és a mélységben található (in situ) mennyiség arányával értelmeznek. A kihozatali tényező kőolajnál 0,3–0,5, földgáznál 0,8–0,9 és szénél 0,5 körüli érték.

A műrevalónál jóval nagyobb földtani vagyonba a nem műrevaló előfordulásokat is beleértik, ha azok megkutatottsága elég részletes. A reménybeli vagyon meglétét földtani vizsgálatok támasztják alá, de az előfordulás nincs részletesen megkutatva. Az eddigiek sokszorosát teszi ki a feltételezett vagyon, aminek becslése analógiákra és egyéb indikációkra alapul.

Van becslés a Földön a tüzelőanyagokban található karbon mennyiségére, kiindulva abból, hogy az eredeti légkörben főleg szén-dioxid volt, és a jelenlegi oxigéntartalom abból keletkezett a fotoszintézis révén. A légkör 60 Pt-ra becsült oxigénmennyiségéhez ilyen alapon 22,5 Pt karbon tartozik. Ennek kis része az élő szervezetekben, legnagyobb hányada diszpergálva a talajban található, az ásványi tüzelőanyagokban felhalmozódott részét pedig a modell alapján 360 Tt-ra becsülik. Ez két nagyságrenddel több a jelenleg feltételezett összes tüzelőanyag-vagyonnál, a különbség fellelésének kicsi a valószínűsége.

²² Petroleum Resources Management System (PRMS).

2.2. Az időhorizont

A jövő megítélésében alapvető, hogy időben meddig terjedjen ki a vizsgálódásunk. A túl rövid táv elfedi a dilemmákat, a túl nagy távlat bizonytalan talajra vezet, a sci-fi irodalmi műfaj, és nem szakmai elemzés (bár sok minden előbb jelent meg a regényekben, mint a valóságban).

Az időbeli energiaviszonyok meghatározó tényezője, hogyan alakul a gazdasági fejlődés és az életkörülmények helyzete. Elsősorban ezek szabják meg, hogyan változik az energiaszükséglet, és azt hogyan lehet kielégíteni az energiaforrásokból. A prognózisok többnyire a múltbeli viszonyok extrapolálására alapulnak, feltételezve, hogy nem következnek be radikális fejlemények, pl. háborús konfliktus, gazdasági válság, forradalom. Az előrejelzéseket módosítják az energiafelhasználást befolyásoló körülmények, pl. az energiahordozók drágulása, a környezetvédelem előtérbe kerülése, az ellátásbiztonság prioritása. Az energiaszükséglet távlati tervezésénél a bizonytalanságokat többféle fejlődési ütemmel készített változatokkal vesszük figyelembe.

Az energiaellátásban szerepet játszó vállalatok számára különösen fontos kérdés az energiafelhasználás hosszú távú prognózisa. Ettől függ, mire kell üzletpolitikájukkal felkészülni. Ez különösen a nagyberuházások ütemezését befolyásolja, ha túl korán lépnek üzembe, feleslegesen kötnek le tőkét, a túl kései belépés energiahiányt okoz, mindkét következmény jelentős veszteséggel jár.

Az energiaszükséglet többféle energiabázison, különféle műszaki megoldásokkal elégíthető ki, melyek megvalósulása a piaci folyamatoktól függ. A keresletet egyrészt a szükséglet növekedése, másrészt az teremti meg, hogy a műszaki létesítményeket és eszközöket időnként cserélni kell, ahogy fizikailag elhasználódnak, sőt gyakran ennél hamarabb műszaki elavulásuk miatt. A termékcsera a fizetőképes keresletnek megfelelően időben elhúzódva történik, a folyamatot logisztikai görbével lehet jellemezni. A legnagyobb számban használatos fogyasztó berendezések (audiovizuális és számítástechnikai eszközök, gépkocsik stb.) egy évtized alatt elavulnak, a háztartási gépek és ipari hajtások cseréjére két évtizeden belül sor szokott kerülni, a lakóépületek infrastruktúrája és a tömegközlekedés járművei gyakran három évtizedet is megélnek. Hosszabb élettartam jellemzi a legtöbb energiaipari nagylétesítményt (pl. bányák, erőművek, átalakító művek, energiaszállító rendszerek, magisztrális vezetékek), de 50–60 évnél többet csak kivételesen élnek meg.

Az energetikai nagylétesítmények létesítésének időtartama egy évtizedet is meghaladhat, ha a kivitelezés mellett a tervezés, előkészítés, engedélyezés és társadalmi elfogadtatás időszükségletét is figyelembe vesszük. Ezek a létesítmények hosszú élettartamuk révén nemcsak technológiájuk jellegét és színvonalát konzerválják, hanem lassítják az energiaszerkezet módosulását is.

A kínálatot a technikai innováció alakítja, amit az üzleti marketing, és néha még a divat is felerősít. Az innovációt megalapozó kutató-fejlesztő munka legfőbb finanszírozói a nagy iparvállalatok, de a perspektivikus kérdésekben az államok is vállalnak szerepet. Az alapvetően új tudományos felismerések (pl. tranzisztor, DNS, nanotechnika) 1–2 évtizeden belül magától értetődővé válnak, és megindul a gyakorlati alkalmazásuk.

A gazdasági hasznot ígérő találmányok viharos sebességgel terjednek el, ezt napjainkban az informatikában tapasztalhatjuk.

Az új megoldások folyamatosan hódítanak teret, ahogy a berendezések generációcseréje zajlik, de nem zárhatók ki váratlan műszaki vagy gazdasági események. A technikai áttörések egész iparágakat formálhatnak át, idézhető a gőzgép, vagy a belső égésű motorok korszakalkotó karrierje, de korunkból is említhető példák a sugárhajtóművek, az atomreaktorok, a nagy teljesítményű gázturbinák. A lehetőségek megítélésében még a legnagyobb tudósok is tévedhetnek. Példa erre, hogy Rutherford, a világ egyik legelismertebb iskolateremtő atomfizikusa, akinek a tevékenységét Nobel-díj, a Royal Society elnöki tisztsége és sok más elismerés fémjelezte, az 1930-as évek közepén azt nyilatkozta, hogy aki a magenergia gyakorlati alkalmazására gondol, az fantomokat kerget. Egy évtized múlva ledobták az első atombombát, és egy további évtized elteltével üzembe lépett az első atomerőmű.

Az energetikai folyamatok időigényét figyelembe véve 1–2 évtizedre még elég jól megítélhetők a várható változások. A 20 éven túli előretétek annál bizonytalanabb, minél távolabbi az időhorizont. A tudomány jelenlegi ismeretei, a vezető iparvállalatok fejlesztési elképzelései, a mértékadó államok energiapolitikai célkitűzései és a nemzetközi szakmai szervezetek ajánlásai alapján lehet feltételezésekkel élni, amelyekre többféle fejlődési pálya alapozható. De azt már nem lehet megjósolni, milyen szerephez jut 40–50 év múlva a fúzió, a hidrogéngazdaság, a napenergia, vagy milyen lehetőségeket nyit meg az űrtechnika. Az pedig végképp nem látható előre, mit tartogat az energetika számára a részecskefizika, a mikrobiológia, vagy a nanotechnika.

Az energiaforrások lehetőségei alapján valószínűsíthető, hogy a 21. században globálisan nem fenyegeti az emberiséget energiahiány, ami nem zár ki regionális feszültségeket pénzügyi vagy szállítási okokból. Az energiaszükségletet talán a jelenlegi energiaszerkezetben is ki lehetne elégíteni, de annak változása – akár a múltban – a jövőben is elkerülhetetlen. Ennek során egyes energiafajták háttérbe szorulnak, mások teret nyernek, valószínűleg a megújuló és talán az atomenergia. Az is lehet, hogy fellendül az autonóm energiaellátás, helyi erőforrásokra támaszkodva.

Magyarországot a természet nem kényeztette el sem a kimerülő, sem a megújuló energiák vonatkozásában. Kőolaj- és földgáz-előfordulásaink jó minőségűek, de csupán a szükségletek kis hányadának fedezésére elegendőek. Szén- és uránércvagyonunk számottevő, de gyenge minőségűek, mélybányászatuk költséges, ezért versenyképtelenné váltak, egyedül a külfejtéses lignitvagyon tűnik ígéretesnek. Van némi tüzelőanyag tartalékunk (lignit, nem konvencionális földgáz) de ezek kiaknázása nemcsak drága, hanem jelentős fejlesztésre szorul a technológia. Nagy szintkülönbségek híján vízenergia potenciálunk kicsi, a széljárás szeszélyes és ritkán megfelelő erősségű. A napos órák száma nem csekély, de az inszoláció a téli félévben kicsi, pedig akkor van sok energiára szükség. Jelentősek a lehetőségek a biomasszában, de a szétaprózódott mezőgazdasági birtokszerkezet nehezíti ennek kiaknázását. Sok reményt fűznek a geotermikus energiához, de a lehetőségeket termálvizeink viszonylag alacsony hőfoka korlátozza. Energiavagyonunk mostoha helyzetéből következik erős importfüggésünk, amivel együtt jár, hogy az átlagosnál jobban függünk a világgazdaság és világgazdaság

energiaviszonyokat befolyásoló, előre nem látható fejleményeitől, ezért az ellátásbiztonság feltételei megkülönböztetett figyelmet érdemelnek. Ilyen adottságok mellett az elképzelések energetikai önellátásról, vagy energetikai függetlenségről vágyálmok. Jelenlegi 85%-os importfüggésünk néhány százalékos csökkentése lehetséges és célszerű is, de nagymértékű energiabehozatalra a jövőben is rá fogunk szorulni. Az importot sokféle bizonytalanság – műszaki, gazdasági, természeti, időjárási, politikai, társadalmi stb. kockázatok – terheli, ennek ellensúlyozására az energiaellátást minél több lábra kell állítani. Minden kínálkozó lehetőséget célszerű kihasználni, nem okos dolog bármelyiket elvetni, legyen szó atomerőműről, vízerőműről, megújuló energiák hasznosításáról, vagy másról. A lehetőségeket célszerű diverzifikálni, mind energiafajták, mind az energiahordozók beszerzési forrásai és szállítási útvonalai tekintetében. Energiahelyzetünk ezért nemcsak a forrásokkal rendelkező országoktól függ, hanem a szállítási útvonalak miatt közvetlen szomszédainktól is. Ebből a szempontból is fontosak velük a jó politikai és gazdasági kapcsolatok.

2.3. Véget ér az olajkor?

Az emberiség történelmében példátlan, hogy egy nyersanyag felhasználása 100 év alatt ezerszeresére nőjön. A kőolajnak ezt a káprázatos pályáját az biztosította, hogy parlatai váltak a szárazföldi, légi, vízi járműveket hajtó belső égésű motorok kizárólagos üzemanyagaivá. Ezen nemcsak a személy- és áruforgalom hihetetlen bővülése múltott, hanem a hadseregek mobilitása és ütőképessége is. Ennek következtében a kőolajellátás stratégiai kérdéssé vált.

A termelés dinamikus bővülése mellett a 20. századot végigkísérte a félelem, hogy a kőolaj műrevaló vagyona el fog apadni. Ez elsősorban arra alapult, hogy a feltárt vagyon mindvégig mintegy 40 évre biztosította az olajtermelést, és feltételezték, hogy a termelés ezt követően csökkenni fog. A 40 éves ellátottság²³ azonban semmit sem bizonyít, hiszen ez jellemezte a 20. század elejét, amikor a világtermelés néhány millió t volt, és a század végét is, amikor a termelés néhány milliárd t-t tett ki. Vagyis a földtani kutatás elegendő vagyont tudott feltárni az igények ezerszeres növekedéséhez. A két világháború között találtak rá az Arab-félsziget, Texas, Venezuela, Közép-Ázsia olajvagyonára, a második világháború után tárták fel a Szahara, Szibéria, Indonézia területén a lehetőségeket, az olajválság nyomán indult meg a termelés az Északi-tenger, Alaszka, Délkelet-Ázsia olajmezőin, majd később ismertté váltak Nigéria, Angola, Brazília, Kolumbia olajlelőhelyei. Felvethető a gyanú, vajon a 40 év körüli ellátottságot nem az magyarázza, hogy a kőolajkutatásba csak annyit érdemes befektetni, hogy biztosítsa a kutak élettartamára a termelést?

Bár a kőolajkutatás módszerei állandóan fejlődnek, a fúrások találati valószínűsége csökken. A sokféle végzett szárazföldi kutatások sok új termelési lehetőséget nyitottak

²³ A műrevaló vagyon és az éves termelés hányadosa.

meg, de a közel-keletiekhez hasonló gazdagságú előfordulásokat eddig nem találtak. (A Földön mintegy 30 000 termelésbe vont kőolaj-előfordulás van, amiből 1% számít óriásinak,²⁴ ezek szolgáltatják a világtermelés háromnegyedét.) A világ műrevaló kőolajvagyonát jelenleg mintegy 200 Gt-ra teszik, beleértve a földgázból nyerhető cseppfolyós frakciókat is, a konvencionális előfordulásokon túlmenően figyelembe véve 35 Gt nem konvencionális olajat. Ugyan a vagyon gyorsabban nő a kitermelésnél, de a növekmény nagyobb hányadát nem az új felfedezések teszik ki, hanem a meglévő előfordulások kiterjesztése. Mindebből sokan arra a következtetésre jutnak, hogy a kőolajtermelés egy maximum (oil peak) elérése után gyorsan vissza fog esni.

Az Egyesült Államok kőolajtermelésének alakulására King Hubert, amerikai geológus matematikai modellt állított fel, ami szerint a folyamatot deformált haranggörbe írja le. A modell alkalmasnak bizonyult olajmezők, sőt egyes országok viszonyainak jellemzésére. King kiterjesztette elméletét a világ olajtermelésére is, az ezredforduló tájára prognosztizálva a tetőzését. Ez a prognózis azonban nem vált be, az olajcsúcs nem következett be. Ennek ellenére sok kutató fejlesztette tovább az olajcsúcs előrejelzésének elméletét.

Egyes nézetek szerint már túljutottunk az olajcsúcson, ami egy félreértésre alapul. Az olaj részaránya a világ energiamérlegében tényleg csökkenőben van (2.1. ábra), miközben termelésének abszolút értéke nő. A világtermelés a 4 Gt/év-hez közelít, és a következő évtizedekre az előrejelzések további növekedését várják. Az ezt figyelembe vevő prognózisok szerint az olajcsúcs még évtizedekkel előttünk van, jelenleg a legtöbb előrejelzés századunk közepére szól. Az ilyen prognózisok a kitermelhető végső olajvagyon becsléséből indulnak ki. Heves viták tárgya, hogyan alakul a világ végső olajvagyon, amit a különféle elemzések geológiai adatok alapján 400–600 Gt-ra becsülnek. Ebben nemcsak a bizonyított vagyont veszik figyelembe, hanem a valószínű és lehetséges előfordulásokat is, de nem egyértelmű, hogy ebből mekkora kihozatal tételezhető fel.

Az olajcsúcs hatásának elemzésére szervezetek is létrejöttek – pl. az ASPO²⁵ –, gyakran konferenciák vitatják meg a kölcsönhatásokat. Sokan messzemenő következtetéseket vonnak le az olajtermelés várható csökkenéséből: az olaj elkerülhetetlen drágulása világgazdasági válságot fog eredményezni, kikényszeríti az energiapazarló magatartás felhagyását, egyesek szerint még az ipari fejlődés korszakának is véget fog vetni.

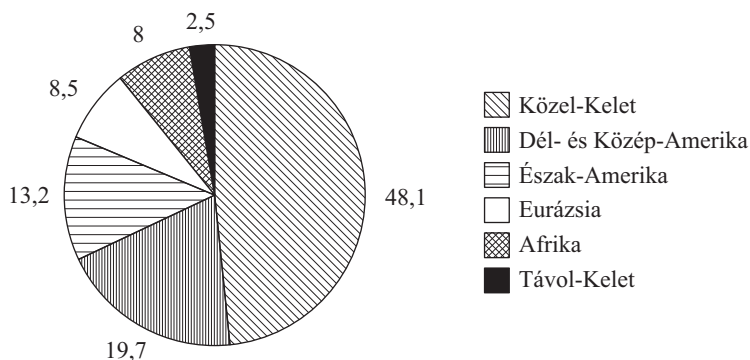
Vitathatatlan, hogy a földkéregben található kőolaj mennyisége véges. Az is tény, hogy egyre nehezebben megközelíthető, és egyre kellemetlenebb körülményekkel jellemzett térségekben (trópusokon, sarkkörön túl, mély tengerek alatt) kell kutatni. A legtöbb újonnan termelésbe vett mezőt kedvezőtlenebb geológiai körülmények (nagyobb mélység, kisebb rezervoárok, gyengébb olajminőség és hasonló hátrányok) jellemezték, és egyre bonyolultabb technológiák alkalmazására került sor. Ezek alapján feltételezhető, hogy

²⁴ Az előfordulások barrelben (bbl) mért vagyona: óriási (super giant): >5 Gbbl; nagyon nagy (giant): 500 Mbbl – 5 Gbbl; nagy (large): >100 Mbbl.

²⁵ Association for the Study of Peak Oil.

a termelés körülményei a korábbiakénál kedvezőtlenebbé válnak, aminek árfelhajtó hatása van.

A kőolajtermelés közeli elapadása viszont megkérdőjelezhető, mivel eddig a kontinensek több száz ígéretes üledékes medencéjének a negyedét kutatták meg olajra, és a mélytengeri hátságok alatti olajvagyon csak napjainkban válik hozzáférhetővé. Nagyok a lehetőségek a kitermelés hatékonyságának növelésében is. A hagyományos módszerekkel a föld mélyén lévő vagyonnak alig harmadát lehet átlagosan felszínre hozni. A kitermelés növelésére vannak bevált módszerek (másodlagos termelés a rétegnyomás növelésével, harmadlagos a mozgékonyság fokozásával), és foglalkoznak a földben visszamaradt vagyon utólagos kiaknázásával is. Nagy előrelépések történtek az extrém nyomás és hőmérséklet uralására, valamint a fűrészi technológiában (irányított fűrés, tengeri eljárások). A műszaki fejlesztéstől várják, hogy az átlagos kitermelési tényező idővel elérje az 50%-ot. Mindez azt támasztja alá, hogy még nem értünk el a hagyományos olajtermelési lehetőségek bővítésének a végére, a konvencionális olajelőfordulások még jó ideig fedezni tudják a szükségletet. Ez azonban nem garancia az olaj biztonságos és folyamatos rendelkezésre állására, amit sok körülmény zavarhat meg. Olajvezeték felrobbantó terrorakció a Közel-Keleten, embargó politikai okokból, tranzitár vitája Oroszország és Ukrajna között, súlyos kapacitáskiesés a termelésben, szállításban, vagy a kőolaj-feldolgozásban, sztrájkok, politikai összecsapások, és sok más példa is említhető a korábbi évtizedek tapasztalataiból. Sérülékennyé teszi a helyzetet, hogy a kőolaj-előfordulások meglehetősen egyenetlenül oszlanak el a Földön, ezt érzékelteti a 2.2. ábra.



2.2. ábra. A világ művealó kőolajvagyonának regionális megoszlása 2011-ben (%-ban)

A művealó vagyonnak mintegy fele a Közel-Keleten található, itt vannak az olajban leggazdagabb országok: Szaúd-Arábia, Kuvait, Arab Emirátusok, Irak, Irán. Jelentősen nőtt Közép- és Dél-Amerika súlya (Venezuela, Mexikó), valamint az afrikai lehetőség (Nigéria, Líbia). Számottevő az észak-amerikai vagyon (Egyesült Államok, Kanada). Euráziában az oroszoknak van sok olaja Szibériában, az Európai Unió részesedése mindösszesen 0,4%, ami jelzi a kiszolgáltatottság magas fokát.

De ha el is fogy az olcsó olaj, sok lehetőség van a pótlására, természetesen drágábban. A magas olajárak kiutak keresésére ösztönzik az emberiséget, a Kasszandra jóslatok aligha fognak beteljesülni. Az emberi leleményesség máris egy sor lehetőséget talált a kőolaj és annak termékeinek helyettesítésére, melyek közül néhány már át is lépte a versenyképesség határát. Ha ezek közül egyes üzemanyagok előnyösebbnek bizonyulnak, a kereslet mérséklődése is csökkenteni fogja a kőolajjéneket, nem csak a magas árak.

2.4. A kőolaj helyettesítése

A kőolaj nagyszámú – néha sok száz – vegyület elege, a természetben változatos formákban található, hígfolyós konzisztenciától a kőzetekhez tapadó szilárd állapotig. A kőolajcsúcsra és a végső vagyona vonatkozó becslések a hagyományos (konvencionális) kőolaj-előfordulásokra vonatkoznak.

A konvencionális kőolaj porózus és permeábilis kőzetekben található, viszonylag kis viszkozitással. Valószínűleg a tengerekben elhalt és a fenékre leülepedett állati és növényi szervezetek, elsősorban egysejtű lények alkotta iszaból, a szapropélból keletkeztek, a kialakuló üledékes kőzetekben. Az átalakulás mikroorganizmusok hatására anaerob bomlás formájában zajlott, a kőzetekben uralkodó magas hőmérséklet és nyomás mellett. A legtöbb kőolajtelepet tengeri eredetű üledékes rétegekben találják. A keletkezett szénhidrogének a földkéregben elvándoroltak, migráltak, míg át nem eresztő boltozattal, vagy vetőréteggel határolt kőolajmegtartó kőzetekbe, „kőolajcsapdába” nem kerültek. A zárórég alatt a kőolaj homokkövek likacsáiban, pórusaiban, mészkövek, palák repedéseiben, szemcsék közötti terekben gyűlt össze. A kőolajtároló kőzetek szilárd anyaggal ki nem töltött térfogatának aránya – a porozitás – 3 és 30% közötti érték. Egy-egy olajtároló réteg vastagsága néhány métertől néhányszor tíz méterig terjedhet. Gyakran egymás felett váltakozva találhatók olajtartalmú rétegek és impermeábilis zárórétegek, az ilyen több rétegből álló zónák vastagsága pár száz métert is elérhet. Kőolaj 8–12 km-nél mélyebben nem fordulhat elő, mert az ottani magas hőmérsékleten a szerves molekulák bomlanának. A szapropél eredete, kora, bomlásának körülményei, a szénhidrogének migrációjának útja és geológiai körülményei nagyon változatosak, ennek következtében a földkéregben található kőolaj-előfordulások anyagi összetétele, és ebből eredően fizikai és kémiai tulajdonságai lelőhelyenként erősen eltérőek. Ez már megjelenésükben is tükröződik, sokféle színű és konzisztenciájú kőolajok, illetve derivátumok fordulnak elő.

A tárolórégben legtöbbször nemcsak kőolaj található, hanem a csökkenő sűrűség függvényében egymás felett többféle közeg rétegződik, melyeket egymástól nem éles határfelületek választanak el, hanem a közegek keverékéből álló átmeneti tartományok. Legfelül gyakran szabad gáz található, nagyrészt metán (esetenként szén-dioxid), de kisebb mennyiségben más gázok is előfordulnak. A gáz alatt az olaj a nyomástól és hőmérséklettől függő mértékben telítve van gázzal, a kitermelésnél a gázhozam m^3/l nagyságrendet is elérhet. A kőolaj a csapdákból gyakran víz felett rétegződve helyezkedik el, ilyenkor emulzió formájában az olajban is található nem jelentéktelen mennyiségű sósvíz. A talajszinten a legtöbb kőolaj hígfolyós, amiben oldott gázok és kolloid

fázisok (főleg emulziók), valamint szilárd anyagok (főleg nagy molekulású gyanta és aszfaltszerű anyagok) található. Az extra nehéz kőolajok légköri viszonyok között gyantaszzerűek, félkemények, sőt néha szilárd állapotúak is lehetnek.

A kőolaj és a kőolajból nyert motorhajtóanyagok helyettesítésére és pótlására jelenleg rendelkezésre álló lehetőségeket a 2.2. táblázat tekinti át.

2.2. táblázat. Lehetőségek a kőolaj és a motorhajtó kőolajtermékek helyettesítésére

Nem konvencionális kőolaj
olajpala, olajhomok

Szintetikus üzemanyagok
szénből, biomasszából, földgázból, más anyagokból

Gáznemű üzemanyagok
PB-gáz, földgáz, hidrogén stb.

Villamos hajtás
vezetékekkel, akkumulátorról, tüzelőanyag-cellával, napelemmel

A kőolaj pótlásának legtermészetesebb útja a nem konvencionális előfordulások (olajpala, olajhomok) kiaknázása. A geológusok szerint ezekben nagyságrenddel több olaj található, mint a konvencionális előfordulásokban, a kihozatali tényező viszont sokkal kisebb, mint a hagyományos olajtermelésre jellemző 0,35–0,4 érték. Mind a föld mélyén található készletekre, mind az iparilag kinyerhető vagyona vonatkozó adatok meglehetősen bizonytalanok. A nem konvencionális előfordulások feltételezett összes vagyona lényegesen eltérő, de minimálisan Tt nagyságrendű becslések található az irodalomban, de nehéz megítélni, mennyi a ténylegesen kinyerhető olaj.

A nagy viszkozitású nem konvencionális olaj szorosan kötődik a kőzetekhez. Az olajhomok (szurokföld) 8–12% erősen viszkozus szénhidrogént tartalmazó agyagos kvarchomok. A benne levő szénhidrogén lehet nehéz, vagy ultranehez olaj, kátrány, bitumen vagy aszfalt. A feltételezések szerint az ilyen előfordulásokban a kőolaj a lebomlás stádiumában van, és a könnyű frakcióit már elvesztette. Az olajpala lamináris szerkezetű, törésfelületekkel tagolt, nagy molekulású szilárd szénhidrogéneket tartalmazó márgás anyag. Ez a tavak és tengerek területén leülepedett kőzet ásványi sók és algák lerakódásával képződött, ezek mennyisége és aránya az idő során kialakult ingadozásoknak megfelelően változik. Az olajpala tulajdonképp egy háromdimenziós nagy molekulású, oldhatatlan polimer – a kerogén – tartja össze, eltávolítása esetén a többi komponensből por marad vissza. A kerogénmolekulákat oxigén és kén keresztkötések egyetlen óriásmolekula mátrixává kapcsolják össze. A feltételezések szerint a kerogén a kőolajképződés fázisában lévő anyag. A kőolaj pótlása palaolajjal az első világháború óta többször felvetődött. Az 1920-as években az Egyesült Államokban a félelem a kőolajtermelés beszűkülésétől vérmes reményeket keltett, meg is indult az ígéretes olajpala területek felvásárlása, de a texasi olajforrások felfedezése lelohasztotta a boomot. Komo-lyan készültek az olajpala kiaknázására a második világháború idején, majd az olajkrízist

követően is. A döntő körülmény – a versenyképesség – a századfordulót követő években tette lehetővé az olajat és gázt tartalmazó kőzetek nagy léptékű kiaknázását.

Egy t olajhomokból 60–130 kg, 1 t olajpalából 30–200 kg szénhidrogént lehet kinyerni. A feltárt és a már kifejlesztett technológiákkal művelhető nem konvencionális vagyonból a becslések szerint ~800 Gt homokolaj nyerhető ki, az elméleti palaolaj vagyont ~900 Gt-ra becsülik.

Olajhomok sokfelé található, a világ feltárt olajpala vagyónának 80%-a az Egyesült Államokban van. Az USGS bejelentése szerint a Sziklás Hegységben pár száz méteres mélységben található olajpala formáció több olajat tartalmaz, mint a közel-keleti olajvagyon.

Szinte észrevétlenül lépte át a nem konvencionális olajtermelés a versenyképesség küszöbét. Kanadában (Athabasca-völgy) hatalmas üzemek létesültek a kátrányos homok kiaknázására, Venezuelában (Orinoco-medence) kitermelik az extranehez olajat, az Egyesült Államokban pedig jelentős mennyiséget ért el a palaolaj-termelés. Egyre több térségben készülnek a nem konvencionális előfordulások kiaknázására.

Sok módszer van olaj szintetikus előállítására szénből, illetve földgázból. A CTL,²⁶ illetve GTL²⁷ technológiákkal kinyerhető mintegy 1500 Gt olaj. A második világháborúban Németország és Japán szénből gyártott benzint, az olajembargó éveiben így fedezte üzemanyag-szükségletét a Dél-afrikai Köztársaság. Más lehetőségek is vannak folyékony üzemanyag nyerésére, pl. sokféle karbontartalmú anyagból – még szén-dioxidból is – előállítható metanol, amit sokan tekintenek a jövő üzemanyagának.

Az olajkrízis évtizede az olaj helyettesítésére irányuló kutatások nagy fellendülésének korszaka volt. Ekkor indult el a bioüzemanyagok alkalmazása is. Haszonnövényekből előállított bioetanol és biodízel kereskedelmi forgalomban van, de heves viták bontakoztak ki ennek következményéről a világ élelmiszerellátására és annak drágulására. Ennek ellenére terjed a bioüzemanyagok használata, az igazi megoldást a fejlesztés alatt álló másodlagos technológiák fogják szolgáltatni, melyek a termés helyett a növényi hulladékokat dolgozzák fel. A horizonton feltűntek a mikrobiológiai folyamatokra alapuló harmadlagos eljárások is.

A járművek hajtására nem csak folyékony üzemanyagok alkalmasak. Üzemszerűen alkalmazzák a PB-gázt (LPG²⁸) és a nagynyomású földgázt (CNG²⁹), kipróbált eljárások vannak belső égésű motorok hajtására hidrogénnel, üzembe kerültek az első villamos hajtású gépkocsik (az áramforrás lehet akkumulátor, tüzelőanyag-cella, napelem), a tüzelőanyag-cellák üzemanyaga lehet kúthálózatból vett metanol, vagy hidrogén is. Nincs tehát semmi ok vészharangok félreverésére, az olajkorszak nem fog hirtelen véget érni, és az olaj drágulása nem fenyegeti katasztrófával az emberiséget (egyszer-kétszer már át is éltünk ugrásszerű árnövekedést). A fokozatos áremelkedés azonban elkerülhetetlennek tűnik.

²⁶ Coal to liquid, szénből folyékony üzemanyag.

²⁷ Gas to liquid, gázból folyékony üzemanyag.

²⁸ Liquefied petroleum gas, folyékony olajgáz (propán-bután).

²⁹ Compressed natural gas.

A még gazdaságosan kitermelhető hazai konvencionális vagyunkat ~10 Mt-ra becsülik. Ha csak ebből kellene a hazai szükségletet fedezni, másfél év után bezárhatnánk a boltot. A néhol található kisméretű olajpala-előfordulások nem tekinthetők számottevő energiaforrásnak. A kőolajtermékek korlátozott helyettesítésére a bioüzemanyagok és a gáznemű üzemanyagok jöhetnek számításba. Üzemanyag-szükségletünk alapvető forrása belátható ideig a kőolajimport marad.

2.5. Tüzelőanyag-ellátás

2.5.1. Biomassza

Az ókori birodalmak kialakulásáig a gyűjtögetett biomassza (rözse, háztartási hulladék, tehénlepény stb.) maradt a legfőbb tüzelőanyag. Ennek közvetlen eltüzelése jelenleg az erősen elmaradt ázsiai és afrikai térségekre jellemző. Idővel az erdős térségekben a biomasszán belül a tűzifa domináns szerephez jutott, az teszi ki az eltüzelte biomassza legnagyobb részét. A korszerű tüzelőanyagok háttérbe szorították a biomassza közvetlen eltüzelését, e helyett alkalmazását megújuló energiaforrásként feldolgozott formában ösztönzik.

A biomassza energetikai célú hasznosításában a legnagyobb szerepe az erdőknek van. A szárazföldek egyharmadát borítják erdők, a világ élőfa készletét 310 milliárd köbméterre becsülik, lombos fáknál a 20 cm-nél, fenyőfáknál az 5 cm-nél nagyobb törzsátmérőt véve figyelembe. Az erdők összetett élőhelyek, a biodiverzitás fenntartásának fontos térségei és a legfontosabb szervesanyag-termelők. Részt vesznek a klíma alakításában, kiszűrlik a légszennyezőket, lekötik a szén-dioxidot és oxigént bocsátanak ki. A fák a CO₂-t 40–60 évre kötik meg, majd a fák pusztulása utáni bomlás a szén-dioxid nagy részét ismét kibocsátja a légkörbe. Az erdőknek szabályozó szerepe van a vízháztartásban, megakadályozzák a talajeróziót és mérséklék az árvízveszélyt.

A világ erdőállománya csökken, aminek kedvezőtlen ökológiai következménye nemcsak lokálisan (humuszképződés elmaradása, talajerózió) érvényesül, hanem globálisan is, többek között a CO₂-elnyelőképesség csökkenése következtében. Sok kormány (a magyar is) ösztönzi az erdősítést, néhány fejlett ország szén-dioxid-kibocsátásának kívánt csökkentését erdősítéssel helyettesíti fejlődő országokban. A Kiotói megállapodás is betudja szén-dioxid-csökkentésnek az erdőtelepítést, de ez nem ellensúlyozza az ellentétes gazdasági érdekeket (faértékesítés, termőföld nyeresése). Sajnos sokfelé rablógazdálkodás folyik az erdőkkel, amire nemcsak a dél-amerikai esőerdők kipusztítása szolgált példát, hanem a privatizálás során szerzett hazai törpe erdőbirtokok kíméletlen tarvágása is. Intő tanulság, hogy sok száz év alatt sem sikerült megállítani azt az eróziót, ami az erdők kipusztítása után a Földközi-tenger keleti medencéjének számos országában bekövetkezett. Szakszerű erdőgazdálkodással biztosítható az erdők egyensúlya. A kivágott fák pótlása általában néhány évtizedbe telik, de vannak gyorsan fejlődő fajták is. Természetesen az erdőtelepítést a hasznosítási körülményeken kívül természetvédelmi és rekreációs szempontok is befolyásolják.

A fa kitűnő tüzelőanyag, jól tárolható, alacsony – 300 °C körüli – hőmérsékleten gyullad, hamutartalma kicsi. Kedvezőtlen viszont alacsony fűtőértéke, ami légszáraz állapotban ~15 MJ/kg, az égési hőmérséklete is alacsony, és hátrányos magas nedvességtartalma. Az élőfa nedvességtartalma 50–60%, a frissen döntött fái 40–50%, ami légszáraz állapotban 15–25%-ra csökken. A fákat lehetőleg télen vágják ki, amikor a nedvkeringés szünetel, hogy minél kisebb legyen a nedvességtartalom.

A fa nemcsak tüzelőanyag, hanem fontos nyersanyag is. Ipari feldolgozása (papír-, bútór-, építőipar stb.) több haszonnal jár, mint eltüzelése, ezért az erdők éves szaporulatának csak az ilyen célokra nem hasznosuló részét indokolt tüzelőanyagként hasznosítani. Jelenleg a világon évente kitermelt 2,5 Gm³ fából a felhasznált tűzifa becsült mennyisége 1 Gm³ (fűtőértéke ~10 EJ). Vannak javaslatok ennek növelésére 100 EJ-ra, ha az erdők szaporulatának 25%-át erre használnák, ami azonban teljesen kivihetetlen.

A kultúrnövények termékének kereken a felét teszik ki a hulladékok. Ezek egy része közvetlenül a begyűjtésből származik (szalma, torzsa, kukoricaszár és -csutka, napraforgószár, szőlővenyige és -szár, kóró, rözse), más részük feldolgozás mellékterméke (hüvely, rizshéj, napraforgóhéj, kenderpozdorja stb.). Jelentős hányadukat nagyobb haszonnal lehet felhasználni takarmányozásra, a talaj termőerejének fokozására vagy ipari nyersanyagként (gyógyszer-, növényvédőszer-, papírgyártásra), az ezek után fennmaradó hányad fordítható energetikai célokra. Az állattartás hulladékaiból is lehet energetikai hasznot húzni (pl. biogáz), néhol a szárított trágya is fontos tüzelőanyag. A világ mezőgazdasági hulladékainak energiaértékét ~30 EJ-ra becsülik.

A biomasszába sorolhatók a természetes eredetű szerves anyagok feldolgozott formában is. Ilyenek a fa ipari feldolgozásának hulladékai (faapríték, fűrészpor, faforgács, használt szerfa, bútoripari hulladék stb.), bontott vagy leselejtezett anyagok (bányafa, vasúti talpfa, építőipari zsuzóanyag, csomagolóanyag, bontott szerkezeti anyag), vegyipari hulladékok (olajpogácsa, savgyanta, hulladékbőr), az eltüzelhető háztartási szerves szemét, a sok szerves anyagot tartalmazó kommunális és ipari (pl. papíripari fekete víz) szennyvizek is.

A háztartási szemét összetétele az életmódtól függ, minél magasabb az életszínvonal, annál nagyobb a fűtőértéket csökkentő szervesetlen anyag (fémek, üveg), valamint a műanyagok aránya. Az utóbbiak égéstermékei között veszélyes anyagok (pl. klorvegyületek, dioxinok, dibenzofuránok, PAH) is előfordulhatnak. Ennek elkerülésére előtérbe kerülnek a gyorsan lebomló környezetbarát műanyagok. Magyarországon naponta átlagosan 1 kg 7,5–8 MJ/kg fűtőértékű háztartási szemét képződik lakosonként. A szemétnek mintegy 85%-át összegyűjtik, és annak 83%-át hulladéklerakókba helyezik. Az Európai Unió előírja a biológiailag lebomló szervesanyag-tartalom csökkentését a lerakással ártalmatlanított szemétben, ami további kezelést igényel, pl. depóniagáz kinyerését.

Vannak kezdeményezések a szemétből megfelelő előkészítő műveletek (darabos anyagok kiszűrése, mágneses vaseltávolítás, porítás, összenyomás, szárítás) után olyan hulladékból nyert pellet (RDF³⁰) készítésére, melyek hagyományos tüzelőberendezésekben, más tüzelőanyagokkal keverve vagy önállóan is eltüzelhetők. A szelektív

³⁰ Refuse derived fuel.

szemégyűjtés a hulladékok újrahasznosításán és a környezetszennyezés csökkentésén kívül elősegíti az energetikai hasznosíthatóság javítását is.

A Föld energetikai célra számításba vehető biomassza-produkciójának jelentős hányadát gyakorlati, vagy gazdasági okokból ténylegesen nem lehet figyelembe venni. Aligha jöhetnek pl. számításba a nehezen megközelíthető erdőségek, a diszperz hulladékok munkaiigényes begyűjtése és költséges szállítása sem mindig fizetődik ki. Optimistán megítélve a világ tűzifatermelésének 100 EJ körüli lehetőségét, a mezőgazdasági hulladékokban rejlő ~30 EJ-nyi potenciált és a kifejezetten energetikai célokat szolgáló energiaültetvények és energiafarmok 50–100 EJ-ra becsülhető hozamát, a biomasszával fedezhető energiaszükséglet lehetősége 180–230 EJ/év-re adódik. Ez az emberiség jelenlegi tüzelőanyag-felhasználásának is csupán egy részét fedezné, a távlati igényeknek pedig csupán kis hányadát tenné ki.

A jelenlegi magyar biomassza hasznosítást lényegében a tűzifa kitermelése jelenti. Racionális erdőgazdálkodással a hazai 1,6 Mha-nyi erdőterületünkől (~150 M m³) évente 2–2,5 Mt faanyag termelhető ki, de ennek jó részét szerkezeti anyagként, valamint papír-, bútór-, építőipari és egyéb célokra hasznosítják. A tűzifa hazai felhasználása évente 1 Mm³ körül mozog, a hasznosítás a lakossági fűtés területéről az erőművi villamosenergia-fejlesztés irányába tolódott el, de a gáz- és távfűtés drágulásának hatására – főleg a vidéki településeken – ismét népszerűvé vált a fafűtés.

A teljes magyar mezőgazdasági biomassza-produkció szervesanyag-tartalma 800–900 PJ/év energiaértéket reprezentál, aminek a fele melléktermék. Levonva a takarmányozásra, talajerőpótlásra és ipari nyersanyagként hasznosított hányadot, a melléktermékek 20–30%-a (80–130 PJ) lenne hasznosítható energetikai célra. A hulladékok begyűjtésének azonban nagy akadálya a rendkívül szétaprózódott magyar birtokszerkezet (a becslések szerint a mezőgazdasági produkció energiaértékének fele marad betakarítatlanul). Bizonyos területnagyság felett a szállítás energiaszükséglete meghaladhatja a begyűjtött biomassza energiaértékét, a tevékenység energetikailag értelmetlenné válik. A reális lehetőségeket összesítve a hazai biomasszából kinyerhető energia mintegy 100–150 PJ/év-re tehető, ami a jelenlegi energiafelhasználásunk 10–15%-a.

A megújuló energiahasznosítás előtérbe kerülése a biomassza felhasználásának új perspektívát nyitott. Az energiabázis bővítésére mezőgazdaságilag nem hasznosított területeken energiaültetvények (energiaplantációk) kialakítását javasolják. Erre számításba jöhetnek fásszárú és lágyszárú növények. A legigéretesebb gyorsan növekvő fafajták a mérsékelt égövön a nyár, fűz, éger és kőris, trópusokon a szikomor-, eukaliptusz-, édes gumifa. Magyarországon különösen az akácot tartják reménykeltőnek, mint jól sarjadó, gyorsan növekvő, rövid vágásfordulójú, 4–5 év alatt kitermelhető fafajtát, ami a hazai körülmények között a legnagyobb hozamú keményfa. Betegségeknek ellenálló, kevés károsítója van, és jelentős előnyei vannak az erdőgazdálkodás számára is (növeli a talaj nitrogéntartalmát, gazdagítja a szervesanyag- és nedvességtartalmat, csökkenti a talaj lemosódását). Hazai körülmények között a hektáronként és évenként várható növekmény akácánál 5–11 t, nemes nyárnál 13–15 t és fűzfánál 35 t-ig is felmehet.

Lágyszárú-energiaültetvényeket nagy hozamú, gyorsan növekvő növényekkel (pl. energiafű, kínai nád, energiakender) célszerű kialakítani, átlagosan ~25 GJ bruttó ener-

giakihozatal képzelhető el egy hektáron. A fotoszintézis nagyobb hatásfoka érhető el vízkultúrákban (energiafarmok), a legígéretesebbek az algák, a fitoplankton, a tengeri hínár és a vízi jácint. A vizes kultúrák kialakítása főleg tengerpartokon ígéretes, első-sorban algák termesztésével, a tengeri moszatok növekedése a napi 0,5 m-t is elérheti.

2.5.2. Szén

A középkor vége felé lépett színre a következő évszázadok sztárja, a szén. A termelékenyen, nagy mennyiségben biztosítható, koncentráltan nagy hőt és magas hőmérsékletet szolgáltató tüzelőanyag verhetetlennek tűnt. Ez lett az ipari forradalom energiabázisa, szenet tüzeltek a gyárak, a vasút, a gőzhajók, a jómódú polgárok. Szénbázison fejlődött ki a vegyipar, a villamosenergia-ipar, a gázgyártás. A 19. században százszorosára nőtt a világ széntermelése.

A földkéregben felhalmozódott széntelepek hosszú földtani korszakok alatt alakultak ki. A szénképződés első fázisában, a tözegesedés során a víz alá került elhalt növények nagy molekulái kisebbekre bomlottak le, mikroorganizmusok hatására lejátszódó, hosszú ideig tartó biokémiai folyamatokban (digenezis). A bomlástermékek egy része gázalakban, vagy vizes oldatban távozott, a visszamaradó szilárd maradék a tőzeg. A növényi szerkezet annál inkább felismerhető, minél fiatalabb a tőzeg. A tőzeglápok évente átlagosan 1 mm-el vastagodnak jelenleg is, aminek a feltétele kereken 2 mm-nyi növényi hulladék leülepedése.

Magát a tőzeget is használják tüzelőanyagként, de nagy nedvességtartalma miatt az égéshő nagyrészt a nedvesség elpárologtatását fedezi. Ezért frissen fejtve, nyersen – amikor nedvességtartalma 85–90%-ot is elér – nem is tüzelhető el. Levegőn szárítva a nedvességtartalom 20–25%-ra csökken, ekkor fűtőértéke 15–17 MJ/kg, ami erősen függ a hamutartalomtól. Kis sűrűsége (0,1–0,8 kg/dm³) és nagy nedvességtartalma miatt nem érdemes szállítani, ezért tüzelőanyagként az előfordulás helyén hasznosítják. A világ ismert tőzegovonjának becsült hőértéke néhány ZJ, a termelése pedig EJ nagyságrendű. A kis mennyiségben előforduló hazai tőzeg nem energetikai célokat szolgál.

A szénülés a szénképződés második fázisa, amin a süllyedés és a hordalékok következtében a földkéreg mélyébe került tőzeg megy keresztül a hegyképző erők hatására (geokémiai átalakulás). Egy méteres tőzegrétegből mintegy 20 cm-es szénréteg képződik. A Föld mélyében uralkodó nagy nyomás és magas hőmérséklet hatására a kisebb molekulású vegyületek polimerizálódtak és kondenzálódtak, így alakult ki a kőszén nagy molekulású, bonyolult vegyületekből álló kolloidszerkezete. A kőszén 5000-nél nagyobb molekulású szénvázas szerves vegyületekből áll. A szénülés lefolyása függ az egyes geológiai korok növényi anyagának összetételétől és az adott helyen a földkéregben uralkodó viszonyoktól. Minél hosszabb ideig tartott a szénülés, annál nagyobb az elemi összetételben a karbon aránya a többi összetevő rovására, amivel arányosan nő a fűtőérték is. A szénülés körülményeinek változatossága következtében a szének összetétele, kémiai és fizikai tulajdonságai nagyon eltérőek, szinte telephelyről telephelyre változnak.

A széntelepek elsősorban olyan medencékben alakultak ki, ahova a környezetből kevés egyéb hordalék került. E medencék az idők során lassan lesüllyedtek, fölérjük más rétegek rakódtak le, majd újabb tözegképződés után a folyamat megismétlődött, így egymás felett több szénréteg jött létre. A széntelepek egy része a hegységek előtti medencékben keletkezett, többnyire kisszámú, de vastag rétegekben, melyek vastagsága 100 m-t is elérhet. Az egykori tengerek partján kialakuló széntelepek viszont sok egymás felett elhelyezkedő vékony rétegből állnak, szélsőséges esetben több száz réteg is előfordul, a szénmedence mélységbeli kiterjedése több kilométert is elérhet. E rétegek vastagsága néhány méter, köztük a víz és a szél transzportfolyamataiból lerakódó üledékes kőzet (mészkö, homokkő, pala) helyezkedik el. A későbbi kőzetmozgások helyenként megzavarták a széntelepek eredeti helyzetét, törések, vetődések, eltolódások és dölések alakultak ki, nehezítve mind a kutatás, mind a termelés körülményeit.

A szenek tulajdonságai erősen függenek a koruktól. A legidősebbek a feketeszenek, a barnaszenek jóval később képződtek. Elhatárolásuk megállapodás kérdése, az európai gyakorlat 24 MJ/kg égéshőnél jelöli ki a két széntípus határát. Mindkét szénfajtának sokféle változatát különböztetik meg, melyek egymástól fűtőértékben, kémiai összetételben, fizikai és tüzeléstechnikai tulajdonságokban térnek el.

A Földön a legbőségesebben rendelkezésre álló fosszilis tüzelőanyag a szén, ez teszi ki a műrevaló tüzelőanyag-vagyon háromnegyedét és a feltételezett vagyonnak több mint 80%-át. A világ műrevaló szénvagyon 1 Tt közelében van, a feltételezett és reménybeli ennek a sokszorosa, szemben a 3,5 Gt/év jelenlegi termeléssel, vagyis az ismert vagyon is több száz éves ellátottságot biztosít, a reménybeli készletek pedig ennek sokszorosát. A szén esetében nem a vagyon kimerülése gond, hanem kiaknázásának növelése. A vagyon 52%-a feketeszen, a többi barnaszén és lignit, de a fűtőérték szerinti megoszlásban a feketeszen részesedése 83%. A vagyonbecslés feketeszennél az 1200 m-nél nem mélyebben fekvő és 30 cm-nél vastagabb rétegekre terjed ki, barnaszénél és lignitnél 500 m-es mélységig veszik figyelembe az előfordulásokat. A számbavételt nehezíti, hogy nagyon eltérő fűtőértékű szenek mennyiségét kell összegezni. Ennek áthidalására vezették be az egyezményes tüzelőanyag (ETA³¹) fogalmát.

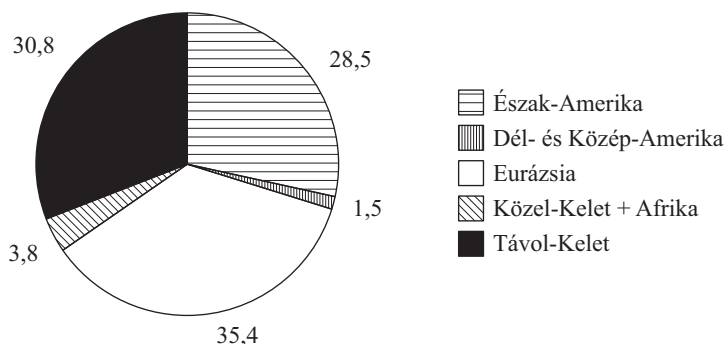
A szénelőfordulások sokkal egyenletesebben oszlanak el a Földön, mint az olaj (2.3. ábra), az Európai Unió részesedése (6,5%) is számottevő.

Magyarországon többfelé vannak széntelepek, feketeszen a Mecsekben, barnaszenek a Vértes, Gerecse, Pilis előterében, az Ajkai- és a Nógrádi-medencében, valamint a Sajó-völgyben. A Dunántúlon (Várpalota, Torony, Hidas) és a Mátra-Bükk déli peremén (Visonta, Bükkábrány) nem nagy mélységben lignit³² található. Szénelőfordulásaink fiatalok, ezért minőségük gyenge, fűtőértékük alacsony, magas hamu és nedvességtartalom, nagy kéntartalom csökkenti a használati értéket, tüzeléstechnikai tulajdonságaik sem mindig kedvezőek, eltüzelésükhöz az átlagnál költségesebb és karbantartás-

³¹ Egyezményes tüzelőanyag (29,3 MJ/kg = 7000 kal/kg fűtőértékű szén).

³² A magyar szóhasználatban nagyon alacsony fűtőértékű, fás szerkezetű tüzelőanyag, de sokfelé a barnaszenet nevezik így.

igényesebb tüzelőberendezések szükségesek. A mélyművelés termelési adottságai is kedvezőtlenek, a legtöbb szénlencse viszonylag nagy mélységben található, vékony és szabdalt rétegekben, esetenként erősen megdőlvé és vetődésekkel megzavarva. A termelés munkaiigényes, ezért költséges, a munkakörülmények mostohák. A részletesen megkutatott ipari szénvagyon 1 Gt körül mozog, de a mélybányákban a termelés nem fizetődik ki, csak a külfejtéssel kitermelhető lignit maradt versenyképes, ennek jövőjét egyrészt az erőmű-építési szándékok, másrészt a lakossági elfogadtatás határozza meg.



2.3. ábra. A műrevaló szénvagyon regionális megoszlása százalékban (2011-es állapot)

A 20. században a szén szerepe csökkent, egyrészt gazdasági, másrészt környezetvédelmi okokból. A fejlett országokban a szénhasználat nagyrészt a villamosenergia-termelés és a kohászat területére szorult vissza, mivel e nagyfogyasztók könnyebben ellensúlyozzák a káros kibocsátásokat. A legnagyobb szénfogyasztók az erőművek, ezek hasznosítják a világon kibányászott szénnek több mint felét. Különösen kedvezőtlenül alakult a szén szerepe az Európai Unióban, a környezetvédelem fokozott előtérbe helyezése miatt. A szén-dioxid-kibocsátás csökkentésének prioritása főleg a szénfelhasználást sújtja, a szén-dioxid kvóták kötelező megvétele hátrányosan fogja befolyásolni a szén-erőmű építést és üzemeltetést. Más régiókban nem ilyen mostoha a szén sorsa.

2010-ben a világ energiaszükségletének 29%-át fedezték szénrel. A világtermelés a 21. század első évtizedének végén feketeszénből 3,6 Gt, barnaszénből és lignitből 0,9 Gt volt. Az egyezményes tüzelőanyagokra átszámított összesített értékek 3,1–3,3 Gt ETA körül mozognak, ami 2,1–2,3 Gt olajegyenértéknek³³ felel meg. A szénbányászat nagy erőfeszítéseket tesz piacának visszaszerzésére, főleg a tiszta szén technológiák fejlesztésétől remélnek új lehetőségeket. A CCS³⁴ technológiák fejlesztését az emissziós kvóták árának csökkenése (néhány EUR/tCO₂-re) erősen visszavetette, mert olcsóbb az emissziós jog megvásárlása, mint az új technológiák várható költsége.

³³ oe, a fűtőérték alapján számított egyenértékű olajmennyiség.

³⁴ Carbon capture and storage, karbonkivonás és -tárolás.

2.5.3. Szénhidrogének

A kőolaj térhódítása nyomán az ipari országokban a könnyebben kezelhető folyékony tüzelőanyagok váltak népszerűvé. A tüzelőolajok lepárlási termékek, azok gázolaj és más desztillációs párlatok különböző arányú keverékei. A fűtőolajok a lepárlás magas dermedéspontú és nagy viszkozitású maradványai. A tüzelő- és fűtőolajok piacuk legnagyobb részét elvesztették, amikor a kőolaj erősen megdrágult.

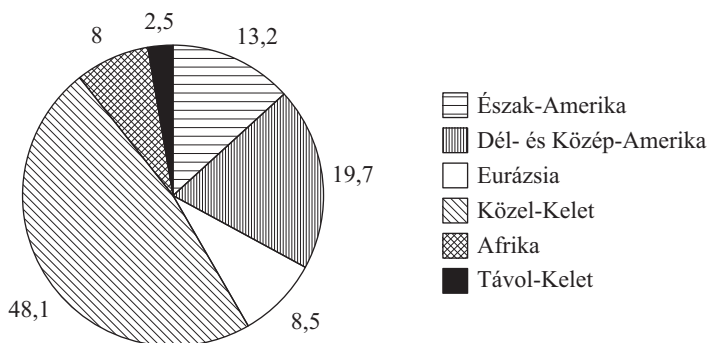
Az energiagazdálkodásban új fejezetet nyitott a vezetékes gázszolgáltatás, kezdetben a szén kigázosításával nyert városi gázzal. Ahogy a 20. század közepe táján kifejlődött a távolsági gázszállítás technikája, elindult világhódító útjára a földgáz, teljesen kiszorítva a városi gázt. Előnyei révén (könnyen kezelhető, tiszta és környezetbarát) a földgáz lett a legkedveltebb tüzelőanyag, ezért részaránya az energiamérlegben folyamatosan és gyorsan nő. Elsősorban hőfejlesztésre használják a tüzelőberendezések teljes teljesítményspektrumában, sokirányúan hasznosítható vegyipari alapanyag és megjelent a motorhajtó üzemanyagok között is. A földgázfelhasználás gyors bővülésének fontos hajtóereje a villamosenergia-termelés, mert erőművet földgázbázison lehet a legolcsóbban és a legrövidebb idő alatt építeni.

Megoszlanak a vélemények, hogy a szapropélból a földgáz a kőolajéhoz hasonló körülmények között, de attól függetlenül keletkezett-e, vagy pedig a kőolaj lebomlásából származik. A földgázletelek mintegy harmada a kőolajjal társulva fordul elő, a felette elhelyezkedő gázsapkában, illetve a rezervoárban uralkodó hőmérséklettől és nyomástól függően a kőolajban oldva. A földgáz-előfordulások kétharmada a kőolajtól függetlenül található, de a kőolajéhoz hasonló geológiai formációkban. A földkéregben található gázelőfordulások összetétele nagyon változatos, energetikai szempontból földgáznak a túlnyomóan szénhidrogén-tartalmúakat tekintik. A legfontosabb alkotóelem a metán, de a földgáz gyakran tartalmaz más szénhidrogéneket és egyéb gázokat is. A földgázban található a kőzetekből elragadott lebegő szilárd részecskék is, valamint vízgőz. A nem éghető alkotók csökkentik a földgáz fűtőértékét, ha nagy mennyiségű éghetetlen gázzal elegyedik a szénhidrogén, indokolt az alacsony fűtőértékű, vagy gyenge minőségű földgáz megnevezés. A 20–30 térfogatszázaléknál kevesebb éghetőt tartalmazó gázokat inertnek, az ~50%-nál többet tartalmazókat inertesnek nevezik.

A statisztikák a világ műrevaló földgázvagyona 2011-ben 206 Tm³-t mutattak ki, a végső konvencionális földgázvagyont 800 Tm³-re becsülik, de ettől lényegesen eltérő adatok is találhatóak az irodalomban. A regionális megoszlás (2.4. ábra) egyenletesebb, mint a kőolajé, a legjelentősebb Oroszország, Irán és Katar részesedése. Az Európai Unió helyzete 0,9%-os részesedésével valamivel kedvezőbb, mint az olaj esetében, az Északi-tenger norvég és brit felségterületek alatti előfordulásai számottevőek, de fogyóban vannak.

Jelenleg a világ földgáztermelése 3 Tm³/év, csúcsát néhány évtizeddel későbbre prognosztizálták, mint az olajét, mivel a műrevaló vagyona nagy. A prognózisokat azonban alapjában ingatta meg a palagáztermelés beindulása.

A magyarországi földgáz-előfordulásokról az első írásos emlék a 18. század elejéről maradt fenn. Kisebb előfordulások hasznosítására már a 19. században sor került, de



2.4. ábra. A műrevaló földgázvagyon regionális megoszlása (%)

a nagyobb arányú kiaknázás csak jóval később indult meg. Az első jelentős földgáz-előfordulást 1958-ban tárták fel Hajdúszoboszlónál, Algyőn a termelés 1966-ban indult meg, számottevő még a vagyon Pusztaföldvár és Szank térségében. Fontos lelőhelyek más térségekben (Battonya, Endrőd, Kardoskút, Kiskunhalas, Kisújszállás, Lovászi, Nagykőrű, Orosháza, Szeghalom, Üllés) is vannak. A túlnyomórészt pliocénkori homokkőrétegekben talált szénhidrogének metántartalma 89–96%. A magyar szénhidrogénvagyon nagyobbik hányada földgáz, a műrevaló mennyiség kerekén 90 Mrd m³, de abból csak ~32 Mrd m³-t tartanak gazdaságosan kitermelhetőnek. Ez a mennyiség mintegy háromévi felhasználásunknak felel meg. A gyenge földgáz hazai mennyiségét ~31 Gm³-re becsülik.

A földgáz kitűnő tüzelőanyag és vegyipari alapanyag, de egyik szerepében sem pótolhatatlan, erre számos megoldással rendelkezünk.

2.3. táblázat. A földgáz tüzelőanyag-helyettesítési lehetőségei

Nem konvencionális földgáz

gázpala, gázhomok, szénelőfordulások metántartalma, alapkőzetek metántartalma, geonómásos zónák, tengeri metánhidrátok

Szintetikus földgáz

szénből, biomasszából

Más éghető gázok

gyártott gázok
biogáz, hulladékgáz ipari folyamatokból

Hőfejlesztési lehetőségek

földhő, napenergia, villamos hőfejlesztés (ellenállás-, ív-, indukciós, dielektromos, infravörös fűtés) stb.

A földgáz helyettesítésére sokkal több a lehetőség, mint a kőolajnál, belátható időn belül zavaroktól nem kell tartani. Első helyen a nem konvencionális földgázforrások jöhetnek számításba, a becslések szerint ezekben a vagyon sokszorososa a konvencionálisnak.

A nem konvencionális vagyon zömét kőzetekhez kötött metán-előfordulások (gázpala, gázhomok, anyakőzetben felhalmozódott metán) teszik ki. Ilyen kőzetek sokféle található. A homokgáz és palagáz termelése néhány éve indult el az Egyesült Államokban, ami váratlan sikerre vezetett. Ma már ezzel fedezik az ország szükségletének közel felét, és célul tűzték ki az import teljes kiváltását, sőt idővel az USA exportórként is megjelenhet a piacon. A palagáz színre lépése teljesen összekuszálta a gázpiacot, a korábbi prognózisok érvényüket veszítették, és az árak is megínogtak. Európában is többféle (pl. Franciaországban, Lengyelországban) tervezik a palagáz termelését.

A nem konvencionális földgáz-előfordulások közül a legrégebben a feketeszén-medencék metántartalmának hasznosításával foglalkoznak. Ennek koncentrációja a mélységtől, a hőmérséklettől és a szén korától függően 5–60 m³/t szén, nagy léptékű kiaknázása többféle meg is kezdődött, váltakozó sikerrel. A kinyerhető metán mennyiségét 20–50 Tm³-re becsülik, a mecseki feketeszénből kinyerhető mennyiség ~150 Gm³.

Üledékes medencék alapkőzetében többféle mutattak ki metánt. A készletek felmérését nehezíti, hogy a metán a nagy mélységben, többféle formában (póruskitöltő gáz, elnyelt gáz, szilárd oldat, kondenzátum, kritikus állapotú gáz, szuperkritikus közeg) fordulhat elő. A medencealjon az anyakőzetben található gáz mennyisége nagy, kitermelhetősége kutatás tárgya. A Makói-árokban, nagy mélységben, a kőzetekhez erősen kötődő hatalmas gázvagyont tételeznek fel, amire elsőként műholdfelvételek hívták fel a figyelmet. A média lelkesen számolt be a kínálózó nagy lehetőségről, egy sáman teljes főpapi ornátusban, az előírt varázsszövegekkel le is foglalta azt a magyar nép számára. A magyar nép azonban egyelőre nem tud mit kezdeni ezzel a vagyonnal, mert megoldatlan, hogyan lehet kiszabadítani a gázmolekulákat a kőzetből, hogyan lehet a gáz számára átjárhatóvá tenni a kőzetet, és hogyan lehet azt a sok ezer méteres mélységből a felszínre hozni. A nagy várakozás nagy csalódásba fordult, amikor az olajtársaságok (MOL, Exxon) kihátráltak a kutatás finanszírozásából, mert az eredmények nem támasztották alá a várakozásokat. Nagy távlatban azonban nem reménytelen ennek a 400–600 Gm³-re becsült vagyonnak a hasznosítása.

A geonyomásos zónákban rendkívül nagy nyomású vízben oldott metán hasznosításának lehetősége még tisztázatlan. Újabbban a figyelem a tengerek fenekén sokféle található metángázhidrátok felé fordult, ezek a víz kristályszerkezetébe ágyazott metán klatrátok 10 °C alatt és 20 bar felett stabilak. Főleg tengeri árokban és a kontinentális talapzatokban található nagy mennyiségben, összesített metántartalmukat minimálisan 5–50 Pm³-re becsülik. Japánban technológiát fejlesztettek ki a termelésre.

Metán szintetikusán is előállítható szénből vagy biomasszából, de helyettesíthető bármely más légnemű tüzelőanyaggal, pl. gyártott gázokkal (gyenge gáz, biogáz, városi gáz, hidrogén stb.). Megjegyzendő, hogy a hőfejlesztés nemcsak más tüzelőanyaggal oldható meg, hanem más eljárások alkalmazásával is, pl. villamos hőfejlesztéssel, hőszivattyúval, hulladékhővel, napenergiával, geotermikus energiával. A földgáz a vegyiparban is helyettesíthető más alapanyagokkal, bár az átállás időbe telik és költséges.

2.6. Meddig elég az atomenergia?

Urán a Föld felszínén nagy mennyiségben fordul elő, de meglehetősen szétszórta, átlagos koncentrációja 3–4 ppm.³⁵ Az urán-előfordulások jellege változatos, az uránásványok száma mintegy 150. Az uránérctelepek egy része magmatikus differenciálódás során dúsult fel, az átlagosnál nagyobb uránkoncentráció a magma megszilárdulása közben alakult ki savanyú kőzetekben, főleg gránitokban, mértéke néhányszor 100 ppm is lehet. A kőzetképződés során is dúsult az urán az ércképző elemekkel és más illékony alkotókkal a maradék olvadékban, és főleg a hidrotermikus járatokban ülepedett le, a kialakult telérekben az uránkoncentráció néhány százalékot is elérhet. Üledékes dúsulás is előfordult, az urántartalmú kőzetek eróziója során az urán vizes oldatba lépve eltávozott az anyakőzetből, majd kicsapódva konglomerátumokban, görgeteges kőzetekben másodlagosan feldúsult. A másodlagos dúsulás számára különösen kedvezőek voltak a körülmények a fluviális eredetű homokkőrétegekből álló medencékben (ez jellemzi a hazai előfordulásokat Permi homokkőben). Kőzetekben előszeretettel válik ki az urán szerves anyagok vagy pirit redukáló hatására, így néhány százalékos koncentrációjú lencsék és telérek is képződtek. Az erózió során kioldott és vizes oldatban maradó urán végső soron a tengerbe jut, valószínűleg így alakult ki a tengerek átlagosan 3,3 ppb³⁶ uránkoncentrációja.

Az uránbányászat a nagy urán-oxid-tartalmú ércet kinyerésére indult meg, a kongói uránszurok telepeken az U_3O_8 -koncentráció a 60%-ot is elérte. A gazdag előfordulások kimerülésével egyre soványabb ércet termelésére tértek át, jelenleg elsősorban a gránitokban, homokkővekben, konglomerátumokban feldúsult ércelőfordulásokat aknázzák ki, ezekben a 0,3–0,1%-os koncentrációt is műrevalónak tekintik. A hazai uránbányászat már a 0,1%-nál soványabb ércet kitermelésére is rákényszerült, méghozzá 1000 m alatti előfordulásokból. Néhol az uránt melléktermékként termelik ki, arany-, réz-, foszfátércsekkel vagy olajjalával.

Konvencionálisnak tekintik az urán-előfordulást, ha azt fő termékként termelik ki, hagyományos bányászati módszerrel (külfejtéssel vagy mélyműveléssel), illetve kilúgozással, továbbá ha az urán lényeges mellékterméke más bányászott ércnek (pl. arany- vagy rézbányászatnál). A nem konvencionális előfordulások közé sorolják a nagyon alacsony koncentrációjú, ma gazdaságosan nem kitermelhető lehetőségeket (pl. a tengervízben), valamint a lényegtelen melléktermékeket (pl. foszfátokban, monacithomokban, szénben, lignitben, fekete palában).

Elterjedt nézet, hogy az uránvagyon csak néhány évtizedre elég, ezért az atomenergiának nincs perspektívája. Zavarja a tisztánlátást, hogy a világ éves urántermelése kisebb az atomerőművek éves szükségleténél. A különbséget a készletekből, a kiégett üzemanyagok újrafeldolgozásából és a leszerelt atomfegyverekből kinyert hasadóanyagokból fedezik. A jelenlegi atomerőművekben a természetes uránban 0,7%-os arányban található

³⁵ Pars pro million, g/t.

³⁶ Pars pro billion, mg/t.

235-ös izotópot hasznosítják, gyalázatosan rossz határfokkal. Ilyen technológiával a világ műrevaló uránvagyonának energiaértéke a kőolajvagyonének harmadát is alig éri el, ezzel az atomenergia valóban nem jelenthet korszakalkotó megoldást.

Szerencsére a helyzet sokkal kedvezőbb, a nukleáris energetika üzemanyagbázisa szinte kimeríthetetlen. Az uránvagyon a megkutatottság mértéke és a kitermelés költsége szerint kategorizálva tartják nyilván. Az adatok hosszú ideig katonai titkot képeztek, ami egyes régiókban még ma sem oldódott teljesen fel, ezért az adatokat jelentős bizonytalanság terheli. Jelenleg azon érceket minősítik kiaknázásra érdemesnek, melyek termelési költsége, fémuránra vetítve, alatta marad a 40 USD/t határköltségnek.

A világnak a műrevalóság határánál olcsóbban kitermelhető vagyona a becslések szerint ~3 Mt (ami ~2,8 ZJ energiaértéknek felel meg a jelenlegi termikus reaktorokban hasznosítva). A 40–130 USD/kg kategóriában feltárt vagyon 5–6 Mt, a járulékos vagyon 4–6 Mt-ra becsülik és a 130 USD/kg-nál olcsóbb reménybeli vagyon 10–12 Mt-ra teszik. Megjegyzendő, hogy a szárazföldek felszínének eddig csupán 8–10%-át kutatták meg uránra. A nem konvencionális előfordulások közül kiemelkedik a foszfátokban található 50–200 ppm koncentrációjú ~22 Mt uránmennyiség, amit a műtrágya melléktermékeként 40–90 USD/kg-ért lehetne kitermelni, valamint a szénhamuban található 200–1000 ppm koncentrációjú urán. Az uránsók koncentrációja az óceánokban 3,3 ppb, ami kb. 5 Gt uránnak felel meg, termelési költsége mintegy 340 USD/kg U lenne. Ennél jóval olcsóbb technológia kifejlesztésén japán kutatók dolgoznak.

Mód van a jelenlegi uránvagyon kihasználásának hatékonyabbá tételére is, a ^{235}U izotóp nagyobb arányban nyerhető ki az ércből, ha a dúsítással az elszegényítést a jelenlegi 0,25–0,3% alá csökkentik. A hasznosítás fokozható a fűtőelemek nagyobb mértékű „kiegésével”, ígéretes fejlesztés folyik a termikus reaktorok jelenlegi 40 MWnap/kg körüli kiegészítésének 50%-os növelésére. A kiegészített fűtőelemek újrafeldolgozásával a hasadóképes alkotók kinyerhetők és visszavezethetők az energiatermelésbe. A nagy lehetőség a potenciál 70–80-szorosára történő növelése, amire az ad módot, hogy a természetes uránnak több mint 99%-át kitevő 238-as izotópot hasadóanyaggá (239-es plutóniummá) lehet átalakítani. Ilyen átalakulás kismértékben minden reaktorban zajlik, de bizonyos típusokban (gyorsreaktorok) a tenyésztés tömeges. Az urán- és plutónium-oxidok keverékéből készített fűtőelemeket (MOX³⁷) néhány reaktortípusban már a gyakorlatban is használják.

Tovább bővíthető a hasadóanyag-bázis a tóriumércekkel, mert a 232-es Th izotóp gyorsreaktorokban hasadóképes 233-as uránná alakítható. A világ tóriumvagyon a többszöröse az uránvagyonnak, legnagyobb mennyiségben a monacithomokban fordul elő. Az ismert vagyon 2 Mt körül mozog, a reménybeli 15–20 Mt. Erőteljesen folyik a tórium-üzemanyaggal működő technológia fejlesztése. Az üzemanyagciklus költsége valószínűleg meghaladja az uránbázisút, de előny, hogy nem keletkezik plutónium, ami megkönnyíti a hulladékkezelést és a fegyvergyártásra irányuló proliferáció elkerülését.

³⁷ Mixed oxide.

Mindezek háttérében folynak a kutatások a fúzió megvalósítására, aminek üzemanyagául a hidrogén izotópjai (deutérium, trícium) szolgálnak. A természetes vizekben a deutérium tömegaránya 0,15%, minden 6700-ik hidrogénatom deutérium, a tengervíz szinte korlátlan deutériumforrást biztosít. A deutériumok közötti fúziós reakcióknál enyhébb feltételek között valósítható meg a deutérium-trícium reakció, ehhez a tríciumot nagy mennyiségben lítiumból lehet előállítani, aminek előfordulási valószínűsége sokkal kisebb a deutériuménál. Néhány percig önfenntartó D-T fúziót már sikerült előállítani az Európai Unió kísérleti berendezésében (JET³⁸). Nemzetközi együttműködésben épül Franciaországban az ITER³⁹ nevű kísérleti berendezés, amitől a fúziós erőmű technikai megvalósíthatóságának igazolását remélik. Azonban a megoldandó technikai problémák miatt siker esetén sem remélik ilyen erőmű tényleges megvalósulását századunk első felében.

Magyarországon többfelé találtak sovány uránércet. A Mecsekben fél évszázadon keresztül folyt uránbányászat, de a kibányászott érc koncentrációja fokozatosan csökkent, és azt egyre mélyebbről kellett felszínre hozni. Végül a termelést be kellett fejezni, mert az önköltség a világpiaci ár kétszeresére-háromszorosára nőtt. Egy ausztrál cég (Wildhorse) koncessziót szerzett uránkutatásra a Mecsekben, és optimista nyilatkozatokat bocsát ki a termelés kilátásáról, ennek realitása még nem ítéhető meg.

2.7. És a geotermikus energia?

Bolygónk tömege óriási mennyiségű hőt tárol, mértékét még becsülni is nehéz. A számítások szerint a kereken 7000 km átmérőjű mag belsejében 20 kbar-t meghaladó nyomás és több ezer fokos hőmérséklet uralkodik. A magot a környezettől a mintegy 2900 km vastag földköpeny zárja el, ami rossz hővezető lévén termikusan szigetel. A köpeny legkülső, 30–50 km vastag rétege, a kéreg helyenként – főleg üledékes medencéknél – rendhagyó módon elvékonyodik, ezek a geotermikus anomáliák helyei. A Pannon-medencében például csak 24–30 km a kéreg vastagsága, ennek következtében hazánk területének 70%-án kivételesek a geotermikus viszonyok, és gyakoriak a hévforrások. A kutatófúrások már 15 km-es mélységet is elértek, de a gyakorlati tevékenység számára csak a legfelső, néhány km-es réteg jöhet számításba. Ugyanis ~3 km alatt olyan kicsi a kőzetek porozitása és átteresztőképessége, hogy a kedvező termikus viszonyok ellenére sem nyerhető termálvíz. A köpeny felső tartományában 100–120 km-es mélységben magmafészkekben található a magma, ami gázokkal és gőzökkel telített, 1000–1400 °C hőmérsékletű kőzetolvadék. A magma hatása különösen az aktív övezetekben jelentős, a kontinentális táblák találkozásánál, a vulkáni tevékenység térségeiben, vagy ahol a magma előrenyomult a felszín irányába. A nagy nyomás alatt levő magmát a hegyképző erők aktiválják, ezek hatására a földkéreg gyenge zónáiban, kéreghibákon,

³⁸ Joint European Torus, Közös Európai Tórusz.

³⁹ International Thermonuclear Experimental Reactor, Nemzetközi Kísérleti Termonukleáris Reaktor.

töréseken és hasadékokon keresztül felfele nyomul az olvadt vagy plasztikus állapotú kőzet, de csak a vulkánokon keresztül jut ki a felszínre, egyébként megreked a kéreg alatt. A földkéregben tárolt hőnek csak egy része származik hőátszármaztatás révén a magmából. Másik forrása a kőzetekben előforduló radioaktív anyagok bomláshője, a ^{238}U , ^{232}Th és ^{40}K szerepe a legjelentősebb.

A hő a mélyebb rétegekből egyrészt hővezetéssel, másrészt hőhordozókban jut a felszínre. A hővezetés révén érzékelhető teljesítmény a talajszinten néhányszor 10 és 100 mW/m^2 nagyságrendben mozog, átlagértéke 60 mW/m^2 , különösen aktív térségekben 300–500 mW/m^2 -t is elérhet. A hővezetés olyan kis teljesítménysűrűséget szolgáltat, aminek gyakorlati hasznosítására nincs reális lehetőség. Ugyancsak kizárható a vulkánizmusban feltörő forró láva és agresszív gázok hasznosítása is. Érdemi alkalmazásra legnagyobb részben a kedvező hidrogeológiai körülmények között kialakuló rezervoárokból felszínre kerülő vízben tárolt energia tarthat számot, ami azonban a geotermikus energiának csupán morzsáit képviseli. A víz halmazállapota a kőzetekben uralkodó hőmérséklet és nyomásviszonyoktól függ. A víz hőfokától függően alacsony ($<90\text{ }^\circ\text{C}$), közepes ($90\text{--}150\text{ }^\circ\text{C}$) és magas ($>150\text{ }^\circ\text{C}$) hőmérsékletű előfordulásokat különböztetnek meg. A magas hőmérséklet kedvez a gőzfejlődésnek, különösen átnemeresztő záróréteg alatt fekvő akviferekben. A víz, illetve gőz esetenként természetes forrásokban tör fel, az energetikai hasznosítás azonban többnyire fűtő kutakra támaszkodik. A hő használati értéke hőfokfüggő, a nagy entalpiájú hőhordozóval villamos energiát lehet fejleszteni, az alacsonyabb hőmérsékleten rendelkezésre állóval csak alacsonyabb hőmérsékletű hőigények (fűtés, szárítás, mezőgazdaság, balneológia stb.) fedezhetők. Hőszivattyúval a hőtároló közegek hőtartalma közvetlenül is hasznosítható, termálvíz közvetítése nélkül, alacsony hőmérséklettartományban is.

Sokak nézetével ellentétben a geotermikus energia nem megújuló, hiszen forrásai csökkennek (a magma hűl, a radioaktív anyagok bomlanak), de emberi időléptékhez mérve ez a csökkenés nagyon lassú. A rezervoárok hőmérsékletét a hővezetés a magmából és a radioaktív anyagok bomláshője fenntartja, de a hőt a felszínre szállító termálvíz hozama csökkenhet, sőt utánpótlás híján teljesen el is apadhat.

A Föld hasznosítható hőmennyiségére nagyon bizonytalanok a becslések, közvetlen kinyerésére elsősorban az átlagosnál nagyobb hőáramú térségekben érdemes törekedni, ahol az víz jelenlétével párosul. A kéregnek az energiahasznosítás szempontjából figyelmet érdemlő felszínközeli néhány km-es övezetében a termikus viszonyokat a kőzetek összetétele és szerkezete szabja meg. Különösen fontos a kőzetek porozitása, ami befolyásolja mind a hővezető képességet, mind a víz-, illetve gőztárolás lehetőségét. Nagy mennyiségű és egymással közlekedő pórusok vagy üregek esetében vizet tározó akviferek is kialakulhatnak. A felszíntől lefele a hőmérséklet 100 m-enként átlagosan $3\text{ }^\circ\text{C}$ -kal emelkedik, nagyobb mélységben a hőfokgradiens nő, ugyancsak gyorsabb a hőfoknövekedés a magmaközeli térségekben. A nyomásnövekedés 10 m-enként átlagosan 1 bar, de az akviferek kiegyenlítő szerepe módosítja a nyomáseloszlást, főleg ha felszíne felett gőzpárna alakul ki.

A hasznosítható geotermikus hőmennyiségre nagyon eltérő és bizonytalan becslések vannak, attól függően, hogy a kéreg milyen vastag rétegét veszik figyelembe. A felszíni

hőáram a Föld teljes felszínére 32 TW, ami évenként 1 ZJ energiának a szállítását jelenti, ennek mintegy fele a radioaktív anyagok bomláshője. Mivel a hővezetéssel felszínre jutó hő teljesítménysűrűsége túl kicsi a hasznosításhoz, energia kinyerésére csak az átlagosnál jóval nagyobb hőáramú térségekben érdemes törekedni, ha hőhordozóként víz is rendelkezésre áll. Termálvizet főleg akviferekből lehet nyerni, de ezek megcsapolása csak egy kisebb tartomány hőtartalmát juttatja a felszínre. A kis entalpiájú rezervoárookban a hőmérséklet 100–120 °C-ot nem halad meg, a magyar előfordulások legnagyobb részét ilyenek. Magas entalpiájú hőhordozó viszonylag ritkán fordul elő, főleg fiatal vulkanikus övezetekben, ahol a magma behatolása nyomán magas hőmérsékletű akviferek alakultak ki, esetleg gőzdómok alatt. A nagy entalpiájú folyékony halmazállapotú rezervoárookban a vízhőmérséklet 200–380 °C. A gőzdómokban a nyomás 30–35 bar, a hőmérséklet 150–250 °C. Egyes mély üledékes kőzetek alatt 150–180 °C-os, rendkívül nagy nyomású (280–560 bar) forró víz található, gyakran oldott metánt is tartalmaz (1–2 m³gáz/m³víz). E geonyomásos zónák kiaknázhatósága azonban technikailag még megoldatlan.

A rezervoárok energiaviszonyainak időbeli alakulását sok körülmény befolyásolja. Egyes forrásoknál a hőmérséklet és a nyomás nagyon hosszú ideig állandó, másoknál váratlanul jelentős csökkenés tapasztalható. Főleg a nagy entalpiájú hőhordozók hőmérséklete csökken az idő múltával, a rezervoárok hasznosíthatósága véges. A kis entalpiájú előfordulásoknál a kőzetekbe beszűrődő csapadék, vagy a víz visszanyomása pótolhatja a forrás hozamát. A hazai termálvíz-előfordulások rétegenergiája csökkenőben van, lehet, hogy a klímaváltozás következtében kicsi a vízutánpótlás. Emberi beavatkozások is megzavarhatják a vízrendszer egyensúlyát, amit példáz a bányászat túlzott vízkiemelésének hatása a Dunántúlon az 1970-es években.

A geotermikus energia felhasználásának hazai lehetőségei kedvezőek. A felső pannon homokkő a világ legnagyobb hévíztárolója. Hévízeink jelentős részére a szénhidrogén-kutatás során bukkantak, a meddő fűrészek harmada mutatott ki termálvizet. Geológusaink véleménye szerint az ország területének 42%-án található 33 °C-nál melegebb hévíz, ahol a kőzetek porozitása és permeabilitása kedvező. A számítások szerint a 3 km vastag kéregben található 30 °C-nál melegebb földtani termálvízkészletünk (2,500–4000 km³) energiapotenciálja 600 EJ, de ennek csak egy nagyon kis része aknázható ki. (A becslések 50–60 PJ/év-re teszik a reálisan kiaknázható lehetőséget.)

2.8. Ahol a cipő szorít

Az energiaiparoknak sok más erőforrásra is szükségük van, azok felmérését és összehasonlítását gyakran a WELMM⁴⁰ csoportosításban végzik. E szerint a víz, az energia, a terület, a nyersanyagok és az emberi erőforrások a legfontosabbak.

Az igénybevett természeti erőforrások egyike a víz, ami egyre fontosabb szerephez jut és használata egyre költségesebbé válik. A világ jelentős részén nem áll rendelkezésre

⁴⁰ Water, energy, land, material, manpower.

elegendő mennyiségben édesvíz, de a növekvő vízfelhasználás miatt a bővebben ellátott térségek is takarékosabb vízgazdálkodásra kényszerülnek. A vízigényes technológiák megérzik, hogy a víz drágul, és rendelkezésre állása szűkül.

Friss vizet a legkisebb ráfordítással a felszíni vizekből és a talajvíz magasabban fekvő rétegeiből lehet nyerni. Ezekből a víznyerés lehetősége főleg a csapadékviszonyoktól függ. A rohamosan növekvő vízfelhasználás miatt e források világszerte beszűkülően vannak, előtérbe kerülnek a talaj mélyebb rétegeiben fekvő vízbázisok, a rétegvíz és a karsztvíz. Az utánpótlást meghaladó, túlzott vízkivétel regionális zavarokat okozhat települések ivóvízellátásában, technológiai vízigények kielégítésében és a növények vízháztartásában. A bányászat túlzott vízkiemelésének hatására pl. zavarok támadtak a Dunántúl vízellátásában, és a hévizeknek is csökkent nemcsak a hozama, hanem a hőmérséklete is. Mindez csak részben regenerálódott a vízemelés korlátozása után. Az emberi tevékenység már a víz globális körforgását is érinti, valószínűsítik, hogy az üvegházhatás lényeges változásokat okoz a csapadék mennyiségében és eloszlásában. A víztakarékosság érdekében előtérbe került az ismételt felhasználás, technológiai célú visszaforgatáshoz víztisztítással, hűtéshez a hűtőtornyos visszahűtéssel.

Sok energetikai technológiai folyamathoz van szükség vízre, a világ vízfelhasználásának 15%-át az energetika igényli. Legnagyobb mennyiségben a vizet berendezések hűtésére használják, pl. erőművek, belső égésű motorok, kemencék, kémiai reaktorok esetében. A legnagyobb vízfelhasználók a kondenzációs hőerőművek. A hőkörfolyamat végén a gőz lecsapatásához sok hőt kell elvonni a kondenzátorokból, aminek a leg egyszerűbb és leggazdaságosabb módja a frissvíz-hűtés, a frissvíz-hűtésű hőerőművek veszik igénybe országunk ipari vízfogyasztásának 60–70%-át. Ha nincs hulladékhő-hasznosítás vagy kapcsolt hőszolgáltatás, frissvíz-hűtésnél 1 GW kiadott teljesítményhez hagyományos hőerőműveknek 30–35 m³/mp hűtővízre van szükségük, atomerőműveknek 45–50 m³/mp-re. A több GW-os, nagy hőerőművek vízkivétele összemérhető a kisebb folyók vízhozamával. Ehhez folyókból, vagy tavakból vonnak el hideg vizet, amit felmelegedve visszavezetnek. A hűtővíz visszavezetésének helyét, értékét, módját, valamint megengedett hőmérsékletét előírások szabályozzák.

A víz folyékony halmazállapotban vízerőgépek (turbínák, szivattyúk), valamint a legtöbb hidraulikus szállító- és erőátviteli rendszer, illetve munkagép munkaközege. Gőz állapotban sokféle készüléket és hőerőgépeket működtet, a legnagyobbak közé tartoznak az erőművek és a nagy hajók gőzturbinái. Hőhordozóként fontos szerepet játszik a hőátzármaztatásban, fűtési rendszerekben, melegvíz-ellátásban, ipari hőellátásban, klíma-berendezésekben.

Kiterjedten alkalmazzák a kémiai technológiákban oldószerként és kémiai reagensként, pl. mint hidrogénforrást szintézisgázgyártáshoz, reformáláshoz, krakkoláshoz, vagy űrhajók üzemanyagának előállításához. Vízigényesek a kőolaj-finomítók is, 1 t kőolaj feldolgozásához átlagosan 10–20 t víz szükséges. Sok más feladathoz is használják, a hidraulikus szállításhoz, a szénosztályozó mosáshoz és flotálásnál hordozóanyag, a hidraulikus fejtésnél munkaeszköz, atomreaktorokban moderátor stb.

A felszín alatti vizekből a legnagyobb mennyiséget a bányászat emeli ki. Mélyműveléses szénbányáinkból 1 t szén kitermelésével átlagosan 3,8 m³ víz kiemelése páro-

sult, az egyes bányáknál a tényleges mérték erősen függött a bányatárság alakulásától, a hidrogeológiai adottságoktól és a termelés volumenétől. A külfejtések, valamint az uránbányászat fajlagos vízkiemelése szerényebb. Javítja a megítélést, hogy a bányákból kiemelt víz mintegy 10%-át ivóvízellátásra, és technológiai célokra is hasznosították, a többi azonban felhasználatlanul elfolyt. Különösen sok vizet kell kiemelni a művelés lehetőségének biztosításához a rétegvíz szintje alatti szénbányákból. A Dunántúl karsztvízszintje alatti eocénbányák nem mindegyikénél sikerült a vízmentesítést biztosítani, ezért néhány bányát (Nagyegyházát és Mány egy részét) véglegesen elárasztotta a víz. A túlhajtott szén- (és bauxit-) bányászat hatására az 1980-as években a kiterjedt dunántúli karsztvízrendszer egyensúlya megbomlott, a víz szintje lesüllyedt és módosultak a vízmozgások a talajban. A vízrendszer megszívása nyomán nemcsak számos forrás és kút apadt el, hanem a kapcsolódó hévízforrások hozama és hőmérséklete is csökkent (pl. Budapesten és Hévízen). A károsodás megállítása radikális intézkedéseket követelt, korlátozták a termelés mértékét, sőt bányabezárásra is sor került. Az olajtermelés só- és olajtartalmú rétegvíz kiemelésével jár, amit egyes kőolajmezőkön visszajuttatnak a rezervoárba a felhajtóerő növelésére, így fokozva a kőolaj-kihozatalt (másodlagos kitermelés).

Erőforrás-hasznosításnak tekinthető a területfelhasználás is. Az energetika nagylétesítményei és különösen a szállítóhálózatai sok területet foglalnak el. A fejlett országokban egyre nehezebb területet szerezni az energetika létesítményeinek, erről nemcsak az urbanizáció tehet, számottevő az ipartelepek helyfoglalása, a közlekedési útvonalak, nyomvonalas létesítmények területfoglalása, a hulladéklerakók (meddőhányók, zagyterek, szemétkerakók) területfelhasználása, a lebetonozott felületek részarányának növekedése. Hosszadalmas jogi és pénzügyi viták nehezítik a szükséges területek kisajátítását, települések félelmei és környezetük károsításával kapcsolatos aggályai akadályozzák a szükséges engedélyek megszerzését. Nem egy példa van arra (főleg erőművek esetében), hogy a beruházó elállt a megvalósítástól, mert az egyeztetési és engedélyezési eljárás elhúzódása nemcsak elviselhetetlen költséget okozott, hanem a létesítés célja is okafogyottá vált. A megújuló energiahasznosítás is jelentős felület lefedésével jár, a viszonyokat érzékelteti a 2.4. táblázat. Az energiaszállítás létesítményei is sok területet foglalnak el, a villamos szabadvezetékek a védőtávolság figyelembevételével az ország területének 1–1,5%-át fedik le, a szénhidrogén-szállító csővezetékek helyigénye is tetemes.

2.4. táblázat. Villamosenergia-fejlesztés területigénye

Energiaforrás	Területigény, m ² /kW
Hőerőmű	1–4*
Vízenergiaerőmű	10–30
Naperőmű	50–100
Szélenergiaerőműtelep	100–200
Energiaültetvény	4000–6000

* Bánya nélkül.

A területfelhasználás megítélése függ az igénybe vett föld értékétől, valamint attól, hogy a használat okozta változás irreverzibilis, vagy reverzibilis. Az utóbbi esetben a hatás időtartama is lényeges. A zöldmezős beruházásokhoz a szükséges területet ki kell sajátítani. Ez a pénzügyi és jogi vitákkal járó folyamat néha évekig is elhúzódhat. De nemcsak gazdasági, vagy szakmai szempontok befolyásolják a viszonyokat, hanem társadalmi körülmények is. Mind gyakrabban hiúsulnak meg zöldmezős beruházások a lakosság ellenkezése miatt, többnyire környezetvédelmi aggályokra, vagy az ingatlanok értékvesztésére hivatkozva. Az ilyen akcióknál az érdekérvényesítést jelentősen befolyásolhatják a személyi összeköttetések.

A terület igénybevétele gyakran a termőföld károsodásával vagy elvesztésével jár. A termőföld fizikai, kémiai, mikrobiológiai kölcsönhatások során létrejövő erőforrás. Kialakulása hosszú időt igényel, de gyorsan tönkretelhető káros anyagokkal, vagy kedvezőtlen hatásokkal. Többnyire feltétele a beruházási engedélyeknek a használat befejeztekor a terület eredeti állapotának helyreállítása.

A területfoglalásban jelentős az energetika szerepe. A létesítmények telepítése, valamint a nagy terület megbolygatásával járó vezetékek építés óhatatlanul élőhelyek felszámolásával jár, ami az eredeti növény- és állatvilág kiszorítását jelenti a térségből. Ez a hatás jóval túlnyúlik a ténylegesen elfoglalt területen, az anyagmozgatás forgalma, a létesítéssel együtt járó zajok, fények, szagok sokkal nagyobb térségben zavarják meg a természetes állapotot. Nő is a társadalmi ellenállás a zöldmezős energetikai beruházásokkal szemben, különösen, ha a környezetszennyezés gyanúja is felmerül. A területfelhasználási jog megszerzésének nehézségei miatt jelentősen felértékelődött a régi erőművek telephelye az új létesítmények elhelyezésére. Így lerövidíthető az engedélyezési eljárás, és könnyebb megszerezni a lakosság támogatását, a korábban kialakított infrastruktúra egy része is hasznosítható.

Az akadályok miatt szinte lehetetlen feladat új nagyfeszültségű villamos távvezetékek nyomvonalának kialakítása. Ezért a meglévő vezetékek nyomvonalán törekednek a bővítés lehetőségét biztosítani. A tartóoszlopokat eleve úgy alakítják ki, hogy később mód legyen újabb vezetékek felhelyezésére. Ha ez nem kivitelezhető, más módszerekkel kell a bővítés lehetőségét megteremtteni (oszlopok átalakítása, átviteli feszültség növelése, köteges vezetők alkalmazása). Földgázvezetékek fektetésének megakadályozására is akadnak már példák.

A mélybányák (szén, urán) felszíni létesítményei is nagy területet foglalnak el, amibe az üzemi épületeken kívül a szállítási infrastruktúra, a meddőhányók, az előkészítés és dúsítás létesítményeinek területe is beletartozik. De nemcsak e létesítmények tényleges helyfoglalását kell vizsgálni, hanem a bányatérség feletti területen a bányakárral érintett térségét is. A felszín alatti bányaművelésnél igyekeznek elkerülni a felszín károsodását, a talajszint besüppedését vagy beomlását, de az alábányászott terület nem mindig tökéletesen stabil, a talajsüllyedést időnként épületkárok és csővezetékek törései is jelzik. Közvetett következmények is elfordulnak, amikor a talajmozgás repedéseket alakít ki a vízgyegekben, és az elszivárgó víz alámosza a felszíni létesítmények alatt a talajt. Viszonylag kis területfoglalás jellemzi a fluid energiahordozók kitermelését, de az intenzív kiemelés lazíthatja a mélyebb rétegek homogenitását, ami néha a felszínen is érzékelhető talajsüllyedést okoz.

A hagyományos erőművek között a szénerőművek a leghelyigényesebbek, melyeknek széntere és zagytere, esetenként hűtőtava több km²-nyi területet foglal le GW-onként. A szénhidrogén-erőművek területfoglalása viszonylag kisebb, mivel nem szükségesek hulladéklerakók, és a tüzelőanyag-tárolás is kevés helyet igényel, ugyanakkor a kőolaj-finomítók nagy kiterjedésű telephelyen terülnek szét. A nukleáris fűtőelemciklus (ércdúsítás, konverzió, izotópdúsítás, fűtőelemgyártás, újrafeldolgozás) sok létesítményt foglal magába, és a területigényt növeli a szükséges védőövezet is. A radioaktív hulladéktárolók tényleges helyfoglalása nem nagy, de feladatukat hosszú ideig kell betölteniük. A kis aktivitású hulladékokat néhány száz évig kell a környezettől elzártan és felügyelet alatt tartani. A nagy aktivitású hulladékoknál az elszigetelés időigénye nagyon hosszú, mértéke ma még meg sem határozható, mivel az jelentősen függ az üzemanyagciklus lezárásának módjától és a végső elhelyezés tényleges technológiájától. Radioaktív hulladék keletkezik az atomerőmű nukleáris részének lebontásakor is, ennek megkezdése előtt több évtizedes pihentetési időt irányoznak elő, mialatt a sugárzás szintje nagymértékben csökken, és a lebontás olcsóbbá és veszélytelenebbé válik.

Szeles időben a bányától távol is érzékelhető a külfejtéssel együtt járó porzás hatása. A szállítórendszerek, vasszerkezetek, meddőhányók a mélybányák környezetére is rányomják bélyegüket. A lignit- és szénerőművek tájromboló hatásához hozzátartozik, hogy környezetükben a növényzetet, az építményeket és egyéb létesítményeket gyakran a szénterről, a zagytérről vagy a füstgázból származó por lepi be, ami kémiai és biológiai hatásán túl látványával is megkeseríti az emberek közérzetét. Különösen nyomasztó látvány a felhagyott bányák otffelejtt maradványa, lepusztult építmények, rendezetlen felszíni utak és tárolóterek, ócskavasként rozsdásodó vasszerkezetek, céltalan kötélpályák, hasznavehetetlen berendezések. A jogszabályok által megkívánt területrendezésre nincs mindig pénz, gyakran már megszűnt a vállalat, a tulajdonos és felelős azonosítása is nehézségekbe ütközik. A bányászati tevékenység maradandó nyomai a meddőhányók is. Kénmentesítés esetén a domborzatot elcsúfító kőfejtések is a szénbázisú energia-termelés számláját terhelik. A kőolaj-kitermelést jellemző bologató kútállványok képe sem esztétikus, de a rezervoár leművelése után a kutak és csővezetékek könnyen eltávolíthatók. A kőolaj-finomítók magas tartályai, a csővezetékek kusza hálózata éjszakai kivilágításban még színes látványnak is felfogható, de nappal megoszlanak a vélemények, hogy azt inkább a modern világ szimbólumának kell tekinteni, vagy lehangoló fémtelepnek. Az uránbányának a szénbányákhoz hasonló tájromboló hatásai vannak, sok éves program készült a mecseki uránbányászat környezetében a meddőhányók, ülepítő-medencék, perkolációs halmok rehabilitációjára. Egyes országokban a szélerőmű telepek látványával sincsenek kibékülve.

Egy új ipari létesítmény építése szükségszerűen megváltoztatja a térség látványát, de a tervezők kellő körültekintéssel lényegesen javítani tudják a képi hatást. A zavaró hatású létesítmények növényzettel takarhatók, az erősen kiemelkedő kontúrok beilleszthetők a domborzatba, színezéssel tompíthatók az éles különbségek stb. A felszíni építmények beillesztése a tájba az építészek tudatos tevékenységévé vált, amit a legsikeresebben a geometriai testekbe foglalt építményekből álló atomerőműveknél valószínűsítenek meg. A lignit- és szénerőműveknél ez nehezebb feladat, mivel a magas kémények, a nagy kiterjedésű széntér, a zagytér, a különféle anyagszállító rendszerek létesítményei (osz-

lopok, kötélpályák, csővezetékek, szállítószalagok) nagyon elütnek a környezettől. A szénhidrogén-erőművek képét is terhelik a magas kémények, a nagy tárolótartályok és csővezetékek takarása sem mindig sikeres.

A helyfoglalást nemcsak az jellemzi, hogy a létesítmény mekkora területet von el az ökoszisztémától, hanem az is, hogy az elvonás mennyi ideig érvényesül. Az energiaipari létesítmények által elfoglalt területek rehabilitációja a sok évtizedes tevékenység felhagyása után többnyire hosszú időbe telik (nem mindig sikerül a működés előtti állapot tökéletes rekonstrukciója, a visontai külfejtés helyén aligha lehet egyhamar az abasári rizlinggel egyenértékű bort produkálni). Különösen hosszú idő alatt rehabilitálhatók a külfejtések és meddőhányók, valamint nagyon hosszú elszigetelési időt követelnek a radioaktív hulladéktárolók. A területfelhasználás gazdasági megítélése zöldmezős létesítésnél a kisajátított földterület mezőgazdasági hozamának értékétől függ, valamint attól, hogy a használat okozta változás mennyire reverzibilis. A környezetvédelem érdekében mind több jogszabályunk követeli meg a használat befejezése után a terület helyreállítását. A bányászkodás nyomainak eltüntetéséhez, a meddőhányókon és a megbolygatott területeken a növényzet rekultiválásához, a megszüntetett iparművek területének zöldmezős rehabilitációjához a szükséges anyagi fedezet megteremtését a vállalatok költségei között kell előirányozni. A nukleáris létesítmények esetében a radioaktív hulladékok elhelyezését és a létesítmények lebontását erre a célra létrehozott pénzalapból finanszírozzák, amit az üzemeltetők befizetéseiből töltenek fel.

Az energiaellátást biztosító vállalatok, és az annak beszállító vállalatok sikeres működésének elengedhetetlen feltétele egy erős szellemi háttér, szakmailag kitűnően felkészült, kreatív emberekből. Ennek megteremtése visszavezet az oktatási intézményekhez, a kutató-fejlesztő szervezetekhez. A 20. század utolsó évtizedeiben új problémaként jelentkezett a szakemberhiány. Az energetika több területe elvesztette vonzerejét, a tehetséges fiatalok figyelme inkább a gyorsan fejlődő más szakmák, pl. informatika irányába fordult. Az érdeklődés visszaesésében jelentős szerepet játszottak a különféle erőművek (atom-, víz-, fosszilis energiabázisúak) környezeti hatásait kritizáló médiahangok és demonstrációk, az energiavállalatokat elmarasztaló politikai megnyilvánulások, és a szakmai presztízst károsító közvélemény. Viszonylag új jelenség az agyelszívás, a kreatív fiatalok külföldre csábítása. Ez már az egyetemi képzésben is érvényesül, az álláskeresésben pedig a magas jövedelem és több szakmai lehetőség nagy vonzerő.

Az energiatermelő és -fogyasztó berendezések nagy száma következtében az energetika az ipari termékek egyik legnagyobb felhasználója, e miatt – ha nem is meghatározó – de jelentős hatása van sok ipari nyersanyag forgalmának alakulására. Néhány nyersanyag szűkössége, vagy erős drágulása a műszaki fejlődés korlátjává is válhat. Ebbe a körbe tartozik 17 ritka földfém (pl. neodímium, diszprózium), melyeket többek között villamos autókban és szél erőművekben használt állandó mágnesű motorokban, kémiai áramforrásokban, fényforrásokban (fénycsövek, LED) alkalmaznak. Más ritka fémek is kritikus szerephez juthatnak, a napelemekben használt indium, gallium és tellúr, a kémiai áramforrásokhoz szükséges kobalt (kadmium) és főleg lítium. Az utóbbinál az is szerepet játszik, hogy a fúzióhoz a tríciumot Li-ból tervezik fejleszteni.

Az építési és szerkezeti anyagok szükséges mennyisége és költsége a megújuló energiák versenyképességének egyik kulcskérdése. A vízerőművek nagy műtárgyainál ez magától értetődő, de a nap- és szél erőművek esetében meglepő összehasonlítások adódnak. Például a szél erőművek létesítéséhez szükséges anyagok teljesítményre vetített fajlagos mennyisége (500–600 t vas/MW, ~1000 m³ beton/MW) nagyságrenddel haladja meg a hagyományos erőművekéét, egy naperőműnél a hasonló összehasonlító adatok: beton 6-szoros, fémek 30–150-szeres.

Az energiaellátás maga is sok energia befektetését igényli. A természeti erőforrások kiaknázása, az energiahordozók szállítása, a létesítmények és eszközök létrehozása és működtetése mind energiafelhasználással jár. Mindebbe nem érdemes belefogni, ha a ráfordítás meghaladja a hasznosítható energia mértékét. A bioüzemanyagoknál pl. komoly gond, hogy a növénytermelés, szállítás, kémiai átalakítás energiaszükséglete az időjárástól, terméshozamtól, művelési módtól és más körülményektől függően bizony meghaladhatja a nyert üzemanyag fűtőértékét, és ez aláássa a versenyképességet. Az energiahordozók energiatartalma nagyon széles határok közé esik, néhány tájékoztató érték a 2.5. táblázatban látható.

2.5. táblázat. Energiasűrűségek

Energiahordozó	MJ/kg
Tömeg energiaértéke	$9 \cdot 10^{10}$
Fúzió anyagai (D, T)	$3,5-4,5 \cdot 10^8$
Hasadóanyagok (²³⁵ U, ²³⁹ Pu)	$8 \cdot 10^7$
Tüzelőanyagok (H ₂ , szén, olaj, földgáz, lignit)	130–12
Biomassza	8–20
Víz rejtett hője (párolgás, olvadás) 1 baron	0,3–2,3
Akkumulátorok	0,1–2,5
Helyzeti energia / m	$9,8 \cdot 10^{-6}$
Mozgási energia / (m/s) ²	$5 \cdot 10^{-7}$

3. Hagyatkozunk a természetre?

3.1. Megújuló energiaforrások

Az emberiség az ipari forradalomig életkörülményeinek megteremtésére és szükségleteinek kielégítésére jóformán kizárólag megújuló energiákra tudott támaszkodni. Kezdetben csak saját fizikai erejére számíthatott, később a tűz melegére és fényére is, amit eleinte csak biomassza-hulladékokkal tudott táplálni, majd a fémszerszámok megjelenése tűzifa kitermelésére is módot teremtett. A világ legelmaradottabb térségeiben ma is az izomerő és a biomassza jelentik a legfontosabb energiabázist. Az energiabázis kibővítésének első lépései a bioszférából kinyerhető megújuló természeti erők – a szél, majd a vízfolyások – energiájának hasznosítására törekedtek. A világ jelenlegi energiamérlegében a biomassza arányát ~10%-ra becsülik, a vízenergia mintegy 6%-ot képvisel, és gyorsan bővül a szél hasznosítása, vagyis a megújuló energia részaránya 20% körül mozog. (A legtöbb publikáció ennél sokkal kisebb arányt közöl, figyelmen kívül hagyva a biomasszát, mert annak legnagyobb része nem kerül kereskedelmi forgalomba.)

Közkeletű nézet, hogy az energiaproblémák megoldásának kulcsa a megújuló energiák növekvő hasznosítása, ami idővel elvezet kizárólagos alkalmazásukhoz. Kétségtelen, hogy a megújuló energiákkal lehet a leginkább kielégíteni a fenntartható fejlődés követelményeit, egyrészt korlátozni az erőforrások kimerítését, másrészt mérsékelni a környezet károsítását. Az is előny, hogy mint belföldi és nem kimerülő energiaforrások, növelik az ellátásbiztonságot, amihez az is hozzájárul, hogy helyi forrásként lehetővé teszik autonóm rendszerek kialakítását. Kedvező hatásuk a tüzelőanyag-megtakarítás és ezzel az import csökkentése is. De ábránd az a nézet, hogy a világ energiaellátásának jövőjét lehet kizárólag a megújulókra alapozni.

Az ásványi energiavagyon kimerülésével gyakran a megújuló energiák korlátlan rendelkezésre állását állítják szembe. A korlátlan rendelkezésre állás azonban hamis illúzió. Az ugyanis, hogy ezeket az energiaforrásokat folyamatos megújulásuknak köszönhetően nem lehet kimeríteni, nem jelenti azt, hogy mindig és korlátlan mennyiségben rendelkezésünkre állnak.

Kiaknázásuknál ritkán veszik figyelembe, hogy ugyan a napsugárzás, a szelek, a vízmozgások, a biomassza hatalmas energiamennyiséget képviselnek, de azok alapvető feladata a Földön a természet folyamatos működését biztosító hatások fenntartása. Ennek egy része elvonható az emberi civilizáció működtetésére, de ennyivel kevesebb marad az eredeti folyamatokra, vagyis csökkentjük hozzájárulásukat a Föld egyensúlyának fenntartásához, mivel a természet energiamérlegén nem lehet erőszakot elkövetni. Fogas kérdés, hogy mennyit hasznosíthat az emberiség a saját céljaira a természet működésének megzavarása nélkül? Az ózonlyuk, az üvegházhatás, élővizek kipusztulása és hasonló jelenségeknél megtapasztalhattuk, hogy viszonylag kis emberi beavatkozásokkal milyen

nagy mértékben meg lehet zavarni a természet rendjét. A megújuló energiaforrásokat természetesen kimeríteni nem lehet, de a hatásukat megzavarhatjuk, és ennek a megnyilvánulása gyakran nem látható előre.

A hasznosításhoz szükséges berendezések létesítésének vannak gyakorlati korlátai is. A Föld felszínén számításba vehető terület korlátozott, eleve kiesnek a vízfelületek, a nehezen megközelíthető térségek, pl. a magas hegyek, öserdők stb. Szűkíti a lehetőségeket a más irányú területhasználat – települések és ipartelemek helyfoglalása, mezőgazdasági művelés, közlekedési hálózatok, rekreáció lehetősége stb. – vagy a lakosság ellenzése. Természetesen el kell tekinteni a túlságosan költséges megoldások megvalósításától is, pl. az energia szállításától indokolatlanul nagy távolságra. Az ezek figyelembevételével kiadódó potenciál többnyire összemérhető az emberiség jelenlegi technikai energiafelhasználásával, a ténylegesen realizálható pedig annál jóval kisebb, vagyis a reális lehetőségek eredője – még a gazdaságosság szempontját figyelmen kívül hagyva is – nem éri el a világ jelenlegi összegzett energiafelhasználását.

A megújuló energiák rendelkezésre állása időben is korlátozott, mert azt különféle természeti körülmények – napszaki és évszaki változások, időjárás, biológiai folyamatok stb. – behatárolják. A megújuló energiák érvényesülését biztosító hatásokat nemcsak természeti eredetű akadályok korlátozhatják, hanem szorgos emberi tevékenységek is, pl. erdőirtással, áramlások elrekesztésével, klímaváltoztatással.

Manapság szinte kötelező a megújuló energiák használatát propagálni. Teszik ezt hozzáértők és hozzá nem értők egyaránt. Érvrendszerük gazdag: a megújuló energiák olcsók, hiszen a természeti erőért nem kell fizetni; kimeríthetetlenek, mivel megújulnak; nem szennyeznek a környezetet; nem járulnak hozzá az üvegházhatáshoz; mindenütt rendelkezésre állnak; stb. Vitathatatlan előnyeik miatt hasznosításuk ösztönzést érdemel, amit a legtöbb kormány és számos nemzetközi szervezet fontos feladatának tekint. Támogatásuk, alkalmazásuk ösztönzése azonban szinte dogmává vált, a problémák és a korlátok bemutatása majdnem szentségtörés, amire a türelmetlen hívők szerint csak retrográd szemléletűek, vagy ellentétes anyagi érdekek képviselői vetemednek. A szakmai viták hamar érzelmi és erkölcsi síkra terelődnek, a gazdasági és műszaki megfontolásokat demonstrációk és érzelmekre ható publicisztika szorítja háttérbe. Pedig alkalmazásuk hatékonyságának a feltétele a tárgyyszerű megítélés, így kerülhető el olyan megoldások erőltetése, amelyeknél az adott környezetben hiányoznak az adottságok, ugyanakkor így juttathatók indokolt támogatáshoz a célszerű megoldások.

A megújuló energiák hasznosítása többnyire anyagi támogatást is igényel. A támogatásnak többféle módja szokásos, pl. adókedvezmény, ösztönző hitelfeltételek, hozzájárulás a beruházáshoz, a hálózatba táplált villamos energia kötelező átvétele előnyös áron. A támogatásnak visszatérő gondja a finanszírozás forrása, azt vagy a költségvetésből fedezi az adók növelésével, vagy a fogyasztókra hárítják tovább az energiaárak emelésével. A támogatások eredményeképp a megújuló energiák hasznosítása gyorsan fog nőni. De igazi térhódításuk időszaka akkor várható, amikor támogatás nélkül is versenyképesek.

A megújuló energiák versenyhátránya alapvetően a magas fajlagos beruházási költségeken múlik. Ennek több oka van, első helyen említendő, hogy a megújuló energiák

diszpergáltak, vagyis térbeli teljesítménysűrűségük kicsi. Ezért a szükséges energiát nagy felületről kell összegyűjteni, sok anyagot tartalmazó, fajlagosan nagyméretű berendezésekkel, ami miatt a fajlagos létesítési költségek magasak. A 2.4. táblázat példa-képp érzékelteti, mekkora területet kell igénybe venni egységnyi villamos teljesítmény biztosításához. A második ok a megújuló energiák intermittens rendelkezésre állása. Energiára akkor is szükség van, amikor nem süt a nap, nem fúj a szél, kicsi a vízhozam, illetve a terméshozam, az ilyen időszakok áthidalására vagy energiatároló létesítményeket, vagy másfajta energiával működő tartalékkapacitásokat kell létesíteni. Mindkét megoldás tovább növeli a beruházási költségeket, amit gyakran nem a megújuló energiát hasznosítók viselnek, hanem a társadalom, mintegy külső költségként. Harmadik okként említendő, hogy a megújuló energiákat átalakító berendezések hatásfoka (a vízerőművek kivételével) alacsony, ezért adott szolgáltatáshoz (pl. villamosenergia- vagy hőellátáshoz) megújuló energiából hőértékben többször annyi szükséges, mint tüzelőanyagból. E hátrányok kiküszöbölése a műszaki fejlesztéstől várható. A kormányok jelentős összegekkel támogatják a hasznosítást előmozdító új műszaki megoldások fejlesztését, és a piaci lehetőségek reményében az ipar is sokat áldoz a kutató-fejlesztő munkára. Ennek sikere idővel eléri, hogy a megújulókat támogatás nélkül is versenyképesé váljanak. Versenyképességüket elő fogja mozdítani az ásványi tüzelőanyagok drágulása is.

A megújuló energiák hátrányát a versenyben gyakran azzal magyarázzák, hogy a hagyományos energiaellátás áraiban nem veszik figyelembe a társadalmat terhelő külső költségeket. Néhány évtizede ez a kifogás még indokolt volt, de ma már nem állja meg a helyét. Épp a környezetvédelem szorításának hatására a külső költségek nagy része valós költséggé vált a hagyományos energiaellátás területén is. Az energia árának jelentős hányadát a környezet terhelését és igénybevételét figyelembe vevő különféle díjak, adók és járulékok, a kibocsátásokat mérséklő létesítmények beruházási és működtetési költségei, a hulladékok elhelyezésének és a területi rehabilitációnak a terhei teszik ki. Jelenleg viszont a megújulókat alkalmazásával jár számottevő külső költség, egyrészt a támogatások, másrészt a rendszerszintű kihatások miatt.

Az energiaellátás célszerű megközelítése a kimerülő és megújuló energiák ésszerű kombinációja a gazdaságosság és az ellátás biztonságának szem előtt tartásával. A részrehajló érdekérvényesítés azonban gyakran eltérít ettől az optimumtól, mert az energiaellátásban hatalmas gazdasági és politikai érdekek feszülnek egymásnak. Emellett a tudásbázisunk sem mindig elegendő a bonyolult kölcsönhatások figyelembevételéhez. Természetesen a megújuló energiák hasznosításának is vannak nem kívánatos környezeti hatásai, amit az egyoldalú propaganda gyakran elleplez.

A 3.1. táblázat egy becslést tartalmaz a világ és Magyarország kiaknázható megújuló potenciáljának reális értékeire. Az irodalomban sok ezektől eltérő adat található, gyakran idézik pl. az MTA Energetikai Bizottsága által publikált, az elméleti potenciálra számított lényegesen nagyobb értékeket (3.2. táblázat), bár hozzáfűzik, hogy annak csak törtrésze realizálható.

A fundamentalista nézetek szerint a Földet változatlan formában kell továbbadnunk az utódoknak, csupán a természetes folyamatok hozama – „kamata” – felett van szabad rendelkezési jogunk, így az energetikában csak megújuló energiaforrásokat lenne

3.1. táblázat. A reálisan kiaknázzható megújuló potenciálok

Energiafajta	Potenciál		Járulékos lehetőség	
	Világ	Magyarország	Világ	Magyarország
Nap	150 EJ/év	100–150 PJ/év	100 EJ/év*	100–150 PJ/év**
Szél	1–2 TW	2–5 GW		
Víz	2–3 TW	1 GW	3–10TW***	
Biomassza	100 EJ/év	100–200 PJ/év		

* Naperőmű, OTEC és SSPS.

** Passzív hasznosítás.

*** Tengeri energiák.

3.2. táblázat. Elméleti potenciálok Magyarországon

Energiafajta	Potenciál, PJ
Napsugárzás	1838
Víz	14
Szél	533
Biomassza	203–328
Geotermia	64

szabad hasznosítani, kimerülőket nem. Ez az elképzelés nyilván irreális, egyrészt nincs „változatlan forma”, hiszen állandóan érvényesül a természet erőinek módosító hatása, és az emberi jelenlét hatása arra csak szuperponálódik, másrészt ilyen alapon a civilizáció nem lenne fenntartható. Az „utánunk a vízözön” szemléletű ellentétes szélsőséget sem lehet osztani, hiszen saját utódaink létfeltételeiről van szó. A közéletet egy pragmatikus megközelítés jelentheti, amely mértéktartó és visszafogott gazdálkodást ajánl, az erőforrások egy részének megőrzésével az utókor számára. Így a jelenlegi energiaigényeket csak bizonyos mértékig elégítenénk ki az utódok számlájára, feltételezve, hogy az emberi leleményesség nem vész ki, az utódok sem lesznek butábbak nálunk és megtalálják a helyettesítés megoldását. A készletek kímélése, vagy kimerítése azonban nem szándékokon múlik, hanem gazdasági érdekeken. Ezek híján a racionális gazdálkodásra intő megfontolások, mint jámbor óhajok, nem befolyásolják a piacgazdaság mechanizmusait. Egy erőforrás kímélésének az a feltétele, hogy helyettesítésre álljon rendelkezésre tartósan versenyképes más megoldás.

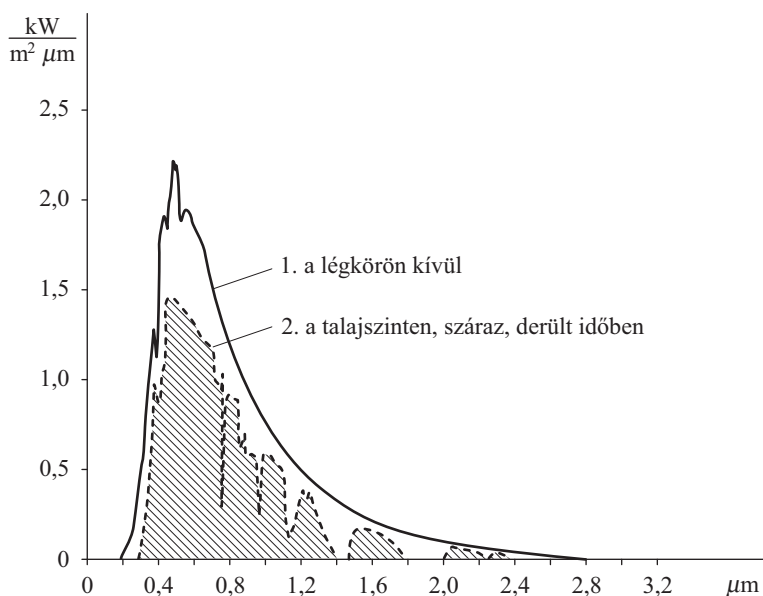
3.2. Napsugárzás

A Nap energiája a belsejében zajló fűzőből származik, ami 6000 K körüli hőmérsékletre hevíti a napgolyót övező fotoszférát. Ez a burok sugározza ki az elektromágneses hullámokat a világűrbe, a sugárzás energiájának 99%-a a 0,15 és 4,0 μm közötti hullámsávba

esik, a 4 mm-nél hosszabb hullámok teljesítménye gyakorlatilag elhanyagolható. A földi légkör határán a sugárzás irányára merőleges felületen a napsugárzás teljesítménye $1,39 \text{ kW/m}^2$ (ez a napállandó, a Föld enyhén elliptikus pályája miatt a középértékhez viszonyítva $\pm 3\%$ -os határok között változik). A Föld $1,28 \cdot 10^8 \text{ km}^2$ területű síkmetszete a napsugárzás fluxusából 177 PW teljesítményt metsz ki, ami a Nap teljes sugárzásának egy milliárdnyi hányadát sem éri el. E teljesítmény folyamatos besugárzása alapján a Földre eső energia évente $5,6 \text{ YJ}$.

A napsugárzásnak sokféle feladata van, és egyáltalán nem biztos, hogy minden szerepéről tudomásunk van. Maga a Föld anyaga is a Nap hatására kondenzálódott bolygóvá, és a Nap szabja meg a Föld mozgását, alakítja az életfeltételeket meghatározó éghajlatot és időjárást. Ezen hatások egy része a forrása a megújuló energiáknak. A napsugárzás tartja fenn a víz körforgását, működteti a szárazföldi és tengeri vízáramokat, biztosítja a légköri áramlásokat, létrehozza a táplálékot és tüzelőanyagot jelentő biomasszát, biztosítja a biológiai életet, stb. Tulajdonképp az ásványi tüzelőanyagok is napenergia-konzervek, hiszen biomasszából keletkeztek a földkéregben érvényesülő fizikai, kémiai, mikrobiológiai hatásoknak köszönhetően.

A napsugárzás légkörön kívüli spektruma közelítőleg megfelel egy 6000 K hőmérsékletű fekete test sugárzásának. A Föld felszíne felé haladva, a légkörben lejátszódó összetett folyamatok következtében, a napsugárzás lényegesen módosul. Egyrészt csökken a sugárzás teljesítménye, és a beeső teljesítménynél jóval kevesebb jut el a talajszintig. Másrészt lényegesen változik a frekvenciaeloszlás, a talajszintre érkező sugárzás legnagyobb része a látható fény ($0,38\text{--}0,78 \text{ }\mu\text{m}$) tartományában van (3.1. ábra).



3.1. ábra. A napsugárzás spektruma

A saját galaxisunkból és más galaxisokból származó kozmikus sugárzás teljesítménye 6 nagyságrenddel kisebb a napsugárzásnál. A kozmikus sugárzás spektruma nagyon széles, a rádióhullámoktól a röntgensugarakig terjed.

A beeső sugárzás egy részét a légkör elnyeli. Az abszorpció feltétele, hogy a fotonok energiája fedezze az atomokat, illetve molekulákat alkotó elemi részecskék energia-állapotának kvantált változását. Mivel a fotonok energiája frekvenciájukkal arányos, a legnagyobb energiával az ibolyántúliak (uv) rendelkeznek. Ezek veszélyeztetik a földi életet, mert energiájuk elegendő a létfontosságú víz- és szén-dioxid-molekulák felbontására is. Szerencsére e veszélyes sugárzást a sztratoszféra gyakorlatilag kiszűri, a 0,22 μm -nél rövidebb hullámhosszú sugárzást (uv A) az O_2 , N_2 , H_2 és más gázok nyelik el, a 0,22 μm és 0,29 μm közötti hullámhosszú ibolyántúli sugarakat (uv B) pedig az ózonpajzs szelektív abszorpciója. (A sztratoszféra ózonkoncentrációjának csökkenése jelenti az „ózonlyuk” kialakulását.) A nagyobb hullámhosszú sugarak abszorpciója legnagyobb részben a troposzférában történik, legjelentősebb a vízgőz hatása, különösen az infravörös tartományban, de más molekulák (CO_2 , O_2 , N_2O , CH_4 stb.) szerepe sem mellékes. A lefele irányuló sugárzást a szóródás is csökkenti, a sugarak a levegőt alkotó részecskébe (atomok, molekulák, porszemek, vízcseppek, jégkristályok) ütközve irányt változtatnak, egy részük kilép a világűrbe, más részük szórt sugárzás formájában érkezik a felszínre. Az elnyelésen és szóráson kívül visszaverődés is befolyásolja a viszonyokat. A visszaverődésben jelentős a felhők szerepe, átlagosan a Föld egész égboltjának 54%-át borítják felhők, ezek 48%-os átlagos albedóját⁴¹ figyelembe véve a felhőzet veri vissza a beeső napsugárzásnak mintegy negyedét. Mindezek következtében a Földet érő napsugárzásnak kerekén 30%-a visszaverődik, 27%-át elnyeli a légkör és csak 43%-a ($76 \text{ PW} = 2,4 \text{ YJ/év}$) jut a talajszintre, amiből a kontinensek és a tengerek közötti felületarányuk megfelelően 29% jut a szárazföldekre ($22 \text{ PW} = 0,7 \text{ YJ/év}$).

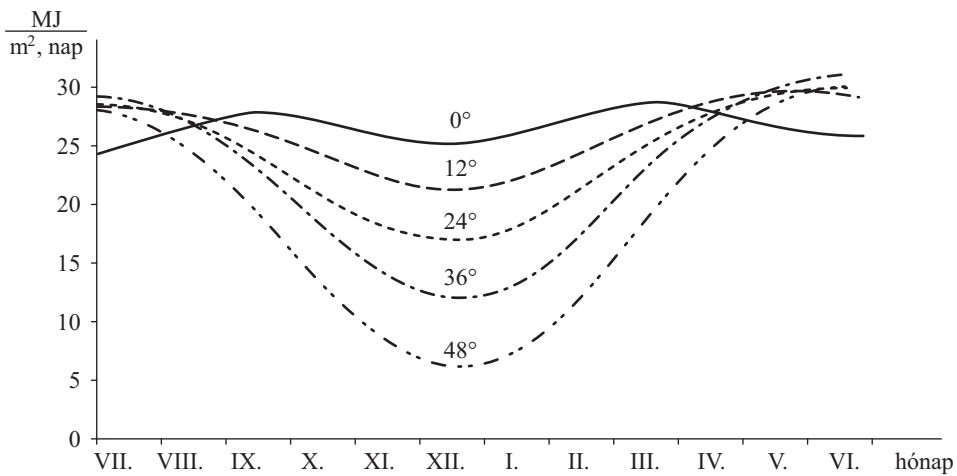
A légkörben és a felszínen elnyelt energia hővé alakul, és e közegek 200–300 K hőmérsékletének megfelelően 4 és 100 μm közötti infravörös hullámhosszon kisugárzódik (a spektrum maximuma 10 μm táján van). Az energiaviszonyok alakulásában megkülönböztetett szerepe van a légkörben található üvegházgázoknak. E legalább kétféle atomot tartalmazó molekulák (pl. H_2O , CO_2 , CH_4) szelektíven elnyelik, illetve kisugározzák az infravörös hullámokat. Az üvegházgázok felszín felé irányuló sugárzása hozza létre az üvegházhatást, aminek következtében a bioszféra hőmérséklete átlagosan mintegy 30 °C-kal magasabb, mint amekkora lenne üvegházgázok nélkül. A feltételezések szerint ezt a hatást növelik az emberi tevékenység – jórészt a tüzelés – során kibocsátott üvegházgázok.

A Föld termikus egyensúlyát az biztosítja, hogy a beeső napsugárzás energiájával egyenlő a világűrbe visszavert és kisugárzott energia összege. Nem világos, hogyan befolyásolja ezt az egyensúlyt az emberiség egyre növekvő energiafelhasználásából származó hő. Az energiafelhasználás minden formája ugyanis végső fokon hővesztességgé válik, aminek egy része kisugárzódik a világűrbe, a többi a felszínt melegíti. Egyes szakértők

⁴¹ A visszavert és a beeső sugárzás hányadosa.

számításai szerint a felszín melegedése 1°C-kal növelné a Föld átlaghőmérsékletét, ha elérné a talajszintre érkező napsugárzás 5–10%-ét. Szerencsére ettől még messze vagyunk, de a nagy agglomerációk térségében a hőmérséklet emelkedése már érzékelhető (ez Budapestre is vonatkozik).

A talajszinten érzékelhető sugárzást – az inszolációt – egyrészt a Naptól érkező közvetlen sugárzás teszi ki, aminek legnagyobb része a látható fény, másrészt a felszínre a légkörben lejátszódó folyamatok eredményeképp kialakuló diffúz, szórt sugárzás érkezik, nagyrészt az infravörös tartományban. A felszínre érő közvetlen sugárzás teljesítménye időben és térben állandóan változik, ez a változékonyság a hasznosítás legjelentősebb problémája. Szerepet játszik ebben a Naphoz viszonyított relatív helyzet, a földrajzi szélesség, az évszak, a napszak, és a felfogó felületnek a vízszintessel bezárt hajlásszöge.

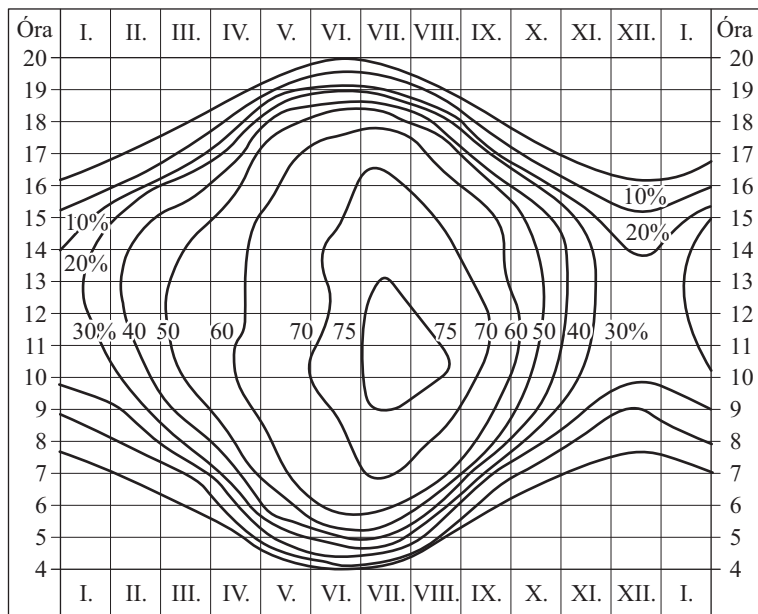


3.2. ábra. Átlagos inszoláció tiszta időben, vízszintes felületen a földrajzi szélesség és az idő függvényében

A 3.2. ábra az éves ingadozás és a földrajzi szélesség szerepét tükrözi. A délkörök mentén az egyenlítőtől a sarkok felé haladva a sugárzás eltérő szögek alatt éri a felszínre, ettől függően mértéke és a napsugárzás száma folyamatosan csökken, az évszakok szerinti ingadozás pedig nő. Az egyenlítő és a 35. fok közötti sivatagokban minimális a felhőképződés, ezen térségekben a legnagyobb az inszoláció, és legtöbb a napsugárzás száma (évente 3500–4000 óra). Ezért a nagy naperőművek telepítésére vonatkozó elgondolások ezekre az övezetekre irányulnak, mivel a napsugárzás éves mennyisége a Földre vonatkozó átlag kétszerese, egyes területeken 3–4-szerese.

A Föld forgása következtében a napkelte és napnyugta között a közvetlen sugárzás folyamatosan változik, a déli időpont maximumától távolodva csökken a beesési szög és nő a sugárzást elnyelő légréteg vastagsága, fokozódik az abszorpció és a szórás szerepe, és ezzel a diffúz sugárzásé is, ami napkeltekor és napnyugtakor a teljes sugárzás felét is elérheti. A Föld keringése szezonális változást okoz. Mivel a Föld forgástengelye 23,45

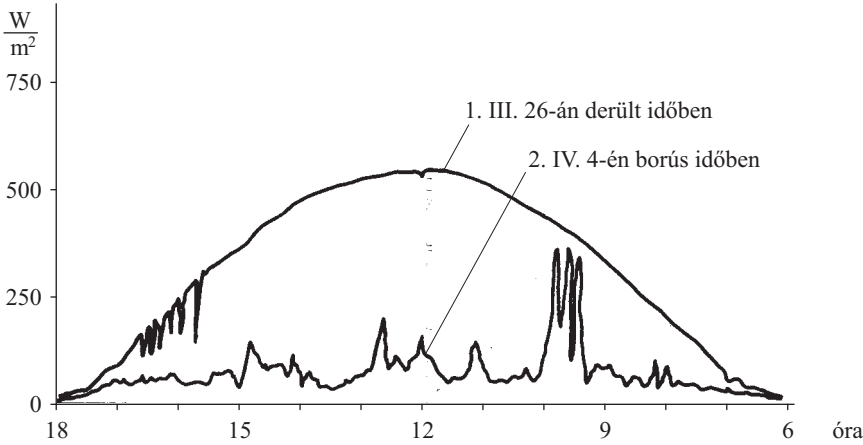
fokos szöveget zár be a keringés pályasíkjának normálisával, a nyári félévben a Nap felé forduló északi térfelet sokkal több sugárzás éri, a téli félévben pedig sokkal kevesebb. A 3.3. ábra a napfénytartam időbeli alakulását szemlélteti.



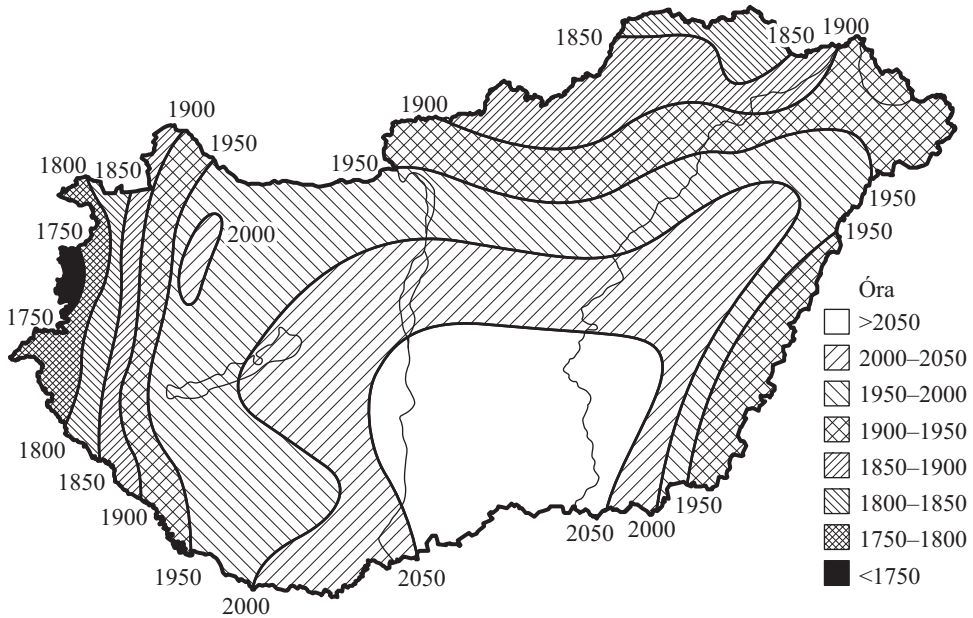
3.3. ábra. A napfénytartam átlagos alakulása Budapesten

Természetesen az időjárás szerepe jelentős, derült, száraz időben a közvetlen sugárzás dominál, ellenkező esetben a szórt sugárzás válik meghatározóvá. Fedett égbolt, köd, nagy nedvességtartalom, szennyezett levegő megnöveli a szórt sugárzás arányát, vastag felhő, sűrű köd, intenzív aeroszol-szennyezés a közvetlen sugárzást teljesen el is nyelheti, de a diffúz sugárzást is törtrészére mérsékelheti. A szórt sugárzás egy évnyi energiája a mérsékelt égövön megközelíti a teljes sugárzás energiaértékének a felét, az arány nyáron jóval kevesebb, télen sokkal több. A szórt sugárzás mértéke gyakran meghaladja a közvetlenét, ez jellemző az év jelentős részében a hazai viszonyokra is. Az inszoláció alakulását példázza a 3.4. ábra. Szerepet játszik a domborzat is, a magas hegyek árnyékolnak, a tengerszint feletti magassággal pedig csökken az elnyelő légréteg vastagsága.

Magyarországon a napfénytartam és az inszoláció szélsőséges értékek között mozog. A napos órák száma nyáron havonta 250–300, télen viszont csak 40–90. Az évente érvényesülő napos órák területi eloszlását a 3.5. ábra mutatja. Az inszoláció éves energiájának átlagértéke 4,2–4,5 GJ/m², aminek 74%-a nyári félévre esik, és csupán negyede jut a télire. A verőfényes nyári napokon 27–32 MJ/m²nap is előfordul, télen nagyságrenddel kisebb értékekkel is meg kell elégedni.



3.4. ábra. A légkör befolyása az inszolációra



3.5. ábra. A napfénytartam alakulása Magyarországon

Meglepő, hogy a besugárzott energiának csupán egy ezreléke fordítódik a fotoszintézisre, minden földi élet fenntartására. Talán ez a mérce, ami figyelmeztet az energiaellátásra elvonható potenciál határára? Ennek a szárazföldekre jutó hányada csupán másfélszerese az emberiség jelenlegi technikai energiafelhasználásának. De a gyakorlatban ténylegesen kiaknázható inszoláció ennél nagyságrenddel kevesebb. Vannak természeti akadályok, a földfelszín jelentős hányada – a vízfelszínek, a magas hegysek, az erdők, valamint azok a sarkvidéki övezetek, ahol az inszoláció, és a naps időszak tartama is

kicsi – nem jöhet számításba a napenergiát hasznosító berendezések telepítésére. Hasonló akadályt emberi tevékenységek is okoznak, pl. a települések területének jelentős hányada, a közlekedési és energiaszállítási infrastruktúra, a növénytermesztés és más foglalatosságok. Az erős időbeli egyenetlenség is akadályozza a hatékony hasznosítást. Ezek a körülmények egyértelműen alátámasztják, hogy kizárólag a napsugárzással nem oldható meg az emberiség energiaellátása, a ténylegesen kiaknázható energia 100–150 EJ-ra becsülhető.

Magyarországban a napos órák száma évente 1750 és 2100 óra között van. A csúcsteljesítményre vonatkoztatott kihasználás ennek mintegy a fele, mivel a hasznosítás lehetősége időben és térben nagyon egyenetlen. Hazánkban a napállás júliusban a legmagasabb, a legderültebb időszak augusztusban tapasztalható, a borultság decemberben a legnagyobb, amikor a felhőzet mellett a ködképződés is maximális. A területi különbségek is számottevőek, a legtöbb napsütést a Dél-Alföld kapja, a legkevesebbet a Nyugat-Dunántúl és az Északi-középhegység. Az 1,3 MWh/m² éves átlag figyelembevételével az ország teljes területére besugárzott napenergia 450 EJ, aminek 1%-e 450 PJ. A lehetőségek és korlátok figyelembevételével a 100–150 PJ hasznosítás derülátó határérték.

3.3. Biomassza

A biomassza elvileg minden a bioszférában található élő anyag, valamint annak a hulladékai. Legnagyobb hányadát az erdők képviselik, de nem elhanyagolható az egyéb növények és az állatok részaránya, valamint azok feldolgozott állapotából származó hulladékok szerepe sem. A biomassza gyakorlati értelmezése ettől némileg eltér, nem tartoznak bele az ásványi tüzelőanyagok, bár azok is a biomassza hulladékaiból képződtek, beleértik viszont az élő anyagokból származó ipari hulladékokat (fa-, papír-, bőr-, élelmiszeripar stb.), valamint a szerves anyagokat tartalmazó kommunális szemetet is. A biomassza megújuló energiaforrás, ha hasznosításának mértéke nem haladja meg az újratermelődését.

A Földön az élő anyagok létrejötte a fotoszintézisre alapul, a növényekben, algákban és egyes baktériumokban zajló folyamat hatására az élő szervezetben a szerves anyagokból szerves anyagok képződnek. A biokémiai reakciót a napsugárzás hozza létre szén-dioxidból, vízből és ásványokból, oxigén felszabadítása közben. A növényekben a folyamat főleg a zöld levelekben zajlik, azt a citoplazmában található pigmentek, legnagyobb részben a legaktívabb klorofil, katalitikus hatása vezérli. A leggyakoribb reakció a glükóz képződése a



egyenlet szerint, miközben oxigén és víz szabadul fel. A szén-dioxidot a növény a leveleken található apró pórusokon (gázcserenyílások) keresztül szívja fel a levegőből, és ugyancsak ezeken a pórusokon keresztül bocsájtja ki az oxigént. A vizet a gyökerek szívják fel a talajból és a szállítószövet-rendszer segítségével jut a levelekbe. A napsu-

gárgázás energiáját a klorofill szívja magába, és alakítja át kémiai energiává. Ezt az enzimet a növényi sejtek egyik szerve tartalmazza. A klorofill által elnyelt fényenergiával először vízbontás történik, a felszabaduló hidrogénionokat nagy energiájú enzimek (NADPH-molekulák) szállítják el. A szén-dioxid megkötéséhez szükséges energia egy másik enzimben (ATP-molekulák) raktározódik el, és az nagy energiájú kémiai kötések létrehozására fordítódik. Az enzimek közreműködésével jönnek létre a szénhidrátok.

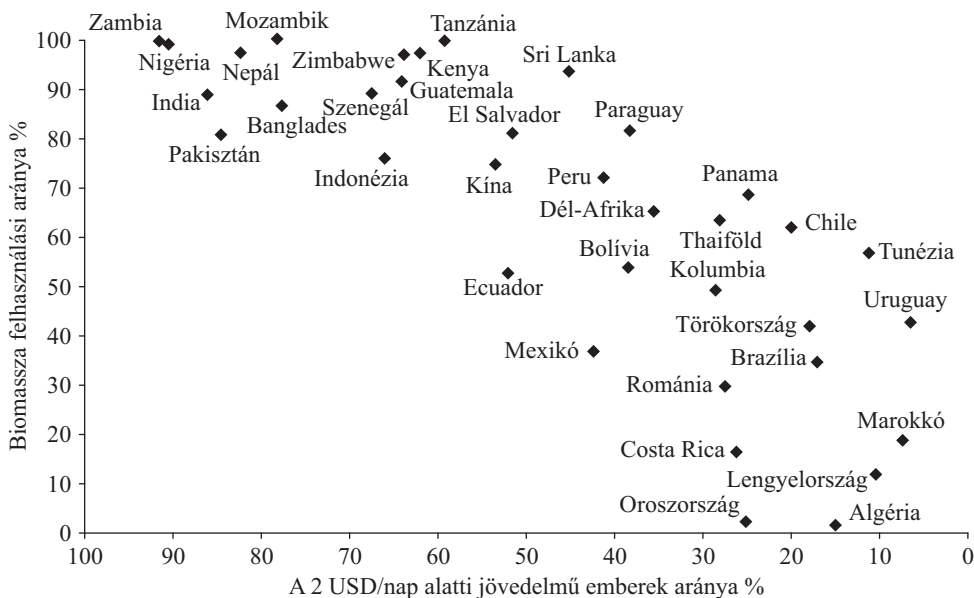
A fényenergia fő szerepe a vízmolekulák bontása. A vízbontás hatékony, viszont a teljes folyamat a napsugárzást nagyon rosszul hasznosítja. Mivel fotoszintézis csak a vegetáció időszakában zajlik, a beeső napsugárzásnak kétharmada eleve nem játszik szerepet. A felszínre eső napsugárzásnak mintegy 20%-át fogják fel a növények levelei, de annak csak a felét hasznosítja a fotoszintézis, a többi oxidációs folyamatokban újból felszabadul és a növényből légzés (O_2 -kibocsátás), a nedvesség elpárologtatása és hőleadás formájában távozik. A reakciókhoz szükséges energiakvantummal csak a látható fény spektrumába eső fotonok rendelkeznek (főleg 0,4 és 0,75 μm között, de a zöld fényt a levelek visszaverik). Az elnyelt energiának mintegy 30%-át tárolják a szénhidrátok kötési energia formájában, de annak 40%-a a növényt működtető anyagcserére fordítódik, és csak a fennmaradó rész hasznosul a növekedésben. Mindezek figyelembevételével az átlagos átalakítási hatások a területre eső napsugárzásra vetítve az 1%-ot sem éri el. Valamivel kedvezőbb a kép, ha csak a vegetációs időszakban beeső napsugárzás a vonatkoztatási alap, az így számított átalakítási hatások a trópusi növényeknél 1,1–1,6%, a mérsékelt égöviéknél 0,6–1,0%. A talajszintre érkező napsugárzásból a szárazföldi növényvilág 0,2–0,3%-ot hasznosít a növekedésére, a tengerek élővilága pedig 0,04–0,07%-ot. A fotoszintézis hatásfokát befolyásolja a szén-dioxid rendelkezésre állása, a hőmérséklet, a növény kora és más körülmények. Ha a növényevő állatok testépítését a táplálékáncon keresztül visszavezetik a fotoszintézisre, a napenergiára vetített hatásfok egy nagyságrenddel kisebbre adódik. A számítások szerint a fotoszintézis a Föld élő anyagát átlagosan mintegy 3–5 évenként újítja meg, a légkör CO_2 -tartalma 300, az O_2 -tartalma pedig 2000 évenként cserélődik.

Az energetika számára a fotoszintézis fontos kihatása egyrészt a biomassza képződése, másrészt a légkörbe kibocsátott szén-dioxid egy részének feldolgozása. A növényekre támaszkodik a többi élőlény léte is a táplálékáncon vagy az anyagcsere más módján keresztül. Az évente hasznosított napenergia harmada az óceánok élővilágának fenntartására szolgál, másik harmadát a trópusi és szubtrópusi erdők használják fel, a harmadik harmad a szárazföldi lét többi részét szolgálja, aminek csak kb. 2,5%-a az emberiség mező- és erdőgazdaságának részesedése. Az emberiség táplálékának számított energiaértéke 10 EJ/év (másfél nagyságrenddel kisebb a technikai energia felhasználásnál).

A Földön található biomassza tömegét ~ 2 Pt-ra becsülik, aminek 80%-át az erdők faállománya tartalmazza, és további 10% található az egyéb szárazföldi növényekben. Évente ~ 400 Gt biomassza képződik, amiből a szárazföldeken létrejövő száraz szerves anyag ~ 170 Gt/év. A növekedés időszakában a növények gyarapodása faj- és klímfüggő, a trópusi növényeknél naponta 15–25 g/m², a mérsékelt égöviéknél 3–8 g/m², ennek megfelelően a terméshozam évente a trópusokon 35–90 t/ha, a mérsékelt égövön 15–30 t/ha. A fotoszintézis évente mintegy 200 Gt szén-dioxidot köt meg a légkörből, a biomasszába

így beépülő karbon energiaértéke 3,2 ZJ. A hidrogén szerepének megítélését nehezíti, hogy az élő szervezetek anyagában sok a víz. A szárazföldi biomassza energiatartalmára található irodalmi adatok 15 és 25 ZJ között mozognak.

Az emberiség első tüzelőanyagát a biomassza hulladékai szolgáltatták. A világ legelmaradottabb térségeiben ma is a rözse, konyhai és ipari hulladék, tehénlepeny a fő tüzelőanyag. India egyes térségeiben az asszonyok több órás munkájába telik a napi szükséglet összegyűjtése. Az IEA vizsgálata (3.6. ábra) összefüggést mutatott ki a szegénység és a biomassza aránya között az ország energiamérlegében.



3.6. ábra. Kapcsolat a szegénység és a lakosság biomassza-felhasználása között

A biomassza füstgázában a tökéletlen égés miatt számottevő a károsanyag-tartalom (CO , N_2O , benzol, aldehid, butadién, korom, nehézfémek), ami számos elmaradt térségben a kémény nélküli, primitív belsőtéri tüzelésnél a légúti és keringési betegségek legfőbb okozója, és e térségekben komoly egészségügyi problémát jelent. A szennyezett talajon termelt növények veszélyes anyagokat szívnak fel a földből (pl. nehézfémeket a „barnatalajokból”⁴²), azok a füstgázzal kikerülhetnek a környezetbe, hamujuk pedig veszélyes hulladéknak minősül. A kereskedelmi energiahordozók ezekben az övezetekben is fokozatosan háttérbe szorítják a hulladéktüzelést.

Jelenleg a világ energiaszükségletének ~10%-át fedezik biomasszával, pontosabb statisztikai adatokkal nem rendelkezünk, mivel csak kis hányaduk kerül kereskedelmi forgalomba. A biomassza közvetlen eltüzelése fokozatosan háttérbe szorul, viszont ösz-

⁴² Ipari roncssterületek.

tönzik a hasznosítás feldolgozott termékekkel történő új korszerű módszereit. Ezek közé tartoznak a tüzelőanyag-koncentrátumok, a bioüzemanyagok és a biogáz.

A korszerű tüzeléstechnikai lehetőségek kiaknázása érdekében a növényi tüzelőanyagokból biobrikettet, illetve biopelletet sajtolnak. Brikettet főleg fa aprítékból és fahulladékokból, illetve szalmából állítanak elő, a kisebb méretű pellet sokféle anyagból készíthető. Nagyobb horderejű fejlemény a biomasszából üzemanyagok előállítása az ásványi eredetűek helyettesítésére. A benzin helyett bioetanol (etilalkohol), esetleg metanol (metilalkohol), a gázolaj helyett biodízel használható, a földgáz és más éghető gázok pótlására biogáz jöhet számításba.

Az első belső égésű motorokat alkohollal működtették, de hamarosan kiderült, hogy a benzin előnyösebb üzemanyag. Az olajkrízis hatására ismét foglalkozni kezdtek az alkoholokkal és a biomasszából előállítható más üzemanyagokkal. A bioüzemanyagok gyorsan megjelentek a gyakorlatban. Többnyire benzin-etanol keverékeket használnak, bár előfordulnak tiszta etanollal közlekedő gépkocsik is, leginkább a 85% etanolt tartalmazó E85 üzemanyag terjedt el. A II. világháború idején Magyarországon „motalko” megnevezéssel 20% alkoholtartalmú üzemanyagot forgalmaztak. A legambiciózusabb bioetanol programot Brazília indította el, ahol már a gépkocsiforgalom harmadát fedezi bioüzemanyaggal. A felhasználást erősen ösztönzik az Egyesült Államokban, Skandináviában és másutt. Az Európai Unió 2020-ra a forgalmazott üzemanyag 10%-ára kívánja növelni a bioüzemanyagok arányát.

Az első generációs bioüzemanyag-gyártó technológiák haszonnövényeket dolgoznak fel. A bioetanol a mérsékelt égövön nagy keményítőtartalmú növényekből, főleg kukoricából, a trópusi és szubtrópusi területen elsősorban cukornádból állítják elő. Alkalmazásuk ütközik az élelmiszer- és takarmánytermelés érdekeivel, a sokféle kibontakozó vitákban az élelmiszerdrágulás egyik okát is a bioüzemanyagok terjedésének tudják be. A hazai elképzelések is kukoricára alapoznak, de ténylegesen nehezen realizálódnak, aminek sok oka van. Bizonytalan a bioüzemanyagok versenyképessége, ami függ többek között az olajártól, a gazdasági paraméterek volatilitásától, az energiaigényességtől. Bizonytalanok az árualapot meghatározó körülmények is, széles határok között ingadozik a terméshozam, a piaci kereslet és kínálat, a gabonaár. A három felhasználói szektor – élelmiszer, takarmány, üzemanyag – ellentéteit fel fogja oldani a fejlesztés alatt álló másodlagos gyártási technológia, ami nem haszonnövények termésére alapoz, hanem a növényi hulladékokra. A biodízel termelésével kevesebb a gond, azt Európában főleg repceből és napraforgóból, a meleg klímaövezetben pálmaolajból nyerik.

A bioüzemanyagokkal kapcsolatban versenyképességi gondok is akadnak. A trópusokon a terméshozam többszörös, a mérsékelt égövön a termelési költség többszörös. A mérsékelt égövön a ráfordítás teljes energiája megközelíti, sőt meg is haladhatja az előállított üzemanyag energiaértékét. Nagy kérdés, hogyan tud a GMO-tilalommal sújtott magyar mezőgazdaság ilyen körülmények között helyt állni.

Elvileg minden lebomló szerves anyagból előállítható biogáz, de gyakorlatilag ez csak akkor kifizetődő, ha a biomasszát nem lehet másképp hasznosítani. A biogáz előállítása különösen előnyös, ha az környezetszennyezést mérsékel, pl. állattartó telepek hulladékaiból, személtlerakó telepekből (depóniagáz), szennyvíziszapból (csatornagáz).

A biogáz lényegében metán és szén-dioxid keveréke, de a kiinduló anyag összetételétől és a technológiától függően más komponenseket is tartalmaz. A különféle szerves anyagokból előállított biogáz hozama széles határok között változik, a szilárd szerves anyag tömegére vetítve 90–600 m³/t. Főleg helyi igények fedezésére használják mint tüzelőanyagot.

3.4. Bioenergia

Az élővilágban sokféle energiaciklus zajlik. Az élőlények szervezetében zajló energiaciklusok egy része izmok működtetésével külső munkavégzésre is alkalmas, vagy más energiatípusra helyettesítésére is hasznosítható. Szemlélet kérdése, hogy az ilyen bioenergiát megújuló, vagy kimerülő energiatípusnak minősítik. Az egyedek aktív szerepe csak az élettartamuk során érvényesül, sőt utolsó időszakukban erősen vissza is esik, ez tipikusan kimerülő folyamat. De ha figyelembe vesszük a replikációt is, a faj megújulóan tovább viszi a szerepet. Nagyon sok példa van a Földön fajok kihalására is, de legyünk optimisták, feltételezve, hogy a számunkra fontosaknál ez belátható időn belül nem fog bekövetkezni.

Nemrég tárta fel a tudomány, hogy energiaszolgáltatásra a mikrovilág is számításba jön, léteznek hidrogént fejlesztő baktériumok, fénykibocsátó membránok, fémek bányászatára használható baktériumok, és ki tudja, mit hoz még a jövő. A növény- és állatvilágból származik a legősibb tüzelőanyag, a biomassza, és annak derivátuma, a sokféle ásványi tüzelőanyag. A bioenergia hasznosul az emberiség élelmiszerbiztosító mezőgazdaságban és élelmiszeriparban. De mindezek jelentősége eltörpül az emberi fizikai munka mellett, ami a bioenergia legfontosabb megnyilvánulása.

Őseink munkájához a szükséges energiának saját maga volt a forrása. A fizikai munkavégzés szempontjából az emberi szervezet egy sokoldalú erőgépnak is tekinthető, működőképességét egy kis motor – a szív – biztosítja. Annak teljesítménye nem nagy, 0,5 W körüli érték, de sok évtizeden keresztül szolgálja gazdáját. A percenként 60–80 szívdobbanás naponta átlagosan 40 kJ munkát képvisel. Az emberi élet során a szív több milliárd munkautemet végezve préseli ki az érrendszerbe a vért, ami az égéshez szükséges oxigént, és a fontosabb tápanyagokat szállítja. A fizikai munkavégzéshez szükséges erőket a harántcsíkolt izmok összehúzódása hozza létre, amit az agyból kiinduló ingerek hatására enzimek vezérelte biokémiai folyamatok idéznek elő.

Nyugalmi állapotban a szervezetnek percenként 5 kJ energia felhasználására van szüksége, könnyű munkánál ennek a négyszeresére. A működéshez az alapvető „tüzelőanyagot” a naponta elfogyasztott 0,5 kg körüli táplálék (főleg a zsírok és a szénhidrátok) és 1–2 liter víz biztosítja, az átlagos táplálékigény 8–10 MJ/nap. Végső fokon ennek is a Nap a forrása, hiszen a növényi és közvetetten az állati táplálék a fotoszintézisből származik, ivóvizünket pedig a víz körforgása biztosítja. Természetesen a táplálék-szükségletet befolyásolják az egyén szervezetének adottságai, és erősen függ a végzett tevékenység jellegétől. Az utóbbira – mai emberek esetében – néhány átlagos értéket mutat a 3.3. táblázat. Az energia egy része a test hőmérsékletét biztosítja, más része az

alapanyagcserét tartja fenn – beleértve a szív működtetését is –, és a fennmaradó hányad fedezi az izmokkal kifelé végzett hasznos fizikai munkát. Az erőfeszítés mértékétől függően a naponta végezhető fizikai munka néhány MJ, vagyis erőlködve is alig éri el egy deciliter benzin fűtőértékét. Ez a bevezetett „tüzelőanyagnak” 10–20%-át jelenti, ami műszaki szemmel nézve nem valami fényes hatások, viszont a biológiai funkciókat figyelembe véve az energia-háztartás optimális.

3.3. táblázat. Az emberi szervezet napi energiaszükséglete

Tevékenység	Energiaszükséglet, MJ/nap	
	Férfi	Nő
Nyugalmi állapot	7	6,5
Beszélgetés, étkezés	8–10	
Szemleli munka	11,5	8,5
Könnyű fizikai munka	12,5	9,5
Nehéz fizikai munka	14,5	11
Nagyon nehéz fizikai munka	17	13

Tartós és egyenletes munkavégzés mellett egy fizikai munkát végző személy 60–100 W körüli teljesítményt fejt ki. Néhány percre ez megnövelhető, maximálisan ~450 W-ig, nagyon rövid ideig tartó koncentrált erőfeszítéssel az elérhető csúcsteljesítmény 3 kW. A tartósan igénybe vehető 100 W-os teljesítmény nem sok, még a konyhai kávéörlő is ennek sokszorosára képes. A teljesítőképesség kis értéke csak fokozza csodálatunkat az elért eredmény felett, hiszen eltekintve a legutolsó néhány évezredtől – ami szinte elhanyagolhatóan rövid idő az emberiség története mellett – az ember két keze munkájával teremtette meg az életkörülményeit. Annak segítségével emelkedett ki az állati sorból, és vált a természet erőinek kiszolgáltató lényből azokat kihasználó, majd leigázó személyiséggé. Mindaz, amit alkotott, amit termelt és fogyasztott, alapvetően emberi izmok és idegek működéséből származott, munkája az anyagi javaknak és kulturális értékeknek hihetetlen gazdagságát hozta létre. Ez a munka alakította ki a civilizált társadalmakat, ez teremtette meg az ókor folyami kultúráit, ez építette az ősi városokat, ez hozott létre bámulatra méltó építészeti alkotásokat, melyek a modern embernek is kiváltják a csodálatát.

Fokozatosan kialakult a piac is. Kezdetben csak a termékek kerültek forgalomba, majd a rabszolgaság kialakulásával azok készítői is áruvá váltak. A rabszolgarendszer bukása után, megélhetésük érdekében a szabad emberek is kényszerültek munkaerejük áruba bocsátására. De a világ energiamérlegében az emberek fizikai munkájának aránya már a tűz meghódítása után gyors csökkenésnek indult, a termikus technológiák térhódítása következtében. Az ipari forradalom végleg alárendelt szerepre szorította a fizikai erőfeszítést, egyre nagyobb teljesítményű gépek vették le az emberek válláról a nehéz fizikai munkát. A fejlett világban már csak kevés munkafolyamathoz van szükség az emberek fizikai munkájára, feladatuk már a gépek irányításáról is mindinkább a felügyeletre te-

relődik át. A fejlődő világ egyes régióiban azonban még számottevő az emberek fizikai munkája, de ennek részesedése a világ energiamérlegében már nem jelentős.

Magyarország munkaképes lakosságának összesített elméleti munkavégző képessége néhány PJ/év, ami a felhasznált primer energia néhány ezreléke, a ténylegesen végzett fizikai munka pedig ennél egy-két nagyságrenddel kisebb. Retrográd lépés a közmunka címén felelevenített kubikusmunka, ami a földmunkagépek mellőzésével, egyszerű szerszámokat használó, kézzel végzett talajmunka.

Fizikai munkára néhány állatot is befogtak. A régészeti leletek szerint az állatok házi-ásítása a csiszolt kőkorszakban indult meg, ami előmozdította az áttérést a vadászatról az állattenyésztésre. A helyi adottságoktól függően sokféle állatot (szarvasmarha, szamár, teve, elefánt, jak, kutya stb.) háziásítottak, kezdetben csak a kisebb állatokra és a szarvasmarhára került sor. A nagyobb megszelídített állatok ereje az emberinek többszöröse, ezt felismerve a folyami kultúrák területén kezdték azokat befogni az eke vontatására. Ennek a járulékos energiaforrásnak a hasznosítása a rézkorban kezdődött, az egyiptomi Óbirodalom sirrajzain már feltűnnek az igásállatok. De használták az állatokat teherhordásra, járművek vontatására is.

A legjelentősebb lépés a ló megszelídítése és hasznos munkára fogása volt a bronzkorban, mivel egy ló munkavégző képessége mintegy 15-szöröse az emberi teljesítménynek. Bár lovak már az ókori kultúra emlékein is feltűnnek, alkalmazásuk nem tömeges. A lovak drágák, gondozást és táplálást igényelnek, tartásukra csak keveseknek volt módja, a közemberek továbbra is gyalog jártak. A lovak főleg a közlekedésben és a hadviselésben játszottak szerepet, de egyszerűbb gépek hajtására is befogták őket.

A fejlett országokban a gépek végleg kiszorították az állatokat a termelő tevékenységekből, de a világ legelmaradottabb vidékein ez még nem fejeződött be. Magyarországon jelenleg mintegy 300 ezer ló található, potenciális munkavégző képességük 1–2 PJ/év körül mozog, ami alig haladja meg az ország energiafelhasználásának 1 ezrelékét. Legnagyobb részük azonban tenyésztési célokat szolgál, és nem munkavégzést.

A világ primer energiamérlegében az emberi és állati izomerő a 17. század végén még a felhasználás jelentős hányadát fedezte. Összesített hányaduk 1850 táján még 15% volt, ami a 20. század elejére a felére csökkent, napjainkra szerepük ki sem mutatható.

Energetikai folyamatokban mikrobiológiai részecskék is részt vesznek. Mikroorganizmusok már az ásványi tüzelőanyagok képződésében is jelentős szerepet játszottak, és közreműködnek modern üzemanyagok (bioetanol, biodízel, biogáz) előállításában is. Élelmiszerek készítéséhez már az ókorban is használtak mikrobiológiai eljárásokat – pl. erjesztést.

Beláthatatlan, hogy a biológia és a genetika rohamos fejlődése milyen új utakat nyit meg. Szerepet kaphat a mikrobiológia a hidrogénfejlesztésben. Vannak hidrogént fejlesztő baktériumok (pl. a bíborbaktérium) és fényrel hidrogén leadására stimulálható kék (zöld) algák. Egyes baktériumokban és algákban található hidrogenáz enzim kölcsönhatása Fe és Ni tartalmú fehérjékkel hidrogén felszabadulásával jár. Jelentős lehetőségek nyílnak energia megtakarítására. Génmódosítással növelhető például a mezőgazdasági termékek hozama és ellenálló képessége, ami energiabefektetést helyettesít, és feleslegessé teszi energiaigényes kemikáliák alkalmazását. Baktériumokat tartalmazó oldatokkal

fémek – pl. réz, urán – in situ vonható ki ércekből, helyettesítve a sok energiát igénylő bányászati és kohászati technológiákat.

Kutatások folynak a fotoszintézisnél hatékonyabb fotóbiológiai eljárások kifejlesztésére, élő szervezetekkel (algák, cianobaktériumok) valamint sejtkomponensekkel (kloroplasztok, membránok, enzimek). Kutatás tárgya, hogy a fizika és biológia közötti hidat jelentő nanotechnológia segítségével nem lehet-e mesterségesen előidézni a fotoszintézist. Fotoszintézis baktériumoknál is kialakulhat, pl. a kén-baktérium nem vizet, hanem kénhidrogént, kéntartalmú alkoholt vagy szerves savat bont meg, és az így nyert hidrogént építi be a szervezetébe, a környezetbe pedig nem oxigén, hanem kén lép ki.

3.5. Szélenergia

A légkör energiaviszonyait egyrészt a beeső napsugárzás, másrészt a talajszintről kiinduló folyamatok befolyásolják. A napsugárzás melegítő hatása ismétlődő elnyelési, kisugárzási, visszaverődési és szóródási folyamatok közepette meglehetősen bonyolult alakul. Ugyancsak összetett folyamatok érvényesülnek a földfelszínről kiindulva. Az onnan kisugárzott infravörös sugárzás melegíti a légtömegeket, a felszínről hőt konvekcióval felszállító turbulens légáramlások is befolyásolják az energia-egyensúlyt, a magasabb hőmérsékletnek megfelelően a kontinensek hőátvezetése valamivel erősebb, mint a tengereké. Jelentős szerepe van a víz körforgásának, ami a beeső napsugárzásnak közel negyedét köti le. Az elpárologtatásban a tengerek szerepe természetesen sokkal nagyobb, mint a szárazföldeké, ennek megfelelően alakul a felhő- és csapadékképződés. Az eközben kialakuló halmazállapot-változások során elvont, illetve felszabadult rejtett hő szintén befolyásolja az energiaviszonyokat, a felhők mozgása pedig sztatikus feltöltődés nyomán villamos kisülésekkel járó heves zivatarokba torkolhat.

Mivel e hatások térben és időben változatosak, a légkörben hőmérséklet- és sűrűség-különbségek keletkeznek, nyomáskülönbségeket okozva. A nyomáskülönbségek kiegyenlítésére légmozgások és áramlások alakulnak ki, a légtömegek hőenergiájának egy része mozgási energiává alakul. Ugyan a légmozgások pályájának a kialakításában a nyomásviszonyok az elsődlegesek, azt más erők és körülmények is lényegesen befolyásolják. Szerepe van a gravitációnak, a Föld forgása okozta centrifugális, valamint Coriolis-erőnek, a súrlódásnak, lényegesek a levegő állapotjellemzőinek (hőmérséklet, sűrűség) alakulása, a nedvességtartalom és annak fázisváltozásai, valamint a talajszint közelében a felszín felépítése. A sokféle hatás következtében mind függőleges, mind vízszintes irányban bonyolult térbeli mozgások keletkeznek, legnagyobb részben a troposzférában.

A légmozgások komplikált rendszerében általános és helyi szeleket, valamint ciklonokat különböztetnek meg. Az általános légkörcsét az egyenlítő és a pólusok klímája közötti különbség gerjeszti, ennek hatására a magasban az egyenlítő felől a pólusok felé tartó, a talajszinten pedig ezzel ellentétes irányú áramlás alakul ki. Ezeket az áramlásokat azonban módosítják egyrészt a Föld forgásából származó erők, másrészt a Föld alakjának a hatása, mivel a sarkok felé szűkülő áramlási csatornának gyorsító hatása van.

A különféle hatások következtében az egyenlítőnél, a 30° körüli szubtropikus térrészben (itt helyezkednek el a sivatagok), valamint az 50–60° táján lévő szubpoláris régióban szélmentes övezetek alakulnak ki. Az egyenlítő és a szubtropikus övezet között kifejlődő passzátszél meglehetősen egyenletes, 5–6 m/mp sebességgel fúj évente 290–330 napon keresztül, legszabályosabban az óceánok felett, az északi féltekén északkeleti, a délin délkeleti irányból. A mérsékelt égövön az általános légmozgást nyugati – de sokkal egyenetlenebb – szél képviseli, a poláris régióban pedig keleti.

Az általános szélrendszerre regionális és helyi szelek, valamint ciklonok és turbulenciák szuperponálódnak, a korszerű felfogás a regionális szeleket is az általános légmozgás részének tekinti. Ilyen regionális szél a viszonylag egyenletes monszun, ami azt a különbséget egyenlíti ki, hogy az óceánok hőmérséklete sokkal kevésbé követi a téli és nyári klíma különbségeit, mint a kontinensek. A monszun télen a tenger felé fúj, nyáron esőt hozva a tenger felől, a Medárd körüli hazai esős időszakot is a monszun nyúlványának tekintik. Partvidéken a napi felmelegedés változása is okozhat gyenge kiegyenlítő szelet, pl. a Balatonon nappal a tó felől (tavi szél), éjjel a tó felé (parti szél) fújó szelet. A mérsékelt égövön, hegyvidéken is előfordul helyi szél, különösen nyáron a reggeli felmelegedés a hegyre feláramló, az esti lehűlés a völgybe lenyomuló széllel.

A ciklonok a hideg és meleg légtömegek találkozásánál kialakuló határfelületről indulnak ki, függőleges tengely körül forgó mozgással. E néhány napos képződmények gyakran több hullámban vonulnak el, sebességük változó, átlagosan 6–9 m/mp, hazánk területére legtöbbször nyugatról érkeznek. A trópusi ciklonoknak vannak hatalmas energiájú pusztító formációi is (hurrikán, tájfun). Viszonylag kis kiterjedésű forgószelek a tornádók, melyek tölcsérének külső felületén romboló erejű nagy szélsébség alakul ki.

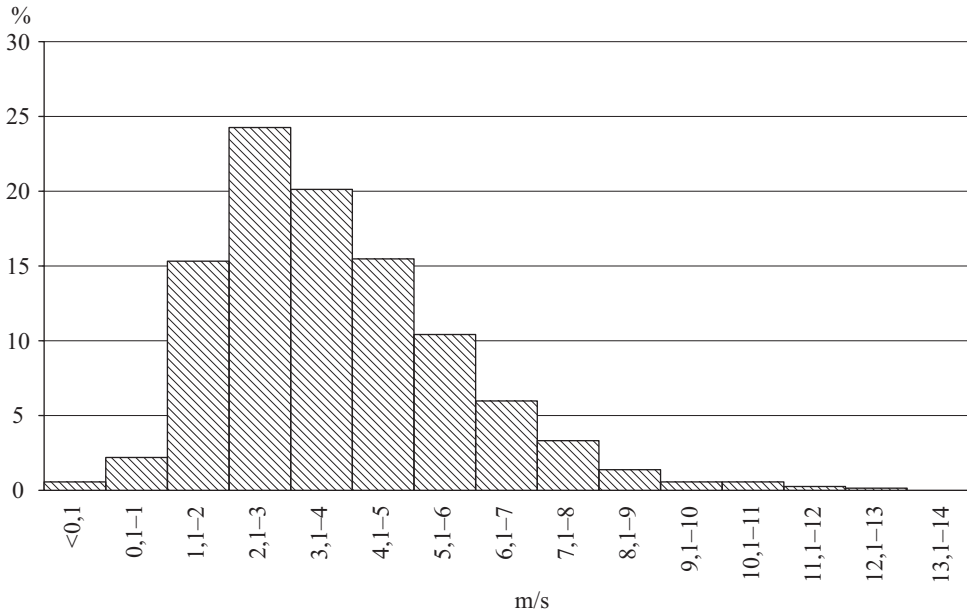
A szél vízszintes irányú sebességének értéke a magasság függvényében többnyire deformált haranggörbe szerint alakul, aminek 1–2 km magasságban van maximuma. A felszínen a légmozgás sebessége viszonylag kisebb a súrlódás miatt, a szél irányát és sebességét számottevően befolyásolja a felszín topográfiája (domborzat, erdőség, beépítettség stb.). A súrlódás a talajszinten turbulenciát okoz, ami még 1 km magasan is érzékelhető. Az is perturbációk forrása, hogy az áramló légtömegek összetétele és állapota sem homogén. A sokféle hatás következménye, hogy a szél ritkán egyenletes, lökések, ingadozások alakulnak ki, a szél iránya és sebessége változékony. A viszonyokat többnyire az éves átlagértékkel jellemzik, amiben azonban egyik évről a másikra 25%-os különbségek is előfordulnak.

A legtartósabb széljárás a tengereken, valamint a nyílt tengerpartokon érvényesül, ezekben az övezetekben nyerhető a legtöbb energia (~2,5 MWh/év.m²). A parttól a kontinens belseje felé haladva a széljárás szeszélyesebbé válik, és a súrlódás erősen csökkenti a sebességet. A nyerhető energia 1 és 0,1 MWh/év.m² között mozog. Jelentős lehet a szélenergia a hegyekben is, valamint az áramlás felgyorsulására módot adó kiterjedt fennsíkokon.

A légmozgásokból nyerhető energia becslése bizonytalan. A napsugárzás teljesítménymérlege alapján a légkörben elnyelt energia teljesítménye mintegy 48 PW. A szél energetikai hasznosítására legfeljebb a talajszint feletti 150–200 m-es határretegben kínálkozik lehetőség, ami a troposzféra szélenergiájának legfeljebb néhány százalé-

kát képviseli. Szélérőművek telepítésére csupán a szárazföldeket, és a sekély tengerek partközeli területét lehet számításba venni. A szélre is vonatkozik az a fenntartás, hogy csak bizonyos hányadát célszerű elvonni a természetes folyamatoktól (időjárás, tenger hullámzása, transzport folyamatok, felszín eróziója stb.). Így 1–2 TW körüli érték a lehetőségek felső határának tűnik.

A hasznosíthatóság oldaláról kiinduló becsléssel hasonló eredményre jutott az IIASA⁴³ is. Az intézet számításai szerint az északi és déli 50°-os szélességi körök közötti területen, a tengerparttól számított 1000 km-es sávon belül a műszakilag villamosenergia-termelésre hasznosítható szélenergia-potenciál évente 26 PWh, de gazdasági, terepi és esztétikai korlátok miatt ennek csupán a harmadát tartják kiaknázhatónak. Az ebből az energiamennyiségből számított éves átlagteljesítmény ugyancsak 1 TW körül mozog. Akárhogy számítjuk is a lehetőségeket, a világ jelenlegi összesített 4,5 TW-nyi erőműkapacitásának csupán egy részét lehetne szélérőművekkel helyettesíteni.



3.7. ábra. A szélesség relatív gyakorisága (Fertőrákos, 1981–2005)

A medencei jelleg miatt Magyarország a kevésbé szeles régiók közé tartozik, a tartós, nagy szelek hatása nem érvényesül, csupán a ciklonoknak és helyi szeleknek vagyunk kitéve. A széljárás meglehetősen szeszélyes, mind a szélirányok, mind a szélességek tekintetében. A 3.7. ábra a sebesség relatív gyakoriságára mutat példát. A meteorológiai állomások 10 m magasságban mérik a szélességet, az energetika számára e magasság többszöröse mértékadó, ahol a magasságfüggés miatt nagyobb a sebesség. Az éves átlá-

⁴³ International Institute of Applied System Analysis.

gos szélesebbesség 2–4 m/s között mozog, a közepes szélesebbesség a Bakony északi részén, a Kisalföldön és az ország néhány más pontján haladja meg számottevően az átlagot. A legszelesebb időszakunk a tavasz első fele, a legkisebb szélesebbeségek általában nyár végén, ősz elején tapasztalhatók. Áprilisban a havi átlag 4 m/s fölé emelkedik, augusztus, szeptember, október hónapokban alig haladja meg a 3 m/s-t.

A szélérőművek a sűrűlódás miatt csak 2,5–3 m/s szélesebbesség felett indulnak be, és 20–25 m/s felett azokat le kell állítani a rongálódás elkerülésére. Gyakran fordul elő tartós szélcsend is, a kihasználás évente 1600–1700 órát alig halad meg (az Atlanti-óceán partvidékét ennek kétszerese jellemzi). A kinyerhető átlagos teljesítmény az Alföld déli részén 70 W/m^2 , a legszelesebb északnyugati térségben $160\text{--}180 \text{ W/m}^2$. Sokféle becslés látott napvilágot a szélenergia-hasznosítás hazai potenciáljának elméleti értékére, a szélsőérték 500 PJ, amihez 15 GW teljesítmény tartozik, de a területi lehetőségek és a tényleges rendelkezésre állás figyelembevételével ennek csupán törtrésze realizálható. A szélérőművek lehetséges telephelyeiből az ország területének kétharmadát különböző okokból (pl. települések, vízfelületek, közlekedési útvonalak és energiaszállító vezetékek környezete, védett területek) kizárták.

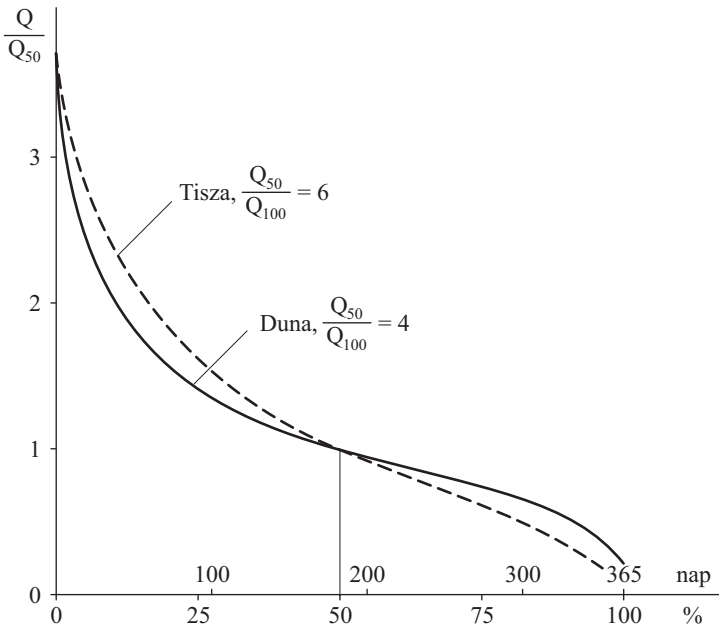
3.6. Vízenergia

A Föld felszínére érkező napsugárzásnak 23%-a (~40 PW) fordítódik a víz körforgásának fenntartására. Ennek nagy részét (20,7%) a víz elpárologtatása teszi ki, a többi az elpárologtatott víz szállítását, a csapadék és a felszíni vízfolyások fenntartását szolgálja. Mintegy 2–3 MJ munka szükséges ahhoz, hogy 1 kg víz a szabad vízfelszínekről elpárologjon, és a vízgőz a felhőképződés szintjéig felemelkedjen. Ennek az energiának a legnagyobb része azonban a mi számunkra elvész, a csapadékképződés során a gőz kondenzálódásakor felszabaduló hő a felhőket melegíti, a csapadék (eső, hó, jég) mozgása közben fellépő sűrűlódási és ütközési veszteség is a légkör hőtartalmát növeli, és ugyancsak veszendőbe megy a felhő és a felszín közötti távolságra eső potenciális energia.

A nedvesség a légkör tömegének 0,16%-a, a levegő vízkészlete átlagosan 14 Tt, ami 10 naponta cserélődik, és abból naponta átlagosan 1,4 Tt csapadék hullik ki. A Földre hulló csapadék évenkénti tömege ~500 Tt, amiből kerekén 100 Tt hullik a szárazföldre. A lehulló csapadék jelentős hányada azonban elszivárog, újra elpárolog, vagy a növények tápanyagellátását szolgálja, így csupán egy része (~20–30%-a) gyűlik össze a felszíni vízfolyásokban. Figyelembe véve a felszín átlagos ~800 m-es tengerszint feletti magasságát, a kontinensekre hulló csapadék globális potenciális energiája évente mintegy 300 EJ. A vízfolyásokban a vízrészecskéknak a gravitáció hatására a tengerig vezető útjuk során jelentős ellenállást kell leküzdeni, energiájuk nagy részét az áramlási veszteségek (sűrűlódás, örvénylés) emésztik fel. Műszaki hasznosításra az egész potenciálnak csupán az a hányada jöhet számításba, amivel csökkenteni tudjuk a tengerig vezető út során felemészített energiát. A hasznosíthatóságnak vannak műszaki korlátai, pl. ha túl kicsi az esésmagasság, vagy a vízhozam, kedvezőtlenek a topológiai körülmények, veszteségek

a kilépésnél stb. Mindezek alapján ~160 EJ-t tartanak ténylegesen hasznosíthatónak, amit a műszaki fejlődés növelni fog, de minőségi változást már nem lehet remélni.

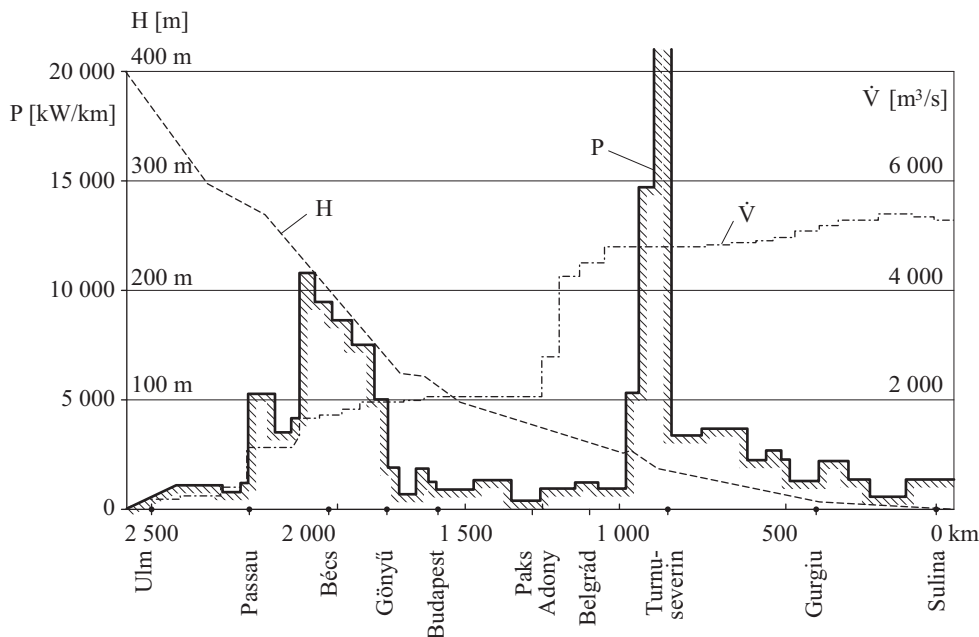
A hidrológusok a világ ténylegesen még kiaknázzható vízenergia potenciálját mintegy 15 PWh/év-re (~54 EJ) becsülik. A reális kihasználási tényezők figyelembevételével a szárazföldi vízfolyásokra még telepíthető erőművi kapacitás lehetséges mértéke ~2–3 TW. Ez a jelenleg működő vízerőművek kapacitásának 3–4-szeresét jelenti, de a világ összesített erőmű-kapacitásának csupán felét-kétharmadát teszi ki. E szerint a szárazföldi vízfolyások önmagukban még a világ jelenlegi villamosenergia-szükségletét sem tudnák fedezni.



3.8. ábra. A Duna és a Tisza vízhozamának tartamgörbéi

A folyók energiáját kitűnő (90–95%) hatásfokkal tudjuk hasznosítani. A lehetőség egyrészt a vízhozamtól függ, ami időben változó mennyiség. A vízhozam erősen függ a vízgyűjtő terület csapadékviszonyaitól, hegyvidéken a hóolvadás lefolyásától, a létesítmény feletti vízhasznosítástól (ipari felhasználás, ivóvíznyerés, öntözés stb.). A vízgyűjtő területeken csapadékban gazdag és szegény évek váltakoznak, ennek következtében a vízhozamban egyik évről a másikra is jelentős eltérések lehetnek, mind az éves mennyiségben, mind annak időbeli eloszlásában. Ha az egyenetlenséget nem lehet tározással kiegyenlíteni, a vízhiányos évben az erőmű az átlagosnál sokkal kevesebb villamos energiát tud szolgáltatni. A hidraulicitásban, ami az évente ténylegesen hasznosított vízenergia viszonya a sokévi átlaghoz, 1:3 arányú eltérések is előfordulnak. A változó vízjárás miatt a vízerőművek kapacitását nem az átlagos vízhozamra, hanem a lehetsé-

ges maximumra építik ki, ennek következtében kapacitástényezőjük (0,4–0,5) jóval alacsonyabb, mint a hőerőművéké. A 3.8. ábra példaképp a Duna és a Tisza átlagos vízhozam-tartamgörbéit mutatja. A vízhozam szélső értékei között nagyságrendi különbség van, a Duna sok évtized alatt tapasztalt legkisebb vízhozama $Q_{\min} = 700 \text{ m}^3/\text{s}$, legnagyobb vízhozama $Q_{\max} = 8500 \text{ m}^3/\text{s}$, az időszak felében $Q_{50} = 2260 \text{ m}^3/\text{s}$ -nál nagyobb volt. Másrészt a hasznosítható szintkülönbség függ a domborzati viszonyoktól és a vízjárást befolyásoló műtárgyaktól. A 3.9. ábrán a Duna energetikai hossz-szelvényén látható a H szintmagasság, a v sebesség, és a km-enként kinyerhető P teljesítmény.



3.9. ábra. A Duna energetikai hossz-szelvénye

A vízfolyás hasznosítható potenciális energiájának növeléséhez csökkenteni kell az áramlási veszteséget, ami a sebesség, valamint a súrlódási ellenállás mérséklésével érhető el. Ebben nagy szerepe van a folyószabályozásnak (medervonal kiegyenesítése, töltésépítés, medercsatornázás) és a vízépítési műtárgyaknak, különösen a duzzasztásnak, ami lelassítja a vízfolyást. A súrlódás csökkenését eredményezi, ha a vizet a természetes medertől eltérő, kisebb áramlási veszteséget okozó pályán vezetik, ami lehet a felszínen kialakított üzemvízcsatorna, a föld belsejében kialakított alagút, vagy külön vezetett nyomócső. Az így kialakított pálya a természetes medernél rendszerint rövidebb, és fala is simább.

Azt, hogy a műszaki potenciálból ténylegesen mennyit érdemes kiaknázni, két körülmény szabja meg. Egyrészt a gazdaságosság, ami alapvetően a beruházás költségén múlik, másrészt a környezetvédelem, amit a társadalmi szemlélet alakít. A nagy vízerő-

művek létesítése kiterjedt vízépítési munkákkal jár együtt, a világ legnagyobb méretű épített létesítményei vízerőművek műtárgyai. A vízerőművek önmagukban is beruházásigényesek, de többnyire együtt járnak egyéb építési munkálatokkal. A duzzasztáshoz gátakat, a vízgyűjtéshez víztározókat kell kialakítani, az árvízvédelem hosszú partszakaszok megerősítését igényli gátakkal, a duzzasztóműbe árapasztó zsilipeket kell beépíteni, hajózható folyókon a forgalmat lebonyolító zsiliprendszereket kell létesíteni, gyakran a turbinák kiszolgálására is jelentős létesítményekre (üzemvízcsatorna, nyomócső) van szükség. A létesítéshez rendszerint számottevő infrastruktúrát (közlekedés, közművek, lakások, energiaszállítás) is ki kell építeni. Mindezek következtében a vízerőművek nagyon beruházásigényesek, amit némiképp ellensúlyoz hosszú élettartamuk. Jó néhány 100 évnél régebben épült létesítmény is üzemben van, melyeknek csupán a gépészeti berendezéseit kellett időnként felújítani. A nagy beruházási költségek többnyire akkor térülnek meg, ha az energetikai hasznosítás a térség vízgazdálkodási problémáinak komplex megoldásával párosul. Ebbe tartozik az árvízveszély megszüntetése a partvédelem kiépítésével, valamint tározók révén a vízjárás kiegyenlítésével. Ugyancsak fontos lehet stabil hajóút kialakítása a duzzasztás segítségével, öntözési és egyéb vízigények kielégítése az egyenletesebb vízhozammal, a növényzet tápanyagellátásához a talajvízszint stabilizálása, üdülési övezetek kialakítása a víztározókkal, haltenyésztés lehetővé tétele, vízisportok feltételeinek a megteremtése stb. A komplex szerep, valamint a nagy beruházási költség, és a lassú megtérülés miatt állami szerepvállalás nélkül ritkán létesülnek nagy vízerőművek.

A sokrétű kölcsönhatás egyben a környezetvédelmi ellenzés legfőbb indoka. A leggyakoribb ellenérv, hogy az erőműépítés hosszabb szakaszon megváltoztatja a folyó, valamint környezetének életfeltételeit és mikroklimáját, ami módosítja az élővilágot, esetenként értékes fajok eltűnését is okozva. A gátak és töltések megváltoztatják a folyó vízjárását, hordalék és üledékviszonyait, a gátak felett kiülepedés, alatta medererózió jellemzi a viszonyokat. A gátak alatti folyószakaszon a víz hajlamos a meder erodálására, hogy pótolja a gáttal visszafogott hordalékot (ez zajlik a Duna magyarországi szakaszán). A tározóknál az eliszaposodás és kolmatáció, valamint ennek hatása az élővilágra a leggyakoribb aggályok. A műtárgyak befolyásolják a környezetben a talajvíz szintjét, ami szintén visszahat az élőhelyek alakulására, sőt az emberi tevékenységek lehetőségeire is (víznyerés, mezőgazdaság, halászat, üdülés, esztétikai érték). A folyószabályozás és a tározók építése jelentős területek elárasztásával járhat együtt, ami szükségessé teheti települések és a lakosság áttelepítését, megtörve emberek megszokott életvitelét. Különösen nagy térfogatú tározótavaknál félnek a gátszakadás katasztrofális hatásának lehetőségétől, bár ennek a valószínűsége nagyon kicsi (a világon létező 15 000 gát közül 6–10 évente fordul elő 1 gátszakadás, vagyis a kockázat 10^{-5} /év nagyságrendű). Sok vita zajlik a nagy tömegű gátak hatásáról a talajmozgásokra, esetleg a földrengésveszély fokozására.

Nehezíti a megítélést, hogy egyes folyamatok csak hosszú idő után stabilizálódnak. Az erőteljes ellenzés következtében a vízerőműveket – tiszta és megújuló jellegük ellenére – gyakran kirekesztik a fenntartható fejlődés megoldásai közül, legfeljebb a törpe vízerőműveket fogadva be a kívánatos környezetbarát létesítmények közé. A kialakult

társadalmi ellenérzés miatt a környezetvédelem az energetikai hasznosítás alapkövetelményévé vált.

Vízerőművek létesítésére nemcsak a folyókon vannak elképzelések, hanem esés-magasság kialakítására módot adó más körülmények között is. Egyelőre csupán elvi lehetőség a tengerszintnél mélyebben fekvő depressziók hasznosítása. Ilyen mélyen fekvő területek többfelé találhatók (pl. Holt-tenger), de mesterségesen is kialakíthatók egy tengeröböl elzárásával. Az abban kialakuló tó szintjét a párolgás szabja meg, a forró égvön különösen erős a nap párolgató hatása. A tengerből csatornán keresztül a depresszióba vezetett víz működtetheti a turbinákat, a kialakítható szintkülönbség 50–80 m-t is elérhet, amire sok GW-os erőművek telepíthetők. A felvetett koncepciók (Egyiptom, Vörös-tenger, Perzsa-öböl) realitása kétséges, egyrészt a szükséges mérnöki munkák túlságosan nagyszabásúak, másrészt nehéz felmérni az ökológiai következményeket (pl. a tavak sótartalmának növekedése a párolgás következtében).

A megújuló energiák között gyakran esik szó a hatalmas tengeri energiákról. Az árapály, a hullámok, a tengeri áramlatok, valamint a tengeri sótartalom-különbség révén nyerhető teljesítményt néhány TW-ra becsülik, a tengeri hőmérséklet-különbségeket pedig két nagyságrenddel nagyobbra. Ezek teljesítménysűrűsége azonban kicsi, az energiát nagy térrészből kell kinyerni, ezért a versenyképesség gyenge, amit tovább ront az energiaszállítás jelentős költsége, mivel többnyire a fogyasztói központoktól távol állnak rendelkezésre. A tengerek energiájának hasznosítására különleges esetekben – pl. kis szigetek ellátására – kerülhet sor, a nagyobb mértékű kiaknázást azonban csak távoli lehetőségnek tekintik. A kutatások kezdeti jellege miatt a környezeti hatások is kevésbé tisztáztak, az ülepedés, a vízi élővilág és madárpopuláció módosulása, ártalmas anyagok feldúsulása, befolyás a hajózásra és a parti életkörülményekre a leggyakrabban felvetett kérdések, néha a szén-dioxid-körfolyamat megzavarása is felmerül.

A legkiforrottabb megoldás az árapály hasznosítására áll rendelkezésre, aminek teljesítményét csillagászati adatokból számolva 3 TW-ra becsülik. Az árapály keletkezésében a legnagyobb szerepe a Hold vonzásának van, annak hatására az óceánok vízszintje erősen felemelkedik a Hold felőli és kevésbé az ellentétes oldalon. Az erők különbségét nagyjából kiegyenlíti a forgó Föld és a körülötte keringő Hold közös forgástengelye körüli forgásból származó centrifugális erő hatása. Ezekhez adódik hozzá a Nap jóval kisebb mértékű (mintegy 32%-ot kitevő) vonzereje, mindezek következtében naponta kétszer apály és dagály alakul ki. A Föld forgásának megfelelően a dagály nyugat felé vándorol, 24,8 órás periódusidővel, amire szuperponálódik a Nap 12 órás periódusidejű hatása. Két dagályhullám között 12 óra 25 perc telik el, de a Hold keringése következtében a csúcserték időpontja naponta mintegy 50 percet késik. Az égitestek mozgásai további kisebb ciklikus változásokat is előidéznak. Az óceánok közepén a vízszintváltozás mértéke az idő során szinuszosan változik, a mintegy 14 napos időkülönbséggel fellépő maximális és minimális dagály aránya kétszeres értéket is meghaladhat. A legnagyobb dagály a Föld, a Hold és a Nap tavaszi együttállásakor lép fel, a legkisebb az őszi oppozíciókor (amikor a Hold és a Nap iránya derékszöget alkot). A szintkülönbség értékét erősen módosítják a partviszonyok, a kontinentális talapzatok alakja, valamint az öblözetek, főleg a hullámok visszaverődése és rezonancia révén. A beltengerek kö-

zepén a dagály cm, partján dm nagyságrendű, a nyílt óceánokon 1 m körüli, az óceánok egyes partvidékein, főleg a folyótorkolatok tölcészerű összeszűkülésében feltorlódo víz szintkülönbsége rendkívül nagy értéket is elérhet. Az Atlanti-óceán partján a dagály átlagosan 3 m körüli, de Kanada keleti partján 15–20 m-es vízjáték is előfordul, az angol és francia partvidék egyes pontjain a csúcsérték 14 m.

Az árapály hasznosításának lényege egy magasabban fekvő víztározó és a tengerszint közötti esésmagasság kiaknázása kisesésű vízerőművel. A tározót a legegyszerűbb egy folyótorkolatban kiépíteni, zsilipekkel vezérelve a víz be- és kiáramlását. Erőművi hasznosításra csak előnyös topográfiai körülmények között érdemes törekedni. Elvileg 3 m-es szintkülönbség már hasznosítható, de gazdaságos megoldáshoz rendszeresen legalább 5–10 m-re van szükség. Az ígéretes helyek nem nagyon gyakoriak, de a felderített lehetőségek mintegy 120 GW (200 TWh) kiaknázására adnának módot. Gondot okozhat, hogy a teljesítmény 0 és egy változó maximum között hullámzik, a Hold járásának megfelelően, ami nem illeszkedik a fogyasztás ritmusához.

Néhány évtizede felerősödött a hullámzás hasznosítására irányuló törekvés. A tenger hullámzása véletlenszerűen alakul, amiért a kinyerhető teljesítmény jellege is ingadozó. A hullámokat a vízfelszín felett áramló szél gerjeszti, amire a helyenként kialakuló turbulenciák további hullámokat ültethetnek, és így többféle hullám eredője alakul ki. Ha a hullámok elég magasak, a szél tolóereje fel is erősítheti azokat. Az energiaátjármaztatás mértéke a szél sebességétől és behatolásának mélységétől függ, a hullám potenciális energiája annak magasságától függ, kinetikus energiája a terjedés sebességétől. A hullámok energiatartalma meglepően nagy, 1 m hosszú hullámfront teljesítménye 1 m-es hullámmagasságnál 1 kW, 2 m-es hullámoknál 10 kW, 5 m hullámmagasságnál 100 kW és 13 m magasságnál már 1 MW nagyságrendű. Miután a hullámzás lassan csillapul, a tenger energiatárolóként is viselkedik. Az Atlanti-óceánon szerzett tapasztalatok szerint csupán az idő 1%-a hullámmentes és hasonló időtartamú a szélsőségesen nagy hullámokat okozó viharos időszak. A hullámenergia kiaknázható mértékét 2 TW-ra becsülik, feltételezve, hogy arra gyakorlati lehetőség valószínűleg csak a partok közelében van. Eddig ténylegesen a tengerparton kialakított, vagy a tengerfenékhez rögzített berendezéseket hoztak létre, többnyire 50–150 kW teljesítménnyel (főleg bóják és világítótoronyok ellátására), de létesítettek 1 MW-os kísérleti szerkezetet is. Néhány tengerparti országban ambiciózus tervek vannak a hullámzás energiájának kiaknázására.

Időnként felvetődik a tengeri áramlások hasznosítása is. A víz egyenetlen felmelegedése, valamint az általános légkörzés szele gerjeszti az óceánok általános vízkörzését. Ennek hatására a felszínen 1–3 m/mp sebességű meleg áramlások alakulnak ki az egyenlítőől a sarkok irányába, a mélyben pedig ellentett irányú hideg áramlás zajlik. A tengeráramok 10–100 M m³/mp vízáramokat jelentenek, de a kis sebesség és a kis teljesítménysűrűség következtében a potenciáljuk valószínűleg nagyságrenddel marad el a felszíni vízfolyások potenciálja mögött. Hasznosításukra csupán nagyon vitatható elképzelések láttak napvilágot, pl. a Golf-áramlatból (átlagos szélessége 50 km, közepes mélysége 120 m, átlagos sebessége 2 m/mp, teljesítménye ~25 GW) 1 GW kinyerésére lehorgonyozott vízikerekkel. Természetesen a kis sebességű áramlást csak nagyon rossz hatásfokkal lehetne hasznosítani, az áramlás megzavarásának pedig beláthatatlan

következményei lehetnének az időjárásra. Folyótorkolatok közelében folynak kísérletek az áramlások hasznosítására tengerfenékhez rögzített vízikerekkel.

Trópusi és szubtrópusi tengerek felszínén és a mélyben érvényesülő hőmérséklet különbségével hőkörfolyamat alakítható ki (OTEC⁴⁴), az így termelt villamos energiát főleg szigetek ellátására tartják reményteljesnek. Csupán elvi lehetőség az édesvíz és a tengervíz sótartalmának különbségéből származó, ozmotikus nyomáskülönbség kiaknázása, ami mintegy 240 m esésmagasságnak felel meg.

A hazai vízenergia-potenciál kicsi, elméleti értékét 100 PJ/év-re teszik, amiből reálisan csupán 16 PJ/év (~4,5 TWh/év) építhető ki. Átlagos teljesítményben ez ~1 GW-ot képvisel, aminek 97%-a három nagy folyónkban (Duna, Tisza, Dráva) lenne megvalósítható. Természetesen a szlovák és horvát határszakaszokon nemzetközi együttműködésben. A hajózás érdekében a Duna magyar szakaszán a Duna Bizottság három gát létesítését irányozta elő (Nagymaros, Adony, Fajsz), ahol a gátakban 150–160 MW-os erőművek is létesíthetők. A kis esésmagasság (6–7 m) miatt a fajlagos beruházási költségek magasak, ezért versenyképesség csak komplex regionális vízhasznosítási programok (árvízvédelem, hajózás, víznyerés, öntözés, víztisztítás, üdülés, sport stb.) keretében valósulhat meg. Ezt azonban lehetetleníti az a vízerőműépítés-ellenes fobia, amit a politika hozott létre a magyar társadalomban a bős–nagymarosi projekt kiátkozásával.

Az ügyet a félelem teszi tisztázhatatlanná. Ugyanis nem kell valamilyen vízerőmű létesítését szóba hozni, elég a helyzet szakszerű és elfogulatlan vizsgálatát kezdeményezni, hogy valaki megkapja a nemzet elárulójának minősítését. A közvéleménybe és a médiába sikerült azt a téveszmét belegyökereztetni, hogy minden vízerőmű kártékony, veszélyezteti a természetet, az emberek biztonságát, az ország gazdasági egyensúlyát, és nem magyar érdekeket szolgál. A tények ezek ellenkezőjét támasztják alá, de azokat az előítéletek miatt a magyar társadalom nem hajlandó tudomásul venni.

Ez a közhangulat nem csupán vízerőművek létesítését akadályozza, hanem egy a nemzetközi fejlődés élvonalába tartozó szakmát is tönkretett. Olyan, világviszonylatban is elismert kiemelkedő személyiségek jellemezték a hazai vízépítést, mint Vásárhelyi Pál, Beszédes József, Kvassay Jenő, Mosonyi Emil és mások. Ezt a szakmát megfosztották a presztízsétől, elvesztette a vonzerejét, a szakembergárda utánpótlása elapadt. A szakmai háttér kiürülése nemcsak az erőműépítést érinti, hanem az ország olyan elemi érdekeit is, mint az árvízvédelem, a belvízrendezés, a víznyerés, a szennyvíztisztítás, az öntözés stb. Gyakran tapasztalható ezen kérdésekben is a szakmai háttér hiánya, a döntések megalapozatlansága és dilettantizmusa.

⁴⁴ Ocean thermal energy conversion.

4. Mit nyerünk a föld mélyéből?

4.1. Ásványi energiahordozók

Az ásványi energiahordozók nagyon fontos szerepet játszottak az emberiség gazdasági, társadalmi és politikai viszonyainak alakulásában. A világ energiaellátásának kerekén 80%-a jelenleg is az ásványi tüzelőanyagok hasznosítására alapul, arányuk hasonló a magyar energiamérlegben is. A prognózisok szerint ezt a domináns szerepüket még jó néhány évtizedig megőrzik.

Az elsődleges ásványi tüzelőanyagok természetes eredetű bányatermékek, a legjelentősebb a szén, a kőolaj, a földgáz és a hasadóanyagok, de más termékek is szerepet játszhatnak, pl. tőzeg, olajpala, bitumenes homok, palagáz, bányametán, termálvíz stb. A bányatermékek egy részét közvetlenül hasznosítják, de a legnagyobb részükből előkészítő és átalakító technológiákkal a fogyasztói igényeknek jobban megfelelő energiahordozókat állítanak elő. Az előkészítő műveletekkel a nem kívánatos alkotókat (pl. meddő, víz) leválasztják, a szállítást és a hasznosítást zavaró komponenseket szétválasztják, de a termék alapvető jellegét nem módosítják. Az átalakító technológiák lényegesen módosítják az anyagi összetételt és/vagy a tulajdonságokat, másodlagos energiahordozókat állítanak elő, pl. kocszot, kőolajtermékeket (benzin, gázolaj, petróleum, gudron stb.), PB-gázt, a szén elgázosításával vagy cseppfolyósításával nyert termékeket, szénhidrogének bontásával előállított tüzelőanyagokat, a hasadóanyagokból reaktorok fűtőelemeit. A fogyasztók igényének megfelelő energiahordozó – pl. villamos energia – előállítása gyakran többszörös átalakítás terméke.

Az ásványi energiahordozókat kitermelő bányászat durva beavatkozás a litoszférába.⁴⁵ A szilárd ásványok kinyerésének legelterjedtebb módszere a mélyművelés, aminél a felszín alatt kialakított bányatérsegekben fejtik ki a kőzetet. Ahol az adottságok kedvezőek, ott a termelés történhet a felszínen kialakított külfejtésben. A bányászat legvonzóbb módja az ásványkincs kihazatala valamilyen fluid közegben a földbe mélyített fúrt kutakon keresztül.

A bányászat sok kedvezőtlen következménnyel jár. Jelentkezik ez a bányászok egészségkárosodásában (balesetek, foglalkozási ártalmak), a felszínen jelentkező bányakárookban, a vízjárások befolyásolásában, hulladékok lerakásában, a környezet károsításában, a lakosság egészségkárosításában és más hatásokban.

⁴⁵ Kőzetövbbe.

4.2. Széntermelés

Az ásványi tüzelőanyag-használat sorát a szén nyitotta meg, az a Földön a legbőségesebben rendelkezésre álló fosszilis tüzelőanyag. Szén teszi ki a világ művelelő tüzelőanyag-vagyonának háromnegyedét és a feltételezett vagyonnak több mint 80%-át. A világon jelenleg bányászott szilárd ásványi anyagok 80%-a szén.

Kínában szénhasználatra utaló, 3000 évnél régebbi leletekre bukkantak, Angliában és Skóciában a felszínre kibúvó rétegeket már a római kor óta bányászták, sőt az „tengeri szén” néven még a kontinensre is eljutott. Már az ókorban is előfordult, hogy szenet használtak kovácsoláshoz és öntéshez, de alkalmazása nem terjedt el, mert a fát könnyebb volt kitermelni és eltüzélni. Az erdők ritkulása miatt a 9–10. században szórványosan már előfordult a fa helyettesítése szénnel. A 13–14. században kormozó füstje miatt még több városban szigorúan tiltották a széntüzélést, Angliában egy 1273-ban kiadott királyi rendelet intézkedett erről, aminek megszegése miatt I. Edvárd állítólag le is fejeztetett egy londoni polgárt. Ezek ellenére a szénhasználat terjedt a tűzifa árának emelkedése és a visszatérő ellátási zavarok miatt, a 17. században a városokban növekvő arányban alkalmazták lakóházak fűtésére, majd ipari célokra is.

Az első mélyműveléses szénbányákat 1350 táján nyitották meg a Ruhr-vidéken és Szászországban. A szén térhódítása a leggyorsabban az iparosodó Angliában következett be, a 17. század közepére az éves termelés elérte a 3 Mt-t, ami az akkori európai termelés 4/5-e volt. Lassan kiderült, hogy a pótanyagként tekintett szén hatékonyabb tüzelőanyag, mint a fa, nagyobb a fűtőértéke, magasabb a tüztérben a hőmérséklet, és olcsóbb, mert a bányák koncentráltan, nagy mennyiségben és hatékonyan tudják termelni.

A szénszükségletet különösen megnövelte a gőzgép megjelenése, a szén vált a kibontakozó ipari forradalom fő tüzelőanyagává. A gőzgép sikeres pályafutását a kőszénvel összefonódva érte el, a szén remek tüzelőanyag a gőzfejlesztő kazánokban, a gőzgép nagyszerű erőgép a széntermelésben is. Az energiaigényes ipartelepek a szénbányák közelébe települtek, a szénvidékek körül jelentős ipari városok jöttek létre. A szén és a gőzgép diadalmenete nem állt meg az iparnál, a gőzhajó és a gőzmozdony révén a közlekedésben is egyeduradalomra tett szert. A vasút és a hajózás összezsugorította a távolságokat, egy rendszerbe kapcsolva össze a Föld országait, elindult a világkereskedelem. A szén a mobil gőzgépek révén a mezőgazdaságba is betört. Szénből fejlesztették a világítógázt, illetve a városi gázt, szén volt a kibontakozó vegyipar alapanyaga, majd a 19. század vége felé megjelenő villamos erőművek fő tüzelőanyaga. A 19. századot a szén dinamikus térhódítása jellemezte, a szénfelhasználás az iparosodás fokmérőjévé vált, a világ széntermelése egy évszázad során százszorosára nőtt. A bányavállalatok, többnyire a kohászattal összekapcsolódva, rendkívül nagy gazdasági erővel és befolyással rendelkező vállalatbirodalmakká fejlődtek. Regionális szerepük idővel országos jelentőségűvé nőtt, a bankokkal összefonódva kulcsszerepet játszottak az ipari országok gazdaságában.

A széntermelés hazánkban 1753-ban indult el Brennebergbányán, amit további bányanyitások követtek. Az első nagy szénfogyasztó az 1830-as évektől a dunai gőzhajózás volt, majd a 19. század közepétől a vasút. A kiegyezés után erősen fellendült az ipari

felhasználás, mindenekelőtt a kohászaté. A nagy szénbánya vállalatok nálunk is banki érdekeltségbe kerültek, a dunántúli és északkeleti bányákat tulajdonló MÁK⁴⁶ a Hitelbankéba, az országban sokfelé szénbányák és más vállalkozások tulajdonosa, a Salgó⁴⁷ a Kereskedelmi Bankéba.

A folyamatoknak jelentős társadalmi következményei is voltak. A kialakuló munkásosztályban vezető szerepet játszottak a bányászok. A bányászok könnyen szervezhetőek, mivel a mostoha munkakörülmények erősítik az összetartást, ez magyarázza szerepüket a társadalmi és politikai megmozdulásokban. Gyakran játszottak vezető szerepet szociális követelményekkel fellépő tüntetésekből (a Magyarországon évente megünnepelt bányásznap is egy 1919. évi tatabányai tüntetés emlékét őrzi, amikor a csendőrsortűz több halálos áldozatot követelt). A bányászok gyakran álltak az élen politikai változásokat kikényszerítő akciókban, sztrájkokban, vagy erőszakos megmozdulásokban. Példaként említhetők a nyugat-európai és dél-amerikai sztrájkok, vagy a romániai Zsil-völgyi bányászok politikameghatározó megmozdulásai.

A szén termelése történhet a felszín alatti mélybányákban, vagy a felszínen kialakított külfejtések munkagödreiben. A szénvagyon nagyobbik hányada mélyebben fekszik és csak föld alatti bányászkodással lehet kitermelni. Összességében a világ széntermelésének kétharmada származik mélybányákból és egyharmada külfejtésből. Magától értetődő, hogy a széntermelés annál gazdaságosabb, minél közelebb van a szénréteg a felszínhez, a műszaki és gazdasági feltételek a mélyművelés alsó határát 1200 m körül jelölik ki. Az ennél mélyebben fekvő szén kitermeléséhez jelentős műszaki fejlesztésre lenne szükség (nagyobb teherbírású támszerkezetek, a munkakörülményeket biztosító szellőztetési technika stb.), ami nincs napirenden, mert a kisebb mélységben feltárt vagyon is bőséges. A magyar szénbányászatot sok évtizeden keresztül a néhány száz méter mélyen kialakított mélybányák jellemezték.

A mélyművelés feltételeit a geológiai körülmények szabják meg, a fejtési rendszer megválasztása a szénlencsék elhelyezkedésén múlik a kíséző kőzetben. Figyelembe veendő a szénrétegek száma, vastagsága, dőlése, szabálytalansága, hibái (vetők, elcsúszások), a kíséző kőzetek szilárdsága és permeabilitása, különösen a fedőréteg (főte) stabilitása és állékonyasága. Szerepet játszanak a tektonikai és hidrogeológiai viszonyok, a bányatértségben várható hőmérséklet, nyomás és légnedvesség, a gáz és vízveszély. Nagy előrelátással kell kialakítani a széntelep megközelítését, a szükséges szállítási, közlekedési, szellőztetési, energiaellátási, információtovábbítási utakat, az aknákat, illetve tárnákat.

A mélyművelés átlagos kitermelési együtthatója⁴⁸ 0,5, mivel a termelésnek jelentősek a veszteségei. Ennek egyik oka, hogy az optimális fejtési vastagságnál (1–3 m) vékonyabb, vagy vastagabb rétegek kitermelése veszteséggel jár. Ugyancsak veszteséggel jár, hogy gépekkel a szénvagyon mezők szerinti kitermelése célszerű, az ezeket elválasztó

⁴⁶ Magyar Általános Kőszénbánya Rt.

⁴⁷ Salgótarjáni Kőszénbánya Rt.

⁴⁸ A kitermelhető és a fizikai vagyon hányadosa.

szénpillérek végleg a föld mélyében maradnak. Az is veszteségforrás, hogy a termelést általában a legvastagabb, legjobb minőségű réteggel kezdik, ami gyakran akadályozza, esetleg lehetetleníti a többi réteg kitermelését. Veszteséget jelentenek azok a biztonsági pillérek is, melyeket a felszínen levő épületek és műtárgyak védelmére, vagy más okokból (pl. vízvédelem) kell kialakítani.

A szénréteg jellegétől függően széles vagy keskeny homlokú fejtést alakítanak ki. A széles homlokú fejtés a legtermelékenyebb és a legjobban gépesíthető módszer, ez jár a legkisebb veszteséggel (kitermelési együtthatója 0,6–0,8). A fejtés előrehaladásának iránya a homlokra merőleges, a szén elszállítása azzal párhuzamosan történik, maga a fejtés irányulhat a teljes frontra, vagy csak pászmarkra. Előnyei miatt a bányászat lehetőleg a széles homlokú módszer kialakítására törekszik, de a geológiai viszonyok gyakran csak a keskenyhomlokú fejtésre adnak módot. Ez nehezebben gépesíthető, a munkahelyek biztosítása miatt a szén jelentős hányadát nem lehet kifejtetni, emiatt átlagos kitermelési együtthatója 0,35 körüli. A szállítás a viszonylag keskeny homlokra merőlegesen történik, a hazai bányatérsegekben többnyire csak keskeny homlokú fejtés kialakítására volt mód. A korszerű bányákban a nehéz munkák (jövesztés, rakodás) gépesítve, az infrastruktúrák (szállítás, szellőztetés, víztelenítés, energiaellátás) nagymértékben automatizálva, illetve távirányítva vannak, a fedőréteget biztosító támszerkezetek sokszor önjáróak. A föld alatti műveletek gépesítése és automatizálása nemcsak a termelékenységet, hanem a biztonságot is növeli.

A felhasználók meghatározott minőségű és összetételű tüzelőanyagokat igényelnek, mivel a legtöbb berendezést arra méretezik, hogy a szén jellemzői meghatározott határokon belül maradnak. A gazdaságosságon múlik, hogy a kibányászott szenet milyen mértékű előkészítő eljárásoknak vetik alá, a használati érték növelése érdekében. A szénrögök méretének csökkentésére szolgálnak a törés, aprítás, őrlés különféle eljárásai. A mélybányákból felhozott aknaszenet törik, illetve aprítják, és ha a felhasználáshoz szükséges, a szemnagyság szerinti szétválasztáshoz osztályozzák. A nagy kazánok szénportüzeléséhez a szenet malmokban megőrlik. A szénportüzelésű kazánok üzemképességének sarkalatos pontja a légáramban befújt szénszemcsék mérete, ami az őrlést végző malmokon múlik. A kokszolásnak is fontos feltétele a megfelelő aprítás. Az aprított vagy őrlött szenet osztályozással lehet szemcsenagyság szerint szétválasztani, amit darabos szénél rácsokkal, apró szemcsék esetében vibrátorokkal, folytonosan mozgó rostákkal és szitákkal, esetleg hidrociklonnal oldanak meg. Többféle eljárás van a szén dúsítására, vagyis a meddő anyag leválasztására, ami az összes bányászott terméknek mintegy negyed részét teszi ki. A meddő többletsúlyt és többletmunkát okoz a szén szállításánál, őrlésénél, mozgatásánál és rontja az eltüzelhetőséget. A meddő kőzet szétválasztására már a fejtésnél és szállításnál is törekedni lehet, de a gépesítés nehezíti a szelektálást, ezért nőtt a felszíni eljárások szerepe. A mosásnál azt használják ki, hogy a meddő fajsúlya (~2 kg/dm³) közel kétszerese a szénének (~1,3 kg/dm³), és a vízzel alkotott zagyban – főleg apró szemű szénél – elérhető a fajsúly szerinti rétegződés. Ülepítéssel eljárásnál a víz lüktető mozgásával fellazítják a szitára helyezett nyers szenet, és a szemcsék a szitára visszaesve fajsúly szerint rendeződnek. A rendszert vízáramba helyezve terelő lapokkal külön lehet választani a szenet és a meddőt. Finomabb szétválasztáshoz több

ülepítőt kapcsolnak sorba. Áramlásos eljárásnál a nyers szenet állandó vízáram sodorja ferde felületen, és így alakul ki a megbolygatott anyag rendeződése. Tökéletesebb szétválasztás érhető el a víznél nagyobb – 1,3–1,8 kg/dm³ – fajsúlyú folyadék használatával, aminek a tetején úsznak a szénszemcsék. Ilyen folyadék lehet szerves anyagokat tartalmazó oldat, vagy homokot, baritot, agyagot, magnetitet tartalmazó szuszpenzió. Szárazon is dúsítható a szén légszerekben, ekkor a vízáram szerepét légáram tölti be. A főleg koksizálás előtt alkalmazott flotálásnál azt aknázzák ki, hogy a tiszta szén hidrofób, a meddő pedig hidrofil. Az erősen aprított (~2 mm-es) nyers szenet olyan vízben szuszpendálják, amelyhez levegőt és kevés habképző olajat adagolnak. A befúvás, vagy kavarási hatására hab képződik, a légbuborékok a szenet a felszínre emelik, az a felületi feszültség hatására a víz–levegő határfelületen helyezkedik el, a nedvesedő meddő pedig lesüllyed a habban. A szenet a folyamatosan eltávolított habtól kell elkülöníteni. Szárítás is szükséges lehet a nedves eljárásokat követően, vagy nagyon nedves szeneknél, ha az gazdaságosnak mutatkozik. Szárítani lehet mechanikai úton (rázással, centrifugálással) vagy hővel. Az utóbbinál a víz elpárologtatására szóba jöhet füstgáz vagy vízgőz bevezetése atmoszferikus nyomáson. Drasztikusabb eljárás az ahidrállás, aminél autoklavban nemcsak forró közeggel szárítják a szenet, hanem néhány bar nyomáson ki is préselik a vizet. Az összepréselt szén a kezelés után már nem tud vizet felvenni. A hazai szénélőkészítésben a bányáknál törést, osztályozást és esetenként mosást alkalmaztak, az erőművek porszentüzelésű kazánjainál pedig malmokkal megfelelő méretre őrlik a tüzelőanyagot. Igényesebb eljárások költségét energetikai barnaszeneink nem bírták el, a régebben alkalmazott lignit-ahidrállást beszüntették, mert versenyképtelenné vált. A szárítás kiküszöbölésére kidolgoztak módszereket a víz–szén szuszpenzió közvetlen eltüzelésére, ami alkalmazható a vízsugaras fejtés termékeinél, vagy vizes szállítási mód esetében (zagyban vagy szuszpenzióban) is.

A szén hasznosításának legfőbb gondja a környezetszennyezés. Sokirányú erőfeszítések történnek a környezetvédelmi követelmények kielégítésére, mindenekelőtt a légszennyezés visszaszorítására. A „tiszta szén” (clean coal) jelszó e törekvések szimbólumává vált, az ilyen irányú kutató-fejlesztő munkákat mind az államok, mind a nemzetközi szervezetek támogatják.

A mélyművelésű szénbányászat a legbalesetveszélyesebb ipari tevékenység. A szélsőségesen kellemetlen munkakörülmények (sötét, meleg, párás, poros, huzatos) között végzett nehéz fizikai munka sok ipari balesettel jár. A művelés során kialakított bányatérsek (aknák, vágatok) megváltoztatják a kőzetek egyensúlyi viszonyait, ami veszélyes hatásokat – omlás, sújtólégrobbanás, vízbetörés, bányatűz – okozhat. A sújtólégrobbanás a legpusztítóbb, bekövetkeztének feltétele, hogy a fejtés során kiszabaduló metán koncentrációja meghaladja a robbanási határ értékét. Nem csak a nyomáshullám, a szétrepülő törmelékek, a kialakult tűz, az oxigén elszívása, másodlagos szénporrobbanás veszélyezteti a bányászokat, a leszakadó kőzet elrekeszti a menekülési útvonalat és a szellőző járatokat. Ezek következtében időnként súlyos katasztrófák történnek, nagyszámú halálesettel. Magyarországon a legsúlyosabb ilyen tömeges szerencsétlenség 1978-ban Tatabányán 26 áldozattal és 1983-ban, Oroszlányban 36 halottal következett be. Külföldön ezeknél nagyságrenddel súlyosabb katasztrófák is előfordultak. Az omlás

robbanás nélkül hasonló következményekkel jár. A vízbetörés is elrekesztheti a menekülési útvonalat és elzárhatja a levegő utánpótlását, halálos áldozatokat követelve. A karsztvíz alatti bányákban gyakran fordult elő vízbetörés, Nagyegyházán a bányát oly mértékben elöntötte a víz, hogy a szén kitermelését fel kellett adni.

Jelenleg a zaj okozta halláskárosodás a legelterjedtebb foglalkozási ártalom, második helyen az izom és csontkárosodás áll, amit a munkagépek vibrációja okoz, számottevők a mozgásszervi ártalmak és néhány egyéb foglalkozási ártalom (pl. vazo-neurózis, burzitisz) is előfordul.

A magyar mélybányákban folyamatosan növelték a biztonságot, javították a munkakörülményeket, és fokozták a munkavédelmet. Ennek ellenére az 1980-as években a balesetek ezer főre eső gyakorisága (120/év) a foglalkozási balesetek átlagának mintegy háromszorosa, a halálos kimenetek átlagnak majdnem duplája (0,18/év) volt. Megjegyzendő, hogy a nem halálos balesetek jelentős része is súlyos következményekkel járt (csonkulás, érzékszerv vagy érzékelőképesség elvesztése, bénulás). A kedvezőtlen munkakörülmények légző- és mozgás-szervi megbetegedéseket okoznak, az erős por-képződéssel járó munka tipikus foglalkozási ártalma a pneumokoniózis (szilikózis), aminek súlyosabb kimenete fibrózis, vagy tüdőrák is lehet. E megbetegedést a munkahelyek szellőzésének javításával és a fokozott egészségi ellátással sikerült radikálisan csökkenteni.

A kőzeteknek a mélybányákban megbomló egyensúlya károkat okozhat a talajszinten is, főleg talajsüllyedés, beomlás révén. A bányakárok jelentkezhetnek a bánya bezárása után is, ha az elhagyott bányatérsegeket nem töltötték megfelelően fel, vagy szerkezeti megoldásokkal nem gondoskodtak azok stabilitásáról. A talajmozgás okozhatja épületek és utak sérülését, esetleg teljes tönkremenetelét, sínek, csővezetékek törését, vízjáratok eltérítését. A bányászat megzavarhatja a vízrendszereket is. A munkahelyek vízmentesítése érdekében a kitermelt szén mennyiségének többszörösét (esetenként sokszorosát) kitevő vizet kell kiemelni. Ennek egy részét a vezetékes vízellátásban hasznosították, a bányabezárások ezért vízellátási nehézségeket okoztak. A bányakárok szélsőséges példája volt, hogy a Dunántúlon a szén- (és bauxit-) bányászat vízkiemelése megzavarta a kiterjedt karsztvízrendszer egyensúlyát, víznyerők (források, kutak) apadtak el, csökkent a hévizi és budapesti termálfvízforrások hőmérséklete és hozama, mindez természetesen nagyon erős társadalmi reakciót váltott ki. A vízviszonyok rendezése érdekében korlátozni kellett a bányák vízkiemelését, egyes bányákat (pl. Nyírádon a bauxitbányát) be is zártak.

A széntermelés nagy teherterelei a meddőhányók, ahová a bányaépítés, a széntermelés és a szénelőkészítés során keletkezett meddőt elhelyezik. E jelentős területet elfoglaló közettrakások nemcsak a táj képét rontják, hanem káros kibocsátásoknak is forrásai. A szél port hordhat le, és a csapadék is kimos nem kívánatos anyagokat. Széntartalmuk meggyulladhat és sok éven keresztül bűzös és mérgező – főleg kéntartalmú – gázt bocsáthat ki, károsítva a növényzetet és az emberek légzőszerveit. A hányók felületének stabilizálása, majd a bányászat befejeztével rekultiválása nem egyszerű feladat. Gondot okoznak a bezárt bányák elhagyott felszíni létesítményei is, melyek gazdátlanul a pusztulás riasztó képét sugallják.

A szénbányászat leghatékonyabb módszere a gépesített külfejtés, aminél kevés munkaerővel nagy hatékonyságot lehet elérni. A nem nagyon vastag takarórétegek alatt fekvő, kiterjedt szénrétegeket nagy kiterjedésű munkagödörből hatalmas fejtő és rakodógépekkel biztonságosan lehet kitermelni. Bár a technológia erősen beruházásigényes, a termelt szénre vetített fajlagos beruházási költség átlagosan fele a mélyművelésének. A külfejtés akkor gazdaságos, ha a fedőréteg és a szénréteg vastagságának arányát kifejező letakarási arány a szén minőségétől függően nem nagyobb 5–8-nál. Az észak-magyarországi lignitnél ez 5–6 körül mozog (6–9 m³ föld/t lignit), ami az alacsony fűtőérték miatt a gazdaságosság határán van. A külfejtéses bányákat nagy kapacitással gazdaságos kiépíteni, nem ritkák a többször 10 Mt/év-es léptékek, a Mátra–Bükki külfejtés a kisebbek közé tartozik.

A külfejtések kitermelési együtthatója 0,8–0,9. A szénminőség és a fűtőérték ingadozását okozza, hogy a gépek időnként meddőt is fejtenek a szénnel együtt. Kemény fedőkőzetnél mozzanatos, puhábbnál folytonos működésű fejtőgépeket használnak, ezek teljesítménye óránként több ezer m³ is lehet. Hatalmas méretek jellemzik a lazább anyagok fejtésére használt vedersoros és marótárcsás kotrókat, illetve a keményebb anyagokhoz alkalmazott puttonyos vagy vonóvedres exkavátorokat. E teljesítményekhez illeszkednek a nagy anyagmennyiségek rakodására és szállítására szolgáló berendezések, szállítószalagok, illetve billenő teherautók és sínen gördülő szerelvények. A fedőrétegek letakarítását kiszolgáló átrakóhidak több száz méter áthidalására is képesek. A talajvíz szintjének süllyesztésére szolgáló kútrendszerrel 1–10 m³ víz kiszivattyúzása párosul 1 t szén kitermeléséhez.

A külfejtések nagy tehertétele a tájrömbölés, mert sok éven keresztül érvényesülő hatalmas és súlyos sebet ejtenek a tájon. Nemcsak a táj képét teszik tönkre, hanem felszámolják az eredeti élőhelyeket is. A nagy külfejtések sok km²-nyi területet foglalnak el és a legnagyobbakban akár több száz m mély munkagödört vájnak ki, a lefejtett takaróréteget pedig hatalmas hányókon deponálják. A nagy léptékű földmunkák porzással és zajjal zavarják a környéken élők közérzetét. Ezért a környezetvédelem lakott térségek közelében többnyire megakadályozza külfejtések létesítését. Az engedélyek elnyerésének mindig feltétele a leművelt bánya helyreállításához a jogi és pénzügyi feltételek biztosítása. A lezárás nem csupán a táj esztétikai rendezését jelenti, hanem az élővilág rehabilitációját is.

A bányászatot a termőtalajréteg gondos lefejtésével kezdik, a lefejtett humuszréteget tárolják, hogy a rekultiváció során azzal fedjék le a területet. A szén fedő kőzetréteget és a meddő zárványokat meddőhányókon tárolják, ezeket a bányászat befejezte után visszatöltik a munkagödörbe. A bányászok befejeztével visszahordják a termőtalajt, és abba növényzetet telepítenek, a rekultiváció során a betelepített fajok értékét fokozatosan növelik. Ez azonban hosszú időbe telik, és az eredeti növény- és állatvilágot nem mindig sikerül helyreállítani. Gyakran a talajvízből és csapadékból a kibányászott szén mennyiségének megfelelő térfogatú tó is keletkezik, aminek a hasznosíthatóságát szintén rendezni kell.

A külfejtések munkakörülményei sokkal kedvezőbbek a mélybányászaténál, ezt a nagyságrenddel kisebb baleseti mutatók és a foglalkozási ártalmak aránya is tükrözi.

Főleg a poros levegő és az időjárásnak kitett szabadtéri jelleg okoz ártalmakat, legnagyobb részüket mozgásszervi megbetegedések teszik ki.

Több mint egy évszázada foglalkoznak a szén föld alatti elgázosításával (UCG⁴⁹), sajnos egyelőre kevés sikerrel. A feladat megoldása többszörös előnyöket ígér: olcsó terméket, mivel a beruházásigény kicsi, a föld alatti munkával járó balesetek kiküszöbölését, a bányászat környezetkárosításának minimalizálását és a nagy mélységben található szénvagyon hozzáférhetőségét. Az elképzelés egyszerű, a szénhez fűrőlyukakon keresztül levegőt vagy oxigént kell bejuttatni, esetleg vízgőz hozzákeverésével. Ha begyűjtjük a szenet, a generátorgáz-gyártáshoz hasonló reakciók alakulnak ki. A szén in situ égetése elsősorban éghető szén-monoxid előállítására irányul, de az égéstermékben némi hidrogén és metán is előfordul. A világon lehetséges potenciált ~146 Tm³ fűtőgázra becsülik. A folyamatos égés biztosításához a szénréteg szerkezetét fel kell lazítani, pl. nagy nyomáson besajtoltt közeggel repesztve, robbantással vagy villamos árammal kialakított csatornákkal. Az égés szabályozása a föld alatt nehéz, az elgázosítás mellett kigázosítás, karbonizáció, valamint az égést elfojtó folyamatok is kialakulnak. A hőmérséklet eloszlását és a gázok áramlását a nem pontosan ismert morfológiai viszonyok és inhomogenitások befolyásolják. Az égési tér kialakítására és a közegek keringtetésére sokféle megoldást próbáltak ki, többnyire a levegőárammal ellentétes irányú égetés bizonyult a leghatásosabbnak, de eddig nem sikerült olyan technológiát kialakítani, amely egyenletes mennyiségben és állandó minőségben szolgáltatna éghető gázt. A fűrőlyukon kivezetett alacsony fűtőértékű gáz erősen szennyezett, tisztításra szorul, hogy tüzelőanyagként hasznosítható legyen. Probléma a védekezés a kiégett térség feletti felszín beroskadása ellen, valamint a felszín alatti vizek szennyeződésének megakadályozása az elszivárgó égéstermékkel. Az irányított fűrés technológiájának kifejlesztése új lendületet adott a föld alatti elgázosítás fejlesztésének.

A 20. században az olcsó és könnyen kezelhető szénhidrogének a fejlett országokban aláásták a szén versenyképességét. A szénhasználat nagyrészt a kohászat és az erőművek területére szorult vissza, a világon kibányászott szénnek több mint felét villamosenergia-termelésre fordítják. A világ energiaszerkezetében a szén részarányának maximumát az 1930-as években érte el, amikor a felhasznált primer energiahordozók 50%-ot is meghaladó hányadát tette ki, a 20. század végére ez az arány 30% alá csökkent.

Különösen válságos helyzetbe került a nyugat-európai szénbányászat, aminek nem csak a szénhidrogénekkel kellett versenyezni. A 90%-ban mélybányákban termelt, és nagy élőmunka költséggel terhelt szén nem bírta a versenyt sem a szénhidrogén tüzelőanyagokkal, sem a jó minőségű, olcsó tengerentúli szénnel. Ez utóbbi olyan országokból (pl. Ausztrália, Dél-Afrika, Kolumbia) származik, ahol hatalmas, jó minőségű szénelőfordulások vannak, és azt külfejtésekben olcsón lehet kitermelni. A hosszú tengeri szállítás ellenére ez a nyugat-európai kikötőkben olcsóbb, mint az Európában mélyműveléssel bányászott szén. A század második felében tovább rontotta a szén pozícióját az égéstermékekre vonatkozó környezetvédelmi követelmények szigorodása.

⁴⁹ Underground coal gasification, föld alatti szénelgázosítás.

Az Európai Unió több országában a szénbányászat nagy része leépült. Néhány országban az energetikai ellátásbiztonság érdekében, és a munkahelyek megőrzésére jelentős állami támogatással igyekeztek megőrizni a szénbányászatot, nem mindig sikerrel. A támogatási politikát Németország (és Spanyolország) hosszabb időre kívánja fenntartani, amit az Európai Unió csak vonakodva tolerál. Néhány nagy fejlődő országban (többek között Indiában és főleg Kínában) a szénfelhasználás jelenleg is nagy léptékben nő, mivel a gazdaság rohamosan növekvő energiaigényének fedezésére a széntermelést lehet a legkönnyebben és legolcsóbban növelni.

A szénbányászat nagy erőfeszítéseket tesz piaci helyzetének visszaszerzésére. Az 1970-es években a szénbánya vállalatok és a nagy olajtársaságok nagyvonalú kutató-fejlesztő programokat indítottak a szénből cseppfolyós üzemanyagok és szintetikus földgáz előállítására. Az Egyesült Államokban államilag koordinált projektet (Synfuel) is kialakítottak. A kutató-fejlesztő munka részben a II. világháború idején alkalmazott eljárások továbbfejlesztésére irányult, de nagyszámú új technológiát is kifejlesztettek, kísérleti üzemek is létesültek, de még a magas olajárak mellett sem bizonyultak versenyképesnek a szénből fejlesztett szénhidrogének. A nagy nekibuzdulás azért nem volt haszontalan, egyrészt kialakítottak hatékony eljárásokat szénhidrogének szintetikus előállítására szénből, másrészt növelték az ellátásbiztonságot, tartalék megoldásokat teremtve a szénhidrogén-ellátás esetleges beszűkülésére.

A piac beszűkülése arra szorította a szénbányászatot, hogy racionalizálja a termelést, javítsa a felhasználás hatékonyságát, és fejlessze a tiszta szén (clean coal) technológiákat. A környezetszennyezők közül a por-, SO_x - és NO_x -kibocsátás korlátozása megoldott, jelenleg az erőfeszítések a CO_2 -problémára koncentrálnak. A füstgázból a port nagy erőművekben többnyire elektrosztatikus úton választják le, kisebb tüzelőberendezésekben ciklonokat, vagy zsákos szűrőket alkalmaznak, néha mosás is számításba jöhet. A füstgáz kénmentesítők többsége nedves eljárást alkalmaz lúgos kémhatású vízzel, de vannak száraz megoldások is megfelelő abszorbensekkel. A nitrogén-oxidok redukálására leginkább a katalitikus reakciók terjedtek el.

Az erőművekből kibocsátott szén-dioxid csökkentésének egyik útja a tüzelési és hasznosítási hatások növelése, például a szénelgázosításra alapuló kombinált ciklusú rendszerrel (IGCC⁵⁰). Nagy erőműveknél ultra-szuperkritikus gőzparaméterek alkalmazásával is foglalkoznak. A legfontosabb törekvés a szén-dioxid kivonása a füstgázból, és tárolása geológiai formációkban (CCS⁵¹), erre néhány demonstrációs erőmű épül szerte a világban. Többnyire aminos vegyületekkel mossák ki a füstgázból a CO_2 -t, de számításba jöhet tüzelés tiszta oxigénben is, ilyenkor csak vízgőz és szén-dioxid szétválasztására redukálódik a feladat, ami lehűtve a víz kicsapódásával oldható meg. A tárolásra számításba jöhetnek leművelt szénhidrogén mezők, akviferek, felhagyott bányatérsegek, foglalkoznak a tengervízben történő elnyeletéssel is, valamint megkötéssel kőzetekben karbonátok létrehozásával. A szakértők nem várnak egy-másfél évtizednél hamarabb

⁵⁰ Integrated gasification combined cycle, elgázosítással integrált kombinált ciklus.

⁵¹ Carbon capture and storage, karbonkivonás és -tárolás.

műszakilag érett megoldást elviselhető költséggel. Figyelmet érdemlő kutatások folynak a szén-dioxidból metanol előállítására is.

Magyarország a második világháború után a helyreállítás kulcskérdése volt a széntermelés megindítása, a „széncsata” a kor mozgósító erejű politikai jelszavainak egyike volt. A feszített iparosítás és a felkészülés egy új világháború lehetőségére autark gazdaságpolitikát követelt, aminek energiaellátásához hazai forrásként csak szén állt rendelkezésre. Magyarország energiagazdálkodása az 1960-as évekig jóformán teljesen a hazai széntermelésre alapult, energiaszerkezetünkben a szén részaránya 1950 táján tetőzött 90%-kal, a széntermelés 1965-ben érte el csúcsteljesítményét 420 PJ energiaértékkel, a bányászlétszám az 1960-as években megközelítette a 100 000 főt. A szénbányászat hegemon szerepéhez nagyon jelentős gazdasági és politikai súly járult.

Változó megnevezéssel hoztak létre központi szervezeteket a tevékenység irányítására, vagy koordinálására (Magyar Állami Szénbányák Rt. 1946, Egyesült Magyar Szénbányák 1967, Magyar Szénbányászati Tröszt 1974, Szénbányavállalatok Egyesülése 1981, Szénbányászati Szerkezetátalakítási Központ 1990), de az iparág pillérei a területi bányavállalatok voltak. Ezeket is gyakran szervezték át, a legstabilabbak a Borsodi, Dorogi, Közép-dunántúli, Mátraaljai, Mecseki, Nógrádi, Oroszlányi, Ózdi, Tatabányai, Várpalotai Trösztök voltak. Vezetőik a politikai és közigazgatási funkcionáriusokkal összefonódva területük meghatározó személyiségeivé váltak, erős befolyással az országos politikára is. A bányavállalatok nagy gazdasági erejükkel területük kegyurai voltak, támogatva az infrastruktúra fejlesztését, az egészségügy és oktatás intézményeit, finanszírozva a templomépítéstől a sportklubokig és a bölcsődéktől a tűzoltóságig a közösségi szükségleteket. Ez a támogatás eredményezte jó néhány településünk – pl. Tatabánya, Pécs, Salgótarján, Dorog és mások – fellendülését. A munkaerőt kiemelt juttatásokkal (magas bér, lakásjuttatás, korai nyugdíj, különleges egészségi és szociális ellátás stb.) és a munka magas társadalmi presztízsével biztosították. A bányászok díszegyenruhában feszítettek az ünnepeken, hullottak a jó munkáért járó kitüntetések, a médiában sztárolt sztahanovisták⁵² még Kossuth-díjban is részesülhettek. A közéletben a szénbányászat teljesítményéről csak felsőfokon esett szó, a hátrányokról (balesetveszélyes, egészségkárosító, környezetszennyező, beruházásigényes, a szén hasznosítása körülményes stb.) nem illett beszélni, mert hős bányászaink erőfeszítéseinek leértékelése könnyen vezetett a rendszerellenesség vádjához.

De a fénykornak véget vetett a fejlődés, a szén háttérbe szorította az olaj. Az enyhülési politika megnyitotta az olajimport lehetőségét, a széntüzelésű berendezéseket tömegesen térítették át olajra, amit a műszaki fejlődés szimbólumának tekintettek. Az olajkrízis 1973-ban megtörte ezt a folyamatot, a fókuszba ismét a szén került, a széntermelés leépítését célzó korábbi határozatokat felelőtlennek és kártékonynak tekintették. Ambiciózus programok (a barnaszénbányászat eocénprogramja, a feketeszen-termelés liászprogramja) születtek a szénbányászat reneszánszára, a szénfelhasználás növelése érdekében elkezdődött az öreg szénérművek elavult technikát konzerváló rekonstruk-

⁵² A munkaversenyben kiemelkedő teljesítményt felmutatók, Sztahanov orosz bányász követői.

ciója. A szénbányászat újraélesztéséhez fűzött remények azonban nem váltak be. A líász-program okafogyottá vált, mert a magyar kohászat a mecseki szén kokszolása helyett kokszimporra tért át. Az eocén bányák (Nagyegyháza, Lencsehegy, Mány, Márkushegy új bányái, valamint Dudar és Balinka rekonstrukciója) nem váltották be a hozzájuk fűződő reményeket, a szénvagyon mennyisége és minősége elmaradt a várakozásoktól, a nagyegyházi bányát el is öntötte a víz. (Egyes geológusok óvtak a karsztvíz alatti bányanyitástól, de ezt felülírta a népgazdasági terv teljesítésének kényszere.) A földgáz térhódítása nyomán a lakossági szénpiac összeomlott, a szén majdnem kizárólagos fogyasztói az erőművek maradtak.

A magyar kormányok hosszú ideig dotációkkal támogatták a széntermelést, de az évtizedeken keresztül folytatott sorozatos átszervezésekkel és szanálásokkal sem sikerült a szénbányák versenyképességét biztosítani. Különösen kiélezte ezt a kérdést a rendszerváltást követően a piaci viszonyok kialakulása. A szénbányászat gondját az állam a vállalati körre terhelte át azzal, hogy az 1990-es évek elején a szénerőművekbe olvasztotta a tüzelőanyag-bázisukat jelentő bányákat. A szénbányászat kapacitásának 95%-a, a produktív munkaerő 80%-a olvadt be az erőmű vállalatokba. A gyenge minőségű szenet drágán termelő bányák házassága az öreg, rossz hatásfokú és környezetszennyező erőművekkel nem bizonyult versenyképes megoldásnak. A szénbányászat leépülését csak lassította az összevonás, a termelés fokozatosan néhány Mt-ra csökkent, a létszám pedig tizedére apadt. A légszennyezésre vonatkozó szigorú EU-előírások meghonosítása elkerülhetetlenné tette a szénerőművek bezárását és ezzel a barnaszéntermelés majdnem teljes felszámolását. Egyedül az Oroszlányi Erőmű és az ahhoz tartozó márkushegyi bánya kapott néhány éves moratóriumot – nem eléggé előrelátó választási ígéretek nyomán. Ennek súlyos gazdasági terheit (állami dotáció, MVM-hozzájárulás, lakosság fizette szénfillér) csak egy ideig sikerült elviselni.

A bányászok munkahelyének elvesztése súlyos szociális problémákat okozott, de különféle intézkedésekkel (átképzés, végkielégítés, munkahelyteremtés, kedvezményes nyugdíj) viszonylag súrlódásmentesen sikerült a feszültségeket levezetni. De a szocialista munka hőseiből mégiscsak csellengő munkanélküliek váltak, a jómódú bányásztelepülésekből leépülő szegénynegyedek. A szénbányák csődje, majd bezárása nyomán a bányák által támogatott közintézmények sorát kellett felszámolni, ami a munkanélküliséggel tetézve a települések elszegényedéséhez és leépüléséhez vezetett.

A magyar mélyműveléses szénbányászat valószínűleg véglegesen megszűnt. Időnként felmerülnek elképzelések a bányák újranitására, de ezek nem bizonyulnak életképesnek. A reményt élteti, hogy néhol kis léptékű peremi külfejtéseket létesítettek, helyi tüzelőigények kielégítésére. A föld mélyében hagyott szénvagyon a kormányzat stratégiai tartaléknak minősítette, de ez inkább a szenes lobbis lecsendesítését szolgálja, mint a termelés kilátásba helyezését egy távoli jövőben. A vagyon hasznosítását csak teljesen új in situ technológiák – pl. metánkinyerés, föld alatti elgázosítás – tehetik versenyképessé. A bányavállalatok felszámolása sok rendezetlen ügyet hagyott maga után, ezért a kormány külön szervezetet hozott létre a bányakárok rendezésére és a meddőhányók felszámolására.

A külfejtéssel termelhető lignit bányászata versenyképes maradt. A Mátra–Bükk vonulat lábánál elterülő lignitmezőt több évtizede művelik, ellene a lakosság nem tiltakozik, mert a térség fő munkaadója a bánya és az erőmű. A lignittüzelésű Mátrai Erőmű az ország legnagyobb szén-erőműve. Üzemének meghosszabbítására voltak tervek új blokkok létesítésével, de ettől a tulajdonosok (MVM, RWE) – gazdasági okokból – elálltak, ami kérdéssé tette az erőmű és a bánya jövőjét. A döntést egyrészt az energiacegerekre kivetett különadók és jövedelemkorlátok, másrészt a szén-dioxid-kibocsátási kvóták megvásárlásának terve váltotta ki. A Magyarország több területén található jelentős lignit-előfordulásokat aligha lehet kibányászni, a lakosság tiltakozása miatt. Torony térségében pl. a nagy lignitvagyonot többször szándékozták termelésbe vonni, de ezt mindig megakadályozták az ottani települések.

4.3. A kőolajtermelés szerepe

A felszíni olaj-, illetve aszfaltkibúvások hasznosításáról az első adatok az ókori Mezopotámiából származnak. A fontos szövegeket tartalmazó agyagtáblákat bitumenborítással óvták, aszfaltot használtak hajók impregnálására, téglafalak tapasztására, homokkal keverve épületalapok szigetelésére. A Gilgames-eposz leírja, hogyan főzték a bitument, a kellő keménység elérésére. Olajfáklyák alkalmazására, valamint templomi lángok táplálására már Babilonban is voltak példák, az első olajlámpást alexandriai Héron szerkesztette i. e. 100 körül, de elterjedésére 2 évezredet kellett várni. Olajjal gyűjtötták fel a rómaiak a szaracén flottát, és olajtűztől pusztult el az ostromlott Siracusa 670-ben. A tatárok tüzes nyilain, a bizánciak tengeri ütközetben alkalmazott „görögtüzében” felitatott szurok égett. Kolumbusz a bennszülöttek tapasztalata alapján trinidadi aszfalttal szigetelte a hajóit. A középkortól kezdve az olajat külsőleg és belsőleg gyógyszerként is alkalmazták, a 18. századtól kezdve előnyös kenési tulajdonságait is kiaknázták. A kőolajleparlás lehetőségét először Agricola említette (1550-ben), arab gyakorlat alapján. Az első nagyobb keresletet a kőolajtermékek iránt a petróleumlámpák széles körű elterjedése támasztotta a 19. században. Ennek kielégítésére kezdték meg a felszínközeli előfordulások kitermelését ásott kutakból, árkokból, felszíni kibúvásokból, és indult el a kezdetleges leparlás is. A benzin ebben az időben kellemetlen és veszélyes hulladék volt, amit óvatos eltüzeléssel kellett megsemmisíteni. Szigorú rendszabályok tiltották, hogy a petróleum hígítására használják, mert a petróleumba kevert benzin okozta robbanás sok ember halálát okozta. Úgy tűnt, hogy a világítógáz, majd a villanyvilágítás megjelenése aláássa a petróleum és ezzel az egész olajipar jövőjét, és csak az akkoriban kiépülő vasút növekvő kenőanyag-szükséglete marad meg a nehéz frakciók felhasználási területeként. Ki gondolta volna az első – kerékpárokra szerelt – kezdetleges belső égésű motorokról, hogy megváltoztatják az emberiség életvitelét, és ennek érdekében a kőolajipart is példátlan ütemű fejlődési pályára állítják. Míg a 20. század elején a világ kőolajtermelése alig ért el néhány millió tonnát, a század végén már 3,5 milliárd tonna körül mozgott. Nincs még egy nyersanyag, melynek termelése egy évszázad alatt ezerszeresére nőtt.

A kőolaj néhány párlata (benzin, petróleum, gázolaj) bizonyult a belső égésű motorok legmegfelelőbb üzemanyagának. Így a kőolaj vált a mobil motorok domináns üzemanyagforrásává, ami meghatározó szerepet nyert a közlekedés átalakulásában, az egyéni mobilitás kialakításában, a szállítási és kereskedelmi tevékenység átrendeződésében, és nem utolsósorban a hadseregek mozgékonyságának és ütőerejének radikális megnövekedésében. Az autó és a repülőgép a mobilitás lehetőségének megteremtésével új dimenziót nyitott az emberek életében, a távolságok összezsugorodtak a Földön. Ezen szerepek mellett szinte másodlagos, hogy a frakciók egy része sokoldalú vegyipari és építőipari alapanyag, illetve tüzelőanyag. A kőolaj nemcsak az emberek életvitelének megváltozásában játszott meghatározó szerepet, hanem az államok politikai és katonai viszonyainak alakulásában is.

Az olajipar gyors fejlődése a világ legnagyobb tőkeerejű és hatalmas nyereségű vállalatainak a létrejöttét és mesés magánvagyonok felhalmozódását eredményezte. A leghamarabb és a legdinamikusabban az amerikai olajipar alakult ki. Rendkívül nagy politikai és gazdasági befolyása, valamint visszaélései miatt Amerikában a Standard Oil a trösztellenes törvény alkalmazásának legfőbb célpontjává vált. A 20 évig tartó pereskedés végén a Legfelsőbb Bíróságnak a tröszt felosztatására kimondott ítélete után 1911-ben azt 34 vállalatra bontották, melyek között olyan, önmagukban is hatalmas szervezetek voltak, mint az Exxon, a Mobil Oil, a Standard Oil of California (későbbi nevén Chevron). A vállalathálózat azonban bonyolult pénzügyi kapcsolatok, titkos megállapodások és informális eszközök révén továbbra is az alapító J. D. Rockefeller irányítása alatt maradt. Az újabb olaj-előfordulások felfedezése az Egyesült Államokban további vállalatok alapítására adott módot, egyesek, pl. Texaco, Gulf Oil, a legnagyobbak sorába fejlődtek. Mivel a kőolajtermékek nemcsak a közlekedési eszközök és mobil munkagépek pótolhatatlan üzemanyagai, hanem biztosításuk a korszerű hadseregek ütőképességének is kulcskérdése, a kőolajipari vállalatok tevékenysége gyakran összefonódik a nagypolitikával. A páratlan lehetőségek kiaknázására követett agresszív politikájuk fegyvertárában mindennapos volt a gazdasági nyomás, az erőszak, a törvények kijátszása, ha érdekük kívánta, kormányokat döntöttek meg, felkeléseket és háborúkat robbantottak ki. A nagyhatalmak közötti harc a kőolajforrások birtoklásáért már a 20. század elején megindult, a kőolajforrások megszerzését politikai intrikák, titkosszolgálati akciók, fegyveres konfliktusok kísérték. A megoldás többnyire az értékes területek megszállása, nyílt gyarmatosítása volt. A Távol-Keleten kialakuló Royal Dutch Shell kíméletlen módszerekkel irányító H. Deterding országok politikáját befolyásoló szerephez jutott, a bakui olajmezők elvesztése miatt a Szovjetunió elleni intervenció fő finanszírozójává, majd a náci Németország támogatójává vált. Az iráni olaj kiaknázási jogát a haditengerészet ügynöke ravasz csellel szerezte meg az angol kormánynak, erre alapították a British Petroleum (BP) elődjét. Regénybe illő bonyodalmak között zajlott a harc az iraki olajért a német és az angol szervezetek között. A vezető olajtársaságok 1928-ban egy skóciai kastélyban (Achnacarry) kartell⁵³ létrehozásával stabilizálták kapcsolataikat.

⁵³ Egyezmény a kőolaj-kitermelés korlátozására és a nemzetközi kőolajpiacok felosztására.

A két világháború között a nyílt katonai akciók finomabb politikai módszerekkel ötvöződtek, gyarmati státusz helyett protektorátus kialakításával, gazdasági befolyás biztosításával, baráti kormányok hatalomra juttatásával. A világháborúk stratégiai céljai között jelentős szerepe volt a kőolajforrások birtokbavételének, és az ellenség távoltartásának a forrásoktól. Az olajipari vállalatok üzleti érdeke azonban rendszerint megelőzte az állami érdeket, még a világháború időszakában is folytak üzemanyagszállítások az ellenséges országoknak.

A két világháború között tovább erősödött az amerikai olajipar pozíciója, új jelentős olajkincseket tártak fel (Venezuela, Mexikó, Texas) és megszerezték az olajszállítási és finomítási kapacitások legnagyobb részét. A második világháború végén a világ gazdaság olajellátása szilárdan a nagy olajipari társaságok – mindenekelőtt a rendkívül megerősödött amerikai irányítású vállalatok – kezében koncentrálódott, a nagy olajvállalatok gazdasági hatalmuk, politikai befolyásuk csúcán voltak, a világ legnagyobb vállalatainak élbolyában a legtöbb helyet a multinacionális olajvállalatok foglalták el. Az olajpiac helyzete megingathatatlanak tűnt, a Közel-Keleten és Észak-Afrikában mesés olajkincsekre bukkantak, csak meg kellett fúrni Szaúd-Arábiában, Kuvaitban, Iránban, Irakban, Líbiában és másutt a homokot, és ömlött az olcsó olaj. Az olajforrások kiaknázásának a lehetőségét több évtizedre szóló koncessziók biztosították, rendkívül előnyös feltételek mellett. A gyarmatbirodalmak felbomlása után a gazdasági függés vette át a katonai és politikai hatalom szerepét. A volt gyarmati országok politikai függetlenségük elnyerése után is sok szálon függték a volt gyarmattartóktól, de ezek a szálak koptak, és az amerikai tőke igyekezett átvenni a befolyást ezen országok felett. Ebben szerepet játszott a feszült nemzetközi helyzet, a hidegháborúban a katonai támaszpontok mellett az olajforrások birtoklása is stratégiai jelentőséggel bírt. A kulisszák mögött néha előfordultak békétlenségek a szövetségesek között, de az amerikai hegemonia vitathatatlan volt. A monokulturális olajországokban a tényleges hatalom az olajvállalatok kezében volt, ezek gazdasági kényszerrel, politikai intrikákkal, ha kellett erőszakos beavatkozással biztosították, hogy a helyi politikai vezetés megfelelően képviselje érdekeiket. Ha valamelyik kormánya nem volt elég engedelmes, újat ültettek a helyére, az okvetetlenkedő személyiségeket lecserélték, vagy eltették láb alól, az olaj kiaknázását veszélyeztető szociális elégedetlenséget vaskézrel törték le. Az olajpozíciók átrendezése érdekében nem voltak ritkák a puccsok, államcsínyek, néha helyi háborúkra is sor került.

A második világháborút követő negyedszázad alatt az olajbirodalmak helyzete – mindenekelőtt a „7 nővér” (Exxon, Shell, Texaco, Mobil, Gulf, Standard, BP) és leányvállalataik szövetvényes hálózata – rendíthetetlennek tűnt. A bőségesen és olcsón rendelkezésre álló olaj világpiaci árát a kedvező koncessziós feltételek és az alacsony önköltség biztosították, a hordónkénti olajár 2 dollár alatt mozgott. De az olajvilág rendszerén megjelentek az első repedések, melyeket akkor még gyorsan ki lehetett javítani. Az eredeti állapot helyreállítására az olajtársaságot államosító Moszadik iráni miniszterelnököt megbuktatták és bebörtönözték (1953), az olasz ENI⁵⁴ önálló olajpolitikát

⁵⁴ Ente Nazionale Idrocarburi, Nemzeti Szénhidrogén Vállalat.

ösztönző vezérigazgatójának, Matteinek a repülőgépet lelőtték (1962). De a feszítőerők egyre nőttek, a fejlődő olajországok gazdasági felemelkedésükhöz nagyobb részesedést követeltek az olajjövödelmekből. Az olajtársaságok engedményekre kényszerültek, az 1970-es évek elején nagyobb koncessziós díjakat, bányajáradékokat, exportilletékeket fogadtak el, bizonyos idő után beletörődtek a tulajdonban való részesedésbe is, egyes országokban (Mexikó, Líbia, Szíria, Algéria, Venezuela, Irán, Irak) az olajvállalatok teljes államosítását sem tudták megakadályozni.

Az olajvilágban radikális változások következtek be, amikor 1973-ban az arab olajországok bevetették az olajfegyvert. Ezzel akarták az arab hadviselőket támogatni, és az izraeli előnyomulást megállítani a 4. közel-keleti háborúban. Visszafogták az olajtermelést, egyes Izraelt támogató országok ellen olajszállítási embargót vezettek be, és többszörösére emelték az olaj árát. Az áremelést viszonylag könnyen sikerült érvényesíteni, mivel az egybeesett a többi olajország és az olajtársaságok érdekével. Az Egyesült Államok vezető körei hajlottak a kialakult helyzet gyors, határozott, esetleg erőszakos rendezésére. Ebben azonban nem volt szabad kezük, Nyugat-Európa és Japán inkább kompromisszumra hajlott, akár politikai és gazdasági engedmények árán is, félve attól, hogy a hidegháború időszakában egy ilyen konfliktus akár világháborúra is vezethetett volna.

Kezdetben a kialakult helyzetet csak üzemanyagellátási zavarnak tekintették, amit adminisztratív intézkedésekkel uralni lehet. Ennek érdekében – a piacgazdaságban szokatlan módon – erőteljes és közvetlen állami beavatkozásokra került sor. Az üzemanyag-fogyasztás mérséklésére sok országban csökkentették a gépkocsik megengedett sebességét, néhol megtiltották a személyautók hétvégi forgalmát, vagy rendszám szerint szabályozták az üzemüket, ösztönözték az autók csoportos használatát, és a légiforgalmat is korlátozták. A költségvetési intézményekben csökkentették a fűtési hőmérsékletet, és ennek bevezetését a magánszférában is ösztönözték. Ilyen, és hasonló intézkedésekkel viszonylag gyorsan sikerült helyreállítani az üzemanyagpiac egyensúlyát, de az olajárakat nem sikerült visszaszorítani. Szembesülni kellett azzal, hogy véget ért az olcsó olaj, és azzal az olcsó energia korszaka, aminek szerteágazó következményei máig is éreztetik a hatásukat. A kialakult olajkrízisnek az egész világra kiható gazdasági, politikai és társadalmi következményei meglehetősen voltak.

Az olajválság rendezéséhez szükséges teendők meghatározására az ENSZ 1973-ban rendkívüli közgyűlést hívott össze. A másfél hónapos, magas szintű, több ezer résztvevővel folytatott tanácskozás az érdekek divergenciája miatt eredménytelen volt, csupán a helyzet áttekintésére volt alkalmas. Annak a felismeréséhez azonban nem vezetett, hogy a folyamatok nemzetközivé válása következtében egy új állapot – a globalizáció – érvényesül. (Kudarcba fulladt a közgyűlésen az ásványokat és gyarmatarút termelő fejlődő országok törekvése, hogy kiterjesszék az olajárban elért áttörést a saját termékeikre is, mert ehhez nem volt elegendő érdekérvényesítő erejük.)

A tartósan érvényesülő magas olajár nemcsak az energiaellátást zavarta meg, hanem inflációt és recessziót gerjesztve súlyos gazdasági következményeket okozott. Az olajimportáló országok fizetési mérlege felbillent, gazdasági megszorításokra került sor, sok fejlődő ország fizetéseképtelenné vált, sok évre kiható következményekkel. Az olajkrízis

kikényszerítette az olajimportáló fejlett országok gazdaságpolitikájának módosítását. Egyrészt a fejlett technikát tartalmazó, és így nagy értéket megtestesítő termékek és technológiák exportjának előtérbe helyezésével helyrebillentették a fizetési mérlegüket. Másrészt erőteljes lépéseket tettek olajfelhasználásuk mérséklésére (energiatakarékosság ösztönzése, az olaj helyettesítése más energiahordozókkal, az energiaigényes iparágak kitelepítése fejlődő országokba stb.). Az OPEC⁵⁵ monopólhelyzetének csökkentésére az olajbeszerzés forrásainak diverzifikálására törekedtek, támogatva az OPEC-től független olajforrások felkutatását. Stratégiai olajtartalékokat képeztek (az Európai Unióban 3 havi felhasználás fedezetére elegendő tartalék biztosítása kötelező). Megalakították az IEA-t az energiapolitikák koordinálására és olajellátási válságok közös elhárítására.

A fejlett ipari országok felismerték, hogy energiaellátásuk bizonytalansága nemcsak gazdaságuk stabilitását veszélyezteti, hanem sebezhetővé teszi katonai potenciáljukat és külpolitikai mozgásterüket is korlátozza. Ezért az energiapolitikát kiemelt állami feladatnak minősítették, érvényesítésére hatóságokat és intézményeket hoztak létre. A megoldandó feladatokra terveket és koncepciókat dolgoztak ki, a kutatási-fejlesztési tevékenységre jelentős forrásokat biztosítottak. Az államközi kapcsolatokban megjelentek az energiaszállításokkal, valamint az ezt szolgáló beruházásokkal kapcsolatos megállapodások, nem egyszer átértékelve a külpolitika irányát.

A szocialista országokban általános vélemény volt, hogy a KGST-együttműködés megakadályozza az olajkrízis hatásának „begyűrűződését” a gazdaságukba. A bukaresti árelv⁵⁶ ugyan késleltette a magas olajárak érvényesülését, de végül a drága olaj súlyos gazdasági következményekre vezetett ezekben az országokban is. Közvetett következmény volt, hogy alaposan megváltozott a különféle energiahordozók szerepének a megítélése, és az energetika távlati terveit is átértékelték.

Az olajországokban óriási olajjövendelmek keletkeztek. A viszonylag kis lélekszámú országok annak jelentős részét a pénzpiacon könnyen megszerezhető hitelek nyújtásával költötték el, ami később sok ország (köztük Magyarország) súlyos eladósodására vezetett. Az olajtermelők másik csoportja saját gazdasági és politikai elképzeléseinek megvalósítására fordította jövedelmét. Az olajországok 1973. évi fellépésének határozottan imperializmusellenes irányultsága volt. Néhány országban ez a politika állandósult, de a legtöbben szoros politikai és gazdasági együttműködést alakítottak ki a fejlett tőkés országokkal, hiszen azok jelentették az olajtermelők legfontosabb piacát.

A gazdag arab olajországok – saját társadalmi rendszerük felforgatásától féltve, mintegy belső stabilitásuk megváltására – jövedelmükből bőségesen támogatták az Izrael-ellenes palesztin mozgalmakat. Kezdetben a Fatahot és a kisebb iszlám terrorista csoportokat pénzelték, később a nagy befolyással és fegyveres erővel rendelkező Hamász és Hezbollah támogatására is sor került. Az olajjövendelmek talaján fejlődött ki az al-Kaida

⁵⁵ Organization of the Petroleum Exporting Countries, Kőolaj-exportáló Országok Szervezete, tagjai: Algéria, Egyesült Arab Emírátsok, Ecuador, Gabon, Indonézia, Irak, Irán, Katar, Kuvait, Líbia, Nigéria, Omán, Szaúd-Arábia, Venezuela.

⁵⁶ Az előző 5 év világpiacon átlaga.

is, mely nemcsak Izrael, hanem a fejlett nyugat ellen is terrorhadjáratot folytat. A 2001. szeptember 11-én az Egyesült Államok két toronyháza ellen végrehajtott támadás óta a világpolitika egyik legfontosabb kérdésévé vált a nemzetközi terrorizmus elleni küzdelem. Ennek jegyében indult meg a háború Irak, majd Afganisztán ellen, ez igazolta a beavatkozást a világ számos pontján, ami mögött az olajjal kapcsolatos érdekek is ott voltak. Az arab olajországok megerősödésének talaján bontakozódott ki az iszlám fundamentalizmus, ami a nyugatitól eltérő társadalmi berendezkedést tűzött ki célul, és ezt néhány országban már sikerült is megvalósítani.

Az olajkrízis után az olajár a világgazdaság legfontosabb mutatójává lépett elő. Az nemcsak a kőolajtermékek árát szabja meg, hanem a többi energiahordozó ára is ahhoz igazodik. Az energiaárak pedig megjelennek minden termék és szolgáltatás költségei között, befolyásolva a gazdaság versenyképességét és a lakosság életszínvonalát. Ezért a kormányok és a gazdaság szereplői feszült figyelemmel követik a tőzsdén jegyzett kőolajok ármozgását, hogy időben reagálhassanak a várható következményekre. Már kisebb változásokra is élénken reagál a tőzsde, a pénzpiac, a tőkemozgás, és az üzleti világ konjunktúrája. A magyar nemzetgazdaságban különösen érzékenyen függ a kőolajártól az infláció és a fizetési mérleg egyensúlya.

A világpiacon több száz olajfajtát forgalmaznak, ezek ára nem egységes, mivel a kőolajok minősége a lelőhelytől függően nagyon eltérő. A tőzsdéken néhány olajfajtát tekintenek iránymutatónak (markernek), az európai tőzsdéken az Északi-tenger angol szektorából származó Brent olaj, az amerikai tőzsdéken a West Texas Intermediate árát, ezeken túlmenően néhány más olajminőség, pl. iráni nehéz (Irán), Es Sider (Líbia), Ural (Oroszország), könnyű arab (Szaúd-Arábia), Dubai (Egyesült Emírátsok), Forcados (Nigéria) árát is jegyzik.

A kőolaj piaci árát elvileg a kereslet és kínálat alakulásától függő határköltség szabja meg, amit a rendelkezésre álló technológiával az adott gazdasági körülmények között a még kitermelésre érdemes legnagyobb önköltségű előfordulás jelöl ki. A tényleges ár azonban gazdaságon kívüli körülmények ettől eltérítik, egyrészt állami beavatkozások, valamint monopóliumok érvényesülnek, másrészt a spekulációnak is szerepe van. Az állami költségvetés jelentős bevételi forrása az energiahordozók forgalmát terhelő adó, ami pl. Európában a kőolajtermékek fogyasztói árában a termelési költség 2–3-szorosát is elérheti. Más jellegű gazdasági szabályozók (bányajáradék, vám, exportilleték stb.) sem ritkák, az állami szándékok érvényesítésére (pl. a hazai kitermelés ösztönzésére, az import mérséklésére). Nem ritka a nagyhatalmak (főleg USA és Oroszország) politikai indíttatású szerepvállalása sem a piacra juttatott kőolajmennyiségek befolyásolásával. Említhető az amerikai olajtartalékok piacra dobása is a 2001-ben kibontakozó recesszió visszafogására.

Az olajár eszköz is lehet a politika alakításában. A Szovjetunió széthullása után hatalmas állapotba került Oroszországnak például az olaj- és földgázexportból származó hatalmas jövedelem segítségével sikerült szanálnia gazdaságát, és erre támaszkodva konszolidálta az ország zavaros politikai és társadalmi helyzetét. Elemi érdeke az energiaexport piacainak megőrzése és további bővítése, mert egyrészt ez a feltétele gazdasági fejlődésének, másrészt ez kiváló eszköz gazdasági és politikai befolyásának növelésére. Oroszország az energiaexport révén megerősödve regionális nagyhatalom

szerepet igyekeznek kialakítani az elvesztett szuperhatalmi helyzet pótlására. Ezért is az energiaexport fő piaca az Európai Unió maradt, bár az energiakereslet Kína és Japán részéről is megjelent, és az első keletre irányuló új magisztrális vezetéseken a szállítások meg is indultak.

Az olajkrízis alaposan átrendezte az olajvilágot is. A számottevő olajvagyonnal rendelkező országok nemzeti olajtársaságokat hoztak létre, többnyire 100%-os állami tulajdonban. Ezeknek feladatává tették a felelős gazdálkodást a nemzeti vagyonnak tekintett olajkinccsel, és azt is elvárják, hogy jövedelmükből támogassák a kormány gazdasági és társadalmi céljait. Ezek az elvárások csökkentik a versenyképességet, mégis néhány nemzeti olajtársaság – pl. Aramco (Szaúd-Arábia), NIOC (Irán), Pemex (Mexikó), PDVSA (Venezuela) és mások az élvonalba fejlődtek fel. És megjelentek a piacon a hatalmas orosz és kínai olajtársaságok is. Ma már a világ olajtermelésének több mint felét a nemzeti olajtársaságok szolgáltatják. Megerősödésüket jelzi, hogy például a tenger alatti olajtermelés technológiájának kifejlesztésében a Statoil (Norvégia) és Petrobras (Brazília) járnak az élen. Műszaki fejlődésükhöz jelentősen hozzájárultak a nagy multinacionális szolgáltatóvállalatok (pl. Schlumberger, Halliburton, Baker Hughes), melyek alvállalkozóként kiváló hozzáértéssel, nagy szellemi és technikai apparátussal elvállalnak minden olajipari feladatot a földtani kutatástól a kutak üzemeltetéséig. A nemzeti olajtársaságok egy része terjeszkedni is kezdett külföldön, főleg olaj kitermelését biztosító koncessziók érdekében. Külön figyelmet érdemel a kínai olajtársaságok politikája, hatalmas befektetéseikkel Kína nagy gazdasági és politikai befolyáshoz jutott számos közép-afrikai államban. Kisebb mértékű az orosz olajipar terjeszkedése Latin-Amerikában. Ezeknek a folyamatoknak világpolitikai kihatása is van. Latin-Amerika néhány országa (pl. Venezuela) olajjövendelméből enyhíteni kívánja szociális problémáit, ami a politikai rendszer balra tolódásával jár. Ezt az amerikai pénzvilág és az USA kormánya nehezen tolerálja, ami konfliktusok forrása. A legnagyobb szénhidrogén-termelő vállalatok rangsora a 4.1. táblázatban látható, jelölve az állami tulajdon részarányát is.

4.1. táblázat. A legnagyobb szénhidrogén-termelők

Vállalat	Ország	Állami részesedés
Gazprom	Oroszo.	51
NIOC	Irán	100
Pemex	Mexikó	100
ExxonMobil	USA	–
CNPC	Kína	100
BP	UK	–
Shell	UK	–
Sonatrach	Algéria	100
Adnoc UAE	Abu Dabi	100
PDVSA	Venezuela	100

Vállalat	Ország	Állami részesedés
Chevron	USA	–
KPC	Kuwait	100
INOC	Irak	100
Total	Franciao.	–
Petrobras	Brazília	56
Rosneft	Oroszo.	80
Lukoil	Oroszo.	–
LNOC	Libia	100
ConocoPhillips	USA	–
Eni	Olaszo.	–
Qatar Petroleum	Katar	100
Petronas	Malajzia	100
NNPC	Nigéria	100
StatoilHydro	Norvégia	63
TNK-BP	Oroszo.	–
Surgutneftegas	Oroszo.	–
Repsol YPF	Spanyolo.	–
Sinopec	Kína	100
ONGC	India	100
Turkmengas	Turkmenisztán	100
EnCana	USA	–
EGPC	Egyiptom	100
PDO	Omán	100
Sonangol	Angola	100
Devon	USA	–
BG	UK	–
Anadarko	USA	–
Apache	USA	–
Occidental	USA	–
CNR	Kanada	–
Tatneft	Oroszo.	–
Novatek	Oroszo.	–
CNOOC	Kína	100
Inpex	Japán	–

Vállalat	Ország	Állami részesedés
Kazmunaigas	Kazahsztán	100
Talisman	Kanada	–
Marathon	USA	–
Ecopetrol	Ecuador	100
SPC	Szíría	100

Forrás: IEA Energy Outlook, 2008.

A 20. század utolsó negyedében az olajár tartós növekedési tendenciája alakult ki, amire azonban nagy ingadozások szuperponálódtak. A tartós tendencia egyik oka, hogy az olcsó források helyett egyre drágább, nehezebben megközelíthető és kitermelhető előfordulásokat kellett művelésbe vonni. Árfelhajtó hatása van az inflációnak, és a dollárárfolyam romlásának is (mivel az olaját dollárban jegyzik). Ha az utóbbi két tényezőt figyelembe véve a folyó árakat változatlan árakra számítják át, kiderül, hogy az áremelkedés nem is olyan meghökkentően nagy, időnként a reálár meg is közelítette az 1973 előtti szintet. Az alacsony és viszonylag stabil olajár az 1970-es évekig lényegében a hatalmas olajvállalatok monopolhelyezete szabta meg. Az olajkrízis után az 1960-ban alapított OPEC kartellmegállapodásai nyertek alapvető szerepet. Az áringadozásokat átmeneti események idézték elő, mert az olajár lázgörbeként tükrözi az olajellátás folytonosságát megzavaró eseményeket. Befolyásolták az ár alakulását pl. törzsi konfliktusok Nigériában, sztrájkok Venezuelában, államosítás Bolíviában, szabotázsakciók Irakban, hurrikán a Mexikói-öbölben, nem beszélve a közel-keleti háborúkról, vagy az al-Kaida nagyobb akcióiról. Az 1980-as években megindult az olajár lemorzsolódása, amiben még jelentős olajforrások kiesése – pl. a helyi háborúk miatt – is csak átmeneti növekedést okozott. Szinte összeomlásszerű árcsökkenés alakult ki 1986-ban, amit az olajországok koordinált fellépése ellensúlyozott. A 20. század végén, a 21. század elején újabb jelentős drágulás következett be, amit elsősorban az üzemanyagpiac egyensúlyának zavara váltott ki. A kőolaj-feldolgozás nem tartott lépést a szükségletek nem várt növekedésével, az okok közé a világgazdaság gyors fejlődése, és az USA igényének erős emelkedése mellé felzárkózott Kína és India olajimportjának rendkívül gyors növekedése.

A 21. század első éveit az olaj szinte folyamatos drágulása jellemezte, 2008 első felében már 150 USD/bbl körüli árak is előfordultak, sok szakértő néhány éven belül a 200 dolláros árat sem tartotta lehetetlennek. Ekkor beütött a világgazdasági válság, az olajár 40 dollár körüli értékre zuhant. A recesszió mérséklődésével az ár ismét felkapaszkodott a 100 USD/bbl szint fölé. Az olaj drágulása az utóbbi időben a korábbinál sokkal kisebb hullámokat váltott ki a világgazdaságban. Lehet, hogy a főszereplőket kielégítő kompromisszum alakult ki, de kérdéses, hogy ez mennyire tartós. A jelenlegi ár a kőolajtermelő országoknak biztosítja politikai és gazdasági elképzeléseik megvalósítását, a nagy olajtársaságok megfelelő nyereséghez jutnak, a fejlett országokba pedig visszaáramlik az olajjövendelmek része az olajországok vásárlásaiban, az olajtársaságok adójában és befektetéseiben. A többi szereplő véleménye pedig nem nagyon érdekes.

Az árak alakításában az OPEC állásfoglalását gyakran jelentős érdekelleték ütközése előzi meg. A kis lélekszámú olajországok (Szaúd-Arábia, Kuvait, Egyesült Arab Emírségek) olajjövedelmükből magas életszínvonalat biztosítottak a lakosságnak, és megalapozták az olaj utáni kor gazdaságát, egyrészt hazai beruházásokkal, másrészt külföldi befektetésekkel. Ezek az országok szükség esetén könnyen elviselik az olajtermelés visszafogását is, ami a magas olajárak fenntartásának egyik eszköze. Ez számukra nem okoz veszteséget, mivel a földben hagyott olaj megőrzi az értékét. A sűrűn lakott olajországok (Irán, Irak, Algéria, Líbia, Mexikó, Venezuela, Nigéria) azonban az olajtermelés tartósan magas szintjében érdekeltek, mert a lakosság elviselhető életkörülményeit így is nehezen tudják biztosítani az olajjövedelmekből.

Az olajtermékek ára követi a kőolaj árának alakulását. A benzin és a gázolaj áremelkedése időnként meghaladta a fuvarozók tűrőhatárát, ami Nyugat-Európában tettelegességbe torkolló demonstrációkat, útelzárásokat, a finomítókból a kőolajtermékek kiszállítását megakadályozó blokádot idézett elő. Magyarországon 1990-ben taxis blokádnak békítette meg három napra Budapest életét. A feszültségek levezetésére és a gazdasági stabilitás biztosítására egyes kormányok mérsékeltek az üzemanyagok adótartalmát, Magyarországon 2011-ben átmenetileg a fuvarozóknak visszatérítéses rendszert vezettek be.

Az árpolitika speciális vadhajtása volt Magyarországon az elsősorban helyiségfűtésre használt háztartási tüzelőolaj (HTO) ára. A HTO tulajdonképp gázolaj, azt szociálpolitikai okokból hosszú ideig jóval alacsonyabb adókulccsal forgalmazták, mint az üzemanyagot, ezért a HTO-t a megkülönböztetés érdekében megfestették. Az árdifferencia nagyarányú visszaélésekre adott módot, a festés eltávolításával (savazással) a terméket magasabb áron üzemanyagként forgalmazták. Ez az „olajszőkítés” az árkülönbség megszüntetéséig a magyar maffia hatalmas jövedelmi forrásává és a korrupció melegágyává vált.

Az olajtermelő országok pozíciójának megerősödése következtében megváltozott a nagy olajtársaságok helyzete is. Ugyan profitjuk az olajkrízis után rekordmagasságokat ért el, szerepük az olaj kitermelésében fokozatosan visszaszorult. A legnagyobb transznacionális társaságok (Exxon, Shell, BP, Total, Chevron) az OPEC-től független területeken kerestek olajforrásokat (pl. Latin-Amerika, Közép-Afrika, Indonézia, Távol-Kelet), de domináns szerepüket nem nyerték vissza. Ezért tevékenységük súlypontját a kőolajszállítás, -feldolgozás (beleértve a vegyipari termékeket), és termékértékesítés területére helyezték át. Növelték jelenlétüket a világ minden táján, főleg a fejlődő világ felé terjeszkedve. Nagy számban létesítenek leányvállalatokat, közös vállalatokat, kihasználva a dinamikus gazdasági fejlődést Kínában, Indiában, Dél-Amerikában, Délkelet-Ázsiában. Működésüket kiterjesztették az energetika más szektoraira (földgáz, villamos energia, szén, megújuló energiák), főleg az új technológiák kifejlesztése és megvalósítása terén. Nem véletlen, hogy jóformán minden nagy olajtársaság vezető szerepet játszik a nem konvencionális előfordulások kiaknázásában és a szintetikus technológiák fejlesztésében. Sok vállalat kapcsolódott be a megújuló energiákat hasznosító technológiák, valamint az új erőművi megoldások fejlesztésébe. Egyesek érdeklődést mutattak más, hálózatszerűen működő szolgáltatások – pl. gázszolgáltatás, vízellátás, csatornázás, távközlés, kábeltelevízió, bankrendszer stb. – iránt. Magyarországon is több vízműben és csatornázási rendszerben szereztek tulajdont multinacionális energetikai

vállalatok. Ez később politikai konfliktusokat gerjesztett, napirendre került visszaállamosításuk, illetve önkormányzati tulajdonba vételük.

A pozíciók megerősítésére a 20. század utolsó évtizedeiben megindult a nagy olajtársaságok fúziója, az óriások még óriásabbakká váltak. Az Exxon a Mobillal egyesült, a BP az Amocót nyelte le, a Chevron a Gulfot és a Texacót, a Totalba beolvadt a Fina és az Elf. Vannak hírek a mexikói-öbölbeli kútkitörés kártérítésében megroggyant BP és az Exxon vagy a Shell házasságának lehetőségéről. Nem lenne meglepő, ha a legnagyobb kőolajtársaságok között jelenleg is létezne az érdekszférák felosztása az 1928-as skóciai megállapodáshoz hasonlóan. Hosszabb ideig a mi térségünkben a Shell tűnt mértékadónak, de nem lehetetlen, hogy a hatalmasra nőtt orosz vállalatok (Gazprom, Lukoil) miatt a területek újrafelosztására került sor. A legnagyobbak természetes törekvése a kisebbek beolvasztása, amikor az üzletileg kifizetődik. Ezt a nem elég erős legnagyobbak (pl. Amoco, Mobil, Gulf, Texaco) sem kerülték el, az elegánsabb megoldás a fúzió, a durvább a gazdasági kényszer. Vajon a regionális szerepre törekvő MOL (a Szlovnaft felvásárlásával, és más vállalatokban – pl. INA – jelentős tulajdon szerzésével) el tudja-e kerülni ezt a sorsot? Hozzá hasonló helyzetben van az osztrák OMV, és talán azért törekedett az egyesülésre a MOL-lal, mert a nagyobb falat lenyelésére nehezebben kerül sor, esetleg kedvezőbb feltételekkel.

A magyar kőolajvagyon jó részét a hazánk területét borító triász kori tenger üledékeiből származtatják. Az első jelentős kőolaj-előfordulást 1937-ben találták meg Lispe-Lovászi térségében, 1952-ben vezettek sikerre a kutatások Nagylengyelnél és 1965-ben Algyő környékén. E jelentősebb előfordulások mellett számos más helyen (pl. Babócsa, Battonya, Budafa, Demjén, Dorozsma, Eger, Kaba, Pusztaföldvár, Sávoly, Szank, Szeged, Tótkomlós, Üllés, Tóalmás, Gödöllő) is találtak kisebb mennyiségben kőolajat. A Dunántúl kőolaj- és földgáztermelői szerepét fokozatosan az Alföld vette át. A kőolajkutatásra néhány külföldi cégnek adott koncessziók eddig csak szerény eredményre vezettek. A termelésbe vett hazai kőolajmezők száma jelenleg meghaladja a 10-et. A hazai előfordulásokból a 20. században 41 Mt kőolajat termeltek ki, a jelenlegi ismeretek alapján a még gazdaságosan kitermelhető vagyunkat ~10 Mt-ra becsülik.

Az olajipar sorsa Magyarországon is változatosan alakult. A kőolajkutatás első eredményei alapján került sor a Magyar Amerikai Olajipari Részvénytársaság (MAORT) megalapítására 1938-ban, aminek a főrészvényese a Standard Oil of New Jersey volt. A háború során az olajipari vállalatok irányítása német kézbe került, a német tulajdonú vállalatok jóvátétel fejében a Szovjetunió tulajdonába mentek át. Ezek működtetésére alakult meg 1946-ban a magyar–szovjet vegyesvállalat, a MASZOVOL,⁵⁷ későbbi nevén MASZOLAJ. A MAORT megkísérelte folytatni a működését, de ez az akkori politikai viszonyok között sok nehézségbe ütközött. 1948-ban a MAORT néhány vezetőjét (Papp Simon akadémikust és társait) szabotázs vádjával letartóztatták, majd a koncepciós per ítéletét követően a vállalatot államosították. A magyar olajipar teljes vertikumát 1954-ig a MASZOLAJ fogta össze, majd a tulajdonviszonyok rendezése után ezt a szerepet

⁵⁷ Magyar–Szovjet Nyersolaj Rt.

1957-től a Kőolajipari Tröszt töltötte be. A gázipar csatlakozása után (1960) átnevezték Országos Kőolaj- és Gázipari Trösztre (OKGT). Ennek jogutódja lett részvénytársasági formában a MOL (Magyar Olaj- és Gázipari Részvénytársaság).

A magyar kormány a MOL-t nemzeti olajtársaságnak tekinti, bár a részvények jelentős többsége magánkézben van. Az állam szerepét nemcsak a vállalat mérete és gazdasági ereje (az ország legnagyobb vállalata és legnagyobb adófizetője) indokolja, hanem az is, hogy az állami energiapolitika végrehajtásának fontos eszköze. A MOL vezetése ambivalens helyzetben van, képviselnie kell a részvényesek érdekeit, akiknek több mint háromnegyede külföldi, de eleget kell tennie a kormány elvárásainak is. Ez nem mindig egyeztethető össze, pl. a gázüzletágot eladták az EON-nak, amikor az államilag leszorított gázárak miatt az nem bizonyult jövedelmezőnek.

A múltbeli tapasztalatok arra utalnak, hogy a MOL-hoz hasonló méretű olajvállalatok előbb-utóbb valamelyik nagy multi részévé válnak. Ennek elegánsabb útja a fúzió, vagy a felvásárlás, durvább módja a kényszer gazdasági ellehetetlenítéssel. Erre többnyire akkor kerül sor, amikor az olajipari infrastruktúra már megfelelően kiépült, a piaci viszonyok stabilizálódtak, és a vállalat komoly gazdasági erőt képvisel. Nemigen látható át, hogy az olajvilágban a jelentős üzletpolitikai lépések hátterében melyik multinacionális vállalat húzódik meg, és az milyen stratégiai (vagy politikai) célokat szolgál. A MOL megszerzésére – részvények felvásárlásával – két akció már történt, az osztrák OMV fúziót próbált kikényszeríteni, az orosz Szurgutnyeftgaz pedig irányító pozíció megszerzésére törekedett. A részvények 22%-át kitevő pakettet bonyolult taktikai lépések után a magyar állam visszavásárolta, aminek fő célja az oroszok visszatartása volt a magyar energiapolitikától. Az anyagi áldozat túl nagynek tűnik, mert a szavazati jog 10%-ra van korlátozva, és a kormánynak elsőségi részvénye alapján a pakett nélkül is előjoga van a menedzsment kinevezésében. A külföldi befolyás erősödését a felvásárlási szándék észlelésekor a kormány törvénnyel is megakadályozta (lex MOL). Hosszú távon a MOL helyzetének megőrzését célzó bonyolult manőverek kimenete kétséges, mert a tőke szabad mozgása az EU egyik alapvető hittétele.

A kőolaj-előfordulások eloszlása a Földön nagyon egyenetlen. A Közel-Keleten található a világ kőolajvagyonának közel kétharmada, ezért ennek a térségnek meghatározó szerepe van az olajellátásban. Nem utolsósorban az olajforrások feletti befolyás megszerzésére vezethetők vissza a térséget átszövő feszültségek, melyek nem egyszer lokális háborúkat robbantottak ki (pl. Irán–Irak, Irak–Kuvait, Észak- és Dél-Jemen). A térség labilitása a kőolajellátás biztonságát is veszélyezteti, nem véletlenül törekszik az Egyesült Államok a térség pacifikálására mindenáron, ezért indított háborút Irak és Afganisztán ellen, és törekszik Irán elszigetelésére. Az észak-afrikai forrongások sem függetlenek az olaj- és földgázellátástól.

4.4. A kőolajtermelés technikája

A gyorsan növekvő kőolajszükséglet kielégítéséhez megfelelő technikai fejlődésre is szükség volt. Meghatározó szerepe volt a kűtfűrészi technológia kialakulásának, amivel

egyre mélyebben fekvő és mind nagyobb előfordulásokat lehetett bevonni a termelésbe. Az első sikeres kőolaj kútfúrást 1859-ben mélyítették le Pennsylvániában (USA), a váratlanul feltörő nagy olajmennyiség felfogására csak viszkis hordók álltak rendelkezésre, így vált ezek szabványos térfogata – a barrel⁵⁸ (hordó) – a mai napig is az olajkereskedelem alapvető mértékegységévé. Ugyancsak jelentős fejlemény volt a csővezetékes kőolajszállítás kifejlesztése.

A legkiterjedtebb kőolajtelepeket a nagy táblák felboltozódásainál lehet találni (arab, saharai, észak-amerikai, Volga–Urál vidéki táblák), kisszámú, egymás alatt fekvő rétegekben. A nagy geológiai törésvonalaknál kialakuló kőolaj-előfordulásokat kis felület, de nagy mennyiség jellemzi, gyakran sok rétegben (pl. Kaszpi-tenger, Kalifornia). A tenger alatti üledékes rendszerekben szintén kedvezőek a kőolaj-felhalmozódás feltételei, a világ olajtermelésének már több mint harmada származik tenger alatti (*off shore*) kutakból, és a kilátások nagyon biztatóak. Hosszú ideig csupán a sekély tengerrel borított kontinentális talapzatban (*selfek*) tételeztek fel kőolaj-előfordulásokat, idővel azonban azok folytatásában, a kontinentális rézsűben és az óceáni lapályokban, továbbá az üledékes szerkezetű óceáni medencékben is sikerre vezettek a kutatások. Az utóbbi években a mély és ultramély tengerek⁵⁹ alatt is óriási készleteket sikerült feltárni, ezek kitermelése is megindult. Ehhez teljesen új technológiákat kellett kifejleszteni. A tenger alatti termelési mód nem olcsó, és nem veszélytelen. A termelést nehéz körülmények jellemzik, vízmozgásokkal (hullámzás, árapály, áramlások), talajmozgásokkal (erózió, süllyedés, földrengés), az élővilág hatásaival (lerakódások, rongálás) és az időjárás szélsőségeivel kell számolni. A munkát gyakran zord körülmények (viharok, nagy hullámok, északon jéghegyek, nehéz megközelíthetőség stb.) jellemzik. A feltételezett olajvagyon miatt több térségben (pl. Kaszpi-tenger, Sárga-tenger, sarkvidék) határviták támadtak az államok 200 mérföldig terjedő gazdasági érdekszféráinak átfedése miatt. A tengeri termelésnek komoly gondja, hogy amikor a kőzetből feltörő forró olaj eléri a hideg (3–4 °C-os) tengervízbe fektetett csőszakaszt, ne váljanak ki az áramlást gátló hidrátok és paraffin. Hasonló gondok jelentkeznek szárazföldi termelésnél az örök fagy térségében is.

A lelőhelyek felderítése és termelésbe vétele között évtizednyi idő telik el. Időigényes a geofizikai, geológiai és hidrológiai körülmények feltárása és a rezervoárban található vagyon felmérése, amire alapul a termelési terv. A rezervoárok felkutatásában és azok kiaknázásának tervezésében minőségi változást eredményezett a háromdimenziós (3D) szeizmikus mérés, a számítógépes modellezés, és az irányított fúrás. Néhány évet vesz igénybe a termelőkutak kialakítása, a csőhálózatok és a különféle felszíni létesítmények megépítése is. A kőolajmezők termelési élettartama átlagosan negyven év körül mozog, a rezervoárgazdálkodástól és az üzemvitel módjától függően.

A kútfúrás technikája mind a fúrési sebesség, mind az elérhető mélység tekintetében állandóan fejlődik. Az elérhető sebesség a kőzetek keménységétől és a rétegek szerkezetétől függ, értéke 0,3 és 60 m/óra közé esik. A kutatófúrások már a 12 km-es mélységet

⁵⁸ 1 barrel (bbl) = 169 l

⁵⁹ Mély tenger: 400–1500 m; ultramély: >1500 m.

is meghaladják, a fűrási költségek rohamosan nőnek a mélység függvényében. A termelőkutak a rezervoár elhelyezkedésétől függően pár száz és pár ezer m közötti mélységből hozzák felszínre az olajat, átlagos napi hozamuk 10–100 t, de ettől mind lefele, mind felfele jelentős eltérések is előfordulnak. A ferde és később a horizontális fűrás technikájának kifejlesztése nagymértékben kiszélesítette mind a kutatás, mind a kitermelés lehetőségeit. Az utóbbi különösen a tengeri termelésben nyitott új utakat, egyetlen felszálló vezetékkel továbbítva több termelőkút termékét, ilyenkor a kutaktól kiinduló vezetékeket a felszálló vezeték talppontjánál kialakított gyűjtő szerelvényhez vezetik.

A kútképzés körülményeitől függően szükség lehet egynél több koaxiális bélésű cső beépítésére, a legbelső bélésű csőn belül helyezkedik el a kőolajat felfele továbbító termelőcső, amit a kitermelni kívánt rétegnél perforálnak. Esetleg az oldalán elzárható nyílásokat alakítanak ki, más rétegek termelésbe vétele, vagy felülről más közegek (pl. segédgáz) bevezetése érdekében. Ha egyidejűleg több rétegből kívánnak termelni, lehetséges több termelőcső behelyezése is. A több cső lehetőséget teremt egyidejűleg több közeg különböző irányú áramoltatására, amit megfelelő csőszakaszokon elhelyezett szerelvényekkel lehet terelni. Az áramlások irányítására, szabályozására és lezárására szolgáló legfontosabb szerelvények a kút tetején kialakított „karácsonyfában” helyezkednek el. A kutakba időnként segédanyagokat is juttatnak, a kőzetek átteresztőképességének növelésére (repszés, savazás), gátakat képző adalékokkal akadályozzák meg víz vagy homok nem kívánatos bejutását a termelőcsőbe.

A kőolajtermelésben elsődleges, másodlagos és harmadlagos eljárásokat különböztetnek meg. Az elsődleges eljárásoknál a termelés lényegében az olajra ható rétegyomásra alapul, a másodlagosaknál a felhajtóhatást különféle közegek benyomásával növelik, a harmadlagosaknál pedig a porózus tároló kőzeten belül növelik az olaj mozgékony-ságát. A szárazföldi olajbányászat hatékonysága meglehetősen alacsony, az átlagos kitermelési együttható 0,3–0,4, vagyis a rezervoárban levő olaj 60–70%-át nem sikerül a felszínre hozni. A másodlagos és harmadlagos eljárásokkal a kihozatal jó néhány százalékkal növelhető, de ezek alkalmazását a földtani körülmények, illetve a költségek nem mindig teszik lehetővé. A tenger alatti termelés kihozatala nagyobb, átlagosan 40% körüli és a kutak átlaghozama is bővebb. A lehetőségek és a realitások alapján nem várható, hogy a világ kőolajtermelésének átlagos kitermelési együtthatója 1–2 évtizeden belül 0,5 fölé emelkedjen, vagyis a kőolaj fele a föld méhében marad.

A kőolajmezők egy részében a kúttalphoz érkező kútáram energiája elég nagy a kőolaj felszínre emeléséhez, a kőolaj külső beavatkozás nélkül kijut a felszínre. E felszálló termeléshez a felhajtóerőt biztosíthatja az olaj feletti gázsapka nyomása, ami a pórusokból kiszorítja maga előtt az olajat. A nyomás csökkenésével a kutak hozama is csökken. Felhajtóerőt képvisel az olaj alatt elhelyezkedő víz hidrosztatikus nyomása is, ahogy a víz felemeli maga előtt az olajat. A víz tökéletesebben kiszorítja a pórusokból az olajat, mint a gáz, az ilyen kutak hozama mindaddig állandó, amíg a víz szintje el nem éri a termelőcső talppontját, akkor a kút elvizesedik.

A termelés előrehaladtával a rétegenergia csökken, azt kívülről bevezetett energiával kell kiegészíteni. Ennek egyik lehetősége, hogy külső forrásból folyamatosan vagy szakaszosan segédgázt nyomnak a bélésű csőbe, és azt többnyire a talppontnál, esetleg

egy feljebb fekvő nyílásnál vezetik be a termelőcsőbe. E gázliftes termelésnél az olajjal keveredő gáz növeli a felhajtóhatást. Ha a felhajtó energia erősen csökken, illetve nagy viszkozitású olajoknál eleve kevés, akkor szivattyúzásra van szükség.

A másodlagos termelés történhet gáz visszanyomásával a gázsapkába, víz benyomásával az olajréteg alá, vagy e két módszer kombinálásával. A gáz lehet az olajtermelés kísérőgáza, lehet sűrített levegő vagy szén-dioxid. A víz származhat külső forrásból vagy az olajtermelésből, de a szükséges mennyiség meghaladhatja a termelt olaj mennyiségét, és a besajtoláshoz nagy nyomás (150–350 bar) szükséges. A másodlagos eljárások csak az előfordulások egy részénél alkalmazhatók, mivel hatásosságuk függ az olaj viszkozitásától, valamint a környező kőzetek tulajdonságaitól és szerkezetétől. A rezervoár részletes ismeretétől függ, hogy mely kutaknál történik a besajtolás, és melyek a termelő kutak. Régebben akkor tértek rá a másodlagos termelésre, amikor az elsődleges termelés kimerült. A tapasztalatok szerint a vagyont nagyobb mértékben lehet kiaknázni a két eljárás együttes alkalmazásával, ezért gyakran már a felszálló termelés átátamasztására is beiktatják. A víz és más fluidumok nagynyomású besajtolása – főleg a kemény kőzetekben – előidézheti a rétegek repesztését, ami az átbocsátás és kihozatal növekedését eredményezi. E célból néha föld alatti robbantásokat is alkalmaznak.

A harmadlagos eljárások (angol terminológiával EOR⁶⁰ eljárások) közegek benyomásával és adalékokkal az olaj mozgékonyságának növelését és a környező kőzetekben az átbocsátás javítását célozzák fizikai és kémiai folyamatokkal. Miután alkalmazhatóságuk erősen függ az olaj minőségétől és a lelőhely jellegétől, a célszerű eljárást egyedileg kell kikísérletezni. Nehéz olajoknál a viszkozitást csökkentő termikus módszerek a legcélravezetőbbek. Ezek egy részénél forró vizet vagy gőzt sajtolnak be, ami az olaj hőkiterjedését, viszkozitásának és felületi feszültségének csökkenését eredményezi, sőt bizonyos mértékű desztillációt és oldást is. A szükséges ráfordítás nagy, pl. 1 t járulékos olajtermeléshez 4–40 t gőzt kell besajtolni 40–90 bar nyomáson. Egy másik eljárásnál az olajat a föld alatt meggyűjtják, az égést levegő befúvásával táplálják, az égési zóna előrehaladva maga előtt tolja az olajat. Ennek sem kicsi a ráfordítása, hiszen az olaj 10–20%-a elég és a többletkihozatalhoz tonnánként 2000 m³ levegőt kell befújni. Növelhető a hatékonyság vízgőz bekeverésével, a keletkező vízgáz szintén részt vesz a reakcióban és így a levegőszükséglet is csökken. Nagyon nagy viszkozitású olajnál stimuláló eljárás is számításba jöhet, a kútnál váltakozva alakítanak ki termelő és injektáló periódusokat, és gőzbesajtolás helyett vagy mellett viszkozitáscsökkentő oldószer bejuttatása is lehetséges. Kis viszkozitású olajoknál felületaktív anyagokat is alkalmaznak, az interfaciális erők módosítására.

Könnyű olajoknál a harmadlagos módszereket gyakran a másodlagos eljárásokkal kombinálva alkalmazzák, és többnyire vegyszeradagolással párosítják. A besajtolt vízhez adagolt nátronlúg, vagy más felületaktív anyag (pl. karbonátok, alkáli-szilikát-oldatok) módosítják a kapillaritást és a felületi feszültséget, a kőzetfelületek hajlamosabbak lesznek vízzel nedvesedni, mint olajjal. Az additív olajtermeléshez tonnánként 5–10 kg

⁶⁰ Enhanced oil recovery, fokozott olajkitermelés.

felületaktív anyag adagolására van szükség. Az is előfordul, hogy a felületaktív kezeget iszap formájában nyomják be, és pufferközeggel választják el a víztől, hogy az ne mossa ki az adalékot. Egyes olajok szén-dioxiddal oldatot vagy elegyet alkotnak, ami duzzadáshoz és az olaj viszkozitásának csökkenéséhez vezet. Karbonátos kőzetekben a CO_2 -nak felületaktív hatása is van. A CO_2 -ot vízzel, vagy inert gázzal együtt, esetleg azzal váltakozva nyomják be. A magyar szakemberek élenjáró szerepet játszottak az EOR módszerek fejlesztésében. Az 1000–1500 m mélyen homokkőben található Buda-fa–Lispe–Lovászi mezőben pl. az intermedier-paraffinos olaj mozgékonyabbá tételére szén-dioxidos földgázbenyomás bizonyult hatékonynak, amit követően vízbesajtolással hajtották ki az olajat. A besajtoló víz, és különösen a benyomott kis viszkozitású gáz hajlamos arra, hogy elszivárogjon a rétegből. Ennek megakadályozására a víz esetében további adalékokra is szükség lehet (pl. megszilárdulva gátat képző poliakrilamidra), gáz esetében az olajban oldódó C_2 – C_6 frakció benyomására. Arra is van példa, hogy az olajat a vele azonos viszkozitású, a felületeket nedvesítő – víz, olaj és adalékanyagok (biopolimerek, poliakrilamid) keverékéből álló – emulzióval szorítják ki, az emulziót pedig sósvízzel hajtják előre.

A felszínre hozott olajból a szállíthatóság érdekében el kell távolítani a nem kívánatos alkotókat. A károsító gázokat kigázosítással szeparálják, a nyert nedves gázt földgázra és légköri viszonyok között cseppfolyós gázolajra bontják. Az oldott gázokat ellenáramban haladó gázzal ragadják ki az áramló olajból (stabilizálás), nehogy a szállítás hőmérsékletén elpárologva zavarják az áramlást. A szuszpendált szervesanyagokat ülepitéssel vagy centrifugálással választják ki.

Teljesen új technológiák kifejlesztésére vezetett a tengeri termelés. A kutatófúrásokhoz kezdetben fix állványokat használtak, nagyobb vízmélységnél egyre inkább kutatóhajók vették át ezt a szerepet. A part menti selfeken megindult termelés hamar áttért a mélyebb vizekre, kifejlesztették a mély (400–1500 m), majd az ultramély (>1500 m) tengereken alkalmazható módszereket. Brazília partjai előtt már közel 3 km mély tenger alatti termelés folyik, és több helyen készülnek 4 km mély víz alatti olajvagyon kiaknázására. A kitermeléshez néhány száz méter tenger mélységig a tenger fenekére támaszkodó fix fedélzeteket (platformok) alkalmaznak, kisebb mélységig merev lábakkal, nagyobb mélységnél leereszthető lábakkal ellátott úsztatható fedélzettel. Kereken ezer méteres tenger mélységig használhatók a fenékhez horgonyokkal rögzített, feszített platformok, ennél mélyebb tengereken úszó (lebegő) fedélzetek jönnek számításba, melyeket számítógéppel vezérelt, dinamikus pozícionált rendszerek tartanak stabil helyzetben.

Mintegy 200 m-nél sekélyebb tengereken a kitermelt olajat csővezetéken is partra lehet juttatni, mélyebb vízben, vagy nagy távolságnál a fedélzeten gyűjtött terméket tartályhajókkal szállítják el. A termelőfedélzetek rendszerint több kútból gyűjtik össze az olajat, a fedélzeteket hajlékony felszálló cső kapcsolja össze a tenger fenekén kialakított távműködtetett kútfejjel, vagy több kút termékét összegyűjtő állomással. A fedélzetek alkalmasak hajók és helikopterek fogadására, az üzemvitelhez szükséges személyzet és berendezések elhelyezésére. Terjednek a tenger fenekére telepített létesítmények a termelési és áramlási folyamatok vezérlésére, valamint a tenger szennyezésének megakadályozására (kitörésgátlók, automatikus elzárók csőtörésnél), sőt a feldolgozást előkészítő

feladatok (tisztítás, szeparálás) ellátására is. Vizsgálják a tenger fenekére telepíthető fúróberendezések lehetőségét is. A kifejlesztett bonyolult berendezések csúcstechnikát képviselnek, ennek ellenére előfordultak katasztrófák, a teljes személyzet pusztulásával járó tűzvészek vagy viharban felborult fedélzetek miatt.

A szárazföldi olajtermelés nem különösen veszélyes tevékenység, az ott dolgozók baleseti statisztikája megfelel az ipari dolgozók átlagos értékeinek. A tengeri olajtermelés viszont veszélyes, a vízen kialakított fedélzetek összeroppanása, vagy az azokon bekövetkezett tűzvész tömegszerencsétlenséget okoz. A legsúlyosabb baleset az Északi-tengeren következett be 1988-ban, a Piper Alpha termelő platformon kialakult tűzvész 167 emberéletet követelt.

A szárazföldi termelésnél a környezetszennyezés csekély. A szénhidrogénkutak kialakításuk során kismértékben szennyezik a talajt és a felszíni vizeket fűrőiszappal, építőanyagokkal, olajjal, hulladékokkal. A termelés során kismértékű olaj és savanyú kémhatású víz szivárgása is előfordul, a beszennyezett talaj területe nem nagy, és az ilyen hibákat többnyire gyorsan elhárítják. De ennek az ellenkezője is előfordul. A legnagyobb környezetkárosítás egyikeként tartják számon a Niger folyó torkolatvidékét, ahol az elhanyagolt berendezésekből mintegy 2000 helyen az 1960-as évek óta szivárog az olaj, és több millió t-val szennyezték a termőföldeket és a folyókat. A kuvaiti háború során tönkretett és felgyújtott olajmezők demonstrálták a súlyosabb következmények lehetőségét. Nemcsak a stratégiai és gazdasági konzekvenciák, hanem a környezeti hatások is rendkívül nagyok voltak: a talaj és a tenger hosszú időre jelentősen károsodott, élőlények tömege pusztult el, a füst még az időjárást is befolyásolta. A hazai szénhidrogén-termelés évente legfeljebb 10–20 kt talajt szennyez el, nagyobb hatása van az időnként előforduló kútkitöréseknek. Azok nemcsak olajjal szennyezik a környezet talaját, hanem éghető és robbanásveszélyes gázokkal a légtérrel is. A kutak begyulladására tűzveszélyt jelent a környezetre, és az égéstermékek között mérgező anyagok is találhatóak. A katasztrófa elkerülésére a környező települések kiürítésére is sor kerülhet. A kitörések elfojtása néha hetekig tartó erőfeszítésbe telik.

A tengerbe került olaj közvetlenül veszélyezteti az élővilágot. A termelőberendezések sérülése súlyos környezetszennyezést okoz. A legnagyobb katasztrófát a Deepwater Horizon fedélzet robbanása okozta a Mexikói-öbölben 2010-ben. Az olaj 87 napig ömlött a tengerbe, közel 1 Mt került a vízbe, a robbanás 11 emberéletet követelt. A kárt előzetesen 20 milliárd USD-nál is többre becsülik, a kártérítési perek megingathatják a BP pénzügyi stabilitását. A víz felszínére került olaj eltávolítására mechanikai és biológiai módszereket alkalmaznak, néha égetik is, a mélyben elhelyezkedő olaj megsemmisítése még várat magára.

A kőolajban többnyire van emulzió formájában víz, ami oldott sókat tartalmaz. Találhatók benne oldott gázok (koncentrációjuk 1 m³/l-t is elérhet), ásványi szennyezések, és szuszpendált szilárd kolloid részecskék is. A legtöbb olajban oldva előfordulnak kénvegyületek (kénhidrogén, szulfidok stb.), esetleg elemi kén is. A szállíthatóság megkönnyítésére célszerű a kénmázas alkotókat – mindenképp a vizet és a gáznemű komponenseket – leválasztani. A nagy mennyiségű, tűzveszélyes anyaggal végzett technológiai műveletek balesetveszélyesek.

A nem konvencionális olaj-előfordulások – az olajhomok és olajpala – kőzetekhez kötött szénhidrogéneket tartalmaznak. Komoly hátrány, hogy termelésük nagyon tőkeigényes, a technológiáknak sok vízre van szükségük, és el kell helyezni a nagy mennyiségű meddőt, valamint a feldolgozásból származó, és a környezetet veszélyeztető hulladékot.

Az olajhomok (kátrányos homok, szurokföld) többféle erősen viszkózus szénhidrogén-tartalmú anyag közös megnevezése. A bennük levő szénhidrogén lehet erősen viszkózus nehéz, vagy ultranehez olaj, kátrány, bitumen vagy aszfalt. A termékek hidrogénben szegények, viszont gyakran jelentős a kéntartalom. Több országban megkezdték az olajhomok kiaknázását, a legjelentősebb üzemszerű termelés Kanadában (Athabasca-völgy) folyik, az ország olajtermelésének már több mint fele ilyen forrásból származik. Venezuelában (Orinoco övezet) a nagyon nehéz olajat termelik ki. Az alkalmazott *in situ* módszerek nem térnek nagyon el a konvencionális nehézolajoknál alkalmazott másodlagos és harmadlagos kitermelési eljárásoktól. Többnyire a mozgékonyág növelésére kutakban hőt juttatnak be gőz, füstgáz vagy forró víz besajtolásával. Helyenként oldószert, emulgálószert és gázt is hozzáadnak, föld alatti égetéses termelés is előfordul. Az utóbbinál a termelőktől visszafele haladó égetés bizonyult hatásosabbnak, amikor az olaj a meleg zónán keresztül áramlik. Az *ex situ* megoldásoknál bányászati módszerekkel – főleg külfejtéssel – termelik ki az olajhomokot, gyakran hő bevezetésével csökkentve a viszkozitást, és a bánya közelében dolgozzák fel a további hasznosításhoz. A termékből termikus és kémiai módszerekkel nyerik ki a bitument, illetve a nehézolajat. A szeparálás és molekulabontás más módszereivel (ultrahanggal, centrifugálással, dielektromos hevítéssel, mikrobákkal) is kísérleteznek. Az Athabasca-völgyben nátronlúg forró vizes oldatával történik a feltárás, majd a terméket krakkolják és a fejterméket hidrogénnel telítik. Az ultranehez olajok kezelésének megkönnyítésére a minél mélyebb helyszíni feldolgozásra törekednek (termikus szeparáció, hidrokrakkolás, oldószeres aszfaltkivonás). A nehéz olajok szállításához különleges eljárásokra (melegítés, hígítás, vizes emulzió) van szükség, a venezuelai Orinoco-völgy nehézolaját 30% vízzel alkotott emulzió (Orimulsion) formájában továbbítják.

Az olajpalában a szerves anyagok aránya, mennyisége és összetétele a keletkezés körülményeitől függ, az egyidejűleg lerakódott ásványi só és elhalt élőlény mennyiség időszakos ingadozásának megfelelően. A szénhidrogének mintegy 10%-a bitumen, ami sok szerves oldószemben oldható, a többi kerogén. Az olajpalát hagyományos bányászati módszerekkel, mélyműveléssel, vagy külfejtéssel termelik ki, de az csak nagy léptékben versenyképes. A javasolt bányák kapacitása jóval nagyobb, mint amekkora szén- és ércbányák jelenleg a világon vannak. Ezen óriási bányák létesítési költsége is hatalmas, ami lassítja a kiaknázást.

A kibányászott palából a szénhidrogént hőbontással választják le. Ennek érdekében a kitermelt kőzetet retortákban 370–540 °C hőmérsékleten dolgozzák fel, az eljárások széles skáláját próbálták ki. A technológiák a retorta jellegében (függőleges, vagy vízszintes), a hőközlés módjában (külső vagy belső hevítés, esetleg melegített kerámiagolyókkal, homokkal vagy örölt palával), az anyagtovábbítás kialakításában (betáplálás alulról vagy felülről, a termék elvezetése alul folyékony halmazállapotban, vagy felül gőz formájában) térnek el egymástól. Laboratóriumi körülmények között vizsgálják

a hőközlés más lehetőségeit is (lézer, mikrohullám, kémiai reakciók). A pirolízis egyrészt nagy sűrűségű és viszkozitású, magas dermedéspontú és erősen szennyezett kőolajszerű anyagot, másrészt különféle melléktermékeket (ammónia, kén, alacsony fűtőértékű gáz, gyenge minőségű koks) eredményez. A termékek a feldolgozott kőzetnek legfeljebb 15–20%-át teszik ki. Mivel a nyert termék csövön nem szállítható, a bánya mellett tisztításra és bizonyos mértékű raffinálásra szorul. Kísérleteznek a föld alatt retortaszerűen kialakított térségben az olajpala *in situ* pirolízisével is, amihez a hőt a benyomott földgáz égése szolgáltatja. A pala kis permeabilitása miatt a hőhordozó áramlását biztosító csatornát is ki kell alakítani (nagynyomású közeg besajtolásával, robbantással, villamos árammal stb.). Nagy reményeket fűznek a vízszintes fúrások alkalmazásához. Nagy problémája a technológiának a visszamaradó hatalmas mennyiségű meddő kőzet és a rendkívül nagy – a termelt olaj többszörösét kitevő – vízigény. Azt is meg kell akadályozni, hogy a csapadék ne mosson ki a meddőből kellemetlen ásványi sókat.

Az olajtermelés tényleges önköltsége erősen függ az olaj minőségétől, a földtani körülményektől és a termelés technológiájától. A 4.2. táblázat néhány olajforrás és helyettesítési eljárás önköltségének becsült arányát mutatja. A táblázat érzékelteti, hogy egyrészt az önköltségek között nagyságrendi különbségek is előfordulnak, másrészt a legkedvezőbb előfordulások hatalmas többletjövedelmet biztosítanak.

4.2. táblázat. Néhány olajforrás és helyettesítő eljárás önköltségének becsült aránya

Olajforrás	Relatív önköltség
Perzsa-öböl, Észak-Afrika	1
Nigéria	3
Venezuela	6
Egyesült Államok	9
Alaszka, Északi-tenger	12
Olajpala, bitumenes homok	24
Szén cseppfolyósítása	36

4.5. Földgáztermelés

A földgáz ismerete hosszú múltra tekint vissza, a felszíni gázkibúvások révén. Kirkuk (Irak) közelében 4000 éve ég a felszínre kitörő gáz, az ókori Közép-Keleten a tűzmadók földgázforrások fölé építették templomaikat. A gyakorlati hasznosításra azonban csak a 20. században került sor, a földgáz karrierje néhány évtizeddel később indult el, mint a kőolajé, mert hiányzott a szállításához szükséges infrastruktúra.

Az 1920-as években a csőgyártás és a nyomásnövelésre alkalmas kompresszorállomások fejlődése lehetővé tette nagy mennyiségű földgáz nagy távolságra történő továbbítását. Ez a földgázzal rendelkező régiókban utat nyitott a felhasználás rohamos bővülése előtt, teljesen kiszorítva a szénből fejlesztett városi gázt a vezetékes ellátásból. A szállítási technika további fejlődése kiterjesztette az ellátható területek határát, a távolság ma

már nem korlátozó, a cseppfolyósított földgáztechnika kifejlesztése óta a tengerek sem jelentenek akadályt. Visszaszorulóban van az a gyakorlat, hogy a fogyasztóktól távoli előfordulásoknál, szállítási infrastruktúra híján a földgázt elfáklyázzák, e helyett terjed a gázból cseppfolyós üzemanyagot előállító GTL-technológia, a folyékony üzemanyagot azután könnyű elszállítani. A kitermelt földgáz legnagyobb része ma már kereskedelmi forgalomba kerül, egyes szénhidrogénmezőkön a kőolaj-kihozatal növelésére a kísérőgázt visszanyomják a rezervoárba (másodlagos termelés).

A világ művealó földgázvagyona jelenleg $\sim 200 \text{ Tm}^3$, a végső konvencionális földgázvagyont 450 Tm^3 -re becsülik. A regionális megoszlás egyenletesebb, mint a kőolajé, a legnagyobb előfordulások Oroszországban, Iránban és a Közel-Keleten – főleg Katarban – találhatók. Az utóbbi időben jelentős készleteket találtak a tengerek alatt és a sarkkörön túli területeken. A világ jelenlegi földgáztermelése közeleg a 3 Tm^3 -hez.

Az Európai Unió energiapolitikájának egyik kulcseleme a függés csökkentése az orosz gázimporttól. Ennek helyettesítése azonban nehézségekbe ütközik. Az Északi-tengeren hanyatlik a termelés; az afrikai országok politikailag bizonytalanná váltak, mert megerősödtek az Európával szemben ellenséges iszlám fundamentalista mozgalmak; a vallási, törzsi és politikai ellenségességgel terhelt Közel-Kelet kiszámíthatatlan és veszélyes.

A földgázleletek mintegy harmada a kőolajjal társulva fordul elő, a felette elhelyezkedő gázsapkában, illetve a rezervoárban uralkodó hőmérséklettől és nyomástól függően a kőolajban oldva. A földgáz-előfordulások kétharmada a kőolajtól függetlenül található, de a kőolajéhoz hasonló geológiai formációkban. A kőolajtól független előfordulásokból és a kőolaj feletti gázsapkából a gázt saját nyomása hajtja a felszínre. Ez a tetemes rétegnomás 100 bar nagyságrendet is elérhet. A száraz gáz 60–80%-át lehet ilyen módon kinyerni, vízelárasztással a kitermelés 85–95%-ra növelhető. A kihozatal növelése érdekében az áteresztőképesség fokozására a rezervoár kőzetét néha robbantással, vagy más módon repesztik, vagy fellazítják. A kőolajban oldott földgáz kitermelését a kőolajtermelés módja és mértéke szabja meg, a szeparálás az előkészítő létesítményekben történik. Fejlesztik az intenzív gázkihozatalt szolgáló EGR⁶¹ eljárásokat.

A feldolgozás szempontjából a száraz földgáz a legkellemesebb, az alig tartalmaz olyan komponenseket, melyek szobahőmérsékleten nyomással cseppfolyósíthatók. Ezek alapvetően metánból és etánból állnak, a C_2 - C_5 komponensek mennyisége minimális. A nedves (dús) gázban légköri viszonyok között cseppfolyós szénhidrogének is vannak, így pentán (C_5), hexán (C_6), heptán (C_7). A nedves gáz legnagyobbbrészt az olajban oldva kerül a felszínre, és abból a nyomás csökkentésével lehet kiléptetni.

A földgáztermeléshez kapcsolódó előkészítő műveletek jellege függ a gáz összetételétől, ami nagyon változatos. A legjobb tüzelőanyag a metántól (C_1) a pentánig (C_5) terjedő egyszerű paraffinokból áll. De a földkéregben található gázelőfordulások domináns komponense lehet szén-dioxid, nitrogén, kénhidrogén is. Ha a szénhidrogének nagy mennyiségű ilyen éghetetlen (inert) gázokkal elegyedve fordulnak elő, a fűtőérték kicsi, az energetikai hasznosításnak alárendelt jelentősége van, és a gázt szállítani sem érdemes.

⁶¹ Enchanted gas recovery.

A kitermelt földgázt a szállításra elő kell készíteni, ami a mezők közelébe telepített földgázüzemekben történik. A gázban elragadott szilárd szennyező anyagok kiülepedve dugulást okozhatnak, és a vezetékeket koptatják, a por néha nehézfémeket is tartalmaz. Eltávolításuk mechanikai úton, vagy elektrosztatikus leválasztókkal történik. Többnyire szeparátorokkal választják le a gázhoz keveredett folyadékokat. A nedvességet szárítással, hűtéssel vagy glikolos abszorpcióval lehet eltávolítani, de célszerű eleve megakadályozni a rétegvíz nagyobb mértékű felszínre kerülését vízben duzzadó polimer oldatot juttatva a kútba, ami a pórusfalakhoz tapadva akadályozza a víz áramlását. A víz sókkal savakat hoz létre, és a gáz halmazállapotú szénhidrogénnel szilárd, kristályos hidrátok képzésére hajlamos, amelyek a csővezetékben és a szelepeken válnak ki. A szállításnál kellemetlen szennyezők a szerves savak, az agresszív rétegvíz, vagy a kiváló gázhidrátok. A szállításhoz el kell távolítani a szén-dioxidot is, mert vízzel korrozív szénsavat alkot, e folyamatot a magas nyomás és hőmérséklet gyorsítja. Erre leginkább abszorbenseket (alkálisók, vas-oxid, dietil-amin) használnak ellenáramban. Abszorbensekkel lehet lekötni a szén-dioxidot és a kénhidrogént. A H_2S mérgező és a kondenzvízzel kölcsönhatásban korrozív, vasszulfidot képezve elektrolitikus korróziót, illetve H_2 hatására ridegedésben megnyilvánuló feszültségkorróziót okoz a vezetékekben és a fogyasztó-berendezésekben. Ugyancsak korrozív a CO_2 nagy nyomáson nedvesség jelenlétében. A földgázban levő éghetetlen gázok – pl. CO_2 , vagy He – néha még ipari nyersanyagként is kivonhatók.

A teljes körű hasznosítás érdekében a nedves gázt gazolintelegeken fizikai eljárásokkal száraz gázzá és nyers gazolinra (főleg pentán és hexán) választják szét, kihasználva, hogy a komponensek fizikai jellemzői a molekulásúlytól függenek. A nyers gazolint nyomás alatt desztillálják, egyrészt cseppfolyósított propán-bután gázt (PB-gáz), másrészt 35–100 °C közötti forráspontú komponensekből álló stabilizált gazolint nyernek. A stabil gazolint többnyire benzinekhez adalékolják, de más célú hasznosítása is előfordul (pl. oldószerként).

Soványabb gázoknál a gazolint aktív szenes vagy szilikagés adszorpcióval kötik le, mivel a nagyobb molekulásúlyú komponensek hajlama az adszorpcióra nagyobb. Használatos a nyomás alatti kioldás is egy petróleumfrakcióval, mert a magasabb forráspontú frakciók jobban abszorbeálódnak. Alkalmaznak kompressziót is a hőmérséklet csökkentésével, amikor a C_3 -as és ennél több szénatomot tartalmazó komponensek cseppfolyós halmazállapotba kerülnek. Ugyancsak így távolítható el a nitrogén és az esetleg előforduló hélium is. Így választják el a nyers gazolintól a propánt (C_3) és butánt (C_4) is, melyek légköri viszonyok között gázneműek, de nyomás alatt cseppfolyósak. A propán és bután forráspontja légköri nyomáson –40 °C körül van, ami a nyomás növelésével emelkedik. A szállítás nagy nyomásán e komponensek kondenzálódnak, veszélyeztetve a kompresszorok üzemét. A PB-gázt 4–10 bar nyomáson hozzák forgalomba, vezetékes gázzal nem ellátott háztartások számára palackokban, valamint gépkocsik üzemanyagául (LPG⁶²) a töltőállomásokon. A forgalomba kerülő PB-gáznak mintegy 60%-a származik

⁶² Liquefied petroleum gas, cseppfolyósított olajgáz.

a földgázfeldolgozásból és 40% a kőolajfinomítás mellékterméke. Néhány településünkön PB-re alapozott hálózatot alakítottak ki (falugáz), esetleg a földgázhálózathoz történő későbbi csatlakozás reményében.

A szállíthatóság is megkívánja a harmatpont alatt kicsapódó, illetve a nagy nyomáson kifogyó gőzök eltávolítását, mert a szállítás nagy nyomásán akadályozhatják az áramlást, súlyosan veszélyeztetve a kompresszorok üzemét is. A földgázzsállítás robbanásveszélyes, a tengereken a cseppfolyósított szállítási mód miatt maga a hajó is robbanásveszélyes, de különösen az a feladó kikötőben lévő cseppfolyósító és a lefejtés helyén az elpárologtató mű. Szárazföldön a végső fogyasztókig csővezetéken jut el a gáz, a szállító-, elosztó-, fogyasztói hálózatokban lépcsőzetesen csökkenő nyomáson. A gázrobbanások leggyakoribb oka, ha a vezetékből szivárgó gáz összegyűlik és gyújtószikra éri. Több katasztrófa következett be a nagy interkontinentális gázvezetékek szivárgása miatt (a legnagyobb Mexikóban 1984-ben 452 halottal, illetve egy szibériai völgyben egy vasúti szerelvény áthaladásakor sok száz áldozattal). A legtöbb gázrobbanást az elosztóhálózatok és az épületek vezetékeinek szivárgása okozza, nálunk sem ritkák lakóházakban letális kimenetű gázrobbanások.

A legfontosabb nem konvencionális földgáz-előfordulások (gázpala, gázhomok) kiaknázásának technológiája hasonló a nem konvencionális olajforrásokéhoz. A palagáztermelés több országban megindult, az Egyesült Államok már gázszükségletének felét fedezi palagázzal, erre alapozva importfüggésének felszámolását is célul tűzte ki. A palagáz és a tömött homokkőből származó gáz nagy léptékű termelésének lehetősége felbolygatta a gázpiacot, új megközelítésű prognózisok születtek, mind az ellátásra, mind az árakra. Néhány helyen a környezetvédők ellenzik a palagáztermelést, nehogy az elvándorló gáz szennyezze az ivóvízbázisokat (állítólag metán lépett ki a vízcsapokból).

Nem konvencionális előfordulás az üledékes medencék tömör alapkőzetében található jelentős mennyiségű metán is. Tisztázatlan, hogyan választható le a metán a kőzetről, hogyan biztosítható az áramlása a kőzetben, és hogyan hozható fel a több km-es mélységből. A kinyerés lehetőségére csak nagyobb távlatban remélnek választ a kutatásoktól. Ugyancsak megoldásra vár a geonyomásos zónákban rendkívül nagy nyomású vízben oldott földgáz hasznosítása is.

Megindult a feketeszenek metántartalmának a kinyerése is (CMM⁶³), ami egy t szénben 25 m³-t is elérhet. A metán kinyerésére többféle lehetőség van, pl. kioldható a fűrőlyukakba juttatott metanollal, vagy dimetiléterrel, szabadabbá tehető a metán mozgásához az út a nyomás csökkentésével vízszivattyúzás révén. A CO₂-benyomás is számításba jöhet, aminek nagyobb affinitása van a szénhez, és lehetővé teszi a metán deszorpcióját, N₂ benyomásával is lazítani lehet a metán kötődését a szénhez.

Hatalmas vagyont (15–50 Pm³) tételeznek fel a sekély tengerekben és a mélytengeri árkokban sokfelé található metángázhidrátokban. A víz kristályszerkezetébe zárványként beágyazódó metán (klatrát) 10 °C alatt és 20 bar felett alkot stabil szerkezetet. Egy m³

⁶³ Coalmine metan.

metánhidrát mintegy 5000 m³ metánt tartalmaz. Ennek kiaknázására kísérleti üzemek létesültek.

Többféle eljárást fejlesztettek ki szintetikus földgáz (SNG⁶⁴) előállítására szénből, de ezek még távol vannak a versenyképességtől, mert a technológiához nagyon költséges berendezések szükségesek. Sokan a földgáz-helyettesítés fontos lehetőségének tekintik a hidrogéngazdaság megteremtését.

A magyarországi földgáz-előfordulásokról az első írásos emlék a 18. század elejéről maradt fenn. Kisebb előfordulások hasznosítására már a 19. században sor került, de a nagyobb arányú kiaknázás csak jóval később indult meg. A földgáztermelés 1924-ben kezdődött Hajdúszoboszlón, a termálvíz kísérőgázát helyi igényekre és vasúti kocsik világítására használták. Az első jelentős földgáz-előfordulást 1958-ban tárták fel Hajdúszoboszlónál, Algyőn a termelés 1966-ban indult meg, számottevő még a vagyon Pusztaföldvár és Szank térségében. Fontos lelőhelyek más térségekben (Battonya, Endrőd, Kardoskút, Kiskunhalas, Kisújszállás, Lovászi, Nagykőrű, Orosháza, Szeghalom, Üllés) is vannak. A túlnyomórészt pliocénkori homokkőrétegekben talált szénhidrogének metántartalma 89–96%. A magyar szénhidrogén-előfordulások mintegy 70%-át teszi ki a földgáz, a feltárt vagyon kereken 90 Gm³, de abból csak ~32 Gm³-t tartanak gazdaságosan kitermelhetőnek.

Nagy mélységben, kőzetekhez kötve még jelentős előfordulásokat valószínűsítene (pl. a Makói-árokban), de ezek kitermeléséhez technológia még nem áll rendelkezésre. Magyarországon a mecseki feketeszén-előfordulásokban van jelentős mennyiségű kitermelhető metán.

A földgázhasználat az 1960-as években kapott nagy lendületet, jelentős állami ösztönzéssel. A kialakított központi program a hazai földgázvagyon hasznosítására irányult. A magyar földgáztermelés csúcstértékét az 1980-as évek közepén érte el 7,5 Gm³/évvel, azóta fokozatosan csökken, jelenlegi értéke ~2,5 Gm³/év. A hazai kitermelés eddig összesen ~200 Gm³-t tett ki.

A földgáztermelés baleseti viszonyai megegyeznek az olajtermeléssel. A környezetkárosításban az olaj esetében a talajszennyezés, a földgáznál a kút berobbanása a kellemetlenebb, ami nemcsak emissziókkal, hanem hatalmas zajjal és rázkódással jár. A legnagyobb kitérés Zsanán (1979) és Pusztaszőlösön (2000) fordult elő, az utóbbinál a 100 m magas lángoszlopot 3 hónapos küzdelem után sikerült elfojtani.

4.6. Hasadóanyag-bányászat

Az atomenergia alkalmazása ellentmondásos kérdése az energetikának. Hívei szerint ez teremti meg a lehetőséget az energetika feszültségeinek (ellátásbiztonság, környezet-szennyezés, árszint stb.) a feloldására. Ellenfelei viszont zsákcácnak tartják, ami súlyos veszélyekkel fenyegeti az emberiséget. A politikában váltakozva érvényesülnek ezek

⁶⁴ Synthetic natural gas.

a nézetek, ennek függvényében az atomerőmű-építés fellendülése és visszaesése változtatja egymást, ettől függ az uránkutatás és kitermelés aktivitása is. Ezek a folyamatok országokként eltérően alakulnak, a politikai hatalom jellegétől függően.

Az atomenergetika jelenleg az urán hasznosítására alapul. Urán a Föld felszínén nagy mennyiségben fordul elő, de meglehetősen szétszórta. Az értelemek kutatása az egyéb ércekhez hasonlóan történik. A geofizikai vizsgálatok lehetőségét bővíti a hasadóanyagok spontán bomlása okozta ionizáló sugárzás, ami nemcsak a felszínen, hanem levegőből is indikálható. A γ sugárzás szelektív mérése lehetővé teszi az uránércek elhatárolását az ugyancsak sugárzó tórium- és káliumércektől. Gázáteresztő fedőközet esetén hasznos útmutatást ad a spontán bomlásból származó radon mérése is. A geokémiai lehetőségek is számottevőek, mivel az urán hajlamos a vegyületképződésre, és az oldódásra. Természetesen az urántelepek pontosabb behatárolásához ugyanúgy mélyfúrásokra van szükség, mint az egyéb ásványoknál.

Az urán mindig együtt található a radioaktív bomlási sor összes bomlási termékével. A hosszú felezési idő következtében magának a kőzetnek a sugárzása nem intenzív, viszont a fejtés során kiszabadulnak belélegezhető, a szervezetre ártalmas izotópok. A légtérbe kerülő radon koncentrációját megfelelő szellőztetéssel az előírásokban megengedett koncentráció alá lehet szorítani, több gondot okoz a radioaktív porok eliminálása.

A hidegháború megszűntével az uránérből kinyert U_3O_8 -koncentrátum (sárga pogácsa, yellow cake) tőzsdei cikké vált, amit a világpiacon a fontnyi mennyiség⁶⁵ dollárban mért költségével jegyeznek. Az uránár kevésbé függ az olajártól, viszont erősen befolyásolják az atomerőmű építési szándékok. Az urán legnagyobb részét nem a spot piacon szerzik be, hanem a fűtőelemek szállítására hosszú időre kötött szerződések alapján. Az Európai Unióban az EURATOM-nak beleszólási joga van a szerződésekbe, az ellátásbiztonság érdekében, ennek során preferálja az Unión belüli ellátást. Ezt ellensúlyozandó, a szovjet atomerőműveket üzemeltető országok csatlakozásuk előtt hosszú távú szállítási szerződéseket kötöttek az üzemanyag orosz szállítójával.

Az uránércek kitermelésének 60%-a az ércbányászat hagyományos módszereivel történik. A felszín alatt mintegy 120 m-nél nem mélyebben elhelyezkedő előfordulásokat érdemes külfejtéssel kitermelni, a mélyebben fekvő telepeket pedig mélyműveléssel. A világtermelés 37%-a külfejtésből, és 24%-a mélyművelésből származik. Főleg homokkőből sikeresen alkalmazzák az urán in situ kémiai kilúgozását, így termelik ki a világ urántermelésének 34%-át. A literenként 20–200 mg koncentrációjú oldatot csővezetékben továbbítják a fűrőlyuktól a feltárás helyére. Ígéretes a baktériumokat tartalmazó oldatokkal történő in situ feltárás is. Mintegy 5%-ra tehető az egyéb módszerek aránya, a más bányatermékek melléktermékeként kibányászott, valamint a hulladékokból felszíni kilúgozással (perkoláció) kinyert urán.

A bányatermék tonnánként legfeljebb néhány kg urán-oxidot tartalmaz, a feldolgozás első fázisa ennek a kinyerése. A bánya mellé telepített ércdúsítóban a kibányászott kőzetet törés, aprítás, néha flotálás után golyós vagy csőmalmokban vizes iszappá őrlik,

⁶⁵ 1 lb = 0,4536 kg

majd kémiai eljárással kivonják az uránércet. Tekintettel a feldolgozásra kerülő ércek sokféleségére, telephelyenként egyedi eljárásokat dolgoznak ki a feltáráshoz. A leggyakoribb a kénsavas feltárás – ez volt a magyar gyakorlat is – de alkalmaznak sósavat és salétomsavat is. Használják lúgos eljárást is, elsősorban karbonátok esetében. Biokémiai kilúgozási módszerek is terjednek, baktériumok segítségével nyerve ki az uránt az ércből. A tóriumérccek feltárása szintén savas vagy lúgos eljárásokkal történik, további feldolgozásának módja hasonlít az uránéhoz.

Az oldott uránvegyületet szűréssel vagy üleptéssel különítik el az iszaptól, ezt követően az oldatból többnyire ioncserélő gyantákkal, néha szerves oldószerrel vagy csapadékképzéssel választják ki. A gyulladás és kémiai robbanás elkerülésére a folyamatokat vagy inert gázatmoszférában végzik, vagy nedves porral dolgoznak. Minden műveletnél elengedhetetlen a sugárvédelem, és gondoskodni kell az elfolyó radioaktív szennyvizek hatástalanításáról is. A szűrt és koncentrált anyagot kemencékben szárítják, azután pörkölik és tisztítják. A kivonásnál alkalmazott anyagoktól függően az ércfeldolgozás végterméke vagy tiszta urán-oxid (U_3O_8), vagy urán-oxidot tartalmazó nátrium-diuranát ($Na_2U_2O_7$), vagy ammónium-diuranát ($[NH_4]U_2O_7$) koncentrátum. A koncentrátumot sárga színe miatt nevezik sárga pogácsának, annak urán-oxid tartalma 80% körüli érték. (Vannak a sárgától eltérő színű koncentrátumot szolgáltató technológiák is, ami azonban nem érinti a megnevezést.)

A mecseki homokkőben talált gyenge minőségű⁶⁶ urán termelése 1956-ban indult el néhány száz méter mélyen, a bányászat az évtizedek során 1000–1100 m mélységgig jutott, szükségszerűen egyre nagyobb önköltséggel. A magas költség miatt az 1990-es évek elején a bánya bezárására született döntés, amit szociálpolitikai okból később visszavontak, és a Paksi Atomerőművet a világpiaci árnál lényegesen magasabb átvételi ár megfizetésére kötelezték. Ez a konstrukció azonban tartósan nem volt fenntartható, ezért a bányát 1997-ben végleg bezárták. A kövágószőlősi uránércbányából 42 év alatt 46 Mt kőzetet termeltek ki, amiből ~31 kt fémuránt nyertek. A tevékenység a katonai vonatkozások miatt titkos volt, ami sok félreértésre adott okot. 1956-ban a Petőfi Kör egyik vezető jelszava volt a „hová tűnt a magyar urán?” E mögött az a feltételezés állt, hogy a Szovjetunióba kiszállított uránból atombomba készül, megfosztva bennünket annak energetikai hasznosításától. A közvéleményben az a tévhit élt, hogy az uránt Magyarországon kellene feldolgozni, nem tudva, hogy ennek rendkívül bonyolult és költséges technológiájával csak az atomhatalmak rendelkeznek, és csak olyan nagy léptékben érdemes kiépíteni, ami Magyarországon szóba sem jöhet. Azt is feltételezték, hogy az atomenergia megoldja az ország teljes energiaellátását, pedig csak a villamosenergia-ellátás egy részének fedezésére jöhet számításba. Óriási értéket tulajdonítottak uránvagyonunknak, pedig a nagy mélységben található sovány érc egyre versenyképtelenebbé vált, és végül a Szovjetunió csak vonakodva vette át a Paksi Atomerőmű számára fűtőelem gyártásához. Egy ausztrál vállalat (Wildhorse) koncessziót szerzett uránkutatásra a Mecsekben. Bizakodó nyilatkozatokat tesz kilúgozásos termelés kilátására, ennek realitása

⁶⁶ Igen jó minőségű érc: >20%; jó: >2%; gyenge: >0,1%; igen gyenge: >0,01% (100 ppm).

ma még nem ítélték meg. Az uránbányászatnak jelentős szerepe volt Pécs és környéke fejlődésében. Az urán- és széntermelés megszűnte a régió gazdasági visszaesését okozta, ezért a helyi szervek lelkesen támogatják az urán kitermelésének újraindítását.

Hasadóanyag-bázisnak tekinthetők a tóriumérccek is, bár ennek energetikai hasznosítására még nem került sor. A tóriumérccek mennyiségét az uránvagyon többszörösére becsülik, a földkéregben található tórium átlagos koncentrációja 12 g/t, ami három-négyeszerese az uránkoncentrációnak. A nagyobb koncentrációjú előfordulások legtöbbször tóriumtartalmú kőzetek elmállása során dúsultak fel. Többnyire a ritka földfémekkel együtt fordul elő, rendszerint más elemekkel együtt alkot érceket, a tiszta tóriumásványok ritkák. Legfontosabb érce a monacitromok. A tórium feldolgozási technológiája nincs annyira kidolgozva, mint az uráné, kifejlesztése több országban kutatás tárgya. A tórium uránnál alacsonyabb rendszámának köszönhetően a láncreakcióban nem keletkezik plutónium, és más aktinidák mennyisége is kevesebb, ami enyhíti a hulladékproblémát, és kiküszöböli a proliferáció lehetőségét.

Az uránbányászokat elsősorban a kőzetpor okozta szilikózis és a radioaktív sugárzás fenyegeti, de a mozgásszervi és rezgés okozta ártalmak is jelentősek. Magának a kőzetnek a sugárzása nem intenzív, viszont a fejtés következtében kiszabadulhatnak belélegezhető, a szervezetre ártalmas gázok, melyek közül különösen a radon veszélyezteteti az emberek egészségét, főleg tüdőrákot okozva. A radon hatását intenzív szellőztetéssel lehet ellensúlyozni. Nagyon poros munkahelyeken a por lecsapására is sort kell keríteni.

Sugárzás és radon kibocsátása a talajsztinten is érvényesül, mivel a bányászás során nagy mennyiségű szilárd és folyékony hulladék keletkezik. Ugyancsak sok hulladék keletkezik a kifejtett kőzetből az urán-oxid leválasztását szolgáló ércdúsításnál. A meddőhányók és az egyéb hulladéklerakó helyek (ércdúsító, perkolációs halmok, ülepítő tavak) jelentős területet foglalnak el, amit lezárásuk után rekultiválni kell. Sok évig szükséges e térségek ellenőrzése, és megközelítésük megakadályozása, amíg a radio-nuklidok kellő mértékben le nem bomlanak. A zagytereket és ülepítő medencéket alul is szigetelni kell a talajvíz védelmére. Bár az uránérccek rendszerint száraz formációkban találhatóak, a Mecsekben elhelyezkedő uránbányánkat sajnos nem ez jellemezte, abból nagy mennyiségű vizet kellett kiemelni a termeléshez. A környezet ivóvízbázisainak megóvása érdekében a vízemelést a felhagyott bányából is folytatni kell, ellenkező esetben a föld alatti vízáramok radioaktív szennyezést juttathatnának az ivóvízbe. A bányászat hulladékainak felszámolására, és a terület rekultiválására a kormány vállalatot hozott létre, sok éves programmal és megfelelő pénzalappal. A mérések szerint a teljes üzemanyagciklus hatása a lakosságra kisebb a háttérsugárzás 1%-énél.

4.7. A földhő kinyerése

A hévizeket már az ókorban is használták fürdésre, gyógyításra, lakóházak fűtésére, de a földhő szélesebb körű energetikai kiaknázására csak a 20. században gondoltak.

A földhő hasznosítása leginkább a talaj mélyebb rétegeiből származó termálvízzel történik, az ebből származó energia a Föld tömegében rejlő hőnek csupán morzsáit kép-

viseli. A kedvező hidrogeológiai körülmények között kialakult rezervoárokból felszínre jutó víz halmazállapota a kőzetekben uralkodó hőmérséklet és nyomásviszonyoktól függ. A víz esetenként természetes úton jut a felszínre artézi forrásként, az energetikai hasznosításhoz azonban többnyire fűrt kutakban szivattyúzzák fel a hőhordozót. A hő használati értéke hőfokfüggő, az alacsony entalpiájú termálvizek energiatartalma 100–180 kJ/kg, ami 2 nagyságrenddel kisebb a tüzelőanyagok energiatartalmánál. Alacsonyabb hőmérsékleten használati melegvíz szolgáltatás, mezőgazdasági hasznosítás és balneológiai alkalmazás jöhet számításba. Az elég magas hőmérsékletű víz távfűtésre és technológiai célokra is használható, a nagy entalpiájú hőhordozóval villamos energiát lehet fejleszteni. Újabban a geotermikus energiát szélesebben értelmezik, beleértve a környezeti hőt is, ami a környezetünkben levő talajból, vizekből és levegőből nyerhető, és az gyakorlatilag hőszivattyúval aknázható ki.

A Pannon-medence hévizeit legnagyobb részét 100–120 °C hőmérsékletet meg nem haladó rezervoárokból nyerik, bár akad néhány nagy entalpiájú gőzelőfordulás is. A hévízkutatás és -termelés módszereit a kőolajiparból ültették át. Hévizeink jelentős részére a szénhidrogén-kutatás során bukkantak, a meddő kutató fúrások harmada mutatott ki termálvizet. E fúrások legtöbbször nem olyan területeken mélyítették, ahol számottevő a hőigény, ezért több száz hévíz szolgáltatására alkalmas kút le van zárva, mert nagyobb távolságra szállítva a termálvizet lehűlne. Jelenleg kerekben több mint 1000 hévízszolgáltató kút van üzemben, melyek évente ~400 Mm³ (~1,1 Mm³/nap) melegvizet szolgáltatnak.

Néhány országban jelentős kutatómunka folyik a forró sziklák (főleg gránit) hasznosítására, néhány kis kísérleti üzem is létesült. Forró – 200–300 °C-os – kőzeteket néhány km mélységben mindenütt fel lehet tételezni, ezek hőtartalma elvileg kinyerhető. Az elv egyszerű, vizet kell lenyomni a forró kőzethez, azt felmelegedés után a felszínre kell emelni, majd munkavégzés után egy másik kútban vissza kell nyomni a mélybe. A probléma a folyamatos hőátzármaztatás és cirkuláció biztosítása az impermeábilis és hőszigetelő kőzetben. A megoldás érdekében a kőzetben hidrofракcionálással, vagy más módon vezető csatornákat kell kialakítani, de azok idővel eltömődhetnek, és környezetük lehűlhet. Más elképzelések a mélyben néhány 100 m átmérőjű üreg kialakítására irányulnak, ilyenkor a hőátzármaztatás az üreg környezetének hővezető képességén múlik. A cirkulációhoz nagy teljesítményre van szükség, mivel a leküzdendő nyomáskülönbség 300–600 bar. A forró sziklák hasznosításához szükséges fúrások költsége exponenciálisan nő a mélység függvényében, ezért az eljárás nem ígérkezik olcsónak, valószínűtlen, hogy a forró sziklák hőjének kiaknázása (HDR⁶⁷) néhány évtizeden belül versenyképesé válik.

A felszínre kerülő termálvizek rendszerint különféle szennyező anyagokat is tartalmaznak, amik üzemviteli gondokat (eróziót, korróziót, eltömődést) okozhatnak, és környezetvédelmi problémákkal járnak. A víz tartalmazhat homok formájában magával ragadott szilárd ásványi részecskéket, oldott ásványi sókat (főleg Na- és K-kloridok, valamint -karbonátok), nehézfémeket (Hg, Pb, As, Zn), nem kondenzálódó gázokat

⁶⁷ Hot dry rock.

(pl. szén-dioxidot, ammóniát, metánt, nitrogént, hidrogént, kénhidrogént), és a lelőhelytől függően más szennyezőket. A termálvíz rendszerint erősen sós, mivel a meleg víz jobban oldja az ásványokat és a fémeket. A sótartalom a mélységgel nő, az 1–2 km mélyről származó vizekben 100–400 g/l a szokásos érték. Az agresszív anyagok, pl. a kénsavvá oxidálódó kénhidrogén korrodál, a metán és más szénhidrogéngázok levegővel keveredve robbanást okozhatnak. Ezért rendszerint szükség van szűrésre, gázleválasztásra, szeparálásra és egyéb tisztító eljárásokra. Azt is meg kell akadályozni, hogy toxikus, az egészségre ártalmas, illetve környezetszennyező anyagok kerüljenek ki a levegőbe, vagy a felszíni vizekbe. Néha a hasznosítható ásványi anyagok kinyerése is számításba jöhet.

A geotermikus energiahasznosításnál elejét kell venni annak, hogy agresszív, egészség- és környezetkárosító anyagok a talajba, az élővizekbe vagy a légtérbe jussanak. A legkellemetlenebb légszennyező a kén-hidrogén, ami 10 ppm felett mérgező, de kellemetlen szaga már $> 0,002$ ppm esetében erősen érezhető. A rezervoárgazdálkodás és a környezetvédelem érdekében egyre inkább követelmény, hogy a technológiai ciklus végén a kiemelt hőhordozókat visszasajtolják a rezervoárba. A visszasajtolás költséges, és természetesen energiabefektetést követel, rontva az eredő energiamérleget.

Az üzemeltetés legnagyobb gondja a vízkőkiválás, ami a buborékpontnál kezdődik (többnyire már a terepszint alatt 30–60 m-el). A hazai termálvizekre főleg karbonátos vízkő kiválása jellemző. A főleg CO_2 -t tartalmazó termálvizeknél a probléma a nyomás beállításával uralható, ha a szén-dioxid parciális nyomását megfelelő értéken tartják, nem képződik vízkő. A vízkőképződést inhibitorok bekeverésével is meg lehet előzni, a kiválást megakadályozó fizikai effektusok (ultrahang, villamos erőtér) is számításba jöhetnek. A már lerakódott vízkövet savazással lehet eltávolítani. Műanyagcsövek, valamint különféle bevonatú acélcövek alkalmazásával veszik elejét a vízben oldott sók és gázok (főleg oxigén, szén-dioxid, kén-hidrogén) korrozív hatásának. Gyakran szükség van a hévíz gáztalanítására is, a vízben lévő CH_4 , CO , N_2 , H_2S , a nyomokban előforduló etán, propán, bután kiválasztására, ami esetleg a metán felhasználásával is párosulhat. A két világháború között a MÁV a hajdúszoboszlói termálvízből kivont metánnal világított vasúti kocsikat.

Nem ellensúlyozható a kútképzésnél és az üzemzavarok során szükséges lefűvésznél a néha szuperszonikus sebességű szabad kiáramlás hatalmas hangja, és az erőmű közepében a csövekben sűrűlő közeg zaja sem jelentéktelen. Esetenként a talaj stabilitása is gondot okoz, egyrészt a felszín besüllyedése, másrészt szeizmicitás kialakulása révén, a visszasajtolás ezek veszélyét is csökkenti.

5. A természet kihasználása

5.1. Megújuló energiák

A megújuló energiákat gyakran illetik nem konvencionális, vagy újszerű jelzővel, pedig ezek az emberiség legrégebbi energiaforrásai. A biomassza hasznosítása egyidős a tűz meghódításával, majd azt is megtanulták, hogyan lehet az állatok erejét kihasználni. A rézkorba nyúlik vissza a folyami kultúrák területén a megszelídített állatok alkalmazása igavonóként, majd a bronzkorban megszelídítették a lovat is. A ló fizikai munkavégző képessége 15-szöröse az emberi teljesítménynek, de a 11. századig, amíg nem jelent meg Kínából a célszerű hámgiga és a patkó, ennek csak törtrészt tudták kiaknázni. A tartósan nagy erő kifejtésére képes lovat malmokban, bányákban gépek működtetésére is használták, de a legjelentősebb szerephez a mezőgazdaságban, a szállításban, a kereskedelemben és a hadviselésben jutott. A hadseregek mozgékonyága és hatósugara alapvetően a lovakon múlt, a népvándorlás sem kuszálta volna össze két kontinens etnikai térképét, ha a nomád harcosok nem ülnek lóra. A lovon ülő ember nemcsak gyorsabban halad, hanem messzebbre is lát, optikailag is meg képletesen is. A feudális lovagok szinte lóháton éltek, a ló e társadalmi rend egyik státuszszimbóluma volt. Még az első vasutat is lovak vontatták, de a modern kor erőgépeivel nem tudták felvenni a versenyt, a gazdasági életből az állati energia végleg kiszorult.

Ahogy – főleg a fémszerszámok megjelenése nyomán – nőtt a termelékenység, egy ember már többet tudott termelni, mint ami a saját megélhetéséhez kellett, munkájából mások eltartására is futotta, kialakulhatott a rabszolgatartás. A társadalmi változás egyben energetikai változás is, a rabszolgák fizikai munkája növekvő arányban járult hozzá az ókori társadalmak energiabázisához. Ők művelték a földeket, ők dolgoztak a bányákban, építették a piramisokat, sütötték a kenyeret, hajtották a hajókat. Az eszköznek tekintett rabszolgában ugyan szerencsésen egyesült a munkavégző szerszám a hajtó erőgéppel, használat után regenerálódott, sőt szaporodott is, de használhatóságának jelentős korlátai is voltak. A legfőbb probléma, hogy a termelékenységét nem lehetett úgy növelni, ahogy azt a fejlődés megkívánta. Kényszerrel csak átmenetileg növelhető a teljesítmény az élettartam rovására, de a felügyeletmentes időszakokban annál nagyobb a visszaesés. A kegyetlen bánásmódban részesülő emberi „erőgép” érdektelen a technológia fejlesztésében és a hatékonyság javításában, több forrás szerint a rabszolgák átlagos teljesítménye feleakkora volt, mint a szabad embereké. Ahogy a rabszolgaszerzés lehetőségei is beszűkültek, a rabszolgatársadalmak zsákutcába futottak. A történelem kegyetlen vargabetűje, hogy az Újvilág meghódításához a munkaerőhiány a korszak úttörő országait a rabszolgamunka felélesztésére készítette az ültetvényes rabszolgatartás formájában.

Idővel rá kellett jönni, hogy a gondozást és táplálást igénylő biológiai erőgépek helyett jobb megoldást jelentenek a természeti erőkre alapuló technikai energiaforrások. Ahogy

az emberek félelme csökkent a természet erőitől, igyekeztek azokat is felhasználni, mindenekelőtt a szél és a vízfolyások mozgását. A vízfolyások erejének hasznosítása őrlésre, vízemelésre már az ókori folyami kultúrákban is megjelent, de a vízimalmok tömeges alkalmazása a középkorban indult meg. A 18. században a gyorsan iparosodó országokban a gyáripar csíráit képező manufaktúrák legjelentősebb hajtóereje a nagy erők kifejtésére képes vízikerek, tömegesen használták vashámorok, fonodák, fűrésztelepek stb. működtetésére, kohóknál levegőbefújtatásra. A folyóktól távol a szélmalomok töltötték be hasonló szerepet. A vízi- és szélmalom konstruktőrei a műszaki kultúra terjesztői is, a kor első kezdetleges munkagépeit is gyakran ők alkották meg.

A szél a tengereken játszotta el főszerepét a történelemben. A víztükrök felett viszonylag tartós széljárás tud kialakulni, mivel semmi sem akadályozza az útját. A szél segítette a föníciai és görög hajósokat a földközi-tengeri kolóniák kiépítésében és a virágzó antik világ megteremtésében. No meg a szép számmal megjelenő kalózok is a szél erejére támaszkodtak. A szél hajtotta a portugál karavellákat a nagy földrajzi felfedezésekhez és szállította a katonákat és kereskedőket a hatalmas gyarmatbirodalmak megteremtéséhez.

Megjegyzendő, hogy a megújuló energiák ugyan környezetbarátok, de hasznosításuk teljesen nem mentes a környezetszennyezéstől. Mindegyiknek vannak sajátos hatásai, a mikroklíma módosítása, az élővilág életfeltételeinek és az emberi életkörülményeknek a befolyásolása stb. És mindenekelőtt – a teljes vertikumot figyelembe véve, a bölcsőtől a koporsóig szemléletben – a felhasználásukhoz szükséges anyagok, berendezések és eszközök előállításának a környezetszennyezése, a felhasznált cement, acél, üveg, félvezetők és más anyagok gyártásából, a szerkezetek gyártásának melléktermékeiből és hulladékaiból, valamint leszerelésükből származó hatások. Az ellenzésre már találtak érveket, a vízerőműveknél a környezet átalakításában, amire a legjobb példa a szerencsétlen Bős–Nagymaros-ügy, a szél erőműveknél a táj képenek tönkretételében, valamint a kommunikáció és a madarak megzavarásában.

Az Európai Unió 2020-ig 20%-ra kívánja növelni a megújuló energiák jelenlegi 6%-os részarányát az energiamérlegben, és hasonló arány elérését célozza meg a villamosenergia-termelésben is. A motorhajtó üzemanyagok között pedig el kívánják érni a biomasszából előállítottak 10%-os arányát. Magyarország adottságai a legtöbb megújuló energia hasznosítására szerények, ugyanakkor erős nyomás nehezedik ránk a hasznosítás fokozására, egyrészt az Európai Unió, másrészt a hazai zöldek részéről. A lehetőségeket a jelenlegi teljes éves energiafelhasználáshoz viszonyítva a 3.1. táblázat mutatja. A tőlünk 2010-re elvárt 3,5%-os arányt túlteljesítettük, de ez csak látszatsiker, mert a kedvező mutatókat a fatüzelésű erőművek térhódítása eredményezte, aminek jelenlegi gyakorlata műszaki, gazdasági és környezetvédelmi zsákutca. A magyar energiapolitika nehéz dilemmája, hol van a megújuló energiahasznosítás optimuma, mennyit indokolt ennek támogatására a költségvetésből előirányozni, és mekkora teherviselést lehet ehhez a lakosságtól elvárni? Az adatok alátámasztják, hogy a megújuló forrásokra fontos és hasznos szerep vár az ország energiaellátásában, de kizárólag azokra nem alapozható az igények fedezete.

5.2. Napenergia-hasznosítás

Tulajdonképp meglepő, hogy a napsugárzás mindig és mindenütt érvényesülő energiájának nagyarányú technikai kiaknázására csak a 20. század vége felé kezdtek gondolni az emberek. Pedig már az ősemberek számára is kézenfekvő volt, hogy a Nap szabályozza az élet ritmusát, a nappalok és éjszakák váltakozását, a hőmérséklet ingadozását, a borult és derült időszakok érvényesülését, az évszakok alakulását. A tapasztalatok arra is rávezették, hogy a természet megújulása is a napsugárzás változásainak függvénye, a növények és gyümölcsök fejlődése, majd termésük beérése a napos időszak tartamától és a napsugárzás erejétől függ. A Nap jóindulatának megnyerése életkérdéssé vált a primitív népeknél, mert a Nap teremtőerején múltott, találnak-e táplálékot az életben maradásukhoz, ez volt a talaja a napimádat kialakulásának. A Nap természetesen bekerült az első istenek közé, kultusza a mitológiákban és minden ősi vallásban is megtalálható. A Nap valódi szerepét a csillagászok kezdték megérteni, Kopernikusz, Galilei, Kepler munkássága nyomán. De hosszú ideig csupán egy égitestnek tekintették, energetikai szerepével nem foglalkoztak. A modern ember már tudja, hogy a Nap számunkra nem csupán egy csillag, hanem energiaforrás is, méghozzá nem egy energiaforrás a sok között, hanem a Földön minden energia forrása. A napsugárzás hozza létre a szélben, a vízfolyásokban, a tengervíz mozgásaiban megtestesülő energiát, a földi élet minden formája a fotoszintézisre alapul, és közvetve az ásványi energiahordozók létrejötte is a Nap szerepére vezethető vissza.

A Nap szerepének a megfigyelése vezetett a növénytermesztés kialakulására, ami megoldotta a gyorsan szaporodó emberiség táplálását. Ez a fejlemény adott módot a Föld benépesítésére, lehetővé téve az emberek széttelepülését olyan térségekbe is, ahol a természet magától nem ontotta bőségesen az ennivalót. A mezőgazdasági tevékenység megkövetelte rendszeres munka átformálta az életvitelt, ami alapjává vált a rendezett társadalom kialakulásának, az erre alapuló stabil életkörülmények vezettek az ókori nagy birodalmak kifejlődésére. A mérsékelt égövön a hőmérsékleti és a csapadékviszonyok különösen kedvező feltételeket teremtettek a mezőgazdaság számára, ott alakultak ki a fejlett civilizációk. Lehet, hogy az üvegházhatás ezeket a feltételeket tönkreteszi?

A napsugárzás passzív hasznosításának legjelentősebb módja a növénytermesztés, ez napjainkban is a napenergia legszélesebb körű alkalmazása. A Nap hatása azonban nemcsak éltet, pusztító is lehet, a Száhel övezet súlyos aszályaiban emberek és állatok milliói halnak éhen és szomjan.

A passzív hasznosítás hosszú időre visszatekintő területe az építészet. A házak kialakításánál már az ókor mérnökei is számoltak a napsugárzás hatásával. Vitruvius, Augustus császár építész, az időszámításunk előtti első században rámutatott, hogyan kell figyelembe venni a házépítésnél az éghajlat helyi sajátosságait. Alapjában véve passzív napenergia-hasznosító minden olyan épület, amely környezeti adottságai, építészeti kialakítása következtében képes kiaknázni a nap sugárzását mint energiaforrást. A passzív napenergia-hasznosítás a napsugárzás hőenergiájának elnyelésén, a hőenergia tárolásán, végül leadásán nyugszik. A ház kitarulkozik a nap felé, külső átlátszó (üveg,

polikarbonát) felületei beengedik a napfényt, mely vagy közvetlenül átadja hőjét a belső térnek, vagy elnyelődik a helyiség felületein, és onnan késleltetve – amikor éppen szükség van rá – érkezik ismét a helyiségbe.

A napenergiának ez a passzív hasznosítása a mérsékelt égövön a napsugárzás minél nagyobb mértékű felfogását, az energia tárolását és célszerű elosztását jelenti, amivel az épületek fűtésében, szellőzésében, világításában sok energiát lehet megtakarítani. Ebben szerepe van az épület elhelyezésének (tájolás, védelem a széltől, árnyékolás), a külső térelhatároló szerkezetek (falazatok, nyílászárók, tetők) szigetelésének, a hőtároló épületelemeknek, a napsugárzást gyűjtő naptereknek (veranda, tornác, loggia, télikert) stb. Jelentősen csökkenthetők a hőveszteségek az épületek külső térelhatároló szerkezeteinek megfelelő kialakításával (réteges falszerkezetek, légréses fal- és tetőszerkezetek, utólagos külső hőszigetelés). Nagy a nyílászárók szerepe a megfelelő szigetelésen kívül az optikai tulajdonságok befolyásolásával (pl. többréteges, illetve szelektív átteresztőképességű üvegezés). Számos olyan konstrukció is megjelent, melyek az üvegházhatás elvét alkalmazó épületelemek kialakításával növelik az épületek hőhasznosítását. A hatékonyság növelésére különféle épületszerkezeteket fejlesztenek: szelektív és változó fényáteresztő képességű, valamint vákuum vagy gáztöltésű ablakszerkezeteket; a fényátbocsátást vilamos vagy termikus vezérléssel ellátott üvegeket; kis sugárzású bevonatokat; hőtároló és hőszigetelő anyagokat; átlátszó szigeteléseket, fázisváltó hőtárolást; stb. A napfényt tükröző, irányító és terelő szerkezetekkel, üvegszálkábeles vezetéssel, valamint egyes fogyasztó-berendezések napsugárzástól függő vezérlésével csökkenthető a világításra fordított energia és a természetes keringés elősegítésével a hűtés energiaszükséglete. A napenergia aktív és passzív hasznosításának kombinálásával sikerült fűtést egyáltalán nem igénylő kísérleti épületeket (napházak) is kialakítani.

A passzív napházak olyan épületek, amelyek a nap energiáját gépészeti eszközök nélkül igyekeznek minél nagyobb mértékben hasznosítani és azt minél tovább megőrizni. Jellegetes az építészeti megformálás is, a keleti, déli, nyugati oldalakon nagyméretű, nagyon jó hőszigetelő képességű üvegfelületek helyezkednek el, míg az északi oldalon legfeljebb csak kis nyílások vannak. A jó hőszigeteléssel (aljazatban, külső falakon, földemben), a belülről származó hőleadással (azaz a háztartási gépek hőveszteségével és az emberek hőleadásával), valamint a napenergia „csapdás” hasznosításával a fűtés jelentős része a mérsékelt égövön is megtakarítható.

A melegebb klímaövezetben ellentett a feladat, a napenergia hatásának mérséklése árnyékoló felületekkel, a hőt elszállító levegő természetes keringésének elősegítésével, és hőelvonó hatásokkal (párolgatók, vízáramok) növelve a hűtést.

A napenergia aktív kiaknázásánál valamilyen szerkezet segítségével alakítják át a sugárzást más energiafajtvá. Ennek első kísérlete Arkhimédész nevéhez kapcsolódik, aki i. e. 212-ben a görög harcosok bronzpajzsát tükörként használva a fókuszált napsugarakkal felgyújtotta a Siracusát ostromló római hajókat. Ezt követően nemigen hallani újabb fejleményeket a 19. század közepéig, amikor az olcsó szén hiánya a napenergiával működtetett gőzgépek felé fordította a francia feltalálók figyelmét. Parabola-tükörrel a fókuszba helyezett kazánban gőzt fejlesztettek, amivel dugattyús gőzgépet működtettek. Ilyen elven készítettek pl. nyomdai sajtót, szőlőprést, hűtőgépet stb., de

ezeket a próbálkozásokat a szénár csökkenése elsöpörte. Főzésre szolgáló naptűzhelyet is kifejlesztettek, amit még a 20. század vége felé is ajánlgattak a trópusi országoknak, kevés sikerrel, mert azzal főzni csak napsütés idején lehet, és akkor is állandóan forgatni kell a Nap irányának követésére.

A közvetlen sugárzásból a legtöbb energiát a nap irányára merőleges felületen lehet felfogni. Maximális energiahozam a Nap pályáját követő, a sugárzásra mindig merőlegesen álló felfogófelülettel érhető el. Ehhez azt egyrészt folytonosan forgatni kell a vízszintes tengely körül, hogy a vízszinteshez mért dőlésszöggel követni lehessen a Nap állását a horizonthoz viszonyítva. Másrészt a függőleges tengely körül is forgatni kell, hogy a felület állásszögével követni lehessen a Nap keletről nyugatra irányuló pályáját. Azt is figyelembe kell venni, hogy a pálya síkja, továbbá a napkelte és a napnyugta helye a horizonton napról napra változik, északi, illetve déli irányban tolódva el az évszakok változásának megfelelően. A nappálya zenitje, valamint a napkelte délkeleti és északkeleti, illetve a napnyugta délnyugati és északnyugati szélső helyzetei a megfigyelési pont földrajzi szélességétől függenek. A Nap mozgását érzékelőkkel vezérelt motorokkal mozgatott felfogófelületekkel (heliosztátok) lehet követni. Az így kialakított tükrökkel a napsugarakat a kívánt helyre lehet koncentrálni. Ilyen bonyolult szerkezetek az energiahozam maximalizálására csak igényes berendezéseknél fizetődnek ki, többnyire rögzítik a felfogófelületek helyzetét, például háztetőkre, vagy állványokra szerelve. Az égtájak szerinti irányultságban a déli a legkedvezőbb, de csupán néhány százalék energiavesztésig származik az attól eltérő állásszögből a délkeleti és délnyugati irányok között. A vízszinteshez mért dőlésszög a napéjegylenlőség napjain akkor optimális, ha megegyezik az adott hely délkörének szögével. Ha főleg a nyári félévben van szükség energiára, akkor kedvezőbb egy enyhébb, inkább horizontális (~20°-kal kisebb, mint a délkör) pozíció, a téli félévben pedig egy meredekebb, inkább vertikális (~20°-kal nagyobb) dőlésszög célszerű. Természetesen a rögzített dőlésszöggel felfogható energia kisebb, mint ami a Nap pályáját követő megoldással lehetséges, de az eltérések nem szélsőségesen nagyok.

A felfogófelületek ki vannak téve az időjárás viszontagságainak. Mindenféle felfogófelület hatékonyságát csökkenti a kiülededő szennyezés, a lecsapódó pára, a lerakódó csapadék. Ezért a felületek időszakos tisztítása elkerülhetetlen, ami nem mindig egyszerű feladat. A felszerelésnél megfelelő rögzítéssel biztosítani kell, hogy a viharos szelek se tegyenek kárt a létesítményben, de a mozgatható felületek elállítódása az erős szél hatására nem mindig kerülhető el.

Az aktív napenergia-hasznosítás legegyszerűbb módja az üvegházhatás, amit a mezőgazdaságban régóta alkalmaznak. A növényházak üveglapja és a fóliasátrak műanyag borítása a napsugarakat átengedi, a felmelegedett talaj és a növényzet infravörös kisu-gárzását viszont jórészt visszaveri, így a hő nagy része a zárt térben marad.

Az aktív hasznosítás korszerű megoldását a síkkollektorok jelentik, melyek üvegházhatást hoznak létre, kihasználva az üvegek azt a tulajdonságát, hogy a látható fényt átengedi, de az infravörös sugárzást visszaveri. A síkkollektorok eredetileg üveglappal lefedett dobozok, hátoldalukon fekete abszorbenssel, ami a beeső napsugárzás hatására felmelegedik, és az abban kialakított járatokban hőhordozót (vizet, levegőt) melegít fel.

Az üveglap a látható fény 85–90%-át átbocsátja, de az infravörös sugaraknak legfeljebb 1–2%-át, hasonló hatás érhető el megfelelő optikai tulajdonságú műanyag fóliával is, aminek súlya és ára sokkal kisebb. A síkkollektorokat egyszerű kivitel jellemzi, rendelkezésre állásuk nagy, mivel a szórt sugárzást is hasznosítják. A hőhordozót csak mérsékeltén lehet felmelegíteni, bonyolultabb szerkezetekkel 100 °C-ot némileg meghaladó hőmérséklet is elérhető. Az egyszerű megoldások hatásfoka ritkán halad meg 20–30%-ot. A hatásfok és az elérhető hőmérséklet növelhető a hőszigetelést javító kettős üveglappal, az üveglap alatt kialakított vákuummal, az üveglapra felvitt szelektív bevonattal, vagy kedvező jellegű görbéljű, alacsony vastartalmú üveg alkalmazásával. Az abszorbens a legegyszerűbb esetben fekete vagy sötétre festett test (fém, műanyag, üveg), amelyről a hőt felette áramló levegővel vagy hozzá simuló csövekben, illetve belesüllyesztett járatokban áramló hőhordozóval vezetik el. A hőhordozó lehet áramló levegő, lehet szivattyúval vagy a termoszifon-hatással keringetett víz, vagy más fluid anyag (szerves gőz, olvadt só stb.). Az abszorbens hőmérséklete addig emelkedik, amíg a sugárzás, konvekció és hővezetés révén leadott teljesítménye el nem éri az abszorbeált sugárzás teljesítményét. A konvekció az áramlások szabályozásával befolyásolható, a hasznosítható hő növelhető a hőelvitel fokozásával, a hőhordozó áramlási sebességének növelésével, turbulens áramlással, vagy alacsony forráspontú folyadék elpárologtatásával. Hatékony az abszorbensre felvitt szelektív bevonat hatása is, amit sötét fémekből, fémoxidokból vagy félvezető anyagokból lehet előállítani. A napsugárzás időszakos rendelkezésre állása tárolással ellensúlyozható.

A síkkollektorok használati melegvíz készítésére bevált, versenyképes és széleskörűen elterjedt kereskedelmi termékek. Alkalmazásukat számos országban erősen ösztönzik, a világon üzembe helyezett készülékek felülete meghalad több tízmilliónyi m²-t. A mérsékelt égöv országaiban lassabb a megtérülésük, versenyképességük a megtakarított tüzelőanyag áratól függ. Itt önálló alkalmazásuk főleg a szezonális hőigények (üdülők, kempingek, uszodák) kielégítésére célszerű, a téli félévben a hagyományos hőforrásokkal együttműködve a tüzelőfelhasználást csökkentő szerepük van.

A használati melegvíz-készítésen túlmenően síkkollektorok alkalmazhatók levegő felmelegítésére is, ezzel mezőgazdasági létesítmények fűtésére, sőt alacsony hőmérsékletű technológiai hőigények, pl. szárítás fedezésére is. A lakásfűtésre irányuló törekvések kevés sikerrel jártak, egyrészt nehéz áthidalni a fűtési idény és a napos időszak szezonális különbségét, másrészt nagy felület tartozik a szükséges energiamennyiség összegyűjtéséhez. Az átmeneti időszakokban számításba jöhetnek pótfűtésre, ilyen szerepre távfűtéshez csatlakozó kísérleti telepek is létesültek.

A napsugárzással működtetett gőzgépek kései utódai a jelenleg fejlesztés alatt álló naperőművek, melyekből 10–100 MW teljesítményű kísérleti berendezések létesültek szokványos gőzturbinával. Egyik típusukban parabola alakú, tükröző felületű vályúk fókuszálják a tengelyükben kialakított csőkégyóra a napsugarakat („nap-farm”). Az elgőzölgő munkaközeg több száz m hosszú csőkégyóban kering, a befagyás és a korrózió elkerülésére víz helyett néha 300–400 °C-os forráspontú olajokat (hexafluór-benzol, perfluor-n-hexán, tiofén) használnak. Parabola alakú vályúkkal csak 50–150-szeres koncentráció érhető el, viszont a vályúk hosszának növelésével a fókusz tengelyben elhe-

lyezett abszorbensben nagy teljesítmény gyűjthető össze. Ez fokozható a kelet–nyugati irányban elhelyezett tengely körüli forgatással, hogy a vályú normálisa mindig a Nap felé irányuljon. Olyan megoldás is előfordul, hogy sok sík heliosztát vetíti egy nagy paraboloid felületre a sugarakat.

A hosszú kollektorrendszer költséges és karbantartás-igényes, a hőhordozó keringtetése energiaigényes és veszteséggel jár, ezért vonzóbb a „torony-erőmű”. A torony-erőműnél a napsugarakat nagyszámú, néhány m² felületű heliosztát koncentrálja egy 200–300 m magas torony tetején elhelyezett abszorbensre. Ennek a belsejében helyezkedik el a munkaközeg csőrendszere. Kisebb a hővesztesége egy alul fényáteresztő ablakkal ellátott üreges gömb abszorbensnek, melynek a belsejébe belépő sugarak hevítik a csöveket. Az abszorbens többnyire a napsütés egyenetlenségét kiegyenlítő hőtároló anyag, olvadt só (pl. nátrium-, illetve kálium-nitrát), vagy olaj, ami hőcserélőn keresztül melegíti fel a munkaközegét. Az erőműben konvencionális gőzturbinák használhatók, mivel az abszorbens 500 °C-ot meghaladó hőmérséklete is elérhető. Munkaközegként nitrogén és hélium is számításba jöhet gázturbinák számára, kísérleteznek Stirling-motoros megoldással is. A termikus naperőművek hatásfoka alacsony, az energetikai képet az is rontja, hogy hőveszteség akkor is fellép, amikor nem süt a nap. A termikus naperőművek működéséhez tartós és erős közvetlen sugárzás szükséges, az ilyen éghajlatú száraz térségekben viszont a munkaközeg kondenzálásához szükséges nagy hűtővízigény kielégítése gondot okoz. A torony és a heliosztátok költsége, valamint a területigény jelentős. A szükséges terület sugara a torony magasságának többszöröse, hogy elkerüljék a heliosztátok egymást árnyékoló hatását, a felület mintegy 30%-os arányban borítható be. A heliosztátok területfoglalása 4–8 ha/MW, de a tükrök hatékonysága csökken a toronytól mért távolsággal. Ez korlátozza a megvalósítható teljesítményt 100–200 MW-ra. A térítők közötti övezetben 1 km²-nyi felület ~100 MW_e csúcsteljesítményt képes kiszolgálni, az átlag ennél természetesen jóval kisebb. A termikus naperőművekben termelt villamos energia önköltsége lényegesen meghaladja a hagyományos erőművekben fejlesztettét. Csupán elvi lehetőség termokémiai átalakítással, vagy naperőműben előállított árammal hidrogén fejlesztése vízből.

A világ energiaellátását nagy távlatban a napenergiától remélők nagy szerepet szánnak a napfényben gazdag területeken létesített nagy naperőműveknek. Ezek telepítésére a trópusi-szubtrópusi övezet sivatagait, az egyenlítőközeli tengereket vagy a világűrt ajánlják. A nyert energiát a sivatagi és űrbeli elhelyezésnél villamos energiával, illetve a tengeri és sivatagi változatnál ott gyártott tüzelőanyaggal (hidrogén, metanol) szállítanák el a napsütésben szegényebb országokba. Az ilyen koncepciók megvalósíthatósága azonban még távlatilag sem tűnik reálisnak. Eltekintve attól, hogy a gazdaságos nagy naperőművek fejlesztése még várat magára, más jelentős nehézségek is vannak. A trópusi-szubtrópusi övezet száraz éghajlatú térségeiben nemigen biztosítható a munkaközeg kondenzálásához szükséges nagy mennyiségű hűtővíz. A szénhidrogének tengeri termeléséhez szükséges nagy léptékű *off shore* vegyi művek létesítésére pedig még elképzelések se születtek. Az űrbe kihelyezett gőzturbinás erőművek már számításba sem jöhetnek a napelemes lehetőség mellett. Valószínű, hogy még a műszaki problémáknál is nagyobb akadályt jelent a politikai feltételek hiánya, hiszen a koncepciók megvalósítá-

sához nagyon stabil és biztonságos nemzetközi együttműködésre lenne szükség, aminek a lehetőségei belátható időn belül aligha teremthetők meg.

Elvértve magas sótartalmú, néhány m mélységű naptavakat is felhasználnak villamosenergia-termelésre. A sókoncentráció, és ezzel arányosan a hőmérséklet lefele nő, a tó fenekén akár 90 °C is kialakulhat, ahol fel lehet melegíteni a hőkörfolyamat munkaközegét. A kis hőmérséklet-különbség miatt a munkaközeg szerves gőz, a tó a hőtárolást is megoldja. Érdekes gondolat a napkémény, aminek a fenekén az üveglappal fedett talaj hője légáramot ébreszt, ami a kéménybe helyezett szélturbinát működtet.

A hagyományos hőkörfolyamatnál gyorsabb sikert ígér a napsugárzás közvetlen átalakítása villamos árammá. Az átalakításra hővillamos, hőionos, fotokémiai és fotoelektromos (pv) hatások jöhetnek számításba. A hővillamos generátor lényegében a sugárzást érzékelő speciális hőelem, vagy félvezető (pl. PbTe), ami hosszú élettartamú, biztonságos áramforrás. E tulajdonságai alapján jól bevált űrbeli alkalmazásra, azonban földi hasznosítása valószínűtlen, mivel alacsony hatásfokkal csak kis teljesítményt szolgáltat. A hőionos átalakító nagyon magas hőmérsékletre hevített katódú dióda. A magas hőmérséklet és a szükséges különleges és drága anyagok miatt ez a megoldás sem ígéretes. Az energetikai alkalmazás számára a fényelemekben (napelemekben) van a legnagyobb fantázia.

Az régóta ismert (1839, Becquerel), hogy fénykvantumok elektronokat tudnak kiléptetni bizonyos fémekből, illetve gázokból. Ezen alapul egyes gázkiszülései fényforrások, valamint a fénymérő eszközök működése. A nagy áttörést a Bell Laboratórium kutatóinak az a felfedezése jelentette (1950-ben), hogy a hatás p - n átmenetű félvezetőkben is előidézhető. Normálisan egy kristályban a rácspontokhoz kapcsolódó elektronok egy a lehetséges energiaállapotokat összefoglaló vegyérték-energiasávban helyezkednek el. Ha a fénykvantum energiája meghaladja a vegyérték sáv és a vezetési sáv közötti különbséget (a potenciálgátat), akkor elektronnal ütközve azt át tudja léptetni a vezetési sávba. A vezetési sávban az elektron szabadon el tud mozdulni. A potenciálgát értéke eV nagyságrendű. Az átlépett elektron helyén elektronhiány – lyuk – mutatkozik, ami pozitív ionként viselkedik. A p és n rétegek határfelületének két oldalán töltésalakul ki volt nagyságú potenciálkülönbséggel, ennek erőtere mozgásba hozza a töltéshordozókat. Az áram a félvezető két felületére felvitt elektródákhoz kapcsolódó külső áramkörben is érzékelhető.

A leghatékonyabb napelemek Si egykristályokból készülnek, az n típus elektronfelületlegét főleg foszfor, a p típus többletlyukait főleg bór implantálásával érik el. A monokristályok gyártása bonyolult és költséges. Csökkenthető a költség a monokristályos szeletek helyett polikristályos, sőt amorf szilikon alkalmazásával, valamint néhány μm vastag rétegek felvitelével fém, üveg, műanyag felületekre és hajlékony fóliákra. Míg a kristályos szilikont olvadékból állítják elő, az amorfot elgőzölgötgetve viszik fel felületekre. Az alapanyag homogenitása lényegesen befolyásolja az átalakítási hatásfokot, ami Si egykristályoknál 15–20%, polikristályoknál 13–17% és amorf alapanyagnál 5–10%. Az amorf napelem a többi típusal ellentétben a szórt fényt is jól hasznosítja, viszont élettartama rövidebb.

A napelemek először a mW tartományban terjedtek gyorsan el kisméretű fogyasztási cikkek (pl. órák, kalkulátorok) táplálására. Bevált megoldás az elszigetelt helyeken mű-

ködő telefonok, mérő- és jelzőberendezések energiaellátása napelemekkel, teljesítményigényük W nagyságrendű. Terjed a villamos hálózattól távol fekvő fogyasztók ellátása akkumulátorral puffertelt, kW teljesítményű napelemekkel. Mivel a napelemek egyenárama félvezetős inverterekkel szinuszos váltakozó árammá alakítható, a napelemes áramforrások összekapcsolhatók a villamos hálózattal. Ez módot ad az áramfejlesztés szezonális ingadozásának ellensúlyozására is. Meg is indult a napelemes áramfejlesztés integrálódása a villamosenergia-rendszerekbe, megjelentek a nagyobb, MW teljesítményű naperóművek. Magyarországon 10 kW-os kísérleti erőmű létesült napelemek és meleg vizet szolgáltató síkkollektorok kombinációjával.

A félvezető technika rohamos fellendülése a napelemek fejlesztését is magával ragadta, a gyakorlati alkalmazásban döntő szerepe volt az űrhajózásnak, ma már napelemek biztosítják a legtöbb űrobjektum energiaellátását. A nagy erővel folytatott technológiai fejlesztés eredményeként 30 év alatt az átalakítási határfokot sikerült háromszorosára növelni, az előállítási költséget pedig tizedére csökkenteni. Ennek nyomán megnyílt a polgári alkalmazás lehetősége is, a világon üzemben lévő napelemek összesített teljesítménye már GW nagyságrendben mozog. A jelenleg sorozatban gyártott legolcsóbb napelemek szilikonalapúak.

A fejlesztés új félvezető-kombinációk (CdS, CuS, GaAs, CdTe, AlSb, InP, CuInSe) alkalmazására is irányul, egyrészt a hatásfok növelése, másrészt az árak csökkentése érdekében. A CdS és CuS fénylelemek olcsók, de hatásfokuk alacsony. A GaAs fénylelemek hatásfoka nagyobb, de magas hőmérséklet szükséges a működésükhöz. Sokat várnak a magas hatásfokot megvalósító AlGaAs napelemektől. A kereskedelemben kapható napelemek hatásfoka jelenleg 10% körül mozog, az elméletileg elérhető maximum 40–50%, de a gyakorlati korlát közel 25%. Laboratóriumokban már sikerült 20%-ot is meghaladó értéket elérni, a tapasztalatok szerint egy évtizedet igényel a laboratóriumi eredmények átültetése a sorozatgyártásba – valamivel kisebb hatásfokkal.

A hatásfok növelhető optikai koncentrálással, de a fénysűrűség növelésére előnyösebbnek tartják a lumineszcens vagy holografikus megoldásokat. Optikai lencsékkel vagy prizákkal csak kisméretű berendezéseknél reális a koncentrálás, valamivel nagyobb méret valósítható meg Fresnel-prizmával, aminél a hasábszegmenset nem egy tömbből alakítják ki, hanem egymásra helyezett, fokozatosan keskenyedő lemezekből. Nagyobb teljesítményhez a koncentrálást tükrökkel oldják meg, melyek egy nagyobb térszögben befogott napsugarakat fókuszálnak egy felfogóra (abszorbens vagy napelem), növelve annak az energiáját. Egyszerűbb tükröző felületekkel 2–10-szeres koncentráció valósítható meg, nagyobb koncentráció érhető el parabola alakú tükröző felületekkel, amik kialakíthatók kis sík tükördarabkák sokaságából, vagy hajlékony fólián kialakított fényvisszaverő felülettel. A legnagyobb, akár több ezerszeres koncentrációt – és ezzel nagyon magas (1000–2000 °C) hőmérsékletet – lehet elérni paraboloid reflektorokkal, melyeknél az abszorbenst a fókuszpontba kell helyezni. Ez a konstrukció szempontjából kényelmetlen elhelyezkedés megkerülhető a koncentráció némi csökkentése árán a Winston-tükörrel, melynél a visszaverő felületek a fókuszpont helyett a paraboloid fenekére helyezett abszorbensre irányítják a fényt. Ezzel az a hátrány is kiküszöbölhető, hogy a nem pontosan a Nap felé irányuló reflektornál az abszorbens és a fókuszpont nem

mindig esik egybe. Napelemeknél a fénytjeljesítmény megsokszorozására fluoreszkáló rétegek is használhatók.

A koncentráció akkor optimális, ha a tükrök normálisa felezi a napsugárzás iránya és az abszorbens síkja között bezárt szöveget. A felfogott teljesítményt csökkenti, hogy a parabolafelületek tükreire – vagy egy részükre – ez a követelmény nem teljesül. Az is veszteséget okoz, hogy a koncentráció növelésével viszonylag csökken a felfogó által befogott térszög, így a szórt sugárzás mind nagyobb része esik kívül az észlelés területén, ami egy hosszabb időszakot figyelembe véve akár az eredő hatékonyságot is csökkentheti. Különösen sokat várnak több olyan réteg sorbakapcsolásától, melyek a napsugárzás spektrumának eltérő frekvenciáit hasznosítják.

A sorozatban gyártott napelemek többsége 100 cm^2 felületen $\sim 0,5$ volt feszültséggel maximálisan $2,5$ amper áramot szolgáltat. Az ilyen napelemek soros és párhuzamos kapcsolásával kialakított panelekkel tetszőleges teljesítményű rendszerek állíthatók elő.

A napelemek a szórt sugárzást is hasznosítják, így kevésbé napos övezetekben is jól működnek, felhős időben is működőképesek, és akkumulátorokkal áthidalhatók a napsütésmentes időszakok. Alkalmazásuk jóformán minden klímaövezetben elképzelhető. A hőerőgépes naperóművekkel szemben előnyük, hogy nincs szükségük hűtővízre. A mozgó alkatrészeket nem tartalmazó berendezések karbantartásigénye kicsi, és kezelésük is egyszerű. Számos országban (pl. USA, Japán, Németország, Olaszország) sokat áldoznak a nagyobb naperóművek fejlesztésére, a legnagyobb kísérleti berendezés teljesítménye a napsugárzás legintenzívebb időszakában $100 \text{ MW}_{\text{csúcs}}$. A napelemek alkalmazása villamosenergia-fejlesztésre az utóbbi években erősen felgyorsult. A magyarországi tömeges alkalmazásnak két feltétele van, az egyik a napelemek árának lényeges csökkenése, a másik a véletlenszerű változásokat ellensúlyozó energiatárolás és gyors terhelésváltozás biztosítása. Az utóbbira a szivattyús tározás a legjobb megoldás, de az országon belül csak akkor valósítható meg, ha sikerül a vízerőmű-ellenes közhangulatot megszüntetni a bős–nagygyarosi görcs feloldásával. A külföldi tárolás bérlése rugalmatlan függő helyzetet teremt.

A napenergia-hasznosításnak nagy a fajlagos területigénye. Kisméretű eszközök viszonylag könnyen elhelyezhetők a szerkezeti elemekben, illetve ha nem ütközik az esztétikai követelményekbe, az épületek tetején vagy más felületein. A nagy léptékű rendszerek elhelyezésére főleg más célra nem használható térségek jöhetnek számításba a napos régiókban.

A területfoglalás hátránya elesik az űrbe kihelyezett naperóműnél (SSPS⁶⁸), aminek első gondolatát (Glaser, 1972) még sci-fi témának tartották. Ma már tekintélyes szervezetek (NASA, a japán MITI) foglalkoznak ezek tervezésével. Az első elképzelések a villamosenergia-fejlesztést még az űrhajón elhelyezett hőerőgépekkel irányozták elő, később a napelemek szerepe vitathatatlaná vált. A NASA tervei között szerepel egy $12\,000 \text{ km}$ -es magasságban keringő, 8 km magas, torony formájú 400 MW -os erőmű,

⁶⁸ Satellite solar power system.

valamint egy geostacionárius pályán keringő 5 GW-os létesítmény, ~30 km² felületű napelemekkel. A geostacionárius pályán keringő naperőmű teljesítménye gyakorlatilag állandó, mert az év 99%-ában a Föld nem vet árnyékot a napelemekre, és időjárási körülmények sem befolyásolják a működését. Az egyenáramú energiát 2,5 GHz-es mikrohullámmá alakítva 1 km-es antennával tervezik a földre lesugározni egy 100 km² felületű vevőantennára. Nyitott kérdés a mikrohullámú fluxus hatása a repülőgépekre és madarakra. Vizsgálják az energia továbbítását lézersugárral is, bár az életveszélyes az élőlényekre. Ugyan az űrerőmű elemei már működnek az űrhajókban, a megvalósítás még csak távoli remény. A létesítési költség nagyságrenddel haladná meg a földi telepítési erőművékéét, mivel csak az alkatrészek pályára juttatása dollármilliárdokba kerülne.

A napenergia ideális alkalmazását a decentralizált ellátás jelenti, melyben az energiafogyasztók saját napkollektoraikkal biztosítják az önellátást. Ez decentralizált településformát tételez fel, mivel a nagyvárosokban nehéz elegendő felületet találni a sugárzás összegyűjtéséhez, még ha a sikkollektorok vagy napelemek, esetleg a kétféle funkciót együttesen ellátó szerkezetek, burkoló vagy árnyékoló épületelemek szerepét is betöltik. Az autonóm ellátás lehetőségét korlátozza, hogy a társadalmi mozgások – különösen a fejlődő világban – az urbanizáció irányába mutatnak, és nem a szétszóró települések felé.

Természetesen a napenergia hasznosítása sem mentes a környezetszennyezéstől. A teljes vertikumot figyelembe véve és a bölcsőtől a koporsóig szemléletben jelentős szennyezés tartozik a szükséges szerkezeti anyagok (beton, acél, cement, üveg stb.) gyártásához, és egyes szerkezetek létesítéséhez. A pv napelemek sokféle veszélyes anyagot (kadmium, arzén, nikkel, antimon, szelén stb.) tartalmaznak, melyeket az élettartam végén újrahasznosítani, vagy biztonságosan tárolni kell. Közvetlen egészségkárosításról – eltekintve a gyártóipar szokásos ártalmaitól – nincsenek információk, a sugárzást koncentráció naptükrök elvéve a szemet károsíthatják.

5.3. A szél hasznosítása

Őseink már nagyon régen felfigyelhettek az ágakat hajlítató, a tárgyakat magával sodró szél hatására. De e szeszélyes természeti erőt nehéz kiismerni, iránya, ereje és tartama nagyon változatos. Időnként pusztító hatású viharok formájában jelentkeznek, néha viszont a levél se rezdül. Amíg nem álltak rendelkezésre olyan anyagok és szerkezetek, melyek képesek elviselni a szél okozta erők nagy igénybevételét, addig gondolni sem lehetett annak kiaknázására. A szél hasznosítása valószínűleg a bronzkorban kezdődött a folyami kultúrákban mint kisegítő hajtás hátszélnél a csónakokat hajtó evezősök támogatására. Idővel kitűnt, hogy a szél segítségével más irányokba is lehet hajózni, de a vitorlázat jelentős fejlődésére volt szükség, hogy teljesen átvehesse az evezők szerepét. Ez tette lehetővé, hogy a föníciai és görög hajósok már a nyílt tengerre is kimerészkedtek. Ahogy tőkéletesebbek a hajók, mind nagyobb távolságok megtételére váltak alkalmassá, módot adva új területek felfedezésére és új népek leigázására. A szél szárnyán terjedt az antik civilizáció, alakultak ki az ókori mediterrán kolóniák. Új területeket népesítettek be, új

tartományok kerültek egymással kapcsolatba, fellendült az áruforgalom, kibontakozódott a kereskedelem a tengereken, és annak kísérőjelensége, a kalózkodás.

A forgalom növekedése kiváltotta a hajók méretének és teherbírásának növelését, a tapasztalatok alapján tökéletesítették a vitorlázatot is. A pálmát Siracusa 4200 t vízki-szorítású, 2 árbocos Alexandria nevű hajója vitte el, melyet szélcsendben 2000 evezős hajtott. Ezen az i. e. harmadik században épült 124 m hosszú és 32 m széles hajóóriáson minden luxus biztosítva volt, lakosztályok, fürdő, könyvtár, tornaterem, 20 lóistálló stb. Az ókor vége felé már többárbcos hajók jelentek meg, bonyolult vitorlarendszerekkel, melyek nagy sebességre és nagy távolságok megtételére voltak képesek. A kalandozó normannok a 10. században már Amerikába is eljutottak.

Nem véletlen, hogy az emberiség történetében a szél főszerepét a tengereken játszotta el. A víz hőmérséklete és a felette kialakuló hőmérséklet-különbségek viszonylag állandók, a víztükör felett a szél útját semmi sem akadályozza, minden feltétele megvan, hogy viszonylag tartós szél alakulhasson ki (passzát, monszun), melyek hosszú utak megtételére is módot adtak.

A 13. században – valószínűleg Kínából származó megoldás alapján – a kormány a fartökére került, növelve az irányíthatóságot. A 15. században gyorsjáratú, mozgékony, hosszú utakra alkalmas vitorlás jelent meg, a portugál karavella, e hajótípus vált a nagy földrajzi felfedezések járművévé. A vitorlások történelmet írtak, a szél szárnyán új világ-részeket tártak fel és igáztak le, létrejöttek az újkor nagy gyarmatbirodalmi, bolygónk nagy része egységes világgá kapcsolódott össze. Vitorlások szállították a hódítókat és a rabszolgákat az Újvilágba, és az új tartományok kincseit az anyaországba – a kapitalizmus kibontakozódásához szükséges eredeti tőkefelhalmozáshoz – Spanyolországba és Portugáliába, majd később Angliába, Hollandiába, Franciaországba. A nagy forgalom visszahatott a hajók fejlődésére is, amiben kulcsszerepe volt a vitorlázat fejlődésének, mind nagyobb és gyorsabb hajótípusok jelentek meg, karavellák, briggek, szkúnerek, klipperek. A vitorlások hosszú ideig uralták a tengereket, még a 20. század elején is több hajóteret képviseltek, mint a gőzhajók.

A világ legnagyobb vitorlásait azonban nem Európában, hanem Kínában építették meg. Zeng admirális vitorlásainak mérete (hosszuk 120 m-t, szélességük 50 m-t is meghaladt) Kolumbusz zászlóshajójának tízszeresét tette ki, a 307 hajóból álló flottával, melyben 27 ezer tengerész szolgált, a 15. század elején a Távol-Keletet hajtották Kína uralma alá. Zeng hajóhada a világ hatalmas területeit járta be, még Amerikába is eljutottak. A hódításnak azonban nem volt folytatása, Kína bezárta kikötőit a külvilág elől.

Természetesen a vitorla a haditechnikában is teret hódított. A vitorlák már az ókori gályák mozgékonyágában is fontos szerepet töltöttek be. A tengeri csaták nemegyszer sorsdöntő szerephez jutottak, a szalamiszi csata vetett véget a görög–perzsa háborúknak, az actiumi döntötte el a Római Császárság jövőjét. A hajóhad állapota és színvonala birodalmak sorsát dönthette el, a Nagy Armadával a spanyol világbirodalom is a hullámsírbán lelte végét, Drake és Nelson vitorlásai biztosították Anglia világalma szerepét.

A szárazföldön a szél alakulását sok körülmény (domborzat, növényzet, beépítettség, termikus viszonyok stb.) befolyásolja, ennek következtében a légmozgás egyenetlen és ingadozó. A nyílt tengerpartokon a széljárás még tartós, de a parttól a kontinens belse-

je felé távolodva a súrlódás 150–200 km-en belül erősen lecsökkenti a sebességet, és a széljárás egyenetlenebbé is válik.

A szélenergia kiaknázása helyhez kötött berendezésekkel talán 4000 éve fejlődött ki. A legrégebbi lelet az iráni fennsíkról származik, feltehetőleg onnan terjedt át a szélkerék Európába. A gabonaörlésre és vízemelésre szolgáló első ókori szélmalomok függőleges tengellyel készültek, az ilyen megoldások azonban csak állandó szélirány mellett működnek megfelelően. A 13. századtól teljesen átadták a helyüket a Normandiából elterjedő vízszintes tengelyű szélmalomoknak, melyeknél a forgástengely iránya állítható a szélirány változásának megfelelően. A középkori Európában ez a típus vált uralkodóvá. Ma is kísérleteznek függőleges tengelyű megoldásokkal, melyek legfőbb előnye, hogy a turbinához csatlakozó berendezések (sebességváltó, generátor, szabályozók stb.) a talajszinten helyezkednek el, míg a vízszintes tengelyűeknél a turbinával egybeépítve a torony tetejére ültetett gondolában. E karbantartási és üzemviteli előny azonban nem egyenlíti ki a magasban érvényesülő nagyobb szélesebesség és jobb hatásfok fölényét, ezért a függőleges tengelyű megoldások nem versenyképesek.

A szélmalom virágkora a 16–18. század volt. Elsősorban a tengerparti országokban örvendtek nagy népszerűségnek, a viszonylag állandó széljárásnak köszönhetően. Például Hollandiában az 1700-as években 8000 szélmalom működött, de más térségekben – többek között Magyarországon – is ott álltak sok település határán. A falu szélén álló szélmalom találkahely is volt a gabonájuk örlésére várakozó parasztok számára. A tapasztalatok alapján tökéletesedett a szélmalom szerkezete, nőtt a hatásfokuk, egyre bonyolultabb mechanizmusok biztosították a szélirány változásának önműködő követését, a lapátok állítását. Az időszak végén egyes malom teljesítménye már 5–10 kW-t is elért, e nagyobb teljesítménnyel már fűrésztelepeket és ipari berendezéseket is működtetni lehetett. A munkanélküliségtől félve az első szélmalom-hajtotta fűrésztelepet (Limehouse, 1768) a tömeg szétverte. Később is előfordult, hogy a szélenergia alkalmazása akadályokba és értetlenségbe ütközött. Nem is olyan nagyon régen Skóciában az első közvilágítást szolgáló szélenergia létesítését azzal akadályozták meg, hogy az az ördög műve. A gőzgép megjelenése az iparosodó országokban rövid időn belül néprajzi emlékekké degradálta a szélmalomokat. A világ fejletlen régióiban azonban a kis 100–1000 W teljesítményű szélmalomok megőrizték a szerepüket, számuk a milliót is meghaladja. Feladatuk örlőmalom hajtása, vízemelés, itatók táplálása, kisléptékű öntözés.

A szél energetikai alkalmazására új lehetőséget teremtett a villamosenergia-termelés. Kezdetben a villamos elosztóhálózattól távol fekvő fogyasztók ellátására jelentek meg a szélmotorokkal működtetett 10–100 kW-os áramforrások. Az ilyen autonóm ellátás gyengén villamosított területeken jelenleg is terjed. A széljárás bizonytalansága pufferezemben működtetett akkumulátorral hidalható át. Az energiaellátás drágulása és az ellátásbiztonság megingása kedvező feltételeket teremtett a villamos hálózatokba bekapcsolódó szélenergia-termelés terjedésének, aminek az 1970-es évek olajkrízise hatalmas lökést adott. Ezek a szélenergia-termelés lényegében fosszilis energiahordozót helyettesítenek, csökkentve az importfüggést és a környezetszennyezést.

A fejlődésben Dánia és Kalifornia játszott élenjáró szerepet, amihez később számos kedvező széljárású ország (Németország, Spanyolország, Japán, Kína) zárkózott fel.

Az elmúlt évtizedekben a világ szélenergia-kapacitása robbanásszerűen bővült, az utolsó tíz évben a növekedés több mint tízszeres volt. A világon működő szélenergia-telepek összesített teljesítménye meghaladja a 100 GW-t. Világszerte ösztönzik a szélenergia hasznosítását, számos országban vannak ambiciózus szélenergia-építési programok, a prognózisok szerint a szélenergia-telepek néhány éven belül támogatás nélkül is versenyképesé válnak a hagyományos erőművekkel.

Ugyanakkor a villamosenergia-rendszer működésében gondot is okoznak – különösen, ha kötelező a szélenergia-telepekben termelt villamos energia átvétele, ami elég általános gyakorlat. A széljárás ingadozása miatt rendelkezésre állásuk és teljesítményük bizonytalan, ami nehezíti a rendszer szabályozását és a forrásoldali tartalékképzést.

Kedvező széljárású és nem sűrűn lakott területeken szélenergia-telepeket is kialakítanak, néhány tucat szélturbina egységgel. Így csökkenthető a létesítés, üzemeltetés és karbantartás költsége. Terjednek a sekély vizű tengerekbe kihelyezett szélenergia-telepek is, aminek előnye, hogy nem vesz igénybe hasznos földterületet, és a lakott területektől távoli elhelyezkedés kiküszöböli a környezet zavarásával kapcsolatos aggályokat. Az *off shore* telepítés magasabb költségét ellensúlyozza a nagyobb és tartósabb szélenergia. Egyes – több MW-os egységekből álló – telepek összteljesítménye száz MW-ot is meghalad. Tervezik a számításba vehető vízmélység növelését, és ezzel a telep létesítésének kiterjesztését a parttól számított 20–30 km-ig. A szélenergia-telepek – főleg csoportos telepítésnél – területigényes létesítmények, az átlagos területszükséglet 50–100 m²/kW. Szélenergia-telepeken az egységeket egymástól több száz méterre (de legalább a forgórész átmérő négyszeresére) kell elhelyezni, amit nemcsak a lapátok mérete szab meg, hanem a levegőáramnál a kölcsönös zavaratlanság biztosítása is. Ez magyarázza a nagy helyigényt, az *off shore* telepek többször tíz km²-t is elfoglalhatnak.

A szélenergia-telepek létesítését 4–5 m/mp átlagos szélsebesség felett tartják gazdaságosnak. A kinyerhető teljesítmény a szélsebesség köbével arányos, ennek közepes fajlagos értéke Európa kontinentális területén a szélre merőleges felületen ~110 W/m², az Atlanti-óceán partján ennek 6–8-szorosa is érvényesül. A szélkerék a levegő mozgási energiájának legfeljebb 40–45%-át hasznosítja. A széljárás ingadozása miatt a szélenergia-telepekkel ténylegesen fejleszhető energia és az elméletileg lehetséges maximum aránya – a kapacitástényező – ritkán halad meg 20–25%-ot. Szélcsendben, valamint a sűrűlódás miatt kis szélsebességnél (2,5–3 m/mp alatt) a szélturbinák működésképtelenek, nagy szélsebességnél (20–25 m/mp felett) a szerkezetek épségét veszélyeztető erőhatások miatt kell a turbinákat leállítani.

A villamos hálózatba kapcsolt szélenergia-telepek egységteljesítménye fokozatosan nőtt, a legnagyobb működő szélenergia-telep teljesítménye 6 MW, és ennek további növelését tervezik. A kis teljesítménysűrűség miatt a szélenergia-telepek nagyméretű berendezések, az alkalmazható méreteket – és ezzel a teljesítményt – a szerkezeti anyagok szilárdsága szabja meg. Az első 6 MW-os egység 100 m magas oszlopon helyezkedik el, a szélkerék átmérője 150 m.

A lapátokra ható szélenergia egyrészt a szélirányba mutató szélnyomást fejt ki, másrészt arra merőleges felhajtóerőt gyakorol. A függőleges tengelyű turbinákat a szélnyomás, a vízszintes tengelyűeket a felhajtóerő forgatja, a forgatónyomaték nagysága a szélse-

bességen kívül függ a lapát alakjától és állásszögétől. Figyelembe véve a szerkezetek méreteit, a lapátok kerületi sebességét és az ezekből, valamint a szélnyomásból származó erőket, MW nagyságrendnél nagyobb teljesítményű szélerőművek aligha valósíthatók meg. Régebben a lapátokat fából, acélból, alumíniumból készítették, napjainkra az üveg-szállal erősített poliészter vált uralkodóvá.

Mivel a szél iránya változó, a vízszintes tengelyű szélturbináknál a függőleges tengely körüli elfordítással (csűrés) gondoskodni kell a beállításról a szél irányába. Egyszerűbb szerkezeteknél terelőlapáttal, korszerű berendezéseknél elektronikus vezérléssel oldják meg ezt a feladatot. A szélerőművek lapátjai a repülőgépek légszárjáihoz hasonlóak, alakjukat az aerodinamika törvényszerűségeinek figyelembevételével alakítják ki. A nagy teljesítményű szélerőműveknél a lapátokat hossztengegyük körül is forгатni lehet, hogy állásszögük változtatásával minden szélesebségnél maximális teljesítményt szolgáltatassanak, illetve túl nagy szél esetében csökkentsek a szélnek kitett felületet és a felhajtóerőt. A lapátok csúcán a sebesség 50–100 m/mp, amihez 40–60 1/perc-es fordulatszám tartozik. A lapátok módosítják a légáramlás képét, ezzel hatást gyakorolnak a szomszédos lapátok viszonyaira, ezért a hatásfok függ a lapátszámtól.

A kis teljesítményű forgórészeket többnyire sok (15–36) lapát, kis fordulatszám, de nagy forgató nyomaték jellemzi. Az utóbbi tulajdonság előnye, hogy kis szélesebségnél is nagy mechanikai teljesítményt szolgáltat. A nagyobb teljesítményű önálló szélturbinák kevés lapáttal készülnek, a tapasztalatok szerint a három propellerlapátú vízszintes tengelyű szélturbinák hatásfoka a legnagyobb, de elvéve két, sőt egylapátos megoldás is előfordul. A nagy lapátszámú szélturbinákat kis fordulatszám, a kis lapátszámúakat nagy fordulatszám jellemzi. A nagy fordulatszám különösen villamosenergia-termelésnél előnyös, mert kisebb áttétel szükséges a nagy fordulatszámú generátor hajtására.

A szélturbinák legjelentősebb környezeti hatása a zaj. Ez egyrészt a sebességváltók mechanikai zajától származik, másrészt a levegő sebességváltozása által okozott aerodinamikai zajtól. A szélerőművek tövénél a zaj tetemes lehet, de mivel a távolság kétszereződése a zajforrástól ~6 dB-el csökkenti a zajszintet, 150–200 m-re már a lakóterületekre előírt érték alá csökken.

Kedvezőtlen esetben a szélturbinák által visszavert elektromágneses hullámok interferenciát okozhatnak, különösen a tv-adás vételét és a mobiltelefonok működését zavarhatják. Elsősorban a magas szélerőműveknél gyakori panasz a tájkép rontása, főleg csoportos telepítésük esetében. Más optikai problémák is jelentkeznek, reggel és este a magas tornyok árnyéka okozhat zavart, erős fényben pedig a diszkóhatás (szaggatott fény a forgás hatására). A környezetvédők a turbinák madárpusztító hatását is kifogásolják, ami különösen akkor jelentős, ha a telephely a madarak vonulási útjába esik. Egyes megfigyelések szerint a helyben élő madarak alkalmazkodnak a létesítményekhez. Jegesedés idején a lapátokról lerepülő jégdarabok balesetet is okozhatnak. Szélerőműtelepeknél, a kölcsönös zavarítás elkerülése érdekében, a fajlagos területfoglalás nagy, de ez nem akadályozza a terület mezőgazdasági hasznosítását.

A magyar Országgyűlés a termelt villamos energia kötelező átvételére indokolatlanul magas árat állapított meg, a gyors megtérülés következtében a szélerőművek létesítése

jó üzletté vált. E kedvező helyzet tömeges szélerőmű-építési kezdeményezést indított el (mintegy 2 GW-nyi összteljesítménnyel), amiben a vállalkozókon kívül érdekeltek az érintett települések, a kisajátításra kerülő területek tulajdonosai és a berendezések gyártói. Ilyen sok szélerőmű befogadására a villamosenergia-rendszer jelenleg képtelen. Egyrészt az átviteli hálózat kapacitása kevés a szanaszét létesíteni tervezett erőművek termelésének elszállítására. Másrészt korlát a villamosenergia-rendszer szabályozhatósága. A rendszer nem rendelkezik sem a szélerőművek rendelkezésre állásának, illetve teljesítményük ingadozásának ellensúlyozására alkalmas kapacitásokkal, sem a termelés és terhelés különbségét áthidaló tárolási lehetőséggel.

Ilyen célra az energiát tárolni képes, gyorsan indítható és teljesítményük gyors változtatására képes szivattyús-tározós vízerőművek a legalkalmasabbak, amire több helyen (Pilis, Börzsöny, Zempléni-hegység) vannak alkalmas lehetőségek. A megvalósítást azonban a zöldek sikeresen akadályozzák, a vízerőmű építést ellenző közhangulatra támaszkodva. Ismét visszakerülünk a sok gondot okozó Bős–Nagymaros-komplexushoz. Ha sikerül a tárolás és szabályozás gondját megoldani, a szélerőművek jelentős szerepet fognak játszani a magyar villamosenergia-ellátásban.

Szabályozás céljára jelenleg néhány száz MW-ig van mód, jelentős hátrányok árán. A szabályozás ugyanis rossz hatásfokú hőerőművekkel történik, melyek terhelésváltoztatása jelentős többletvesztéssel jár, ugyanakkor sokkal több szén-dioxidot bocsátanak ki, mint amennyit a szélerőművek megtakarítanak. Ez együtt jár gazdasági gondokkal is, nemcsak a magas támogatást és annak járulékos költségeit kell végső fokon a fogyasztóknak megfizetni, hanem annak hatását is, hogy a kötelező átvétel időszakonként olcsón termelő erőműveket (pl. atomerőművet, ligniterőművet) szorít ki a rendszerből. A korlátok miatt a szélerőmű építési lehetőségek határát 330 MW-ban határozták meg. Az engedélyezési eljárás körül érdekütközések, társadalmi viták és politikai konfliktusok alakultak ki, melyek lényege a támogatási rendszerhez vezethető vissza. A fejlesztett villamos energia kötelező átvételét eredetileg a zöld energiahasznosítás ösztönzésére vezették be. A jó magasan megállapított átvételi ár és a piaci ár különbségét az energiaszolgáltatóknak egy erre a célra létrehozott alaphól (KÁP⁶⁹, később KÁT⁷⁰) megtérítették. Ennek fedezetét kezdetben a költségvetés biztosította, később a fogyasztókra terheltek át. A támogatás elnyeréséért a szakmai körök és az önkormányzatok erős lobbitevékenysége indult meg, aminek eredményeképp sok más villamosenergia-termelési megoldást (hő- és villamos energia kapcsolt termelése, hulladékégetés, fatüzelés stb.) is bevontak a rendszerbe, a támogatásnak alig negyede jutott a megújulóknak. A zavaros helyzetben megérett az idő a támogatási rendszer átalakítására. A szélenergiával kapcsolatban még az is felmerült, hogy támogatás nélkül is versenyképes, támogatva viszont népgazdasági szinten veszteséget okoz. Új szempontként jelentkezett, hogyan egyeztethető össze a fogyasztók járulékos terhelése a kormány rezsicsökkentési stratégiájával (az áramszámlákban több ilyen burkolt teher található, pl. a szénfillér a veszteséges erőmű

⁶⁹ Kötelező átvételt támogató pénzalap.

⁷⁰ Kötelező átvétel támogatása.

és bánya dotálására, vagy a nyugdíjas villamosenergia-ipari dolgozók áramkedvezményének finanszírozása).

A zöld mozgalmak gyakran érvelnek a megújuló energiahasznosítás munkahelyteremtő hatásával. A szélerőművek esetében ezt fenntartással kell fogadni, mert a technológiai berendezéseket importáljuk, ami a gyártóknál (főleg Dániában, Spanyolországban, Németországban) növeli a nemzeti jövedelmet és a foglalkoztatottságot. Mivel Nyugat-Európában a szélerőmű-építés telítődés felé tart, a gyártók erőteljesen a keleti piac – benne Magyarország – megszerzésére törekednek. A nyugati szélerőművek felújítása gyakran teljesítménynöveléssel párosul, ki vagyunk téve annak, hogy a külföldi beruházók a leszerelt berendezésekből nálunk építenek erőművet, ami később bosszulja meg magát rövidebb élettartammal.

5.4. A vízenergia kiaknázása

A víz ereje – főleg pusztító hatása révén – régóta foglalkoztatja az emberi képzeletet. A vízözönnel kapcsolatos Gilgames-legenda Hammurápi könyvtárából kultúráról kultúrára átörökítve vált az ókori mítoszok visszatérő elemévé. A víz útjának befolyásolása gáttakkal, csatornákkal már több ezer éve kezdődött az ókori folyami kultúrákban (Mezopotámia, Egyiptom, India, Kína), egyrészt öntözés céljából, másrészt szállítási útvonalak kialakítására. Az építmények néha impozáns méreteket értek el, még 100 m-es magasságot megközelítő földgátak is előfordultak, a kínai Nagy-csatorna hossza megközelítette a 2000 km-t.

A vízgépek első példái valószínűleg az öntözéshez használt vízemelő szerkezetek (noria) voltak, e fakerekekre szerelt serlegekkel a vizet a folyóból magasabb szintre tudták felemelni, hogy elvezethessék az öntözendő földekre. Az első gabonaörlő vízimalmok időszámításunk előtt néhány száz évvel jelentek meg a Közel-Keleten, Európába Nagy Sándor közvetítésével jutottak el. Az ókori görögök már használtak nagyon kis teljesítményű, függőleges tengely körül forgó vízikerekeket. Időszámításunk előtt 200 körül kezdték alkalmazni a Római Birodalomban a nagyobb teljesítményű, vízszintes tengely körül forgó vízikerekeket, teljesítményük már 1–2 kW-t is elért, de a rabszolgaerő bősége miatt nem volt igény kiterjedt alkalmazásukra. Vespasianus császár még határozottan tiltotta a vízimalmok használatát, nehogy munkanélküliséget okozzanak. A vízimalmok terjedését azonban császári rendeletekkel sem lehetett meggátolni, amit később a munkaerőhelyzet radikális romlása is ösztönzött. Néhány évszázadon belül már nagy számban elterjedtek, kezdetben főleg gabonaörlésre, később más nagyobb teljesítményt igénylő feladatokra is.

A vízimalmok az 5–6. században már a frankoknál is megjelentek, más népeknél is gyorsan terjedtek, gazdasági jelentőségük állandóan nőtt. Bagdad nagy vízimalmában a 10. században száz örlőkö volt. Hódító Vilmos nyilvántartása Angliában 5000 malmot sorolt fel. A középkori Angliában a vízimalom vált a manufaktúrák fő erőgépévé, a textilipar a vízjárások mellé települt, létrehozva a későbbi technikai fejlődés centrumait.

A feljegyzések szerint a tihanyi bencés apátságnak már a 11. században több vízimalma működött a Veszprém megyei Sédén.

Az áramlás által működtetett alulcsapott vízikerek helyett már a 4. században kialakult a felülcsapott megoldás, amit a felül bevezetett víz súlya hajt. De bonyolultabb szerkezete miatt csak a 13–14. században terjedt el. A felülcsapott vízikereknek nem csak a teljesítménye sokkal nagyobb, hanem a telepítés lehetősége is kötetlenebb, mivel a vizet csatornával távolabbra is el lehet vezetni.

Ösztönözte a vízenergia (és ahol nincs folyó, ott a szélenergia) hasznosítását a középkor krónikus munkaerőhiánya, mivel az állandó háborúskodások nagymértékben tizedelték a munkaképes lakosságot. Majdnem minden uradalom rendelkezett saját vízi- vagy szélmalommal, azok rendeltetése, elhelyezkedése, üzem módja harmonikusan illeszkedett a feudális földbirtokon alapuló zárt gazdasági rendszerek jellegéhez és szervezetéhez.

A vízikerek korszerűsítésével növelték a teljesítményt, a 17. században egyik-másik berendezésnél már 100 kW-t is elért. A versailles-i park szökőkútjainak csodájára jártak, az ezek működését biztosító 235 szivattyút 14 darab 12 m átmérőjű vízikerek hajtotta. London közepén, a malom hajtására épített 10 m átmérőjű hatalmas vízikerek egyben a város vízellátását is biztosította. A 18–19. században már sok tízezer 1–50 kW teljesítményű, fémből készült vízikerek működött Európában. A gyorsan iparosodó országokban a 18. század a vízikerek nagy százada. Ahol nagy erő kifejtésére volt szükség, ott a vízikerek vált a fő hajtóerővé. A nagy kapacitású vízikereket sok gépet hajtó és sok embert foglalkoztató üzemekben lehetett jól kihasználni, szétfeszítve a kézművesség kereteit, kialakultak az árutermelő manufaktúrák. Pl. Arkwright fonodájában, 1779-ben már 1000 orsót hajtott a vízikerek. Megjelentek a vízikerek a bányákban a kitermelt érc és a víz kiemelésére, nagyobb teljesítményük lehetővé tette a bányák mélységének növelését. Használtak vízikereket ércőrlésre, posztókészítésnél kallózásra, különféle keverési műveletekre, kohók fűjtatóinak működtetésére, fűrésztelepek, vasművek, papírgyárak, szövödék, fonodák kiszolgálására. Számos olyan technológiai művelet vált lehetővé, amit korábban el sem tudtak képzelni a nagy teljesítményigény miatt, a vízenergia a műszaki fejlődés egyik hajtóerejévé vált. Például a vízikerekkel működtetett fűjtatókkal szolgáltatott nagyobb légáram az égés magasabb hőmérsékletét eredményezte, létrejöttek az első kohók. Ezek segítségével korszerűsítették a nyersvas, majd az öntöttvas és az acélgyártás technológiáját. Hasonlóan alapvető fejleményekre vezetett a vízikerek alkalmazása a fémmegmunkálásban is. Hatalmas súlyú kalapácsok mozgatása vált lehetővé, amikkel lemezeket és huzalokat tudtak készíteni, egyes vasgyárakban a kalapács súlya 1 tonnát is elérte. Ágyúcsövek fűrészesítéséhez megjelentek a vízikerekkel hajtott fűrógépek. De talán a műszaki eredményeknél is fontosabb, hogy ezeken a feladatokon nevelődtek fel a korszerű műszaki ismeretek letéteményesei, a fejlődés úttörő mechanikusai, az új eszközök és gépek konstruktőrei, akiknek a tevékenysége vezetett el az ipari forradalomhoz.

A városi települések nagy része a vízfolyások mellett létesült, hogy kihasználják a folyami szállítási lehetőségét és a vízikerek alkalmazhatóságát. Ez a települési mód azonban korlátozta az ipari fejlődést, akadályozva a gazdaság regionális szerkezetének egészséges fejlődését, a természeti erőforrások racionális kihasználását (pl. a bányá-

szatban). A vízjárás egyenetlenségei is korlátozták a folyamatos termelés kialakulását. Mindez nagymértékben előmozdította, hogy a gőzgép „jött, látott és győzött”. A gőzgép nemcsak a telephely kötöttségét oldotta fel, és függetlenítette az energiaszolgáltatást a vízjárástól, hanem jóval nagyobb teljesítményt tudott szolgáltatni. Néhány évtized alatt kisöpörte a vízikereket az iparból, 1850 táján a vízenergia már csak 0,5%-ot képviselt a világ energiamérlegében.

A vízenergia pályafutása azonban nem ért ilyen egyszerűen véget, a vízerőművek új lendületet adtak a vízenergia hasznosításának. A 19. század közepén kitűnő hatásfokú vízturbinákat fejlesztettek ki, melyek a víz potenciális energiájának 70–80%-át mechanikai munkává tudták átalakítani, szemben a vízikerek néhány százalékos hatásfokával. A fejlesztőjükről elnevezett konstrukciók (Francis, Pelton, Kaplan, Bánki) között a választást a folyó vízhozama, esésmagassága és a topológiai körülmények szabják meg. Azokat kezdetben csak a vízikereket felváltó mechanikai erőgépekként (gabonaörlésre, öntözéshez, fűrészelésre, kisipari erőforrásként stb.) alkalmazták, de ez a szerep a villamosenergia-termeléshez viszonyítva jelentéktelenné vált. A vízturbinákkal ugyancsak kitűnő hatásfokú hidrogenerátorokat meghajtva energetikailag szinte egyedülállóan kiváló lehetőség nyílt villamos energia termelésére, még hozzá állandóan megújuló ingyenes hajtóanyaggal. A konstrukciók fejlesztése egyre nagyobb teljesítményű gépek alkalmazására adott módot, az első néhány száz W-os egység teljesítményt hamarosan túlhaladták, jelenleg a csúcsteljesítményt 800–900 MW-os turbinák jelentik.

A vízerőmű-építés lehetőségét a folyók vízhozama és a hasznosítható esésmagasság szabja meg. A folyók vízhozama időben változó mennyiség, ami nagyon erősen függ a vízgyűjtő terület csapadékviszonyaitól, magas hegyvidéken a hóolvadás lefolyásától, a nem energetikai célú vízkivételezés (ipari felhasználás, öntözés, ivóvíz kivétel) mértékétől, a vízkészletezés kormányzásától a tározókban, valamint a vízfolyásra másutt telepített vízerőművek üzemvitelétől. A vízhozam szélső értékei között nagyságrendi különbség is mutatkozhat, például a Duna legkisebb vízhozama Budapestnél 700 m³/mp, legnagyobb vízhozama pedig 8500 m³/mp volt.

A nagy vízhozamú időszak területenként eltérő időpontokban alakul ki, a magashegységekben (pl. az Alpokban) a hóolvadás miatt tavasszal, a középhegységekben (pl. a Pireneusokban) többnyire az őszi esős időszakban. Az eltérés előnyös kooperációkra ad módot villamosenergia-szállításokban. A vízjárás egyenetlenségét és a tarifakülönbséget használta ki több évtizeden keresztül egy osztrák–magyar villamosenergia-csere egyezmény is, az osztrákok nyáron szállítottak áramot vízerőműveikből alacsonyabb tarifával, amit télen kevesebb árammal ellentételeztünk hőerőművekből magasabb tarifával. A konstrukció nálunk számottevő tüzelőanyag megtakarítását eredményezte, náluk a felesleges vízenergia értékesítését.

A vízgyűjtő területeken csapadékban gazdag és szegény évek váltakoznak, ennek következtében a vízhozamban egyik évről a másikra is jelentős eltérések lehetnek, mind az éves mennyiségben, mind annak időbeli eloszlásában. A hegyekben rendszerint kínálnak olyan völgyszakaszok, amelyek völgyzáró gátakkal elrekeszthetők a víz összegyűjtésére. A közepes- és nagyessű vízerőművek gátjai mögött többnyire kialakítanak ilyen, a vízjárás szezonális egyenlőtlenségeit áthidaló víztározókat, néhol az aszályos

évek hatását ellensúlyozó hatalmas víztömegek összegyűjtésére is mód van. Víz tározós erőműveknél gyakran kerül sor többletkapacitások utólagos beépítésére is csúcsergia előállítására. A vízerőműveknek nagy előnye az energiátározás lehetősége, mivel a villamos energiarendszerek más módon nem tudnak gyorsan igénybevehető nagy mennyiségű energiát tárolni. Ennek nemcsak a rendszerszabályozásban, vagy a szezonális ingadozások kiegyenlítésében van jelentősége, hanem a megújuló energiafajták fokozott hasznosításában is, hogy át lehessen hidalni azokat az időszakokat, amikor azok nem állnak rendelkezésre.

A víz potenciálját meghatározó másik tényező, az esésmagasság a domborzati viszonyoktól függ. A nagy esésmagasság⁷¹ még viszonylag kis vízhozamnál is számottevő teljesítményt szolgáltat, de ha a vízhozam is nagy, akkor ez a villamosenergia-termelés legolcsóbb módja. A kisesésű erőművek többnyire átfolyó jellegűek, víztározásra nemigen van lehetőség, számottevő teljesítményükhöz nagy vízhozamra van szükség. Az esésmagasság kialakításához ilyenkor hosszú szakaszon kell visszaduzzasztani a folyót, ami jelentős partvédelmet kíván meg, a szükséges épített műtárgyak (gát, töltés) terjedelmesek, ami magas fajlagos beruházási költséget okoz. Rendkívüli körülmények – árvíz, jégzajlás – idején a szabad lefolyás biztosítására megnyitják az átfolyó rendszerű vízerőművek árapasztó gátjait, ilyenkor a szintkülönbség eltűnik és nincs villamosenergia-termelés. Folyóink jellegéből következően hazánkban csak kisesésű vízerőművek létesítése képzelhető el, szerény teljesítményekkel.

A nagy esésű vízerőművek speciális válfaját képviselik a szivattyús-tározós erőművek. Ezeknél a villamos energiarendszer terhelésének völgyidőszakában egy magasan elhelyezett tározóba nyomják fel a vizet egy reverzibilis szivattyú segítségével. A vizet a rendszer által megkívánt időben – pl. csúcsidőszakban, vagy a megújuló energiák ingadozásának ellensúlyozására – engedik vissza, amikor a szivattyút turbinaüzemben működtetve villamos energiát fejlesztenek. A megoldás nagy előnye, hogy a teljesítmény gyorsan változtatható. A felső tározót többnyire hegyek kedvező adottságú völgyeiben vagy platóin alakítják ki, az alsó tározó pedig duzzasztott folyószakasz vagy tó, de elhagyott vízzáró bányatérsegek is felhasználhatók erre a célra. Ilyen javaslatot dolgoztak ki a felhagyott recski bánya hasznosítására is. Az utóbbi évtizedekben sokszáz szivattyús-tározós erőművet helyeztek üzembe a fejlett országokban (Japán, USA, Kína, és a legtöbb európai ország). Villamosenergia-rendszerünk szabályozásához nálunk is fontos lenne egy szivattyús-tározós erőmű létesítése, amire előnyös lehetőségek kínálnak a Pilisben (Prédikálószték 1,2 GW), a Zempléni-hegységben (Sima 600 MW), vagy a Börzsönyben (Hegyestető, 600 MW), de megvalósításukat a környezetvédők akadályozzák meg. Felmerült ilyen erőmű bérlése is Ukrajna területén a Kárpátokban, de egy ilyen konstrukciónak kisebb a rugalmassága.

A nagy vízerőművek megvalósítása kiterjedt vízépítési munkákkal jár együtt, a világ legnagyobb méretű épített létesítményei vízerőművek műtárgyai. A duzzasztáshoz gátakat, a vízgyűjtéshez víztározókat kell kialakítani, az árvízvédelem hosszú partszaka-

⁷¹ Kis esésmagasság: ≤ 15 m; közepes: 15–50 m; nagy: ≥ 50 m.

szok megerősítését igényli gáttakkal, a duzzasztóműbe árapasztó zsilipeket építenek be, hajózható folyókon a forgalmat lebonyolító zsiliprendszereket kell létesíteni, gyakran a turbinák kiszolgálására is jelentős létesítményekre (üzemvízcsatorna, nyomócső) van szükség. A létesítéshez rendszerint megfelelő infrastruktúra (közlekedés, közművek, lakások, energiaszállítás) is szükséges. Mindezek következtében a vízerőművek nagyon beruházás-igényesek, amit ellensúlyoz hosszú élettartamuk. Jó néhány 100 évnél régebben épült létesítmény is üzemben van (pl. Magyarországon Ikervárnál), melyeknek csupán a gépészeti berendezéseit kellett időnként felújítani. A műtárgyakat a 100 év alatt előforduló legnagyobb árvíz elviselésére méretezik.

A világon az első nagy vízerőmű a Niagaránál épült. A villamosítás kezdetén a kedvező hidropotenciállal rendelkező országok sorra építették ki vízerőműveiket, főleg a nagy esésmagasságot biztosító hegyvidéken. Ahogy a villamosenergia-átvitel feszültségét növelni lehetett, az elszigetelt helyi ellátást fokozatosan nagyobb területre kiterjedő kooperáció váltotta fel, ami lehetővé tette az áram elszállítását a távol fekvő vízerőművekből is. A rohamosan növekvő villamosenergia-igényeket azonban csak néhány kivételes adottságú területen lehetett főleg vízenergiával kielégíteni (pl. az alpesi és a skandináv országokban), másutt a hőerőművek kaptak domináns szerepet. Mintegy 30-ra tehető azon szerencsés országok száma, amelyekben ma is a vízerőművek képviselik a villamosenergia-ellátás alapvető forrását.

A második világháború után a vízerőmű-építés üteme visszaesett. Sok fejlett térségben elfogytak az olcsón kiaknázható legkedvezőbb lehetőségek, pl. Nyugat-Európában és Japánban a gazdaságosan kiaknázható potenciál kétharmadát kiépítették, ezért az utóbbi évtizedekben főleg a fejlődő világban került sor nagy vízerőművek építésére. A legimpozánsabb Kína grandiózus vízerőmű-építési programja. Ugyan még sok helyen – főleg Dél-Amerikában, Afrikában és Ázsiában – van lehetőség nagy vízerőművek létesítésére, az erre irányuló szándékok azonban gazdasági és környezetvédelmi okokból gyakran elbizonytalanodtak.

A vízerőmű-építés szükségszerűen együtt jár a folyók szabályozásával és a szeszélyes vízjárás megzabolázásával, ami az energiatermelésen kívül más haszonnal is párosul. A nagy beruházási költségek többnyire akkor térülnek meg, ha az energetikai hasznosítás a térség vízgazdálkodási problémáinak komplex megoldásával kapcsolódik. Ebbe tartozik az árvízveszély megszüntetése a partvédelem kiépítésével, valamint tározók révén a vízjárás kiegyenlítésével. Ugyancsak fontos lehet stabil hajóút kialakítása a duzzasztás segítségével, a hajózás feltételeinek javítása előmozdítja az áruforgalmat, és befolyásolja a települések gazdasági helyzetét. A duzzasztás az egyenletesebb vízhozammal ellensúlyozza az aszály hatását, előmozdítja az öntözéses gazdálkodást és más vízigények kielégítését.

A vízjárás kiegyenlítése stabilizálja a talajvízszintet, egyenletesebbé válik a növényzet tápanyagellátása, nő a terméshozam, javul a lakosság és a termelés vízellátása. A mocsaras területek lecsapolása, a vizenyős területek felszámolása hozzájárul az életkörülmények egészségesebbé tételéhez. Számos vízerőmű környezetében olyan rendezett természeti parkokat alakítottak ki, melyek színvonalas üdülési és sport-lehetőségeket teremtettek meg.

A nagy vízerőmű-építési programok párosultak térségek regionális átalakításával, a gazdaság fellendítésével és a foglalkoztatás javításával. Az Egyesült Államokban az 1930-as években a New Deal erőmű-építési programjai a kilábalást segítették a világgazdasági válságból. A Tennessee-völgy rendezése pl. 16 új gát építésével és 5 módosításával megoldotta a térség vízellátását és öntözési igényeit, hajóutat biztosított a Mississippi-völgytől a Mexikói-öbölig, a nagyszámú vízerőművel megoldotta a térség energiaellátását. A példát az Egyesült Államok jó néhány folyóján és külföldön (Svájc, Franciaország, Anglia, India) is követték. A Brazília és Paraguay határfolyóján, a Paranán Itapunál épült 12,6 GW-os erőmű hatalmas dél-amerikai területek villamosítását és iparosítását tette lehetővé. A Szovjetunióban az erőműépítéshez kapcsolódó folyórendezési és csatornaépítési munkák (pl. Volga, Don), vagy az ázsiai építkezések (Angara, Szir-darja) hatalmas területeket kapcsoltak be a gazdaság vérkeringésébe. Kínában a Jangcén épült a világ legnagyobb erőműve (Három Szurdok, 25 GW), ami a víztározással megszünteti a pusztító árvizeket, és biztosítja a folyóvölgyben a stabil mezőgazdasági tevékenységet. Hasonló létesítmények Kína sok más folyóján sorozatban létesülnek. A komplex szerep, valamint a nagy beruházási költség és a lassú megtérülés miatt állami szerepvállalás nélkül ritkán létesülnek nagy vízerőművek.

A folyószabályozásnak azonban nemkívánatos ökológiai következményei is lehetnek. A gát felett a folyó lelassul, hordalékát lerakja, a meder eliszaposodik, tározótó esetében ez nagy kiterjedésű területet érint. A gát alatt az áramlás felgyorsul, erodálja a medret. A folyó áramlási viszonyainak, a víz összetételének és a meder jellegének változása módosítja a víz élővilágának életkörülményeit, élőhelyek tűnhetnek el, egyes fajok ki is pusztulhatnak, mások viszont elszaporodhatnak. A hidrobiológiai változások kihathatnak a part menti szárazföldi élővilágra is, egyrészt a talajvíz szintjének alakulásával, másrészt a táplálékláncon keresztül.

Intő példaként a Nílust szokás említeni, az Asszuáni gát visszatartja a hordalékot, ezért nemcsak a folyó évenként kétszeri áradása marad el, hanem a mezőgazdasági területek elborítása a talajerőt növelő iszappal is, ezért a termékeny folyóvölgyben át kellett térni a műtrágya alkalmazására. A nagy tározótavak befolyásolják a mikroklímát is, környezetükben kiegyenlítettebb, de nedvesebb klíma alakul ki, és módosulnak a csapadékviszonyok is. A nagy tömegű gátak és tározótavak súlya terheli az alattuk fekvő kőzeteket, ami elmozdulásokat idézhet elő ezekben, esetleg kisebb földrengéseket is kipattintva (egyesek ezért földrengéstől is tartanak). Új probléma a víz globális körfolyamatának megzavarása az üvegházhatással, ami a számítások szerint módosítani fogja a csapadék területi eloszlását és mennyiségét.

A kiterjedt vízepítési munkák emberek életvitelét is megzavarhatják. A nagy kiterjedésű tározók létesítése szükségessé teheti emberek kitelepítését (a kínai Három Szurdok építése 1 millió ember áttelepítésével járt), az elárasztás érinthet történelmi emlékeket, természeti és kulturális értékeket, kegyeleti helyeket. A vízerőművek ellenzőinek visszatérő érve, hogy egy gátszakadás pusztító áradatot indíthat el. Azonban ennek rendkívül kicsi a kockázata, a világon épített 15 000 nagy gáttal szerzett tapasztalatok alapján. A nagy léptékű építkezés és szállítás zavarja a környezetben élők életvitelét, rongálhatja a szállítási infrastruktúrát, esetleg a lakóépületeket is.

Nem egyszerű feladat az előnyök és hátrányok szembeállítása, ezek jó részét nem lehet gazdaságilag értékelni, és a hatások gyakran érzelmeket is érintenek. Annak ellenére, hogy a vízenergia tiszta és megújuló energiaforrás, a negatív környezeti hatások lehetősége a környezetvédők heves ellenállását váltotta ki a vízerőmű-építéssel szemben. Az ebből eredő feszültség hálás téma a média számára, és gyakran a politika is kihasználja. A megváltozott hidrológiai és hidrobiológiai körülmények stabilizálódása hosszú időbe telik, meggyőző erejű helyzetképet csak ezt követően lehet kialakítani. Ez nagymértékben nehezíti a vízviszonyokat érintő beavatkozások környezetvédelmet kielégítő tervezését, ami erősen visszavetette a vízerőmű-építési elképzeléseket. A környezetvédelmi ellenzés hatására számos országban eltekintettek nagy vízerőművek létesítésétől, előtérbe került viszont a kis⁷² teljesítményű vízerőművek népszerűsítése (Magyarországon 5 MW a támogatás határa), feltételezve, hogy azok környezeti hatása nem számottevő, mert kevés beavatkozást jelentenek a folyó jellegébe. Ezek rendszerint átfolyó erőművek, tározók nélkül, mert még kismértékű víztározás is csak nagyon ritkán fizetődik ki. Jelentős hányaduk helyi igényeket szolgál ki, és főleg a fejlődő világban nem mindig kapcsolódnak kooperáló villamosenergia-rendszerhez. Ilyenkor telepítésük a fogyasztók közelében célszerű, hogy ne legyen szükség költséges kiszolgáló infrastruktúrára és nagy távolságú energiaszállításra. A kis vízerőművek kiépíthető kapacitását világviszonylatban 20–50 GW-ra becsülik. Kínában grandiózus programot hajtanak végre, a megépített törpe vízerőművek száma már 100 000-t is meghalad.

A világ gazdaságosan kiaknázzható hidropotenciáljának mintegy 30%-át hasznosítják a már megépített vízerőművek, ezek összesített kapacitása 700 GW (a termelt villamos energia ~2,5 PWh/év). A vízerőművek jelenleg a világ összesített erőmű-kapacitásának 22%-át teszik ki, de a vízjárás egyenetlensége miatt – a vízerőművekre jellemző szerényebb kihasználási tényezők következtében – a villamosenergia-szükségletnek csupán 17%-át fedezik. Ez a világ összenergia felhasználásának csak néhány százaléka, és e részesedésnek a tendenciája csökkenő.

A világ szárazföldi vízfolyásaira még telepíthető erőművi kapacitás lehetséges mértékét 4–5,5 TW-ra becsülik, evvel ~15 PWh/év (~54 EJ/év) termelhető, de a műszaki és gazdasági korlátokat figyelembe véve a ténylegesen megvalósítható érték ennek a fele. Ez az érték még a világ jelenlegi villamosenergia-szükségletének fedezésére sem lenne elég, és a szükséges erőműépítést legfeljebb 15–20 éven keresztül fedezné.

Magyarországon már a honfoglalás idején léteztek vízikerekek, a 19. század végén több tízezer vízimalom működött. A vízerőmű építés már a 19. században elindult (az első Csernahévízen létesült 1878-ban), de a Kárpátokban épült számos kis vízerőmű ma már nem esik magyar területre. Legöregebb erőművünk 1896 óta működik Ikervárnál a Rábán, a 19. és 20. század fordulója táján sok vízimalmot alakítottak át vízerőművé, és létesült két nagyobb (500 kW-os) erőmű is a Hernádon (Gibárt és Felsődobsza). A két világháború között több kis vízerőmű épült (pl. keleti és nyugati törpe vízerőművek),

⁷² Törpe vízerőmű: ≤ 100 kW; kis vízerőmű: 0,1–1 MW; közepes: 1–10 MW; nagy: 10 MW – 1 GW; óriási: ≥ 1 GW.

a legnagyobb Kesznyéten 4,4 MW-tal. A 24 telephelyen működő kis vízerőművek összesített teljesítménye 55 MW.

A hazai vízenergia potenciál kicsi, elméleti értékét 4,5 TWh/év-re becsülik, aminek reálisan legfeljebb a hatoda lenne hasznosítható, abból jelenleg mintegy 4% van kihasználva. A lehetséges teljesítmény 50%-os tartóssággal ~1 GW, amiből ~47 MW jut a kis vízfolyásokra, a potenciál 91%-a három folyóra (Duna, Tisza, Dráva) esik. A kis esésmagasság miatt a fajlagos beruházási költségek magasak, ezért versenyképesség csak komplex regionális vízhasznosítási programok (árvízvédelem, hajózás, öntözés, üdülési terület stb.) keretében valósulhat meg. Így épült meg a Tisza vízrendezése során a két legnagyobb teljesítményű vízerőművünk, Tiszalökön (1954, 12 MW) és Kiskörén (1973, 26 MW).

A Magyarországot érintő legnagyobb vízerőmű építési elképzelés a Gabčíkovo (Bős)–Nagymarosi vízrendszer (BNV) volt. A nagymarosi vízerőmű építésére az első ajánlatot svájci cégek tették az 1920-as években, majd létesítése a következő évtizedben is többször felmerült a komplex vízhasznosítási tervekben. 1935-ben a közlekedési és ipari miniszter (Bornemissza Géza) a Parlamentben javasolta Nagymarosnál gát és erőmű építését, az előkészítő munkálatokat a világháború elsodorta.

Az energetika sohasem játszott kezdeményező szerepet a bős–nagymarosi vízlépcsőrendszer létesítésében, mert megépítése kizárólag energetikai célból nem gazdaságos, csupán más célú komplex hasznosítás keretében támogatták. A közvélekedéssel ellentétben a létesítés nem energetikai, hanem folyószabályozási érdek, mivel a folyó vízszintje süllyed a medererózió következtében. Ezzel együtt csökken a talajvíz szintje, rontva a környezet növényzetének tápanyagellátását és csökkentve az ivóvízbázist, a folyómederből mindjobban kiemelkedő – nem erodálódó – sziklahátak pedig a hajózási feltételeket rontják. A problémák végleges megoldását jelentő duzzasztás előbb-utóbb elkerülhetetlen lesz. Nagy pazarlás lenne a más okból megépített gátaknál lemondani a szintkülönbség hasznosításáról villamos energia olcsó és környezetbarát termelésére.

A többféle változat közül kiválasztott terv szerint a Duna egy részét Dunakilitinél kellett volna egy üzemvízcsatornába vezetni a 720 MW-os bősi erőmű működtetésére. Az üzemvízcsatorna Ásványráronál tér vissza az eredeti Duna-mederbe, aminek visszaduzzasztása a 146 MW-os nagymarosi erőműre hárult volna. A kinyerhető teljesítmény némi csökkentése árán egyszerűbb és olcsóbb megoldás lehetett volna egy átfolyó vízerőmű a Duna magyar–szlovák határszakaszának medrében, valamint az alsó erőmű elhelyezése egy Nagymarosnál tájképileg kevésbé vonzó szakaszon. A cseh–magyar államközi szerződés aláírására – sok éves huzavona után – 1977-ben került sor. A költségek és a rendszerben termelt villamos energia fele-fele arányú megosztását tervezték a két ország között.

A rendszerváltást megelőző évben a környezetvédők ellenvetéseit felkarolta a politikai ellenzék, a vízerőmű elleni demonstrációk és publikációk a politikai elégedetlenség legfontosabb kifejezésévé váltak. A nemzeti emlékezetben a Nagymaros elleni tüntetések összemosódtak az 56-os forradalmi megmozdulásokkal, a vízerőművel kapcsolatos nézetek felülvizsgálatának ötlete szentségtöréssel ér fel. A Nagymarost ellenző érvek között megalapozatlan és értelmetlen vélemények is szerepeltek (idegen érdekeket szolgál,

szovjet gigantomania terméke, ökológiai szükségállapotot okoz, gazdaságilag tönkreteszi az országot stb.). A közhangulat lecsillapítása érdekében a magyar kormány elvetette a projekt megvalósítását. Az egyezmény felrúgása azonban 1989-ben, a szlovák szakasz 90%-os és a magyar szakasz 50–60%-os készütségénél ésszerűtlen lépés volt, ami sorozatosan hibás döntésekre és szerencsétlen országgyűlési határozatokra vezetett. Sajnos az ügy azóta is politikai szimbólum maradt, megkötve a döntéshozók kezét a racionális kibontakozás keresésében.

A legnagyobb hiba a gyakorlatilag elkészült dunakiliti duzzasztómű üzembe helyezésének tilalma volt. Ebben a magyar területen épült, magyar kezelésben és magyar irányítás alatt álló létesítményben történt volna a teljes rendszer szabályozása. Ennek az egész vízlépcsősorrendszer kulcsának tekinthető létesítménynek a feladatai közé tartozott a vízmegosztás irányítása a két ország között, a Szigetközben a talajvízszint szabályozása, valamint a bösi erőmű vízhozamának vezérlése (beleértve a sok vihart kiváltó csúcsrajáratás elkerülését) – vagyis mindazok az igények, amelyek teljesítésért a magyar kormányok két évtizede sikertelenül hadakoznak.

A magyar politikai vezetés az 1990-es évek elején feltételezte, hogy döntése a szlovák kormányt is a projekt feladására készíti, az ezzel ellentétes elképzeléseket „papírtigrisnek” minősítve. Ehelyett a szlovákok Dunacsúnynál, szlovák területen a dunakiliti duzzasztó helyettesítésére gátat építettek, és a Dunát elterelve teljes sikerrel üzembe helyezték a „nagy nemzeti mű”-nek tekintett bösi erőművet. A jogvita miatt többek között azóta is ingyen használják a Duna vízmennyiségének a magyar tulajdont képező felét is, amivel évente 50 MUSD-t érő villamos energiát termelnek. A hibás helyzetmegítélés sorozatosan rossz parlamenti döntéseket szült, a szerződés egyoldalú felmondását, a nemzetközi bíróság előtt a lehetőségek hibás megítélését, fenékküszöb építésének tilalmát, ami a duzzasztással a Szigetköz talajvíz-problémájának a megoldását célozta. (Az ehelyett drágán beszerzett, gázolajjal működtetett, zajos és környezetszennyező szivattyúkat végül szegényszemre le kellett szerelni, mert a felül átemelt víz alul visszafolyt a Dunába, mivel a közlekedőedények törvényét nem lehet parlamenti határozatokkal megerősöskölni.) Hiába mondják ki sorozatos határozatok a gátépítés tilalmát, arra előbb-utóbb rákényszerülünk. Csak azzal lehet ellensúlyozni a Duna vízszintjének folyamatos süllyedését, mert a folyó erodálja a medret, hogy pótolja a vízből hiányzó hordalékot. A folyó vízszintsüllyedése leszállítja a talajvíz szintjét a környezetben, csökkentve a növényzet tápanyagellátását és az ivóvízbázist. Lehet, hogy azok a környezetvédelmi mozgalmak fogják majd követelni a gátépítést, amelyek régebben a legjobban ellenezték azt?

A Duna menti államok által létrehozott Duna Bizottság egyezményben jelölte ki a folyó hajózhatósága érdekében szüksége vízlépcsők helyét (amit a magyar parlament ratifikált). Ezekből 42 gát megépült, a hiányzó 5-ből 3 (Nagymaros, Adony, Fajszt) a magyar szakaszra esik. A vízszintsüllyedés következtében a nem kopó sziklahátak egyre jobban kiemelkednek a mederfenékből, akadályozva a hajózást. Az év harmadában ez a szakasz korlátozza a hajózást a Dunán, és egyben ez a szűk keresztmetszet a Duna–Rajna–Majna nemzetközi vízi út kihasználásában. Ennek köszönhetően vált a pozsonyi kikötő a vízi és szárazföldi szállítást összekapcsoló csomóponttá, jelentős járulékos hasznot hajtva Szlovákiának.

A hibás döntések hatalmas kárt okoztak az országnak. Eltekintve a presztízvesztéstől és a szlovák–magyar viszony megterhelésétől, hatalmas összegek mentek pocsékba semmiért. A becslések szerint a károk összesítve megközelítik a 2 milliárd USD-t, ami évente 4–5%-kal nő. Magyarországra csak hátrányok származtak: egy feleslegessé vált duzzasztómű romjai, a pusztuló Szigetköz vízellátásának gondja, elmaradt árvízvédelmi töltések és szennyvíztisztító rendszerek, a villamosenergia-termelés elvesztése, a csepeli kikötő forgalmának összezsugorodása, a nagymarosi vízépítési munkák miatt keletkezett kártérítés Ausztriának stb. Ugyanakkor Szlovákia élvezte a rendszer minden előnyét: folyamatos villamosenergia-termelés, jelentős hajóforgalom, a pozsonyi kikötő forgalmának fellendülése, a talajvízszint-szabályozása. A műtárgyakkal megoldották a térség árvízvédelmét, kialakították a Csallóköz természeti egyensúlyát, rendezett nemzeti parkot hoztak létre, biztosítva a természetvédelmet, a sport és üdülési lehetőségeket stb.

A rendezetlen helyzet groteszk következményekkel is jár. A határfolyókó vízmennyiségének, és az abból fejlesztett villamos energiának a tulajdonjoga egyenlő mértékben oszlik meg a két ország között. Megállapodás híján a magyar hányadból Bősben fejlesztett villamos energia Szlovákia tulajdonában marad, és azt mi meg is vásároljuk, mivel villamosenergia-importunk egy része onnan származik. A nagymarosi erőmű létesítéséhez szükséges körgátat osztrákok építették meg, aminek ellenértékét 20 éven keresztül az ott termelt villamos energiával törlesztettük volna. Azután a körgátat le is kellett bontatni, duplájára növelve az adósságunkat, amit két évtizeden keresztül hőerőművekben termelt áram szállításával törlesztettünk – semmiért. Néhány éve helyezték üzembe Bécs egyik külvárosában a freudenau-i erőművet, amibe a nagymarosi erőmű számára legyártott turbinákat építették be, kedvezményes áron. Azok átvételének elmaradásáért jelentős kártérítést fizettünk, „hozzájárulva” egy a nagymarosihoz hasonló osztrák erőmű létesítéséhez.

A bős–nagymarosi vízlépcsőrendszerrel kapcsolatban évtizedekig tartó szenvedélyes társadalmi vita egyik oka a lehetséges következmények bizonytalansága, pl. mekkora vízhozam biztosítja az Öreg-Dunában az ökológiai egyensúlyt, milyen feltételeket kell biztosítani a Szigetköz talajvízháztartásának szabályozásához, mik a korlátai a bósi erőmű szabályozásának, vannak-e káros következményei a nagymarosi duzzasztásnak. A vitákat motiválták érzelmi kérdések is, megőrizhető-e a tájkép szépsége, a létesítés nem jelenti-e a rendszerváltás eszméjének feladását, mivel az 1980-as évek végén egybemosódott a mű és a politikai rendszer ellenzése. Mindez együttvéve a kérdést szinte megoldhatatlan politikai ügygé deformálta, háttérbe szorítva a reális szakmai elemzést. Ebből hatalmas külpolitikai, belpolitikai, gazdasági és ökológiai káraink származtak, viszont döntéseink semmiféle haszonnal nem jártak. Az eddig veszendőbe ment kiadásokból minden munkanélkülinek munkahelyet lehetett volna létrehozni Magyarországon.

A BNV-n túlmenően vannak lehetőségek néhány kisebb vízerőmű építésére a Dunán ~300 MW-nyi erőmű-kapacitással (adonyi, fajszi, mohácsi vízlépcsők), a Tiszán ~50 MW (csongrádi, dombrádi, vásárosnaményi vízlépcsők) valamint a Murán és a Dráván ~190 MW. Ezen lehetőségek kihasználása jelenleg a környezetvédők erős ellenzésébe ütközik.

II. RÉSZ

Energiaátalakítások

A természetből nyert primer energiahordozókat néha közvetlenül hasznosítják – például a földgázt, tűzifát, termálvizet –, többnyire azonban módosítják a felhasználók igényéhez alkalmazkodva. Egyszerűbb esetben csak előkészítő műveleteket alkalmaznak a könnyebb kezelhetőség, vagy szállíthatóság előmozdítására, pl. felesleges kísérőanyagok leválasztásával, vagy valamilyen tulajdonság szerinti osztályozással. A fizikai konzisztenciát, vagy/és kémiai összetételt módosító energiaátalakítások egy energiafajtából, vagy energiahordozóból más típusú energiafajta, vagy energiahordozót hoznak létre.

Az energiaátalakítás eszköztára nagyon sokrétű, a nagy átalakító művektől (erőművek, kőolajfinomítók, kokszolók stb.) a különféle erőgépek és berendezések sokaságán keresztül a közvetlen energiaátalakítás kis eszközeiig (pl. napelemek, hőelemek, kémiai áramforrások) terjed. A közvetlen energiaátalakítási eljárásnál az egyik energiafajtából a másik valamilyen fizikai vagy kémiai hatás segítségével közvetlenül állítható elő, a közvetettnél pedig egynél több átalakítási eljárással más típusú energiafajta közbeeső előállításán keresztül lehet a végcélhoz eljutni. Az utóbbira a legismertebb példát a hőerőművek szolgáltatják: a tüzelőanyagok kémiai energiájából az égés során hő fejlődik, azzal gőzt fejlesztenek, ami turbinában mechanikai munkát végez, és a megforgatott generátor az indukció révén fejleszti a villamos energiát. A *II.1. táblázat* bemutatja a közvetlen átalakítási lehetőségek fontosabb, a technika jelenlegi szintjén megvalósítható módjait. A fizikailag bizonyított átalakítási eljárások egy részének a gyakorlati alkalmazása műszaki vagy gazdasági okokból nem jöhet számításba, ez teremti meg a közvetett átalakítási eljárások létjogosultságát. A táblázat nem tartalmazza azokat a kis léptékű közvetlen átalakítási lehetőségeket, melyek csak laboratóriumi körülmények között demonstrálhatók. Nincs kizárva, hogy a műszaki fejlődés hatására ezek is jelentős szerephez jutnak, ami a múltban gyakran előfordult, említhető pl. a napelemek, a mikrohullámú sütők, vagy a tüzelőanyag-cellák kialakítása.

II.1. táblázat. Közvetlen átalakítási lehetőségek

	Kémiai energia	Hő	Mechanikai energia	Villamos energia	Sugárzás	Atomenergia
Kémiai energiából	endoterm reakciók tüzelőanyagok átalakítása hidrogén-fejlesztés metanol-gyártás	exoterm reakciók égés	izomerő hőkör-folyamat robbanás sugárhajtás	galvánelem akkumulátor tüzelőanyag-cella	lumineszcencia	fűtőelem-gyártás újrafeldolgozás
Hőből	endoterm reakciók	hőátzármatatás abszorpciós hűtőgép	hőerőgépek sugárhajtás	hőelem elektroncső plazma	infra-sugárzás fénykibocsátás	fúzió
Mechanikai energiából		sűrűlódás hőszivattyú kompresszoros hűtőgép	vízgépek pneumatikus eszközök	dinamó generátor mikrofon piezo-elektromos eszközök		részecskegyorsító
Villamos energiából	elektrolízis	ellenállás fűtés indukciós hevítés dielektromos melegítés ívfűtés Peltier-hatás	motorok	transzformátor egyenirányító váltóirányító tranzisztor	fényforrások röntgenkészülékek lézer antenna	
Sugárzásból	fotoszintézis	kollektorok	fotonhajtás	napelem		transzmutáció
Atomenergiából	magreakciók	fisszió fúzió		radioaktív áramforrás	ionizáló sugárzás	tenyésztés

6. Energiaátalakítások kémiai energiából

Mind az energiaforrások biztosításában, mind az energiafelhasználásban alapvető szerepet játszanak a kémiai reakciók, azokhoz mindig tartozik energiaváltozás is. Az endoterm reakciókhoz szükséges energiabefektetésnek sokféle módja van, pl. melegítés, besugárzás, nyomásnövelés. Nagyon sok technológiai folyamat alapul endoterm vegyi reakciókra (pl. pirolízis, disszociáció, frakcionálás, fotokémiai reakciók, elektrolízis stb.), endoterm folyamat a növények létrejöttét biztosító fotoszintézis, vagy a hidrogén leválasztását szolgáló vízbontás is. A reakciók bekövetkeztéhez megfelelő reakciófeltételek szükségesek, így az energifolyamatokat kedvezően befolyásoló állapotjellemzők (hőmérséklet, nyomás) vagy katalizátorok jelenléte. Gyakran energiaközlés szükséges a reakciófeltételek megteremtéséhez, vagy a folyamatok gyorsításához is. Az energia felszabadulásával járó exoterm reakciók sokfajta szerepet játszanak technológiai folyamatok energiamérlegében. Exoterm átalakulás az oxidáció is, ami a természetben leggyakrabban előforduló kémiai reakció. Az égésnek többféle megjelenési formája ismeretes, lassú, csendes oxidáció zajlik az élőlények szervezetében, vagy a fémek korróziója során, katalizátor serkenti a tüzelőanyag-cellák működését, a tüzelőberendezésekben a gyulladási hőmérséklet felett többnyire fény és hangjelenségekkel kísért folyamat a tüzelőanyagok éghető alkotóinak egyesülése oxigénnel, a belső égésű motorokban az oxidáció robbanás formájában zajlik le.

Az energiaátalakítások gyakori formája, amikor egy tüzelőanyagból más jellegű, a fogyasztók igényeihez illeszkedő szilárd, folyékony vagy gáznemű tüzelőanyagot állítanak elő. A kiinduló anyag lehet biomassza, szén, folyékony és gáznemű szénhidrogén, de endoterm reakciókkal más anyagokból is elő lehet állítani tüzelőanyagokat, pl. vízből hidrogént, vagy szintézisgázból metánt.

6.1. Biomasszából nyert energiahordozók

A biomassza hagyományos hasznosítása a közvetlen eltüzelés, korszerűbb felhasználásához készítenek komprimált készítményeket is. A tömörítéssel nyert brikett (50 mm-nél nagyobb méretű préselvények) és pellett (50 mm-nél kisebb préselvények) előállításához szigorú követelményeket (méret, nedvességtartalom, tisztaság) támasztanak a nyersanyaggal szemben. A biomassza energetikai szempontból legértékesebb eleme a tűzifa, alkalmazása hazánkban az utóbbi években az erőművekben is teret nyert. A biomassza-tüzelés égéstermékei között vannak ártalmas lég- és talajszennyezők is. A közvetlen eltüzelésnél több hasznot ígér korszerűbb tüzelőanyagok (biogáz, bioüzemanyagok) előállítása a biomasszából.

6.1.1. Faszén

A tüzelőanyag-átalakítások sorát a faszén előállítása nyitotta meg. Ez a fa száraz lepárlásából nyert porózus szerkezetű, kis térfogatsúlyú anyag majdnem teljes mértékben tiszta karbonból⁷³ áll. Fűtőértéke 29 MJ/kg, hamu- és kéntartalma kicsi. Eredetileg erdőgazdaságok boksáiban állították elő, később inkább retortákat használtak. 100 kg fából átlagosan 30–40 kg faszenet lehet nyerni, az átalakítás energetikai hatásfoka 55–60%. Használata az ókorba nyúlik vissza, a szén kokszolásának feltalálásáig a vas- és acélgártás alapvető tüzelő és redukáló anyaga volt, a szénből előállított kokszt teljesen kiszorította a kohászatból. Jelenleg csak kis mennyiségben használják a vegyiparban (adszorbensként, szűréshez, széndiszulfid előállításához, gyógyszerként) és tüzelőanyagként különleges igényű ételkészítéshez.

Energetikai szerepét végleg elvesztette, ennek ellenére időnként javasolják, hogy az erdőkben gazdag trópusi országokban térjenek rá a szélesebb körű alkalmazására. A koncepciót azzal támasztják alá, hogy a trópusi erdők bőven biztosítják a nyersanyagot, az alacsony foglalkoztatottság mellett rendelkezésre áll a kitermeléshez szükséges munkaerő, és e helyi energiaforrás kiaknázásával mérsékelni lehet az energiainportot, ami számos fejlődő ország fizetési mérlegében súlyos hiányt okoz. Az ilyen javaslatok jóindulatúak, de politikai hatásuk retrográd. Egy ilyen út rövid távra hasznos lehet, nagyobb távra azonban az elmaradottságot konzerválná, mert korszerű gazdasági szerkezetet nem lehet korszerű energiahordozók nélkül kialakítani.

6.1.2. Biogáz

A biogáz szerves anyagok lebomlásából keletkező gázelegy, nagyrészt metán és széndioxid keveréke, ezek aránya az alapanyagtól és a fermentációs eljárástól függ (6.1. táblázat). A metán aránya 45–70%, a fűtőérték is e szerint változik. Ezekon kívül a termék kisebb mennyiségben más gázokat (nitrogén, hidrogén, kénhidrogén, ammónia stb.) is tartalmazhat. Biogáz elvileg minden szerves anyagból előállítható, de gyakorlatilag csak a másképp nem hasznosíthatókból érdemes gázt fejleszteni. Biogáz nyerhető trágyából, mezőgazdasági és élelmiszer-ipari hulladékokból, lerakókban tárolt, sok szerves anyagot tartalmazó szemétből (depóniagáz), csatornaiszaphól (csatornagáz), továbbá más hasonló anyagokból. Járulékos előny a környezetvédelem, a lebontás során csökkennek a kórokozó csírák, a kellemetlen szagok, a visszamaradó lebontott anyag pedig kitűnő növényi tápanyag. Kína és India falvaiban sok millió biogázfejlesztő létesítmény működik. A magyar mezőgazdaságban az olcsó földgázzal a biogáz nem bizonyult versenyképesnek, de a földgáz drágulása megnövelte az érdeklődést. Számos mezőgazdasági és élelmiszer-ipari üzemben, szennyvíztisztítóban és hulladéklerakóban kezdték meg a biogáz

⁷³ A megkülönböztetés érdekében az elemet karbonnak, az ásványt szénnek fogjuk nevezni, de a vegyületekben megtartva a szén megnevezést.

hasznosítást, főleg helyi hőigények fedezésére. Vonzó lehetőség a kisebb településeken biogázra alapuló távfűtés kialakítása (falufűtés). Esetenként kapcsolt energiatermelés is számításba jöhet gázmotorok és mikrogázturbinák alkalmazásával. A biogáz kiinduló fázisa lehet más anyagok gyártásának is. Elvileg oxigénben történő elgázosítással szintézisgáz és abból szintetikus tüzelőanyagok, pl. metanol is előállíthatók (BTL⁷⁴). Tisztítás és az előírt fűtőérték beállítása után a földgázba is bekeverhető.

6.1. táblázat. Biogázok jellemzői

Nyersanyag	CH ₄ , %	CO ₂ , %	Fűtőérték, MJ/m ³
Települési hulladék	50	<50	15–18
Állati trágya	65	<35	20–23
Szennyvíziszap	70	<30	18–26

A trágyából nyert biogáz fűtőértéke szarvasmarhák és sertések esetében alacsonyabb, baromfiknál magasabb. Nagy állattartó telepeken a hígtrágyából is előállítható biogáz, az iszap melléktermék folyékony hányada trágyaként, nitrogénben gazdag száraz része talajjavításhoz használható. A sok szerves anyagot tartalmazó hulladékok (pl. háztartási szemét, szennyvíziszap, hígtrágya) zárt lerakóiban magától is kialakul 20–40 °C-on zajló anaerob bomlás. A fejlődő biogázt a nagyobb szemétkerakókban csőhálózattal gyűjtik össze (depóniagáz), mind gyakoribb a szennyvíztisztító telepeken az iszaptól fejlődő biogáz (csatornagáz) hasznosítása is. Míg a biogázfejlődés biogáz telepeken viszonylag gyors, a hulladéklerakókban kialakuló depóniagáz keletkezése lassú, többnyire évekbe telő folyamat. A depóniagáz jellege függ a szemét összetételétől, a lerakás és az üzemvitel módjától. A szemételepen 15–20 év alatt 1 t hulladékból 150–200 m³ depóniagáz fejlődik, aminek 40–50%-a metán, 30–40%-a szén-dioxid, 5–20%-a nitrogén, fűtőértéke 14–15 MJ/m³. A gáz elvezetésére a korszerű lerakók eleve alagsóvezéssel készülnek, és a lerakás befejezése után gázkutakat is kialakítanak. Mivel a városi szemétben nem található a mikroorganizmusok növekedéséhez szükséges nitrogén, azt szennyvízüledék, vagy kémiai tápanyag hozzákeverésével kell pótolni a biogáz fejlesztéséhez. A csatornaiszap 1 m³-éből átlagosan 10 m³ csatornagáz fejlődik, fűtőértéke magasabb, mint a depóniagázé, a nagyobb metántartalomnak megfelelően. A cellulózból kb. fele-fele arányban keletkezik szén-dioxid és metán.

6.2. táblázat. Szilárd anyagra vetített biogázhozam

Szerves anyag	Gázhozam, m ³ /t	Szerves anyag	Gázhozam, m ³ /t
Sertétrágya	340–550	Fű	280–550
Szarvasmarhatrágya	90–310	Nád	170
Baromfitrágya	310–620	Lóhere	430–490

⁷⁴ Biogas to liquid.

Szerves anyag	Gázhozam, m ³ /t	Szerves anyag	Gázhozam, m ³ /t
Lótrágya	200–300	Zöldségmaradvány	330–360
Birkatrágya	90–310	Burgonyaszár	280–490
Istállótrágya	175–280	Cukorrépaevél	400–500
Búzaszalma	200–300	Napraforgóevél	300
Kukoricaszár	380–460	Mezőgazd. hulladék	310–430
Repceszalma	200	Növényi magvak	620
Rizsszalma	170–280	Lomb	210–290
Len	360	Algák	420–500
Kender	360	Csatornaiszap	310–740

Forrás: Büki, 2010.

Biogáz előállítására többféle eljárás lehetséges, leginkább a levegőtől elzárt baktériumos erjesztés használatos nedves és meleg környezetben. Az anaerob fermentációban több ezer mikroorganizmus-fajta – többségükben élesztőbaktériumok – vesz részt, ezek a szerves anyagot előbb cukrokra bontják, majd abból alkoholokat állítanak elő, amikből fejlődik a biogáz, és inert szilárd anyag marad vissza. A mérsékelt égövön a fermentáláshoz a baktériumok optimális életfeltételeit fűtéssel kell biztosítani, a pszichofil baktériumtörzsek <25 °C-ot, a mezofilok 20–45 °C-ot és a termofilek 40–70 °C-ot igényelnek.

A mezőgazdasági üzemekben szakaszosan üzemelő rendszert is használnak, amiben először levegővel erjesztik a biomasszát. Amikor az aerob fermentáció 80 °C körüli hőmérsékletet ér el, anaerob fermentációs szakasz következik. E levegőtől elzárt erjesztés 30–35 °C-os hőmérsékleten optimális, ilyenkor a tartályt fűteni kell, ami a fejlődő gáznak mintegy 20%-át emésztí fel. A fermentálás etanolgyártás kiinduló fázisa is lehet, főleg nagy cellulóztartalmú anyagokból.

A biomassza feldolgozásának másik lehetősége a termikus elgázosítás alacsony fűtőértékű gáz fejlesztésére, amihez a szénelgázosításhoz hasonló technológiák jöhetnek számításba. A termék CO, H₂, CH₄, N₂, CO₂ keveréke, az arányok az alkalmazott nyomástól és hőmérséklettől függenek. Az elgázosítás történhet autoterm eljárással, aminél a hőt az anyag egy részének égése biztosítja levegővel. Nagyobb fűtőértéket eredményez az alloterm módszer, aminél a hőt külső forrás szolgáltatja és az elgázosítás gőz bevezetésével, de a levegő kizárásával történik.

Fejlesztés alatt áll a biomassza pirolízise is, a szárazanyag oxigénszegény környezetben lejátszódó pirolízise éghető gázokat és olajszerű termékeket eredményez. Az alacsonyabb hőmérsékleten (300–500 °C) folytatott pirolízis környezetszennyezése kisebb, a magasabb hőmérsékleten (800–900 °C) végzett több értékes mellékterméket szolgáltat. A lepárlás 1 t városi szemétből 450 m³ metánban dús gázt, 110–150 l folyadékot (olajok, aldehidek, metanol, fenol, víz) és faszénhez hasonló, többféle szilárd anyagot tartalmazó maradékot eredményez. A hulladék térfogata 75–80%-kal, súlya 85–90%-kal csökken, szemben az égetés 40–50%-nyi salakjával. A néhány ezer t szemetet feldolgozó kísérleti üzemek kedvezőbb üzemeltetési költséget ígérnek, mint a hagyományos személtelhelyezésé.

6.1.3. Bioüzemanyagok

Az ásványi üzemanyagokkal kapcsolatos nehézségek oldásának egyik útját sokan a biomasszából előállított üzemanyagoktól remélik. Szerves anyagokból alkoholok (etanol, metanol) állíthatók elő, olajos magvak olajából gázolajhoz hasonló anyag (biodízel) nyerhető. E megújuló energiafajtának minősülő üzemanyagok alkalmazása csökkenti a kőolajfelhasználást és az importfüggést, szén-dioxid égéstermékük nem befolyásolja a légkör üvegházgáz mérlegét, mert azt korábban a fotoszintézis során a levegőből vonták ki (a megközelítés feltétele, hogy a növényzet pótlódik). Ezért tűzte ki célul az Európai Unió, hogy 2020-ra a bioüzemanyagok aránya a forgalmazott üzemanyagokban nőjön legalább 10%-ra. A bioüzemanyagok általában több üvegházgázt és kevesebb savas légszennyezőt bocsátanak ki, mint az ásványi üzemanyagok.

A bioüzemanyagok gyártása gyorsan népszerűvé vált. Az etanol (etilalkohol, spiritusz, C_2H_5OH) alkalmazásában Brazília járt az élen, nagy léptékű etanol programot (Proalcool) valósítottak meg cukornád és manióka fermentálásának bázisán, az így előállított üzemanyag már az ország gépjárműforgalmának a harmadát fedezi. Gyorsan nő az etanol-forgalom az Egyesült Államokban, Skandináviában, és néhány más országban is, Nyugat-Európában inkább a biodízel termelését támogatják. Jelenleg a világ bioüzemanyag termelése néhány Gtoe, amihez mintegy 15 Mha-on (a megművelt terület ~1%-a) termelnek nyersanyagot a gyártáshoz. A becslések szerint a világ bioüzemanyag termelésének energiaértéke akár 400–500 EJ-t is elérhetne, ha erre fordítanák a szárazföldek felületének 8%-át, ami azonban már erősen korlátozná az élelmiszer-termelést. A magyar kormányzati szervek a biomasszában rejlő jelentős energiapotenciál kiaknázásának legcélszerűbb módját az üzemanyaggyártásban látják.

A bioüzemanyagok termelésének gyors fellendülése együtt járt az ellenzés felerősödésével is. A világszerte kialakult éles viták hazánkat sem kerültk el. Az érdekek és nézetek ellentéte főleg a körül forog, hogy a föld termőerejét élelmiszer vagy üzemanyag termelésére fordítsák. Az agrárpolitikusok többsége lelkesen felkarolta a bioüzemanyagok termelésének gondolatát. Az nemcsak az energetika és klímaváltozás problémáinak megoldásához járulhat hozzá, hanem az agrárium gondjainak enyhítéséhez is. Az üzemanyag-nak biztos piaca van, munkahelyeket teremt a falusi munkanélküliek számára, lehetővé teszi a nem hasznosított területek termelésbe vonását stb. A versenyképesség előmozdításához jelentős preferenciákat sikerült kilobbizni, így a kedvezményes jövedéki adót.

Az agrárértelmiség inkább az élelmiszer-termelést pártolja, a magyar termőföld és időjárás erre nemzetközi összehasonlításban is előnyös, a jó minőségű magyar élelmiszere mindig lesz kereslet, és nemcsak az olaj, de az élelmiszer is stratégiai termék. Véleményük szerint politikai hiba az élelmiszer-termelés szűkítése, amikor az emberiség ötöde éheznek.

A bioüzemanyag-termelés elleni fellépés világszerte felerősödött. Arra hivatkoznak, hogy az üzemanyag-termelés máris szűkítette a világon az élelmiszer-kínálatot és az élelmiszerek áremelkedését idézte elő. Rámutatnak ennek társadalmi és politikai veszélyeire, már Európában is fordultak elő éhséglázadások, és a fejlemények beláthatatlanok.

Sok koncepciót tettek közzé Magyarországon bioetanol és biodízelgyártó üzemek létesítésére, de a kusza helyzet miatt ezekből alig valami realizálódott. A megítélést nem-

csak az eltérő felfogások nehezítik, hanem a gazdasági bizonytalanságok is. A kiinduló anyagok rendelkezésre állása függ a terméshozamtól és a más irányú kereslettől, áruk is széles határok között ingadozik, amit befolyásol az időjárástól függő terméshozam, a piaci kereslet, a világpiacon az ár.

Az ellenérvek között az is megjelent, hogy a teljes vertikum figyelembevételével a bioüzemanyagok előállításának teljes energiaráfordítása meghaladhatja az üzemanyagok fűtőértékét. Ez a negatív energiamérleg különösen a mérsékelt égövön következhet be, ami a hazai megítélést is befolyásolja. Nekünk azt is mérlegelni kell, hogyan alakul a GMO-tilalommal sújtott mezőgazdaságunk versenyképessége, amikor kialakul a bioüzemanyagok világpiacon. A trópusi és szubtrópusi térség országaiban cukornád és pálmaolaj a kiinduló anyagok, ezek terméshozama többszöröse, ráfordítása pedig törtrésze a mi klímaövezetünkben a gabonára és olajos magvakra alapuló termelésnek. Azonos termőterület figyelembevételével cukornádból kétszer annyi etanol állítható elő, mint kukoricából, pálmaolajból pedig háromszor annyi biodízel, mint repceből. Az arányoknak csak némi javulása remélhető az agrártechnika fejlődésétől (fajtanemesítés, terméshozam-növelés, földhasználat racionalizálása).

A viták oldása csak a fejlesztés alatt álló másodlagos eljárások (hidrolízis enzimekkel, fás cellulóz elgázosítása) sikerétől várható. Ezek a termékfeldolgozása helyett a hulladékokra alapozzák a gyártást, megteremtve az élelmiszer- és az üzemanyag-termelés összhangját. Az EU is lazított korábbi álláspontján, és a haszonnövények termésének feldolgozása helyett a hulladékokból előállított bioüzemanyagokat preferálja.

Az etanol előállításának legegyszerűbb módja növényi eredetű szénhidrátok levegőtől elzárt erjesztése. Az aprított alapanyag rostjait, sejtfalait főzéssel szétrombolják, majd savas, vagy enzimes hidrolízissel a hosszú szénhidrátláncokat feldarabolják és glukózzá alakítják. Az ezt élesztő bekeverésével követő erjesztés során jön létre az alkohol, sok vizet és szilárd maradványanyagot is tartalmazó cefrében felszívódva. Abból a végterméket többfokozatú desztillációval nyerik ki. Az anaerob erjesztésben több ezer mikroorganizmus fajta – leginkább élesztőbaktériumok – vesz részt, ezek állítják elő a biomasszából a cukrot, majd abból az alkoholt. A 6.3. táblázat egyrészt 1 liter etanol előállításához szükséges termékmennyiséget, másrészt egy közepes nagyságú gépkocsi éves üzemanyag-szükségletét fedező terület méretét mutatja be.

6.3. táblázat. Etanol előállításának jellemzői

Növény	Szükséges termés, kg/l	Területigény, ha/gépkocsi, év
Cukornád	14,3	0,49
Manióka	5,5	1,43
Cukorköles	12,6	0,38
Rizs	3	2,5
Kukorica	3	2,5
Kalászosok	3	2,5
Burgonya	9	1,29
Cukorrépa	11,8	0,53

Etanol előállítására különféle növényi anyagok jöhetnek számításba, a cukornövények (cukorrépa, cukornád, takarmányrépa, cirok), a magas keményítőtartalmúak (kukorica, kalászosok, burgonya, csicsóka), a lignocellulózok (fa, szalma, kukoricaszár), különféle ipari hulladékok (melasz, tejsavó, fűrészpor), még bor lepárlása, sőt állati hulladékok feldolgozása is lehetséges. A hazai körülmények között különféle növényekből erjesztéssel kinyerhető etilalkohol-mennyiséget mutatja a 6.4. táblázat.

6.4. táblázat. Etilalkohol-kihozatal átlagos értékei

Növény	l/ha
Cukorrépa	3248
Csicsóka	4230
Cirok	3200
Kukorica	2115
Burgonya	1861
Búza	1767
Zab	927
Rozs	900

A hazai elképzelések leginkább kukoricára alapozzák az etanol gyártását, 1 t kukoricából átlagosan 300 l bioetanol nyerhető. Nem világos azonban az árualap stabilitása, hogyan egyeztethető össze a nyersanyagtermelés az üzemanyaggyártáshoz az élelmiszer- és a takarmányigénnyel. A bő termésű évben örömet okozott, hogy az EU intervenciók alapjába megvásárolta a termésfelesleget, de már a következő, gyenge évben az állattartók annak visszavásárlását követelték az állatok etetéséhez. Mindezt erősen befolyásolták a piaci árak. Bonyolítja a helyzetet, hogy a kiinduló anyagot képviselő növények terméshozama egyrészt helyfüggő, másrészt befolyásolja az időjárás és a művelési mód. Vitatott kérdés a hazai etanolgyártás energiamérlege is, figyelembe véve a nyersanyag termelésébe fektetett energiát (munkagépek üzemanyaga, műtrágya és növényvédő szerek energiatartalma, szállítás stb.), valamint a kémiai technológia energiaszükségletét. Kedvezőtlen adottságok esetében a befektetett energia meg is haladhatja az etanol energiatartalmát. A környezeti hatások sem mellékesek, egyrészt a monokulturális termelés csökkenti a biodiverzitást, másrészt az intenzív termelési módszerek (vegyszerezés, öntözés) rontják a talaj termőképességét.

Etanol-benzin keveréket sok országban forgalmaznak. Kezdetben főleg 10% etanolt tartalmazó E10 jelű keveréket, később megjelentek a tisztán etanollal, vagy a 85% etanoltartalmú keverékekkel (E85) működő járművek, melyek szükség esetén tiszta benzint üzemre váltanak át. A második világháború idején Magyarországon 25% alkoholtartalmú keverék motalkó néven volt kapható. Etanol kizárólagos használatához módosítani kell a motorkonstrukciót, mivel nagyobb kompresszió-viszonyra van szükség. Az üzemanyag-adagolás kisebb módosításával benzinhoz 20%-os arányban, gázolajhoz 50%-os arányban hozzákeverhető az etanol, kísérleteznek biodízel és etanol keverékek alkalmazásával is.

Gondot okoz, hogy az etanol tárolás közben a környezetből vizet vesz fel, és a vízzel oldatot alkot, a benzín-alkohol keverék víz jelenlétében fajsúly szerint rétegződik (fázis

szeperáció). Az etanolnak korrozív hatása is van, gőznyomása is magas, nyáron erősen párolog. A nem mindenben kedvező üzemi tapasztalatok miatt a figyelem a továbbfeldolgozás felé fordult, főleg ETBE⁷⁵ előállítására etanol és izobután keverékből. A MOL 4,4% ETBE bekeverésével helyettesíti az oktánszámjavító MTBE⁷⁶ adalékot a benzinben. Enzimes eljárásokkal etilbutanol is előállítható, aminek a tulajdonságai közel azonosak a benzinével, de ezt magasabb árral kell megfizetni.

Erőteljesen fejlesztik a második generációs etanolgyártási eljárásokat, melyekkel cellulózból, illetve hemicellulózból állítanak elő etanolt enzimekkel, vagy elgázosítást követő szintézissel. Ez egyrészt a teljes növény feldolgozását teszi lehetővé, mintegy négyszeresre növelve a kihozatalt, másrészt csökkenti a fajlagos területigényt. Valószínűleg a második generációs eljárások fogják megteremteni a bioüzemanyagok gyártásának valódi lehetőségét. Kutatások folynak géntechnológiai eljárások kifejlesztésére is, ez a harmadik generációs megoldás a távolabbi jövő lehetősége (de ezt Magyarországon sajnos törvény tiltja).

A bioüzemanyagok másik csoportja, a biodízel a gázolaj pótlására szolgál. A dízelmotor feltalálójának, Rudolf Dieselnek is szándéka volt mogyoróolajat használni üzemanyagként, de az elképzelés nem vált be. Jó néhány évtizedet kellett várni a bioüzemanyag megjelenésére. Alapanyaga lehet növényi olaj, állati zsiradék és más anyagok, pl. használt sütőolaj. A mérsékelt égövön elsősorban olajos növények – repce és napraforgó – magvaiból lehet motorhajtó olajokat sajtolni, melegebb éghajlaton palmaolaj a legkedveltebb alapanyag. A növényi olaj nyers formában nagy viszkozitása miatt csak igénytelenebb gépek (hajók, egyszerűbb mezőgazdasági gépek) hajtására, vagy tüzelőolaj helyettesítésére használható. A viszkozitás és a kokszolódásra való hajlam csökkentésére a magvakból kisajtolt olajat tovább feldolgozzák, hogy korszerű dízelmotorokban is alkalmazható legyen. A repceolajt lúgos közegben katalizátoros átészterezéssel metanollal reagáltatva nyerik a repceolaj-metilésztert (RME). Ez a biodízel hasonló a gázolajhoz, azzal jól keverhető, a keverék mintegy 5%-os arányig a meglévő motorkonstrukciókban is alkalmazható, de a biodízel önálló alkalmazásához módosítani kell a konstrukciót, elsősorban a nagyobb viszkozitás ellensúlyozására. (A MOL 4,4%-ot adalékol a gázolajhoz.) Az olajpréselés során jelentős mennyiségű olajpogácsa keletkezik, amely értékes fehérjedús takarmány, de energetikai célra is felhasználható. Az észterezés mellékterméke a glicerin, amely vegyipari, vagy energetikai (biogázfejlesztés) célra hasznosítható.

A biodízel fűtőértéke némileg elmarad a dízelolajétól, dermedéspontja magasabb, egyes szerves anyagok oldására hajlamos, és vannak problémák a stabilitásával kapcsolatban is. A fény és a levegő az észtereket gyorsan öregíti, ami kokszképződésre vezet, a lerakódások problémákat okoznak az üzemeltetésben és a raktározás alatt. A biodízel hajlamos víz abszorbeálására, ami előmozdíthatja a szerves anyag bomlását okozó mikrobiológiai környezet kialakulását. Az égéstermékekben viszonylag nagyobb az aldehidek, többgyűrűs aromások és az NO_x aránya, de kevesebb a CO-, aeroszol- és hidroxidkibocsátás. A kipufogógáz irritáló szaga adalékokkal ellensúlyozható.

⁷⁵ Etil-tercier-butil-éter.

⁷⁶ Metil-tercier-butil-éter.

Magyarországon a biodízelt leginkább repceből, esetleg napraforgóból állítják elő. Újabban hidrogénezéssel javítják a tulajdonságokat. Átlagosan 1 t repceből 450 l biodízelt állítható elő. Évente 1 ha területen 2,5–3 t repcemag termelhető, annak olajtartalma ~40%, amiből 30–35% (~1 t) metilészter állítható elő. A repce nedves és hűvös körülményeket kedvelő növény, aminek a hazai klíma kevésbé felel meg, ezért a magyar termés-átlag (1,5 t/ha) mintegy fele a Nyugat-Európainak. A hazai termesztésnél az is gond, hogy a repcét 4–6 éves vetésforgóval célszerű termesztetni. A hazai feltételek mellett sajtolással, illetve oldószeres kivonással kinyerhető olajmennyiség a 6.5. táblázatban látható.

6.5. táblázat. Növényolaj kihozatal fajlagos értékei

Növény	kg/ha
Napraforgó	740
Repce	696
Szója	856

A biodízelt használatának legfőbb gondja, hogy önköltsége magasabb a gázolajánál, csak állami támogatással versenyképes. Ezért gyártása nem annyira energetikai, mint inkább agrárpolitikai kérdés.

A biomassa hasznosítására folynak kutatások hidrogenizációs eljárásokkal is. A vizes zagy formájában retortába táplált biomasszához 100–200 bar nyomáson, 240–380 °C hőmérsékleten szén-monoxidot és vízgőzt, valamint 5%-os arányban alkáli katalizátort (pl. NaCO₃) adagolnak. A reakció fő terméke 1 t száraz biomasszából 300 l nehéz paraffinos olaj, jelentős oxigén- és nitrogéntartalommal, de kevés kénnel.

6.2. Energiahordozók szénből

A vegyipar korszerű módszereivel szénből nagyon sokféle szerves anyag állítható elő, a lehetőségeket csak a költségek korlátozzák. A 6.6. táblázat néhány tüzelőanyag jellemző értékeit foglalja össze, amiből lesűrhető az átalakítások elvi útja: a szén kolloid szerkezetének molekuláit kisebbekre kell törni, majd hidrogén hozzáadásával kialakítható a kívánt karbon/hidrogén arány. Megjegyzendő, hogy kőolajból az út sokkal könnyebb, és ezért olcsóbb is, földgázból pedig nem is kell tördelni, inkább molekulák felépítése a feladat.

6.6. táblázat. Néhány tüzelőanyag jellemzői

Anyag	Átlagos molekulásúly	C/H arány
Metán	16	3
Földgáz	20	3–4
Propán-bután	58	4–5
Benzin	100	5–6
Fűtőolaj	200	6–7

Anyag	Átlagos molekulásúly	C/H arány
Kőolaj	400	7–8
Lepárlási maradék	600	8–10
Lignit	5000	12–15
Barnaszén	5000	15–17
Feketeszén	5000	25–30

6.2.1. Kokszyártás

A legfontosabb iparilag előállított szilárd tüzelőanyag a kocsz. A világon kibányászott szén 15–20%-ából állítanak elő kocszot. Kocszot minden szénből elő lehet állítani, de a kereskedelmi forgalomban csak meghatározott feltételeknek eleget tevő termékeket minősítenek kocsznak. A legjobb minőségű kocszot a nagy sülőképességű kocszszénből, vagy gázszénből lehet előállítani. A kovácszszen megolvadt, zsugorodott, néha felfúvódott puha kocszot szolgáltat. A gázlángszénből nagyon puha, a lángszénből gyengén zsugorodott porszerű kocsz nyerhető, a barnaszének porlásra hajlamos, higroszkópos félkocszot (svélkocsz) szolgáltatnak. Kocsznak tekinthető a kőolajfrakciókból előállított petrolkocsz, valamint a fából előállított faszén is.

A kocszgyártáshoz a szenet levegő kizárásával külső fűtésű berendezésekben – kezdetben öntöttvas retortákban, később keramikus anyagból készült kamrakemencékben – magas hőmérsékletre hevítve lepárolják. E száraz desztillálásban összetett fizikai és kémiai folyamatok játszódnak le. A 14–24 óráig tartó lepárlás során fokozatosan növelik a hőmérsékletet 1200–1300 °C-ig, miközben mind magasabb forrponú anyagok lépnek ki gáz alakban, a szén pedig fizikai és kémiai átalakulásokon megy keresztül. A szén eredeti kolloid szerkezete koagulál, a lepárlás végtermékeként összeolvadt, tömör szerkezetű kocsz jön létre. A kocszon kívül gáz (kamragáz), kátrány és gázvíz keletkezik, a gáz tüzelőanyagként hasznosítható, a kátrány régebben a szerves vegyipar egyik legfontosabb alapanyaga volt, a gázvíz inkább kellemetlen melléktermék, bár ebből is nyerhető hasznosítható vegyipari anyagok. Az előállítható kocsz anyagi összetétele, struktúrája, mechanikai szilárdsága, fűtőértéke erősen függ a lepárolt szén minőségétől és a lepárlás módjától. Általában annál jobb a kocsz, minél sülőképesebb a szén, amit kísérleti úton meghatározott egyezményes mérőszámokkal (pl. Roga-szám) jellemeznek. A kocszkihozatal – a szén minőségétől és a lepárlás módjától függően – a feldolgozott szénnek 50–70%-a, a lepárlás eredő energetikai hatásfoka 85–90%. A szénszerkezet megbontása során kiszabadul sokféle vegyület a fejlődő kamragázban, valamint gázvízben távozik. Ezek között számos alkotó káros a környezetre és az emberi egészségre, néhány erősen toxikus. A veszélyes anyagok kikerülését szigorú előírások tiltják, de ez nem jelent teljes védelmet a kocszolóknak dolgozóinak.

A feldolgozott szén minőségétől és a lepárlás módjától függően többféle kocszfajtát különböztetnek meg. Elsősorban a vaskohászat szükségletei a meghatározók, a világ kocsztermelésének legnagyobb részét a nyersvas gyártásához használják fel. Az erre szolgáló kohókocszot jól sülő, nagy bitumentartalmú feketeszénből állítják

elő. A nagyolvasztókban egyrészt a kokszt égése biztosítja a vasérc megolvasztásához szükséges hőt, másrészt a karbon és a fejlődő szén-monoxid redukálja a vas-oxidot. Ugyanakkor az olvadt vas karbont vesz fel az izzó kokszból. A kohókoksznak sokirányú követelményrendszert kell kielégíteni. A metallurgiai folyamatokhoz szükséges hőmérséklethez magas fűtőértékkel (>30 MJ/kg) kell rendelkeznie. Nagy mechanikai szilárdság szükséges ($>0,8$ N/cm²), nehogy összeroppanjon a magas nagyolvasztókban ránehezülő nagy súly alatt. A nyersvas jó minősége megfelelő kémiai összetételt igényel (1%-nál kisebb kén tartalom, maximálisan 8–10% hamutartalom, kis foszfor- és illótartalom). Fontos követelmény a jó gázáteresztő képesség, hogy a nagyolvasztóban levő anyagoszlopban az égéstermékek zavartalanul tudjanak felfele áramlani.

A kokszolóműveket többnyire a nagyolvasztók mellé telepítik, mert a szén sokkal jobban tűri a szállítással járó igénybevételeket, mint a kokszt, aminek a minőségét a szállítás és átrakás rontja. Ugyanezért a kokszt külkereskedelme kicsi, inkább a kokszolható szenet importálják és szállítják nagyobb távolságra. A hazai kohókokszt szükségletet is importszénből biztosítják. A kohászat fejlesztésének egyik fő iránya a fajlagos kocszfelhasználás csökkentése, amiben jelentős eredményeket sikerült elérni. Ennek egyik lehetősége a kocszt egy részének helyettesítése a magas hőmérsékleten redukáló hatású karbonra és hidrogénre bomló földgáz, vagy fűtőolaj befűvésével. Ez a minőséget és a fajlagos kihozatalt is javítja. Terjednek a kocszt nélküli, direkt vasérc-redukációs eljárások is, pl. hidrogénatmoszférában. Mindez a világ kohókocszt szükségletének fokozatos csökkenését eredményezi.

Valamivel enyhébbek a követelmények az öntödei kocszt iránt, mivel az főleg hőfejlesztést szolgál, a kúpoló kemencékben kémiai reakciók csak kismértékben zajlanak. Nagy kémiai tisztaságot kívánnak meg, hasonló mechanikai szilárdságra van szükség, mint a kohókocsztnál, és a megolvadt vas útjának biztosítása porózus szerkezetet igényel. Régebben előállítottak jóval kisebb követelményeket kielégítő kocsztokat is, alacsonyabb fűtőértékkel (~ 25 MJ/kg) ipari és háztartási tüzelőanyagként, illetve generátorgázgyártáshoz, ezeket azonban a korszerűbb tüzelőanyagok kiszorították a használatból.

Bitumendús barnaszénre dolgozták ki az alacsony hőmérsékletű kocsztolás (svélezés) technológiáját. E kíméletes, 550–600 °C véghőmérsékletig végzett lepárlással elejét lehet venni a bitumenitek túlságos lebomlásának. Az eljárás eredetileg minél több kátrány kinyerését célozta, a II. világháborúban a mübenzin gyártásának ez volt az alapanyaga. A főleg tüzelésre vagy elgázosításra használható svélkocszt (félkocszt) fűtőértéke 25 MJ/kg, a svélgáz fűtőértéke pedig 8–12 MJ/m³. A petrolkémia térhódítása kiküszöbölte a svélezést.

Régebben nagy volt a jelentősége a lángkőszenek és zsirkőszenek magas hőmérsékletű lepárlásával városi gázt szolgáltató kocsztolásnak. A gázgyárak mellékterméke gyenge minőségű, alacsonyabb fűtőértékű gázkocszt volt, amit ipari és háztartási tüzelőanyagként hasznosítottak, de a gázgyártás leépülése nyomán alkalmazása visszaszorult. A gázgyártás hulladékának elhelyezése néha még utólag is probléma.

Mivel a kocsztolható szenek drágák és ritkák, törekvés a kocsztgyártás nyersanyagbázisának bővítése. Előzetes tömörítéssel a gyengébben sülő szenek is felhasználhatók, e formakocszt használata különösen jól bevált öntödei célokra és füstmentes háztartási

tüzelőanyagként. Gyengén sülő szenekből gyártott porkokszból készített brikettből állítják elő újabb kokszolással a brikettkokszot. A kőolajleparlásból nyert petrolkokszot (H–C koksz) főleg kohászati, valamint vegyipari célokra és elektródagyártáshoz használják, gyengébb minőségű hányada tüzelőanyag, vagy adalékanyagokkal elfogadható nyersanyag kokszoláshoz.

6.2.2. Brikettálás

A brikettálás nehezen elégethető termékek eltüzelését teszi lehetővé darabos tüzelőanyagot igénylő berendezésekben. A brikettet aprószemű, vagy porállapotú szénből vagy kokszból készítik. Ez történhet lágy szeneknél 250–400 bar nyomáson kötőanyag nélkül, kemény szeneknél pedig kisebb nyomáson kötőanyaggal. A kötőanyag leginkább bitumen, kátrányszurok, fűtőolaj vagy pakura, ezek égése erősen kormozó. A termék fűtőértéke 20 MJ/kg, az átalakítási határfok valamivel meghaladja a 96%-ot. Az egyenletes darabnagyság kedvező a gyulladáshoz és a stabil égéshez. Főleg kisfogyasztók számára előnyös tüzelőanyag, a földgázhasználat nagyrészt kiszorította a piacról.

6.2.3. Cseppfolyósítás

Folyékony halmazállapotú szénhidrogén-molekulákat szénből is elő lehet állítani, ha megfelelő hőmérsékleten és nyomáson, katalizátorok és reagensek segítségével kötéseket hoznak létre a karbon- és hidrogénatomok között. A szén-cseppfolyósítási eljárásokat a két világháború között fejlesztették ki az elegendő saját kőolajjal nem rendelkező országokban. Több eljárást dolgoztak ki, melyek katalizátorokkal, szélsőséges hőmérséklet és nyomásviszonyok között, megfelelő reagensekkel kényszerítik ki a karbon- és hidrogénatomok összekapcsolódását. Németország és Japán a II. világháború időszakában nagy mennyiségű benzint gyártott szénből, így oldotta meg üzemanyag-ellátását a Dél-afrikai Köztársaság is azokban az évtizedekben, amikor olajembargó alatt állt az apartheid miatt.

Az egyik alapvető eljárás a szén pirolízisére alapul (Bergius-eljárás). Először hőközléssel a szénleparláshoz hasonló folyamatban szétbontják a szénmolekulákat, majd több lépésben nagy nyomás alatt hidrogén hozzákapcsolásával alakítják ki a nyersolaj vegyületeihez hasonló molekulaszervezetet. A szenet rendszerint nehézolajban pépszerű zagy formájában, vagy folyadékban szuszpendálva táplálják be. Sokféleképp alakítható a reakciótér (retorta, fluidágy, forgókemence), a hőközlés módja, a reagensek keverése, különbségek vannak a katalizátorok anyagában és a paraméterek megválasztásában is. A reakciók az első fázisban 200–300 bar nyomáson, 400–480 °C hőmérsékleten zajlanak le, hidrogénadagolással katalizátorok segítségével, az eljárás 200–325 °C forrponútú közép-olaj mellett gázt és szilárd maradékot (koksz, vagy kátrány) is szolgáltat. A második fázisban ugyancsak katalitikus reakcióval gőzfázisú hidrogénezés, majd krakkolás következik, a kinyerhető szénhidrogének főleg gyűrűs szerkezetűek, az előállítható benzin oktánszáma alacsony. Az eljárással a második világháborúban Németországban számos

üzem több millió t üzemanyagot állított elő. A világháború után a kialakított nagyüzemi termelést gazdaságtalansága miatt leállították.

A pirolízises technológiát több irányban fejlesztették tovább, elsősorban a szerény olajkihozatal növelésére. A keletkező gáz és folyadék arányát a hőmérséklet változtatásával, illetve a tartózkodási idővel lehet befolyásolni a reakcióterben, a gáz összetétele a legerősebben a nyomás mértékére reagál. A pontos körülmények és különösen a katalizátorok összetétele többnyire üzemi titok.

A Bergius-eljárás továbbfejlesztése a hidrofrakcionálás is, a hidrogént a cseppfolyósító reaktorba gázalakban, vagy hidrogént leadó oldószerben táplálják be. A hidrogénezés többnyire fluidágyban katalizátorral történik, 25–70 bar nyomással és 400–450 °C-on. Az oldószeres finomítós eljárásnál az aromatikus oldószerbe adagolt szénport közepes nyomású hidrogénatmoszférában alakítják át. Szűrés és tisztítás után 180 °C olvadáspontú és 37 MJ/kg fűtőértékű, viszonylag tiszta tüzelőanyagot nyernek, amit az Egyesült Államokban sikerrel alkalmaznak erőművi célra.

Az elterjedtebb Fischer–Tropsch-szintézishez a szenet teljesen elgázosítják, a szén-monoxidhoz hidrogént keverve szintézisgázhoz (CO+H₂) jutnak, majd katalitikus reakciókkal főleg egyenes láncú szénhidrogéneket állítanak elő. A reakciók légköri nyomáson is kialakulnak, de 10–30 bar előnyösebb, a célszerű hőmérséklet 170–210 °C. Az eljárás jó minőségű gázolajat, de gyenge benzint szolgáltat. A második világháború idején ezzel az eljárással is sok millió t üzemanyagot gyártottak. A technológia berendezéseinek és paramétereinek változtatásával a módszerek sokféle továbbfejlesztett változatát dolgozták ki, ezek közé tartozik a Dél-afrikai Köztársaságban 1955 óta alkalmazott eljárás (SASOL) is.

Az 1970-es években sok energiát fektettek az eljárások korszerűsítésébe és továbbfejlesztésébe. A legambiciózusabb az amerikai állami program volt (Synfuel), amibe a piaci lehetőségek reményében minden nagyobb energiaipari vállalat bekapcsolódott saját technológiájával. Hasonló tevékenység más fejlett országokban is kibontakozott (pl. Németország, Egyesült Királyság, Japán). Az olajár lényeges növekedése versenyképessé teheti a szénből előállított motorhajtó üzemanyagokat, ezért a K+F tevékenységet – takaréklángon – tovább folytatják a multinacionális olajvállalatok és az energetikai gépgyártók, hogy felkészüljenek egy esetleges alternatív útra. A szén cseppfolyósítását egyes vélemények zsákutcának tekintik, ígéretesebbnek tartják a szénből metanol gyártását a szintetikus földgáz előállításán keresztül.

6.2.4. Gyártott gázok

Az energetikai célra előállított gázok többsége néhány éghető gázkomponens (6.7. táblázat) keveréke, a legnagyobb szerepet a szén-monoxid, a hidrogén és a metán játssza. A komponensek aránya és az előállítás módja nagyon változatos, így a gyártott gázoknak széles a választéka.

Éghető gázok előállítása szénből több mint két évszázados múltra tekint vissza, ennek két fő iránya a kigázosítás és az elgázosítás. A kigázosítás során a szenet levegő

kizárásával lepárolják, a szén termikus lebontása közben egyéb termékek mellett gáz is fejlődik, ami a feldolgozott szén hőértékének 20–40%-át képviseli. A szénből nyert gázok sorát a világítógáz gyártása nyitotta meg, ami a széleskörűen hasznosított városi gáz elődje volt. Az első regionális energiaellátó művek a városok gázvilágítására létesültek. Az első gázgyárat Londonban alapították 1814-ben, amit számos város követte, a közcélú gázművek száma a 19. század utolsó évtizedeire már sok ezerre rúgott. Magyarországon már 1816-ban történt kísérlet a „légszesz” alkalmazására, de az ellenállás leküzdéséhez még Széchenyi támogatása sem volt elég. Az első városi gázgyárat csak 1856-ban alapították Pesten. A városi gázt elsősorban lángkőszenek és zsírkőszenek magas hőmérsékletű lepárlásával állították elő, majd a szén minőségétől és a lepárlás módjától függően sokféle technológia honosodott meg, később szokásossá vált más éghető gázok bekeverése is. 1 t szénből 250–400 m³ városi gázt nyertek, 17–21 MJ/m³ fűtőértékkel. A jelentős szén-monoxid-tartalom miatt a városi gáz mérgező, ami sok balesetet okozott. A földgáz térhódítása miatt a városi gáz versenyképtelenné vált, gyártását fokozatosan felszámolták.

6.7. táblázat. A fontosabb elemi gázok jellemzői

Gáz	Összetétel	Fűtőérték	
		MJ/kg	MJ/m ³
Hidrogén	H ₂	120,5	10,8
Szén-monoxid	CO	10,1	12,7
Metán	CH ₄	50,2	35,9
Etán	C ₂ H ₆	47,7	64,6
Propán	C ₃ H ₈	46,5	93,9
Bután	C ₄ H ₁₀	45,3	122,6
Pentán	C ₅ H ₁₂	42,2	146,0
Hexán	C ₆ H ₁₄	45,2	173,7
Heptán	C ₇ H ₁₆	45,2	198,6
Etilén	C ₂ H ₄	47,2	59,6
Benzol	C ₆ H ₆	40,8	141,8

A városi gázgyártás mellékterméke egy gyengébb minőségű, fűtésre használható kokszt volt. A kokszolás mindig együtt jár gázfejlődéssel. A vaskohászatban használt kokszt gyártásának mellékterméke a kamragáz (koksztgáz), ami sokféle komponensből áll (metán, szén-monoxid, szén-dioxid, hidrogén, vízgőz, kén-hidrogén, szén-diszulfid, szerves kénvegyületek, nitrogén, ammónia, benzol, fenol, kátránygőzök, hidrogén-cianid, naftalin stb.), fűtőértéke 14–21 MJ/m³. A meleg gázt lehűtés után tisztítják, egyrészt az értékes vegyipari anyagok kinyerésére, másrészt a csővezeteki szállítást és a tüzelést kedvezőtlenül befolyásoló komponensek, valamint a toxikus anyagok kivonására. A kamragázt fűtésre használják, elsősorban magának a koksztolókamrának a hevítésére, egy időben a városi gázhoz is hozzákeverték.

Nagyszámú eljárást fejlesztettek ki a szén elgázosítására, aminek célja éghető gáz előállítás a szénmennyiség minél nagyobb hányadából. Az elgázosítás fontos szerepet

játszott a fűtőgázok és a vegyipari folyamatok kiinduló anyagát képező szintézisgáz előállításában. A generátorgázok különféle típusainak fejlesztéséhez az izzó szenet különféle gázokkal (levegő, oxigén, vízgőz, szén-dioxid, hidrogén) léptetik reakcióba. A generátorok sokféle konstrukcióját valósították meg, folytonos és szakaszos üzemmel, különféle szénbeadagolási és salakeltávolítási eljárásokkal, változatos hőmérsékleti és nyomásviszonyok mellett. Legegyszerűbb esetben a szenet felülről adagolják a gázgenerátorba és alulról levegőt fújnak be. A legfelül elhelyezkedő friss szenet az alsóbb rétegekből áramló forró gáz szárítja, majd a szén lejjebb csúszva melegebb gázokkal találkozik és lepárolódik. Az innen tovább csúszó izzó koks redukálja a feláramló széndioxidot, az el nem használt karbon a lejjebb elhelyezkedő égési zónában elég a befűjt levegőben. A reakciók lefolyása és a reakciótermékek összetétele nemcsak a szén és a bejuttatott gáz jellegétől függ, hanem olyan paraméterektől is, mint a hőmérséklet és a nyomás eloszlása, a tartózkodási idő az egyes zónákban stb., amelyek alapvetően a gázgenerátorok kialakításától függenek.

A szénelgázosítás során fellépő fontosabb reakciókat a 6.8. táblázat mutatja be, a reakcióhő exoterm folyamatoknál pozitív, endotermeknél negatív, az utóbbiaknál a hő beviteléről is gondoskodni kell. A reakciók lefolyása függ a hőmérséklet és a nyomás értékétől, azokat sokféle anyag katalizálja, illetve inhibálja.

6.8. táblázat. Az elgázosítás fontosabb reakciói

	Reakció	Reakcióhő kJ/mól	Megjegyzés
6.1	$C+O_2 \rightarrow CO_2$	+407	
6.2	$C+CO_2 \rightarrow 2CO$	-160	CO aránya nő a hőmérséklettel, 1000 °C felett 100%
6.3	$2C+O_2 \rightarrow 2CO$	+246	
6.4	$C+H_2O \rightarrow CO+H_2$	-108	1000 °C felett
6.5	$C+2H_2O \rightarrow CO_2+2H_2$	-89	1000 °C alatt
6.6	$C+2H_2 \rightarrow CH_4$	+88,5	a metán aránya csökken a hőmérséklet növekedésével
6.7	$CO+3H_2 \rightarrow CH_4+H_2O$	+217	metánosítás
6.8	$CO_2+4H_2 \rightarrow CH_4+2H_2O$	+164	metánosítás
6.9	$2CO+O_2 \rightarrow 2CO_2$	+667	1000 °C alatt
6.10	$2CO \rightarrow CO_2+C$	+160	
6.11	$CO+H_2O \rightarrow CO_2+H_2$	+42	hidrogén konverzió
6.12	$n(CO+2H_2) \rightarrow (CH_2)_n+nH_2O$		
6.13	$nCO+(2n+1)H_2 \rightarrow C_nH_{2n+2}+nH_2O$		szintézisegyenlet
6.14	$nCO+(n+1)H_2 \rightarrow C_nH_{2n+2}+nCO_2$		szintézisegyenlet
6.15	$(3n+1)CO+(n+1)H_2O \rightarrow$ $\rightarrow C_nH_{2n+2}+(2n+1)CO_2$		szintézisegyenlet

A klasszikus generátorgáz (léggenerátorgáz) levegőben történő elgázosítás terméke, legfontosabb összetevője a szén-monoxid, ideális esetben 35% CO-t és 65% N₂-t tartalmaz, a gyakorlatban található benne néhány százalék hidrogén, metán és szén-dioxid is. Fűtőértéke 4,4 MJ/m³ körül mozog. Léggenerátorgáznak tekintik a levegő és füstgáz, valamint a levegő és vízgőz befűvésével nyert elgázosítás termékeit is, fűtőértékük az összetételtől függően 4,2–7,5 MJ/m³. Vízgőz befűvésével állítják elő a vízgázt, ami közel fele-fele arányban hidrogénből és szén-monoxidból áll, fűtőértéke 11,6 MJ/m³. Vízgáz és oxigén keveréke az oxivízgáz (11,5 MJ/m³), a léggenerátorgáz és vízgáz különböző arányú keverékei a „kevert gázok”. A nyomás alatti elgázosítás több metánt tartalmazó és magasabb fűtőértékű (16–18 MJ/m³) gázt szolgáltat, amit néha nyomásgáznak neveznek. A generátorgáz-gyártás 55–60%-os átalakítási hatásfoka alacsony, a termék előállításának költsége viszonylag magas, ezért a generátorgázok energetikai jelentőségüket elvesztették, miután versenyképtelennek bizonyultak az olcsó földgázzal szemben. Elvértve a vegyipari gyakorlatban még használnak generátorgázt szintézisgáz előállítására.

Az 1970-es évek olajkrízise új lendületet adott az elgázosításnak, a gáznemű tüzelőanyagok szénbázisú helyettesítése érdekében. A technika fejlesztésére két irányzat bontakozott ki, a könnyebben megvalósítható út az alacsony fűtőértékű gáz előállítása, a nehezebb a földgáz helyettesítése. Az alacsony fűtőértékű gáz (fűtő gáz, gyenge gáz) összetételében hasonlít a tisztított generátorgázhoz, fűtőértéke 10–12 MJ/m³, miután a legtöbb környezetszennyezőt a gyártás során kivonják, használatos a „clean gas” (tiszt gáz) megnevezés is. Előállítására számos nagyüzemi eljárást fejlesztettek ki, melyek egymástól a hőmérséklet, a nyomás, és a reagensek jellegében térnek el. Erőművi hasznosítása – főleg gáz-gőz kombinált ciklussal összeépítve (IGCC⁷⁷) – átlépett a versenyképesség küszöbén.

A földgázt helyettesítő, 35–38 MJ/m³ fűtőértékű SNG⁷⁸ előállításának első fázisa szén-elgázosítás, ami történhet magasabb hőmérsékletű és kisebb nyomású oxigázosítókkal, vagy alacsonyabb hőmérsékleten, de nagyobb nyomással működő hidrogázosítással. Az oxigázosítók az elgázosításhoz oxigént és vízgőzt tartalmazó atmoszférát alkalmaznak, terméke legnagyobb részét szén-monoxid és hidrogén elegye. A hidrogázosításhoz hidrogént és vízgőzt vezetnek be, főleg metán és szén-dioxid keletkezik.

Az elgázosítást metánképző második fázis követi, melyet többnyire katalizátorokkal, nagy nyomáson és magas hőmérsékleten idéznek elő. Az eljárások egymástól az elgázosított szén minőségében, a reakcióparaméterek és katalizátorok jellegében, a termék tisztításának technológiájában, valamint a hidrogén előállításának módjában különböznek. A hidrogént többnyire vízgőzből fejlesztik (izzó koksszal vagy vassal redukálva, néha villamos hevítéssel). Egyes eljárásoknál a metanizáció katalitikus hatású olvadt vasfürdőben, vagy sóolvadékban (Na₂CO₃) történik.

Az SNG-gyártás fejlesztését erősen visszavetette egyrészt a világ műrevaló földgázvagyonának gyors, a felhasználás ütemét meghaladó bővülése, másrészt a jelenlegi

⁷⁷ Integrated gasification combined cycle, elgázosítással integrált kombinált ciklus.

⁷⁸ Synthetic natural gas.

gázarak mellett a bonyolult technológiákkal előállítható termék versenyképtelensége. Az elgázosítási technikáknak nagy lökést adna a szükséges magas hőmérséklet és hőmennyiség fedezésével a magas hőmérsékletű atomreaktorok megjelenése (ez a IV. generációs atomerőművek fejlesztésének is tárgya). Az ilyen alloterm elgázosításhoz nincs szükség oxigénre, és a karbonnak azt a 30–40%-át is gáz előállítására lehet hasznosítani, amivel az autoterm folyamatoknál a hőt fedezik, így a szén karbontartalma teljes mértékben éghető komponensek létrehozatalára fordítódna. Ezzel a szén új szerephez juthatna az energiaellátásban, a szénhidrogén-ellátás beszükülésekor. Egyes vizsgálatok szerint az SNG-gyártásnál olcsóbban lehet metanóból földgáz helyettesítésére alkalmas gázt előállítani, ami 50% dimetil-éter, 33,3% hidrogén és 16,7% szén-monoxid keveréke.

6.2.5. Hulladékgázok

Számos ipari folyamat melléktermékeként keletkeznek éghető hulladékgázok. Ezek éghető komponensei többnyire megegyeznek a gyártott gázokéval, de rendszerint sokkal több nem éghető összetevőt tartalmaznak, ennek következtében fűtőértékük alacsony. Ennek ellenére ösztönzik a hasznosításukat – esetleg csak a hőtartalmukat – az energetikai hatékonyság javítására.

A legjelentősebb hulladékgáz a nagyolvasztókból magas hőmérsékleten túlnyomással távozó kohógáz (torokgáz), melynek éghető része főleg CO. Összetételét a nyersvasgyártás technológiája szabja meg, függ az adagok összetételétől, a gyártott nyersvas minőségétől, a kokszt és a bevitt szénhidrogének arányától, az oxigénbefúvás mértékétől és az üzemmódtól. Normálállapotra átszámítva egy tonna nyersvas gyártásánál 1800–4000 m³ kohógáz képződik, de a gázfejlődés nem egyenletes. Mind a mennyiség, mind az összetétel véletlenszerűen ingadozik, és a képződés csökken a redukció előrehaladtával. A kohászati technológia fejlődésével csökkenő tendenciát mutat a kohógázképződés. A kohógázt maga a kohászat hasznosítja, kazánok és kemencék fűtésére, esetleg magasabb fűtőértékű gázzal dúsítva. A kohógáz a redukációs zónát 1350 °C körül hagyja el és a magával vitt jelentős mennyiségű hőt is hasznosítani lehet 200–400 °C-ra hűtve anyagok előmelegítésére. A kohógáz nyomása is hasznosítható erőgépben expandáltatva.

Lényegesen kisebb mennyiségben más pirometallurgiai folyamatoknál is keletkeznek hulladékgázok. A konvertergáz az oxigénbefúvásos konverteres acélgyártásnál képződik, átlagosan 60–70 m³/t acél arányban. A gáz 90%-a CO, fűtőértéke 8,5–12,5 MJ/m³, a konvertert 1600 °C-on hagyja el. A konverter üzemi ciklusainak megfelelően szakaszosan áll rendelkezésre, ami a hasznosításnál némi nehézséget okoz, gőzfejlesztésre és előmelegítésre használják.

Ugyancsak főleg szén-monoxid az éghető része az acélotvívő kemencékben képződő kohófüstnek, különös körülményt követel, hogy többnyire mérgező alkotókat is tartalmaz. Fűtőértéke 8,5–12,5 MJ/m³, mennyisége 600–1000 m³/t acél. Többnyire csak a hőtartalmát hasznosítják és a környezetre veszélyes alkotókat tisztítóberendezésekben

történő kivonását követően elfáklýázzák. A színesfém-kohászati eljárásoknál (pl. alumínium és réz elektrolízisénel) felszabaduló kohófüst hasznosítását az agresszív és mérgező alkotók nehezítik, elfáklýázásuk a szokásos gyakorlat. A kémiai technológiákból gyakran származnak olyan szénhidrogén-gőzök és éghető hulladékgázok, melyeket a robbanásveszély elkerülésére elfáklýáznak. Ha mennyiségük és fűtőértékük számottevő, akkor energetikai hasznosításukra is sor kerül.

6.3. Kőolajtermékek

A kőolaj nagyon összetett anyag, amiben mintegy ezer különféle vegyület található. Ezek legnagyobb része szénhidrogén, de szép számmal fordulnak elő kén, nitrogén, foszfor oxigén, valamint fémvegyületek (V, Ni, Cu, Co, Mo, Pb, Cr, As) is. Fizikai és kémiai eljárásokkal a kőolajból nagyon sokféle vegyület, illetve vegyületcsoport vonható ki. A kinyert anyagokat a gazdaságnak szinte minden ága széleskörűen hasznosítja. A legnagyobb horderejű energiaátalakítás a kőolaj frakciókra bontása. A kőolajfeldolgozó (régebben finomító) üzemek a vegyipar legnagyobb és legsokrétűbb létesítményei.

6.3.1. Kőolajfeldolgozás

A kőolaj feldolgozása a vegyipar legösszetettebb technológiája. Ennek során motorhajtó üzemanyagokat (fehéráru), tüzelőanyagokat, petrokémiai termékeket, kenőanyagokat és útépítő anyagokat állítanak elő. A termékek száma több száz lehet, azok 80–85%-a energetikai célokat szolgál. A termékszerkezetet a piaci kereslet és a termékek fizikai és kémiai tulajdonságaival szemben támasztott követelmények szabják meg. A piac befolyását érzékelteti, hogy a kőolaj drágulása miatt a folyékony tüzelőanyagok majdnem teljesen kiszorultak a hőpiacról. A követelmények az idő során módosulnak, amit az anyagok biztonságos kezelése, a hatékony felhasználás és a környezetvédelem befolyásol.

A kőolajfinomítók sokféle üzemből álló, bonyolult vegyipari komplexumok, az elvégzendő műveleteket és azok kapcsolódásait sokféleképp lehet kialakítani. Az egyes műveletekre is sokféle konkrét technológia áll rendelkezésre, mindezek alapján állítják, hogy a világ sok száz kőolaj-finomítója között nem találni két egyformát. A kőolajfeldolgozó üzemek technológiája rugalmasan alakítható, egyrészt a különféle eredetű és összetételű kőolajok feldolgozhatósága érdekében, másrészt a termékek iránti kereslet változékonysága miatt. Az egyes üzemszervezetekben a feldolgozás módját befolyásolni lehet a hőmérséklet, a nyomás, az anyagáramok összetétele és sebessége, a tartózkodási idő változtatásával, katalizátorok és adalékanyagok megválasztásával.

A feldolgozás előtt a kőolajat megtisztítják a nem kívánatos alkotóktól. A szuszpendált szervesanyagokat ülepitéssel, vagy centrifugálással választják ki, az emulziókat villamos erőterrel koaguláltatják és kiűzik. A kísérő gázokat kigázosítással szeparálják, az így nyert nedves gázt a továbbiakban földgázra és gázolinra bontják. Az alacsony hőmérsékleten párolgó éghető gázokat (metán, etán, propán, bután) azért kell néhány bar

nyomáson kigőzölni, hogy ne zavarják a szállítást. A propánt és butánt nagy nyomáson cseppfolyósítva forgalmazzák (PB-gáz, angolul LPG⁷⁹).

A kőolajfeldolgozás leglényegesebb művelete a frakcionális desztilláció, a különböző forráspontú vegyületek szétválasztása. Ennek során a hőcserélőkön keresztül előmelegített, majd csökemencében felmelegített kőolajat frakcionáló toronyba vezetik és elgőzöltetik. Az első lepárlás légköri nyomáson történik, a 300 °C-nál alacsonyabb forráspontú párlatok leválasztására. Az elgőzöltetett kőolaj a frakcionáló toronyban egymás felett elhelyezett, folyékony fázist tartalmazó tálcákon keresztül áramlik felfele, az abból kondenzálódó folyadékfázis pedig lefele áramlik. A tálcákon a különböző forráspontú frakciók kvázi egyensúlya alakul ki, és a kívánt forráspontúhoz tartozó tálcáról a frakciót kivezetik a toronyból. A legalacsonyabb hőmérsékleten a gázok távoznak, ezt követően a forráspontoknak megfelelően a motorhajtó üzemanyagok – benzin, petróleum, gázolaj – választhatók le. E párlatok nem késztermékek, további feldolgozással módosítják a molekulákat, kivonják a nem kívánatos alkotókat, adalékokkal javítják a tulajdonságokat. Az atmoszferikus desztilláció maradéka a 0 °C körül dermedő pakura. Az atmoszferikus desztillációnál a hőmérséklet további növelése a molekulák hőbomlását okozná, ezt a nyomás csökkentésével lehet elkerülni. A 25–70 mbar-on végzett vakuumdesztilláció kiinduló anyaga a pakura, amiből gázolajat és 350 °C-nál magasabb forráspontú kenőolajpárlatokat nyernek, a desztilláció maradéka bitumen, illetve kevésbé erélyes lepárlásnál a bitumen és paraffinos kenőolajok keverékéből álló gudron. A molekulák szénatomszáma szerint sorba rendezve a fontosabb frakciók forráspontját mutatja légköri nyomáson a 6.9. táblázat. Ez a kategorizálás azonban nem egységes, használatosak más csoportosítások is, eltérő hőmérséklethatárok szerint felosztva.

6.9. táblázat. Fontosabb kőolajfrakciók

Szénatomszám	Frakció	Forráspont, °C
C ₁ –C ₄	gázok	
C ₅ –C ₁₀	benzin	40–200
C ₁₁ –C ₁₂	petróleum	160–300
C ₁₃ –C ₂₀	gázolaj	200–350
C ₂₀ –C ₃₀	pakura	240–360
C ₃₀ –C ₅₀	bitumen	360–380

A fehéráru, valamint a petrokkémiai alapanyagok iránti kereslet növekedése a feldolgozás mélységének növelésére ösztönzi a kőolajipart, a fűtőolaj-előállítás terhére. Az erre szolgáló másodlagos eljárások többsége a lepárlási maradékokból fehéráru előállítását célozza. Első lépésben eltávolítják a további feldolgozást zavaró kén- és nitrogénvegyületeket, a szerves fémvegyületeket (V, Ni stb.), és a kolloidálisan diszpergált aszfalténeket. Ezt követően kerül sor a nagyobb molekulákat kisebbre törő destruktív eljárásokra (krakko-

⁷⁹ Liquefied petroleum gas, cseppfolyósított kőolajgáz.

lás). A legkorábban a termikus krakkolást vezették be, melynél a pakurát 400–600 °C hőmérsékleten és 10–70 bar nyomáson bontják le, terméke benzin, fűtőolaj, petrolkoks és gázok. Alkalmazása az eredeti célra erősen visszaszorult, ma már elsősorban petrolkokszyártásra és enyhébb paraméterekkel viszkozitáscsökkentésre használják. A katalitikus krakkolás alacsonyabb hőmérsékleten történik, kiinduló anyaga egyaránt lehet pakura, vagy vákuumdesztillációs párlat, a fehérrarun kívül petrolkémiai alapanyagokat (főleg könnyű olefineket) és gázokat szolgáltat, a legnehezebb termékeket esetleg visszacirkuláltatják. A hidrokrakkolásnál a molekulák katalitikus bontása hidrogénatmoszférában történik, szelektívebb és jobb minőségű középtermékeket szolgáltat és a kénmentesítést is megoldja. A katalitikus krakkolás főleg a benzintermelést, a hidrokrakkolás pedig a gázolaj-kihozatalat fokozza. A lényegében enyhe termikus krakkolást jelentő viszkozitástörés (visbreaking) célja, hogy a nagy viszkozitású fűtőolajokból kisebb viszkozitású fűtőolaj keverőkomponenseket állítson elő. Elnyújtott termikus krakkolással a fűtőolajat teljes egészében fel lehet dolgozni úgy, hogy a fehérraru mellett jó minőségű, kohászati igényeket is kielégítő petrolkoks keletkezzen.

A másodlagos feldolgozás jellegének és mértékének megválasztása a gazdaságosságtól függ, figyelembe véve, hogy a másodlagos feldolgozás létesítményeinek fajlagos beruházása mintegy háromszor annyiba kerül, mint az elsődlegeseké, és az üzemeltetési költségek aránya is kereken kétszeres. A primer feldolgozás (atmoszferikus és vákuumleparlás) a világ finomítói kapacitásának háromnegyedét teszi ki, a többi a másodlagos feldolgozás.

A kőolajtermékek nem meghatározott összetételű anyagok, hanem megszabott hőmérséklet-intervallumon belüli forrásponttal rendelkező komponensek keverékei. Ennek megfelelően a termékek összetétele és tulajdonságai függenek a feldolgozott kőolaj eredetétől és a feldolgozás módjától. A követelmények jobb kielégítésére a leparlás és destruktív bontás termékein kütönféle utókezelő és finomító műveleteket hajtanak végre, pl. alkilezést és polimerizációt a könnyű szénhidrogéngázok átalakítására, hidrogénes kezeléseket a kén-, nitrogén- és oxigénszennyeződés eltávolítására, katalitikus reformálást az oktánszám javítására stb.

A kőolaj-feldolgozás sokféle veszéllyel terhes. A nagy mennyiségű tűz- és robbanásveszélyes anyag, a sok magas hőmérsékleten és részben nagy nyomáson zajló művelet, a hőfejlesztést szolgáló nagy teljesítményű tüzelőberendezések, a veszélyes anyagokkal teli hatalmas tárolótartályok, a nagy anyagáramok, a sokféle egészségre káros anyag kikerülése mind potenciális veszélyforrás. A színvonalas technikai kultúra ellenére időnként előfordulnak súlyos katasztrófák is. Nálunk a legsúlyosabb egy kemencerobbanás volt a szászhalombattai kőolajfinomítóban 8 áldozattal.

A kőolaj-feldolgozás során sok veszélyes vegyület válik szabaddá, ezek kikerülését a környezetbe meg kell akadályozni, a veszélyes komponenseket (pl. SO_x, NO_x, VOC) kiszűrjük, az éghetőket elfáklázzák. A kőolaj-feldolgozásnál eleget kell tenni az EU REACH⁸⁰

⁸⁰ Registration, Evaluation, Authorization, and Restriction of Chemicals.

rendeletének – mely főleg a biztonság érdekében szabályozza a vegyi anyagok regisztrálását, értékelését, engedélyezését és korlátozását –, valamint a légtisztaságot célzó CAFE⁸¹ előírásainak.

6.3.2. Üzemanyagok

A motorhajtó üzemanyagok megkívánt fizikai és kémiai tulajdonságait részletes szakmai termékszabványok írják elő. A követelmények az idő során módosulnak a műszaki fejlődés, valamint más körülmények változása miatt, ami az előírások felújítását teszi időnként szükségessé. Az üzemanyagok alkalmazásának feltételeit befolyásolják a felhasználás szempontjából jellemző erőgépek működési módja, a szállítás, tárolás, kezelés szempontjai, a biztonsági követelmények, és nem utolsósorban a környezetvédelem. Ebben jelentős szerepe van az EU Auto Oil programjában meghatározott követelményeknek is.

A kőolajból nyert üzemanyagok között a legnagyobb jelentősége a benzinnek van, ami az Otto-motorok hajtóanyaga (kis mennyiségben vegyipari alapanyagként, tisztító- és oldószernek is használják). A benzin nem egységes vegyület, hanem sokféle szénhidrogén – a legnagyobb mennyiségben hexán és heptán – elegye, forráspontja légköri nyomáson az összetételtől függ.

A motorbenzinnél követelmény, hogy a porlasztásnál optimális legyen az illékonysága, ne korrodáljon, ne képződjön gyanta és jó legyen a kompressziótűrése. Adalékokat használnak a benzin megfelelő konzisztenciájának biztosítására, oxidáció, jegesedés, gyantaképződés megakadályozására, a porlasztáshoz szükséges illékonyság biztosítására. Ugyancsak adalékok segítségével akadályozzák meg az égéstermékek lerakódását a motorban, védekeznek a korrózió és rozsdásodás ellen, kenik a mozgó alkatrészeket, csökkentik a kibocsátásokat stb. Részben a szénhidrogének összetételével, részben adalékokkal csökkentik az öngyulladásra való hajlamot. Az Otto-motoroknál a motor hengerébe szívott levegő-benzin keveréket szikrával gyújtják be, de nagy sűrítés mellett előfordulhat öngyulladás az elektromos gyújtási impulzus megjelenése előtt. Az ezt jellemző kopogásos égést az oktánszámmal jellemzik, minél magasabb ennek az értéke, annál kevésbé hajlamos a benzin a kopogásra. Hosszú ideig ólomtetraetil adagolásával csökkentették a hajlamot a kopogásra, de az egészséget súlyosan veszélyeztető Pb kibocsátásának beszüntetésére világszerte áttértek az ólommentes benzin használatára.

A közúti közlekedésben benzint többféle minőségben forgalmaznak, ezek az üzemanyagok a személygépkocsik legnagyobb részének, a motorkerékpároknak és a kis teherautóknak. A dugattyús motorokkal hajtott légcavaros repülőgépek speciális követelményeinek kielégítésére szolgál a repülőbenzin. Ugyancsak benzinnel üzemelnek a nem villamos hajtású kerti kisgépek és kézi szerszámok.

⁸¹ Clean Aer for Europe.

A tökéletlen égés miatt a kipufogógázban sok a kellemetlen égéstermék. A CO-kibocsátást katalizátoros utóégetővel csökkentik. A benzint szennyező alkotók közül a sokféle vegyületben előforduló kén a legkellemetlenebb, mert mérgezi a háromutas katalizátorokat és növeli a CO-, NO_x- és VOC-emissziót, katalitikus konverteres gépkocsiknál pedig H₂S-kibocsátást okoz erősen dúsított üzemanyagnál, pl. hidegindításnál. Az európai és a magyar előírások a kéntartalom fokozatos csökkentését írják elő, a MOL-nak sikerült az üzemanyagok kéntartalmát 10 ppm alá szorítani, távlatilag a tökéletesen kénmentes üzemanyag a cél. Ugyancsak törekvés a benzoltartalom csökkentése, valamint az emissziók mérséklése érdekében a felső leválasztási hőmérséklet csökkentésével az aromások és olefinok arányának visszaszorítása, esetleg oxigéntartalmú alkotók adagolásával. Az égéstermékek között mérgező hatású szénhidrogének is kikerülnek, egyesek – pl. a benzpirén – rákkeltők. Egyes szennyezőkre maga a benzin is érzékeny. A benzin párolgása szintén környezeti ártalom, ami különösen a töltőállomások környékén érzékelhető, ezt is mérsékli a MOL „zöld kutak” programja.

A dízelmotorok üzemanyaga a gázolaj (dízelolaj), amit a hengerbe szívott levegőbe injektálnak, a gyulladást kompresszióval idézik elő. A gázolajjal nagyobb kompresszió érhető el, mint benzinnel, így azonos térfogatból mintegy 12%-kal több hasznos energia nyerhető. Így azonos térfogatú motor km teljesítmény 20–40%-kal magasabb, és az élettartam is nagyobb. A nehezebb molekulákból álló gázolaj forrponja is magasabb, a gyulladási képességét a cetánszámmal jellemzik. A gázolaj égése környezetszennyezőbb a benzinnél, főleg NO_x, aldehidek, korom található a kipufogógázban.

A nagyobb nyomás miatt a dízelmotorok robusztusak, nagyobb súlyuk rontja a járművek dinamikai tulajdonságait. Elsősorban a nagyobb súly iránt érzéketlen járművek (teherautók, mozdonyok, hajók), a mezőgazdasági gépek, valamint a stabil hajtások erőgépei. Gazdaságosságuk révén terjednek a nehezebb személyautók területén is, bár ott jelentős versenytárs a gázüzem.

A gázolaj tulajdonságait is adalékokkal javítják, hogy ne legyen hajlamos kokszképződésre, vagy lerakódásokra, hogy alacsony dermedéspontot és megfelelő viszkozitást biztosítsanak a jó tárolhatóság és szivattyúzhatóság érdekében, megfelelő legyen a gyulladási hajlama, égéstermékében ne legyen sok korom. A gázolajnál is törekvés a kéntartalom csökkentése.

A sugárhajtású repülőgépek üzemanyaga a kerozin, ami lényegében petróleum, de adalékokkal biztosítják, hogy a nagy magasságban érvényesülő hidegben is folyékony maradjon, nyomokban se tartalmazzon nedvességet, ami megfagyva az áramlást akadályozhatja. Ugyanezen okból követelmény, hogy ne legyen hajlamos sem oxidálódásra, sem kokszképződésre. A hajtómű hűtésében játszott szerepe miatt fontosak a termikus tulajdonságok is.

A magyar kőolaj-feldolgozó technológiát számottevően módosították az utóbbi években, és jó néhány további beruházás van előkészületben, hogy a termékek maradéktalanul eleget tudjanak tenni az EU szigorodó előírásainak. Az Unió „Auto Oil” programja követelményeket támaszt egyrészt az üzemanyagok megengedett szennyezőanyag-tartalmára, másrészt a gépkocsi kibocsátására. Végrehajtása jelentős csökkenést eredményezett a legkedvezőtlenebb kibocsátások (CO, benzol, NO_x, VOC, SO₂, korom) terén, vala-

mint az üzemanyagok tulajdonságait rontó alkotók (oleffinek, PAH) visszaszorításában. Egyeztetés alatt áll a következő fázis a kibocsátások további csökkentésére, ami a CO₂-emisszió mérséklésére is kiterjed.

6.3.3. Tüzelőanyagok

A fejlett országokban az olcsó olaj korszakában népszerű volt az olajtüzelés. A tüzelőanyag szállítása és tárolása egyszerűen oldható meg, és az égést könnyű szabályozni. Az olcsó olaj importjának fellendülése Magyarországon is vonzóvá tette az olajtüzelést, azt a kormány is erőteljesen támogatta. Ennek érdekében bevezették a háztartási tüzelőolajat (HTO), ami lényegében gázolaj, de mentesítették az üzemanyagokra kivetett súlyos adó alól. A megkülönböztetés érdekében a HTO-t megfestették, de a festéket savazással viszonylag könnyen el lehetett távolítani. Ennek révén az olcsón megvásárolt HTO-t szőkítés után gázolajként drágán el lehetett adni. Ebből nagy vagyonok keletkeztek, az olajszőkítés a korrupció melegágya, és a magyar maffia kialakulásának táptalaja lett. Az ezzel foglalkozó szervezeteket évekig sem sikerült felszámolni, végül csak az árkülönbség megszüntetése tett pontot a visszaélésekre.

Az olajkrízis utáni árak világszerte, és Magyarországon is eltérítettek a hőfejlesztéstől olajbázison. Az áttérést a gáztüzelésre megkönnyítette a hozzáférés a vezetékes földgázhálózathoz, vagy a PB-gáz folyamatos rendelkezésre állása.

A magyar szabvány tüzelő- és fűtőolajokat különböztet meg, ami nem általános nemzetközi gyakorlat. A tüzelőolajok különféle fajtái lepárlási frakciók, azok lényegében gázolaj és más desztillációs párlatok különböző arányú keverékei. Környezeti hőmérsékleten folyékonyak és jól porlaszthatók. Főleg háztartások és igényesebb ipari kemencék tüzelőanyagai voltak. A fűtőolajok a lepárlás magas dermedéspontú és nagy viszkozitású maradványai, szintén az összetételtől függő többféle minőségben forgalmazzák. Lefejtésűkhöz, csővezetéken történő szállításukhoz és porlasztáshoz a fűtőolajokat a viszkozitás csökkentéséhez fel kell melegíteni, ezért csak nagy tüzelőberendezésekben használhatók. A Dunamenti Hőerőművet eredetileg gudron tüzelésére tervezték, de a kőolajkrízis hatására át kellett térni földgáz eltüzelésére. Az olajégőket és ellátási rendszerüket azonban meghagyták, így az erőmű, szükség esetén alternatív fogyasztóként mindkét tüzelési módban üzemben tartható.

A háztartási tüzelőolajtól a nehéz fűtőolaj felé haladva a sűrűség, a viszkozitás, továbbá a dermedés-, lobbanás- és gyulladáspont és a manipuláció szempontjából mértékadó hőmérséklet nő. Hasonló irányban nő a nemkívánatos szennyező anyagok koncentrációja, mivel azok a lepárlás során a nehezebb frakciókban dúsulnak fel, ha nem gondoskodnak a kivonásukról. Ugyanez vonatkozik a legkellemetlenebb szennyezőre, a kénre is. A kén a kőolajban többnyire a nagy molekulákhoz kapcsolódik, ezért a lepárlásnál a nehéz frakciókban dúsul be. Igényesebb termékekhez kénmentesítő eljárásokat alkalmaznak, az Unió kénmentesítési programja a tüzelő- és fűtőolajokra is kiterjed. A többnyire szerves vegyületekben (pl. merkaptánok) formájában található kén kivonására többféle eljárás használatos, rendszerint hidrogén bevezetésével kénhidrogénné (H₂S) redukálják, amiből

elemi ként vagy kénsavat nyernek. A fűtőolajok kellemetlen szennyezője a vanádium is, ami a magas hőmérsékletű korrózió legfőbb oka, különösen ha nátrium is van az olajban. A nagy légfeslesleg előmozdítja a magas hőmérsékletű korróziót. Követelmény a folyékony tüzelőanyagokkal szemben tárolhatóságuk hidegben is, üledékképződés nélkül, valamint hogy tüzelésük kormozás- és hamumentes legyen.

6.4. Földgázból nyert termékek

A 20. század második felét a földgáz rohamos térhódítása jellemezte. Ehhez nagy technikai áttörések is társultak, a hatalmas méretű magisztrális csőhálózatok kifejlesztése, a cseppfolyós szállítás kialakulása, és századunk elején a palagáz megjelenése.

6.4.1. Cseppfolyósítás

A gyorsan bővülő földgázforgalomnak nagy lökést adott a cseppfolyósított földgáz (LNG⁸²) szállítási technológiájának kifejlesztése, ami megnyitotta az utat a tengeri szállítás előtt. Egy az USA-ban 1944-ben bekövetkezett súlyos katasztrófa (128 halálos áldozattal) évtizedekre visszavetette a cseppfolyós földgáz-technológia hasznosítását, amíg a szállítási és tárolási igények ki nem kényszerítették az alkalmazását, és meg nem teremtették annak biztonsági feltételeit. Azóta folyamatosan nő a cseppfolyós földgáz részaránya a világkereskedelemben.

A metán forrpointja légköri nyomáson -161 °C , ez alá hűtve a cseppfolyós földgáz térfogata kereken 800-ad része a 20 °C -os gázénak. A nyomás növelésével a forrpoint emelkedik, de ezt nem használják ki, mert tovább növelné e robbanásveszélyes technológia kockázatát. A cseppfolyósításhoz, és a folyadékállapot fenntartásához megfelelő kriotechnikai berendezéseket kellett kifejleszteni. A cseppfolyósító, illetve a gázállapotot visszaállító elgőzöltető létesítményeket a tengerparti feladó, illetve fogadó terminálokra létesítik.

Az első szerződést Nagy-Britannia és Algéria kötötte 1961-ben évi 1 Mt LNG szállításáról. A forgalom 1965-ben indult meg az Arzewben felépített cseppfolyósító üzemből. A példát gyorsan követte Franciaország, Japán, az Egyesült Államok, majd más dél-európai államok. Sorban épültek a feladó állomások Észak-Afrikában, a Közel- és a Távols-Keleten. A fogadó terminálok száma százhoz közelít és összesített kapacitásuk az évi 200 Mt-hoz. Korábban tervezték terminál építését az Adrián (Krak szigetén) és a Balti-tengeren is, melyek a magyar gázellátást is befolyásolhatták volna, de a palagáz színre lépése elbizonytalanította ezeket az elképzeléseket.

A hatalmas robbanóképes tömeg miatt az LNG szállítási technológia veszélyes, különösen kritikus a visszagázosítás. Egy algériai cseppfolyósító terminálon hatalmas tűzvész

⁸² Liquefied natural gas.

kialakulására már volt példa. A félelmek azonban túlzottak, a gondos tervezéssel és a biztonsági előírások betartásával a kockázat minimálisra szorítható. Összesen nyolc olyan tengeri balesetet jegyeztek fel, ami az LNG-tankerekből repedések miatt kiömléséhez vezetett, de a rakomány egyik esetben sem gyulladt ki. Tankhajó fedélzetén egyszer sem történt halálos baleset. A kiömlő LNG nem képez réteget sem a vízen, sem a földön, mert ha szivárogni kezd, a levegőn gyorsan elillan, ha pedig a tengerbe folya, úgy feljönne a felszínre (mivel sűrűsége kevesebb mint fele a vízének), és onnan párologna el.

6.4.2. Folyékony üzemanyag előállítása

Földgázból is előállítható folyékony szénhidrogén (GTL⁸³), lényegében a Fischer-Tropsch-szintézis segítségével. Nem lehetetlen, hogy idővel szerephez jut a kőolajpótlásban, bár jelentős beruházási költsége és nagy energiaszükséglete miatt – ami a bevezetett földgáz 45%-át felemésztí – nem versenyképes. Ezzel szemben a GTL-technika nagyon hasznos az elfáklyázás kiküszöbölésére. Az olyan kutaknál, ahol az olajjal együtt felszínre hozott földgáz hasznosítására nincs mód sem másodlagos termelésre, sem csővezeték híján elszállítására, ott azt elfáklyázva semmisítik meg. Ehelyett cseppfolyósítva könnyen szállíthatóvá tehető, ha ez gazdaságosnak bizonyul.

6.5. Tüzelőanyagok endoterm reakciókból

Energiabefektetés árán éghető anyagok sokféle kiinduló anyagból állíthatók elő. Jelenleg energetikai szempontból a hidrogén kinyerése vízből és a metanol előállítása szintézisgázból tűnik fontosnak.

6.5.1. Hidrogéngazdaság

Először Verne egyik regényében (1870-ben) jelent meg a hidrogén mint tüzelőanyag, de sok időnek kellett eltelnie, amíg az Apollo-programban betöltött kulcsszerepéig eljutott. Sokan a jövő energiahordozójának a hidrogént tekintik, amivel háttérbe lehetne szorítani az ásványi tüzelőanyagokat. Nagy előnye a hidrogénnek, hogy hasznosítása nem jár környezetszennyező anyagok kibocsátásával, mivel égésterméke víz. Ezért egyes zöld mozgalmak egyenesen a környezetvédelem kulcskérdésének tekintik a hidrogéngazdaság kiépítését, különösen ha előállítása megújuló energiákra támaszkodik, hogy fejlesztése se járjon környezetszennyezéssel. Reálisabbnak tűnik az atomenergiára alapozott hidrogéngazdaság, a hidrogént vízből éjszakai árammal fejlesztve elektrolízissel, vagy pirokémiai úton bontva magas hőmérsékletű reaktorról. A hidrogén szélesebb körű

⁸³ Gas to liquid.

alkalmazása azonban még jelentős kutató-fejlesztő munkát igényel, mind az előállítás és szállítás, mind a felhasználás területén.

A hidrogén színtelen, szagtalan, íztelen gáz, forráspontja légköri nyomáson 20,3 K ($-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), kis sűrűsége és kis viszkozitása következtében illékony. Szobahőmérsékleten katalizátor vagy szikra hatására lép reakcióba az oxigénnel, és a hidrogéntűz gyorsan terjed, de a hidrogénláng nem látható. Az oxigénnel alkotott 2:1 arányú keveréke szikra hatására robban (durranógáz), ugyancsak robban fény hatására a klórral alkotott 1:1 arányú keveréke. A robbanásveszély és a tűz terjedése főleg zárt térben veszélyes, szabadban a hidrogén kis molekulásúlya következtében gyorsan elillan. Nagy a tömegegységre eső kémiai energiája (141,8 MJ/kg) és szabad entalpiája (120 MJ/kg), de sűrűsége a normál állapotra jellemző gázállapotban kicsi, ezért 12,8 MJ/m³-es fűtőértéke kereken harmada a földgázénak. A hidrogén nem mérgező az emberi szervezetre és nem szennyezi a környezetet.

Az energetikában a hidrogén izotópjai is szerepet játszanak. Az atommagban a proton mellett egy neutron is tartalmazó deutérium (D) stabil izotóp, a természetes hidrogénben átlagosan 0,015% található. Egyes nukleáris reaktortípusok moderátor anyaga nehézvíz (D₂O vagy DHO). Az atommagban két neutronot tartalmazó trícium (T) radioaktív, előfordulása a természetben ritka. A trícium gyenge β sugárzó, felezési ideje 12,5 év, magreakciók terméke és az atomerőművek környezetszennyező anyagainak egyike. A deutérium és a trícium a fúzió tervezett üzemanyagai.

A hidrogént jelenleg sokoldalúan használják a vegyiparban, műtrágyagyártáshoz ammónia előállítására, metanol, propilén, hidrazin termelésére, élelmiszerek kezeléséhez, zsírok telítéséhez, a kőolaj-feldolgozás fontos segédanyaga (hidrogénezéshez, kéntelenítéshez, krakkoláshoz stb.), kitűnő hűtőközeg, rakéták üzemanyaga. Alkalmazzák autogénhegesztéshez, lángvágáshoz, a kohászatban ércredukcióhoz, és sok más feladatra. E sokirányú hasznosítás fontos ismereteket szolgáltat az energetikai felhasználás megvalósításához. Az energetikai célú hidrogéngazdaság gondolata az 1970-es években erősödött fel, nagy szerepet szánva a hidrogénnek egyrészt az energiaátvitelben, másrészt mint tüzelőanyagként és motorhajtó üzemanyagként. Az űrhajózás és a petrokémia tapasztalatai alapján a hidrogénnel kapcsolatos veszélyforrások uralhatók.

A troposzférában szabad hidrogén olyan kis koncentrációban fordul csak elő, hogy onnan gazdaságosan nem lehet kinyerni. Nagy mennyiségben hidrogén a természetben vegyileg kötött formában található, elsősorban vízben, de számtalan szerves és szervetlen vegyületben is. Kinyeréséhez legalább a reakcióhőt közölni kell, ezért a hidrogén nem bővíti a primer energiabázist (ezzel ellentétes nézetek gyakran jelennek meg a népszerűsítő irodalomban). A világtermelés évente kereken 400 Mrd m³, de ezt legnagyobb részét maguk a felhasználók állítják elő, kereskedelmi forgalomba ennek csupán 5%-a kerül. A vegyipar hidrogénszükségletét legnagyobb részben szénhidrogénekből – elsősorban földgázból – állítják elő pirolízissel, a metán és a vízgőz közötti reakció segítségével, a reakciótermék hidrogén és szén-dioxid. Előállítható kőolajtermékből is, nyomás alatti katalitikus oxidációval, parciális oxidációval, esetleg reformálással, katalizátorral vagy a nélkül. A nyersanyagként használt szénhidrogének maguk is előnyös tulajdonságú, könnyen szállítható energiahordozók, ezért azokból – jelentős energiabefektetés

árán – energetikai célra hidrogént gyártani nyilván nem érdemes. Régebben szénbázisú hidrogénfejlesztés is folyt, vízgőz befúvással (lényegében vízgázgyártáson keresztül). A szén tulajdonképp a segédanyag szerepét töltötte be, harmada a hőfejlesztést biztosította, a többi a vízbontás energiáját és a szén-oxidok képződését fedezte. A szénbázisú hidrogéngyártás azonban versenyképtelenné vált.

A hidrogén energetikai alkalmazásának egyik kulcskérdése olcsó előállítás. Az egyik irányzat a hidrogén fejlesztése elektrolízissel vízből. A víz elektrolízisének gazdaságossága egyrészt a villamos energia árán, másrészt a melléktermékként fejlesztett oxigén értékesíthetőségén múlik. Az elektrolízishez a vezetőképesség biztosítására a vízhez adalékanyagot kell keverni (pl. 25% kálilúgot), és folyamatosan biztosítani kell a koncentráció állandóságát. Az elektródákon 1:2 arányban válik ki O_2 és H_2 , az elkerülhetetlen veszteségek miatt az elméletileg szükséges $12,8 \text{ MJ/m}^3$ -nél több, átlagosan $15,2 \text{ MJ/m}^3$ energiát kell bevezetni. Egy óra alatt 1 m^3 hidrogén leválasztásához $2,39 \text{ kA}$ áram kell, a cellafeszültség elméletileg $1,48 \text{ V}$, de a veszteségek miatt $3,65 \text{ V}$ szükséges. A leválasztás hatásfokának felső határa 85%, de a gyakorlatban csak 65–70%-ot érnek el. A vízbontás hatékonyságának növelésére vannak elképzelések, a nyomás és a hőmérséklet emelésével, katalizátorok alkalmazásával, gőzfázisban végzett vízbontással $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ körül, cirkóniumtartalmú porózus elektrolitban stb., de ezek ipari alkalmazására nem került sor. Hőerőművekkel az eredő energetikai hatásfok meglehetősen alacsony (10–12%), a vízbontás rossz hatékonyságát tovább csökkenti a villamosenergia-fejlesztés vesztesége. Ezért az elektrolízis főleg vízerőmű és atomerőmű (nagy távlatban esetleg naperőmű) más fogyasztók számára nem értékesíthető áramtermelésével ígértes (pl. éjszakai árammal). Jelenleg az iparilag gyártott hidrogénnek csupán néhány százalékat állítják elő elektrolízissel. A vízbontásnak értékes mellékterméke az oxigén, annak racionális felhasználása nagyban növeli a hidrogénfejlesztés gazdaságosságát. Nagy mennyiségű oxigént igénylő technológiák (vas- és acélgyártás, oxigénes szénelgázosítás, szén-monoxid fejlesztés mészkőből stb.) ebben jelentős szerepet játszhatnak.

A legtöbb reményt a termokémiai vízbontáshoz fűzik. A víz pirolízise 2500 K felett kezdődik, a disszociáció hatásfoka 80% körül mozog, de fennáll a rekombináció és visszahülés veszélye. Ezért a figyelem inkább olyan lépcsőzetes reakciók felé irányul, melyek alacsonyabb hőmérsékleten ($800\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$) teszik lehetővé a vízbontást. A kutatások sokféle anyagkombinációval folynak, a legígéretesebbek a fém-oxidokkal és fém-halogenidekkel kialakított lépcsőzetes reakciók. A folyamatokat M jelű fém oxidjával az



reakciótípusok jellemzik. A lehetséges reakciók száma meghaladja a százat, de anyagtechnológiai okokból csupán néhánynak van realitása, a legígéretesebbek a klór- és jódvegyületek. Az átalakulásokat Fe–Cl, vagy Fe–S katalizátorokkal elő lehet mozdítani, de a termikus hatásfok 40–50%-nál nem jobb. Számításba jöhetnek fémhidrideket reoxidáló reakciók is. Kísérleteznek jobb átalakítási hatásfokot ígérő más utakkal is, így a víz fotolízisével, a bontási energia egy részét plazma ibolyántúli sugárzásával

közölve. Biokémiai reakciók is elképzelhetők, vannak hidrogént fejlesztő baktériumok (pl. a bíborbaktérium) és fénnel hidrogén leadására stimulálható kék (zöld) algák. Egyes baktériumokban és algákban található hidrogenáz enzim kölcsönhatása Fe- és Ni-tartalmú fehérjékkel hidrogén felszabadulásával jár. Ígéretes kísérletek folynak hidrogénfejlesztésre vízből fotokatalizátorok segítségével, amire olyan szilikonlapkás csip szolgál, melynek egyik felén Co-Mo ötvözet, másikon Fe-Ni-oxid van. Gazdaságos vízbontást ígér a magas hőmérsékletű atomreaktorok alkalmazása is. A fejlesztés alatt álló IV. generációs atomerőművek egyik prioritása, a magas hőmérsékletű vizes típus, ezt a célt is szolgálja.

A hidrogén csővezetékes szállíthatóságát tanúsítják olyan regionális hálózatok, melyeket többfelé kialakítottak iparvidékek ellátására hidrogénnel. A Ruhr-vidéken például 210 km-nyi csőhálózat van üzemben 25 bar nyomással, több mint 70 éve. A tapasztalatok eloszlatták azt a gyakran felmerülő aggodalmat, hogy a kis molekulásúlyból fakadó nagy mozgékonyosság révén a hidrogén megszökik a porózus hegesztési varratokon keresztül, viszont a csövek anyagának megválasztását befolyásolja, hogy bizonyos ötvözeteket a hidrogén nagy nyomáson elrövidíti. A hidrogén szállítására felhasználhatók a meglévő földgázvezetékek, de a szükséges nagyobb nyomás biztosításához 4–5-szörös kompresszor-teljesítmény kell. A hidrogén csővezetéki szállítására sokféle más elképzelés is felmerült, pl. szupravezetős kriokábel belsejében, koaxiális csőrendszer belső csövében semleges gáz nyomása alatt, cseppfolyósítva 14–20 K-en stb., de ezek csak rövid távolságra képzelhetők el.

Elvileg nagy mennyiségű hidrogén tárolható föld alatti üregekben, leművelt gázmezőkben, akviferekben. A gyakorlatban csak kisebb mennyiségek tárolására került sor nagy nyomáson komprimálva tartályokban, ilyenkor a robbanásveszély különös figyelmet kíván. Ez a hidrogéntárolás legolcsóbb módja, de a tárolt gáz sűrűsége a folyékony üzemanyagok (pl. benzin) tizedét is alig éri el. A kriotechnika fejlődése megnyitotta az utat a cseppfolyós tárolás előtt, amit az űrtechnikában mind a rakétáknál, mind a kilövőállomásokon széleskörűen alkalmaznak is. Azonos térfogatban egy nagyságrenddel több hidrogén tárolható folyékony halmazállapotban, mint nagynyomású gázban, de ez többszörös költséggel jár, a -253 °C -nál alacsonyabb hőmérséklet szükségessége miatt. Figyelemre méltó lehetőség a tárolás szilárd halmazállapotban, egyes fémhidrideknél a hidrogén megkötése, illetve felszabadítása a hőmérséklet és a nyomás változtatásával reverzibilis módon szabályozható. Az erre használható vegyületek általános képlete AB_5H_6 , ahol A többnyire valamelyik lantanida ritkaföldfém, B pedig Ni vagy Co. A $LaNi_5$ gyök például 20 °C -on 2,5 bar nyomás mellett 1 cm^3 anyagban 1 dm^3 H_2 -t köt le, ami a hasonló térfogatú cseppfolyósított hidrogén tömegének kétszerese. A keletkezett $LaNi_5H_6$ -ból a hidrogén 1 bar nyomáson felszabadul. Ugyancsak reverzibilis, hőbevezetéssel, illetve elvonással, vagy nyomásváltoztatással szabályozható hidrogénkapcsolatot lehet kialakítani magnéziummal és titánnal. A $FeTiH_2$ egységnyi térfogatában több a hidrogén, mint a cseppfolyós halmazállapotú hidrogénben, de a tömegarány rosszabb. Bizonyos víz-hidrogén keverékek 30 baron és 0 °C körül hexagonális kötésben fagyaszthatók meg, ami szintén számításba jöhet tárolásra. A szilárd kötési technológia ígéretes, de költséges.

Tüzelőanyagként a hidrogén legfőbb előnye, hogy az oxigénnel vízzé ég el, és nem változtatja meg a bioszféra összetételét. Gyorsabban ég a földgáznál, a láng hőmérséklete magasabb, és az égési hatások is jobb, viszont azonos térfogatú hidrogénmennyiség kerekben harmad annyi hőt szolgáltat, mint a földgáz. Mellékhatásai vannak, egyrészt a magas hőmérsékleten NO_x is képződik, másrészt nagy mennyiségű égése a mikroklimát befolyásolhatja, a páratartalom növekedésén, valamint a ködképződés és az esők gyakoriságán keresztül. Perspektív lehetőség a láng nélküli tüzelés, katalizátorral idézve elő az oxidációt $100\text{ }^\circ\text{C}$ körüli hőmérsékleten, ami az NO_x -képződést is kiküszöböli. A folyékony hidrogén kis fajsúlya és magas égéshőmérséklete révén kitűnően bevált nagy rakéták hajtására, az űrobjektumok jelentős hányadának fellövésénél folyékony hidrogén és oxigén üzemanyagot használnak. Ígéretesek a repülőgépek sugárhajtására végzett kísérletek komprimált hidrogéngázzal, az üzemanyag kis súlya mellett járulékos előny kedvező hűtési tulajdonsága. Sokféle kísérletet végeztek dugattyús motorok üzemeltetésére hidrogénnel. Az eredmények szokványos motorkonstrukciókkal is kedvezőek, a jó üzemi tapasztalatokat azonban ellensúlyozza a tárolás gondja, különösen járművek esetében, mivel a berendezések súlya és térfogata többszöröse a benzintartályokénak. Komprimált gáz használatakor az üzemanyag-ellátás miatt szállítandó súly a benzinhoz képest 15-szörösére, a térfogat 25-szörösére nő, a nyomásállékonyság és a robbanásveszély ellensúlyozása miatt. Folyékony hidrogén alkalmazásához az alacsony hőmérsékletet biztosító hűszigetelés és hűtőrendszer növeli a súlyt 3-szorosra és a térfogatot 4-szeresre. A tárolás fémhidridben 5-szörös súlyt és 4-szeres térfogatot kíván meg. Megfelelő átszellőztetéssel annak is elejét kell venni, hogy a párolgási veszteség ne robbanjon, ezért aránya a levegőben 4%-ot nem haladhat meg. A szokványos közlekedési eszközökben a hidrogén a jelenlegi előállítási technológia magas költsége miatt nem versenyképes.

A hidrogén szerepének kilátásait nagyban megnövelte a tüzelőanyag-cellák fejlődése, az űrhajózásban szinte kizárólag hidrogénnel működő tüzelőanyag-cellákat alkalmaznak. A szélesebb körű alkalmazás feltételeinek megteremtésére sokirányú K+F tevékenység folyik. Ez elsősorban a gépkocsikban (első lépésben autóbuszokban) történő hasznosításra irányul, aminek kulcskérdése az üzemanyag-ellátás módja. Valószínűleg itt várható a legkorábban a hidrogén üzemanyag gyakorlati alkalmazása. Az egyik irányzat a folyékony üzemanyag-ellátáshoz hasonló hidrogén-kúthálózat kiépítését tartja szükségesnek, és a gépkocsikra csak a hidrogén tárolásának és a tüzelőanyag-cella működtetésének feladata hárulna. Néhány országban 2000-ben megnyíltak az első komprimált hidrogén-üzemanyagárúsító kutak. Egy kiterjedt hidrogén-infrastruktúra kiépítése azonban rendkívül nagy költséget jelent, aminek a finanszírozhatósága valószínűtlen. A másik irányzat a jelenlegi infrastruktúrára alapoz, a hidrogénfejlesztés feladatát a járművekre terhelve. Mivel benzinnél hidrogént magas hőmérsékletű reformálással lehet előállítani, nagyobb kilátása van az üzemanyag-ellátásra a metanolnak, mert abból alacsonyabb hőfokon lehet a hidrogént előállítani. Mind a kőolajipar, mind a gépkocsigyártók sokat áldoznak e távlati elképzelések kutatására.

A hidrogén legnagyobb jövőjét a távolsági energiaátvitelben (300–400 km felett) látják, ha a földgáz nagyon megdrágul, vagy az ellátás nagyon beszűkül. Egyelőre a hid-

rogén szállítása sokkal drágább, mint a földgázé, azonos energiamennyiség átvitelének költsége mintegy 2–3-szoros, viszont a hidrogén szállítása csövön lényegesen olcsóbb, mint a villamos energiáé távvezetéken. Az előnyt azonban felemésztí a vízbontás és a végponton az eltüzeléssel történő villamosenergia-fejlesztés költsége. Nagy előnye a hidrogénnek a villamos energiával szemben a tárolhatósága. Magának a villamos energiának a közvetett tárolására is vannak elképzelések, pl. a völgyidőszakban atomerőművek áramával előállított hidrogénben, amiből csúcsidőszakban lehet villamos energiát fejleszteni. Az is felmerült, hogy a fogyasztóktól távoli erőművekből, pl. sivatagi naperőműből, vagy tengeri erőműből hidrogénben szállítsák el az energiát. Ma még nem ítéhető meg a hidrogén jövőbeli kilátása, az energiaátvitelben nemcsak a villamos energiával lesz versenyben, hanem az SNG-vel és a metanollal is, amit befolyásolni fog az atomenergia és a szén szerepének alakulása is. Az Egyesült Államokban kísérleti erőmű épült hidrogénre, ami a vízbontástól kezdve a tároláson keresztül a teljes vertikumot felöleli, tartós teljesítménye 600 kW, amihez csúcsidőben tüzelőanyag-cellával 50 kW, Stirling-motorral 25 kW járul. Hasonló rendszer létesítését tervezik az Európai Unióban is.

Figyelmet érdemlő kezdeményezés a hidrogén használata nagy távolságú hőszolgáltatásra. Az erre alkalmazott Adam–Eva rendszernél reaktorban hőközléssel a



reverzibilis endoterm reakciót hozzák létre. A metán–vízgőz keverékből hőközléssel szén-monoxid–hidrogén keverék keletkezik, az így nyert hideg gázt nagy távolságra lehet szállítani, a felhasználás helyén pedig 1 baron és 200 °C-on expandáltatva ellentett irányban folyik le az átalakulás, miközben felszabadul a kötési energiák rejtett hőként tárolt különbsége.

A hidrogéngazdálkodáshoz kapcsolódva vetik fel mint jövőbeli tüzelőanyagot a hidrazint ($\text{H}_2\text{N}-\text{NH}_2$). Ebben a folyadékban a legnagyobb a súlyegységre eső hidrogéntartalom, fűtőértéke 16 MJ/kg. Előnye, hogy nem tartalmaz szenet, így környezetszennyező hatása kicsi. Tengeraltjárók és rakéták hajtóanyagaként alkalmazzák, számításba jöhet tüzelőanyag-cellák üzemanyagául is.

6.5.2. A metanol szerepe

Egyes prognózisok (pl. IASA) a metanolt (metilalkohol, CH_3OH) tartják a legnagyobb jövőjű szekunder energiahordozónak a kőolajtermékek helyettesítésére. Az emberek először a faszénkészítés melléktermékeként találtak a metanollal, ekkor ragadt rá a faszész név. Előnyösebb szénhidrogénekből előállítani, mint biomasszából – elsősorban fa lepárlásából. Hidrogén és szén-monoxid katalitikus szintézisével állítják elő szintézisgázból, amit főleg metánban gazdag, kénmentes földgázból fejlesztenek gőzzel reformálva. Földgázbázison a metanolgyártás energetikai hatásfoka 60% körül mozog, az elérhető maximum 67%, vagyis az értékes földgáznak több mint harmada az energia-

átalakítás során veszteséggé válik. Ilyen alapon a metanol mint motorhajtóanyag nem válhat versenyképessé sem energetikailag, sem gazdaságilag. Hasonló a helyzet a kőolajtermékekből kiinduló metanolgyártásnál is, ami technológiailag szintén lehetséges.

A metanol számításba jöhet motorhajtóanyagként önállóan vagy más üzemanyagokkal keverve. Fűtőértéke csupán 22,7 MJ/kg, ami jóval kisebb, mint a kőolajtermékeké. Ez a járműhajtásnál nagyobb üzemanyag-fogyasztást és kisebb hatósugarat eredményez, mint a benzinüzem. Ez az egyik indítéka a kutatásoknak a metanolból benzint helyettesítő más anyagok előállítására. A kutatások másik oka a metanol kedvezőtlen tulajdonságaiban keresendő. A fémeket korrodálja, a műanyagokat lágyítja, párologáshője nagy, és hatása az emberi szervezetre mérgező. A környezetszennyezés szempontjából előny viszont az alacsonyabb égési hőmérséklet és kisebb égéslevegő-szükséglet, ezek következtében csak kevés NO_x keletkezik, és más kedvezőtlen égéstermék alig képződik.

A jelenlegi motorkonstrukció változtatása nélkül mintegy 15–25% metanolt lehet a benzinnel keverni, de ez azonos üzemanyagtartály-méret mellett a hatósugár 10–20%-os csökkenésével jár. A metanol bekeverése, nagy kompresszió túrése következtében, növeli az oktánszámot, de csökkenti a teljesítményt és a jármű hatósugarát, mert égési hőmérséklete és fűtőértéke alacsony. Kizárólag metanollal hajtott motorok a jelenlegitől eltérő konstrukciót igényelnek: az alacsony fűtőérték ellensúlyozására üzemanyagban gazdagabb keveréket előállító porlasztó szükséges. Párologáshője magas (1,1 MJ/kg, szemben a benzin 0,38–0,5 MJ/kg-jával), ezért a motor hideg indításánál előmelegítést igényel. Az üzemanyagot elő lehet melegíteni a kipufogógázzal, így a benzint teljesen nem is tudja helyettesíteni. Ehhez járul, hogy a metanol ára a jelenlegi technológiák alapján 50–100%-kal magasabb, mint a benziné. A műszaki és gazdasági hátrányok miatt a metanol egyelőre nem válhat a benzin komoly versenytársává, legfeljebb ellátási zavarok áthidalásában játszhat kisegítő szerepet.

Mindezek következtében használata üzemanyagként lekerült a napirendről, viszont előnyös alapanyagként tekintik más folyékony üzemanyagok szintéziséhez, pl. MTBE (metil-tercier-butil-éter) előállítására, amivel a benzint közvetlenül helyettesíteni lehet, és magas fűtőértéke, valamint kis vízzeloldási hajlama miatt előnyösebb motorhajtóanyag, mint maga a metanol. A metanol számításba jöhet más feladatokra is, pl. kazánok tüzelőanyagaként, elsősorban csúcsidejű villamosenergia-termelésre, nagy távolságú energiaszállításra, vagy tüzelőanyag-cellák üzemanyagaként szintézisgázból deriválva. Kutatások folynak előállítására szén-dioxidból, ami helyettesítheti a CCS-technológiákat. Kutatják, hogyan lehet metanolból különféle egyéb energiahordozókat előállítani. Amerikai közlések szerint az SNG-gyártásra jellemző metánosításnál olcsóbban lehet a metanolból közvetlenül 50% dimetil-éter, 33,3% hidrogén és 16,7% szén-monoxid keverékét előállítani, amivel közel egyenértékűen helyettesíteni lehet a földgázt. Biztatók a kilátások a metanolból benzin előállítására is. Bővíülhet az alkalmazása kémiai alapanyagként is, főleg ammónia és proteinek előállításánál.

Olyan javaslatok is vannak, hogy a cseppfolyósított földgáz szállítását metanolszállítással helyettesítsék. Így elmarad a cseppfolyósítás és a fogadóállomáson az elgázosítás, a különleges LNG-szállítóhajók helyett a metanolt közönséges tartályhajókban lehet szállítani. A két variáns gazdasági összehasonlítása nem ismeretes, mindenesetre az

átalakítás nagy energetikai vesztesége nem vonzó, ezért az elgondolást időszerűtlennek tartják.

A metanolgyártás akkor nyerne energetikai létjogosultságot, ha egyébként nehezen hasznosítható, vagy szállíthatatlan energiahordozókból sikerülne olcsón előállítani. Potenciálisan számításba jöhet szén, olajpala, hulladék, sőt biomassa is. Egyesek a szén-eligázosításon alapuló SNG-gyártás kapcsolt termékeként javasolják a metanol előállítását. A nukleáris energiát elsősorban villamosenergia-fejlesztésre lehet hasznosítani, a villamosenergia-igény azonban korlátozott. A nukleáris energiát viszont több olyan folyamathoz fel lehet használni, ami a metanolgyártáshoz szükséges, így a szén eligázosításához és cseppfolyósításához, valamint hidrogéngyártáshoz elektrolízis révén, vagy a nukleáris hő hasznosításával.

6.6. Hőfejlesztés

A vegyipar, kohászat, élelmiszeripar és sok más technológia folyamataiban fontos szerepet játszik az exoterm kémiai reakciók hőfejlesztése, egyrészt az endoterm folyamatok fenntartásában, másrészt a reakció-feltételek (hőmérséklet, nyomás) biztosításában. Kiemelkedő jelentősége van a tüzelőanyagok égésének, ami meghatározó szerepet játszott az emberiség fejlődésében.

6.6.1. A tűz meghódítása

A tűz hasznosítása vitathatatlanul az energetika legnagyobb vívmánya volt, sokan ezt tartják az állati és emberi lét választóvonalának. Hiába voltak kőkorszakbeli őseink nagyon leleményesek a táplálékszerzés és az önvédelem módszereinek tökéletesítésében, de ha nem lettek volna képesek szolgálatukba állítani a tüzet, aligha maradtak volna fenn sikereiket méltányoló utódaik.

A természetben a tűz kiszámíthatatlan és pusztító erőként nyilvánul meg, tűzhányók, erdőtüzek, villámcsapások alakjában. A tűz meghódítása évtizedekig tartó keserves tanulási folyamat lehetett az ősember számára, amíg a félelmetes természeti erő barátta változott. Ennek első lépése vélhetően akkor történhetett, amikor egy őszünk odébb lökött egy zsarátnokot, és rádöbbsent, hogy a tűz máshová is áthelyezhető. Szinte hallja az ember az akkori oppozíciót: be ne hozzátok a barlangba, mindannyian meg fogunk fulladni; a gyerekek bele fognak esni és szénné égnék; elődeink barlangjában sem volt tűz, nekünk sem kell...

Kétségtelenül sok ősember eshetett áldozatul, megrokkantak, vagy szénné égtek, amíg megértették, hogyan lehet a vad erőt barátságos tábortüzzé szelídíteni, hogyan lehet a visszamaradó izzó zsarátnokot ártalmatlanná tenni, hogyan lehet üreges csontokban a parazsat ide-oda szállítani. A tűz barátta vált, de a barátsággal óvatosan kell élni, nehogy a falánk lángok táplálékot keressenek maguknak. Elég egy eldobott izzó cigarettacsikk, vagy egy rossz helyre kipattanó szikra egy pusztító tűz kiváltásához, amiben

épületek, üzemek, erdők éghetnek le. Magyarországon a tűzoltók évente tízezret jóval meghaladó esethez vonulnak ki, sok ember sérül meg, halálesetek sem ritkák az égési sérülések, vagy a fojtó füst következtében. És milliárdokra tehető az anyagi kár. Több száz ember halálát követelő tűzvész száz éve nem volt Magyarországon, de 1970-ben újjá kellett építeni a Dunamenti Hőerőmű egyik blokkját egy kábeleken szétterjedő tűz miatt.

A régészek szerint az ember az alsó paleolitikorban barátkozott meg a tűzzel. Számos korabeli barlangban találtak átégett földfoltokat, nagy hamurétegeket, a kezdetleges tűzhelyek első emlékeit. A neandervölgyi ember településeinek már rendszeresen megtalálni a tűzhelyek nyomait, ahol rőzsét és mindenféle szerves hulladékokat tüzeltek el.

Ahogy őseink megbarátkoztak a tűzzel, annak egyre több előnyére derült fény. A tűz meleget áraszt, elviselhetővé téve a hideg éjszakákat, és a teleket. A tűz melege kiterjesztette az emberi életteret, ez tette lehetővé az ember elterjedését a Föld hidegebb klímaövezeteiben, és ez segített a jégkorszakok átvészelésében. A tűz fénye megtöri az éjszaka sötétjét, meghosszabbítja a napot, és a hasznos tevékenység időszakát, mellette könnyebb elviselni a veszélyekkel teli külvilág nyomasztó súlyát. Egy felragadott égő fáag – a fáklya őse – lehetővé teszi a tájékozódást az éjszakában is.

Az őseink barlangjában fellobbant tűz nemcsak meleget és fényt szolgáltatott, hanem védelmet is jelentett a ragadozó fenevadak és a gyötrő rovarok ellen. Egy izzó fahasábbal el lehet riasztani a legfélelmetesebb ragadozót, füstje elűzi a rovarokat, lángja védelmezi a barlangban hátrahagyott csecsemőket, őrzi a nyugodt éjszakai pihenést. Nagy változást eredményezett a tűz a táplálkozásban, ahogy lehetővé tette a hús megsütését. A könnyebben emészthető sült hús pedig, előmozdítva az agy fejlődését, felgyorsította a fajfejlődést. A jobb táplálkozást segítette elő a főzés felfedezése is, valószínűleg annak felismeréséből, hogy egy faedényben izzó kődarabok bedobálásával fel lehet forralni a vizet. A tűznek az összetartozást előmozdító ereje is említést érdemel, kondenzációs magként gyűjtve maga köré az embereket, kicserélhetők a nap tapasztalatai, és megbeszélhetők a másnapi teendők.

A tűz azonban nemcsak barát, hanem zsarnok is volt, mert éjjel-nappal táplálni kellett rőzsével, éghető hulladékokkal. Az emberek ugyanis csak táplálni és fenntartani tudták a természet által keltett tüzet, gerjeszteni nem. Őseink minden éghető szerves anyagot eltüzeltek, ami kezük ügyébe került, fadarabokat, trágyát, állati és növényi hulladékot. Iszonyatos munka lehetett a kőkorszak folyton égő tűzhelyein a falánk lángok állandó táplálása. Elég volt egy kis figyelmetlenség, vagy a természeti erők valamilyen szeszélye, hogy a tűz kialudjon, a komfort semmivé váljon, és az emberekre ismét rázuhanjon a sötétség a hideg, a félelem. Nem meglepő, hogy e létfontosságú, de kiszámíthatatlan erő szolgálata helyenként még emberáldozatot is megkövetelő tűzimádatá váltzott. Szelídebb formában a tűz kultikus tiszteletének a nyomai a későbbi vallásokba is átöröklődtek. A lángok sok egyház szertartásain ma is ott lobognak az oltáron, gyertyákat és mécseseket gyújtanak az ősök emlékére, a hitélet nagy személyiségeinek a tiszteletére, de még a vallásoktól független társadalmi és politikai eseményeken is megjelennek a fáklyák, lampionok, gyertyák.

Létezhet-e nagyobb varázslat, mint megszabadítani az emberiséget a tűz állandó fenntartásának terhes gondjától, ellopni a tűzgyújtás titkát az istenektől? Az igazi Promé-

theusz a középső paleolitikorban élt. Talán annak az ősöknek az emlékét őrzi a legenda, aki fadarabok dörzsölésével először fedezte fel a mesterséges tűzgyújtás módját, talán egy későbbi feltalálót, aki valamilyen jobb módszert kísérletezett ki. Bizonyára nagy hatalom is összpontosult a tüzet gerjeszteni is képes varázslók kezében, a tűz őrzői és csiholói az ősi közösségek legfelelősségteljesebb funkcionáriusai közé tartoztak. A varázslat azonban szertefoszlott, ahogy a tűzgyújtás csodája mindennapos tevékenységgé egyszerűsödött, és a tűz keltésére alkalmas módszerek széles körben elterjedtek. A fa dörzsölésével fűrészpont, vagy más éghető anyagot felizzító szerkezetek, fémen huzigált kovakővel szikrát keltő tűzszerszámok, taplóval lobbantva lángra a szikrát, és más hasonló módszerek ugyan megfosztották a tűzgyújtást mágikus jellegétől, de a gyufa feltalálásáig egyszerűbb volt a tüzet fenntartani, mint újra gyújtani.

A tűz használata nemcsak az életkörülmények radikális átalakulását eredményezte, hanem új lehetőségekkel is gazdagította az emberek tevékenységét. A technika történetének jelentős része tulajdonképp arról szól, hogyan tudjuk az égésnél felszabaduló hőt hatékonyabban és sokoldalúbban céljaink szolgálatába állítani. Egy 1 kg-os fadarab elégetése több energiát szolgáltat, mint amennyit fizikai munkával egy szorgalmas ember egy nap alatt teljesíteni tud.

A fejlődés nemegyszer azon múltott, hogyan ismerték fel azokat a váratlan jelenségeket, amelyeket a tűz melege létrehoz. Az első termikus megmunkálási folyamat valószínűleg fadárdák hegyezése és edzése volt. Hamar rájöhettek, hogy a tűzzel erdőt is lehet irtani, hogy területet nyerjenek a növénytermesztéshez. Az első kézműves mesterség, a fazekasság is a tűznek köszönheti megszületését a neolitikorban. Valószínűleg néhány, véletlenül a tűzbe esett tapasztott kosár nyomán jöttek rá arra, hogy az agyag cseréppé szilárdul, és abból célszerű formájú edényeket lehet égetni. Természetesen nemcsak a hőhasznosítás technikája fejlődött, hanem a tüzelési és hőátzarmaztatási módszerek is. A kőkorszak vége felé a cserépedényeket már égetőkemencékben állították elő, amihez rá kellett jönni a tüzelés szabályozásának módjára is.

Azt is észrevették, hogy a természetben talált arany- és rézrögök könnyebben formázhatók, ha azokat előzőleg felmelegítik, vagy felizzítják. Innen már „csak” egy lépés az olvasztás, az első metallurgiai művelet valószínűleg e rögök megolvasztása és tömörítése volt szabad tűzön. E „korszakalkotó” lépések véget vetettek a kőkorszaknak, megkezdődött a fémkor. Az arany és réz után más alacsony olvadáspontú fémek – ezüst, ón, ólom – megmunkálása is megindult. A fémek kinyerésének és feldolgozásának technikája a tüzeléstechnikával nagyon szoros összhangban fejlődött. Ez előbb-utóbb elvezetett a karbonátos rézérccek redukálásához, az első kohósítási művelethez. Ehhez azonban magasabb hőmérsékletre volt szükség, mint ami szabad tűzön elérhető, viszont át lehetett venni a cserépkészítéshez használt jó huzatú égetőkemencék tapasztalatait.

Idővel rájöttek, hogy az elszenesedett fa tüzelése megkönnyíti a fémek kinyerését. A majdnem tiszta karbonból álló faszén magasabb hőmérsékleten ég, mint a nyers fa, és ezen a magas hőfokon a karbon redukálni tudja az érc oxigénjét. Mintegy 6000 évvel ezelőtt kezdték alkalmazni a faszénnel fűtött olvasztókemencéket, elterjedésük nyomán a réz bővebben állt rendelkezésre. Tökéletesedett az olvasztás és az öntés technikája is, jelentős előrelépés volt a réz és az ón ötvözetéből kialakított bronz megjelenése.

A bronznak alacsonyabb az olvadáspontja, így könnyebben önthető, ugyanakkor sokkal keményebb, mint a réz.

A fémeket kezdetben csak díszítésre használták, mivel ritka és drága anyagok voltak. A gyakorlati hasznosítás valószínűleg fegyverek készítésével indult bronzból, melyek nagyon hatásosak voltak mind az állatokkal, mind az emberekkel szemben. Később a fontosabb kézművesszerszámokat is kezdték fémről készíteni, használatuk ugrásszerűen növelte a termelékenységet. A fémszerszámok minősége sokkal jobb, mint a kőeszközöké, célszerűbb alakra formálhatók, elkészítésük sokkal kevesebb munkát kíván, viszont tartósabbak. A fémedények nagy előnye, hogy nem repedeznek a tűzön. A fejlődésből a mezőgazdaság sem maradt ki. Fémszerszámokkal könnyebbé vált a talajművelés, nőtt a termelékenység és a megművelhető földterület nagysága, a földművelés bővülésével javult a népesség táplálkozása.

A fémeszközök terjedése befolyásolta a társadalom rétegződését is, meggyorsította a földművelés és az állattenyésztés szétválását, valamint a kézműves szakmák fejlődését. A kézművesség előrehaladását ösztönözte az égés intenzifikálása és a hőfejlesztés módszereinek tökéletesítése is. Számos sok hőt felhasználó mesterség alakult ki a bronzkori Egyiptomban és Mezopotámiában, fémöntő, arany- és rézműves-, pék-, serfőző, mosodás, üvegfúvó, fazekas-, téglágetető műhelyek jöttek létre.

De a réz- és bronzkor még nem igazi fémkor. A rézércek ritkák, réztartalmuk alacsony, és a kor kohászata még nagyon kezdetleges. Ezért még nehéz volt hozzájutni a fémről készült eszközökhöz, azok lassan terjedtek el, a legtöbb használati tárgy továbbra is kőből, fából és csontból készült. A minőségi változást a vas megjelenése jelentette mintegy három-négy ezer évvel ezelőtt. A vasércek egyenletesebben oszlanak el a Földön, és sokkal nagyobb tömegben találhatóak, mint a rézércek, ugyanakkor fémtartalmuk is sokkal nagyobb – mindez a vas sokkal szélesebb körű elterjedését tette lehetővé. A vas használata sok előnnyel járt, ezért rohamosan terjedt, de előállításának módja szakmai titok maradt. Az ókori kovácsok a vasgyártás titkát csak halálos ágyukon adták tovább az utódaiknak.

Kezdetben az ércdarabokat nyílt tűzön pörkölték, majd gödörben redukálták faszénnel. A vasérc redukációjához, a vas olvasztásához és megmunkálásához magasabb hőmérsékletre van szükség, amihez tovább kellett fejleszteni a tüzeléstechnikát. A hőmérséklet növelhető az égést gyorsító több levegő bejuttatásával. Erre a célra megjelentek a kézzel, illetve később lábbal hajtott fűjtatók, az első fűjtatót ábrázoló dombormű Egyiptomból származik, i. e. 1580-ból. Az agyagkemencében levegő befűjtásával kialakított bucatüzelés maradt a vasgyártás fő eljárása a középkor végéig, az közvetlen redukcióval tulajdonképp gyenge minőségű acélt állított elő.

A tüzeléstechnikával szoros kölcsönhatásban gyorsan fejlődtek a kézműves technológiák. A különféle anyagok és termékek előállításához és formázásához többnyire szükséges valamilyen termikus művelet, melegítés, olvasztás, főzés, lágyítás, forralás, elpárolgztatás stb. E folyamatok sebességét és minőségét a termikus paraméterek határozzák meg. A technológia fejlődése kikényszerítette a tüzelés tökéletesítését, a hőfejlesztés fejlődése pedig lehetővé tette a technológia továbbfejlesztését. A kézműves szakmák köre gyorsan bővült, Párizsban a 16. század elején már több mint 300 céhet tartottak nyilván, a fejlett civilizációkban megjelent az árutermelés.

A fejlődő ipart azonban a bucakemencék nem tudták ellátni elegendő és megfelelő minőségű szerkezeti anyaggal. A megoldást a vízikerek alkalmazása jelentette a fűjtatók működtetésére a 17. században. A megnövelt légáram magasabb hőmérsékletet eredményezett az ércolvasztáshoz, magasabb kemencéket lehetett építeni, megszülettek az első igazi kohók. Ezekben nagy mennyiségű öntöttvasat termeltek, és idővel arra is rájöttek, hogyan lehet a kezdetben selejtnek tekintett nyersvasból egy második olvasztással acélt előállítani. Ilyen technikai bázis már nagy tömegben tudott vasat és acélt biztosítani, megnyitva az utat az ipari fejlődés előtt. A kohászat termelésének növeléséhez a következő nagy lökést ismét az energetika adta, a fűjtatók működtetéséhez a gőzgép bevezetésével. A 19. század második felében a tüzelési eljárások tökéletesítése segítette elő a minőségi acélgyártás új módszereinek kialakítását (Bessemer, Thomas, Siemens-Martin kemencék). A fémek előállítása és megmunkálása mindvégig szorosan összefonódott és összefonódik ma is az energetika fejlődésével.

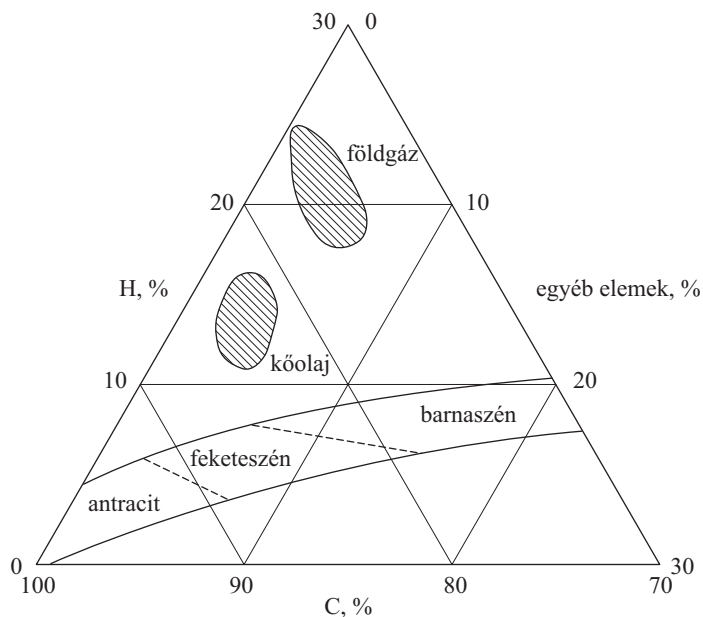
Számos más technológia fejlődése is a tüzelés módjának alakulásától függött, pl. az élelmiszeripar, az építőanyag-ipar, vegyipar. Napjaink szerteágazó ipari (és bizonyos mértékig a mezőgazdasági) termelési folyamataiban gyakran van szükség anyagjellemzők módosítására, állapotjellemzők változtatására, kémiai reakciók kiváltására, fizikai változások előidézésére. Ezeket legtöbbször hő bevezetésével, vagy elvonásával érik el, ami mögött többnyire tüzelőanyagok égése zajlik.

Kevés olyan modern technológia található, ami ne lenne valamilyen kapcsolatban tüzelőanyagok égetésével, még az űrhajókat magasba emelő rakétákból kiáramló lángcsóva is azt jelzi, hogy a szükséges tolóerőt tüzelőanyagok égése biztosítja. A tűz a kőkorszak kis tűzrakásaitól nagy ívű pályát futott be az űrbe történő kilépésig, de vajon a fejlődés ezzel véget ért-e, vagy várnak még ránk meglepetések?

6.6.2. Tüzelőanyagok égése

A világ jelenlegi energiefelhasználásának mintegy 80%-a tüzelőanyagok elégetésére alapul, az arány a magyar energiamérlegben is hasonló. A tüzelőanyagok égésénél a főszerepet a karbon és a hidrogén játssza, ezek arányát az elemi analízis alapján a 6.1. ábra szemlélteti. Az égésnél lejátszódó fontosabb reakciók a 6.10. táblázatban láthatók. Tökéletes égésnél a karbonból szén-dioxid, a hidrogénből víz keletkezik (6.19, 6.20 egyenletek). A tüzelőanyagokban elemi analízissel kimutatott C és H atomoknak csak egy része vesz részt az oxidációban, mivel van éghetetlen vegyületekben (pl. karbonátokban, vízben) lekötött hányaduk is. A hőfejlődéshez esetenként a kén oxidációja is hozzájárul, ami azonban nem maradéktalanul haszon, a kén-oxidok káros hatása miatt. A tüzelőanyagok az éghető elemeken kívül számos egyéb alkotót is tartalmaznak, e ballasztanyagok befolyásolják az égés lefolyását.

A tüzelőanyagok égése fizikai és kémiai változásokból álló, nagyon összetett folyamat. Lefolyását nemcsak a tüzelőanyag halmazállapota, szerkezete és összetétele szabja meg, hanem sok külső körülmény is, a hőmérséklet, a nyomás, a tartózkodási idő a tüztérben, a keveredés módja az oxigénnel stb.



6.1. ábra. Tüzelőanyagok elemi összetétele

6.10. táblázat. Az égés fontosabb reakciói

	Reakció	Megjegyzés
6.19	$C+O_2 = CO_2$	reakcióhő 36,8 MJ/kg
6.20	$H_2+O = H_2O$	reakcióhő 144 MJ/kg
6.21	$S+O_2 = SO_2$	reakcióhő 10,4 MJ/kg
6.22	$CO+O = CO_2$	
6.23	$H_2S + \frac{3}{2}O_2 = H_2O + SO_2$	
6.24	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	
6.25	$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	
6.26	$C_2H_6 + \frac{7}{2}O_2 = 2CO_2 + 3H_2O$	
6.27	$C_mH_n + \left(m + \frac{n}{4}\right)O_2 = mCO_2 + \frac{n}{2}H_2O$	
6.28	$C + O = CO$	tökéletlen égés
6.29	$C_mH_n + \left(\frac{m}{2} + \frac{n}{4}\right)O_2 = mCO + \frac{n}{2}H_2O$	tökéletlen égés
6.30	$CH_4 + O_2 \rightarrow C + 2H_2O$	koromkiválás
6.31	$2CO \rightarrow C + CO_2$	koromkiválás
6.32	$CO_2 + 2H_2 \rightarrow C + 2H_2O$	koromkiválás

Az égéshez szükséges oxigént többnyire levegő bevezetésével biztosítják. A sztöchiometriailag meghatározott levegőmennyiséggel azonban nem lehet tökéletesen elégetni a tüzelőanyagot, mert egyrészt az éghető anyag keveredése a levegővel nem tökéletes, másrészt az anyagok idő előtt kiáramlanak a reakciótérből. Ezért az elméletileg szükségesnél több levegőre van szükség az égésnél, a légfelesleg tényező a tüzelőanyagtól és a tüzelőberendezéstől függ. Jól szabályozott szénhidrogén-tüzelésnél a többlet néhány százalék, szénportüzelésnél 20–30% is jó érték, darabos széntüzelésnél 40–50% is szükséges lehet, kályhák kézi tüzelésénél 80–100% is előfordulhat. Kohászati technológiáknál használnak levegőben szegény tüzelést is, ilyen redukáló atmoszférában a tüzelőanyag a jelen levő oxidokból vonja el az oxigént.

Gyakorlati okokból a légfelesleg sem biztosít tökéletes égést, ilyenkor a karbon egy része csak szén-monoxiddá ég el, korom is képződik, az égéstermékekben elégtelen tartományok távozhatnak (elégtelen gázok, szálló koks, salakéghető, pernyeéghető). A légfelesleg növelésével ez csak részben ellensúlyozható, viszont a túl sok levegő növeli a füstgázban távozó hőveszteséget, romlik az energetikai hatásfok, nő a környezetszennyezés és a korrózióveszély.

A folyamatok során maguk a tüzelőanyagok is fizikai és kémiai változásokon mennek keresztül, melyek annál összetettebbek, minél bonyolultabb molekulákból épülnek fel, és minél heterogénebb a szerkezetük. Az égés során az összetett, bonyolult szénhidrogén-molekulák egyszerűbbekké bomlanak le. Egyes folyamatok számottevő hőelvonással járnak, így halmazállapot változások, a szilárd anyagok kigázosítása, a molekulák termikus disszociációja, a salak konzisztenciájának változásai (lágyulás, olvadás), az endoterm kémiai reakciók, pl. vegyületek pirolízise, vagy a hamualkotás néhány folyamata.

Az égéshez a tüzelőanyagot legalább a gyulladási hőmérsékletig (6.11. táblázat) fel kell melegíteni. A felmelegedés során előbb a nedvességtartalom távozik el, majd gázok és gőzök formájában az illók lépnek ki, melyek nagy része éghető.

Az illók teljes körű kiválása után éghető szilárd vagy képlékeny anyag (koks, pakura) és hamu marad vissza. Megjegyzendő, hogy katalizátorral a gyulladási hőmérséklet alatt is biztosítható az égés, amit kisebb hőfejlesztő készülékeknel ki is használnak, láng nélküli exoterm reakcióban égetve el a gázokat. Más módszerekkel is előidézhető a gyulladás, pl. szikrával (benzinmotorok), vagy zárt térben kompresszióval (dízelmotorok).

6.11. táblázat. Tüzelőanyagok gyulladási hőmérséklete levegőben

Tüzelőanyag	Gyulladási hőmérséklet, °C
Gázolaj, tüzelőolaj	240–250
Benzin	350–500
Generátorgáz	650
Szén-monoxid	600
Hidrogén	450
Metán	650
Városi gáz	450
Etilén	480
Propán-bután	650–750

Tüzelőanyag	Gyulladásási hőmérséklet, °C
Fa	300
Légszáraz tőzeg	240–280
Fiatal barnaszén	250–300
Idős barnaszén	350–400
Feketeszén	400–500
Kocsz	500–600
Antracit	500–550

A gyulladás után az égés zónája a térben kiterjed, az erre jellemző égési sebesség 0,3–10 m/s, a tüzelőanyag jellegétől és a tüzelés módjától függően. A kiterjedés sebessége gázok és gőzök égésénél bizonyos nyomás- és hőmérsékletviszonyok esetében nagyságrendekkel megnő (1–3 km/s), és robbanás következik be. A szokásos égéstől eltérően robbanásnál a folyamat továbbterjedését nem anyagtranszport biztosítja, hanem az égő tartományból kiinduló nyomáshullámok adiabatikusan a gyulladásási hőmérsékletig komprimálják a gázkeveréket, a tér nagy részében szinte egyidejűleg következik be a gyulladás. Mivel a robbanás feltételei csak a reakcióban részt vevő elemek bizonyos sztöchiometriai arányánál teljesülnek, a robbanás lehetősége csak az alsó és felső robbanási határ közötti arányoknál áll fenn. A 6.12. táblázat e határokat mutatja néhány anyagra.

6.12. táblázat. Robbanási határok levegővel alkotott elegyben 1 bar nyomáson

Gáz, gőz	Robbanási határ, térfogat %	
	Alsó	Felső
Hidrogén	4,1	74,0
Szén-monoxid	12,5	74,0
Metán	4,1	14,0
Etán	3,2	12,5
Propán	2,4	9,5
Bután	1,6	8,5
Acetilén	2,5	80,0
Benzin	1,2	7,0
Generátorgáz	30,0	75,0
Torokgáz	40,0	65,0
Olajgáz	3,4	7,8
Vízgáz	6,0	70,0
Városi gáz	6,0	35,0
MAPP ⁸⁴	2,0	14,5

A belső égésű motorokban a nyomás az 1 bar sokszorososa, ennek megfelelően a robbanás tartománya sokkal szélesebb. A belső égésű motorok a robbanást használják ki

⁸⁴ Metil-acetilén-propadién-propán.

munkavégzésre, a hőfejlesztést szolgáló tüzelőberendezésekben viszont a robbanás megengedhetetlen, az nemcsak a berendezést károsítja, hanem életveszélyes is. Ennek megelőzéséről gázzal működő tüzelőberendezéseknél megfelelő védelmek és automatikák beépítésével gondoskodnak, és lángörrel kell megakadályozni, hogy a láng kialakása után ne következhesen be újragyulladás. Ennek ellenére a technológiai előírások megszegése számos súlyos balesetet okozott.

A tüzelőanyagok használati értékének legfontosabb jellemzője a stationer égésből nyerhető hő. Ennek fajlagos értékét a kémiai elemzésekben az égéshővel, a gyakorlati alkalmazásokban a fűtőértékkel (6.13. táblázat) jellemzik. A legfontosabb különbség, hogy az utóbbiban nem szerepel a gőz formájában távozó nedvesség hőtartalma.

6.13. táblázat. Fontosabb tüzelőanyagok fűtőértéke

Tüzelőanyag	Fűtőérték, MJ/kg
Fa	9–17
Faszén	31
Tőzeg	6,5–17
Lignit	3,5–10
Barnaszén	21–25
Feketeszén	25–33,5
Antracit	34,5–35,5
Koksz	25–31,5
Tüzelőolaj	42
Fűtőolaj	41–42
Pakura	38
Földgáz	18–40
PB-gáz	45–47
Benzin, gázolaj	43

A legegyszerűbben és leghatékonyabban a gázokat lehet eltüzelni, mert azok jól keverednek az égést tápláló levegővel. A lángban kezdetben pirogén disszociáció alakul ki, majd szén-monoxid és hidrogén képződik, ami szén-dioxidá, illetve vízgőzzé ég el. A gázégés nagyon kevés hamuval jár, gyakorlatilag csak gáznemű égéstermék képződik. A tüzelőberendezések olcsók, könnyen és jól szabályozhatók, illetve automatizálhatók, a berendezések elhasználódása lassú, kevés karbantartást igényelnek. Kevés légfeleslegre van szükség, ennek megfelelően jó hatásfok és magas hőmérséklet jellemzi az égést. A robbanásveszély miatt biztosítani kell a gáz-levegő megfelelő arányát. A kis légfelesleg miatt fontos a gáz–levegő arány helyes beállítása, túl kevés levegőnél a hidrogén nagyobb égési sebessége miatt a karbon egy része korom alakjában válik ki, túl sok levegő növeli a füstgáz mennyiségét. Többnyire levegővel elkeverve égőkön keresztül juttatják be a gázt az égőtérbe, ha a kiáramló gáz sebessége meghaladja az égési sebességet, a láng leszakad és kialszik.

A folyadékok forráspontja mindig alacsonyabb a gyulladási hőmérsékletnél, ezért a folyadékok mindig csak gőzfázisban égnék a gázokhoz hasonlóan. A hő hatására a nagymolekulájú szénhidrogének egyszerű gázokra, instabil atomcsoportokra és elemi kar-

bonra bomlanak. A gyulladáspont annál magasabb és az égés annál vontatottabb, minél nagyobbak a molekulák és minél nagyobb a szénatomok száma a szénhidrogénekben. A keveredés egyenlőtlenebb, mint gáznál, ezért nagyobb légfelesleg szükséges. Az égéstermékek legnagyobb része gáznemű, minimális mennyiségben előfordul szállóhamu, és túl kis légfeleslegnél koromkiválás. Az olajokban előfordulnak kokszolódásra hajlamos alkotók, egyes ásványi szennyezők (V, S) pedig korróziót okozhatnak. A folyékony tüzelőanyagokat is égők segítségével tüzelik el, a diszpergáláshoz vagy finom eloszlású köddé porlasztva fűjják be, vagy – ha nem hajlamos kokszolódásra – forró felületen párologtatják el. Az égés jól szabályozható, de figyelemmel kell lenni a tűzveszélyre. A berendezések elhasználódása gyorsabb, mint gáztüzelésnél és több karbantartást igényelnek.

A legbonyolultabb folyamat a szilárd tüzelőanyagok égése. A hő hatására a tüzelőanyagból elillanó éghető gázok és gőzök biztosítják a gyulladást és gázkeverékként égnak. A visszamaradó izzó szilárd anyag a határfelületén oxidálódva sokféle fizikai és kémiai folyamat közben bomlik le és ég el. A gázfázisú égéstermékek mellett szilárdak (salak, pernye, hamu, koks) is keletkeznek, azok belsejében a tökéletlen égés miatt kiégetlen tartományok is maradnak. Az égést nehezebben és lassabban lehet szabályozni. A tüzelőberendezések bonyolultak, fokozottan ki vannak téve koptató hatásnak, korrózióknak, elpiszkolódásnak, rendszeres és sokirányú karbantartást igényelnek. A darabos szilárd tüzelőanyagokat kisebb berendezésekben égetőfelületekre, többnyire azonban rostélyokra helyezve égetik el, a szénport égőkön keresztül juttatják a tűztérbe. A tüzelés annál több légfelesleget igényel, minél durvábbak a darabok, a porszéntüzelésnél a porszemek nagy fajlagos felülete jobb keveredést és az égés jobb hatásfokát biztosítja. A tüzelőberendezések bonyolultak, fokozott elhasználódásnak vannak kitéve. Az áramló szén és a szilárd égéstermékek koptatják a szerkezeti anyagokat, a salak és a pernye lerakódhat a felületekre, az agresszív alkotók a berendezések korrózióját okozzák.

6.6.3. Tüzelőberendezések

A tüzelőberendezések alapvető rendeltetése hőfejlesztés, és ennek érdekében a tüzelőanyag és az égéslevegő kölcsönhatásának biztosítása. A műszaki fejlődés hosszú útja vezetett a nyílt tűzhelyektől korunk bonyolult tüzelőberendezéseibe. A legősibb hőforrások a tűzhelyek, melyek a hőt nyílt térrészen vagy egyszerű zárófelületen keresztül származtatják át. Energetikai hatásfokuk alacsony, és az égés alig szabályozható, ezért a legtöbb alkalmazási területről kiszorultak. Hatásukat az emberiség fejlődésére és a technika kibontakozására azonban nehéz túlbecsülni. Utódaik a melegítésre – főleg ételkészítésre – használatos tűzhelyek nevüket még akkor is megőrizték, amikor a tűz szerepét a villany vette át.

A tüzelőberendezések legnagyobb családját a kályhák képviselik, elsősorban légterek egyedi fűtésére szolgálnak, csökkenő mértékben anyagok felmelegítésére is használatosak. A kályhák a hőt hőtároló közeg közvetítésével adják le, teljesítményük 1–10 kW között mozog. A hőfejlesztés jellegétől és a fűtés módjától függően sokféle kályhatípus létezik. Darabos szilárd tüzelőanyagokhoz legegyszerűbbek az acéllemez vagy öntöttvas

köpenyű, kis hőkapacitású vaskályhák. A samott bélésű cserépkályhákat nagy hőkapacitás jellemzi. Építenek lassan égő aknás kályhákat, az egyaknásoknál az égés felül, a tüzelőanyag tetején zajlik. A kétaknás (folytonégő) kályhákban alul ég a szén, ami az egyik aknából kapja az utánpótlását, a második aknában – hőátzármatatás közben – távozik a füstgáz.

A kályhatüzelés szilárd tüzelőanyagokkal munkaigényes, és szennyezéssel jár. Ezek a hátrányok elesnek a gázkályháknaál, melyeknél csak a robbanásveszélynek és a gázömlésnek kell elejét venni megfelelő konstrukciós megoldásokkal. Sokféle megoldás kapható, egyszerű falikályha, parapet alá szerelhető konvektor, cserépkályhába szerelhető égő stb. Az olajkályhák használata kevésbé kényelmes, előnyük gyors felfűthetőségük. A technológiai célú kályhák legnagyobb számban vízmelegítésre szolgálnak, a más anyagok hevítésére használt kályhák néha bonyolult szerkezetek (pl. transzformátorokat vákuum alatt szárító kályhák) és e megnevezéssel gyakran tulajdonképp kemencéket illetnek.

A kőkorszak agyagkemencéitől a kenyérsütésre, és sok más célra szolgáló falusi kemencéken keresztül vezetett az út az ipar magas hőmérsékletet szolgáltató berendezéseig. A kemencék a belsejükben elhelyezett anyagok vagy gyártmányok felmelegítésére, hőntartására, vagy termikus technológiai folyamatok lefolytatására szolgálnak, pl. szárítás, hőkezelés, pörkölés, izzítás, zsugorítás, olvasztás, kémiai reakciók. Felépítésük szerint boksa-, tégely-, kád-, aknás, cső-, kamrás, alagút-kemencéket különböztetnek meg, készülnek forgó kivitelű rendszerek is. A kemence közvetlen melegítésű, ha a láng vagy a füstgáz közvetlenül érintkezik a felmelegítendő anyaggal. A füstgáz agresszív hatására érzékeny anyagok kezelésénél közvetett melegítést alkalmaznak, valamilyen közbenső hőhordozón keresztül adva át a hőt a felmelegítendő anyagnak. Az aknás kemencékben a melegítendő anyag közös térben van a tüzelőanyaggal, ide tartoznak a nagyolvasztók és a kúpoló-, érc redukáló, pörkölő-, fémolvasztó, mészégető, kalcináló-, érczsugorító kemencék nagy része. Ezekben a tüzelőanyag a hőfejlesztés mellett a kémiai reakciókban is szerepet kap. Ennek legtipikusabb esetét a nagyolvasztók képviselik, ahol az érc oxidjait a tüzelőanyagokból kiszabaduló karbon és szén-monoxid redukálja. Az ilyen kemencék üzemvitelét a hőmérleg és a kémiai reakcióarányok együttesen szabják meg. Szilárd tüzelőanyagokkal működő közepes nagyságú kemencékre 50–60%-os hatásfok jellemző, szénhidrogén-tüzelésnél viszont 70–80%-ot is el lehet érni.

Nagyon széles körben használják a fluid halmazállapotú hőhordozók felmelegítését biztosító kazánokat. A hőhordozók jellege és paraméterei, a hőfejlesztés módja és a teljesítmény nagysága szerint sokféle rendszert fejlesztettek ki. Teljesítményük a kW tartományban dolgozó kis kazánoktól (pl. lakásfűtés) a nagy erőművek több GW-os egységeiig terjed. A legtöbb kazán tüzelőberendezéssel épül össze, szilárd, folyékony és gáznemű tüzelőanyagok alkalmazása egyaránt előfordul. Az energiagazdálkodás rugalmassága érdekében többféle tüzelőanyag felhasználására alkalmas kazánokat is létesítenek.

A nagy szenes kazánoknál a szénportüzelés vált kizárólagossá. A malmokkal megőrölt szénport az égéslevegő egy részével fűjják be a kazán tüztérbe, az öngyulladás elkerülésére viszonylag alacsony hőmérsékleten. Az égéslevegő nagyobb részét magasabb hőmérsékletre melegítve külön juttatják be a tüztérbe. A tüztér legelegebb részén a hőmérséklet 1200–1500 °C-ot is elérhet. Kis berendezésekbe a levegőt a kémények

természetes huzata szívja be, amit a meleg füstgáz és a környezeti hideg levegő fajsúlykülönbségéből származó felhajtóerő hoz létre. Nagyobb berendezésekben ventilátorok biztosítják a légáramot. A nagy berendezésekben sokszor szénhidrogénnel táplált támasztó tüzelést alkalmaznak, nemcsak a begyújtáshoz, hanem az alacsony fűtőérték és az ingadozó összetétel miatt a stabil égés fenntartásához is.

A főleg környezetvédelmi okokból fejlesztett fluid (örvényágyas) kazánokban erős légáramban lebegtetett szilárd részecskékből álló ágyban zajlik az égés, valamint a kén-oxid redukciója. A fluidágy anyaga 0,5–3 mm-es szemcséjű salak, esetleg homokkal megtámasztva, valamint mészkő, amivel a keletkező kén-dioxid 90–95%-a megköthető. Kis teljesítményű fluid kazánokban erősen bázikus salak esetében a mészkőadagolás feleslegessé is válhat. A salakágyba adagolják a salakmennyiség mintegy 2%-a körüli arányban az 5–10 mm-esre őrlött tüzelőanyagot. A jó keveredés következtében az égés viszonylag vékony rétegben játszódik le. Az égés 800–900 °C-on zajlik, ezen a hőmérsékleten a NO_x -képződés csekély, az alkálifémsók reakciói sem következnek be, azok a salakban maradnak, így erősen csökken a berendezés elpiszkolódása és korróziója is.

A lángcsöves (füstcsöves) rendszerben a hőhordozót tartalmazó tartályt szeli át egy vagy több, a lángot vagy füstgázt vezető cső, a vízcsövesnél a hőhordozó melegítése a tüztérben és a füstgázhuzamban (illetve a fluidágyban) elhelyezett csőrendszerben történik. A lángcsöves rendszer használata kis teljesítményű, elsősorban meleg vizet készítő kazánokra szorult vissza, a korszerű nagyobb gőzkazánok kizárólag vízcsövesek. A korszerű kazánok hatásfoka a hőfejlesztés módjától, illetve a tüzelőanyag jellegétől függően kis berendezéseknél 70–80%, nagy kazánoknál 80–90%. Az energiagazdálkodás számára különösen fontos, hogy a kazánok hatásfoka a legérzékenyebb a tüzelőanyag jellegére, így néhány százalékos hatásfokromlás árán rosszabb minőségű tüzelőanyagok is használhatók, ami azonban rendszerint többletberuházást is igényel.

A legtöbb kazán feladata gőzfejlesztés. A legnagyobb és legbonyolultabb kazánok a hőerőművekben találhatók, itt fordulnak elő a legszélsőségesebb gőzjellemzők is. A kis- és nagynyomású kazánok közötti határt 6 bar-nál vonják meg, a nagy teljesítményű egységek általában nagynyomásúak, a kis nyomást többnyire csak kis kazánoknál használják.

A gőzkazánok alapvető kérdése a betáplált víz és a fejlesztett gőz cirkulációja. Szubkritikus rendszereknél ezt a hőmérséklet-különbség által létrehozott fajsúlykülönbség is biztosítja, az így kialakuló természetes vízkeringtetéssel működik a legtöbb kazán. Nagy kazánoknál mesterséges vízkeringtetés is előfordul, a kényszerkeringtetésű kazánokból kilépő közeg áramlását szivattyú biztosítja, ami a hőteljesítmény növelésére ad módot némi szabályozási többletfeladat ellenében. A kényszeráramlású rendszerekben a szivattyú a tápvizet közvetlenül a forresövekbe nyomja, a szuperkritikus kazánokra mindig ez a megoldás jellemző, bár elvétve szubkritikus kazánoknál is alkalmazzák.

A víz felmelegítése és forralása csövekből álló fűtőfelületeken keresztül történik. A tüztérben levő csöveket főleg sugárzás, a füstjáratban levőket nagyrészt konvekció melegíti. Változó mennyiségű gőzfelhasználásnál a tápvíz mennyiségét és a hőfejlesztés mértékét automatika illeszti a terheléshez. A víz és a gőz arányában bizonyos fokú kiegyenlítő szerepet tölthet be a kazándob, ami egyben hőtárolásra is szolgál. Ilyenkor

a tápvizet a tápszivattyú a kazándobba táplálja, és a víz onnan áramlik tovább a fűtőfelületekbe. Minél nagyobb a gőznyomás, annál kisebb a kazándob szerepe, a szuperkritikus rendszereket dob nélkül építik. Nagy kazánokba kiegészítő fűtőfelületeket is beépítenek a gőz túlhevítésére és újrahevítésére, a tápvíz előmelegítésére, és az égéslevegő előmelegítésére (léghevítő).

A fűtésben és a használati melegvíz ellátásban nagy szerepet játszó vízmelegítő kazánok felépítése lényegesen egyszerűbb, mint a gőzkazánoké, ezért sokkal olcsóbbak is. Sokféle teljesítményre készülnek, a háztartások néhány kW_f-os cirko-kazánjaitól a központi fűtések 100–1000 kW_f-os berendezésein keresztül a fűtőművek 50–100 MW_f-os forróvíz-kazánjaiig. A fűtésre és vízmelegítésre szolgáló szilárd és folyékony tüzelőanyaggal működő kazánokat nagyon erősen háttérbe szorították a gáztüzelésűek.

A tüzelőberendezések balesetveszélyes létesítmények. A magas hőmérséklet, a tűzveszély, a nagy nyomásnál a robbanásveszély, vagy a magas hőmérsékletű és nagynyomású közeg kiszabadulása nemcsak az iparban, hanem a háztartásokban is követel áldozatokat.

Tulajdonképp tüzelőberendezések a belső égésű motorok népes családja is, ahol az égés robbanás formájában a munkahengerekben zajlik.

6.6.4. Az égéstermékek

Az égéstermékek kémiai összetétele és halmazállapota a tüzelőanyagtól és az égés körülményeitől függ. Az égéstermékek nagy része gázállapotban távozik, keletkeznek szilárd égéstermékek is, folyékony halmazállapotot csak a kicsapódó gőzök képviselnek. A füstgázban mindig található a karbon és hidrogén tökéletes égéséből származó széndioxid és vízgőz, a tökéletlen égés miatt kisebb-nagyobb mennyiségű szén-monoxid, a légszelesleg miatt fel nem használt oxigén, valamint – levegőben történő égésnél – a bevezetett oxigénnek kereken négyszeresét kitevő nitrogén. A tökéletlen égés miatt éghető gázok is távoznak, gáznemű tüzelőanyagoknál hidrogén és metán, folyékony és szilárd tüzelőanyagoknál különféle szénhidrogéngázok és -gőzök. Rosszul szabályozott égésnél, illetve oxigénhiánynál korom is képződik, ami részben füst alakjában távozik. A szilárd és folyékony tüzelőanyagok füstgázában többnyire található kén-dioxid is, ha sok az oxigén, az SO₂ néhány százaléka SO₃-má alakul, ami a nedvességgel kénsavat alkot. A kénsav kondenzálódik ha hőmérséklete a harmatpontja alá csökken. Magas hőmérséklet és nagy légszelesleg előmozdítja az NO_x-képződést.

A füstgázban, illetve kipufogógázban távozó égéstermékek közül a különféle gázokat és gőzöket a diffúzió elkeveri a levegőben, majd azok sűrűségük szerint rendeződnek. A levegőnél könnyebb anyagok – pl. a hidrogén – a magasabb légrétegekbe emelkednek, a nehezebbek – mint a szén-dioxid, metán – inkább a talajszint felé rendeződnek. A légáramlatok a levegőhöz hasonló sűrűségű anyagokat (kén-oxidok, nitrogén-oxidok, finom por) rendkívül nagy – akár 1000 km-nyi – távolságra is elszállítják. Egyensúlyi állapotban a gáznemű légszennyezők parciális nyomása – a Dalton-törvénynek megfelelően – járulékos összetevője az eredő légnyomásnak. Ugyanez vonatkozik harmatpontnál magasabb hőmérsékleten a kibocsátott folyadékok gőzeire.

Az éghetetlen szilárd égéstermék – a hamu – elsősorban a szilárd tüzelőanyagokra jellemző, kismértékben (<0,5%) folyékony tüzelőanyagoknál is előfordulhat, de gyakoribb a képlékeny állapotú kiüledés. A hamut nagyrészt különféle oxidok alkotják. Ezek alacsony forrponútú kis hányada gázállapotban távozik a füstgázban, legnagyobb részük viszont szilárd. Míg a gáz- és gőzmolekulák akadálytalanul terjednek a légtérben, a szilárd vagy folyadék részecskék terjedését a méretük befolyásolja. A nagyobb szemcsék fokozatosan kiülednek, és nem jutnak messze az emisszió helyétől. Az üledésben nemcsak a gravitáció hatása érvényesül, hanem a csapadéké is, ami kimossa a részecskéket a levegőből. A kisméretű szilárd égéstermékek – porok, pernye, korom, szulfátok, nitrátok, szerves vegyületek – nagy részét a füstgáz magával ragadja és ezek a légtérbe távoznak aeroszolok formájában. Ha a láng hőmérséklete magas, az ásványok bomlanak, és ennek következtében fémgőzök is keletkeznek, melyek későbbi kondenzációjá a füstgázban hozza létre az aeroszolok legkisebb méretű részecskéit. A nagyobb méretű granulált szilárd égéstermékek salak formájában visszamaradnak a tüzelőberendezésben. A salakot a tüztérből vagy rögök alakjában, vagy olvadt állapotban távolítják el. A salak lágyuláspontja 1050 és 1500 °C között van, olvadáspontja ennél magasabb.

6.6.4.1. A karbon égéstermékei

Az égésben képződő gáz legnagyobb része a karbon tökéletes égése során keletkező szén-dioxid (CO_2). Évente mintegy 30 Gt CO_2 kerül a légtérbe a világon elégetett fosszilis tüzelőanyagokból. Ez nagyon kis mennyiség a légtérben eleve található szén-dioxid mennyiségéhez képest (~2 ppm), valamint a más eredetű szén-dioxid-kibocsátásokhoz (vulkáni tevékenység, élővilág anyagcseréje, szerves anyagok bomlása, kőzetek mállása stb.) viszonyítva. A légkörben levő szén-dioxid alapvető szerepet játszik a biomassza-képződésben, mivel a növények a fotoszintézis során sejtanyagaik építésére hasznosítják, továbbá fontos szerepe van az üvegházhatás alakulásában.

A CO_2 közvetlenül nem károsítja az egészséget, de zárt térből (pl. pincék) nagy súlya miatt kiszorítja a levegőt, és fulladást okozhat. Tökéletlen égésnél szén-monoxid (CO) is képződik, ami oxigén jelenlétében idővel szén-dioxiddá ég el. Tökéletlen az égés, amikor egyenetlen a keveredés az égéslevegővel, pl. a háztartások rosszul szabályozható kályhafűtésénél, vagy ha kevés az idő a reakciókhoz, pl. a robbanómotorokban. A szén-monoxid általános oxigénhiányt okozó súlyos mérgező, veszélyességét növeli, hogy színtelen, szagtalan, így jelenléte nem érzékelhető. A CO a vér hemoglobinjával lép reakcióba, és mivel affinitása két nagyságrenddel haladja meg az O_2 -ét, gátolja az oxigénfelvételt és oxigénhiányt okoz a szervezetben. A levegő minden 1 ppm-nyi ($1,2 \text{ mg/m}^3$) CO-koncentrációja átlagosan a hemoglobinkészlet 0,16%-át köti le, de nagy koncentrációnál a lekötés aránya fokozódik. Normális körülmények között a vér hemoglobinjának néhány százalékát köti le a szén-monoxid, 10–20% körüli arány már veszélyes. Az enyhe szén-monoxid-mérgezés erős fejfájással jelentkezik, nagyobb koncentrációnál az szédüléssel párosul, mozgászavarok lépnek fel, e felett már szervek károsodása is bekövetkezik, megzavarva a légzést, a szív működést, és az idegfunkció-

kat, a rosszullet ájulással jár, és ha a hemoglobinban a CO túlsúlyba kerül az oxigénnel szemben, valószínű a halálos kimenet. Közismert, hogy a gépkocsik kipufogógázában távozó szén-monoxid zárt térben már sok ember halálát okozta. Ugyancsak sok áldozatot követel a füstgáz rossz elvezetése a lakások kályhafűtéséből. A gépkocsiforgalom CO-szennyezését jelentősen csökkentette a katalizátoros utóégetők kötelező alkalmazása. A szén-monoxid más reakciókra is hajlamos, különféle vegyületeket képezve. Szerepe jelentős a fotokémiai szmog kialakulásában is.

Tökéletlen égésnél a kiegészítő karbon korom formájában válhat ki. A felületekre letapadva nemcsak esztétikailag zavaró, hanem szerkezetek működését is megzavarhatja. A levegőben aeroszolként terjedve károsítja a légzőszerveket, karcinogén szerepét is feltételezik.

6.6.4.2. Üvegházhatás

Jelenleg a környezetvédelem legfontosabb feladata az üvegházgázok kibocsátásának mérséklése, mert koncentrációjuk növekedése a légkörben klímaváltozással fenyeget. A legnagyobb veszélyt sokan abban látják, hogy a légkör szén-dioxid-koncentrációja mintegy 40%-kal nőtt az ipari forradalom óta. Más üvegházgázok koncentrációja is emelkedett, a legfontosabb antropogén eredetű üvegházgázok szerepét a 6.14. táblázat tekinti át, az abban nem szereplő komponensek (NO_x, NMVOC,⁸⁵ CFC-k, HCFC-k, SF₆, CO, antropogén vízgőz) együttesen a kumulált hatás 25%-át okozzák. A 6.14. táblázatból látható, hogy a járulékos üvegházhatásnak több mint feléért a szén-dioxid a felelős. Meghatározó szerepét az üvegházhatásban nagy koncentrációja, és annak további elkerülhetetlennek tűnő növekedése, az atmoszférában töltött hosszú tartózkodási ideje, valamint tetemes kumulált hatása magyarázza.

6.14. táblázat. Üvegházgázok jellemzői

Paraméter	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	O ₃
Koncentráció az ipari forradalom előtt, ppm _v	280	0,7	0,27	0,025
Koncentráció 2012-ben, ppm _v	390	1,75	0,32	0,034
Jelen növekedési ütem, %/év	0,4	0,9	0,25	–
Tartózkodási idő, év	~100	12	114	rövid
100 éves melegítési potenciál	1	25	298	–
100 évre kumulált hatás aránya, %	54	19	6	–

A CO₂ koncentrációja a légkörben a jégkorszak végétől az ipari forradalomig közel állandó volt, akkor viszont növekedésnek indult. Az ipari forradalom kezdetén érvényesülő 280 ppm_v-ről a jelenlegi 390 ppm_v-re. A Föld múltbeli viszonyainak elemzése szerint a légköri szén-dioxid-koncentráció és a talajszinti hőmérséklet között korreláció van,

⁸⁵ Non methane volatile organic compounds, a metántól eltérő illó szerves vegyületek.

ami az üvegházhatással magyarázható. Feltételezik, hogy a szén-dioxid-növekmény 4/5 része a fosszilis tüzelőanyagok égésterméke, mert azok tüzelése az ipari forradalom óta exponenciálisan nőtt. A fosszilis tüzelőanyagok égése a kémiai összetételtől függően 50–100 kg CO₂/GJ kibocsátással jár. A világ tüzelésből származó szén-dioxid-kibocsátásának több mint 40%-a az erőművekből származik, az ipar és a közlekedés részesedése 20–20% körül mozog, a többi oka egyéb tevékenység – többek között tüzelés a háztartásokban. A tüzelés mellett az energetika egyéb CO₂-kibocsátásai (bányákból, földgáz-előfordulásokból, termálvizekből) elhanyagolhatók.

Egyes tudósok az 1970-es években felhívták a figyelmet, hogy a szén-dioxid-koncentráció jelenlegi erőteljes emelkedése járulékos üvegházhatást okoz, amitől a hőmérséklet növekedése várható. Vagyis a hőmérséklet-növekedés révén az üvegházgázok kibocsátásával az emberi tevékenység megváltoztathatja a Föld klímáját. A légkörbe kerülő antropogén eredetű szén-dioxid a természetes eredetű CO₂-kibocsátásoknak (élőlények anyagcseréje, szerves anyagok bomlása, kőzetek mállása, természetes eredetű tüzek, tűzhányók kitörése stb.) csupán 3–4 százaléka, a kutatók egy része kétségbe vonja, hogy ez önmagában elég volt a légkör CO₂-tartalmának megnövelésére.

Az energetika kisebb mértékben más üvegházgázokat is bocsát ki. A légkör metántartalma a 18. század közepe óta megduplázódott, jelenleg 1,7 ppm körül mozog. A mezőgazdaság (rizstermesztés, szarvasmarhatartás) metánkibocsátása lényegesen meghaladja az energetikai eredetűt. Az energetikát terhelő metán főleg a feketeszén-bányákban szabadul ki a megbontott kőzetekből, és a földgázfelhasználás néhány százaléka is a légtérbe kerül, mindenképp a szállítási veszteségek következtében. A metán melegítési potenciálja sokkal nagyobb, mint a szén-dioxidé, de kisebb koncentrációja és rövidebb tartózkodási ideje miatt kisebb a szerepe, az eredő hatás 19%-áért felelős. A nitrogén-oxidok melegítési potenciálja nagy, de a kis koncentráció miatt szerepük csupán 6%. Kibocsátásukért főleg a közlekedés és a műtrágyahasználat felelős, legnagyobb melegítési potenciálja a főleg tüzelőanyagok égéséből származó dinitrogén-oxidnak (N₂O) van. A többi üvegházgázból az energetika csak kis mennyiségeket bocsát ki. Az ózonlyuk visszaszorítása érdekében betiltott halogénezett szénhidrogének koncentrációja nagyon kicsi, de rendkívül nagy melegítési potenciáljuk miatt az üvegházhatás 13%-áért felelősek.

A klímaváltozás lassú folyamat, azt sok – még csak részben ismert – hatás befolyásolja. Az erősödő üvegházhatás lehetséges következményeiről különböző feltételezések láttak napvilágot: a hőmérséklet növekedése, a klímaövezetek eltolódása, szélsőségesebb időjárás kialakulása, a csapadékviszonyok módosulása (több eső, nagyobb párolgás), az ökoszisztémák átalakulása, a tengerszint emelkedése, a sivatagok terjedése, a jégtakarók zsugorodása, tengeráramlatok megváltozása, a mezőgazdasági termelés feltételeinek (hőmérséklet, csapadék) átrendeződése, a termőterületek eltolódása északi irányba és sok más, az emberi életfeltételeket lényegesen befolyásoló körülmény. Ezeket a feltételezéseket a tudomány mai ismereteink alapján sem kizárni, sem megerősíteni nem tudja, de vannak aggasztó jelek, pl. a sarkvidéki jégtakaró és a gleccserek zsugorodása, az időjárás – hazánkban is érzékelhető – szeszélyesebbé válása. A levegő talajközeli hőmérsékletének növekedése (az úrból végzett mérések szerint) a 19. század második

feléhez viszonyítva $0,7\pm 0,2$ °C. A folyamatok leírására kidolgozott modellek alátámasztották a klímaváltozás gyanúját. A lehetséges következmények széles körű ismertetésével sikerült erős nyugtalanságot ébreszteni, a klímaváltozás lehetősége elfogadott nézetté vált. A félelem a következményektől világméretű reakciót váltott ki, a kialakult társadalmi közhangulat sürgeti a cselekvést.

Az 1992. évi Környezet és Fejlődés Konferencián egy Éghajlatváltozási Keretegyezményt⁸⁶ írtak alá, aminek előrehaladását évente felülvizsgálják.⁸⁷ A progresszió lassú, a legjelentősebb előrelépés a kiotói konferencia volt 1997-ben, ahol egyezmény született hat üvegházgáztípus (CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, PFC,⁸⁸ HFC⁸⁹) együttes csökkentésére 2010-ig, országonként differenciált mértékben. A fejlett országok az 1990-es szint 5,2%-os csökkentését vállalták 2008–2012-re, az Európai Unió 8%-os csökkentést vállalt (ami eltérő mértékben oszlik meg a tagországokra), de ezt nem sikerült elérni. A magyar kibocsátás 6%-os csökkentése az 1985–1987-es referencia-időszakhoz viszonyítva teljesült (nagy részt a rendszerváltást követő, valamint a világgazdasági válság miatti visszaesésnek köszönhetően). Egyes nagy kibocsátók (pl. USA, Ausztrália) nem ratifikálták az egyezményt, félve, hogy az a gazdasági versenyképességük csökkenését, munkanélküliséget, inflációt fog okozni, ezért – a kibocsátás nagy hányadéért felelős aláírók hiánya miatt – a hatályba lépés hét évig elhúzódott.

Az éghajlatváltozás folyamatának figyelésére az ENSZ Környezeti Programja (UNEP) és a Meteorológiai Világszervezet (WMO) Éghajlatváltozási Kormányközi Testületet (IPCC⁹⁰) alakított, melynek néhány évente kiadott jelentéseit mértékadó tudományos helyzetképnek tekintik. Ezek alátámasztják az éghajlat megváltoztatásának valószerűségét. Egyes tudományos iskolák viszont kétségbe vonják az IPCC néhány megállapításának tudományos megalapozottságát. Az utóbbi években sok kutató, és néhány szakmai szervezet a klímaváltozással kapcsolatos nézeteket is kétségbe vonta. A mérési adatokat is sok bizonytalanság terheli, egyesek hitelessége is megkérdőjelezhető. Feltették, hogy a Föld klímája állandóan változott, és a hőmérsékletben is pozitív és negatív tendenciák egyaránt előfordultak. A kidolgozott modellek sem tudnak minden tényezőt figyelembe venni, így következtetéseik sem vitathatatlanok. Az éghajlat sok belső és külső hatás eredőjeként kialakuló összetett állapot, aminek okait alig ismerjük. Nem dönthető el, hogy a hőmérséklet növekedését a CO₂-koncentráció emelkedése okozza, vagy fordítva, a hőfokváltozás hatására nő a szén-dioxid-koncentráció. Ugyanis a három nagy szén-dioxid rezervoár – légkör, tengerek, növényvilág – közötti forgalomról, és annak okairól nincs elég ismeretünk. Csupán feltételezés, ami nincs bizonyítva, hogy az antropogén szén-dioxid-kibocsátás az üvegházhatás alakulásának az alapvető oka, hiszen az az összes kibocsátásnak csak kis hányada, és jelentős a nem emberi eredetű emisszió is. Léteznek az üvegházhatást csökkentő – nem eléggé ismert – hatások is,

⁸⁶ UNFCC (United Nations Framework Convention on Climate Change).

⁸⁷ COP (Conference of the Parties).

⁸⁸ Perfluor-karbonok.

⁸⁹ Hidrofluor-karbonok.

⁹⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change.

pl. az aeroszolkok vagy a felhők szerepe. Érdekes összehasonlítás, hogy az emberiség által kilélegzett CO₂ mértéke összevethető a tüzelésből származóval, és az ipari forradalom óta a Föld népessége is exponenciálisan nőtt, akár a fosszilis tüzelőanyagok égésterméke.

A klímaváltozás hívei és ellenzői között szenvedélyes szakmai viták zajlanak. A tudományos közösség nagy többsége szükségesnek tartja az emissziók visszaszorítását, mivel a légkör egyensúlyának megbomlása már vitathatatlan, és nincs idő várni a következmények tisztázására. Véleményük szerint kisebb kockázat a feltételezések alapján elhatározásokra jutni, mint a bizonyosságokra várva elszalasztani az irreverzibilis következmények megelőzésének lehetőségét. Az üvegházgázok hosszú ideig tartózkodnak a légkörben, hatásuk kumulatív, ezért a folyamatokat legfeljebb lassítani tudjuk, de nem megakadályozni. Stabil és kedvezőbb egyensúlyi állapotot következetes intézkedések esetén is csak a távoli jövőben lehet elképzelni, ezért nagy a felelősségünk a jövő generációkkal szemben. Súlyos dilemma, hogy ha sikerül is a fejlett országok CO₂-kibocsátását csökkenteni, az nem lesz képes ellensúlyozni a fejlődő világ nagy lélekszámú országai (pl. Kína, India) jórészt szénbázisú energiagazdálkodásának dinamikusan növekvő emisszióját. Ennek következtében az IEA becslése szerint a következő 3 évtizedben a világ CO₂-emissziója mintegy 50%-kal fog nőni. A folyamatok globális jellege miatt csak nemzetközi együttműködéstől lehet eredményt remélni, de az érdekek összehangolásának akadályai miatt egyelőre mérsékelt a siker. Az IPCC szerint az üvegházgáz-koncentráció stabilizálásához a jelenlegi globális kibocsátást töredékére kellene csökkenteni. Az EU Bizottsága 2050-ig az emissziók 60–80%-os mérséklését tartja megfontolandónak.

Az ajánlott beavatkozások gazdasági kihatása hatalmas, ami a döntéshozókat óvatosságra készíti. Elsősorban a fosszilis tüzelőanyagok értékesítésében érdekelt ipari körök vitatják, hogy szabad-e a társadalmat áldozatra kényszeríteni, amíg nincs bizonyítva a klíma kedvezőtlen változása, és annak esetleges oka. Rangos nemzetközi szervezetek (pl. WEC,⁹¹ Academia Europea) óvnak az elsietett akcióktól, a szükséges nagy ráfordítások miatt is mértéktartó stratégiát ajánlanak, amit később nem kell megbánni (no regret policy).

Hosszadalmas viták zajlottak a Kiotói Egyezmény folytatásáról, az EU a szigorítások élharcosa volt, a zöldek még annál is többet követeltek, az ipari lobbik nyomására egyes országok fékeztek az ambíciókat, a fejlődő országok pedig nem vállaltak kötelezettségeket. Egyes jelentős kibocsátók (pl. Oroszország) a kihátrálást fontolják a kiotói megállapodásból. Kompromisszumként meghatározatlan időtartamra elfogadták a korábbi megállapodás meghosszabbítását.

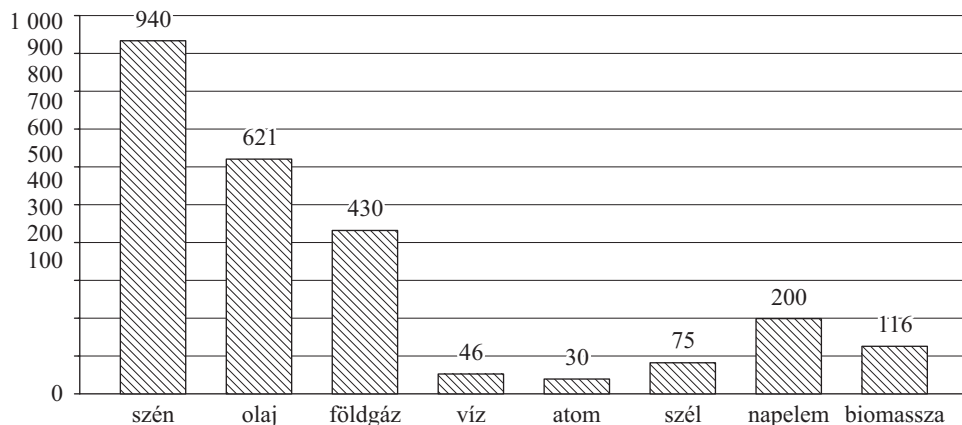
A szén-dioxid-emisszió visszaszorítására a legegyszerűbb út az energiatakarékoság, ami közvetlenül vagy közvetve csökkenti a fosszilis tüzelőanyag-felhasználást. Hasonló eredményre vezet az energetikai hatékonyság javítása is. Hatásos lehetőség a tüzelőanyag-struktúra módosítása is, figyelembe véve, hogy azonos hőmennyiség fejlesztéséhez annál kevesebb CO₂-fejlődés tartozik, minél nagyobb a hidrogén aránya a tüzelőanyagban a karbonhoz viszonyítva. A hidrogén/karbon viszony 1 : 2 : 4 arány-

⁹¹ World Energy Committee, Világ Energiatanács.

ban változik a szén : kőolaj : földgáz sorrendben. Egy MJ hő fejlesztése széntüzelésnél 95 g, olajtüzelésnél 73 g, földgáztüzelésnél 56 g CO₂ kibocsátásával jár (biomasszából 110 g), így a földgáztüzelés 40%-kal kevesebb CO₂-képződéssel jár, mint a széntüzelés. Csökkenti a szén-dioxid-kibocsátást a fosszilis tüzelőanyagok helyettesítése megújuló és atomenergiával (a Paksi Atomerőmű évente kerekén 20 Mt szén-dioxid-emissziót vált ki, kb. ennyi a hagyományos hőerőműveink összes kibocsátása).

A Kiotói Egyezmény járulékos eljárásokat is elfogad a kibocsátások csökkentésére, ezek egyike a CO₂-emissziós jogok (kvóták) nemzetközi kereskedelme. A hazai Nemzeti Kiosztási Terv 270 létesítmény kötelezettségét szabja meg, ezek kibocsátása az ország teljes emissziójának mintegy fele. Bonyolítja a viszonyokat, hogy az Európai Unió 2014-től a kibocsátási kvóták kötelező megvásárlását vezeti be. Ugyancsak betudja az egyezmény az emissziócsökkentést fejlődő országokban, pl. erdőtelepítéssel, a világ jelenlegi, évenként mintegy 20 Gt-nyi CO₂ (vagy karbonra vetítve 6 Gt C/év) emissziójának elnyeléséhez 15 Mkm² új erdőterület kellene, ami megfelel a Föld jelenleg mezőgazdasági művelés alatt álló összes területének.

Az IPCC jelentéseiben a klímakérdés kulcsának minősíti, mennyire sikerül dekarbonizálni a világ erőműparkját. A 6.2. ábra szemlélteti, milyen nagy különbség van az energiabázistól függően a villamosenergia-fejlesztés üvegházgáz-kibocsátásában. A g/kWh-ban mért értékek a teljes vertikum hatását tükrözik bölcsőtől a koporsóig szemléletben, az energiahordozó kitermelésétől a hulladékok elhelyezéséig, figyelembe véve a szerkezeti anyagok gyártásának befolyását is.



6.2. ábra. Fajlagos üvegházgáz-kibocsátások (CO₂-re átszámítva)

Az erőművek dekarbonizálására a tökéletes megoldást az atom és a megújuló energiák alkalmazása jelenti. Kizárólag ezekre azonban nem lehet a villamosenergia-ellátást alapozni, megoldást kell találni a fosszilis tüzelőanyagokat tüzelő erőművekre is. A leg-tökéletesebb megoldás a szén-dioxid-kibocsátás megakadályozása lenne, gazdaságilag elviselhető módon. A szén-dioxid kivonására kis léptékben többféle megoldást alkalmaznak, fizikai szeparáció (pl. membránokkal vagy halmazállapot-változtatással), kémiai

reakciókkal (pl. karbonátképzés alkáliföldfémekkel), ezek azonban erőművi léptékben nem jöhetnek számításba. A legígéretesebb megoldás a szén-dioxid kivonása a füstgázból és tárolása geológiai rezervoárban (CCS⁹²). A kivonás egyik lehetősége, hogy a füstgázt monoetanolamin oldaton átáramoltatva a CO₂-ot abszorbeálják, majd a reverzibilis kémiai kötést deszorberben oldják. A kinyert szén-dioxidot a szállítási térfogat csökkentésére 80 bart meghaladó nyomáson cseppfolyósítják, és deponálják. A tárolásra számításba jöhetnek akviferek, leművelt szénhidrogén mezők, szénlencsék, esetleg kémiai megkötés kőzetekben, vagy benyomás a tengerekbe. Egy másik lehetőség, hogy a tüzelés levegő helyett oxigénben történik, így a füstgáz alapvetően szén-dioxid és vízgőz keveréke, amiből lehűtve a két alkotó egyszerűen szétválasztható az eltérő halmazállapotok alapján. A megvalósítás lehetősége, a tárolás tartóssága, a kölcsönhatás a környezettel kutatás tárgya. A másodlagos kitermelés révén a kőolajipar sok tapasztalatot szerzett a szén-hidrogén injektálás lehetőségéről, amiben a magyar szakemberek élenjáró szerepet játszottak. A geológusok szerint a hazai lehetőségek kedvezőek a CO₂ tárolására. A legnagyobb befogadóképessége a 800 m-nél mélyebben fekvő kiterjedt sósvízű akvifereknek van, a leművelt szénhidrogénmezők is alkalmasak, de tárolókapacitásuk sokkal kisebb, és azt előnyösebb földgáztárolásra igénybe venni, esetleg számításba jöhetnek olyan szénlencsék is, melyeket nem érdemes kibányászni.

Egyelőre a CCS-technológiák drágák, és jelentős az energiaszükségletük is. Több mint egy tucat kísérleti és demonstrációs projekt létesült világszerte, amitől műszakilag kiérlelt és elviselhető költségű megoldásokat remélnek 1–2 évtizeden belül.

6.6.4.3. Szilárd égéstermékek

A tüzelés magas hőmérsékletén a tüzelőanyagokban eredetileg található ásványi anyagok és vegyületek megváltoznak, oxidáció, pirolízis és más reakciók során keletkező éghetetlen szilárd égéstermék a hamu. A szenek hamutartalma keletkezésük körülményeitől függ, feketeszeneknél a száraz tömeg néhány százaléka, barnaszeneknél 50%-ot is elérhet. A hamu egy része a bányászkodás során keveredett a szénhez a környező kőzetekből (palás kőzetekből, agyagból). Ez a szabad hamu fizikai módszerekkel (pl. mosás, flotálás) eltávolítható, ha ez kifizetődő. A kötött hamu a szén keletkezése során épült be a molekulákba, vagy azok közé, az fizikai módszerekkel nem távolítható el.

A hamu kisméretű, szálló por jellegű részecskéinek – a pernyének – egy részét a füstgáz magával ragadja. A néhány mm-nél kisebb szemcsékre alig hat a gravitáció, lebegve aeroszolt alkotnak, így a légáramokban nagy távolságra is eljuthatnak. A tüztérben, majd a légtérbe kilépve terjedés közben fizikai és kémiai kölcsönhatásokban is részt vehetnek, mint kondenzációs magok vagy adszorbensek más anyagokat is magukhoz köthetnek, kémiai reakciók közvetítő közegei, esetenként katalizátorai is lehetnek. A pernye összetétele elsősorban a hamu jellegétől függ, kén-, illetve nitrogén-oxidokkal szulfátokat,

⁹² Carbon capture and storage.

illetve nitrátokat alkotnak, egyesek katalizátorként elősegítik kénessav képződését az SO_2 -ból. A füstgázáram a gáznemű és szilárd alkotók mellett olvadt részecskéket is magával ragad. A pernye legkisebb méretű, finom szemcséit azok a gőzök hozzák létre, melyek magas hőmérsékleten elpárolognak és a későbbiek során a hidegebb huzamokban újra kondenzálódnak. Ezek a légzőszervi ártalmak legfőbb okozói, mert kis méretük révén a mélyebb légutakba is bejutnak.

A tüzelőberendezésben kiülepedik a pernye egy része, valamint a hamu rögökké összesült darabjai, a salak. A salakot a tüzelőberendezésből el kell távolítani, nagy kánoknál többnyire víz-, vagy légáramban. A salak kémiai összetétele szénfajtánkként lényegesen eltérő, lágyuláspontja 1000 és 1500 °C között van, olvadáspontja ezt meghaladja és annál magasabb, minél nagyobb a savas alkotók aránya a bázikus alkotókhoz képest. A meglágyult hamu lerakódhat, vagy rásülhet a szerkezeti elemekre, rontva a hőátadást és zavarva az áramlást, ami üzemzavarokat is okozhat. Többnyire olyan hőmérsékleti viszonyokra törekednek, hogy a salak szilárd rögök formájában legyen eltávolítható (granuláló tüzelés). Alacsony olvadáspontú salakot folyékony állapotban is el lehet távolítani, ha a tüztérben a hőmérséklet meghaladja az olvadáspontot (salakolvasztó tüzelés).

A jó minőségű szenek hamujában többnyire a savas alkotók (Si, Al) dominálnak, minél gyengébb a szénminőség, rendszerint annál több a lúgos összetevő (Ca, Mg, Na), ami befolyásolja a hamu kémhatását és későbbi viselkedését. A hamuban mintegy 50 féle fém, köztük sokféle nehézfém vegyületei is előfordulnak, a láng magas hőmérsékletén a kémiai kötések bomlanak és a fémek szabaddá válhatnak. A hazai szeneinkben előforduló nehézfémek koncentrációja elég széles határok – néhány mg/kg és g/kg – között mozog. Ugyancsak sokféle fémot juttat az égéstermékbe a kénlekötéshez használt mészke is. A szenekben előforduló mérgező nyomelemek (Cd, As, Pb, Hg stb.), valamint természetes eredetű radioaktív anyagok (U és Th sor elemei, ^{40}K) koncentrációja a salakban vagy zagyban feldúsulva veszélyes mértéket érhet el. Az égés során felszabaduló fémek, illetve fémtartalmú oxidok és kloridok egy része a pernyéhez kötődik (As, Cd, Cu, Pb, Sb, Se, Zn), számos fém egyenesen oszlik meg a salak és a pernye között (Al, Ba, Ca, Ce, Cs, Fe, K, Mg, Mn, Th), vannak a salakban dúsulók (Cr, Ni, U, V), néhány elem (Br, I, Hg) pedig gázfázisba kerül. A füstgázkezelési eljárások a Hg és Se kivételével a nehézfémek jó részét is kivonják, azok főleg a zagyba kerülnek, bár némi arzén és kadmium kimutatható a távozó füstgázban is.

Szilárd égéstermék a tökéletlen égésből származó karbonszemcsékből agglomerálódott korom is. Kisebb mennyiségű korom a folyékony tüzelőanyagokból is képződik, és a szénhidrogénekből néha kocsz is keletkezik.

A visszamaradó szilárd égéstermékkelmetlen alkotói miatt további sorsukat körültekintően kell rendezni. Gyakran adalékként hasznosítják azokat építőanyagokban, ami megfelelő ellenőrzést kíván. (Tatabányán egy iskola földmijét le kellett bontani, mert a salakban levő izotópok sugárzása meghaladta a megengedett mértéket.) Kedvező feltételek esetében visszatölthetők a közeli külfejtéses bányákba, de többnyire lerakóhelyekről (zagyter) kell gondoskodni. A zagyártalókban, megfelelő szigeteléssel kell óvni a környező talajt és a vízbázisokat. Felületüket pedig meg kell kötni, hogy megakadályozzák a szennyezést.

lyozzák a porzásukat és kiszóródásukat szél, vagy eső okozta transzportfolyamatokkal. A tevékenység befejeztével gondoskodni kell a zagyterek rekultiválásáról.

Az égből származó aeroszolok egészségkárosítók, a szennyező anyagok elsősorban a légzőszerveket támadják meg, de a véráramba kerülve más belső szervek károsodását is előidézhetik. A nagyobb méretű részecskéket a száj és orrüreg nyálkahártyái megkötik, de a kisebb méretűek a mélyebb légutakba is bejutnak. A lebegő por elsősorban a felső légutak nyálkahártyáit ingerli, és gátolja a garat és légső csillóinak mozgását, ami megkönnyíti a kisméretű részecskék bejutását az alsó légutakba. A 10 μm -nél kisebb (PM_{10}) méretűeket tekintik kedvezőtlen hatásúaknak, a veszélyesség határát 2,5 μm -nél szokták megvonni. Tartós, nagy porterhelés szervek károsodását (pneumokoniózis, fibrózis, rák) is okozhatja. Ilyen kimenet főleg a nagyon poros munkahelyeken fordulhat elő, a szabad levegőn belélegzett szennyezők inkább akut ártalmakat okozhatnak.

A porral abszorbeálva más károsító anyagok is bejutnak a légzőszervekbe, melyek hatását a por szinergikusan erősítheti. Főleg oxidok formájában sokféle elem fordulhat elő az aeroszolokban. Egyes fémek szerephez juthatnak élettani folyamatokban, így izomműködésben (Ca, Mg), ingervezetésben (Na, K, Ca), véralvasásban (Ca), érzékelési mechanizmusokban (Ca, Ba, Fe). Ugyancsak a finom frakcióra kondenzálódhatnak rákkeltő szerves vegyületek is (pl. PAH^{93}). Jó néhány más szilárd szennyező (azbeszt, korom) is karcinogén. A nehézfémek magas hőmérsékleten gőzfázisban vagy gázfázisban (főleg oxidok és halogenidok formájában) kerülnek a légtérbe, majd lehülve főleg a kisméretű szilárd részecskékre mint kondenzációs magokra csapódnak le. A nehézfémek sokféle ártalmat válthatnak ki, egy részük rákkeltő (Cd, Cu, Pb, Zn, As), mások katalizátorként mozdítanak elő nemkívánatos reakciókat, pl. a kén-dioxidból kénsav képződését, vagy biológiailag reaktív kompaundokat alkotnak a szulfátokkal (As, Cr, Mn, V, Fe, Be), molekulákba beépülve létfontosságú biokémiai folyamatokat (oxigénfelvétel, fotoszintézis, fehérjelebontás) zavarhatnak meg. Egyes feltételezések szerint 10–50 km-en belül csak a kibocsátott primer részecskéknak van szerepük, a $\text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$ átalakuláson kívül kémiai reakciók kialakulására a terjedés során még nincs elegendő idő. Nagyobb távolságra már a szekunder szennyezők alkotta aeroszolok is meghatározó jelentőséget nyerhetnek. A Levegő Munkacsoport szerint a porszennyezés okozta egészségkárosodás terén a magyar helyzet a legkedvezőtlenebb az EU-ban (15 000 halál/év), és a 35 napra engedélyezett 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ határértéket is túllépjük.

A szilárd szennyezők kijutását kezdetben ciklonokkal mérsékelték, a görbült pályára térített füstgázból, illetve poros levegőből a centrifugális erő választotta ki a szemcséket, de így a pornak csak egy részét tudták leválasztani. Sokkal jobb leválasztási hatásfokot lehet elérni elektrosztatikus porleválasztókkal, a villamosan feltöltött részecskék 99–99,5%-át ki lehet szűrni az erőtér segítségével. Hasonlóan jó eredmény érhető el kisebb létesítményekben hóálló anyagból szőtt porzsákokkal. Azonban a korszerű porleválasztók is csak részben tudják kiszűrni a néhány μm -es méretű részecskéket, és azok jelentős része kikerül a környezetbe. A hazai mérések szerint a kibocsátott tel-

⁹³ Policiklikus aromás szénhidrogén.

jes portartalom (TSP⁹⁴) mintegy 58%-át 10 μ -nál kisebb méretű frakciók teszik ki, és a 2,5 μ -nál kisebbek (PM_{2,5}) részaránya is 33% körül mozog.

Korábban a legjelentősebb porszennyezők a szénerőművek voltak. Elektrosztatikus porleválasztók beépítésének, és a széntüzelés háttérbe szorulásának köszönhetően ma már nem a szénhamu az aeroszolképződés fő forrása, hanem a koromkiválás (háztartási tüzelőberendezések, dízelmotorok), valamint egyes szerves vegyületek, pl. karcinogén benzpirén (benzinmotorok).

6.6.4.4. A víz mint égéstermék

A tüzelőanyagok ballasztanyagai közé tartozik a nedvesség is. Egy részét csak fizikai erők kötik a tüzelőanyaghoz (felületi adszorpció, vagy keveredés), ez a durva nedvesség, ami a légköri viszonyok között zajló természetes száradás során eltávozik. Ennek lefolyása erősen függ a tárolás körülményeitől. A teljesen kiszáradt tüzelőanyag légszáraz, az ehhez tartozó egyensúlyi nedvességtartalom mértéke a környező levegő nedvességtartalmával van egyensúlyban, ennek egy részét fiziko-kémiai erők kötik meg (kapilláris nedvesség, kolloid oldat), ami csak 100 °C feletti szárítással távolítható el. Az eltávolított víz az analitikai nedvességtartalom, a tüzelőanyag ekkor száraz, de még benne van a szerkezeti nedvességtartalom. Az utóbbi a vegyületekben található kristályvíz, ami csak a vegyületek szétbontásához szükséges magas hőmérsékleten szabadul fel a tüzelés során.

Az égéstermékek közé vízgőz egyrészt a tüzelőanyagok nedvességtartalmának párolgásából, másrészt a szerves molekulákban levő hidrogén égéséből kerül. A szenek nedvességtartalma nagyon eltérő. A barnaszenek erősen higroszkóposak, a feketeszenek alig. A lignit nedvessége 50%-ot is elérhet, a feketeszeneké 15%-ot sem halad meg. A szerves molekulák alacsonyabb hőmérsékleten bomlanak, az így kiszabaduló hidrogén elég, vízgőz fejlődik. A kőolaj és a földgáz termelésénél több-kevesebb sós vizet is kiemelnek, amit az előkészítő műveletek során leválasztanak. A vízben viszonylag nagy mennyiségű szervesetlen só, főleg nátrium-, kálium-, kalcium- és magnézium-kloridok és szulfátok vannak oldatban, NaCl-ra átszámított koncentrációjuk 0,25g/l-t is elérhet.

Az égésből távozó nedvesség kémiaiilag aktív anyagokkal agresszív vegyületeket alkothat (pl. kénsav, sósav, salétromsav), amelyek további kémiai reakciókba léphetnek, vagy a harmatpont alatt kicsapódnak. Harmatpont alatt a telítési értéket meghaladó mennyiségű gőz részben a hidegebb felületekre ülepedik ki harmatként, részben kondenzációs magokra csapódik ki ködöt képezve. A ködök veszélyes közlekedési viszonyokat teremthetnek, nemcsak a látási viszonyok csökkenése miatt, hanem hideg időben az útburkolatokra lecsapódva jegesedést okoznak.

Megfelelő összetevők jelenlétében alakulnak ki a legveszélyesebb ködtípusok, a szmogok, melyek kialakulásában az aeroszolak jelentős szerepet játszanak. A szmogok egyik típusát – a füstködöt – vízköd és füstgáz együttes hatása hozza létre, ha a füstgázban sok

⁹⁴ Total small particles, összes kis részecske.

kondenzációs mag van. A szmog redukáló hatású, ha a füstben ilyen kémhatású anyagok, illetve alkotók (pl. SO_x , NO_x) vannak. Ez a szmogtípus leginkább télen fagyponthoz közeli hőmérsékleten alakul ki. A sűrű ködben egyes alkotók szinergikusan felerősítik a káros hatásokat. A redukáló hatású füstköd a légzőszerveket támadja meg, aminek súlyos következményei lehetnek (Londonban 1952-ben egy kéthetes erősen szmogos időszak 4 000 halálos áldozatot követelt. Azóta a tüzelőanyag-felhasználás szerkezetének átalakításával Londonban kiküszöbölték ezt a szmogtípust.) Nálunk iparvidékeken néha még előfordul.

A szmogok másik típusát fotokémiai reakciók hozzák létre. A fotokémiai szmog sűrű gépkocsiforgalom hatására alakul ki intenzív napsütés időszakában. Nagyvárosok tipikus jelensége, súlyos esetekben szmogriadó elrendelésével korlátozzák a gépkocsiforgalmat. A fotokémiai szmogot elsősorban a kipufogó gázokból származó szén-monoxid, nitrogén-oxidok, valamint kis molekulású szerves gőzök okozzák. Ezek reakciói az ózonnépződés legfőbb okozói a troposzférában. A troposzférában az ózon a légszennyezők terjedése során lejátszódó fotokémiai folyamatok másodlagos terméke. Míg a sztratoszférában az ózon szerepe hasznos, mivel az ott kialakult ózonpajzs szűri ki az emberiségre veszélyes UV-sugarakat, a troposzférában az ózon káros, mert erős oxidáló hatása miatt ártalmas az egészségre és az élővilágra. A fotokémiai szmog erősen oxidáló hatású alkotókat (O_3 , NO_2 , PAN⁹⁵), tartalmaz, melyek a nyálkahártyákat irritálják, gyakori hatása krónikus ártalmakat okoz. Egyes vizsgálatok szerint Magyarországon évente több ezer ember hal meg az ózon által kiváltott folyamatok miatt.

6.6.4.5. Savas szennyezők

A második világháború után a környezetvédelem középpontjába a savas kémhatású égéstermékek kerültek. A füstgázban (kipufogógázban) távozó szennyezők jelentős része savas kémhatású, melyek vagy eleve a tüzelőanyagból származnak, vagy később képződnek az égéstérben, illetve a transzportfolyamatokban zajló reakciókban. Ezekben a fő szerepet a kén vegyületei játsszák, melyek többnyire agresszívok, ingergázok és károsítják az egészséget, a természetet, az épített környezetet és a szerkezeti anyagokat, meghatározó szerepük van a füstköd és a savas eső kialakulásában. A szulfát részecskék befolyásolják az időjárást is, növelve a légkör homályosságát, ami a sugárzás áteresztőképességét csökkenti. A nagyrészt tüzelésből származó antropogén kénkibocsátás 100 év alatt 50-szeresére nőtt; gondot különösen az északi féltekén okoz, ahol a koncentráció az átlag 10-szerese.

A szilárd és a folyékony tüzelőanyagokban mindig található több-kevesebb kén. A legtöbb szénben jelentős a kéntartalom, átlagosan 0,5–2,5%, de barnaszénenél néha 5%-ot is elérhet. A nagy kéntartalmú szeneket és fűtőolajat többnyire erőművekben tüzelik el, ezért azok a legfőbb kibocsátók, de a kisebb tüzelőberendezések SO_2 -emiszió

⁹⁵ Peroxi-acetil-nitrát.

szíója is számottevő lehet. A szénbányák begyulladt meddőhányói is hozzájárulnak az SO_2 -kibocsátáshoz. A szenekben található kén egy része stabil szulfátokban (pl. gipsz, vasszulfát) van lekötve, ami nem éghető. A szénmolekulákhoz kapcsolódó szerves kén, és a szulfidokban, főleg piritben, található kén viszont éghető. A kén egy része, főleg a pirit fizikai eljárásokkal, pl. mosással eltávolítható. Az égés közben kiszabadult kén egy részét a hamuban a bázikus hamualkotók (CaO , MgO) megkötik, a többi kén-dioxid formájában a füstgázban távozik. Magas hőmérsékleten, ha a füstgázban sok az oxigén, az SO_2 egy kis részéből erősen savas kén-trioxid (SO_3) képződik. A kén-dioxid, illetve kén-trioxid nedvességgel kénessavat, illetve kénsavat alkot, azok kölcsönhatásokban különféle szulfátokat (pl. ammóniumszulfát), valamint más kénvegyületeket hozhatnak létre, melyek többnyire aeroszolt alkotnak. Ezeket a viszonylag lassú átalakulásokat katalitikus hatású fémek, valamint egyes aeroszolak lényegesen felgyorsítják, és a reakciótermékek a füstgázban rendszerint a szilárd részecskékhez kapcsolódnak.

A kén-dioxid a nyálkahártyák nedvességével reakcióba lépve savas alkotókat hoz létre, kisebb koncentrációnál ($20\text{--}60\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ alatt) csupán irritáló hatással, azon felül már gyulladást, akut ártalmakat okozva. Tartósan érvényesülő nagyobb koncentrációnál ($200\text{--}300\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ felett) légzőszervi ártalmakat (tüdővizenyő, légúti szűkület) vált ki, egészen nagy koncentráció ($>1000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) már életveszélyes, légzésbénulás is bekövetkezhet. Többen nem a savas hatást tekintik veszélyesnek, hanem a reakciótermékekét, főleg a keletkező szulfátok koncentrációját. A reakciótermékek jellege a körülményektől és a katalizátoroktól függ. Egyes tapasztalatok arra utalnak, hogy a szulfát és por, vagy korom együttes hatása mértékadó, valószínűleg az aeroszol szinergikus szerepe miatt.

A szénerőművek kén-dioxid-kibocsátásának megelőzésére többféle lehetőség kínálkozik, kevés kéntartalmazó tüzelőanyag használata, a pirit előzetes leválasztása a szénből, kénmentes vagy kis kéntartalmú tüzelőanyagokat szolgáltató szénelgázosítás stb. Ezek helyett inkább az égésben már létrejött kén-dioxid kivonása honosodott meg. A kén-oxidok egy részét a salak is megkötöheti az abban levő bázikus alkotók arányában, a többi a füstgázba kerül. Kisebb mértékű lekötést a porszénkazánok tüzterébe bepermetezett bázikus adalékanyagokkal (pl. porlasztott mészhidrát-szuspenzió) is el lehet érni, de ez a megoldás nem bizonyult gazdaságosnak, és sok üzemzavart is okozott. Tökéletesebb lehetőség a fluidtüzelés, ahol az égés légáramban lebegtetett őrleményben zajlik, alacsony hőmérsékleten ($700\text{--}900\ \text{°C}$ -on). A kén-dioxid a lebegő ágyban diszpergált bázikus salakkal, illetve adalékolt mészkővel reakcióba lépve szilárd végterméket alkot. Kisebb teljesítményű berendezéseknél a fluidtüzelés terjed, nagyobb teljesítményre a fejlesztés alatt álló nyomás alatti rendszerektől várnak eredményt. A legelterjedtebb megoldás a füstgáz kénmentesítése, amire többféle technológiát fejlesztettek ki. A fizikai (adszorpciós) eljárásokkal szemben a kémiai módszerek terjedtek el jobban, melyeknél a füstgázban levő kén-oxid bázikus anyagokkal (pl. mészkő, dolomit, ammónia) lép reakcióba. Ehhez a füstgázt többnyire a bázikus anyag vizes oldatán áramoltatják át, a költségesebb száraz eljárások katalizátorral váltják ki a reakciót. A reakciótermék többnyire gipsz, néha elemi kén, vagy kénsav. Az eljárások a kén-oxidok $95\text{--}98\%$ -át kivonják a füstgázból, de ennek az ára egyrészt a beruházási és üzemeltetési költségek

20–25%-os növekedése, másrészt az energetikai hatásfok 1–2%-os csökkenése. Esetenként a füstgáz kénmentesítőt utólag is érdemes beépíteni régi erőművekhez.

A hazai szénélőfordulásokat jelentős kénszennyezés jellemzi, kénmentesítők utólagos beépítése csak a Mátrai Erőműnél bizonyult gazdaságosnak (és szociálpolitikai indokkal Oroszlányban is megvalósult egy évtizednyi élettartam-hosszabbítás érdekében, nagyrészt állami pénzből). A többi szénerőművünk nem tudott eleget tenni az SO_x -kibocsátást korlátozó előírásoknak, ezért azokat a bányákkal együtt leállították. Új szénerőmű létesítése ma már elképzelhetetlen kénmentesítés nélkül. A füstgáz kénmentesítésével a környezetszennyezés gondja a légtérből a talajszintre helyeződik át. A legjobb megoldás az eljárásból nyert gipsz hasznosítása az építőiparban, de problémát okozhat, ha a keletkező nagy mennyiség meghaladja a piac igényét. Ilyenkor meg kell akadályozni, hogy a deponálandó maradékból transzportfolyamatok veszélyes komponenseket juttassanak a környezetbe. Ugyancsak kezelni kell a nedves eljárásoknál a sokféle szennyezőt tartalmazó hulladékvizet is.

A lelőhelytől függően az olajok kéntartalma nagyon eltérő, 0,01 és 5% között mozog. A hazai kőolajok között vannak alacsony (Algyő) és magas (Nagylengyel, 3,5%) kéntartalmúak. A kén előfordulhat olajban oldott kénhidrogén, vagy szulfidok formájában, esetleg aszfaltanyagokhoz kapcsolódva, de lehet szeretlen elemi kén is. A kén égésterméke nemcsak agresszív és egészségkárosító, hanem korróziót okoz a feldolgozás és a felhasználás során, és károsítja a katalizátorokat is. A kén előzetes kivonása a termékekből a kőolaj-feldolgozásnál gazdaságosan megoldható. A kőolaj-finomítás során a kén a nehezebb frakciókban dúsul fel. A kőolajfrakciók kéntartalma teljes mértékben kén-oxidokká ég el, a keletkező füstgáz agresszívabb, mint a széntüzelésnél, mert a magasabb égési hőmérséklet következtében a SO_3 aránya a SO_2 -hoz viszonyítva magasabb, ezért a kénessavhoz viszonyítva nő a kénsavképződés és ezzel a korrózió mértéke. A füstgáz V_2O_5 -tartalma fokozza a SO_3 -képződést, amit MgO -adagolással lehet csökkenteni, de ezzel nő a füstgáz aeroszol-tartalma. A kőolajfrakciók kéntartalmát csökkentő technológiákat (hidrogénezés, hidrokraakolás, késleltetett koksizálás) a MOL nálunk is megvalósította, ezek biztosítják az üzemanyagokban a 10 ppm, a tüzelőolajoknál a 0,1%-os határértékek teljesítését. A földgáz kéntartalma többnyire elhanyagolható, a biomassa SO_2 -kibocsátása minimális.

A tüzelőanyagokban előfordul nitrogén szennyeződés is, aminek reakciótermékei szintén savasak, de kevésbé agresszívek, mint a kén-oxidok. Alacsony tüztérhőmérsékleten főleg a tüzelőanyagban levő nitrogén oxidálódik, magas, 1000 °C feletti hőmérsékleten a levegő nitrogénjének egy része is. A szénben a nitrogén szerves kötésben fordul elő, fizikai eljárásokkal nem távolítható el. Az olajokban nitrogén főleg heterociklusos vegyületekben, pl. merkaptánokban, piridinvegyületekben található. A nitrogén-oxidok képződése többféle közbenső terméken átvezető komplex folyamat. Néhány száz fokos hőmérsékleten főleg dinitrogén-oxid (N_2O) képződik. Alacsony hőmérsékleten a N_2O stabil, ezért a környezetbe nagyobb mennyiségben az alacsony tüztér-hőmérsékletű berendezésekből (lakossági kályhafűtés, fluid kazánok) kerül ki. Magasabb hőmérsékleten a N_2O bomlik, ennek következtében a nagy kazánokban 95%-ban NO , 5%-ban NO_2 jön létre (közös megnevezéssel NO_x). Az NO oxigéndús környezetben 600 °C felett,

illetve az atmoszférába kikerülve, napfény hatására idővel NO_2 -dé oxidálódik. Magas hőmérsékleten, főleg belső égésű motorokban erősen mérgező N_2O_3 (kéjgáz) is képződik, ami idővel disszociál NO és NO_2 -re. Nedvesség jelenlétében kedvezőek a feltételek a nitrogén-oxidokból salétomsav, illetve nitrátok (pl. ammóniumnitrát) képződésére.

A nitrogén-oxid is ingergáz – elsősorban a szem és a légutak nyálkahártyáit irritálja. Valószínűsíthető, hogy nagy koncentrációnál (2 mg/m^3 felett) légzőszervi ártalmakat okoz. Növeli a nyálkahártyák vízáteresztő képességét, ami tüdőödéma keletkezését segíti elő. A nitrogén-oxidok fotooxidánsak, szerepük van a fotokémiai szmog kialakulásában, és a troposzférában az ózonképződésben, előmozdítják a savas eső, valamint a sztratoszférában az ózonlyuk kialakulását. A nitrogén-oxid szénhidrogénnel napfény hatására erősen redukáló hatású fotokémiai oxidánsokat hoz létre; ilyen hatású maga a NO_2 is, de a reakciótermékek közül az ózon, hidrogén-peroxid, PAH és néhány nitrát is. A NO hajlamos a reakcióra a vér hemoglobinjával. Egyes közlemények szerint a NO_x csökkenti a szervezet ellenálló képességét vírusos fertőzésekkel szemben és növeli a hajlamot az allergiára. A nitrogén-oxidok fotokémiai reakciótermékei között vannak karcinogének is.

A füstgázban és kipufogógázban található kis pH-jú vegyületeknek sejteket roncsoló képessége van, és főleg az emberek légzőszerveit támadják meg. Ingerkeltő szerepük és nagyobb dózisban légzőszervi betegségeket okozó hatásuk nem vitatott, de nem egyértelműek a súlyos kimenetre vonatkozó felfogások, mert a hatások vizsgálatának eddigi eredményei ellentmondóak, leginkább a savas hatást minősítik mértékadónak.

A kén-dioxid-emisszió fokozatos csökkentéséről több nemzetközi megállapodás született. Fokozatosan szigorodtak az EU emissziós szabványai is, amit a hazai előírások is követtek, ennek tudható be az SO_2 -kibocsátás radikális csökkenése.

Elsősorban szenekben található klórszennyezés is, amiből víz jelenlétében agresszív sósav, illetve kloridok képződhetnek. Az olajokban vanádium is előfordul, ami oxigénnel korrozív vanádium-pentoxidot alkot, de különösen agresszív a nátrium-oxiddal alkotott eutektikuma. Az utóbbinak a lágyulása $570\text{--}600^\circ\text{C}$ körül indul meg, ennél magasabb hőmérsékleten a fémeket és keramikus anyagokat megtámadja (magas hőmérsékletű korrózió). Ezért korlátozzák az olajtüzelésű erőművekben a gőzhőmérsékletet $540\text{--}545^\circ\text{C}$ -ra.

A fosszilis tüzelőanyagok égésekor fejlődő füstgázban többféle illó szerves szénhidrogén (C_xH_y) is található, ezek fő forrása a széntüzelés, de a belső égésű motorok kipufogógázai is jelentős szerepet játszanak. Sokféle szénhidrogén is bekerülhet a levegőbe. A benzol a vérképző szerveket támadja meg és leukémiát is okozhat, a toluol a központi idegrendszerre hat, a xilol az emésztőszervekre. Az oldószerek, festékek és más szerves gőzök (alkoholok, glikolok, ketonok, észterek, halogénezett szénhidrogének) főleg a belső szervekre és az idegrendszerre hatnak, a többgyűrűs policiklusos aromás szénhidrogének – például az égéstermékek közül a benzpirén, benzantracén, dibenzantracén, aromás nitrovegyületek – rákkeltők. Az üzemanyaggyártók törekvése ezek csökkentése, pl. a benzoltartalmat 1% alá szorították. A kőolaj-finomítónak is sokféle gáznemű hulladéka van, az éghetőket elfáklázzák, de ez csak a berobbanás ellen véd, nem gátolja meg káros, sőt mérgező anyagok kikerülését. Ezek kiszűrésére sokféle eljárást fejlesztettek ki, így a veszélyes emissziók fokozatosan visszaszorultak.

Más technológiákból (kokszyártás, szénlégázosítás, biomassza tüzelés) is kerülnek a légtérbe illő szénhidrogének.

A légszennyezők többsége elsősorban a légzőszerveket támadja meg, de a belélegzett szennyezők a véráramban más szervekhez is eljutnak, és azokat is károsítani tudják. A kialakuló biokémiai és élettani hatások enyhébb esetekben – pl. kis mennyiségű SO_x , NO_x jelenlétében – csak ingerkeltők (köhögést, váladékképződést, nehézlégzést okozva). Súlyosabb esetekben csökkentik az oxigénfelvételben és a biokémiai reakciókban szerepet játszó felületeket, és a légutak részbeni elzáródásával járó betegségek – bronchitisz, asztma, tüdőtágulás – fejlődnek ki. Különösen érzékenyek a légzőszervi ártalmakra a gyerekek és az asztmás betegek. A légzőszervi ártalmak csökkentik az ellenálló képességet más hatásokkal és a fertőzésekkel szemben is. A kén-dioxid fokozza más ártalmak veszélyességét is – 250–500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ felett gyakoribbá válnak az asztmás betegek rohamai, sok vizsgálat az érzékeny csoportok (kisgyerekek, öregek, keringési és légzőszervi betegségben szenvedők) morbiditásának növekedésére utal. Nagy koncentrációnál valószínű a szív és tüdő működésével összefüggő betegségek súlyosbodása, valamint zavarok kialakulása a vérképző szervek működésében és az anyagcserében. Egyes vizsgálatok szerint az SO_2 -immisszió éves átlagával nő a mortalitási kockázat. A hazai egészségügyi statisztikákban a légzőszervek megbetegedései teszik ki az összes betegség 5%-át, és ennek jelentős részét a savas légszennyezés idézi elő.

A légszennyezés egyes alkotói erodálják és korrodálják az épületeket, a műtárgyakat, a szabadtéri berendezéseket és fémszerkezeteket. Budapesten az utakat szegélyező fasorokat és a Duna hidak vasszerkezetét a gépkocsiforgalom kipufogó gázai teszik tönkre. A legtöbb kárt a savas kémhatású légszennyezők okozzák, elsősorban a kén-dioxid és az abból képződött aeroszolok. A savas leülepedés az építőanyagokat erodálja, ami egyrészt a szerkezeti funkciókat, másrészt az esztétikai hatást érinti. Az építőanyagok többsége mintegy 3 mm vastagságcsökkenés után javításra szorul, ami az anyagoktól függően 25–75 év után esedékes, de a művészeti és történelmi értékű építmények állagmegőrzését más követelmények szabják meg. Az erózió sebességét a légszennyező koncentrációján kívül befolyásolja a csapadék mennyisége, a hidrogénion-koncentráció, a légnedvesség, és egyes anyagoknál az ozon- és a szén-dioxid-koncentráció is, a hatások szinergikusak és kumulatívak. Az eróziós folyamatokat sok hatás (koromlerakódás, biológiai folyamatok, kondenzáció, párolgás, vízzárványok fagyása és olvadása) gyorsítja, előrehaladott állapotban mindez rétegződésre és repedésekre vezet. Az erózió természetesen erősen függ az építőanyag jellegétől. A jó minőségű vízzáró beton nagyon ellenálló, leginkább a savas hatások károsítják, felületén néha gipsz képződik kén-dioxid hatására. Ha a nedvesség behatolhat a beton belsejébe, a szerkezeti vasak korrodálódnak, főleg szén-dioxid és klór jelenlétében. Ugyancsak nagyon ellenálló anyag a téglá is. A száraz falazatok nem romlanak, a nedves falak érzékeny összetevője a habarcs, ami kalciumtartalma miatt savas hatásokra roncsolódik. A köveket sokféle hatás károsítja. Szén-dioxid és eső együttes hatására a felületen lemorzsolódó, lemosható réteg keletkezik, sók, savanyú kémhatású alkotók kémiai átalakulásokat indítanak el, ez mállásra, esetenként a felületen lemezes szerkezetű tászkásodás kialakulására vezet, ami nedvesség hatására leválik. A szilícium bázisú kövek ellenállóbbak, a mészbázisúak (mészkö, márvány) érzékenyebbek a savas

kiülepedésre. A savas szennyezés a hagyományos festékreteget évente néhány mikronnal csökkenti, a műanyagbázisúak a légköri hatásoknak sokkal jobban ellenállnak. A külső felületekre kiülepedő szilárd szennyezés, valamint az azokon képződő rétegek elszínezik a felületeket, ami csökkenti a használati értéket (pl. romlik az ablakok átláthatósága), rontja az esztétikai benyomást, az elhasználódás jele csökkenti a forgalmi értéket.

A fémek korróziója elektrokémiai folyamat, amiben többnyire a kén-dioxid a főszeplő nedvesség jelenlétében. Felerősítik a hatást a savas aeroszolok, a folyamatok ózon és nitrogén-oxid jelenlétében gyorsulnak. Különösen érzékeny a légszennyezésre az acél és az öntöttvas, ami horgany vagy festék védőréteggel ellensúlyozható. A rezet patina, az alumíniumot oxidréteg védi a korrózió előrehaladásától. Ugyan az alumínium az egyik legellenállóbb szerkezeti anyag, de azon a kén-dioxid pontkorróziót okoz.

A csapadék ki tudja mosni a levegőben található alacsony pH-jú alkotókat, savas eső keletkezik. A meteorológiai folyamatoktól függően a savas eső az emisszió helyétől sok száz km-re is kialakulhat. A jelenségre az 1960-as években az hívta fel a figyelmet, hogy a nyugat-európai füstgázemisszióból kialakult savas eső – mintegy 2000 km távolságra – Norvégiában pusztította ki 1750 tó teljes élővilágát.

A savas esőre az édesvizek élővilága a legérzékenyebb, a pH csökkenése a fajok fokozatos kihalását okozza. A termőtalaj reakciója anyagi összetételétől függ, a meszes talajok kémiai reakcióba lépve közömbösíteni tudják a savas hatást, az agyagos talajok ioncserével mérséklik a befolyást, más talajfajtáknál viszont savanyosodás következik be, amit néhány régióban nálunk is tapasztaltak. A pH értékének csökkenése módosítja a talajban zajló kémiai és mikrobiológiai folyamatokat, a savanyú közegben lényegesen átalakulnak a mikrobiológiai életfeltételek, ennek nyomán megváltozik a talajban élő mikroorganizmusok és egyéb élőlények aránya. Különösen a kén szerepét tartják veszélyesnek, ha vízzel kölcsönhatásba lépve megnő a szulfátok aránya, azok reakcióba lépnek más tápanyagokkal, csökkentve a növények tápanyagellátását. Nagy kárt okozhatnak a kén reakciói a szerves kötésben levő fémalkotókkal, magnéziummal és főleg alumíniummal.

A szabad hidrogénionok ioncsere révén mobilizálják a talajban lekötött fémek egy részét. Ha a talajban a pH értéke 4 alá csökken, az alumínium oldatba megy, ami kis koncentrációban is veszélyes a növények gyökérzetére, mert a tápanyagszállító szöveteket károsítja. Bizonyos mértéken felül a növekedést serkentő nitrogén is megzavarja az egyensúlyt, árt a talaj élővilágának. Ellentmondóak a tapasztalatok, hogyan befolyásolja a savanyú talaj a növényvilág tápanyagellátását. Az Európában tapasztalt erdőpusztulás egyik okának a savas esőket tartják.

6.7. Kémiai energiából mechanikai munka

A kémiai energia átalakítása mechanikai munkává nem az energetika területén érvényesül a legszélesebb körűen, hanem a biológiában. Az élőlények mozgásában az izmok működését biokémiai folyamatok táplálják. Vonatkozik ez természetesen az emberek fizikai munkájára is. A működéshez szükséges energiát egyrészt a bejuttatott tápanyagok

oxidációja biztosítja a sejtekben, másrészt a testszövetekben egyes makromolekulák összetett biokémiai folyamatokban történő lebomlása is energiát szolgáltat.

Technikai szempontból a legnagyobb jelentősége annak a közvetett folyamatnak van, amely hőkörfolyamatokon keresztül vezet a munkavégzéshez. Közvetlen energiaátalakulással biztosítják a mechanikai energiát a robbanások és a sugárhajtás. Tulajdonképp a belső égésű motorokban (robbanó motorok) is robbanás mozdíttja el a dugattyúkat, de ezeket a folyamatokat jobb megközelítéssel mutatják be a hő→munka átalakítást leíró hőkörfolyamatok. A sugárhajtás nemcsak a légiforgalmat forradalmasította, hanem megnyitotta az utat az űr feltárására, birtokba vételére és a műholdak révén annak sokirányú hasznosítására.

6.7.1. Robbantások

A robbanás rendszerint nagyon gyorsan – μs -ok alatt – lejátszódó égés. Eközben a keletkező gáz hatalmas mértékben kiterjed, elsodorva az útjában álló akadályokat. Mivel a nagy reakciósebesség miatt az égés kívülről nem táplálható, ezért a robbanóanyagok az égés összes elemét, beleértve az oxigént is kémiai kötésben tartalmazzák. Bár a robbanóanyagok fűtőértéke kicsi (2,5–7 MJ/kg), az energia több tízmilliószor gyorsabban szabadul fel, mint a szokványos égésnél, így a leadott teljesítmény 100 GW nagyságrendű.

A robbanóanyagok elsődleges felhasználója a haditechnika. A puszkapor feltalálása óta a lőszer és robbanóanyagok nagyon sok fajtáját fejlesztették ki.

A haditechnikán kívül polgári célokra is hasznosítják a robbanóanyagokat mechanikai munkavégzésre. A robbantástechnikát alkalmazzák kőzetek fellazítására és fejtésére a bányászatban és a mélyépítésben, építmények lebontására, nagynyomású alakításra a gépiparban, impulzusszerű erő kifejtéshez a szerelőiparban stb. Sajnos a terroristák is előszeretettel robbantgatnak, az öngyilkos merénylőkről és a gépkocsikba rejtett pokolgépekről szóló beszámolók szokványos napi híreké váltak.

A kémiai robbanóanyagok mindig tartalmaznak hidrogént, oxigént és gyakran korbont is, a nagy sebességű reakciók kialakulásának kedvező kötésben. A nagy hatású robbanás kezdeményezésére iniciáló anyagok szolgálnak, melyek külső hatásokra (ütés, hőközlés, dörzsölés) meggyulladnak. A legfontosabb iniciáló anyagok közé tartozik a higany-fulminát, az ólom-acid és a diazo-dinitro-fenol. Az iniciáló anyag gyulladásra gyorsan detonációba megy át, ami megindítja a nagy tolóhatású robbanóanyag égését. A nagy hatású – brizáns – anyagok sokkal érzéketlenebbek, meggyújtva nem robbannak, azt csak meghatározott környezeti feltételek esetén az iniciáló anyag detonációja váltja ki. A brizáns anyagok egy nagy csoportját szénhidrátok és alkoholok salétromsavészterei alkotják. Ilyenek a nitro-cellulóz, a nitroglicerín (ez az Alfred Nobel által feltalált dinamit brizáns alkotója, és a szívritmuszavarokat csillapító gyógyszer), a nitropenta (pentanitrit-tetranitrát), ami a terroristák gyakran használt plasztikus robbanószerének, a semtexnek fő alkotója. Sok más nitrovegyület is brizáns, így a trotil (trinitro-toluol, TNT), a pikrinsav (trinitro-fenol) és mások. Keverékek is használatosak, pl. ammónitok (ammónium-nitrát-alapúak), vagy oxilikkvit (nátrium-nitrát és ammónium-klorid

keveréke). A robbanóanyagok egy csoportjánál az égés nem megy át detonációba, de a fejlődő gáz kiterjedése közben nagy hajtóerő alakul ki, ezek a lőporok. Robbanásveszélyes munkahelyeken a robbanóanyagokat különféle fizikai hatásokkal helyettesítik, pl. cseppfolyós CO₂ kiterjedésével, vagy nagynyomású levegővel.

A robbanóanyagok szakszerűtlen kezelése, vagy hozzá nem értő kezekbe kerülése sok balesetet okoz. Különösen szörnyű, amikor katonai műveletek során elszórt hadianyagok gyerekek kezében robbannak fel, vagy rejtett aknák tépik le a lábukat.

6.7.2. Sugárhajtás

A repülésben forradalmi változást jelentett a sebesség nagymértékű növelésére módot adó sugárhajtóművek megjelenése a II. világháború végén. A sugárhajtásnál a tolóerőt a nagy sebességgel kiáramló égéstermékek reakcióereje biztosítja. Repülőgépeknél a hajtóanyag kerozin, az égéstermék kezdeti gyorsítását gázturbina végzi, a további gyorsítást áramlástechnikai lehetőségeket kihasználó gyorsítócső. Ez a technika a katonai és polgári repülés lehetőségeit hatalmas mértékben növelte, mind az elérhető sebesség és magasság, mind a szállítható tömeg tekintetében. A repülés a hétköznapi forgalom részévé vált, de ezzel együtt nőtt a légszennyezés, és a repülőterek környezetében a zaj. Bár egy polgári repülőgép szerencsétlensége sok áldozattal jár, a légi forgalom baleseti mutatói sokkal kedvezőbbek, mint a közúti közlekedésé, sőt a vasút mögött is elmaradnak.

A rakétatechnika is a katonai emléken fejlődött fel. A rakétákat a II. világháborúig jelentéktelen játékoknak és szórakoztató eszközöknek tekintették, amíg ki nem derült, hogy bombák célba juttatására is alkalmazhatók. A hidegháborúban verseny folyt a nukleáris tölteteket hordozó rakéták mind nagyobb hatósugarának és terhelhetőségének elérésére. A versenynek pozitív hozadéka is volt, ezek az eszközök tették lehetővé a kijutást az űrbe, majd a Holdra lépést. Az űrtechnika lehetőségeinek katonai és polgári hasznosítása rohamtempóban bővült, a telekommunikációtól a navigálásig, a meteorológiától a földtani kutatásig és sok más tevékenységig. Mindennek lényeges feltétele volt a rakéták megfelelő tolóerejét biztosító üzemanyagok rendelkezésre állása.

A rakéták hajtásához a tolóerőt kifejtő munkaközegre és a munkaközeget felmelegítő hőforrásra van szükség. A hőforrás égésen kívül más eredetű (pl. nukleáris, villamos, nap-, plazma-, lézereenergia) is lehet, ami kifejezésre jut a rakéta megnevezésében is. A munkaközeg a hőforrással magas hőmérsékletre felmelegített gáz, aminek kiterjedése létesíti igen nagy kiáramlási sebességgel a tolóerőt. A kémiai rakéta hajtóanyagok mindkét szerepet betöltik, a hajtóanyagokban levő tüzelőanyag szabályozott kémiai reakcióban az oxidálószerrel egyesülve szolgáltatja a hőt, és a reakció terméke a munkaközeg. A munkaközeggel szemben követelmény a nagy égéshő, a disszociáció magas hőmérséklete, valamint a reakciótermék kis molekulásúlya a nagy gyorsulás érdekében. A rakétatechnika és az űrhajózás lehetőségei jórészt a hajtóanyagok fejlődésén múltak. A rakétatechnika fejleményei sok más területen is alkalmazást nyertek (fegyverek, tengeralattjárók, pilótaülések katapultálása, gépkocsik légszájja). Nagyon sok

anyagkombináció jöhet számításba, de csak kevés felel meg az alkalmazás gyakorlati követelményeinek (ár, beszerezhetőség, ütésállóság, tárolhatóság, veszélytelenség, katonai alkalmazásnál a munkaközeg nehéz detektálhatósága radarral és lézerrel stb.). A hajtóanyagok folyékony és szilárd halmazállapotúak lehetnek, a folyékonyakkal jóval nagyobb teljesítmény érhető el, egyrészt nagyobb a fajlagos reakcióhőjük, másrészt a reakcióhőből csak a párolgáshőt kell fedezni, az olvadáshőt nem.

A folyékony rakétahajtó anyagok egy vagy több komponensből álló tüzelőanyagot és oxidánst tartalmaznak. Folyékony tüzelőanyagként a hagyományos üzemanyagok (benzin, kerozin) mellett más szerves vegyületeket (benzol, hidrazin, dimetil-hidrazin, ammónia, anilin, furfurool, etilalkohol, pentaborán) is alkalmaznak, nagy teljesítményt tudnak elérni a cseppfolyós hidrogénnel. Az oxidálószer többnyire oxigén (gyakran folyékony halmazállapotban), de egyes kombinációkban ózon, fluor és fluorvegyületek, nitrogén-oxid, salétromsav és más anyagok alkalmazása is előfordul. Cseppfolyósított gázokkal (hidrogén, oxigén) nagy fajlagos impulzust lehet elérni, amihez azonban kriotechnika alkalmazására van szükség.

A szilárd hajtóanyagok előnye, hogy a tárolás és a kezelés egyszerűbb. Kis tolóerőt lőporokkal, többnyire nitrogliceriben oldott nitro-cellulóz formájában is biztosítani lehet, nagyobb tolóerőhöz azonban nagyobb energiatartalmú anyagok szükségesek. Ezek lehetnek műanyagba vagy nitro-cellulózba ágyazott heterogén szerkezetek, melyekben a tüzelőanyag fémpor (gyakran Al, néha Be), illetve ezek hidridjei, az oxidáns pedig kristályos anyag (többnyire ammónium-perklorát, de más alkáli-perklorátok vagy alkálinitrátok is előfordulnak). A tulajdonságok befolyásolására adalékanyagok is használatosak, nagy teljesítményhez a boránok (bór-hidrogének) kerültek előtérbe.

Az ürtevékenységnek is van környezetszennyezése, az elhasznált, vagy szétört eszközök alkotta űrszemét. Ezek a tárgyak hatalmas sebességgel keringenek a Föld körül, veszélyeztetve az űrhajósok életét és a műholdak működését. Egyes tárgyak tömege több tonnát is elérhet, de legnagyobb részük sokkal kisebb, viszont a számuk nagy, az 1 cm-t meghaladó méretű tárgyak száma a millióhoz közeleg. A kisebbekre még becslés sincs. Az űrszemét összegyűjtésére és megsemmisítésére vannak ötletek, de egyelőre csak megfigyelésük valósul meg.

6.8. Kémiai áramforrások

Az autonóm energiaellátás elengedhetetlen a helyhez nem kötött villamos berendezések és eszközök működtetéséhez, amire legnagyobb részét a kémiai áramforrások szolgálnak. A villamosság hajnalát a galvánelemek alakították ki Galvani és Volta felismerései nyomán. A galvánelemek kémiai energiát elektromos energiává átalakító berendezések, melyekben két különböző fém elektródpotenciáljának különbségét hasznosítják, ami egy elektroliton keresztül áramot hoz létre. A pozitív póluson (katód) pozitív ionok semlegesítődnek (redukció), a negatív póluson (anód) pozitív ionok keletkeznek vagy negatív ionok semlegesítődnek (oxidáció). Ez a két, térbelileg különválasztott folyamat (elektrodfolyamat) az elektródokat összekötő vezetékben elektromos áramot tart fenn.

Az elektródák és az elektrolit anyagának megválasztásával sokféle galvánelem alakítható ki, de a gyakorlatban csak néhány alkalmazására került sor. A galvánelemek gyakorlatilag csak addig használhatók, amíg az elektrokémiai folyamatokban szerepet játszó anyagok el nem fogynak. Amikor az áramot tápláló kémiai folyamatok elapadnak, az elem kimerült. A hulladéknak tekintett elemekben azonban a környezetet és az egészséget károsító anyagok is találhatóak. Ezért szükséges az elektronikus hulladékokat begyűjteni, és vagy kinyerni az értékes nyersanyagokat, vagy szakszerűen közömbösíteni azokat.

A kémiai áramforrások legnagyobb mennyiségben használt fajtái a szárazelemek. Ezekben az elektrolitot pép vagy kocsonyás alakban felitatják valamilyen nedvszívó anyagban. Így az elektrolit megkötött állapotban van, és nem folyik ki az elemből. A ma használatos elemek többségében elektrolit-oldattal átitatott, porózus szerkezetű anyagot, vagy félvezetőt használnak. A szárazelemek hosszú ideig csak perifériális szerephez jutottak, zseblámpák meg játékok működtetésében. A második világháború után forradalmi változás következett be az alkalmazásukban. Mivel a gazdaságilag fejletlen országokban a tökeigényes villamosenergia-szolgáltatás csak lassan épült ki, a piacbővítés érdekében a Távol-Keleten megjelentek a szárazelemekkel működő hordozható táskarádiók. A koncepció világsikert aratott, napjainkban a legtöbb kis elektronikus eszközt (órák, fényképezőgépek, kalkulátorok, táskarádiók, távkezelők, szívritmus-szabályozók stb.) szárazelemek működtetik.

Hosszú ideig a Leclanché-elem továbbfejlesztett változata volt az uralkodó, melynek anódja mangán-dioxidba ágyazott szénrúd, katódja a befoglaló cinktök, az elektrolit ammónium-klorid, vagy cink-klorid. Sokféle szárazelem van forgalomban, melyek egyrészt az elektródák és az elektrolit anyagában, másrészt a szerkezeti felépítésükben (rúd, gomb, lapos stb.) különböznek egymástól.

Az elmúlt évtizedekben több új, nem vizes elektrolit oldattal, elektrolit olvadékkal vagy szilárd elektrolittal (pl. alkálifémsók) működő kémiai áramforrást dolgoztak ki, amikkel nagy potenciálkülönbségű és nagy energiasűrűségű áramforrások állíthatók elő. Ezek negatív elektródja rendszerint alkálifém, vagy annak valamilyen vegyülete. A kutatás-fejlesztésben igazi áttörést jelentett a lítium elemek megjelenése az 1970-es években, melyekben az anód Li fém, az elektrolit valamilyen lítium vegyület (pl. LiI). A Li sikerét egyrészt a fémek között kiemelkedően magas katódpotenciáljának köszönheti, amivel az elemek 4 volt körüli feszültsége érhető el. Másrészt kis sűrűsége révén könnyű és kisméretű szerkezeteket lehet kialakítani. Mindezeknek köszönhetően a Li elemeket nagy teljesítmény és hosszú élettartam jellemzi.

Nagyobb villamos teljesítmény biztosításához akkumulátorokra van szükség, melyekben az elektrokémiai folyamatok reverzibilisek, vagyis a kimerülés után ellentétes irányú árammal a szerkezet újra tölthető. Az akkumulátorfejlesztés fő hajtóereje hosszú ideig a járműipar volt, mivel a belső égésű motorok elengedhetetlen feltétele az indító akkumulátor. A 20. század végén új igény jelent meg az akkumulátorfejlesztésre, a mobiltelefonokhoz kisméretű, hosszú élettartamú áramforrásokra volt szükség. Fejlesztésüket a laptopok, notebookok, iPhonek, fényképezőgépek tömegessé válása is befolyásolta. Ezen a területen is a Li jutott vezető szerephez, a leggyakrabban lítium-kobalt-oxid katód és grafit anód alkalmazásával (lítiumionos elemnek is nevezik). Az informatika

korszerű eszközeiben alkalmazott Li ionos akkumulátorokat nagy kapacitás, kis súly és helyfoglalás jellemzi.

Új fejlemény a villamos autók megjelenése, az akkumulátoroknak nemcsak a segédberendezéseket kell kiszolgálni, hanem a jármű hajtását is el kell látniuk. A villamos autóknak kis súlyú, de fajlagosan nagy teljesítményű áramforrásra van szükségük. Az akkumulátor nagy önsúlya korlátozza a gépkocsik terhelhetőségét, hatósugarát, és dinamikai tulajdonságait. És mindezek háttérében érvényesül a katonák igénye a mobil eszközök működtetésére a földön és az űrben.

Akkumulátorokat villamos energia tárolására is fejlesztenek. Nem vált be az elképzelés, hogy a rendszer terhelési görbéjének völgyidőszakában feltöltött, a váltakozó áramú hálózathoz inverteren keresztül kapcsolódó akkumulátor fedezze a csúcsergiát. Viszont pufferüzemben sokféle alkalmazásra van gyakorlat, szükségáram forrásaként, szünetmentes energiaellátáshoz, megújuló energiaellátás tartalék-áramforrásaként. Ilyen célokra is folyik fejlesztés, főleg a hosszú élettartam, nagy tárolókapesség és környezetbarát kivitel a cél. Néhány anyagkombináció a 6.16. táblázatban látható.

6.16. táblázat. Akkumulátorok

Negatív elektróda	Pozitív elektróda	Elektrolit	Energia, Wh/kg
Pb	PbO ₂	vizes, H ₂ SO ₄	30–40
Fe	NiO ₂ H	vizes, KOH	20–30
Fe	Ni ₂ O ₃	vizes, KOH	35
Zn	Ni ₂ O ₃	vizes, KOH	35
Zn	MnO ₂	vizes, KOH	40–80
Zn	AgO	vizes, KOH	60–120
Zn	Cl ₂	ZnCl ₂	70
Cd	NiO ₂ H	vizes, KOH	25–40
Cd	AgO	vizes, KOH	50–80
Li	Cl	LiCl ₂ olvadt só	300
Li	S	olvadt LiCl, KCl	250
Li	oxidok, szulfidok, fluoridok, fémhalogének	szerves oldószerek, benne Li-sók	100–200
Li	SO ₂ , SOCl ₂ , SCl ₄ , POCl ₂	szervetlen oldószerek, benne Li-sók	250
Na	NaS ₂	szilárd Al ₂ O ₃	200–300
Na	Br	szilárd Al ₂ O ₃	400
Ag	I	jódos kettős sók	?
Na	S	szilárd	200

A gépkocsik indítóakkumulátoraiként főleg kénsavas ólomakkumulátorokat használnak, ezek olcsó és megbízható szerkezetek, viszonylag nagy élettartammal. A kénsavelektrolitban zajló reverzibilis reakció:



A lúgos akkumulátorok drágábbak, viszont sok előnyük van az ólomakkumulátorokkal szemben. Nagyobb fajlagos energiatároló képesség, hosszabb élettartam, nagyobb mechanikai szilárdság, erősen túlterhelhetőek, a mechanikai rázkódással szemben érzéketlenek, és hosszú ideig tárolhatóak. Üzembe helyezésük egyszerűbb, a töltés és az elégtelen töltés kevésbé károsítja őket. Hátrányuk a 3–4-szer nagyobb előállítási költségen túl, hogy az elektrolitot az üzemelési körülményektől függően legalább évente egyszer ki kell cserélni, mert a levegő szén-dioxid-tartalma az elektrolitot tönkretesz. Mobil berendezések és kézi szerszámok táplálására, bányák világítására és katonai célokra használatosak. Leginkább vas-nikkel elektródákkal készülnek, kisebb készülékek táplálására jobb hatásfokú, de drágább nikkel-kadmium, cink-ezüst, Ni-MH⁹⁶ elektródák is használatosak.

Az elhasznált akkumulátorok is sokféle ártalmas anyagot tartalmaznak, gondoskodni kell ezek közömbösítéséről. Ennek egyik lehetősége akkumulátor újrahasznosító létesítése. Ilyen létesítményt Gyöngyösorosziiban nálunk is terveztek, de megvalósítását a környezetvédők megakadályozták, ezért a 4–5 éves használat után lecsereált akkumulátorok, és az abban található veszélyes anyagok (Pb, H₂SO₄) sorsa megoldatlan. Az Európai Unió akkumulátor-direktívája nagyon megszigorítja a higany, a kadmium és az ólom használatát az akkumulátorokban, így ezek alkalmazása kihalásra van ítélve.

Az akkumulátorok élettartamát a töltés-kisütési ciklusok lehetséges száma jelöli ki, ami az anyagkombináció függvénye. A töltés-kisütési ciklusok közben az anyagok fokozatosan elhasználódnak, a megvalósítható ciklusszám néhány száz, és csak néhány robusztusabb felépítésű típusnál érhető el 1000 körüli érték.

Az akkumulátorok a hálózathoz vételezett villamos energiát jelentős, 20–50%-os veszteséggel szolgáltatják vissza. Ha ehhez hozzászámítjuk a hőerőművek hatásfokát, és a hálózati veszteséget, kitűnik, hogy hőerőműves rendszerben az akkumulátorról hajtott villamos autók eredő energetikai hatásfoka nem jobb a belső égésű motorok igen gyatra átlagos hatásfokánál. A villamos autók környezetvédelmi előnye persze vitathatatlan.

A kémiai áramforrások harmadik típusát a tüzelőanyag-cellák képviselik. Ezekben lényegében az elektrolízis ellentettjét valósítják meg, katalizátorok segítségével elektrolitokban hoznak létre tüzelőanyagok oxidációjával elektrokémiai folyamatokat. Ennek során a kémiai reakciók szabad energiája alakul át villamos munkává. Az elemek mindaddig szolgáltatják a villamos energiát, amíg biztosítva van a reagensek utánpótlása. Működésük leginkább tüzelőanyagok (hidrogén, metán, metanol, hidrazin, ammónia, szén-monoxid stb.) láng nélküli lassú égésén alapul oxigénben, levegőben vagy más

⁹⁶ Metálhidrid.

oxigéntartalmú anyagban (még víz is lehet). A tüzelőanyagot az anódhoz, az oxidánst a katódhoz vezetik, az elektródák felületére felvitt, vagy a közelükben elhelyezkedő katalizátorok elősegítik a bevezetett gázok adszorpcióját és a kívánt reakciók lefolyását. Az égés szokásos módjánál a tüzelőanyag-molekula elektront ad át a közelébe kerülő oxigénmolekulának, az így kialakuló ionpár az elektrosztatikus erők hatására égéstermékévé egyesül. A tüzelőanyag-elemekben az oxigén távol van a tüzelőanyagtól, az elektronátadás a külső áramkörön keresztül történik és az égéstermékévé egyesülés később, és lassan következik be, miután az ionok az elektroliton keresztül vándorolva az egyik elektródtól a másik elektród környezetébe jutnak. A bevezetett reagensek gyakran kémiai reakciók közben alakulnak át ionokká.

Savas elektrolitokat a pozitív töltésű tüzelőanyag-molekulák, lúgos elektrolitokat a negatív töltésű OH^- ionok vándorlása jellemzi. Az elemek működése alapulhat fémek oxidációjára is levegőben, a kísérletek az oxidációtól eltérő reakciótípusokra (pl. Na-S, Li- FeS_2 , LiAl- FeS_2) is kiterjednek. Ugyan a folyamatot már régen felismerték (Grove, 1839), gyakorlati hasznosítására csak az űrhajózásban került sor. Erre a célra többféle tüzelőanyag-cellát fejlesztettek ki, és azok kitűnően megfeleltek a feladataiknak. Az űrobjektumok számára kifejlesztett rendszerek árát sikerült egy nagyságrenddel csökkenteni, ezzel megnyílt a földi alkalmazás lehetősége is, amit az energetika nagy ígéretének tekintenek. A fejlesztés egyik iránya tüzelőanyag-cellák kialakítása járművek hajtásra, sokan ebben látják a közúti közlekedés jövőjét, és a környezetszennyezés kiküszöbölésének útját. Ennek megfelelő infrastruktúra is feltétele, ami vagy a szükséges tüzelőanyagokat szolgáltató új elosztóhálózattal biztosítható, vagy a meglévő töltőállomások jelenleg is forgalmazott üzemanyagait a járművek fedélzetén alakítják át a kívánt reagenssé, pl. az üzemanyagot vízgőz vagy szén-dioxid segítségével reformálva aktívabb komponensekre bontják.

A fejlesztés másik célja villamos energiát szolgáltató tüzelőanyag-cellák kifejlesztése, egyrészt autonóm energiaforrásként, esetleg hőfejlesztéssel kapcsolva, másrészt a hálózathoz kapcsolódva csúcsergia fedezésére. Ugyancsak cél a hordozható készülékek számára áramforrások kialakítása.

A tüzelőanyag-cellákban nemcsak a tüzelőanyag és az oxidálóközeg folyamatos betáplálását, hanem az égéstermékek és a fejlődő hő folyamatos eltávolítását is biztosítani kell. Az üzembiztos működésnek fontos és nehezen kielégíthető követelménye, hogy miközben a reakció áramot fejleszt, az elektród-elektrolit rendszer maradjon változatlan. Ehhez nemcsak az égéstermékeket kell eltávolítani, hanem az anyagoknak ellent kell állni az agresszív környezetnek és a szekunder kémiai reakcióknak. Az elektródák anyaga lehet fém, szén, műanyagba (rendszerint teflon) ágyazott fémháló vagy félvezető. Az elektróda többnyire porózus szerkezetű, hogy biztosítsa a reagensek intenzív kölcsönhatását. Az elektródába ágyazzák a reakciót gyorsító katalizátorokat is (nemesfémek, palládium, nikkel-borid, egyes oxidok stb.). Az elektrokémiai reakciókat nemcsak katalizátorokkal lehet intenzifikálni, hanem a hőmérséklet és a nyomás növelésével is. Az elektrolit lehet savak, lúgok és sók vizes oldata, olvasztott só, ionosan vezető szilárd anyag vagy félvezető is, a méretek csökkentésére ioncserélő anyagból készített membránban megkötött elektrolitokat is használnak.

A tüzelőanyag-cellákat nem korlátozza a Carnot-hőkörfolyamat, így nagy energiaátalakítási hatásfok valósítható meg. Üzembiztosak, mivel nem tartalmaznak mozgó alkatrészeket. Tetszőleges teljesítményre építhetők ki, kísérleti jelleggel egyaránt készültek miniatűr áramforrások és MW nagyságrendű erőművi létesítmények. A tüzelőanyag-cellák feszültsége a katód és az elektrolit, valamint az anód és az elektrolit közötti potenciálját összege, ami 1 volt körül mozog. A feszültség csökken, ha nő az elektroliton átfolyó áram, vagyis a cella terhelése. Kellő számú cellát sorba, illetve párhuzamosan kapcsolva tetszőleges feszültségű, illetve teljesítményű berendezések állíthatók elő. Minden cellában biztosítani kell a reakciófeltételeket, és mindegyikből el kell távolítani a reakciótermékeket, valamint a fejlődő hőt. A tüzelőanyag-cellás erőművek csendes, igénytelen és környezetbarát létesítmények, hidrogéntüzelésnél az égéstermék víz, más üzemanyagok esetében kedvezőtlen légszennyezők (CO_2 , NO_x , C_xH_y stb.) is keletkeznek. Növelhető az energetikai hatásfok, ha a magas hőmérsékleten távozó égéstermékkel gázturbinát működtetnek, és hasznosítják a hulladékhőt is.

A legfontosabb tüzelőanyag-cellák a 6.17. táblázatban láthatók. A kémiai reagensek, az elektródok és elektrolitek nagyszámú kombinációjából sokféle tüzelőanyag-cellát lehet kialakítani. Ezeket az elektrolit jellege, vagy az üzemi hőmérséklet alapján osztályozzák. A vizes elektrolitos rendszerek a legkiforrottabbak, egyes konstrukciókban ioncserélő membránokba felitatott elektrolittal. A legegyszerűbbek az alkáli lúgos (AFC⁹⁷) megoldások, melyek kitűnően beváltak az űrtechnikában. Tiszta hidrogénnel és oxigénnel működnek, kényesek a reagensek tisztaságára, különösen a CO_2 -szennyezésre. Az elektrolit 35–40%-os kálilég, katalizátorként platinát, palládiumot, ruténiumot, nikkelt alkalmaznak. A legtöbb tapasztalat a tömény foszforsav-elektrolitos (PAFC⁹⁸) tüzelőanyag-celláról áll rendelkezésre, mivel 200–250 kW-os teljesítménnyel autonóm áramforrásként több száz példány működik. Az elektrolitot többnyire porózus műanyagban itatják fel. Az elektróda műanyagba ágyazott szén, nemesfém katalizátorral bevonva. Az üzemi hőmérséklet 200 °C alatt van, a hatásfok 40–60%. Sokféle tüzelőanyag (hidrogén, hidrazin, benzin, gázolaj, metán) használatára alkalmas, szénelgázosítással nyert fűtőgáz is számításba jöhet. Az oxidáns lehet oxigén, levegő, valamint hidrogén-peroxid. A típus járműhajtásra is számításba jöhet.

A legnagyobb teljesítményt a karbonátos tüzelőanyag-cellákkal (MCFC⁹⁹) érték el. Ezek elektrolitja töltőanyaggal pasztaszerű konzisztenciájúvá tett sóolvadék (pl. Li_2CO_3 , Na_2CO_3 vagy K_2CO_3), aminek azonban magas, 650 °C üzemi hőmérséklet az ára. Nagy előnye, hogy nincs szükség drága katalizátorokra és a különleges elektróda anyagok iránt is minimális az igény. Szénelgázosítással kombinálva is alkalmazható. Villamos energia mellett hőszolgáltatásra is alkalmas. Ezt a rendszert tartják erőművi célokra a legmegfelelőbbnek, több MW-os prototípusok is létesültek.

⁹⁷ Alkaline fuel cell.

⁹⁸ Phosphoric acid fuel cell.

⁹⁹ Molten carbonate fuel cell.

6.17. táblázat. Tüzelőanyag-cella típusok

Jelzés	Üzemanyag típusa	Elektrolit	Működési hőmérséklet, °C	Hatásfok, %
AFC	alkáli elektrolit	pl. 30%-os vizes kálium-hidroxid	80 alatt	60–70
PEMFC	protoncsere membrános	protonáteresztő membrán	70–220	50–70
DMFC	direkt metanol membrános	protonáteresztő membrán	90–120	20–30
PAFC	foszforsavas	tömény foszforsav	150–220	50–60
MCFC	olvadt karbonátos	Li-, Na-, K-karbonát	>600	50–60
SOFC	szilárd oxidos	cirkónium-oxid	600–1100	60–65

A polimer-elektrolites cellákban (PEFC,¹⁰⁰ illetve PEM¹⁰¹ és PEMFC¹⁰²) az elektrolitot vékony, gáztömör perfluorizált membránnal alakítják ki, amin csak a hidrogénion tud áthatolni, majd egyesül az oxigénnel. Az üzemi hőmérséklet <140 °C, nagyon kevés Pt katalizátort igényel, a hatásfok ~80%, teljesítménysűrűsége nagy, ára viszonylag alacsony. Szokásos a SPEFC¹⁰³ megnevezés is. Járműhajtásra ez a legígéretesebb rendszer, fejlesztésében versenyeznek az autógyárak. Valószínűleg kezdetben teherautókon vagy autóbuszokon fogják alkalmazni, személyautókra csak az így szerzett tapasztalatok alapján gondolnak. A meglévő üzemanyag-ellátó infrastruktúra használhatósága érdekében olyan konstrukciókat fejlesztenek, melyeknél a járművek fedélzetén reformálják a szokványos üzemanyagokat a tüzelőanyag-cella tüzelőanyagává. Ennek elhagyhatóvá tételére szolgál a metanolt közvetlenül eltüzelő típus (DMFC¹⁰⁴), ez üzemanyagként reformált szén-dioxid felhasználására is módot ad. Így regeneratív tüzelőanyag-cellák alakíthatók ki, melyek szekunder áramforrások. Az égéstermégeket sokféle úton – kémiai redukálással, biokémiai, termikus, fotokémiai, radioaktív, eljárásokkal – lehet lebontani a kiinduló reagensekre. Energetikai szempontból is figyelmet érdemel, hogy a CO üzemanyagú elemek CO₂ égéstermékét szénrétegen átvezetve szén-monoxiddá lehet redukálni, így üzemanyagként újra bevezethető. Fejlesztik a metanol égéstermékét metanollá visszaalakító regeneratív cellákat is, valamint a benzin közvetlen hasznosítására alkalmas megoldást is. Kutatás tárgya a PEMFC cellák alkalmazása hordozható

¹⁰⁰ Polymer electrolyte fuel cell.

¹⁰¹ Polymer electrolyte membrane.

¹⁰² Proton exchange membrane fuel cell.

¹⁰³ Solid polimer electrolyte fuel cell.

¹⁰⁴ Direct Metanol Fuel Cell.

készülékek áramellátására. Ennek kulcskérdése az üzemanyag-tárolás, pl. hidrogén fémhidridben vagy nano-csőben.

Magas hőmérséklet (800–1000 °C) jellemzi a szilárd félvezető oxidkeramikus elektrolittal, pl. cirkónium-, ittrium-, kálium-oxid membránnal működő tüzelőanyag-cellákat (SOFC¹⁰⁵). A magas hőmérsékletet az indokolja, hogy alacsonyabb hőmérsékleten a félvezetők vezetőképessége kicsi, ennek ellentétele, hogy a magas hőmérsékletnek és a korrózióknak ellenálló szerkezeti anyagokra van szükség. Az 50–100 µm vastag membrán gázzáró, villamosan szigetel, de ionosan vezet. A rendszer nem igényel különleges anyagból készült elektródokat és drága katalizátorokat. A tüzelőanyag-elektrod (anód) Ni vagy Zn, a levegő-elektrod (katód) lantán vagy magnezit, a magas hőmérséklet miatt jelentős a korrózióveszély. A rendszer viszonylag kevés katalizátort igényel, határfoka 50%-ot meghalad. Lemezköteges kivitelétől (CFPFC¹⁰⁶) nagy teljesítményt remélnek, főleg helyhez kötött alkalmazásban. Szén-dioxid- vagy szén-monoxid-tartalmú tüzelőanyag használatára is alkalmas. A magas hőmérséklet különösen alkalmassá teszi üzemét kombinált ciklusban.

Az alacsony hőmérsékletű elemek közé sorolják a 25–120 °C-on üzemelő típusokat (AFC és PEMFC rendszer) ezek elektrolitja rendszerint KOH vagy H₂SO₄ vizes oldata, esetenként tömény H₃PO₄. Ebben a hőmérséklet-tartományban csak a hidrogén (és a meglehetősen drága hidrazin) jöhet számba üzemanyagként. Más anyagokkal a kívánt teljesítmény nem biztosítható, mert reakcióhajlamuk H₂ – O₂ – levegő – CO – CH₄ – szénhidrogének – C sor szerint csökken. A hidrogényártás költsége, energiaigénye és tárolása nagy tehertétel. A lúgos cellák nagyon tiszta hidrogént igényelnek, a CO₂- vagy CO-szennyezés az elektrolitból karbonátot képez, ami üzemképtelenséget okoz. A savas cellák nem ilyen érzékenyek e szennyeződésre, viszont a korrózióknak ellenálló elektródokat csak platinaötvözetekkel sikerült biztosítani. A közepes hőmérsékletű cellák (PAFC) üzemi hőmérséklete 250 °C körül van, tulajdonságaik átmenetet képeznek az alacsony és magas hőmérsékletű cellák között. A magas hőmérsékletű rendszerek (pl. MCFC és SOFC cellák) fejlesztését elsődlegesen az indokolja, hogy 650–700 °C felett gyakorlatilag minden számításba jöhető fluid halmazállapotú tüzelőanyag megfelelő reakcióhajlammal rendelkezik, és ezeket közvetlenül be lehet táplálni a cellába. Tisztításra csak erősen szennyezett tüzelőanyagoknál van szükség (1% S-tartalom felett), mert az elemek erre viszonylag érzéketlenek.

6.9. Kémiai eredetű sugárzás

A mesterséges világítás története lángok alkalmazásával indult. A fáklyák, mécsesek, gyertyák lángjában az égéstermék olyan magas hőmérsékletre hevül, hogy sugárzik. Minél magasabb a hőmérséklet, annál közelebb van a sugárzás spektruma a fehér fény-

¹⁰⁵ Solid oxide fuel cell.

¹⁰⁶ Ceramic flat plate fuel cell.

hez. A láng szerepe csúcspontját a gázvilágításban és a petróleumlámpákban érte el, ezt követően a villany mindent letarolt.

Nemcsak lángok bocsátanak ki sugárzást, egyes kémiai reakciók alacsony hőmérsékleten fényjelenséggel járnak (kemo-lumineszcencia), azonban ennek nincs gyakorlati hasznosítása.

6.10. Nukleáris üzemanyagciklus

A kitermelt hasadóanyagértől sok fázisból álló, bonyolult technológiájú üzemanyagcikluson keresztül vezet az út a reaktorokban hasznosítható fűtőelemig, majd a hasznosítás után a „kiégett” fűtőelem végleges sorsához. A technológiát eredetileg katonai célokra fejlesztették ki, amit azonban a polgári alkalmazásokhoz lényegesen módosítottak, az üzemanyagciklus fejlesztése jelenleg is sokoldalú kutató-fejlesztő tevékenység tárgya.

Az üzemek technológiája bonyolult, egyrészt védekezni kell a kémiai ártalmak és a sugárzás ellen, másrészt a láncreakció elindulásának elkerülésére elejét kell venni kritikus tömeg kialakulásának. Ezen túlmenően biztosítani kell a nem kívánatos személyek hozzáférését megakadályozó fizikai védelmet is, nehogy illetéktelenek hozzájussanak fegyver, vagy robbanó szerkezet előállítására alkalmas anyagokhoz. Az üzemek létesítése tökéletes, és csak nagy léptékben gazdaságos. Ezért megvalósításuk Magyarországon még távlatilag sem képzelhető el.

A bányatermék tonnánként legfeljebb néhány kg urán-oxidot tartalmaz, a feldolgozás első fázisa ennek a kinyerése. A bánya mellé telepített ércdúsítóban a kibányászott kőzetet törés, aprítás, néha flotálás után golyós vagy csömalmokban vizes iszappá őrlik, majd kémiai eljárással kivonják az uránércet. Tekintettel a feldolgozásra kerülő érc sokféleségére, telephelyenként egyedi eljárásokat dolgoznak ki a feltáráshoz. Többnyire savas vagy lúgos eljárást alkalmaznak, de előfordulnak más technológiák is. A leggyakoribb a kénsavas feltárás, ez volt a magyar gyakorlat is. Alkalmaznak sósavas és salétromsavas feltárást is, a lúgos eljárások főleg karbonátokat használnak. Biokémiai kilúgozási módszerek is terjednek, baktériumok segítségével nyerve ki az uránt az ércből. A tóriumércet feltárása szintén savas vagy lúgos eljárásokkal történik, további feldolgozásának módja hasonlít az uránéhoz.

Az oldott uránvegyületet szűréssel vagy ülepitéssel különítik el az iszaptól, ezt követően az oldatból többnyire ioncserélő gyantákkal, néha szerves oldószerekkel vagy csapadékképzéssel választják ki. A gyulladás és kémiai robbanás elkerülésére a folyamatokat vagy inert gázatmoszférában végzik, vagy nedves porral dolgoznak. Minden műveletnél elengedhetetlen a sugárvédelem, és gondoskodni kell az elfolyó radioaktív szennyvizek hatástalanításáról is. A szűrt és koncentrált anyagot kemencékben szárítják, azután pörkölik és tisztítják. A kivonásnál alkalmazott anyagoktól függően az ércfeldolgozás végterméke vagy tiszta urán-oxid (U_3O_8), vagy urán-oxidot tartalmazó nátrium-diuranát ($Na_2U_2O_7$), vagy ammónium-diuranát ($[NH_4]U_2O_7$) koncentrátum. A koncentrátumot sárga színe miatt nevezik sárga pogácsának, annak urán-oxid-tartalma 80% körüli érték. A sárga pogácsa tőzsdén jegyzett termék.

Az üzemanyagok előállításához az urán- (és esetleg tórium-) koncentrátumot kémiai átalakítások sorozatával olyan vegyületekké alakítják át (UF_6 , UF_4 , U_3F_8 , UO_2), amelyekből vagy tiszta fémet lehet előállítani, vagy amelyek a további technológiai lépések legalkalmasabb kiinduló anyagai. Természetes összetételű uránból készült üzemanyagot csak néhány grafittal és nehézzvízzel moderált reaktortípusnál használnak, és abból készülhet a szaporítóreaktorok tenyészköpenye is. A könnyűvízes reaktorokban dúsított uránt használnak, enyhe dúsításra tértek át a gazdaságosság javítása érdekében a gázhűtésű és a nehézzvízes reaktoroknál is. A dúsításához többnyire nagy tisztaságú urán-hexafluorid gázt állítanak elő a sárga pogácsából. Az első lépés a koncentrátum tisztítása, különösen fontos a neutronok befogására hajlamos, és ezzel az atomhasadást fékező „mérgek”, a B, Cd, Li és ritka földfémekből álló szennyeződések eltávolítása. Ezt követően kémiai és termikus folyamatok sorozatából álló konverziós eljárással állítják elő az urán-hexafluoridot. A leggyakrabban alkalmazott konverziós eljárásnál salétromsavban oldják a sárga pogácsát, a kiszűrt uranilnitrátból urán-oxidokat állítanak elő, majd megfelelő nyomáson és hőmérsékleten hozzák létre az UF_6 végterméket. E konverziós műveknél fontos követelmény a környezet védelme kémiai és sugárzó anyagok szennyezése ellen.

A dúsításra – vagyis a 235-ös uránizotóp koncentrációjának növelésére – többféle lehetőség van, az ipari gyakorlatban alkalmazott módszerek a 235-ös és 238-as izotópok tömegszáma közötti különbséget aknázzák ki. Az elsőnek létesült dúsítóművek gázdifúziós módszert alkalmaztak, kihasználva, hogy a molekulák diffúziósebessége a molekulasúly négyzetgyökével fordítva arányos. A szétválasztáshoz a nagy nyomásra komprimált gázt porózus falú csövön áramoltatják át, és a fal két oldalán uralkodó nyomáskülönbség hatására a kisebb nyomású térrészben feldúsulnak a kisebb atomsúlyú ^{235}U -t tartalmazó molekulák. A dúsulás azonban nem nagy mértékű, ezért sok fokozatot kell sorba kapcsolni, például 3%-os koncentráció eléréséhez 1200 fokozatot. Az eljárás nagyon energiaigényes. Kevesebb energiát, de sokkal költségesebb eszközállományt igényel a gázcentrifugás eljárás. A korszerű dúsítóművekben ezt a módszert alkalmazzák. A gázt nagy fordulatszámú (60 000/perc) ultracentrifugákba vezetik, és a molekulákat a centrifugális erő segítségével osztályozzák, a kisebb molekulasúlyú komponensek a tengely közeléből vezethetők el. Bár a 3%-os dúsításhoz elég mintegy 20 centrifugát sorba kötni, a szükséges mennyiség biztosításához nagyon sok centrifugát kell párhuzamosan kapcsolni, így az elemek összesített száma több mint a diffúziós eljárásnál. A kutató-fejlesztő munka más dúsítási lehetőségekre (lézersugárral, fűvókás rendszerrel, mágneses, valamint rádiófrekvenciás térrel, ioncserélőkkel) is irányul.

A dúsítás az atomenergetika egyik neuralgikus kérdése, mivel polgári és katonai célokra ugyanazt a technológiát alkalmazzák. Az atomerőművek fűtőelemeiben a 235-ös izotóp koncentrációját 3–4(5)%-ra növelik, a robbanószerkezetekben 90% körüli koncentráció szükséges. Eltérés csupán a dúsításhoz használt fokozatok számában van. Ezért kritikus kérdés, hány ultracentrifugát helyeznek üzembe Irán dúsítójában, annak eldöntésére, törekszik-e az ország atomfegyver előállítására. Jelenleg nagy koncentráció előállítására képes dúsítóművek csak az atomfegyverekkel rendelkező országokban vannak.

A dúsítás befejeztével a fűtőelemgyártáshoz az UF_6 gázból valamilyen szilárd halmazállapotú uránvegyületet állítanak elő. A könnyűvízes reaktorokban UO_2 porból kötőanyaggal oxidkerámiai módszerekkel szinterizált, erős fizikai és kémiai hatásoknak is ellenálló, üzemanyagot használnak.

Az atomenergetika másik kényes technológiája az újrafeldolgozás (reprocessálás), amit eredetileg a bombagyártáshoz fejlesztettek ki. A reaktorokban a 238-as U izotópok egy része gyorsneutronokkal ütközve 239-es Pu-má alakul, ami szintén hasadóanyag. Ez a plutóniumizotóp előnyösebb anyag a bombagyártáshoz, mint a 235-ös urán. Egyrészt kevesebb anyag kell a láncreakció beindulásához (10 kg szemben az urán 56 kg-jával), másrészt nincs szükség dúsításra. A polgári célú újrafeldolgozás előnye a plutónium kinyerése és az energiatermelésbe történő visszavezetése révén egyrészt az üzemanyag-bázis bővülése, másrészt a nagyaktivitású hulladék csökkenése.

Az újrafeldolgozás előtt a kiegészített fűtőelemeket néhány évig víz alatt tárolják, miközben csökken a sugárzás és a hőfejlődés mértéke, e pihentetés után a fűtőelemeket feldarabolják. Az újrafeldolgozásra több technológiát dolgoztak ki, legáltalánosabban forró salétromsavval kioldják az üzemanyagot és különválasztják a szerkezeti anyagokat. A vizes savas oldatból tributil-foszfátban oldva vonják ki az uránt és a plutóniumot (valamint a neptúniumot). Jó néhány más nedves technológia is fejlesztés alatt áll, a száraz eljárások pirokémiai módszerrel választják szét a hasadóanyagokat magas hőmérsékleten olvasztott kloridsóban.

Az újrafeldolgozás nagyon kényes művelet, mivel nagy mennyiségű, erősen sugárzó veszélyes anyag válik hozzáférhetővé. Az erős sugárzás miatt a technológia távkezelt és nagymértékben automatizált. Gondoskodni kell a kiszabaduló (főleg radioaktív H, C, Kr, I, Pu izotópokat tartalmazó) gázok és a nagyaktivitású (H, Co, Sr, Sb, Ru, I, Cu izotópokat, transzuránokat és hasadványokat tartalmazó) folyékony hulladékok kezeléséről és elszigeteléséről is.

A plutónium kezelése nagy elővigyázatosságot igényel, nemcsak erős sugárzó, hanem kémiai mérge is, kezelése fokozott biztonsági és őrzési követelményekkel jár együtt. Az újrafeldolgozással szemben erős a társadalmi és politikai ellenállás, mert hozzáférhetővé válik a robbanószerkezetekben használható plutónium. Ezért Carter elnök kezdeményezte a polgári felhasználást célzó újrafeldolgozás betiltását, amit néhány ország követett, de nem vált általánossá. A jég kezd olvadni, az USA is a tilalom feloldására kényszerült, az urán- és plutónium-oxidokból készített MOX fűtőelemek alkalmazása megindult, és a reprocessálás bevezetése a fejlesztés alatt álló IV. generációs atomerőművek programjában is szerepel.

7. Energiaátalakítás hőből

A hő az anyagok belső energiája, amit az elemi részecskék hőmozgása valósít meg. Az emberiség a legtöbb energiát hő formájában hasznosítja. Hő szükséges az emberi életkörülmények biztosításához (fűtés, vízmelegítés, ételkészítés stb.), és hő szükséges a legtöbb technológiai folyamathoz a nyersanyagok előállításától a megmunkálások sok fajtájáig. Közvetlenül vonhatunk el hőt a napsugárzásból és a környezetünkől, beleértve a Föld hőjét is. Közvetve pedig sokféle módja van a hőnyerésnek, az minden energiafajtából fejleszhető. A kapcsolat fordítva is igaz, hőből az energia minden más fajtája előállítható.

A hőfejlesztés legáltalánosabb módja exoterm kémiai reakció, ami többnyire tüzelőanyagok és motorhajtóanyagok elégetésével történik. A magyar energiagazdálkodás 85%-a erre alapul. A szükséges hőt vagy közvetlenül származtatják át tüzhelyeken, kályhákban, kemencékben a tüztérben vagy a füstgázhuzamban a felmelegítendő közegnek, vagy kazánokban felmelegített hőhordozókban továbbítják a hőt. A feladattól függően sokféle hőhordozót alkalmaznak (levegő, víz, gőz, alkalmasan megválasztott gáz, vagy folyadék), ezekkel fedezik a hőigények mintegy negyedét. Az anyagok közvetlen melegítésének jól irányítható és szabályozható módja a villamos hőfejlesztés, amire sokféle eljárás áll rendelkezésre. Nagy léptékben a nukleáris energiát is hőfejlesztés révén hasznosítják. Terjedőben van a hőt mechanikai munkából előállító hőszivattyú alkalmazása, a hőfejlesztés egyéb módszereit (pl. súrlódás) ritkán használják.

7.1. Kémiai változások előidézése

A vegyipari technológiák jelentős része endoterm reakciókra alapul, ezekhez hő bevezetése szükséges, a hőközlés az anyagok lényeges kémiai változásait okozhatja. E folyamatok elemzése nem az energetika, hanem a kémiai technológia tárgya. A reakciók gyakran csak meghatározott hőmérséklet tartományban jönnek létre, ilyenkor a reakciófeltételek megteremtéséhez is hőbevitelre van szükség. Az anyagjellemzők hőmérsékletfüggőek, a hőközlés jelentős fizikai változásokat (pl. halmazállapot változás, oldás, kristályszerkezet módosulása, disszociáció) eredményezhet. Hőközléssel lehet frakciókra bontani a kőolajat, kihajtani a szénből az illó alkotókat, kokszt gyártani, vagy műbenzint. Elég magas hőmérséklet felbontja a molekulákat, pirolízissel állítható elő generátorgáz, vagy vízbontással hidrogén.

7.2. Hőátszármasztatás

Gyakori technikai feladat a hő átszármasztása egyik közegből egy másikba. Ez történik a tüzelőberendezésekben, kazánokban, kemencékben, kémiai retortákban, és sok más technológiai berendezésben. Hőátszármasztással fűtjük a lakásunkat, készítjük az ételünket, hőátvitellel javítjuk az energetikai hatásfokot, pl. a kazánokba betáplált levegő, tüzelőanyag és tápvíz előmelegítésével. Ezeket a folyamatokat meghatározza egyrészt a hőhordozók hőtároló képessége, másrészt szerepük a hőátszármasztásban. Ha egy c fajhőjű m tömeg hőmérséklete T_1 -ről T_2 -re módosul, akkor hőtartalma

$$\Delta Q = m \int_{T_1}^{T_2} c dT = mc(T_2 - T_1) \quad (7.1)$$

értékkel változik. A c fajhő hőfokfüggő, a képletben a hőfok intervallumbeli átlagértéket kell figyelembe venni, az mc szorzat a hőkapacitás. A képlet csak addig érvényes, amíg a hőközlés vagy elvonás nem okoz fázisváltozásokkal ugrásszerű energiaváltozást. A c értéke fémeknél 0,1–0,8 kJ/Kkg, szilárd hőszigetelő anyagoknál 0,4–1,5 kJ/Kkg, folyadékoknál 0,8–5,0 kJ/Kkg, és gázoknál 0,8–13,0 kJ/Kkg. Gázoknál a fajhő értéke attól is függ, hogy a folyamat állandó térfogaton (c_v), vagy állandó nyomáson (c_p) zajlik-e. Az első esetben a 7.1 képlet mérvadó a c_v fajhő figyelembevételével, állandó nyomáson a c_p fajhővel a képlet ΔQ helyett a ΔI entalpiaváltozást szolgáltatja.

A hőkapacitásnak nemcsak a hő tárolásánál van szerepe, hanem a hőfejlesztés, vagy felhasználás ingadozásainak kiegyenlítésében is. Hő tárolására sokféle lehetőség van, a legegyszerűbb nagy hőkapacitású anyagok alkalmazása. Ilyenek pl. az építőanyagok (beton, kő, tégl), melyek az épületek fűtési és hűtési energiaszükségletét befolyásolják. Nagy a víz hőkapacitása is, fürdőszobánkban a bojler abban tárolja a hőt. Sok anyag rendelkezik nagy hőkapacitással, pl. az ötvözött öntöttvas, számos ásványi anyag, a tüzelőberendezéseket gyakran samottal bélelik, a tározós villanykályhákban a villamos energiarendszer kis terhelésű időszakában magnezit téglákat hevítenek több száz fokra, melyek azután a fűtést biztosító levegőt melegítik fel. Előnyösen használható hőtárolásra reverzibilis folyamatok rejtett hője (pl. halmazállapot változások, reverzibilis kémiai reakciók, oldás, abszorpció, disszociáció, struktúraváltozás) energiája. A fűtőművekben nyomás alatt álló tartályban a víz-gőz arány beállításával szabályozzák a tárolt hő mennyiségét. Vizsgálják 0 és 150 °C közötti olvadáspontú sóhidrátok és azok eutektikus keverékének a használhatóságát, ezek melegítve elvesztik a kristályvizüket, majd lehűtve újból megkötik. A 250–750 °C tartományban ígéretesnek tartják a tárolásra olvasztott sók rejtett hőjét, magasabb, 450–800 °C hőmérsékleten fluoridokkal és fémhidridekkel kísérleteznek. A sók alkalmazását akadályozza nehéz kezelhetőségük, agresszív és korrozív viselkedésük. Kevés hő tárolására nedvességszívó anyagok (pl. szilikagél) is számításba jöhetnek, felmelegítésnél lekötik a párolgási hőt, lehűtés közben visszaadják. A hőtároláshoz jó hőszigetelésre is szükség van, azt többnyire sok levegőt tartalmazó szervesetlen szálal, rostos anyagokkal (üvegből, azbesztből, bazaltból), hőálló műanyagokkal és keramikus anyagokkal alakítják ki.

A hőt hővezetéssel, hőátadással és sugárzással lehet átszármasztani. A hőközlés az anyagi minőségen kívül a geometriai elrendezéstől és a környezet jellemzőitől is függ.

A tényleges viszonyokat bonyolult modellekkel lehet követni, a tendenciákat néhány egyszerű egyenlet érzékelteti.

Egy nagy kiterjedésű λ hővezető képességű és d vastagságú sík lemez, vagy fal felületegységén, az időegység alatt hővezetés útján

$$q = \frac{\lambda}{d}(T_1 - T_2) \quad (7.2)$$

hőmennyiség halad át, ha a lemez két oldalán a hőmérséklet T_1 és T_2 . Fémek hővezetési együtthatója 40–400 W/Km, a hőszigetelő anyagoké legalább egy nagyságrenddel kisebb. A hővezetés megítélése főleg a szerkezetek viselkedésével kapcsolatban fontos, pl. tartályok, csövek falán keresztül áramló hőnél.

A szilárd testek felületéről, valamint folyadékok szabad felszínéről a mellettük áramló fluidumok konvekció útján szállítanak el hőt, illetve ellentétes hőmérséklet gradiens esetében adnak le hőt. Ennek mértéke a felület minőségétől, az áramlás sebességétől és jellegétől (lamináris, turbulens) függ. A T_1 hőmérsékletű sík és sima felületegységről az azzal párhuzamos homogén, lamináris áramlású T_2 átlaghőmérsékletű fluidum

$$q = \alpha(T_1 - T_2) \quad (7.3)$$

hőt szállít el. Az α hőátadási tényező fémfelületek mentén lassan mozgó gáznál 3–20 W/Km², gyors áramlásnál 10–100 W/Km²-re nő, áramló folyadékokban 200–10 000 W/Km², forrásban levő folyadékokban 1000–20 000 W/Km², és kondenzálódó gőzre 6 000–60 000 W/Km². Az utóbbi két értékben szerepet játszik a halmazállapotváltozás rejtett hője. Hőszigetelő anyagok hőátadási tényezője 1–20 W/Km².

Két nagy kiterjedésű T_1 és T_2 hőmérsékletű párhuzamos felület között a felületegységről sugárzás útján átadott hő

$$q = c \left| \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right|, \quad (7.4)$$

ahol a c sugárzási együttható a felület színétől és minőségétől függ, nagyságrendje 0,1–5 W/Km².

7.2.1. Légnemű hőhordozók

A hőenergia szállítása majdnem kizárólag fluid közegekben történik, melyek közül a legszélesebb körű alkalmazása a levegőnek van. Légáramok szállítják ide-oda az energiát, ahogy kialakul az időjárás. Légáramokkal fűtjük és hűtjük lakásunkat, munkahelyünket, járműveinket. Levegőt juttatunk be a tüzelőanyagok égéséhez a kazánokba és kemencékbe, a belső égésű motorok működtetéséhez. Sok technológiai folyamathoz kell levegőt bevezetni, annak előmelegítése növeli az energetikai hatásfokot, pl. a nagyolvasztók égéslevegőjét 600–1200 °C-ra, a nagy kazánokét 200–400 °C-ra melegítik elő. Meleg levegővel szárítják a mezőgazdasági és élelmiszer-ipari termékeket, légszárítást használnak nedves vegyipari és textilipari technológiáknál. Motorok és más gépek hűtésére

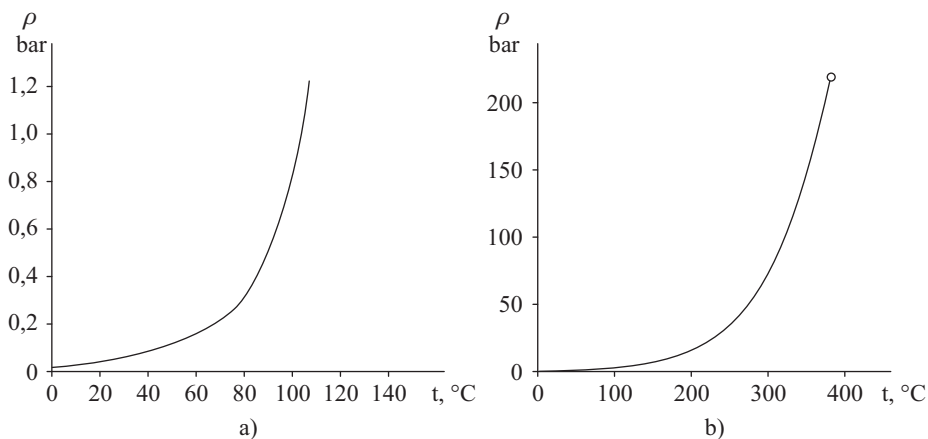
is használnak légáramokat, és mivel minden energiafelhasználás végső fokon hővesztéssé válik, az közvetlenül, vagy közvetve a légkört melegíti.

A levegő legfőbb előnye, hogy korlátlan mennyiségben, mindenütt rendelkezésre áll. Ezt viszont ellensúlyozza, hogy termikus és egyéb jellemzői nem a legkedvezőbbek. Fajhője ~ 1 kJ/kg, a hőátadási tényező sem nagy. A hőtartalom függ az állapotjellemzőktől, és a levegő összetételétől is. Az állapotjellemzőket az állapotfüggvények írják le, az állapotváltozások energiaváltozással járnak. A nyomás növekedését, vagy a térfogat csökkenését hőmérséklet-növekedés kíséri, ellentett folyamatoknál hőmérséklet-csökkenés következik be. Ez visszahat a levegő és a környező testek közötti hőcserére. Ilyen változásokat a cirkulációt biztosító eszközök (kompresszor, fúvó, ventilátor) is előidézik. A hőmérséklet-növekedés hatására a gázok kiterjednek, a sűrűségcsökkenés hatására felhajtóerő alakul ki, ebből származik a kémények huzata és a hűtőtornyok kürtőhatása.

A levegő sokféle komponens keveréke, 20,9% O, 78% N, 0,9% Ar, néhány tized ezrelék H₂, CO₂, nyomokban He, Kr, Xe, O₃, Rn, a környezet jellegétől függő szerves és szervetlen por, szennyező gázok, aeroszolok, valamint víz folyékony és gőz állapotban. A légnyomás a komponensek parciális nyomásának összege, a legváltozékonyabb a nedvessége, aminek energetikai szerepe is van.

A levegőben levő vízgőz parciális nyomása a mennyiséggel arányos. Lehetséges maximuma a szabad vízfelszín felett érvényesülő gőznyomás, ekkor a levegő vízgőzben telített, a relatív légnedvesség $\varphi = 1$. A parciális nyomás hőmérsékletfüggő (7.1. ábra). A levegő tényleges nedvességtartalma többnyire ennél kisebb, a relatív nedvességtartalom a tényleges gőznyomás és a maximális gőznyomás hányadosa. Szárításnál a levegő addig tud nedvességet felvenni, amíg nem éri el a harmatpontot ($\varphi = 1$), ez a folyamat lehűléssel jár. Ha a nedves levegőt lehűtik, a harmatponton a felesleges gőz kicsapódik, és energia szabadul fel.

A levegőben található vízgőz a legfontosabb üvegházgáz, fő szereplője a csapadék-képződésnek, a köd és szmog keletkezésének, a savas esőnek. Bár a szén-dioxid kon-



7.1. ábra. A gőznyomás hőmérséklet függése

centrációja a levegőben kicsi, a klímaváltozással kapcsolatos viták központi szereplője. A levegőben nyomokban található szennyező anyagok sokféle káros hatás okai: ózonlyuk, savas kémhatású folyamatok, aeroszolok, szmog stb.

Tüzelésnél a levegőben levő nitrogén ballasztanyag, az égés tiszta oxigénben magasabb hőmérsékletet biztosít, és kisebb a füstgáz mennyisége. A komponenseket cseppfolyósítással lehet szétválasztani, az oxigén forrtpontja -183 °C , a nitrogéné -196 °C . Így nyerhetők ki egyes hasznosítható gázok is: Xe (-108 °C), Kr (-153 °C), Ar (-186 °C). A nitrogénmentes füstgázból a szén-dioxidot is könnyebb leválasztani.

A tüzelésnél fejlődő hő jelentős részét a füstgáz szállítja el, ennek összetétele és hőmérséklete a tüzelőanyagtól és a tüzelés módjától függ. Legnagyobb része N_2 és CO_2 , de számottevő mennyiségben található benne O_2 , CO, vízgőz, szilárd részecskék, valamint a tüzelőanyag összetételétől függően SO_x , savgőzök és egyéb alkotók. A füstgáz a legmagasabb hőmérsékletekig ($1000\text{--}1100\text{ °C}$) használható hőhordozó, a magas hőmérséklethez nem tartozik nagy nyomás, viszont a hőátadási tényező kicsi. Energetikailag a legelőnyösebb a közvetlen melegítés a füstgázzal, de annak magas hőmérsékletét sok anyag nem viseli el. Ezért a hőmérsékletet gyakran csökkenteni kell (víz befecskendezésével, levegő bekeverésével, más közeg előmelegítésével). Az is korlátozó, hogy a füstgáz egyes összetevői nem kívánatos reakcióba lépnek a melegített anyagokkal, vagy más módon károsítják azokat. Különösen a savgőzök veszélyesek, melyek a harmatpontjuk alatt ($100\text{--}160\text{ °C}$) kicsapódnak, és folyékony állapotban nagyon agresszívek. Veszélyesek az olvadt fémek is.

A füstgáz kályhákban, kazánokban részt vesz a hőátaszármaztatásban, nagy kazánoknál a távozó füstgáz útjában elhelyezett hőcserélőkön keresztül különféle anyagok (tüzelőanyag, levegő, víz) előmelegítésében. Nagyon magas hőmérsékletet igénylő technológiáknál (építőanyag-ipar, kohászat) a füstgáz a kemencékben közvetlenül érintkezik a gyártandó anyagokkal. A közvetlen kapcsolatot azonban sok anyag nem viseli el, ilyenkor semleges hőhordozót (víz, gőz, levegő) iktatnak közbe.

Magas hőmérsékletű körfolyamatok – főleg gázturbinák – előnyös munkaközege a hélium, mivel $800\text{--}900\text{ °C}$ -on is stabil. E nemesgáz nem lép reakcióba a szerkezeti anyagokkal, a nukleáris sugárzás nem aktivizálja. Fajhője a levegőének ötszöröse, így kisebbek a hőátadó felületek. Előnyös tulajdonságai csak nagy tisztaságnál érvényesülnek, ezért nagyon tömör gázzáró megoldások szükségesek, tisztítása nagyon alacsony hőmérsékleten kriotechnikai megoldással történik.

Kitűnő hűtőközeg a hidrogén is, bevált pl. nagy turbógenerátorok hűtésére. A levegőhöz viszonyítva sűrűsége 0,07, ami nagy áramlási sebességet tesz lehetővé, hőátadási tényezője 1,35-szörös, hővezetése 7-szeres. Robbanásveszélyessége miatt jó tömítést és a koncentráció folyamatos ellenőrzését követeli meg. Felmerült a hidrogén alkalmazása távolsági hőszállításra is (Adam-Eva folyamat). A hőközlés a



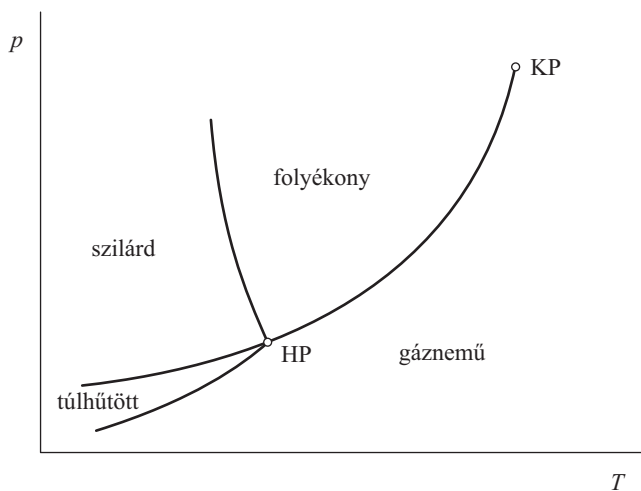
reverzibilis endoterm reakcióval történne, aminek termékei hidegen szállítanak a hőt, a felhasználás helyén expandálva pedig felszabadul a kötési energia.

Néha szén-dioxidot is alkalmaznak hűtésre (hűtőszekrények, gázhűtésű atomreaktorok).

7.2.2. Folyékony hőhordozók

A technikailag legsokoldalúbban használt hőhordozó a víz. Ez nemcsak azon múlik, hogy könnyen hozzáférhető, olcsó és viszonylag bőségesen rendelkezésre áll, hanem előnyösek a hőtani tulajdonságai is. Kevésbé kedvezőek kölcsönhatásai a szerkezeti anyagokkal (oldás, korrózió, vízkő lerakódás), ami visszahat a fizikai folyamatokra, pl. a hőátadásra. A nem kívánatos hatásokat a víz tisztításával, vagy adalékok adagolásával lehet ellensúlyozni. A természetben található nyers vízben mindig vannak oldott ásványi anyagok és szennyeződések. A felhasználás jellegétől függ, milyen mértékű tisztaságra van szükség, a lehetőségek széles körűek: szűrés, ülepités, derítés, vegyszeres vízkezelés, ioncserés tisztítás, desztillálás stb. A kölcsönhatások elkerülésére különleges szerkezeti anyagokat is alkalmaznak, rozsdálló acélból, vagy felületi védőbevonattal.

A víz állapotábrája (7.2. ábra) mutatja, hogyan alakul a halmazállapot a hőmérséklet és nyomás függvényében.



7.2. ábra. A víz állapotábrája

A HP hármasponton (+0,01 °C, 6,12 mbar) mindhárom halmazállapot lehetséges, a KP kritikus ponton (374,2 °C, 225,5 bar) felül csak gőz létezik. A víznek mindhárom halmazállapotban van energetikai szerepe. A jég hűtésre alkalmas, de ezt a szerepét csak a természetben őrizte meg, a technikában kiszorították a hűtőgépek. A folyékony víz és a gőz sokoldalúan alkalmazott hőhordozó, és fontos munkavégző közeg is.

Folyadékállapotban előny, hogy a víz fajhője (4,2 kJ/Kkg) kivételesen nagy, és hőátadási tényezője (10^3 – 10^4 W/Km²) is nagy. Korlátozást jelent, hogy légköri nyomáson a folyékony halmazállapot csak viszonylag szűk hőmérséklethatárok (0–100 °C) között

létezik. A fagyáspont némileg leszállítható adalékokkal, vagy a nyomás csökkentésével, a forráspont pedig a nyomás növelésével emelhető.

A legnagyobb mennyiségben hűtésre használják a vizet, ez teszi ki az ipari vízfelhasználás 80%-át. Hűtésre szükség van minden magas hőmérsékletű ipari technológiánál a szerkezeti anyagok védelmére. Többnyire vízzel hűtik a reaktorokat és munkagépeket, sőt gyakran a termékeket is (pl. a metallurgiában, kokszyártásnál, egyes vegyipari termékekénél). Néha gőzfejlődést is megengednek, mert a rejtett hő erősen növeli a hőelvonást. A hűtővízben távozó hulladékhő hasznosítása jelentősen javítja az energetikai hatékonyságot. Zárt rendszerben keringő vízzel hűtik a belső égésű motorok nagy részét is. A legtöbb hőt a hőerőművek kondenzátoraiból kell elvonni, a több GW-os erőművek esetében a hűtővíz mennyisége kisebb folyók vízhozamának felel meg, ennek biztosíthatósága lényeges szempont a telephelyek megválasztásában. Az is fontos kérdés, hogy a felmelegedett hűtővíz visszavezetése mennyire melegíti fel a befogadó víztest hőmérsékletét. A hőmérséklet-növekedést szigorú előírások korlátozzák, nehogy megzavarja a hidrobiológiai egyensúlyt, a vizek élővilágát, és öntisztuló képességét. Ha a frissvízhűtés feltételei nem biztosíthatók, hűtőtornyot alkalmaznak, aminél csak a nagyságrendekkel kisebb vízvesztést kell pótolni, amit ellentételez a drágább beruházás. Ahol még ennyi víz sem áll rendelkezésre, ott léghűtésre kerül sor.

Az emberi hőszükséglet jelentős részét is vízzel biztosítják. A legnagyobb vízmenyiséget a tisztálkodásra és háztartási célokra szolgáló használati melegvíz (HMV) teszi ki. Ezt vagy helyben állítják elő különféle fűtésű bojlerben, vagy csoportos hőellátással juttatják a felhasználás helyére. A HMV célszerű hőmérséklete 50–60 °C (néha ennél több), és a felhasználás jellegéből fakadóan a használt víz szennyvízként elfolyik. Ezzel szemben a csoportos fűtésre szolgáló víz többnyire zárt rendszerben kering, és csak a vízvesztésért kell pótolni.

Az egyedi fűtést fokozatosan háttérbe szorító csoportos fűtés a 19. század vége felé jelent meg központi fűtés formájában. A radiátorokban keringő hőhordozót az épületekben elhelyezett kazánokban melegítették fel. Magyarországon a II. világháború előtt központi fűtést elsősorban a városok belső kerületeinek igényesebb lakóépületeiben, valamint közintézményekben és kommunális létesítményekben alkalmaztak. A háború után a fűtési rendszer terjedése főleg a nem telepszerűen épülő új építményekben és intézményekben meggyorsult, majd megjelent a távfűtés, illetve egy lakás önálló csoportos fűtését biztosító etázsűtés, többnyire a HMV ellátással kapcsolva.

A központi fűtést kezdetben gőz hőhordozóval alakították ki, amit saját nyomása juttat el a radiátorokba. Gőzfűtésnél a 100 °C körüli gőzhőmérséklet következtében a fűtőtestek pörkölik a levegőben levő porszemcséket, azok abszorbeálják a légnedvességet és a levegő kellemetlenül szárazzá válik. A magas hőmérséklet miatt a fűtőtesteket védeni kell a véletlen érintés ellen, és a meghibásodásnál kiáramló gőz balesetveszélyes. Gőzt ma már csak üzemek technológiai hőigényének fedezésére használnak, lakóterületeket melegvízzel fűtenek, amit kis rendszereknél a termoszfion hatással, nagyobbaknál szivattyúval keringetnek. A fűtőtestek levegőoldali hőmérséklete alacsony, így a melegvíz-fűtés kellemesebb közérzetet biztosít a gőzfűtésnél. A melegvízfűtésnél a lakások fűtőtesteiben keringő víz hőmérséklete 40–70 °C, minél nagyobb az épület, és minél

zordabb az időjárás, annál nagyobb kezdőhőmérséklet szükséges a hőfokesések ellen-súlyozására.

A legkényelmesebb fűtési mód a távfűtés. E kommunális szolgáltatással nagyobb területek, esetleg egész városok hőellátása is megoldható. Az első távfűtést még 1882-ben helyezték üzembe (Lockport, USA), az első rendszerek ipari fogyasztókat ellátó hőszolgáltatáshoz kapcsolódtak. Egy ideig csak szórványosan alkalmazták, főleg az Egyesült Államokban, majd az 1920-as években meghonosodott Európában is, számos közép- és észak-európai országban jelentősen bővült a városok távfűtése. A távfűtés jelentős tüzelőanyag-megtakarítást tesz lehetővé más fűtési módokhoz képest, különösen hő és villamos energia kapcsolt fejlesztése (kogeneráció) esetén. Az is energetikai előny, hogy a hasznosítható energiabázis nagyon széles, az ásványi tüzelőanyagokon túlmenően számításba jöhet szilárd biomassza és biogáz tüzelése, szemétegetés, geotermikus energia, ipari hulladék hő stb. A távfűtés környezetbarát, a hőtermelés nagy berendezésinél alkalmazhatók az emissziót csökkentő korszerű eljárások, és az égéstermékeket koncentráltan, többnyire magas kéményekkel a felsőbb légrétegbe bocsátják ki, szemben az egyedi hőfejlesztésnek a talajszint közelében szétterülő légszennyezésével. A kogeneráció alkalmazását – az Európai Unió számos tagállamához hasonlóan – hazánk is ösztönözte, a termelt villamos energia kötelező átvételével magas áron. Ennek célszerűsége politikai vitákat váltott ki, mivel a kogeneráció támogatás nélkül is versenyképes, ezért a kötelező átvétel meg fog szűnni.

A távfűtésben hőhordozóként 130–180 °C-os forróvizet alkalmaznak, amihez természetesen nagyobb nyomás (1,5–12 bar) tartozik, a forráspont nyomásfüggését a 7.1. ábra mutatja. A magas hőmérsékletet az indokolja, hogy a szállítható hő mennyisége a hőmérséklettel arányos. A forró vizes rendszer könnyen szabályozható, és kevés veszteséggel jóval nagyobb távolságokat lehet gazdaságosan áthidalni, mint gőzzel. A forró vízből a hőközpontokban hőcserélőn keresztül állítják elő a lakások számára megfelelő melegvizet.

Magyarországon a távfűtés az 1960-as években honosodott meg, a tömeges lakásigényeket szolgáló lakótelepek építéséhez kapcsolódóan. Jelenleg távfűtéssel biztosítják a lakásállomány 15%-ának (650 000 lakás) fűtését, aminek 90%-a panelházakban található. A házigyári technológiával épített lakótelepeket eleve távfűtésre alapozták, ami szociálpolitikai megfontolásokból hosszú ideig jelentős állami dotációban részesült. A kényelem és a mesterségesen alacsonyan tartott tarifa következtében a távfűtés vált a legkívánatosabb fűtési móddá. Az áttérés a piacgazdaságra a költségek 2/3-át kitevő dotáció megszüntetésével járt, a távfűtés díja többszörösére nőtt, a kisjövedelmű családok kiadásainak 15%-át is elérheti. Mivel a panellakásokban általában alacsony jövedelmű – gyakran nyugdíjas – emberek élnek, időnként képtelenek a fűtés-számlák kifizetésére. A feszültség enyhítésére lakásfenntartási támogatást, adósságkezelési szolgáltatást (számlajóváírás, adósságcsökkentés) biztosító szociális támogatási rendszer szolgál az önkormányzatoknál, de ennek pénzügyi háttere ingatag.

A távfűtés a magyar energiapolitika egyik neuralgikus kérdésévé vált. Ennek egyik oka a szolgáltatás magas ára, a másik a lakók kiszolgáltatott helyzete. Az áttérés más fűtési módra gyakran műszakilag sem oldható meg, ahol pedig erre mód lenne, ott a ház

lakóközössége aligha rendelkezik a szükséges tőkével. Korábban kívánatos volt a távfűtés ellátási területén elhelyezkedő központi fűtésű épületek bekapcsolása a távfűtésbe. Ma ellentétes irányzat érvényesül, a hőszolgáltatás erős megdrágulásának hatására a jobb módú fogyasztók egy része törekszik leválni a távfűtésről, és áttérni gázfűtésre. A távfűtés fogyasztói körének szűkülése viszont tovább rontja a távfűtés versenyképességét, növelve a visszamaradó fogyasztókra eső fajlagos költségeket. A magas árak ellenére a rendszer forráshiányos, nem jut elég pénz a leromlott műszaki állapotú hálózat felújítására. A távfűtés tarifájának voluntarista leszorítása csak ideiglenes megoldás lehet, mert a tényleges költségeknek valamilyen forrásból meg kell térülni, ami végül a lakosságra hárul.

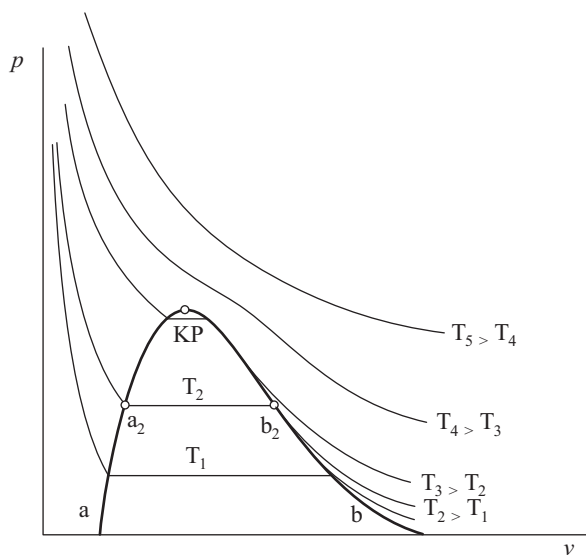
A vízhűtéssel szemben a legszigorúbb követelményeket az atomreaktorok támasztják. A nyomottvízes reaktorokban 140–160 bar nyomás és 300 °C körüli hőmérséklet, a forralóvizekben kisebb nyomás, de magasabb hőmérséklet jellemzi a viszonyokat. Ezekben a reaktorokban a víz feladata nemcsak a hő elszállítása az aktív zónából a hőcserélőkhöz, hanem moderálás is, vagyis a neutronokat a víz lassítja le a láncreakcióhoz szükséges sebességre. A víz elnyeli az ionizáló sugárzásokat, ezért szerepet kap a biológiai sugárvédelemben is. Egyes reaktorokban nehézvizet használnak hűtésre, ami hatásosabb moderátor a könnyű víznél, az ilyen reaktorokhoz nem feltétlenül szükséges az üzemanyag dúsítása.

Az atomreaktorok hűtővizével szemben nagyon szigorúak a követelmények, el kell viselniük a szélsőséges termikus viszonyokat és az erős sugárterhelést, igény a nagy tisztaság és a kémiai stabilitás, beleértve a korrózió elkerülését is. A magyar kutatók nemzetközileg elismert eredményeket értek el a vízkezelés és tisztítás terén, erre támaszkodva számos ipari vízkezelő rendszer valósult meg. Ez a háttér alapozta meg azt a KGST-megállapodást, ami Magyarországot bírta meg az atomerőművi vízkezelő rendszerek fejlesztésével és szállításával. A Nitrokémia kiváló minőségű ioncserélő gyantákat fejlesztett ki és gyártott, sajnos ez a tevékenység a rendszerváltást követő piaci viszonyok között elsorvadt. A technológiai berendezések gyártása a Vegyészter feladatává vált, amihez korszerű eszközöket szereztek be. A vízkezelő rendszerek hazai és külföldi szállításai révén a vállalat nagyon megerősödött, a KGST széthullása után profiljának erős bővítésével jelentős iparvállalattá vált. Az ország politikai és gazdasági vezetésével összefonódva a gazdaság egyik meghatározó tényezője lett, de ez a kapcsolat idővel elsorvadt.

A vízkezelés terén kivívott tekintély magabiztosságot és önhitteget teremtett a Paksi Atomerőműben, ami az erőmű legsúlyosabb üzemzavarára vezetett. A reaktor hőjét elszállító primer körű víz hőcserélőn keresztül fejleszti a gőzt a turbinát hajtó szekunder körű vízből. Ezt a hőcserélőt felújították, a feladatot végző munkásokat meg kellett védeni a primer oldali felületekre lerakódott radioaktív szennyeződés sugárzásától. A felületeket kémiai kezeléssel (dekontaminálás) tisztították meg, a helytelen módszer miatt a primer körű vízbe rozsdá részecskék kerültek. A szennyeződés a legszűkebb áramlási keresztmetszetben felgyorsulva a vízáramból a reaktorban a fűtőelemekre ülepedett ki. Az erőmű – gazdasági érdekből – a nagyszámú szennyezett fűtőelem megtisztítását határozta el, pedig ilyesmire a világon még sehol sem állt rendelkezésre tapasztalat. A kifejlesztett

tisztítóberendezés konstrukciója nem volt megfelelő, üzemeltetése során is elkövettek hibákat, a tisztítás alatt álló fűtőelemek túlmelegedtek és széttrtek. A törmelék a tartály fenekén szétterült, ha egy része valahol a kritikus tömeget elérő mennyiségben gyűlik össze, szabályozhatatlan láncreakció indulhatott volna el, ami szörnyűséges nukleáris katasztrófát idézett volna elő. Szerencsénkre ez nem következett be, de a következmények felszámolása és az eredeti állapot helyreállítása így is több évbe telt, sok milliárd forintnyi kárt és szakmai presztízsveszteséget okozva az országnak.

A vizet gőzállapotban is sokoldalúan használják, mind hőhordozóként, mind munkavégző közegként. Energiatartalmát nemcsak a fajhője szabja meg, hanem a párolgás során felvett rejtett hője is, ami kiugróan magas más anyagokhoz viszonyítva. Ezt vissza lehet nyerni, értéke a teljes hőtartalom 90%-át is meghaladhatja. Munkaközegként a vízgőz korszakalkotó szerepet játszott a gőzgép kialakulásával. E nélkül az ipari forradalom létre sem jöhetett volna. A gőz hasznosíthatóságát bonyolult módon befolyásolják az állapotjellemzők (7.3. ábra).



7.3. ábra. A víz határgörbéi

Az elgőzölgés folyamata a 7.3. ábrán követhető, a határgörbe *a* jelű szakaszától balra csak folyadék állapot létezik, a *b* jelű szakasztól jobbra csak gőzállapot. Állandó hőmérsékleten történő hőközlés közben a folyadék állapotjellemzői izotermikusan alakulnak, pl. a T_2 izoterma szerint. Az a_2 pontban kezdődik a forrás, és a b_2 pontban fejeződik be, az izoterma vízszintes szakaszán balról jobbra haladva a gőztartalom 0-ról 100%-ra nő, a b_2 pontban a gőz telített. A b_2 ponton túl a gőz túlhevített, viselkedését ismét görbült izoterma írja le. A rejtett hő annál kisebb, minél magasabb hőmérsékleten történik a hőközlés, a KP ponton túl zérus, a víz gázként viselkedik. A munkapontot csak a nyomás, a térfogat és a nedvességtartalom kölcsönhatásának figyelembevételével lehet megválasztani. Ezt az is befolyásolja, hogy a nyomás zárt térben gyorsan nő a hőmérséklet

emelkedésével, viszont nyitott berendezésben – amikor a gőz szabadon ki tud terjedni – ez nem következik be.

Hőhordozóként a gőzt főleg jelentős ipari hőigények fedezésére használják a 150–400 °C hőmérséklet tartományban. Főleg kemencék, reaktorok, autoklávok fűtésére, hőcserélőn keresztül anyagok melegítésére, a melegalakítás eszközeinek hevítésére alkalmazzák. Néha közvetlenül is használnak gőzt anyagok megmunkálására, alakítására. 180–190 °C-ig telített gőzt alkalmaznak, az ehhez tartozó 10–12 bar-ig terjedő gőznyomás még könnyebben uralható a szerkezetek kialakításánál. Ennél magasabb hőmérsékleten enyhén túlhevített gőzt használnak, ilyenkor a fajtérfogat növekedésével is számolni kell a berendezésekben.

A gőzfűtés egyszerű és olcsó berendezéseket igényel, a gőz továbbítását saját nyomása biztosítja. A kondenzálódó gőz nagy hőátadása következtében a radiátorok viszonylag kicsik. A rendszer nyomása 1–1,4 bar, a gőzhőmérséklet 100–110 °C, ami a fűtőtestek levegőoldalán 80–90 °C-ot eredményez. A nagyobb nyomás és hőmérséklet, valamint a korrózióveszély miatt a gőzrendszerek üzemeltetése és karbantartása igényesebb feladat. A vízkökviválás is nagyobb. A kondenzvízben gyakran levegő is van, visszavezetése nehézségekkel jár. Gőztávvezetékekkel az áthidalható távolság 5 km-nél kevesebb. A hátrányok miatt a gőz kiszorult a helységfűtés területéről, legfeljebb nagy szintkülönbségek áthidalására alkalmazzák.

Más folyadékokat is használnak hőhordozóként, leginkább a víz forráspontja feletti nagy nyomás elkerülésére. Ezen túlmenően más szempontok is szerepet kapnak, pl. korrózió kiküszöbölése, a víz egyes funkcióinak (nedvesítés, hajlam az oldásra, diszszociáció, hidratálás) elkerülése. Olajok mintegy 300 °C-ig használhatók, azon felül bomlanak. Előnyük, hogy nincs fagyveszély, sűrűségük kicsi, hidegen is szivattyúzhatók, nem korrozívak, kenőhatásuk van, 100 °C felett sem kell nagy nyomás. Magasabb hőmérsékleten más szerves folyadékok is számításba jöhetnek, főleg a vegyiparban, naftalin, difenil, glicerin stb. Ezek kémiaiilag semlegesek, vízzel és fémekkel nem lépnek reakcióba, de termikus stabilitásuk nem nagy, gyúlékonyak és robbanásveszélyesek, egy részük mérgező is. Fajhőjük és hőátadási tényezőjük kisebb, mint a vízé. A szerves folyadékokat főleg akkor alkalmazzák, amikor egyidejűleg más funkciót is ellátnak, az olaj transzformátorokban nemcsak hűt, hanem villamosan szigetel is, forgácsolásnál a víz-olaj emulzió a hűtésen kívül kenőanyag is. Ilyen kombinált feladatokra sok új anyagot fejlesztettek ki, pl. villamos berendezésekhez szilikonolajat, klofent. Magas hőmérsékletre a vegyiparban és a kohászatban a szerves anyagoknál nagyobb stabilitású és hőállékonyságú ionos kötésű vegyületeket is alkalmaznak, pl. kriolitot, titán-kloridot. Ezek viszont gyakran agresszívek más anyagokkal szemben.

Külön csoportot képeznek a hűtőgépek hűtőfolyadékai. Ezeknél követelmény, hogy telítési hőmérsékletük 1 bar nyomáson a környezeti hőmérséklet alatt legyen, kritikus hőmérsékletük haladja meg a kondenzációs hőmérsékletet, dermedéspontjuk pedig legyen az elpárologatás hőfoka alatt. Az ésszerű méretek kritériuma, hogy a körfolyamatok nyomása ne legyen se túl nagy, se túl kicsi. Nagy hűtőgépekben többnyire ammóniát használnak, közepes és kis gépek kedvelt hűtőközegei voltak a freonok, de az ózonlyukban betöltött szerepük miatt alkalmazásukat betiltották. Helyükbe más anyagok léptek,

szén-dioxid, propán, izobután stb. Abszorpciós gépeknél az oldószertől jó abszorpció képességet és kis oldáshőt, és a hűtőközegénél lényegesen magasabb forrponot kívánnak meg.

A nukleáris technika vezetett a folyékony fémek használatára. Ezek magas hőmérsékleten is stabilak és nagy hőigénybevételt is kibírnak. Hőkapacitásuk és hőátadási tényezőjük magas, a hőelvonást gyorsítja a fém jó hővezető képessége, ennek következtében a hőhordozóban egyenletes a hőmérséklet-eloszlás és a határfelületen kicsi a hőmérséklet-különbség. Gőznyomásuk kicsi, így a forrás elkerülésére nincs szükség nagy nyomásra, és kis nyomáson magas hőmérsékleten sem forrnak fel. Hőhordozóként az alacsony olvadáspontú fémek jöhetnek szóba. A nukleáris technikában azon fémek hasznosíthatók, melyek neutronbefogása kicsi. Ezek közé tartozik a bizmut, az ólom, a kálium és nátrium, valamint ezek néhány ötvözet. A IV. generációs atomerőmű fejlesztési programok ezek (főleg Na, illetve Pb-Bi ötvözet) alkalmazására is kitérnek. A gyorszaporító reaktorokban nátriummal nagyon intenzív hűtést sikerült elérni.

A fémek agresszív anyagok, kölcsönhatásba lépnek a környezetükkel, és toxikusak. Emiatt a folyékony fémet tartalmazó szerkezeteket különleges anyagokból kell készíteni, gondosan kell a tömítéseket kialakítani, a szobahőmérsékletnél jóval magasabb dermedéspont miatt külső fűtéssel kell védekezni a befagyás ellen, a tárolótartályokat inert gáz nyomása alá kell helyezni stb. A Na és K a vízzel hevesen ég, minden fém hajlamos az oxidációra, egyesek a levegővel is heves reakcióba lépnek. A Na a fémekbe belépve korrózióra hajlamos, vagy csökkent szilárdságú tartományokat alakít ki. Könnyen felaktiválódik, egyik izotópja erős γ -sugárzó. A radioaktív nátrium kikerülése ellen a szaporító reaktorokban háromkörös hőcserélőt alkalmaznak, melynek első körében van a sugárzó Na, a középső Na-tartalmú kör már nem sugároz, és a harmadikban található a felmelegítendő hőhordozó (pl. víz vagy hélium). Fémhűtéssel létesültek a kísérleti gyorszaporító reaktorok, azonban a gyakori nátriumtüzek miatt üzembiztonságuk nem volt kielégítő. Erre alapozva a környezetvédőknek sikerült betiltatni a programokat.

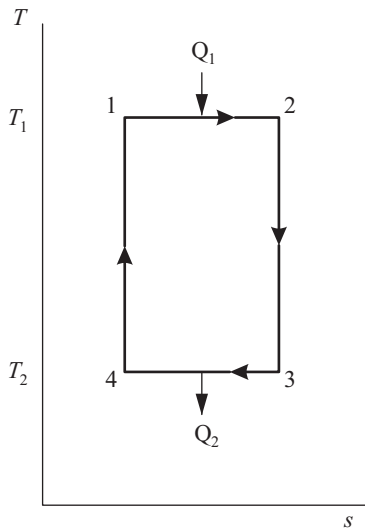
A szupravezetéshez szükséges alacsony hőmérsékleten cseppfolyós gázokat alkalmaznak hűtésre. Ezekkel nagyon alacsony hőmérséklet is elérhető, hidrogénnel $<20,4$ K, héliummal $<4,2$ K, nitrogénnel $<77,4$ K.

7.3. Mechanikai munka hőből

A mobil erőgépek legnagyobb része hőből fejleszti a mechanikai munkát. A hőt többféle módon lehet mechanikai munkává alakítani, legnagyobb jelentősége a légnemű munkaközeg expanziójának van. A gázok és gőzök belső energiájuk rovására expandálni képesek, miközben térfogatuk növekedésével, vagy megnövelt mozgási energiájukkal szilárd felületeket mozdtítanak el. Ezt úgy lehet a leghatékonyabban megvalósítani, hogy egy munkaközeggel hőkörfolyamatot végeztetnek. A körfolyamat lehet nyílt, ekkor a munkaközeggel hőt közölnek, majd expandáltatják, ezt követően a munkát végzett közeget kibocsátják a légkörbe, és a további folyamatok spontán módon a külső légkörben játszódnak le. Nyilvánvaló, hogy a nyílt körfolyamatban az expanziót csak

a környezet 1 bar körüli nyomásáig lehet lefolytatni, ellenkező esetben a munkaközeg nem tud kiáramlani a környezetbe. A zárt körfolyamatban jóval kisebb nyomásig tud a munkaközeg expandálni, ami jobb hatásfokot eredményez. Ennek viszont az ellentétele, hogy a munkavégzés után hőelvonás és munkabefektetés árán kell a munkaközéget a kiinduló állapotba visszajuttatni.

A hőközlés és hőelvonás módjától, az állapotváltozások körülményeitől, és a munkaközeg jellegétől függően sokféle hőkörfolyamat lehetséges. Adott hőmérséklet határok között a legtöbb munkát, és a legjobb hatásfokot egy Carnot által definiált ideális körfolyamattal lehet elérni (7.4. ábra).



7.4. ábra. Carnot-körfolyamat ideális gázban

A körfolyamatban T_1 hőmérsékleten izotermikusan Q_1 hőt közölnek a munkaközeggel (1–2), ezt követően a tökéletesen hőszigetelt rendszerben adiabatikus expanzió következik (2–3), a felesleges Q_2 hőt T_2 hőmérsékleten izotermikusan elvonják (3–4), majd adiabatikusan komprimálva juttatják vissza a munkaközéget (4–1) az eredeti állapotába. A végzett munka a körbezárt terület ($Q_1 - Q_2$), a hatásfok

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1. \quad (7.6),$$

csak a hőmérséklet határoktól függ. Az ábrából kitűnik, hogy az adott hőmérséklet határok között ennél jobb hatásfokú körfolyamat nem létezik, és ennél több mechanikai munkát szolgáltató körfolyamat nem képzelhető el.

A valóságos rendszerek hőszigetelése nem tökéletes, az állapotváltozások sem ideálisak, mindez veszteségeket okoz, ami az ábrán az egyenesek deformációjában mutatkozik meg. A tényleges hőkörfolyamatoknál a munkaközeg tulajdonságait is figyelembe kell venni, mivel a reális gázok állapotgörbéi eltérnek az ideális gázétól, a gőzöknél pedig

figyelembe kell venni a halmazállapot változások fázisdiagramok által kijelölt határpontjait. Vízre a viszonyokat a 7.2. és 7.3. ábra szemlélteti.

A műszaki fejlődésben a legnagyobb szerepet játszó munkaközeg a vízgőz volt. A gőz munkavégző képességét már az ókori görögök is felismerték, de Héron szerkezetei csak játékokat és csodákat működtettek, a termelést szolgáló megoldásokra még nem volt társadalmi igény. Az első próbálkozások gőzzel működő szerkezetek építésére a 17–18. század fordulója táján történtek, de ezeket kis teljesítmény és siralmasan rossz hatásfok jellemezte. Newcomen (1712) néhol 100 évet meghaladó életkort megélt gőzgépei is csak néhány kW-t értek el 1% körüli hatásfokkal. E sok példányban készült szivattyúk közül 6 Selmecbányán működött. Ezek eredetileg vízemelésre szolgáltak bányákban, de később más célokra is hasznosultak, települések vízellátására, mocsarak lecsapolására, folyadékok áramoltatására technológiai folyamatokban.

A nagy előrelépést Watt gőzgépe jelentette, az vált a kibontakozó ipari forradalom erőgépevé. Az 1765-ben épített első példány néhány éves tökéletesítés után ipari gyártásra érett konstrukcióvá fejlődött, az akkori követelményekhez viszonyítva nagy teljesítménnyel és kiemelkedően magas hatásfokkal, egyenletes járással és jó szabályozhatósággal. Az első, bányavíz szivattyúzásra szolgáló – lengő mozgást végző – gépek gyorsan elterjedtek. A tapasztalatok alapján több vállalkozó kereste meg levélben Wattot, hogy fejlesszen ki forgó mozgást szolgáltatató változatot, amivel műhelyek munkagépeit és szerszámgépeit lehet meghajtani. Az ilyen követelményt kielégítő gőzgép példátlan műszaki és gazdasági sikert aratott, megszületett a megfelelő eszköz a megfelelő helyen és a megfelelő időben. Az első atmoszferikus gőzgépek még nyílt körfolyamatot valósítottak meg, Watt a kondenzátor feltalálásával a zárt körfolyamatra tért át. Mai szemmel az első gőzgépek 1–2%-os hatásfoka és néhány kW-os teljesítménye meglehetősen szerény, de ez mit sem von le korszakalkotó jelentőségükből.

A dugattyús gőzgép döntő lökést adott az ipari forradalom kibontakozásának, megteremtve a gépek működtetéséhez szükséges hajtóerőt, és a termelékenység ugrásszerű növelésének lehetőségét. Megnyílt az út az áttérésre a kézműipari manufaktúrákról a gépesített gyáriparra, ki lehetett használni a termelés gépesítésének akkoriban kibontakozó lehetőségét, az ipari termelés látványosan felgyorsult. Az 1800-as évek közepére Európa és Észak-Amerika nagy részén a gépi nagyipar vált uralkodóvá, a kézi munka erősen visszaszorult. Ez nemcsak a technika fejlődésében volt forradalmi lépés, hanem még nagyobb jelentősége volt a társadalmi viszonyok változásának, hiszen ez teremtette meg a tőkés gazdasági rendszer kialakulásának a feltételét. Az ipari munkásosztály és a tőketulajdonosok megjelenésével átalakult a társadalom szerkezete, az új ipari centrumok kialakulása módosította a településszerkezetet.

Watt gőzgépeének előállítására társult Boulton birminghami gyárossal. A gépet előnyös áron értékesítették, de jogosultságukat kötötték ki a korábban használt hajtógéphez vagy a lóhajtáshoz képest a gőzgép alkalmazása révén elért megtakarítás harmadára. Találmányuk jelentőségének teljes tudatában voltak, pl. Katalin orosz cárnőnek tett ajánlatukban Boulton úgy fogalmazott, hogy „Én azzal kereskedem, amire az egész világnak szüksége van – erőt árulok!” A gőzgép gyorsan terjedt, mivel megbízható, bárhol felállítható, bármikor üzemeltethető, könnyen szabályozható, és gyakorlatilag korlátlan

hajtóerőt biztosított az ipar számára. A 19. század elejére gyakorlatilag minden riválisát kiszorította és egyeduralgó erőgéppé vált. Watt szabadalmának lejártáig, 1800-ig sok száz gőzgépet gyártottak. Legnagyobb részüket Angliában helyezték üzembe, bár a század vége felé külföldről is kezdtek befutni rendelések, ahogy ott is megindult az ipari fejlődés. Angliában 1810-ben már 5000 gőzgép volt üzemben, számuk 15 év alatt megháromszorozódott, összteljesítményük még gyorsabban nőtt. A világon üzemelő gőzgépek összesített teljesítménye a 18. században nulláról 10 MW-ra, majd a 19. században 100 GW-ra nőtt, vagyis évszázadonként 4 nagyságrendes viharos tempójú fejlődés zajlott le, a növekedés üteme két évszázadon keresztül évi 10% körül mozgott.

A gőzgépek és a különféle munkagépek gyártása a 19. század közepéig szinte angol monopólium maradt, Anglia a világ műhelyévé vált, gépexportja robbanásszerűen bővült, nem kis mértékben hozzájárulva a világbirodalom kialakulásához. Széchenyi és barátai világosan felismerték, hogy Magyarország számára a felemelkedés útja a nyugati minta – mindenekelőtt az angol példa – követése, ellenkező esetben a perifériára szorulunk. Sajnos csak hősiességből tudunk a világnak példát mutatni, a gazdaság fejlesztéséből nem.

A gőzgép teljesen átformálta az ipari termelés technológiáját, tetszőlegesen meg lehetett választani a telephelyet, és egyre nagyobb teljesítmények álltak rendelkezésre. A gőzgép segítette a bányászatot a nagy mélységek eléréséhez, a kohászatot a fűtatók működtetésével a nagy kohók megvalósításához, a vegyipart a nagy nyomások alkalmazásához, a gépipart, a textilipart és más szakmákat a termelékenység ugrásszerű növekedéséhez, megnyitotta az utat a városi vízvezetékrendszerek kialakításához, és még hosszan lehetne sorolni nagy jelentőségű hatásait. A gőzgép diadalútja nem korlátozódott az iparra, a gőzhajó és a gőzmozdony forradalmasította a közlekedést, elérhetővé váltak a Föld távoli régiói, a szállítási lehetőségek kiteljesedése egyetlen rendszerbe kapcsolta össze a nemzetgazdaságokat, az áruszállítás tömegméretűvé vált, kialakult a világkereskedelem, nagy mennyiségű áru szállítása vált lehetségessé tetszőleges távolságokra. A gőzgép nemcsak a közlekedésben nyitott új távlatokat, a 19. század második felében a mobil gőzgépek – a lokomobilok – teret nyertek a mezőgazdaságban és az építésben is. Sokat köszönhet a tudomány is a gőz új szerepének, a mechanika, a hidrodinamika, a hőtan, a kémia és számos más diszciplína új felismeréseivel.

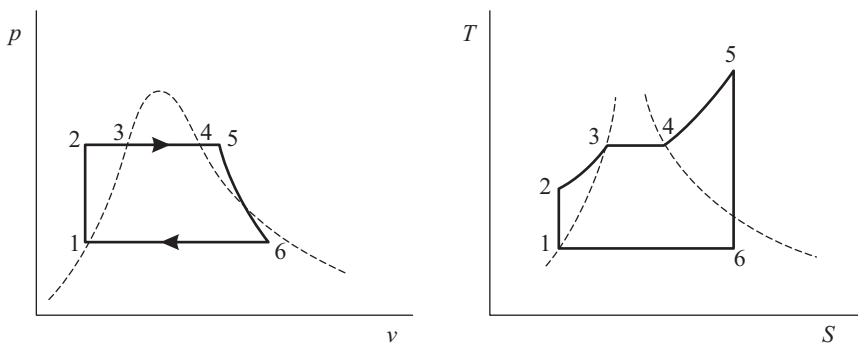
A lélegzetelállító növekedés természetesen visszahatott magára a gőzgép fejlődésére is, a legerősebb ösztönzés a vasúttól származott. A gőzgép konstrukciója rendkívüli módon kifinomult, egy évszázad alatt nagyságrendi javulást értek el a hatásokban és a fajlagos hőfogyasztásban, a megvalósítható egységteljesítmény sok nagyságrenddel nőtt. Az első gépek teljesítménye néhány kW volt, Fulton hajóját, a Clermontot 15 kW-os, Stephenson mozdonyát, a Rocketet 10 kW-os gőzgép hajtotta. Mai szemmel ezek játékszereknek tűnnek, összehasonlítva a jelenlegi járművek teljesítményével (még a lakásunk előtt parkoló gépkocsink teljesítménye is ezek sokszorosa). A 19. század végén már 100 MW-os gőzgépkonstrukciók is léteztek, a századforduló táján egyre körmönfontabb dugattyús gőzgépcsodák jelentek meg, és senki sem gondolta, hogy azok rövidesen hasznavehetetlen lomokként az ócskavastelepre kerülnek.

Új, rugalmasabb és hatékonyabb erőgépek – belső égésű és villamos motorok – vették el a gőzgépek kenyerét, nagy teljesítményre pedig a gőzturbinák vették át a sze-

repét. A hajtómű nélkül közvetlenül forgó mozgást szolgáltató gőzturbinák hatásfoka lényegesen jobb, mint a gőzgépeké, azok a gőz entalpiaváltozását alakítják át mozgási energiává. A gőzárám sebességét és irányát az állórészben kialakított vezetősatornak (álló lapátozás) és a forgórész lapátjainak alakja szabja meg. Attól függően, hogy a forgórész lapátsorában csak a gőz mozgási energiája változik-e meg állandó nyomás mellett, vagy pedig a nyomás is csökken, akciós és reakciós turbinát különböztetnek meg. A nagy turbinák sok lapátsort tartalmazó fokozatokból állnak, melyek között akciós és reakciós fokozatok egyaránt lehetségesek. Nagymértékű expanzió esetében a turbinát több házra bontják, ami lehetővé teszi a hosszú forgórész alátámasztását több helyen. Az utolsó lapátsor mechanikai igénybevétele korlátozza a megvalósítható lapáthossz, ezért nagy gőzmennyiségnél (600–800 m³/s felett) többszörös kiömlést alkalmaznak. Ennek egyik módja, hogy a kisnyomású házba középen belépő gőz két irányba távozik a ház végei felé. Nagy teljesítménynél a gőzárám megosztása is lehetséges több kisnyomású ház között.

A gőzturbinák legfontosabb alkalmazási területe a hőerőművek generátorainak hajtása. Az erőművi turbinák korunk legnagyobb teljesítményű erőgépei, egységteljesítményük GW-ot is elérhet. Alkalmaznak gőzturbinákat nagyon nagy teljesítményt igénylő berendezések – pl. nagy hajók, erőművi blokkok tápszivattyúi, nagy vegyipari kompresszorok – hajtására, de gyakran gőz áramlását hasznosító kisebb berendezések működtetésére is.

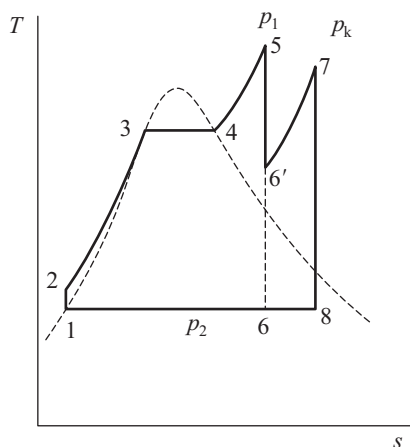
Az erőműveknél állandó törekvés a hatásfok és a teljesítmény növelése. Ennek egyik általánosan követett gyakorlata a fejlesztett gőz túlhevítése. Az így kialakított Rankine-körfolyamatot a 7.5. ábra mutatja. A T_2 hőmérsékletű hideg vizet a tápszivattyú nyomja a kazánba (1–2 szakasz), közben a nyomása p_2 -ről p_1 -re nő. A víz állandó p_1 nyomáson felmelegszik a T_f forrpontig (2–3), majd ezen a hőmérsékleten és p_1 nyomáson elgőzölög (3–4). A fázisokat elhatároló határgörbét elérve a gőz telítetté válik, azt elvezetik, és további hőbevezetéssel – még mindig p_1 nyomáson túlhevítik T_1 hőmérsékletre (4–5). Ezt követi az expanzió a turbinában (5–6), miközben a gőz hőmérséklete T_1 -ről T_2 -re, nyomása p_1 -ről p_2 -re csökken. A munkát végzett gőzt p_2 nyomáson hűtéssel cseppfolyósítják (6–1), a határgörbét elérve teljes egészében folyadékállapotba kerülve visszajut a kiinduló állapotba. A bevezetett hő a 2–3–4–5 alatti terület, az elvont pedig a 6–1 alatti, a végzett munka az 1–2–3–4–5–6–1 görbe által körülírt terület.



7.5. ábra. Rankine-körfolyamat

A 7.4. és 7.5. görbék összehasonlításából egyértelmű, hogy a Rankine-körfolyamat hatásfoka lényegesen elmarad a Carnot-körfolyamétól, a különbség csökkentése a gépszerkesztők állandó törekvése. Az egyik lehetőség a T_1 felső hőmérséklet növelése, amit az korlátoz, hogy 565–570 °C felett a korrózióveszély miatt a szokásos szénacélok helyett ausztenitos acélokból kell a szerkezeti elemeket készíteni, ami lényegesen megdrágítja a beruházásokat. A T_2 alsó hőmérséklet csökkentésének a környezetből nyert hűtőközeg (víz, levegő) hőmérséklete szab határt. Növelhető a p_1 nyomás is, de csak amíg ennek nyereségét nem emészti fel a kompresszió p_2 -ről p_1 -re.

A korlátok átlépésének egyik lehetősége a közbenső túlhevítés. Erre az ad módot, hogy a nagy erőművi turbinák a gyárthatóság, szállíthatóság és szerelhetőség érdekében több részből állnak, és azokat külön turbinaház veszi körül. Így megoldható, hogy az egyik turbinarészben a p_k közbenső nyomásig expandált gőzt visszavezessék a kazánba, ott ismételten túlhevítsék, és úgy vezessék be a következő turbinarészbe a további expanszióhoz. A körfolyamatot a 7.6. ábra szemlélteti, az 5 pontból a gőz nem a 6 pontig expandál, hanem csak a p_k értékhez tartozó 6' pontig, a közbenső túlhevítés a 6'–7 szakasz, és a további expansziót írja le a 7–8 szakasz. Ez a megoldás néhány százalékkal növeli a hatásfokot. Járulékos előny, hogy az expanszió végén (8 pont) a gőz nedvességtartalma kisebb, mint újrahevítés nélkül (6 pont), ami csökkenti a korrózió és erózió veszélyét. Építettek erőművet kétszeres újrahevítéssel is, de a rendszer bonyolultsága nem járt elég gazdasági haszonnal.

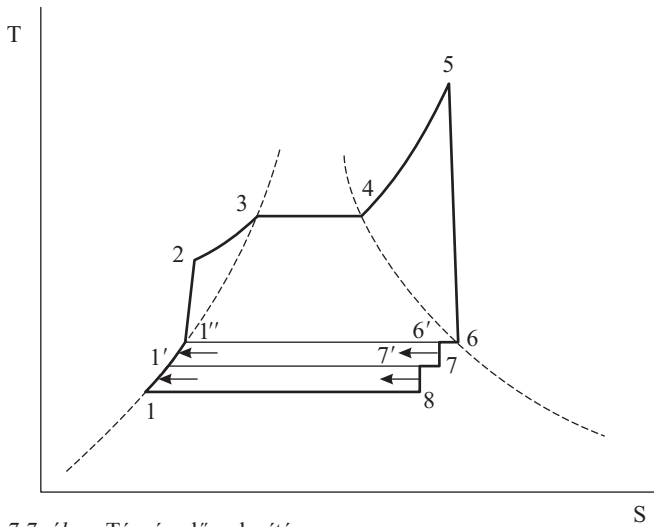


7.6. ábra. Közbenső újrahevítés

Sajnos a közbenső újrahevítés vízhűtésű atomerőműveknél nem oldható meg. A könnyűvizes atomerőműveknél csupán telített vízgőzt lehet előállítani, viszonylag alacsony T_1 hőmérsékleten. A hőmérséklet határt anyagtechnológiai szempontok jelölik ki, a túlhevítést a rendszer jellege akadályozza. Az expandált gőz visszavezetése az aktív zónába biztonsági okokból nem kívánatos, de nem is található olyan hozzáférhető térrész az aktív zónában, ahol a forrpon fölé lenne hevíthető a visszavezetett munkaközeg. (Volt javaslat a közbenső túlhevítésre tüzelőberendezéssel, de a kétféle technológia össze-

ötvezésére nem akadt vállalkozó.) Ezért az atomerőművek termikus hatásfoka kisebb, mint a tüzelőberendezésekkel működőké. Túlhevítés nélkül az expanzió végig a nedves gőz tartományban zajlik, járulékos megoldásokkal (a gőz szárítása, csepleváltás irányelstereléssel) mérséklük az ezzel járó következményeket.

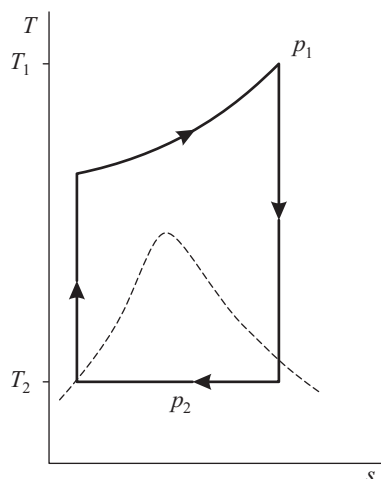
Még nagyobb nyereséggel jár a regeneratív tápvíz-előmelegítés (7.7. ábra). Az expandáló gőz egy kis részét egy vagy több megcsapolásban kivonják, és a tápvíz előmelegítésére fordítják (ezt jelzik a kis nyilak). A termodinamikai folyamatok optimalizálásával 6–10%-os hatásfokjavulás is elérhető.



7.7. ábra. Tápvíz-előmelegítés

A bemutatott körfolyamatok mindegyikében a víz elgőzölgése fokozatosan, a fázisdiagram csúspontjával jellemzett kritikus hőmérséklet alatt történik. E szubkritikus rendszerekben a fázisdiagram két határgörbéje közötti szakaszon (3–4) a gőz nedves, a kétfázisú közeg áramlása a berendezések kényes eleme. A szubkritikus rendszerekkel sok évtizedes tapasztalatok állnak rendelkezésre, a megoldások kiforrottak, továbbfejlesztésükre már csak kis lehetőség kínálkozik, ezért a 40% körüli hatásfokuk lényeges növelését nem lehet remélni.

A szubkritikus rendszerekben a nyomás sohasem halad meg 170–180 bart, ennek lényeges túllépésével a víz állapotjellemzői a kritikus pont (374 °C, 226 bar) fölé kerülnek. Ilyenkor elmarad a nedves gőz állapot, a folyadékból közvetlenül telített gőz keletkezik, a gőz gázként viselkedik. Ilyen szuperkritikus körfolyamatot ábrázol a 7.8. ábra, melynek felső határgörbéje egy p_2 nyomású izobár. A nagy blokkoknál gyakran szuperkritikus rendszert alkalmaznak, a hőmérséklet > 600 °C, a nyomás 240–260 bar. A jobb hatásfokot igényesebb szerkezeti anyagokkal, kényszeráramoltatással és bonyolultabb szabályozással kell megfizetni. A szén-dioxid-kibocsátás mérséklésére még nagyobb hatásfokú ultra-szuperkritikus (700 °C, 350 bar) rendszerek alkalmazását is tervezik.



7.8. ábra. Szuperkritikus körfolyamat

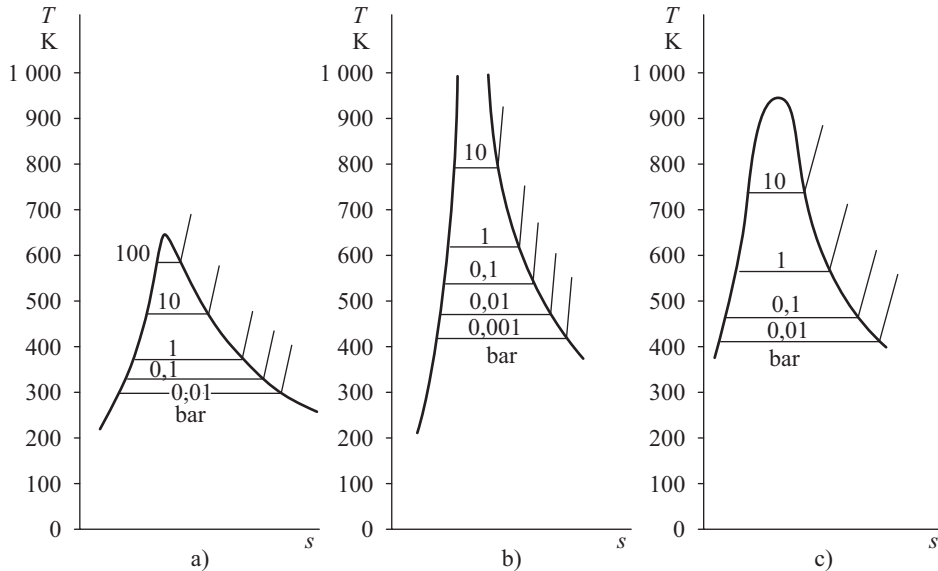
A gőz expanziójával működtetett dugattyúk visszaszorultak a kis gőzmotorok, valamint nagy erőt igénylő megalakítási eljárások munkagépeinek (gőzkalapács, kovácsoló szerszámok) működtetésére, melyekben mérsékelt nyomás (8–12 bar) és hőmérséklet jellemzi a viszonyokat. A gőzgép kései utóda a nagy fordulatszámú gőzmotor, melynek vezérlése a belső égésű motorokéhoz hasonló. Vannak elképzelések az alkalmazására, pl. gépkocsik hajtására, de a gyakorlati megvalósításig nem jutott el. Szelepek nélkül is kialakítható gőzmotor, külső melegítéssel, ami bármilyen hőforrásra támaszkodhat. Ez különösen megújuló, illetve alacsony hőfokszintű forrásokra kínál előnyös megoldást.

A gőzmotor unokatestvére a gáz munkaközeggel (levegő, H_2 , He) működő Stirling-motor. Melegítése és hűtése külső forrásból történik, szelepei nincsenek, felépítése egyszerű. Csendes, jó hatásfokú, kis hőfokkülönbségek kihasználására is alkalmas.

A vízgőz egyszerűen biztosítható, sokoldalúan hasznosítható munkaközeg, amivel hőkörfolyamatban minden teljesítményigény kielégíthető. Használatának azonban vannak korlátai, melyek a fázisviszonyok határgörbéjének jellegéből fakadnak. Az, hogy a határgörbék nem elég meredek, a hőközlés és elvonás lehetőségét korlátozzák, az erősen ellapuló jobboldali ág miatt az expanzió erősen nedves gőzben zajlik, ami erózióveszéllyel jár. A körfolyamat felső hőmérsékletéhez túlságosan nagy, az alsó hőmérsékletéhez túlságosan kis nyomás tartozik, amiből kedvezőtlen térfogatarányok származnak, befolyásolva a méreteket és költségeket. A hatásfokot kedvezőtlenül befolyásolja, hogy a görbe kritikus pontjához viszonylag alacsony hőmérséklet tartozik, és a rejtett hő értéke gyorsan csökken a hőfok függvényében. Érthető a tervezők régi törekvése, hogy a vízgőznél kedvezőbb munkaközéget találjanak.

A 7.9. ábra, csupán a lehetőségek érzékeltetésére, a vízgőz határgörbéjét két másik gőzével hasonlítja össze. Ezekkel sokkal kedvezőbb nyomásviszonyokkal sokkal jobb hatásfok érhető el, mivel az elérhető munkaterület jobban megközelíti a Carnot-folyamatét. A munkaközeg megválasztásához nem elég a termodinamikai lehetőség vizsgálata, technológiai követelményeknek is meg kell felelnie, legyen kémiaiilag stabil, ne

korrodálja a szerkezeti anyagokat, ne legyen mérgező stb. A higanygőz nagyon előnyös jelleggörbéje (7.9/b ábra) ellenére sem nyert létjogosultságot, mert drága és toxikus. Űrhajókban előfordult kálium és cézium munkaközégek használata, alkalmazásukra kísérletek folynak gázturbinákban. Magas hőmérsékletű körfolyamatokhoz a héliumot tartják a legcélszerűbb munkaközégeknek.



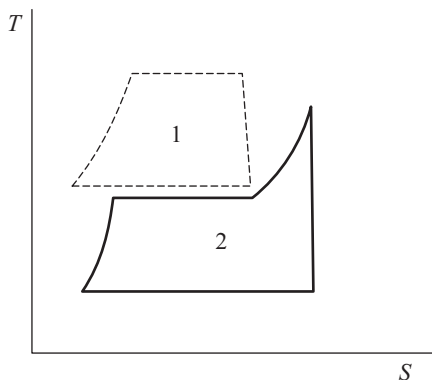
7.9. ábra. Néhány gőz határgörbéje
a) vízgőz b) higanygőz c) antimon-bromid

Alacsony hőmérsékletre – többek között hűtőgépekben – olyan anyagokat alkalmaznak, melyek nagyobb nyomáson kondenzálódnak, mint a víz, pl. ammónia, propán, izobután, n-bután, propilén. A vegyiparban és a geotermikus energiahasznosításban szerves gőzöket is alkalmaznak gázturbinákban, esetenként szerves Rankine-körfolyamattal (ORC¹⁰⁷). Erre a célra olyan nagy molekulású szerves folyadékok sokasága jöhet számításba, melyek termikus bomlás-hőmérséklete jóval a körfolyamat felső hőmérséklete felett van, fagyáspontja pedig jóval kisebb az alsó hőmérsékletnél.

Régóta foglalkoznak kettős körfolyamatokkal, melyeknél a felső hőmérséklet-tartományban lefolytatott körfolyamatból elvont hővel melegítik fel az alsó körfolyamat munkaközegét (7.10. ábra). A magas kritikus hőmérsékletű munkaközeg (pl. kálium) a vízgőzkörfolyamat felett, az alacsony hőmérsékleten viszonylag nagy nyomáson kondenzálódó (pl. ammónia) az alatt kapcsolható sorba a hagyományos gőz-

¹⁰⁷ Organic Rankine Cycle.

körfolyamattal. Kettős körfolyamatot valósítanak meg a gáz-gőz kombinált ciklusú erőművek. Ezekben a gázturbinából kilépő füstgáz hőjével fejlesztik a gőzturbina vízgőz munkaközegét.



7.10. ábra. Kettős körfolyamat

A törekvés az energetikai hatékonyság javítására nagy lökést adott a kapcsolt energia-termelésnek, aminél az expandált gőzt, vagy annak egy részét hőszolgáltatásra hasznosítják. Ezzel csökken a villamosenergia-fejlesztés végén a körfolyamatból veszteségként elvont hő, és megnő az eredő hatásfok. A nagy erőművekben ez a gőzturbinák megfelelő kialakítását kívánja meg.

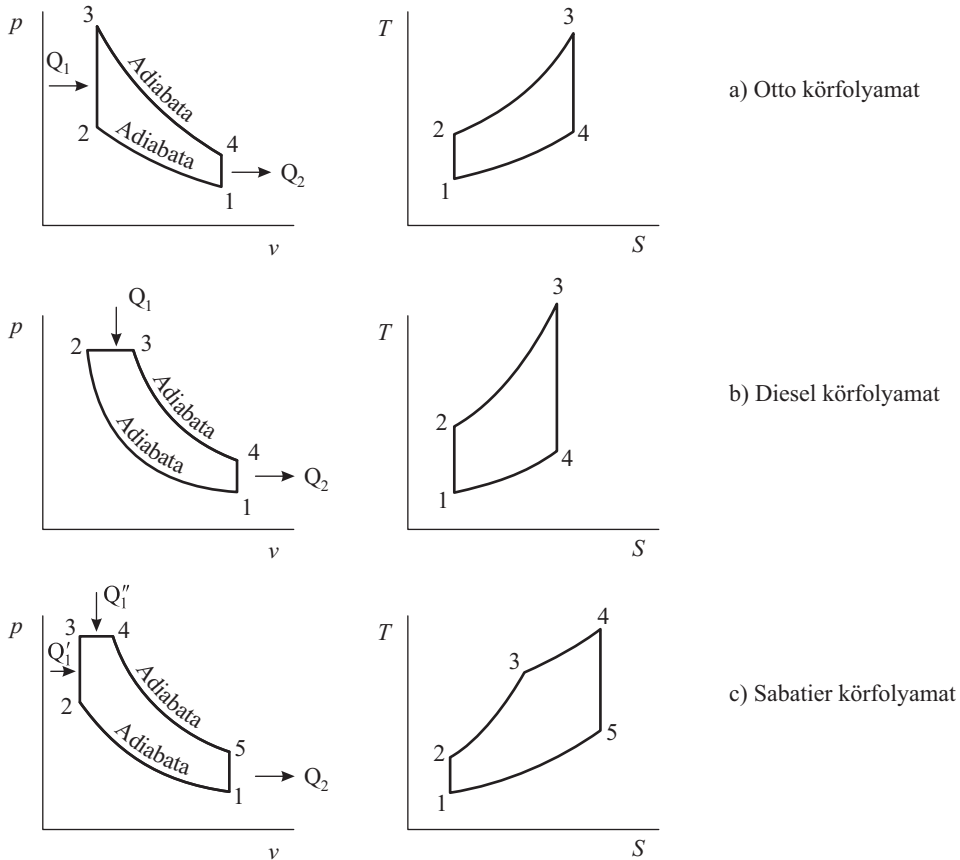
Az egyik lehetőség (kondenzációs elvételes), hogy az expandáló gőz egy részét egy vagy több megcsapoláson keresztül vezetik ki hőszolgáltatásra, többnyire távfűtésre. A másik lehetőség (ellennyomású), hogy az expanziót csupán néhány bar nyomásig folytatják és utána a gőzt elvezetik, ez főleg magas hőmérsékletű és nagynyomású ipari hőigények kielégítésére hasznos.

Terjed a helyi hőforrások és a megújuló energiák hasznosítására szolgáló kisléptékű, alacsony hőfokszintű kapcsolt energiatermelés is, gyakran autonóm rendszerben. Erre használják a kis teljesítményű erőgépeket (Stirling-motor, mikroturbina), vagy a szerves munkaközegű Rankine-körfolyamatot. Utóbbi helyett alkalmazzák a Kalina-körfolyamatot is, melynek munkaközege desztillációval szét nem választható elegy. Többnyire ammónia-víz keveréket használnak (optimálisan 70% ammóniával), aminek az elgőzölgése nem állandó hőmérsékleten, hanem állandó nyomáson történik, amivel jobb hatásfok érhető el.

A hőerőgépek legelterjedtebb típusai a belső égésű motorok. A hőközlés magában a munkatérben történik, miközben a beszívott levegőben a tüzelőanyag elég. A munkaközeg maga az égéstermék, ami expanzió után többnyire a környezetbe áramlik ki, a hőkörfolyamat ilyenkor nyílt. A jellemző körfolyamatokat a 7.11. ábra mutatja.

Az Otto-motornál (7.11/a ábra) a levegő-benzin keveréket kompresszió (1–2) után villamos szikra gyújtja meg, ugrásszerű nyomásnövekedés következik be (2–3), amit adiabatikus expanzió követ (3–4), majd a füstgáz kipufog (4–1). A dízelmotorban (7.11/b ábra) a kompresszió (1–2) után állandó nyomáson juttatják be a gázolajat (2–3), amíg

öngyulladás nem következik be, ami expanzióra (3–4) vezet, majd a füstgáz kipufog (4–1). A valóságos körfolyamatok némileg eltérnek ezektől az ideális viszonyoktól, egyrészt az állapotváltozások nem tökéletesek és veszteségesek, másrészt a gyulladási és robbanási viszonyok optimalizálása más időzítést igényel, pl. a 7.11/c ábra szerint (Seiliger–Sabathé-ciklus). A folyamatok kisebb módosításával számos másféle – a feltalálóról (Atkinson, Clausius, Ericsson, Lenoir, Miller, Stoddard) elnevezett – körfolyamatot is szabadalmaztattak.



7.11. ábra. Belső égésű motorok körfolyamatai

A benzinmotor könnyű, gyorsan és rugalmasan szabályozható nagy fordulatszámú erőgép. Főleg a kis önsúlyú járművek (személygépkocsi, motorkerékpár, kis raksúlyú tehergépkocsi, motorcsónak) és kisebb mobil munkagépek (szivattyúk, kompresszorok, anyagmozgató berendezések, mezőgazdasági és építőipari munkagépek) célszerű erőgépe. A repülés területéről a gázturbina és a sugárhajtás majdnem teljesen kiszorította.

A benzinmotor igénytelenebb feladatokra kétütemű, egyébként négyütemű kivitelben készül. A csak kis teljesítményre alkalmas kétütemű kivitelnél elmaradnak a közegek

áramlását szabályozó szelepek, valamint a szelepek működését vezérlő berendezések, e helyett a be- és kiömlést maga a dugattyú szabályozza. Az egyszerű konstrukcióval tökéletlenebb égés, magasabb üzemanyag-fogyasztás és nagyobb környezetszennyezés jár, mint a négyütemű megoldással. E hátrányok miatt a kétütemű motorok kiszorulóban vannak a gépkocsiiparból, főleg a kis teljesítményű, egyszerűbb gépek hajtására alkalmazzák.

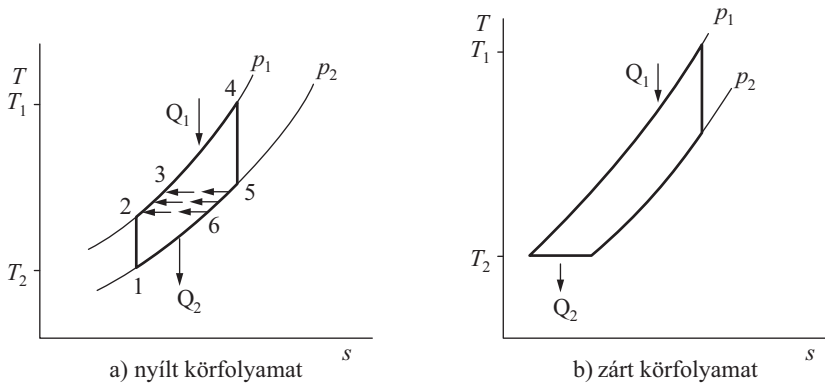
A négyütemű benzinmotoroknál egyelőre nincs versenytársa, mert 500 W/kg körüli fajlagos teljesítményét más erőgépek meg sem tudják közelíteni. Járásának egyenletlenségét több (legalább négy) fázisban eltolt henger alkalmazásával kompenzálják. A motorgyárak állandóan tökéletesítik a konstrukciókat, a legfontosabb az üzemanyag-fogyasztás és a környezetszennyezés csökkentése. Nagy előrelépés volt a számítógépek alkalmazása az üzemanyag-adagolás, a gyújtás, és más körülmények szabályozására. A kőolaj drágulása nyomán növekvő benzinárak miatt annak helyettesítésére olcsóbb üzemanyagokkal, elsősorban bioetanol, PB-gáz, nagynyomású földgáz van forgalomban.

A dízelmotor robusztusabb kivitelű, kevésbé rugalmas, de energetikailag hatékonyabb erőgép. A nagynyomású levegőbe befecskendezett üzemanyag öngyulladását indítja el az expanziót. A fokozatos üzemanyag betöltés, és a nagy nyomás (30–40 bar) lassabb és tökéletesebb égést biztosít. Hatásfoka lényegesen meghaladja a benzinmotorokét, de fajlagos teljesítménye (250–350 W/kg) sokkal kisebb, ezért a dízelmotorok nehezebbek, nagyobbak és drágábbak. Nagy súlya miatt főleg nagy önsúlyú járműveknél (teherautók, autóbuszok, hajók, vasúti mozdonyok), helyhez kötött berendezéseknél, és nagy munkagépeknél (traktorok, mezőgazdasági gépek) használják. Gazdaságos üzeme miatt nagyobb személyautókban is alkalmazzák, de ez rosszabb menettulajdonságokkal jár együtt. Míg Otto-motorok legfeljebb néhány 100 kW teljesítményre készülnek, dízelmotorokkal több MW teljesítmény is elérhető, így nagy teljesítményre kizárólagos a használatuk. Üzemanyaga gázolaj, újabban biodízel és más olajok, a dízelüzemű gázmotorokat sokféle gázzal lehet üzemeltetni.

A benzinmotorokban a benzinben dús levegővel alkotott keveréket legfeljebb tízszeresre komprimálják. A lángfront robbanásszerűen szétterjed, az égés oxigénszegény környezetben és rövid idő alatt zajlik. A tökéletlen égés miatt a kipufogógázban jelentős mennyiségű szén-monoxid és reakcióképes szénhidrogén van. A dízelmotorokban a tökéletlen égés koromkiválással járhat.

A gázturbinákban folytonos égés zajlik. Az égőkamrába – a turbinával közös tengelyre szerelt – kompresszor nyomja be az égéslevegőt, és oda juttatják be a tüzelőanyagot is, ami lehet földgáz, tüzelőolaj, biogáz és sok más. A felmelegített munkaközeg lehet maga az égéstermék, vagy bármely más, magas hőmérsékleten stabil gáz, pl. szén-dioxid, levegő, hélium. A turbinában hőkörfolyamat (Brayton vagy Humphrey) zajlik, aminek a végén a munkaközeg felgyorsul. A repüléstechnikában a körfolyamat nyílt, a turbina vagy propellert hajt, vagy a kiáramló gáz sugarat aerodinamikai úton fűvókában tovább gyorsítják, és a kilépő gáz sugar reakcióereje hajtja a repülőgépet. A sugárhajtás megjelenése korszakváltást jelentett a repülésben, először a haditechnikában, majd a polgári légitforgalomban is. Lehetővé vált sokkal gyorsabb, és sokkal magasabbra szálló és nagyobb hatótávolságú repülőgépek építése, majd a rakéták révén az űr meghódítása.

A gázturbinákban a magas hőmérsékletet álló szerkezeti anyagokkal a körfolyamat sokkal magasabb kezdő hőmérsékletét sikerült megvalósítani, mint a gőzturbinákban, ami sokkal nagyobb termodinamikai hatásfokot eredményez. Ez az erőműtechnikában okozott forradalmi változásokat. Kisebb a jelentősége a rugalmas, gyorsan változtatható teljesítményű nagy (akár több száz MW-os) gázturbinás blokkok megjelenésének a teljesítményszabályozásban. A nagy előrelépést a gáz-gőz kombinált ciklusú blokkok jelentették. Ezekben a körfolyamat zárt, a gázturbinában munkát végzett közeggel kazánban gőzt fejlesztenek, amivel hagyományos gőzturbinát működtetnek. Az ilyen blokkok nemcsak mintegy 50%-kal nagyobb hatásfokot érnek el, mint a hagyományos hőerőművek, hanem – az egyszerűbb rendszernek köszönhetően – így lehet a leggyorsabban és a legolcsóbban erőművet építeni. Az utóbbi 1–2 évtizedben a világon épült hőerőművek legnagyobb része ilyen kombinált ciklusú blokkokkal működik, és az építeni tervezettek is többnyire erre alapulnak. A 7.12. ábra nyílt és zárt gázturbinakörfolyamatokat mutat be.



7.12. ábra. Gázturbinakörfolyamatok

7.4. Áramfejlesztés hővel

A legrégebben ismert közvetlen átalakítási utat a hőelemek biztosítják. A termoelektromos hatás (Seebeck-effektus) azon alapul, hogy az egymással érintkező vezetőanyagok kontaktpotenciálja hőfokfüggő, két különböző anyagból kialakított zárt áramkörben áram folyik, ha az egyik érintkezési pont melegebb, mint a másik. A jelenséget hosszú ideig csak hőmérséklet mérésére használták, az így kialakított termoelemek árama a két érintkezési pont közötti hőmérséklet-különbség függvénye. Ha a hőelemek belső ellenállása elég kicsi, az áram nagy. Energetikai alkalmazására az űrhajózás irányította a figyelmet, sok termoelem sorba kapcsolásával számottevő teljesítményt lehet elérni nagyon egyszerű és mindenféle mozgó alkatrész nélküli áramforrással. A termoelemek vonzerejét növeli, hogy élettartamuk szinte korlátlan, és a közvetlen átalakítási eljárások közül ezekkel lehet a tömegre vonatkoztatott legnagyobb fajlagos teljesítményt elérni. Míg

a hőelemeknél csak különféle fémeket alkalmaztak, a termoelektromos generátorokban a félvezetőtechnika nyújtotta előnyöket is hasznosítják. Fe, Co, Ni, Mn és más elemek különféle vegyületeit (oxid, szulfid, tellurit, szelenit stb.) is sikeresen használták, főleg a PbTe-PbSe és ZnSb-BiSb összetételek bizonyultak megfelelőnek. Újabban a szilícium-germánium alapú ötvözetekből készített p-n átmenetű félvezető-anyagokból kialakított elemek kerültek alkalmazásra az űrhajózásban. A melegpontok melegítésére bármilyen hőforrás felhasználható, még hulladékhő is, de csak 300 °C feletti hőmérsékletnél lehet érdemleges teljesítményt elérni, a hidegpontokat viszont mesterségesen hűteni kell. Az űrhajózásban kis teljesítményre tüzeléssel működő, nagyobb teljesítményre pedig radioaktív anyagok bomláshőjét hasznosító kW nagyságrendű termogenerátorokat sikeresen alkalmaztak, de csupán 15–18%-os hatásfokot sikerült elérni a 150–550 °C tartományban. Az irodalmi adatok szerint nagy teljesítményű laboratóriumi berendezések is épültek, melyek üzemi hőmérséklete 1900 °C körül mozog, az elért hatásfok 35–40%. A termogenerátorok az alkalmazott különleges anyagok miatt drágák. Olcsóbbá tételük az anyagtechnológiai kutatásokon és a félvezetőtechnika fejlődésén múlik. Legnagyobb hátrányuk a viszonylag alacsony hatásfok, a Carnot-hatásfok megközelítését a fémes hővezetés miatt kialakuló belső veszteség nehezíti. A hatásfok terén minőségi változást nem lehet remélni, ezért energetikai jövőjük csak különleges alkalmazásokra és kisegítő szerepre korlátozódik.

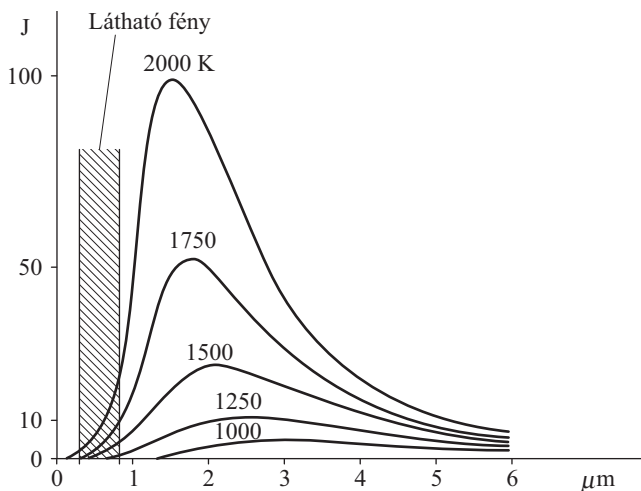
A hő közvetlen átalakításának egy másik lehetőségét az nyújtja, hogy izzó, parázsló testekből, mindenekelőtt hevített fémekből elektronok lépnek ki, melyeket villamos erőterrel el lehet vezetni. Ezt az utat az elektroncső-technikában aknázták ki, az elektroncsövek katódját 1300–1900 °C-ra izzították, a nagy adócsövek teljesítménye több kW-ot is elért. Az elektroncsövek kora azonban lejárt. Visszatérő gondolat viszont az effektus hasznosítása energetikai célra, különösen ahol magas hőmérséklet áll rendelkezésre. A plazmadióda vagy termoionos átalakító néven fejlesztett generátorok mm nagyságrendű elektródtávolságú szerkezetek, melyek emitterét (katód) a hőforrás közvetlenül hevíti, az elektronokat a kollektor (anód) fogja fel. A katód anyaga kis kilépési munkájú fémkarbid (Wo, Mo, Nb, Ta, U stb.). A vákuummal működő elektroncsövekkel ellentétben a plazmadiódák terében kisnyomású, könnyen ionizálható gázok vagy gőzök vannak (cézium, elektropozitív és elektronegatív adalékanyagok, esetleg nemesgázba keverve). Ezek szerepe az, hogy tértöltésükkel ellensúlyozzák a katód előtt összegyűlő elektronok emissziót csökkentő hatását. A gáz-gőz töltés nyomása egyes típusoknál 10 mPa – 1 Pa nagyságrendű, másoknál 1–10 kPa. A plazmadiódákban a töltéshordozók viselkedése nagyon bonyolult és sok tekintetben tisztázatlan. A gázkisülés jellege az idő során módosul, ami nemcsak a leadott teljesítményt befolyásolja, hanem a töltéshordozók kölcsönhatása a szerkezeti anyagokat meg is változtatja. Ez az áramforrások élettartamát 1–2 évre korlátozza, ami a különleges szerkezeti anyagok magas ára mellett az alkalmazás legnagyobb korlátja. Az eddig épített áramforrások hatásfoka 15–18%, az elérhető felső határ 40% körül mozog. Így a plazmadióda önmagában nem jelent előrelépést, ezért elsősorban a hagyományos erőművi körfolyamat előtétfokozatául javasolják, ami az eredő erőművi hatásfokot 55%-ra növelné. A legtöbb javaslat atomerőművi alkalmazásra irányul, ezek szerint plazmadióda az atomreaktorra vagy a fűtőelemekre simuló,

koaxiális hengeres kivitelű szerkezet lenne, mely szerves része a reaktornak. Ilyen irányú tényleges kísérletek azonban csak kisléptékű laboratóriumi modelleken folytak. Nehéz elképzelni, hogy az amúgy is sok problémával terhelt nukleáris berendezéseket ilyen rövid élettartamú szerkezetekkel tovább bonyolítanák. A plazmadiódák energetikai alkalmazása ma még a távoli jövő bizonytalan kérdése. Közvetlen átalakítási lehetőséget jelent a piroelektromosság is, sok kristály (pl. turmalin) melegítve ellentétes oldalain villamosan feltöltődik, de az így nyerhető energia nagyon kicsi.

7.5. Sugárzások

Minden test elektromágneses hullámokat bocsát ki. E sugárzás frekvenciaspektruma a test hőmérsékletétől függ. A 650–1000 μm közötti hullámhosszú infravörös sugarak hőátosztásra használhatók. A gázégővel, vagy villamos izzószállal táplált hőszugárzók infravörös sugárzásával felületeket, térrészeket lehet célzottan melegíteni.

A sugárzásnak a látható fény spektrumába eső része a világítás forrása. A mesterséges megvilágítás átalakítja az emberek életformáját, mert kibővíti az életteret térben és időben. A megfelelő megvilágítás feltétele a kulturált életkörülményeknek és a jó minőségű munkavégzésnek is. A világítás forrása lehet testek termikus sugárzása, vagy atomok szelektív sugárzása. A termikus sugárzás frekvenciaspektruma folytonos, alakja a hőmérséklet függvénye. Elég magas hőmérsékleten a sugárzás egy része a látható fény tartományába esik (7.13. ábra).



7.13. ábra. A spektrum hőmérsékletfüggése

A 19. század végéig lángok fénye biztosította a mesterséges világítást. Az első fáklyák már a kőkorszakban megjelentek, kialakításuk fokozatosan tökéletesedett, legkorszerűbb megoldásuknál a szurok vagy gyanta a tartórúd végén elhelyezkedő tartályban, vagy

kosárban égett. A fáklyák mellett már a bronzkorban felbukkantak a kivájt kőbe helyezett éghető anyagot kanóccal égető mécsesek. Ezek az ókorban állati héjakból, kerámia- és fémtartályokból kialakított művészi alkotásokká váltak, e mécsesekben sokféle anyagot (olaj, faggyú, zsiradék) égettek. A középkor fejleménye volt a gyertyaöntés, a gyertya jó ideig luxusnak számított, kezdetben csak a gazdagabbak jutottak hozzá. A kőolajkorszak kibontakozásával kezdődött a jól szabályozható petróleumlámpák térhódítása. Speciális alkalmazásokra más éghető folyadékokkal (benzin, spiritusz), valamint éghető gázokat fejlesztő anyagokkal (acetilén, karbid) működő lámpák is készültek, de ezek csak elvétve bizonyultak versenyképesnek a petróleumlámpákkal.

Az égés nyílt lángján alapuló fényforrások fejlesztésének csúcspontját a gázláng jelentette. Az első gázlámpát már 1786-ban bemutatták, de elterjedéséhez szükséges volt a gázgyártás és szállítás technikájának tökéletesítése. Már korábban is folytak kísérletek világításra használható gáz előállítására, de a szén kigázosítására az első sikeres megoldást csak az 1800-as évek elején dolgozta ki Murdoch. Ezt felhasználva létesítették 1807-ben, Londonban az első utcai gázvilágítást, ami két tekintetben is radikálisan új fejezetet nyitott az energetikában. Egyrészt ez volt a vezetékes energiaszolgáltatás kezdete, amit további vezetékes ellátási módok – villany, hő – követtek, alapvetően átrendezve az energiefelhasználás módját és szerkezetét. Másrészt ez volt az első közszolgáltatásra létesült regionális energiaellátó mű, aminek a megjelenése újszerű megközelítést kívánt, pl. a jogi és kereskedelmi kérdésekben, új felelősségeket támasztott a biztonság és az ellátási kötelezettség tekintetében.

A 19. század első évtizedeiben gyorsan népszerűvé vált a gázvilágítás, gombamód szaporodtak a városi gázt szolgáltató gázművek. A városokban kialakultak a vezetékes gázellátás rendszerei, egyrészt a közvilágítás, másrészt az igényesebb háztartások belső világításának ellátására. A gázzal el nem látott területeken továbbra is a petróleumlámpa maradt a mesterséges világítás legfőbb eszköze. Budapesten az 1830-as években jelent meg a gázvilágítás, veszélyessége nem jelentéktelen ellenállást váltott ki, aminek leküzdéséhez még Széchenyi támogatására is szükség volt. Az első központi gázgyárat – akkori nevén légszeszgyárat – 1856-ban adták át, és a következő évben elindult a közvilágítás gázzal. A főváros egyesítésekor 1873-ban Pesten 42 ezer, Budán 7 ezer gázlámpa működött.

A világító gáz azonban nem sokáig fényeskedett. Edison 1879 szilveszter éjszakáján menlo-parkbeli laboratóriumának kertjében bekapcsolta az első izzólámpát, attól kezdve a villanyvilágítás monopóliuma töretlen. Villanyvilágítással Edison előtt is kísérleteztek, már a 19. század közepe óta használtak egyes létesítmények (színházak, üzemcsarnokok, sportpályák stb.) kivilágítására ívlámpákat. Magyarország is az úttörők közé tartozott, 1878-ban már kivilágították a Ganz-gyár öntödéjét, majd a Császárfürdőben, az óbudai tornacsarnokban és a városligeti jégpályán is megjelentek az ívlámpák. Senki sem sejtette, hogy ezekből a műszaki kuriózumoknak tekintett szerény létesítményekből kontinenseket behálózó villamosenergia-rendszerek fognak kinőni, melyek hajszalerein keresztül szakadatlanul fog áramlani az energia minden otthonba és munkahelyre. Az ívlámpák azonban nem terjedtek el széleskörűen, vakító fényük, a szénelektrodák rövid élettartama, tűzveszélyességük, nehézkes kezelésük és bonyolult szabályozásuk miatt.

A megoldást a szénszálaz izzólámpa feltalálása jelentette, aminek lehetőségeit Edison 1881-ben a párizsi világkiállításon demonstrálta az operaház kivilágításával.

A kellemes fényt adó, tiszta, jól szabályozható, kényelmesen kezelhető villanyvilágítás rövid időn belül minden versenytársát kiszorította a piacról. Az utcák közvilágítása elsőként Párizsban és Philadelphiában jelent meg, Magyarországon az első villamos közvilágítás Temesvárott létesült 1884-ben, illetve a mai országterületen Mátészalkán 1888-ban (ott egy vízimalmát erőművé átalakító molnár a lakásához vezető útvonalat világította ki). Budapest villamosítását némileg hátráltatta, hogy a szerződések cső és egyéb vezetékek létesítésére a gáztársaságoknak adtak kizárólagos jogot.

Edison lámpájában eredetileg elszesénített bambuszszál izzott vákuumban. A szénszálat idővel, a sokkal magasabb hőmérsékletre hevíthető fém-szállal helyettesítették, ami tökéletesebb színviisszaadást eredményezett. A hatékonyság javítását célzó műszaki fejlesztés egyrészt az izzószál anyagának és geometriai kialakításának javítására, másrészt az izzás körülményeinek tökéletesítésére irányult, ebben vezető szerepet játszottak a Tungstram (Egyesült Izzó) mérnökei (Just, Bródi, Winter, Millner) is. Ők kezdeményezték a wolfram izzószálak alkalmazását, ami teljesen kiszorította a korábban használt egyéb anyagokat. Az izzószálak termikus terhelhetősége erősen légritkított térben $\sim 2500\text{ }^{\circ}\text{C}$, ami lényegesen alacsonyabb a természetes fényre jellemző $\sim 5500\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletnél. A wolfram elgőzölgését nemesgáztöltettel (pl. Ar, Kr, Xe) korlátozni lehet, ezzel a hőmérséklet $\sim 3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra növelhető. A Kr alkalmazása is a Tungstramból indult ki, ennek gyártására épült Ajkán üzem és erőmű. A Tungstram bekerült a világ vezető fényforrásgyártói közé, kutató-fejlesztő laboratóriuma a magyar műszaki tudomány egyik úttörője volt. A privatizáció során a vállalatot a világelső General Electric vásárolta meg, és gyártó-fejlesztő bázisként működteti.

A kellemes meleg fényt szolgáltató izzólámpa fényes karriert futott be, évtizedekig a használatos fényforrások döntő többségét tette ki. A W szálaz izzólámpa sokféle méretben és teljesítménnyel készülő olcsó tömegcikké vált, de legfőbb hátránya, hogy az alacsony hőmérséklet miatt fényhasznosítása csupán 12–20 lm/W, ami 2–4%-os energetikai határfoknak felel meg. Halogéngőz-adagolással (főleg Br és I) tovább mérsékelhető a wolframszál elgőzölgése, és a színkép is javul, mivel a sugárzásban a halogéngőz is szerepet kap. Halogénizzókkal a fényhasznosítás 35–40 lm/W-ra növelhető ($\eta = 8\%$), amit a hőmérsékleti sugárzók felső határértékének tartanak. A halogénizzók drágák és élettartamuk viszonylag rövid, ezért alkalmazásuk köre korlátozott (stúdióvilágítás, gépkocsik ködlámpája). Az izzólámpákat az energiatakarékosság jegyében az EU és sok más ország fokozatosan kiszorítja a használatból. Szerepét jobb hatásfokú, korszerűbb fényforrások (gázkisüléses izzók, kompakt fénycsövek, LED¹⁰⁸-ek) veszik át.

¹⁰⁸ Light-emitting diode, fénykibocsátó dióda.

8. Mechanikai munka átalakítása

A mechanikai munkavégzés legcsodálatosabb eszköze az emberi kéz. Az első szakóca (marokkő) megformálásától egy Stradivari, vagy egy modern robot elkészítéséig szinte mindenre képes. Kiegészítésül ehhez okos eszközöket és gépeket talált ki, amiben az ösztönző gyakran a haditechnika volt. Így került sor a husáng, majd a különféle szűrő és vágó fegyverek alkalmazására, és az első energiatranszformációra, a rugalmas erőből haladó mozgást előállító új feltalálására.

Az ipari társadalmakban a hasznosított energiafajták mérlegében a mechanikai munka 20% körül mozog. Mechanikai munka szükséges helyváltoztatáshoz (közlekedés, anyagmozgatás), gépek működtetéséhez, nyersanyagok kinyeréséhez (bányászat, mezőgazdaság), anyagok formálásához, szerelési műveletekhez stb. A természetből közvetlenül leginkább fluidumok (levegő, vizek) mozgásából nyerhető mechanikai energia, közvetve sok más energiafajtából állítható elő.

Kémiai energiát közvetlenül nem lehet mechanikai hatásokkal előidézni, de sok reakció nyomásfüggő, és számos technológia lefolyását a nyomás alakításával befolyásolják – főleg légnemű halmazállapotban. Tárgyak és anyagok mozgása többféle módon okoz hővé váló veszteséget. A mozgás valóságos körülmények között mindig súrlódással jár, ami hőt fejleszt. Fluidumok mozgása közben nemcsak a határfelületeken lép fel súrlódás, hanem a közeg belsejében is, ami bizonyos áramlási viszonyok esetében örvénylést is előidéz. Fluidumokban haladó tárgyaknak a közegellenállást is le kell küzdeni. Gázok összenyomása is hőfejlődéssel jár (illetve kiterjedése lehűléssel). Hőkörfolyamatokban mechanikai munkával termikus változásokat lehet elérni, pl. hőszivattyúval a munkaközeget melegíteni lehet (fűtés), hűtőgéppel hőt lehet elvonni (hűtés).

A mechanikai munka átalakításának más energiaformába két területen van komoly gyakorlati jelentősége, az egyik a gépek hajtása, a másik az indukción alapuló villamos gépek és készülékek köre.

8.1. Gépek hajtása

8.1.1. Mozgásformák

A gépek alkalmazása a testek helyzetét és mozgását változtató szerkezetekkel kezdődött. Ezek a műveletek energiaváltozással járnak, aminek egyik lehetősége, hogy haladó mozgásból forgó mozgást állítsanak elő, vagy fordítva. A szilárd, m tömegű, v sebességgel haladó merev test mozgási (kinetikus) energiája

$$W_k = 1/2mv^2 \quad (8.1),$$

az ω szögsebességgel forgó Θ tehetetlenségi nyomatékú test mozgási energiája pedig

$$W_k = 1/2\Theta \omega^2 \quad (8.2).$$

A kétféle mozgási energia hajtóművekkel egymásba átalakítható. A dugattyús erőgépekben pl. a haladó mozgást forgattyús hajtóművek alakítják forgó mozgássá, a járást lendkerekek teszik egyenletessé. A forgó mozgásból haladó mozgás előállítására a legáltalánosabb példa a járművek kereke.

A lendkerekekben tárolt energiát főleg egyenetlen teljesítményű erőgépek (pl. dugattyús motorok), vagy egyenlőtlen terhelésű munkagépek (pl. hengesorok) fordulatszámának kiegyensúlyozására használják. Egy ideje foglalkoznak lendkerekekkel mint energiatároló eszközökkel is, pl. nagy járművek fékezési energiájának tárolására, vagy a villamos csúcsigények fedezésére. A forgó testekben tárolható energiát egyrészt a tehetetlenségi nyomaték szabja meg, ami a szerkezet geometriai kialakításán múlik. Növelésére a súlyos tömegeket a tengelytől távol helyezik el, mivel négyzetesen függ a tömegpontok forgástengelytől mért távolságától. Másrészt a tárolt energia a fordulatszám négyzetével arányos, növelésének anyagtechnológiai és üzemviteli korlátai vannak. A tárolt energia ugyancsak növelhető a súrlódás csökkentésével, ha a szerkezetet vákuumba helyezik. A tárolható energia felső határa 10–100 GJ.

A testeknek helyzeti (potenciális) energiájuk is van, ha külső erőter – pl. gravitáció – hatása alatt állnak. Nagyságát az erőter φ potenciáljának két pontja közötti különbsége szabja meg,

$$W_p = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (8.3),$$

például a Föld gravitációs erőterében a potenciál, a $g = 9,81 \text{ m/mp}^2$ nehézségi gyorsulás figyelembevételével, a függőleges irányban a h magassággal arányos,

$$\varphi = -mgh \quad (8.4).$$

Helyzeti energiát nemcsak külső erőterekben lehet értelmezni, hanem a reverzibilis folyamatok széles spektrumában is, például anyagok, vagy rugók összenyomásánál. Rugalmas rendszerekben a deformációt előidéző energiát teljes mértékben vissza lehet nyerni, ha megszűnik a deformáló hatás, a rugalmatlanság mértékétől függő arányban viszont az energia egy része elvész. Rugóknál a visszatérítő erő arányos az s elmozdulással, a felhalmozott helyzeti energia

$$W_p = 1/2ks^2 \quad (8.5),$$

ahol k a rugó anyagától és alakjától függő tényező. A magára hagyott rugó, vagy más rugalmas rendszer harmonikus rezgő mozgást végez, miközben a helyzeti, illetve a mozgási energia 0 és egy maximális érték között leng.

A helyzeti energián alapul a súly- és rugóhajtás. A korszerű technikában a súlyhajtás terhek emelésénél az ellensúly szerepére szorult vissza (felvonók, bányáemelő, siklók).

Ingákat kis teljesítményű mechanizmusok működtetésére alkalmaznak. A rugóknak sokirányú szerepe van a változó erőhatások kiegyenlítésében, de mint hajtóművek csak kis teljesítményű óraművekben fordulnak elő.

8.1.2. Vízgépek

Az előzőek közvetlenül csak szilárd testekre alkalmazhatók, más halmazállapotú anyagoknál azok sajátos viselkedését és tulajdonságait figyelembe vevő kiegészítésre szorulnak. Folyadékoknál figyelembe kell venni, hogy egyrészt szabad felszín kialakulására törekszenek, másrészt a folyadékrezecskék egymáshoz képest elmozdulhatnak, ennek következtében erők hatására áramlás alakul ki, és nyomások lépnek fel. Elméletileg egy áramló folyadékban az energia megmaradásának elvét a Bernoulli-egyenlet fejezi ki. E szerint, ha egy összenyomhatatlan folyadék csak a nehézségi gyorsulás hatása alatt áll, az egységnyi térfogat energiája

$$p + \rho gh + 1/2\rho v^2 = \text{állandó} \quad (8.6).$$

A valóságban a súrlódás és örvénylés miatt az energiaegyensúlyt még veszteségek is terhelik. A 8.6 képlet első tagja a p nyomást, második tagja a ρ sűrűségű folyadék helyzeti energiáját veszi figyelembe, ahol g a nehézségi gyorsulás, és h a magassági szintkülönbség. A harmadik tag a v sebességű mozgás kinetikus energiája. Az egyes energiefajták egymásba átalakulhatnak, de összegük állandó marad. A 8.6 képletben összefoglalt energiaformák egyenkénti és együttes felhasználására, illetve átalakítására a technika számos utat alakított ki.

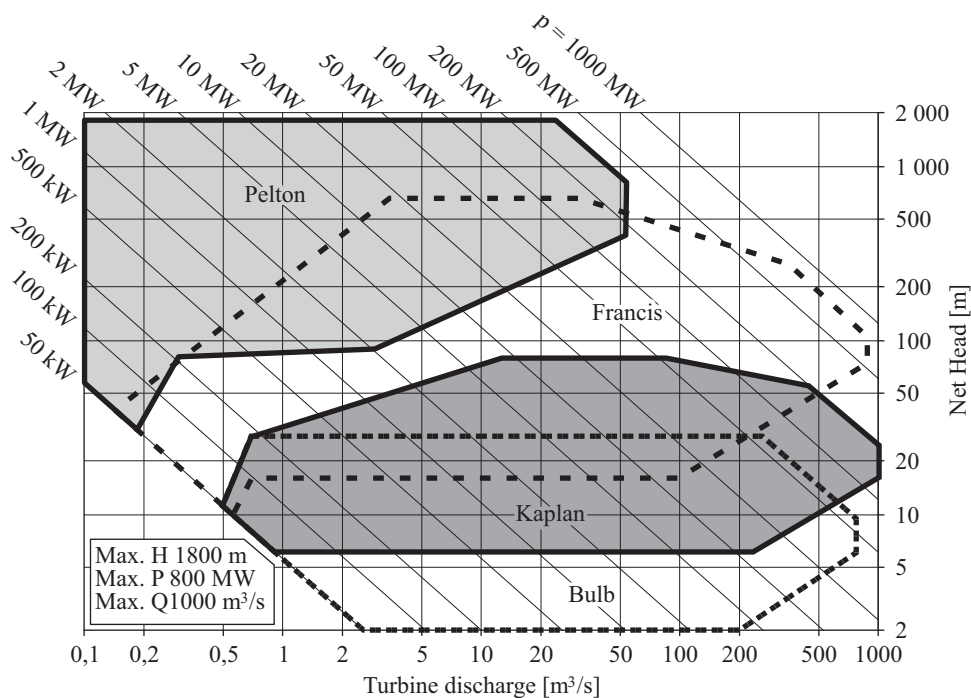
A folyók mozgási energiájának kiaknázása a technikai fejlődés első lépései közé tartozott. A folyóvíz haladó mozgását forgó mozgássá alakító vízikereket már az ókorban építettek. A víz sodrását hasznosító alulcsapott szerkezeteket idővel felváltották az esésmagasságot részben kiaknázó – és ezért lényegesen jobb hatásfokú – felülcapott megoldások. A vízikerek fokozatosan elterjedt malmok, majd más gépek hajtására, és ez vált a manufaktúrák legfontosabb erőgépévé. Nagyméretű vízikerekkel jelentős, mintegy 100 kW-ig terjedő teljesítményt is elértek, és a folyók vízjárása annak hasznosítását az év nagy részében lehetővé is tette. Ez az erőgép az ipari forradalom kibontakozódásában fontos szerepet játszott. A vízikerek azonban kötöttséget is jelentett, mert az üzemeket csak a folyók mellé lehetett telepíteni. A telephely-megválasztásnak ezt a korlátját a gőzgép megjelenése oldotta fel, e rugalmas erőgép gyors térhódításának ez egyik mozgatórugója volt. A gőzgép mellett a nehézkes vízikerek szerepe gyorsan csökkent, majd a korszerű erőgépek teljesen kiszorították a használatból. (Megjegyzendő, hogy a tengeri áramlások kiaknázására ismét felelevenítik a vízikerek alkalmazását.)

A vízikerek korszerű utódai, a vízturbinák hatalmas teljesítményeket tudnak szolgáltatni. A nagy teljesítményű vízturbinák kizárólagos feladata villamos energia fejlesztése vízerőművekben. Kis teljesítményű turbinákat közlőművekben és egyedi hajtásokban erőátviteli feladatokra is alkalmaznak gyakran a víztől eltérő folyadékokkal (pl. olaj) is.

A vízerőművek turbinái elvileg a V vízhozamú és h hasznosítható esésmagasságú vízfolyásból

$$P = Vgh \quad (8.7)$$

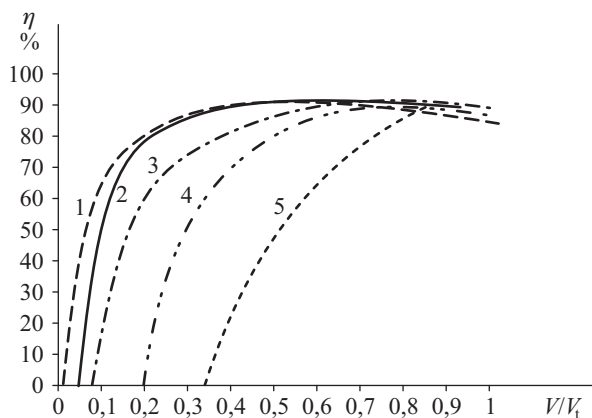
teljesítményt tudnak kiaknázni, e mellett a Bernoulli-egyenlet másik két összetevője elhanyagolható. A különféle veszteségek miatt a gyakorlatilag kinyerhető teljesítmény természetesen kisebb. A vízhozam és az esésmagasság értékétől függően különféle turbinatípusokat fejlesztettek ki, az akciós rendszerek a helyzeti energiát tisztán mozgási energiává transzformálják (Pelton- és Bánki-turbina), a reakciós rendszerekben az energia egy része nyomáskülönbséggé alakul (Francis- és Kaplan-turbina). Nagy esésmagasságra (100 m felett) Pelton-turbinákat használnak, melyek kis fordulatszámmal (10–60/perc) járó konstrukciók, járókerékük lapátjaira sugárcsövek lövellik szabad sugárban a nagy sebességű vizet. Nagy víznyelés és közepes esésmagasság (20–100 m) jellemzi a Francis-turbinák alkalmazási területét. Fordulatszámuk közepes (60–400/perc), a radiálisan beömlő víz a turbina belsejében forgatagot alkot, melyben nyomás- és sebességváltozások közben játszódik le az energiaátadás. Kis esésekre (40 m alatt) szárnylapátos turbinákat (Kaplan-, propeller-, csőturbina) használnak. Fordulatszámuk magas (400–1000/perc), a víz axiálisan áramlik át a járókeréken, melynek lapátjain az energiaátalakítást az aerodinamika törvényei szabják meg. A legnagyobb Francis-turbinák egységteljesítménye megközelíti az 1 GW-ot, a többi turbina-



8.1. ábra. A vízturbinák alkalmazási területe

típus teljesítményének felső határa jelenleg 250–300 MW. A fontosabb turbinatípusok alkalmazási területét a h esésmagasság és a V víznyelés függvényében a 8.1. ábra mutatja. A hazai körülmények között folyami vízerőművekben csak a kis esésmagasságra alkalmas Kaplan-turbinák használhatók, többnyire vízszintes tengelyű csőturbinás kivitelben.

A vízturbinákban lezajló energiáttranszformációt a hidromechanika törvényeivel csak közelítőleg lehet leírni, mert az áramlási viszonyok nagyon bonyolultak. Ezért a tényleges konstrukciókat kisminta kísérletekre alapozva alakítják ki. E módszerek annyira tökéletesek, hogy a turbináknál rendkívül jó, 90–95%-os hatásfokot lehet elérni. A hatásfok azonban erősen függ a fordulatszámától és a víznyeléstől. Mivel a villamosenergia-fejlesztés állandó fordulatszámot igényel, a fordulatszámfüggésnek nincs gyakorlati jelentősége, a turbinát az optimális fordulatszámra méretezik. A teljes víznyelésre vonatkoztatott relatív víznyelés függvényében néhány tipikus hatásfokgörbét a 8.2. ábra mutat be. Ebből látható, hogy a részterheléses üzem a legtöbb típusnál kedvezőtlen, ennek elkerülésére, ha több turbina van párhuzamosan üzemben, kis vízhozamnál célszerűbb a működő gépek számát csökkenteni.



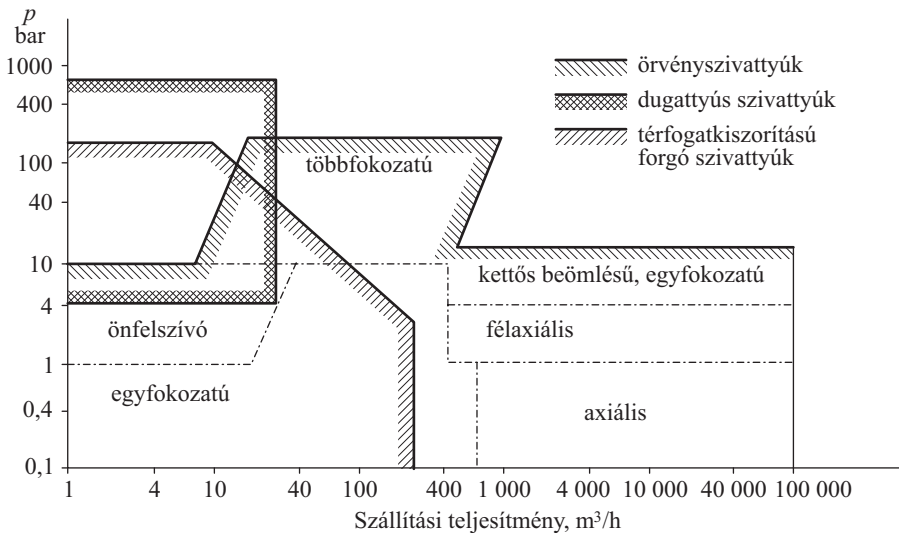
8.2. ábra. Vízturbinák hatásfoka

Hasonló turbinatípusok jönnek számításba a nem folyókra telepített speciális vízerőművekben (árapály-, depressziós-, gleccsererőmű) is. Ezeknél a vízepítési műtárgyak jellege, az üzem mód és egyes konstrukciós részletek tekintetében azonban lényeges eltérések lehetségesek (pl. az árapályerőműveknél a vízmozgás napi és éves ciklusa és a tengervíz korrozív hatása miatt). A szivattyús-tározós erőművekben reverzibilis vízerőgépeket alkalmaznak, melyek egyaránt használhatók turbina- és szivattyúüzemben. Energiamegtakarítás érdekében kisebb teljesítményű turbinákat mesterséges vízáramokra is lehet telepíteni, például hőerőművek hűtővíz visszavezető csatornáiban létesített rekuperációs vízerőműben, sőt ipari technológiákból kilépő folyadékáramokra is, ha azokat tartósan megfelelő folyadékmennyiség és kiaknázható esésmagasság (vagy áramlási sebesség) jellemzi. Az erőátviteli feladatokhoz használt kis teljesítményű turbinák

lényegesen egyszerűbb szerkezetek, de működési elvükben nem térnek el a nagy turbináktól. Ezek általában nem a folyadék esésmagasságát, hanem a nyomáskülönbséget hasznosítják.

Több száz szerkezetet szabadalmaztak a tengeri hullámvás energiájának hasznosítására. Néhány megoldás kísérleti üzemben van, ezekben vagy a mozgási energiát veszik át elmozduló elemek, vagy a kialakuló szintkülönbséget alakítják át nyomássá szelepekkel vezérelt térrészekben.

A leggyakrabban használt vízgépek a folyadékok áramlását biztosító szivattyúk. Ezeket stabil berendezésekben általában villamos motorok, a mobilisokat pedig többnyire belső égésű motorok hajtják. A szivattyúk mozgó elemei haladó vagy forgó mozgás segítségével, egyes konstrukciók pedig nyomáskülönbség előidézésével biztosítják a folyadék áramlását, és növelik meg a továbbított folyadék energiáját. Szivattyúkon alapul a vízellátás, a belvíz- és árvízvédelem, a bányák vízmentesítése, kis rétegnyomású kőolajkészletek kibányászása, szivattyúk biztosítják a technológiai folyamatokban a folyékony közegek áramlását, háztartási gépek (mosógép, mosogatógép) működését, a belső égésű motorok üzemanyag-ellátását stb. A sokrétű igények mind a szállított mennyiség, mind az emelőmagasság tekintetében sok nagyságrendet fognak át, ezek kielégítésére sokféle konstrukciót fejlesztettek ki. A fontosabb típusok alkalmazási területét a 8.3. ábra mutatja. Ennek vízszintes tengelyén a szállítási teljesítmény, függőleges tengelyén pedig a leküzdendő nyomáskülönbség szerepel, az utóbbit szállítási magassággal is ki lehet fejezni.



8.3. ábra. Szivattyúk munkaterülete

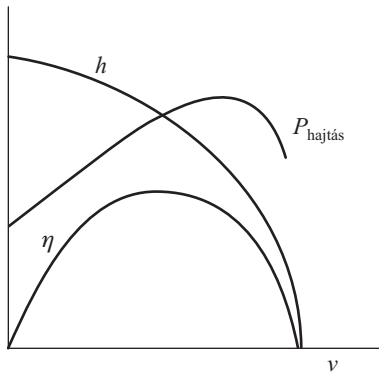
A 8.6 képlet szerinti Bernoulli-egyenlet a térfogategység energiáját írja le, ebben az egyes tagok tulajdonképp nyomás dimenziójúak, az egyenletet a ρ sűrűséggel és a g nehézségi gyorsulással osztva a tömegegységre eső energiát nyerjük, és a tagok magasság

dimenziójúak lesznek, a két fogalomhasználat tehát egyenértékű. Lényeges azonban, hogy akár nyomás, akár szállítómagasság írja le a teljesítményt, az magában foglalja a leküzdendő geodetikus szintkülönbség, a nyomáskülönbség, a sebességkülönbség és az áramlási veszteség összegét. Ilyen felfogásban értelmezett h szállítómagassággal a szivattyú hasznos teljesítményét szintén a 8.7 egyenlet írja le. A szállítómagasságot (emelőmagasságot) a szivattyúk jellemzésére vízszintes irányú szállításkor is használják, sőt a gázok nyomását fokozó kompresszoroknál is. A legnagyobb emelőmagasságot a dugattyús szivattyúkkal lehet elérni, igen jó hatásfokkal, de korlátozott folyadékszallító képességgel. A dugattyú az egyik irányba haladva vizet szív a munkahengerbe, a másik irányba mozogva azt az ellátandó rendszerbe táplálja. Ezt az egyenlőtlen folyadékszallítást részben ki lehet egyenlíteni nyomás alá helyezett légüsttel, illetve ellenfázisban dolgozó több dugattyúval. A dugattyús szivattyúk drágábbak, mint az örvényszivattyúk, ezért főleg olyan speciális követelmények kielégítésére alkalmazzák, mint különlegesen nagy szállítómagasság, szennyezett folyadékok továbbítása, folyadékok pontos adagolása. Dugattyú helyett rugalmas hártát használnak iszapos vagy erősen szennyezett folyadékokhoz (membránszivattyú), pl. cement vagy szennyvíz továbbítására. Ugyancsak térfogat kiszorítás alapján, de forgó mozgással működnek a nagy szállítónyomást biztosító vagy viszkózus folyadékokhoz használt különféle típusok (fogaskerék-, csavar-, szárnyas, lamellás, vízgyűrűs szivattyúk).

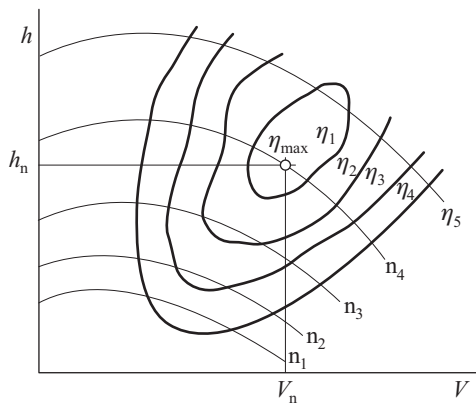
Legszélesebb körű az örvényszivattyúk használata, melyek lényegében fordított irányban működő turbinák. Tetszőleges folyadékmennyiségre készülnek, többfokozatú kivitelben nagy emelőmagasságra is alkalmasak. A legnagyobb teljesítményekre szárnylapátos vagy csavarlapátos kivitel alkalmaznak. Zagyok, szennyezett folyadékok szállítására használják a mamutszivattyút, ennél sűrített levegőt nyomnak be a szállítandó folyadékba és a folyadék-levegő keverék kisebb fajszálya szolgáltatja a felhajtóerőt. Hátránya a megoldásnak a nagyon rossz hatásfok (30–40%). Speciális célokra, pl. kazánok tápvízellátására, benzinmotorok üzemanyag-ellátására használják a mozgó alkatrészt nem tartalmazó sugárszivattyút (injektor). A fűvókába nyomott víz, levegő vagy gőz a szűkületnél felgyorsul, viszont nyomása lecsökken, és ennek hatására a környezetéből folyadékot képes magával ragadni.

A szivattyúk hajtásához szükséges teljesítmény a hidraulikus, volumetrikus és mechanikai veszteségek miatt meghaladja a 8.7 képletnek megfelelő értéket. A szivattyúzásnál 80–85%-os hatásfokot is el lehet érni, de a turbinákhoz hasonlóan a szállított mennyiség és a fordulatszám erősen befolyásolja az értéket. A 8.4. ábra példázza, hogyan függenek egy örvényszivattyú jellemzői a vízhozamtól. Ha a fordulatszám is változik, a 8.5. ábrán látható kagylódiagram tükrözi a viszonyokat. Az ábrákból kitűnik, hogy a szivattyú típusának kiválasztása és munkapontjának kijelölése a tervezésnek és az üzemvitelnek fontos kérdése. A tartósan az optimálistól távol fekvő munkaponton dolgozó szivattyú cseréje jobban illesztett típusra nemcsak energetikai, hanem gazdasági szempontból is gyorsan megtérül.

A folyadékok munkavégző képességét hasznosító erőátviteli berendezésekben a mechanikai munka megjelenési formáját hidrosztatikus és hidrodinamikus úton lehet módosítani. A hidrosztatikus megoldások arra alapulnak, hogy a nyomás a folyadékban



8.4. ábra. Örvényszivattyú jellemzői



8.5. ábra. Kagylódiagram

egyenletesen oszlik el. Elsősorban nagy erőhatást igénylő feladatokra alkalmazzák, mert az erők áttételezését megfelelő keresztmetszet arányú hengerekben elmozduló dugattyúk segítségével könnyen meg lehet oldani. Így működnek a különféle hidraulikus emelők, prések, sajtók, kovácsoló kalapácsok, az alkalmazott nyomás néha több száz bar. A gyors alakító eljárások is gyakran folyadéknyomással működnek, vagy egyéb (pl. robbantásos, elektrodinamikus) megoldásoknál is sokszor folyadék közvetíti az erőt a munkadarabbal. A hidrosztatikus hajtóműveket főleg nagy erőt igénylő vezérlési feladatokra használják (pl. gőzturbinák szelepeinek vezérlése, vasúti járművek hajtóműve, megszakítók működtetése), az erőket hengerekben elmozduló dugattyúk közvetítik. A hidrodinamikus eljárások a folyadékok sebességi energiáját használják fel. Ide sorolhatók a főleg járművekben alkalmazott hidrodinamikus hajtóművek (nyomatékváltók, tengelykapcsolók) is. Ezek egyszerűbb esetben szivattyúból és turbinából állnak, a kettő között a kapcsolatot folyadékáram biztosítja, az erőgép szerepét ellátó turbina fordulatszámát széles tartományban lehet folytonosan változtatni. Sokirányúan használják az áramló folyadékot anyagmozgatásra is, a folyadékkal keveredő, abban lebegő, vagy azzal sodort anyagok-

nál. Nagynyomású vízszugárral bányákban kőzeteket fejtenek, mélyfűrésznél a fűrőfejet forgatják és számos egyéb feladatot, pl. anyagok vágását, oldanak meg.

8.1.3. Léggépek

Gázoknál az összenyomhatóság igényel külön figyelmet, ami a v fajtérfogatú, p nyomású, T abszolút hőmérsékletű, és M molekulásúlyú ideális gázra

$$pv = \frac{RT}{M} \quad (8.7)$$

Boyle–Mariotte-törvénnyel írható le. Az univerzális gázállandó, $R = 8,31 \text{ J/Kmól}$. A képlet magas hőmérsékleten reális gázoknál is jól írja le az állapotjellemzők kapcsolatát, alacsonyabb hőmérsékleten viszont jobb közelítést jelent a

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = \frac{RT}{M} \quad (8.8)$$

van der Waals-állapotegyenlet, amelyben a és b a gáz anyagától függő állandók. Gázkeverékekben az egyes komponensekre külön-külön teljesülnek az állapotegyenletek, tömegarányuk szabja meg parciális nyomásukat, az eredő nyomás ezek összege.

A technika sok területén használják a gázok munkaképességét hasznosító vagy átalakító erőgépeket. Ha az áramló gázok nyomása és hőmérséklete nem változik számottevően, a viszonyokat kis fajsúlyú folyadékáramlásként lehet leírni (pl. szellőzőknél). Erre is érvényes a Bernoulli-egyenlet, de a geodetikus szintkülönbséget leíró tagot a kis sűrűségnek megfelelően rendszerint el lehet hanyagolni. Nagy magasságkülönbségnél a légkörben érvényesülő barometrikus nyomáskülönbség érezteti a hatását, az ebből származó felhajtóerőt, illetve légmozgásokat technikai célra ki is aknázzák (kémények, hűtőtornyok, vitorlázó repülés).

A gázok munkavégző képességét többnyire a nyomás szabja meg, ennek változása 1 bar-ral 10^5 J/m^3 nagyságrendű energiaváltozással jár. Expanzió során ezt az energiát mechanikai munkavégzésre lehet hasznosítani pl. dugattyúk elmozdításával, turbinák hajtásával vagy az impulzus tolóerejével. A mozgási energia ezzel csak nagyon nagy sebességnél mérhető össze, egyébként elhanyagolható (pl. levegőben a talajszinten átlagos szélsősebességnél 10 J/m^3 nagyságrendű. Hasonló nagyságrendű a magasságtól függő helyzeti energia méterenkénti változása is, de ezt az esésmagasságot nem is lehet hasznosítani, mivel a gázok a hőmozgás hatására kiterjednek. Az állapotegyenleteknek megfelelően a gázok kompressziója hőmérséklet-növekedéssel, expanziója hőfokcsökkenéssel jár. A 8.1. táblázat a kompresszió, illetve expanzió legfontosabb típusait mutatja be, az első három ideális gázokra vonatkozik, ami bizonyos körülmények között valódi gázokra is jó közelítés.

Az izotermikus folyamatnak feltétele, hogy a kompresszió során fejlődő hőt elvezzék, illetve az expanzió alatt bekövetkező lehűlést hő bevezetésével ellensúlyozzák. Adiabaticus változás tökéletes hőszigetelésnél folyik le, ilyenkor viszont a gáz

hőmérséklete megváltozik (a κ tényező az állandó nyomáson érvényesülő c_p fajhő és az állandó térfogatra vonatkozó c_v fajhő hányadosa). A politropikus folyamat a kettő közé esik, tökéletlen hűtés, illetve hőbevezetés esetére jellemző. A légköri nyomásnál jóval kisebb és annál nagyobb nyomáson a valódi gázok viselkedése számottevően eltér az ideálistól, ilyenkor a folyamatok leírására a nyomás helyett alkalmasabb a fugacitás, ami a 8.1. táblázat megjegyzés oszlopában szereplő definícióval értelmezett f termodinamikai állapotfüggvény.

8.1. táblázat. Állapotváltozások típusai

Típus	Állapotegyenlet	Megjegyzés
Izotermikus	$pV = RT = \text{állandó}$	
Adiabatikus	$pV^\kappa = \text{állandó}$	$\kappa = c_p / c_v$
Politropikus	$pV^n = \text{állandó}$	$1 < n < \kappa$
Valóságos	$fV = RT = \text{állandó}$	$\frac{df}{f} = \frac{1}{RT} V dp$

A gázok munkavégző képességének energetikai hasznosítása nagy múltra tekinthet vissza. A primer energiaforrások közül a szél volt az első, amit közvetlenül hajtásra hasznosítottak. Ez nemcsak a technika, hanem a társadalmak fejlődésére is nagy hatással volt. A szél kinetikus energiájával hajtott vitorlánhajók útján terjedt szét az antik civilizáció a Földközi-tenger környékén, és kapcsolódtak be újabb területek annak vérkeringésébe. A nagy földrajzi felfedezések eszközei is a vitorlánhajók voltak, melyekkel új világrészeket tártak fel az újkor hajnalán, és egységes világgá kapcsolták össze bolygónk nagy részét. Vitorlások segítségével alapították meg a nagy gyarmatbirodalmakat, és hordták össze az új tartományok kincseit a kapitalizmus kibontakozásához szükséges eredeti tőkefelhalmozás részeként. A gőzgép azonban a kecses vitorlásokat történelmi emlékké degradálta, lokális jellegű közlekedésre csak gazdaságilag fejletlen területeken használják, ahol a szél véletlenszerűsége és az elérhető kis szállítási kapacitás nem korlátozó tényező. Az energiatakarékosság jegyében újabban ismét vizsgálják, hogyan lehetne a tengeri hajózásban a szelet mint kiegészítő erőforrást gazdaságosan kiaknázni.

A szél másik alkalmazási területét a középkorban elterjedő és a 15–17. században nagy számba épített szélmalomok jelentették. Kezdetben csak gabonaörlésre és vízemelésre használták, az említett időszak végén már munkagépek hajtására is. Szélmalmot szinte tetszőleges helyen fel lehetett állítani, de a szél bizonytalan rendelkezésre állása és ingadozó teljesítménye miatt más erőgépek háttérbe szorították. Úgy tűnt, hogy a szélmalomok – legalábbis az ipari országokban – végleg népművészeti emlékekké degradálódnak, de az olajkrízis és a klímaváltozás váratlanul új helyzetet teremtett. Az anyagtechnológia fejlődése kezdetben néhány 100 kW-os, majd rövidesen pár MW-os egység teljesítményű szélerőművek kialakítására adott módot, és ezek váltak a villamosenergia-fejlesztés leggyorsabban terjedő típusaivá.

Mivel a szélenergia térbeli sűrűsége kicsi, a szélerőműveket viszonylag nagy méretek jellemzik. A D átmérőjű szélkerék $F = D^2\pi/4$ felületet jelöl ki, az ezen v sebességgel átáramló $V = Fv$ légmennyiség az időegység alatt

$$P = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho F v^3}{2} \quad (8.9)$$

teljesítményt képvisel, a ρ sűrűség $\sim 1/8 \text{ kg/m}^3$. A teljesítmény 8.9 képlet szerinti elméleti értékét nem csak a hajtómű mechanikai vesztesége csökkenti, hanem az aerodinamikai veszteség is. Az utóbbi a szélesebbesség függvénye, időbeli átlaga rendkívül nagy, 80–90%, amiben egyrészt tükröződik, hogy a szélkerékből kilépő levegőben a kinetikus energia egy része eltávozik, másrészt, hogy a lapátok aerodinamikai kialakítása tökéletlen, illetve állásszöge nem optimális.

Mivel a mértékadó felület az átmérő négyzetével arányos, nagy teljesítményhez nagy átmérő tartozik. A néhány MW-os szélérőművekhez 50–60 méteres lapáthosszak szükségesek, az ezzel együtt járó nagy igénybevételhez nagyszilárdságú anyagok kellenek. A nagy lapáthossz miatt magasak (80–130 m) a tartóoszlopok, és a zavartatás elkerülésére az oszlopok között az átmérő többszörösét kitevő távolságot kell biztosítani. A nagy méretek indokolják a nagy fajlagos anyagszükségletet és a magas beruházási költségeket. A tájból kiemelkedő magas létesítmények – különösen, ha szélérőműtelepeket alkotnak – esztétikai kifogásokat is kiváltanak.

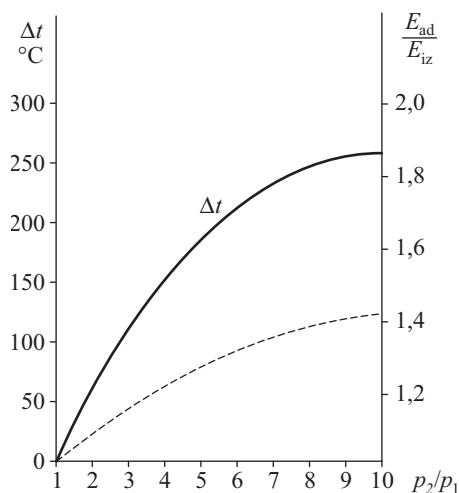
A 8.9 képlet szerint a teljesítmény a szélesebbesség köbével arányos, ezért az a szél-erőtől függően nagyon erősen ingadozik, aminek ellensúlyozása a villamos hálózathoz csatlakozó szélérőműveknél gyorsan változtatható teljesítményű kapacitásokat igényel. A szabályozás, és a szélmentes időszakok áthidalása miatt energiatárolásra is szükség van. Ezek hiánya a magyar villamosenergia-rendszerben problémát okoz, ami korlátozza a telepíthető szélérőmű kapacitást. Természetes, hogy a korlátozás érdekeket sért, ami körül politikai viták is kialakulnak. Légnemű anyagokat kiterjedten alkalmaznak szerszámok és gépek működtetésére, tárgyak mozgatására, áramló gázokkal anyagok szállítására. A légnemű anyagok áramlását, vagy munkavégző képességét biztosító berendezések a mechanikai energia formáját módosítják, megnövelve a nyomást, vagy az áramlási sebességet. Attól függően, hogy a nyomást milyen mértékben növelik, a gázok és gőzök áramlását biztosító berendezések több típusát különböztetik meg. A szellőzők (ventillátorok) belépő és kilépő nyomásának aránya kisebb 1,1-nél, a fűvőknél a nyomásarány 1,3–3 és a kompresszoroknál (sűrítők) 3-nál nagyobb.

A szellőzők csupán a közeg áramlását akadályozó ellenállások leküzdését biztosító kis nyomáskülönbséget szolgáltatják. A viszonyokat kis sűrűségű összenyomhatatlan folyadék áramlásaként lehet tárgyalni, amit a Bernoulli-egyenlet ír le, a helyzeti energiát kifejező tag elhanyagolásával. Ebből az egyenletből határozható meg a szellőző „szállítómagassága” is. Kis mennyiségre axiális, nagyobb légáramhoz félaxiális és radiális átömlésű megoldásokat alkalmaznak. Az áramlástan kialakítás jelentősen befolyásolja a szellőzők hatásfokát, az egyszerűbb szerkezetek 20–40%-os hatásfokával szemben tökéletesebb, de bonyolultabb konstrukcióval 60–80%-ot is el lehet érni. Az energiafelhasználást lényegesen befolyásolja a típus megválasztásán kívül a hatásfokgörbén a munkapont kijelölése és a szellőző elhelyezésének módja is.

A fűvők és kompresszorok esetében a gázok összenyomhatósága jelentős szerepet játszik, a viszonyok leírásához figyelembe kell venni a gáz állapotegyenletét is. A kompresszió az állapotfüggvények megszabta hőmérsékletnövekedéssel jár. Bizonyos esetek-

ben a hőmérsékletnövekedés hasznos, pl. kohók, tüzelőberendezések égéslevegőjének előmelegítése, kémiai reakciófeltételek javítása, gyakran azonban nem kívánatos. Fűvóknál a nyomásarány kicsi, így a hőmérséklet-növekedés sem nagy, és a berendezések külső felületén érvényesülő természetes hűtés elegendő a gép üzembiztos működéséhez. Kompresszoroknál viszont mesterséges hűtés szükséges, amit nemcsak a technológia által megkívánt hőfok indokol, hanem a kompresszor szerkezeti anyagainak a védelme és a kenés biztosíthatósága is. A hőmérséklet növekedése nagymértékben csökkenti a szállítható gázmennyiséget is a fajtérfogat változása miatt.

A kompresszióknak a 6.9. táblázatban bemutatott típusai közül az izotermikus igényli a legkisebb munkát, ezért a sűrítők értékelését ilyen folyamatra szokták vonatkoztatni. Megvalósításának azt a feltételét, hogy a fejlődő hőt teljes egészében el kell vezetni, lassú járatú gépeknél csak megközelíteni lehet, egyébként többszörös közbenső hűtést kell alkalmazni. Az adiabatikus kompresszió több munkát igényel, mint az izotermikus, e két munka arányát, valamint a hőmérséklet-növekedést a sűrítés függvényében a 8.6. ábra mutatja.

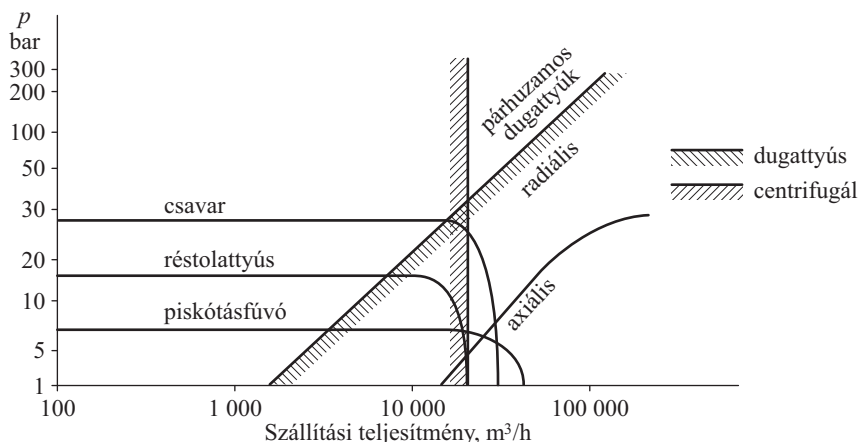


8.6. ábra. Adiabatikus kompresszió

Sűrítésre térfogat kiszorításon alapuló szerkezetek és áramlási elven működő turbókompresszorok egyaránt használatosak, alkalmazási területüket a 8.7. ábra mutatja. Mindkét típusnak számos kivitele van, az első csoportba különféle egyszeres és többszörös dugattyús, forgódugattyús, rotációs kompresszorok tartoznak, az axiális és radiális beömlésű turbófűvők és turbókompresszorok szintén sokféle megoldással készülnek. A térfogat-kiszorításon alapuló megoldásokat jobb hatásfok jellemzi, de teljesítményük korlátozott, nagy teljesítményre turbókompresszorok alkalmasak. A legnagyobb teljesítményű axiálkompresszorok teljesítménye 30–40 MW-ot is elér.

A dugattyús kompresszorok hengerhűtésével, a turbókompresszorok felületi hűtésével a hőnek csupán 10–20%-át lehet elvonni, ezért több fokozatra bontják a kompresszorokat, és közbenső hűtést, illetve a teljes kompresszió után utóhűtést alkalmaznak. Stabil gépeknél vízhűtés, mobil berendezéseknél többnyire léghűtés a jellemző. A hűtővízben

távozó hulladék hő hasznosítása különösen nagy szállítási volumennél és nagy sűrítési foknál az eredő energetikai hatásfok javításának fontos lehetősége. A hűtés intenzitása az előzőek szerint visszahat az energiaigényre is, amit a hűtővíz bemenő hőmérséklete is befolyásol. A nyári meleg például a magasabb hőfokú hűtővíz révén növelheti a kompresszor hajtásához szükséges teljesítményt. Léggompresszoroknál ezt még tovább növeli a levegőben maradó nagyobb légnedvesség, ami a kompresszor további fokozataiban lecsapódva hőt ad át, és a szállítási térfogatot is csökkenti.



8.7. ábra. Kompresszorok alkalmazási területe

A gáznyomás csökkentésére szolgáló vákuumszivattyúk lényegében szintén kompresszorok, azzal az eltéréssel, hogy kisnyomású térből komprimálják a gázt légköri nyomásra, eközben a kisnyomású térből elszállítják az anyagot.

Csupán elvi lehetőséget jelent, hogy fordított irányú MHD¹⁰⁹ vagy EGD¹¹⁰ folyamatot gázok komprimálására is használni lehet (a kicsatoló elektródokon bevezetett villamos feszültség és a mágneses erőtér hatására a töltéshordozók felgyorsulnak, és a gáz komprimálódik). A fordított MHD folyamatot szélcsatorna kísérleteknél használták az űrhajók kialakításához.

A komprimált levegőt energiaforrásként is használják. A gázok nyomását legtöbbször szabad löketű dugattyúk segítségével alakítják át mechanikai munkává. Légnyomásos motorok általában 6–10 barnál nagyobb nyomást nem igényelnek. Különösen ott indokolt a használatuk, ahol hirtelen lökés vagy ütősszerű hatás kifejítése az igény (kovácspöröly, cölöpverő, szegecselőkalapács, fűvő-, réselő- és vésőgépek). A kisebb 0,2–3 kW teljesítményű, gyors működésű szerszámok rendszerint csak a levegő tolóhatását hasznosítják, az expanziós munkát nem. A gyors expanzió miatt ugyanis a levegő expanziós görbéje lényegesen eltér az ideális gázokétól és annyira leül, hogy az abban levő nedvesség tar-

¹⁰⁹ Magneto-hidrodinamika.

¹¹⁰ Elektro-gázdinamika.

talom kicsapódva üzemzavart okozó jég vagy hó formájában megfagy. Ez az üzemmód azonban rossz, 10–15%-os hatásfokkal jár, mivel a bevezetett kompressziós munka nagy része nem hasznosul. Ezért a komprimált levegő drága energiaforrás, a költségek csökkentése és az energiatakarékosság egyaránt a lehetséges legkisebb nyomás alkalmazását indokolja. A pneumatikus szerszámok könnyen kezelhető, üzembiztos eszközök, melyek balesetvédelmi szempontból is előnyösek (pl. tűzveszélyes munkahelyeken, robbanásveszélyes bányákban). Bányamozdonyokat is hajtanak pneumatikus motorokkal (150–200 bar nyomású tárolótartályokból kiszolgált 15–30 bar nyomású munkahengerrel), továbbá bányavitlakat.

A pneumatikus, valamint hidro-pneumatikus erőátvitelt alkalmazzák testek mozgatására, továbbítására is, pl. kapcsolók gyors működtetésére, automatákban a munkadarabok mozgatására, szervoberendezések vezérlésére. Terjednek a pneumatikus eszközök a finommechanikában összetett műveletek távműködtetésére (automata szerszámgépek, manipulátorok) a szerelőberendezésekben, mivel egyszerű és igénytelen elemeket tartalmaznak. Az anyagmozgatáshoz mind a gázok kinetikus, mind nyomási energiáját felhasználják. A kinetikus energia biztosítja a szemes anyagok, porok pneumatikus szállítását, a fluidizált rendszerek üzemét, ezen alapul a csőposta. Porok szállításánál előfordul, hogy a sűrűlódás hatására sztatikusan feltöltődnek, és villamos szikra veszélyes hatású porrobbanást okoz. A természetes eredetű felhajtóerőnek alárendelt szerepe van a repülés technikájában (vitorlázó repülőgép, ballonok), a hajtóműves repülőgépekre ható felhajtóerőt az áramlás okozta nyomáskülönbség hozza létre.

A légpárnás járművek és szállítóeszközök a jármű alá besajtolt légrétegen lebegnek, hajóknál a közegellenállás, szárazföldi járműveknél a sűrűlódás lényeges csökkenése mérsékli a szállítási munkát, viszont a légpárna fenntartása is jelentős energiát igényel. Közegek eredő sűrűségét gáz bekeverésével csökkenteni lehet, ami a felhajtóerőt növeli. Így a besajtolt gáz nyomási energiáját emelő munkára lehet konvertálni, ezen alapul a mamutszivattyúk működése vagy a gázliftes kőolaj-kitermelés.

A kiterjedve szabad sugárban kiáramló gáz nagy mozgásmennyiséggel rendelkezik, ha a kezdeti állapotban az entalpia nagy. Az így fellépő tolóerő biztosítja a sugárhajtóműves repülőgépek és a rakéták hajtását. Az energiaracionalizálás figyelmet érdemlő lehetősége a nyomásredukáló turbina. Alkalmazzák a nagyolvasztóból kilépő torokgáznál, számításba jöhet földgázvezetéknel a nyomás csökkentésére (pl. a tárolók előtt), sőt olaj- és vízvezetékeknél is. A nagy teljesítményű (MW nagyságrendű) nyomásredukáló turbínákkal villamos energiát lehet termelni, vagy kompresszort hajtani, a kis teljesítményű berendezések (10–100 kW) hőszivattyú hajtására alkalmasak.

8.2. Áramforrások

Az indukció törvénye szerint mágneses térben mozgó vezetőben áram ébred. Amikor Faraday a Royal Societyben bemutatta új felismerését Anglia miniszterelnökének, az megkérdezte:

– Mire lesz ez jó?

– Nem tudom – hangzott a szarkasztikus válasz –, de egyszer még adózás tárgya lesz.

A prófécia beteljesülése minden képzeletet felülmúlt. Hatalmas iparág született a villamos gépek és készülékek gyártására, és hatalmas iparág jött létre a villamosenergia-ellátásra, hogy az áram minden emberi tartózkodásra szolgáló helyig eljusson. Ezek a világ legnagyobb vállalatbirodalmaivá fejlődtek fel és az államok legnagyobb adófi-zetőivé váltak.

Az elektrotechnika hasznosításának nagyon sok lehetősége az indukció alkalmazásán alapul. Ezek közül is kiemelkednek a forgó gépek, különösen a generátorok, hiszen azok szolgáltatják a villamos energiát. Megjegyzendő, hogy ellentett irányú betáplálással minden generátor motorként működtethető. Siemens 1866-ban szabadalmaztatta az egyenáramú generátort, melyben a mágneses teret az állórész tekercse hozza létre. A forgórész hornyaiba helyezett vezetőkben indukált feszültséget, illetve áramot kollektor segítségével vezetik ki. A forgórész tekercseinek végéhez illeszkednek a kollektor lemezkéi, melyekkel szénkefe biztosítja a kapcsolatot. A dinamók könnyen kezelhető, jól szabályozható áramforrások, nagyságrendekkel több energiát szolgáltatnak, mint a kémiai elemek.

A dinamók gyorsan elterjedtek, de monopolhelyzetüket hamar megtörték a váltakozó áramú generátorok. Azokban a mágneses teret az egyenárammal gerjesztett forgórészben hozzák létre. Az állórész tekercsei szolgáltatják a feszültséget, illetve áramot, annak kialakításán múlik, hogy egyfázisú, vagy háromfázisú váltakozó áramot hoznak létre. Az utóbbi esetben három térben egymáshoz képest 120° -kal eltolt tekercs időben is hasonlóan eltolt három szinuszos váltakozó feszültséget hoz létre. A három tekercs feszültségeinek összege minden időpontban zérus, egyik kivezetésük összeköthető (csillagpont) és a vezeték elhagyható. Ennek révén a fejlesztett energia továbbításához nem 6, hanem csak három vezeték szükséges. A forgórész lehet tömör, ez jellemzi a hőerőművek nagy fordulatszámú turbógenerátorait. Kialakítható a forgórész sok kiképzett pólussal is, ilyenkor a fordulatszám jóval kisebb, ami a vízerőműveknél gyakori. Az n fordulatszám a 8.10 képlet szerint függ a hálózat f frekvenciájától és a forgórész póluspárainak p számától.

$$n = \frac{60f}{p} \quad (8.10)$$

A hálózati frekvencia általában 50 Hz, de az Egyesült Államokban és az amerikai kontinens legtöbb államában 60Hz-et használnak. Más frekvenciájú rendszerek is használatosak, egyes országok vasúti hálózataiban $50/3 = 16\frac{2}{3}$ Hz, mert ebből könnyebb a folytonos szabályozáshoz szükséges sima egyenáramot előállítani. A középfrekvenciás indukciós kemencék néhány 100 Hz-ig terjedő sávban működnek, fogyasztóberendezésekben sok másféle frekvenciát is alkalmaznak. Az információtechnikában 0 és THz között szinte minden frekvenciaérték használatos. Egyes technológiákban időben más lefutású feszültségek (impulzus, fűrészfog stb.) is előfordulnak.

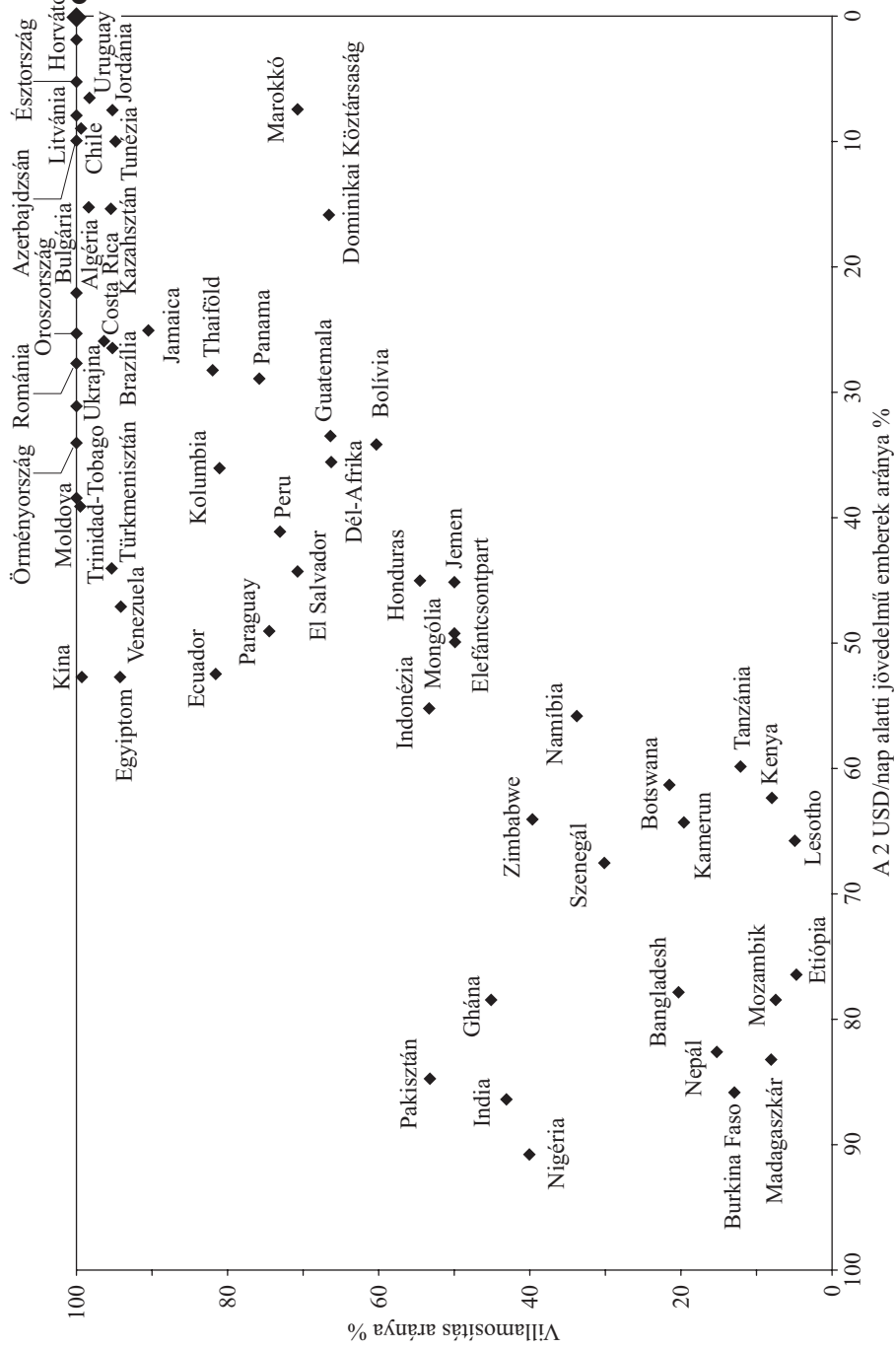
A tömör forgórészű ($p = 1$) szinkron generátorok fordulatszáma 3000/perc (illetve 3600), a legnagyobb gépek egységteljesítménye 1 GW-hoz közelít. A hatalmas tömegű forgórész mechanikai igénybevételének csökkentésére bizonyos teljesítmény felett félfordulatú ($p = 2$) gépeket alkalmaznak.

9. Villamos energia átalakítása

A villamos energia a legsokoldalúbban és legrugalmasabban hasznosítható, egyszerűen szállítható, könnyen szabályozható energiahordozó. Villamos energia minden energiatípusból előállítható, és azzal a fogyasztói szükségletek jóformán minden változatát ki lehet elégíteni. A villamosság e sokoldalú alkalmazhatósága következtében alig akad olyan emberi tevékenység, amiben ne játszana szerepet. Vonatkozik ez mind a személyes szükségletek kielégítésére, mind a termelő folyamatokra. Ennek következtében a villamos energiának jelentős hatása van a gazdasági hatékonyságra, valamint az emberi életminőség és életszínvonal alakulására.

A gazdasági tevékenység bővülése, a technológiák korszerűsítése, az életminőség javulása egyaránt járulékos szükségletet támaszt a villamos energia iránt, ezért a villamosenergia-felhasználás a fejlett országokban is folyamatosan nő, telítési tendencia még a nagyon magas fajlagos felhasználású országokban sem jelentkezik. Az országok egy főre eső évenkénti villamosenergia-felhasználása széles határok között (25 000 és 1000 kWh/fő/év) szóródik, Magyarország ~4000 kWh/év-es mutatójával meghaladja a világtátlagot, de Európában a sereghajtók közé tartozik. A fejlődő világot sokkal kisebb mutatók jellemzik, és az emberiségnek mintegy negyede ma is villamosítás nélküli területeken él ezekben az országokban. Az IEA felmérése korrelációt mutat a villamosítás mértéke és a szegénység aránya között (9.1. ábra). Ezért ezekben az országokban a villamosítás társadalompolitikai ügy, és nagy erőfeszítéseket tesznek a villamos hálózatok kiterjesztésére, hogy eljuttassák a villanyt minden településre. Kiemelkedő Kína példája, ahol két évtized alatt 98%-os ellátottságot sikerült elérni, 500 millió falusi emberhez juttatva el a villanyt.

A villamosításnak kitüntetett szerepe van a gazdasági felemelkedésben, és a civilizált életmód kialakításában. A nap hosszát megnövelő villanyvilágítás időt teremt a művelődésre és tanulásra, az elektronikus média ismereteket és információkat terjeszt, bővíti az emberek látókörét, közreműködik az oktatásban és képzésben, felhívja a figyelmet a lehetőségekre az életvitel javításában és a termelés hatékonyságának növelésében. A villamos gépek és eszközök az egyszerű munkafolyamatoknál is csökkentik a nehéz fizikai munkát (vízmelés, darálás, teheremelés és szállítás stb.), a bonyolultabb technológiai folyamatok gépesítése és automatizálása a termelékenység növelésének legfontosabb eszközei.



9.1. ábra. Kapcsolat a szegénység és a villamosítás között

9.1. Villamosenergia-ellátás

A villamosság gyakorlati alkalmazása az információtechnika területén indult el a távíró és a telefon bevezetésével. E vezetékes rendszerek tapasztalatai megalapozták az energiaátviteli hálózatok kialakításának lehetőségét, ami a villanyvilágítás kiépítésével kezdődött. A villamos energetika egyenárammal indult el világhódító útjára, mivel csak egyenfeszültséget szolgáltató kémiai áramforrások álltak rendelkezésre, és az első forgógépes áramforrások, a dinamók is egyenfeszültséget szolgáltatottak. Egy kisebb körzetben a villanyvilágítás kialakításához az első közcélú erőművet Edison hozta létre New Yorkban (Pearl Street, 1882), melyben dugattyús gőzgép két dinamót hajtott. A kezdeményezés hatalmas sikert aratott, már a következő évben sok városban megjelentek az első kis villanytelepekre támaszkodó, 1–2 km²-nyi területet ellátó rendszerek. Az erőművekhez egymástól elszigetelt különálló hálózatok kapcsolódtak.

De az áthidalható távolság az egyenáram továbbítására korlátozott volt, az alkalmazott kis feszültség miatt. A kialakított rendszerek hatósugarát a vezetékek mentén az árammal arányos feszültségesés, és az áram négyzetétől függő joule-veszteség korlátozta. A francia mérnökszövetség egyenesen színvonalához méltatlan utópiának minősítette Depreznek azt a kijelentését, hogy a villamos vezetékeken átvihető energia nagyságát és az átvitel távolságát tetszőlegesen növelni lehet a paraméterek megfelelő megválasztásával.

A problémát a Ganz-gyár három mérnökének (Zipernowszky Károly, Déri Miksa, Bláthy Ottó Titusz) találmánya (1885), a transzformátor oldotta meg, ami lehetővé tette az átvitel feszültségének és ennek révén a szállítás távolságának ugrásszerű növelését. Adott teljesítménynél ugyanis minél nagyobb a feszültség, annál kisebb az áram, és kisebbek az áram értékétől függő hátrányok, a feszültségesés és a veszteség is. Ehhez azonban váltakozó feszültségre kellett áttérni egyenfeszültség alkalmazása helyett, ami nem kevés vélemény- és érdekütközéssel járt. Az elektrotechnika úttörői – Edison, Siemens, Kelvin és mások – az egyenáram hívei voltak, bizalmatlanul tekintettek a bonyolultan kezelhető, és szokatlanul viselkedő váltakozó áramra. De vitathatatlan előnyei miatt térhódítása megállíthatatlan volt, amiben úttörő szerepet játszott a Ganz-gyár.

A villamos energiát szolgáltatató vállalatok világszerte gombamód szaporodtak. A kis villanytelepekből mind nagyobb teljesítményű erőművek nőttek ki, és ellátási területük egyre messzebb terjedt. A kialakuló villamos hálózatok nagyon heterogén képet mutattak, az áramnem, a frekvencia és a feszültség eltérő értéke miatt. Ez egyrészt műszakilag akadályozta a hálózatok összekapcsolását, és az ebből származó előnyös lehetőségek kihasználását, másrészt zavarta a villamos fogyasztó berendezések kompatibilitását. Az egymással érintkező hálózatok kapcsolódása természetes igény volt, de a meglévő adottságok visszahúzó ereje miatt ez a folyamat lassan alakult, még a 20. század vége felé is előfordultak elszigetelt rendszerek. Az előrelépésben jelentős szerepe volt az 1910-ben megalapított IEC¹¹¹-nek, ami irányelvek és szabványok tömkelegével törekszik ma is a villamosság jellemzőinek és az alkalmazás körülményeinek egységesítésre.

¹¹¹ International Electrotechnical Commission.

Az áramnemek közötti vitát az idő megoldotta, és lehetővé vált közöttük az átjárhatóság is. Az áramnem módosításának első lépése a váltakozó áramból egyenáram előállítás volt, elektroncsövekkel, forgógépekkel, higanygőz egyenirányítókkal, majd félvezetőkkel. Az ellentett irányú átalakítás később érett be, a teljesítményelektronika segítségével. Forgógépekkel a frekvenciák közötti váltás is megoldható, de a korszerű megoldás félvezetők alkalmazása, amikkel a feszültség és áram frekvenciáját és hullámalakját tetszőlegesen be lehet állítani. A feszültségek egységesítésében az ajánlott szintek szabványosítása jelentett megoldást.

Néhány területen az egyenáram megőrizte a szerepét, pl. az elektrokémiai technológiákban (színesfémkohászat, galvanotechnika, anyagok leválasztása a vegyiparban). Bekövetkezett a finoman szabályozható egyenáramú hajtások reneszánsza is. A fordulatszám folytonos szabályozását igénylő vontatásban egyenáramot használnak, így a vezetékhez kötött városi járművekben (metró, villamos, trolibusz), és a legtöbb nagyvasúti mozdonyban. Egyenfeszültségű táplálást igényelnek az elektronikus eszközök és készülékek is. Alkalmaznak egyenáramot villamos energia nagy távolságú szállítására, valamint eltérő frekvenciájú hálózatok aszinkron kapcsolatához. A frekvenciákban mutatkozó eltérések okozta üzemzavarok elkerülésére néhány éven keresztül pl. az osztrák és a magyar villamos energiarendszer egyenáramú betéten keresztül kapcsolódott össze. A villamos energiaszállítást és a felhasználás zömét azonban szinuszos lefolyású váltakozó áram jellemzi. Ennek frekvenciája általában 50 Hz, de az amerikai kontinensen 60 Hz-et használnak.

A kedvező adottságú helyeken vízerőműveket építettek, de a fő irány hőerőművek létesítése volt szénbázison. Ezeket kezdetben a fogyasztói súlypontokba telepítették, mert egyszerűbb és olcsóbb volt a szén vasúton odaszállítani. A villamos energia nagyobb távolságú szállíthatóságának kialakulásával a szénbányák mellé telepített erőművek is létjogosultságot nyertek, majd a tengeri szénszállítás fellendülése maga után vonta szénerőművek építését a kikötők közelében. A hőerőművekből a dugattyús gőzgépeket a 20. század elején hamar kiszorították az egyre nagyobb teljesítményű gőzturbinák. Napjainkban atomerőművekben található a legnagyobb gőzturbinák, a legnagyobb egységteljesítmény teljes fordulattal (3000/perc) 1,5 GW, félfordulattal ~2 GW. E hatalmas erőgépek csúcstechnikát képviselnek. A hőerőművek tüzelőanyaga kezdetben szinte kizárólag szén volt, hegemon szerepét később kedvezőbb adottságú tüzelőanyagok versenye, valamint a környezetvédelmi követelmények megtörték. A szén azért még ma is számottevő szerepet játszik a villamos energetikában.

A második világháború után kerültek előtérbe a nehéz kőolajfrakciók és a lepárlási maradékok eltüzelésére a kőolaj-finomítók közelébe telepített erőművek. Az 1970-es évek kőolajkrízisének hatására a folyékony szénhidrogének erőművi felhasználása erősen visszaszorult, főleg csúcserőművek ellátására és szénerőművek támasztó tüzelésére. A gázhálózatok kiterjedése lehetővé tette a földgáz erőművi eltüzelésének gyakorlatát, aminek az 1990-es években nagy lökést adott az áttörés a gázturbinák fejlesztésében. Az űrtechnika eredményeinek felhasználásával kifejlesztett magas hőmérsékletet álló lapátanyagok és különleges szerkezetek nagyon jó hatásfokú, tartós üzemre alkalmas gázturbinák gyártására teremtettek lehetőséget, már 500 MW-os egységteljesítmény is

megvalósult. A gázturbinákkal gyorsan és olcsón megépíthető gáz-gőz kombinált ciklusú földgázerőművek vezető szerephez jutottak az erőműépítésben. Míg a hagyományos gőzerőművek hatásfoka legfeljebb 35–38%-ot ér el, a kombinált ciklusnál ezt 55–58%-ra sikerült növelni. Ez a lehetőség gázturbinás fejelés utólagos kiépítésével hagyományos erőműveknél is kiaknázható.

Atomerőművek építése az 1970-es években indult meg, a nukleárisenergia-hasznosítás helyzete ellentmondásosan alakult. A kezdeti nagy lendületet megtörte a csernobili katasztrófa, a kiváltott antinukleáris közhangulat idővel lecsengett, és az atomenergia reneszánsza kezdett kibontakozódni. A reményeket derékba törte a fukusimai katasztrófa, néhány országban a kitűnően működő atomerőművek leállítását is elhatározták. Az országok egy része azonban kitartott az eredeti elképzelések mellett. Az atomenergia jövőjét a politika és a társadalmi elfogadottság alakulása fogja meghatározni, a pozitív kimenet reményét a nagy erővel folytatott kutató-fejlesztő tevékenység élteti, de visszahúzó erő a beruházási költségek állandó növekedése.

A klímaváltozás veszélye fellendítette a megújuló energiákra alapuló villamosenergia-fejlesztést. Dinamikusan fejlődött a szélerőművek építése, és megindult a naperőművek létesítése is.

A magyar erőműépítés az energiaszerkezet tekintetében néhány év késéssel követte a nemzetközi gyakorlatot, de a blokkok egységteljesítménye csak lassan nőtt, a rendszer igényeinek megfelelően.

A villamos energia távolsági szállításának lehetősége megteremtette az erőművek és a nagy fogyasztói csomópontok összekapcsolásának útját. Az így kialakított alaphálózatra támaszkodva villamosenergia-rendszerek alakultak ki. Ahogy nőtt az erőművek és a rendszer teljesítménye, úgy nagyobb feszültségű hálózatok szuperponálódtak a korábbiakra, az alacsonyabb szintű vezetékek pedig az elosztó rendszerekben kaptak szerepet. A magyar alaphálózat feszültsége jelenleg 400 kV, de van egy 750 kV-os nemzetközi kapcsolatunk is. Az áramszolgáltató vállalatok állomásait középfeszültségű vezetékek (1–60 kV) kapcsolják össze, és a fogyasztókat közvetlenül ellátó kiefeszültséghez (<1 kV) többszörös transzformáción keresztül vezet az út.

A nagyobb feszültségek lehetőséget teremtettek az ellátás sugarának növelésére, az összeérő hálózatok idővel regionális rendszerekké kapcsolódtak össze, kiaknázva az együttműködésben rejlő előnyöket. A kooperáció módot ad üzemzavaroknál egymás kiegészítésére, lehetővé teszi az erőművekben a tartalékok mértékének csökkentését és alapot ad előnyös villamosenergia-szállítási megállapodásokra. A fejlett országokban a regionális rendszerekből a két világháború között országos villamosenergia-rendszerek fejlődtek ki. Néhány országban – pl. Franciaországban, az Egyesült Királyságban, Olaszországban, Spanyolországban – egyetlen állami tulajdonú nagy monopolszervezetben koncentrálódott a villamosenergia-ellátás. A magyar tervgazdaságban az erőművektől az áramszolgáltatókig terjedő teljes vertikumot magába foglaló trösztöt a francia EdF¹¹² mintájára alakítottuk ki. Másutt – pl. Németországban, az USA-ban, Kanadában – néhány

¹¹² Electricité de France.

nagy és tőkeerős regionális vállalat között oszlott meg a feladat, melyek tulajdonlásában gyakran a szövetségi államok/tartományok is jelentős szerepet vállaltak. A lokális szolgáltatók többnyire függetlenek maradtak, nemritkán az önkormányzatok tulajdonában, tekintettel a tevékenység közüzemi jellegére.

A 20. század második felében a technikai integrálódás átlépte az országhatárokat, a nemzeti rendszerek számos gazdasági és műszaki haszonnal járó együttműködő nemzetközi rendszerekké kapcsolódtak össze. Az együttműködéssel kiaknázhatók azok a különbségek, melyek az energiafelhasználás időbeli lefolyásában országoként jelentkeznek, mert eltérő a gazdasági szerkezet, a fogyasztói szokások, a munkaidő-beosztás, az időjárás, és számos más körülmény, még a kelet–nyugati irányú időzóna eltérésnek is van szerepe. Mindez a kapacitáskihasználás optimalizálására ad módot, hiszen eltérő időpontokban jelentkeznek a csúcsterhelések és a kis terhelésű időszakok, az együttműködő rendszer csúcsterhelése kisebb, mint a résztvevők csúcsterhelésének összege. A kooperáció elősegíti a költségek minimalizálását, értékesíteni lehet a felesleges kapacitásokat, kompenzálható a vízjárás egyenetlensége a vízerőműveknél, még az erőműépítés koordinálása sem lehetetlen elképzelés, és üzemzavaroknál nagy jelentősége van a kisegítés lehetőségének.

Európában több nagy együttműködő rendszer alakult ki. A Nyugat-Európai villamos energiarendszerek a második világháború után alakították meg az UCPTÉ¹¹³-t, az együttműködés feltételeinek kialakítására és a tevékenység koordinálására. 2000-ben tevékenységéből a villamosenergia-piac liberalizálása miatt törölték a termelés koordinációját, ezért nevét UCTÉ¹¹⁴-re módosították. Az észak-európai államok együttműködését a NORDEL, a dél-európaiakét a SUDEL koordinálta, energetikai kapcsolatban az UCTÉ-vel. Kelet-Európában a KGST¹¹⁵ rendszer jött létre a Prágában működő CDU¹¹⁶ központi teherelosztóval. Magyarország a volt szocialista országokkal együtt a KGST-rendszerben vett részt, ennek felbomlása után négy ország (Csehország, Lengyelország, Magyarország, Szlovákia) létrehozta a CENTREL-t. Az ezredforduló táján a CENTREL tagjai az UCTÉ-rendszerhez csatlakoztak. Míg a KGST-együttműködés alapvető célja nagymértékű energiaszállítások bonyolítása volt, az UCTÉ-rendszer fő feladata a kölcsönös kisegítés.

Az 1990-es években új fejleményként megindult a fejlett országokban a villamosenergia-ellátás liberalizálása. A versenytől az ellátás költségeinek csökkenését és a fejlődés felgyorsulását várták. A piaci módszerek kialakítása egyrészt a monopóliumok megszüntetését jelenti, másrészt az állami befolyásolás visszaszorítását (dereguláció). A liberalizálással a villamosenergia-ellátás közüzemi szolgáltatásból kereskedelmi tevékenységgé válik, és a villamos energia piaci áru lesz. Korábban a vállalatok célfüggvénye a fogyasztói szükségletek kielégítése volt, természetesen gazdasági hasznuk sem volt

¹¹³ Union for the Coordination of Production and Transmission of Electricity, Villamosenergia-termelést és Szállítást Koordináló Társulás.

¹¹⁴ Union for the Coordination of Transmission of Electricity.

¹¹⁵ Kölcsönös Gazdasági Segítség Tanácsa.

¹¹⁶ Centralnoje Diszpecerszkoje Upravlenyije.

mellékes. Számos országban – Magyarországon is – törvény írta elő az ellátási kötelezettséget, ami megszűnik a piaci viszonyok teljes körű megteremtésével.

Az Európai Unió élharcosa a liberalizálásnak, a versenytől az energiaárak csökkenését reméli, ami egyik feltétele annak, hogy az európai ipar versenyképessé váljon az amerikai és japán iparral. Sok éves vita eredményeképp kötelező erejű direktívában írták elő a tagállamok villamos energia (és földgáz) piacának megnyitását. Ez egyrészt az átviteli hálózatok szabad hozzáférését jelenti bármely villamos energiát termelő vagy szállító vállalatnak, másrészt a fogyasztók szabad választását a szolgáltatók között. Az EU az energiapiacok működését, a vállalatok magatartását nagyszámú kötelező előírással, irányelvvel, szabvánnyal szabályozta. Ezek érvényesítését kemény viták, hosszas egyeztetések alapján kialakított kompromisszumok biztosították.

Az Európai Unió aktív szerepvállalása az energiaellátás működésének szabályozásában átalakította a kapcsolatrendszereket is. Az UCTE és a regionális egyesülések összeolvadtak az Eurelectric¹¹⁷-ben, ami szakmai képviseletet lát el és elemzésekkel támogatja a vállalatok tevékenységét. Később az beolvadt a rendszerirányítók által létrehozott ENTSO-E¹¹⁸-be.

A villamosenergia-piac kialakítása nem egyszerű feladat, egyrészt a hálózatok természetes monopóliumot jelentenek, mert párhuzamos rendszerek létesítése nemcsak értelmetlen, hanem gazdaságtalan is lenne. Ezért a piaci mechanizmus kulcskérdése a villamosenergia-termelők és a fogyasztók – törvényben biztosított – megkülönböztetés nélküli szabad hozzáféréseinek lehetősége a villamos energiát szállító hálózatokhoz, természetesen megfelelő költségtérítés ellenében. Másrészt gyakran abból származik monopólium, hogy a technológiai vertikum fázisai hierarchikusan felépített, centralizált nagyvállalatok kezében összpontosulnak. E problémák feloldásának módja országonként változó. A legegyszerűbb megoldás a vertikum felbontása független vállalatokra. Az érintett – többnyire multinacionális – vállalatok ennek megakadályozására, vagy legalább enyhítésére (pl. szervezeten belül funkcionális, üzemviteli vagy számviteli elkülönítéssel) törekednek. Az utóbbi esetben informális, vagy személyi kapcsolatok biztosítják az érdekérvényesítést. Természetesen verseny csak kellő számú – és nem nagyon eltérő alkuerejű – szereplővel hozható létre. Számos országban a liberalizáció együtt járt a nehézkes és költségérzéketlen állami tulajdonban levő vállalatok magánosításával is.

Valós verseny esetén a vállalatok a költségek leszorítására törekednek, kritikus kérdés, hogy ez ne menjen a fejlesztés és az üzemvitel színvonalának rovására. A nem eléggé előrelátó szabályozás pl. Kaliforniában nem ösztönözte a beruházásokat, ennek következtében súlyos ellátási zavarok következtek be 2000–2001-ben. A villamosenergia-rendszer sorozatosan összeomlott, mert az erőművi kapacitáshiány és az import vezetékek elégtelensége miatt a fogyasztói igényeket nem sikerült fedezni.

Megoszlanak a vélemények, hogy az energiapiac liberalizálása meghozta-e a remélt előnyöket. Verseny csak nagyon módjával valósult meg, mert az alapvető kérdésekben

¹¹⁷ The Union of the Electricity Industry.

¹¹⁸ European Network of Transmission System Operators for Electricity.

a hatalmas energiaipari vállalatok nagy gazdasági erejükre, valamint kapcsolataikra támaszkodva érvényesíteni tudták érdekeiket, ami oligopólium kialakítására vezetett. A fogyasztói árak nem mérséklődtek, amit elsősorban a világgazdasági ármegmozgások befolyásoltak, mindenekelőtt az olajár. Az viszont tagadhatatlan, hogy a gazdasági szempontok előtérbe kerülése növelte a hatékonyságot.

Magyarországon az első közcélú villamos erőmű Temesváron létesült 1884-ben, megelőzve Európa legtöbb országát. Mátészalkán pedig 1888-ban egy malomtulajdonos üzemi villanytelepéből lakóházáig vezette a villanyt és a vezeték mentén az utcákat is kivilágította. Budapesten majdnem egy évtizeddel hátráltatta a fejlődést, hogy mindenféle vezeték építésére a gázszolgáltató társaságok kaptak kizárólagos jogot, és a villany konkurenciát jelentett a gázvilágításnak.

A 20. század első felében a magyar viszonyokat elszigetelt hálózatok jellemezték. Az első világháború előtt még Budapesten is két társaság szolgáltatott villanyt, a Budapesti Általános Villamossági Rt. egyenáramot, a Magyar Villamossági Rt. pedig egyfázisú váltakozó áramot.

A II. világháborút követően mintegy két-három évtizednyi lemaradást kellett bepótolni, mert addig településeinknek alig több mint negyede volt bekapcsolva a villamos hálózatokba. Az államosítás (1949) nyomán elindult az együttműködő villamosenergia-rendszer és az országos hálózat kiépítése, a nagyobb erőművek 120 kV-os vezetékekkel történő összekapcsolásával. Egy erőteljes villamosítási programmal sikerült az ország településeit bekapcsolni a hálózatba, az utolsó községbe, Aporligetre 1963-ban jutott el az áram. Az 1960-as évek végére majdnem minden lakásba sikerült eljuttatni a villanyt. A villamosenergia-ipar vállalatait az 1950-es években fokozatosan egy nagy centralizált szervezetben egyesítették, aminek megnevezése és cégformája időnként változott, tevékenységének csúcspontját az 1980-as évek végén érte el, amikor 6,5 GW-os csúcsterheléssel 40,6 TWh/év energiát szolgáltatott, és több mint 5 millió fogyasztót szolgált ki.

A rendszerváltást követően az országos rendszert decentralizálták, és az 1990-es évek közepén az állami tulajdon legnagyobb részét magánosították. Az MVM¹¹⁹ tulajdonában maradt az alaphálózat, az atomerőmű és néhány kisebb hőerőmű. Az erőművek többségét, és az áramszolgáltató vállalatokat privatizálták, azok külföldi nagyvállalatok tulajdonába kerültek. Az új tulajdonosok legnagyobb része nagy multinacionális vállalat, hatalmas gazdasági és szellemi erővel, kiterjedt nemzetközi háttérrel, gazdag piaci ismeretekkel és sok évtizedes érdekérvényesítő tapasztalatokkal. A Magyarországon jelen levő multik (EdF, Suez-GdF, EON, RWE) a világ legnagyobb vállalatai közé tartoznak, manőverezési lehetőségeik messze túlnyúlnak az országhatárokon. Az Orbán-kormány törekvése a privatizáció visszafordítása, hogy az MVM-ből egy a teljes villamos energetikai vertikumot átfogó nagy, centralizált nemzeti holdingot alakítson ki, aminek kompetenciája a gázszolgáltatás egyes kérdéseire is kiterjed. Nagy kérdés, hogy ez az EU törekvéseivel is ellentétes irányzat mennyire lesz életképes, és hogyan biztosítható a fejlesztéséhez szükséges tőke.

¹¹⁹ Magyar Villamos Művek Rt.

A privatizációra nemcsak a költségvetés hiányának a kiegyenlítésére volt szükség, hanem a fejlesztés finanszírozása miatt is, mert arra az állami vállalatok önerőből nem lettek volna képesek, az állami beruházások pedig megszűntek, így csak külföldi tőkére lehetett támaszkodni. A hatalmas pénzmozgások visszaélésekre is módot adtak, korrupcióra, személyes érdekek érvényesítésére, egyesek jelentős vagyonosodására. Az ebből származó társadalmi és politikai feszültségek még jelenleg is érezhetőek, a politikai pártok közötti konfliktusokban, sőt személyek megítélésében is megjelennek.

A privatizáció során tulajdonhoz jutott külföldi társaságok kifinomult módszerekkel, de következetesen és határozottan képviselik érdekeiket, nemigen viselve el beleszólást üzletpolitikájukba. Az ilyen vállalatok tevékenységét lényegében csak a jogszabályokban rögzített keretek között lehet kívülről befolyásolni. Ha a hazai gazdasági klímát nem tartják elég vonzóknak, rejtett utakon tőkéjük repatriálásának is megtalálják a módját. A kívülállók előtt rejtve maradnak a magyarországi vállalat szakmai és gazdasági kapcsolatai külföldi anyavállalatával, valamint annak tulajdonosi érdekeltségeivel külföldön, ami nagy mozgási szabadságot biztosít e vállalatoknak. Ez nemcsak a pénzmozgásokat érintheti, hanem a megrendeléseket és a műszaki döntéseket is.

Az erőművek privatizációja során a vevők garanciát igényeltek befektetésük megtérülésére. Ennek kielégítésére az MVM – mint villamosenergia-nagykereskedő – szerződésben (HTM¹²⁰) vállalta a megtérülés időszakára a termelt villamos energia átvételét meghatározott áron. A liberalizáció után a HTM-eket a piac korlátozásának tekintették, fenntartásuk körül heves viták alakultak ki egyrészt az EU illetékes szerveivel, másrészt a hazai államigazgatás hatóságai között. Az MVM keményen harcolt a szerződések fenntartásáért, mert olcsó forrásokat biztosított a számára. Tarifaemeléssel fenyegetve még a kormányt is maga mellé állította. A vitáknak végül az EU Bizottsága vetett véget, kötelezve a magyar államot a szerződések felbontására.

Csatlakozásunk az Európai Unióhoz azt jelentette, hogy a magyar energiapiac a közös uniós piac részévé vált, és az arra érvényes szabályokat kell alkalmaznunk. Sok vita után hazánkban is elindult a fokozatos piacnyitás. Ez megkívánta a korábban alkalmazott dotációk és keresztfinanszírozások felszámolását, és olyan tarifák kialakítását, hogy az árak fedezzék a költségeket. A villamos energia és a földgáz ára a magyar gazdaságpolitika neuralgikus kérdése. A tervgazdaságban az erősen nyomott árat eszköznek tekintették az életszínvonal és az ipari költségzínvonal befolyásolására. A rendszerváltás utáni kormányok pedig a társadalmi nyugalom érdekében szorították le az árakat, aminek következtében az árak nem fedezték a költségeket. A hiányt egy ideig a költségvetésből fedezett dotációval kellett áthidalni, ami piaci viszonyok között nem fenntartható gyakorlat. Ezért később az energiaszolgáltató vállalatokat szorították rá a költségtöbblet viselésére. Ennek a fedezetét a vállalatok egyrészt az ipari fogyasztókra terheltek (keresztfinanszírozás), másrészt a beruházások és a karbantartás visszafogásában, a szolgáltatás minőségének romlásában teremtették meg. Végül elkerülhetetlenné vált, hogy a költségeket nyíltan vagy áttételesen a fogyasztókra terheljék. A fogyasztói árak volutarista leszorítása

¹²⁰ Hosszú távú megállapodás.

a korábbi problémák (beruházások elmaradása, műszaki lemaradás, a szolgáltatás minőségének romlása, költségviszonyok torzulása) visszatérésével fenyeget.

Az EU joganyagának átvétele a környezetvédelmi követelmények honosítását is jelenti. A kén-dioxid-kibocsátás határértékeinek a magyar szénerőművek nem feleltek meg. Füstgáz kénmentesítő utólagos beépítése egyedül a Mátrai Erőműben bizonyult kifizetődőnek. Egy a választási kampány során a bányae erőmű munkahelyeinek megőrzésére tett koordinálatlan ígéret miatt a Vértes Erőműben is sor került füstgáz kénmentesítő utólagos beépítésére, állami forrásból. A többi szénerőművet vagy leselejteztek, vagy – ha erre megvoltak a feltételek – más tüzelőanyagra tértek át. Ahol hőszolgáltatással kapcsolatosan termelték a villanyt, ott gyakran földgáztüzelést vezettek be, néhány erőműben pedig fatüzelést.

Az EU követelményét a megújuló energiák részarányára túlteljesítettük, ami 90%-ban a fatüzelésű erőműveknek köszönhető. Ez azonban önbecsapás, mert ezek az erőművek nem erdei hulladékot hasznosítanak, hanem egészséges, hatalmas rönköket aprítanak fel és tüzelnek el. Ez a konstrukció jó az erdőgazdaságoknak, mert biztos bevételhez jutnak. Jó az erőműnek, mert a megújuló energiából – biomasszából – termelt villamos energiát magas áron veszik át. De nem jó az energetikának, mert ezek a régi erőművek iszonyatosan rossz, 20% körüli hatásfokkal termelik a villanyt, és nem jó a természetvédelemnek, mert pusztítják az erdőket. Az erőműhöz közeli erdőkben már tarvágások is előfordulnak.

A rendszer zavartalan működésének feltétele, hogy a villamosenergia-termelés minden pillanatban fedezze a fogyasztók időben nagyon változékony szükségletét. Az operatív irányítás szerepét betöltő rendszerirányítók az egyensúly érdekében korábban az energia és teljesítmény viszonyokat szabályozták, a liberalizáció után ezt az áramkereskedelem váltotta fel. Ennek bonyolítására áramtőzsdék is kialakultak. A rendszerirányítók feladata nemcsak az egyensúly biztosítása a források és az igény között, hanem az erőművi és hálózati kapacitások szükséges és lehetséges bővítésének előre becslése is. Az EU követelményei felerősítették a rendszerirányítók szerepét, a regionális intézmények koordinálására létrehozták az ENTSO¹²¹-E-t (ugyanilyen szervezet – ENTSO-G – működik a gázhálózatok területén).

A fogyasztók elvárása, hogy mindig álljon rendelkezésükre kellő mennyiségben és megfelelő minőségben villamos energia. Ennek érdekében a tömegtelen sok berendezésből álló hatalmas rendszer minden elemének teljesítenie kell a feladatát. Folyamatos ellenőrzéssel és karbantartással kell gondoskodni a hibák kijavításáról, az elhasznált eszközök cseréjéről, és időben bővíteni is kell a rendszert, hogy ki tudja elégíteni a fogyasztás növekedését, és a leselejtezésre kerülő eszközök pótlását. E követelmények kielégítéséhez megfelelő személyi állományra van szükség, szakmailag felkészült és feladatuk iránt elkötelezett emberekből, valamint pénzre a költségek fedezésére és a tartalékok biztosítására. De nem mellékesek az ellátás tartós stabilitását biztosító energia-politikai döntések sem, melyeken a rendszerek kialakítása, jellege, jövőbeli biztonsága

¹²¹ European Network of Transmission System Operators

műlik. Az energiavállalatok költségeinek kényszerű leszorítása az erre fordítható források hiánya miatt az ellátásbiztonság rovására mehet.

Tartalékok nélkül nem lehet folyamatos üzemet biztosítani, mert a sérült elemeket pótolni kell, a változó követelményeket pedig fedezni kell. Mindenből kellenek tartalékok, tüzelőanyagokból, erőművi kapacitásokból, energiaszállítási utakból, berendezésekből, szerelési anyagokból. A tüzelőanyagok és nukleáris fűtőelemek szükséges tartalékait jogszabályok írják elő. Az erőművi tartalék mértékét és jellegét szigorú előírások szabályozzák, amire egyrészt a változó fogyasztói terhelés ellensúlyozására, másrészt az üzemzavarok okozta kiesések pótlására van szükség. A nagyfeszültségű hálózatokat úgy alakítják ki, hogy egy távvezeték kiesése esetén legyen átviteli út annak helyettesítésére, amit automatikus átkapcsolások biztosítanak. A kisfeszültségű sugaras lakossági ellátásnál erre nincs mód, ott az üzemzavarok elhárításának időszükségele minősíti az áramszolgáltatót.

Sajnos minden körütekintés és előrelátás ellenére előfordulhatnak üzemzavarok természeti erők hatására, szerkezetek tönkremenetele miatt, vagy emberi hibák következtében. Majdnem mindenkinek vannak személyes tapasztalatai arról, amikor egy rövidzárlat következtében sötétbe borul a lakás, és egyik pillanatról a másikra megszűnnek a civilizált élet feltételei. Minden rideggé és barátságtaganná válik, a tárgyak ellenségesen meredeznek a sötétben, megszokott társaink – a háztartási gépek, a szórakoztató eszközök – életképtelen lomok. Megszűnhet a fűtés és a melegvzellátás, esetleg a lift se működik, és töprenghetünk, hogyan engedjük be a segítségünkre jövő szerelőt, mert a kaput se tudjuk működtetni.

Az ilyen helyi zavarok viszonylag gyorsan elháríthatók, az ok többnyire egyszerűen átlátható és orvosolható. Előfordulhat azonban a zavar lavinaszerű továbbterjedése, kiváltva a villamosenergia-ellátás összeomlását regionális, vagy akár országos léptékben. Az ilyen rendszerösszeomlások következményei felérnek egy természeti katasztrófával. A kezdeti esemény ilyenkor is többnyire egy kis helyi üzemzavar. Egy határkeresztező vezeték kiesése túlterhelődés vagy vezetéksérülés következtében Braziliában és Svédországban az energiaellátás teljes megbénulását idézte elő. Hasonló üzemzavar Olaszországban 55 millió lakost érintett, és 1,6 Mrd EUR kárt okozott 2006-ban. Egész Nyugat-Európa kapott ízelítőt a rendszerösszeomlásról, amikor egy hajó szabad útjának biztosításához kikapcsoltak egy folyót keresztező vezetékét.

A legnagyobb kihatású rendszerösszeomlás 1963-ban következett be Amerika északi harmadában.¹²² Egy villamos távvezeték túlterhelődése további vezetékek túlterhelődését okozta, az előidézett meghibásodások a villamosenergia-rendszer összeomlására vezettek, aminek következtében 40 millió ember életkörülményei napokra ellehetetlenedtek. A forgalomirányítás hiánya miatt megbénult a vasúti és a légi forgalom, napokba telt a városokban a jelzőlámpák hiánya miatt kialakult forgalmi dugók feloldása. Leálltak a metrók, az utasok százezrei óráig botorkáltak a sötét alagutakban, hogy kijussanak a felszínre. Nem működtek a felhőkarcolók felvonói, a bennrekedt emberek kétségbeesve

¹²² A New York-i nagy „black out” 1963-ban.

várták a kimentésüket. Akadozott a hírközlés, megszűnt a tv és a vezetékes rádió híradása, a tájékozatlan emberek között sokféle alakult ki pánik. Az élelmiszerek megromlottak a működésképtelen hűtőszekrényekben. Az áramhiány miatt zavar támadt a vízellátásban, a kórházak működésében, a műtétek nagy részét elhalasztották. Éjszaka sötétbe borultak a városok, megrendült a közbiztonság. Az Egyesült Államokban rendkívüli állapotot hirdettek, riadóztatták a hadsereget, a stratégiai bombázók felszállási parancsot kaptak. Nem kivételes eseményről van szó, hiszen az üzemzavar 40 év elteltével – 2003-ban – megismétlődött (50 millió embert érintett 2–3 napon keresztül, kiesett 263 erőmű, 62 GW teljesítménnyel, 350 GWh termeléssel, a kár ~4 Mrd USD).

Magyarországon az 1950-es években voltak súlyos ellátási zavarok, szénhiány és nem elegendő erőmű-kapacitás miatt. Időnként az ország jelentős területét – beleértve Budapest egyes részeit – ki kellett kapcsolni az ellátásból. A települések sötétbe borultak, Budapesten leálltak az üzemek, nem jártak a villamosok, nem működött a rádió, az emberek a sötét munkahelyükről gyalog botorkáltak haza a sötét otthonukba. A tanulságokat levonva sikerült egy nagyon hatékony, korszerű villamosenergia-rendszert kialakítani, világszínvonalú védelmi és irányítási eszközökkel. Az üzemzavarok miatt nem szolgáltatott energia áránya nemzetközi összehasonlításban is kiemelkedően alacsony. Kérdéses azonban ennek tartóssága, az erőműépítési szándékok elapadása kételyeket ébreszt.

Mínél fejlettebb egy társadalom, annál jobban ki van szolgáltatva az energiaellátás folytonosságának. Normális körülmények között a piac összerendezi az ebben szerepet játszó sokféle szervezet tevékenységét, de ha homok kerül a fogaskerekek közé, a következmények beláthatatlanok. Az energiaellátás biztonsága világszerte az energiapolitika első prioritásává vált. Az ellátásbiztonság nem a tulajdonviszonyokon múlik, megfelelő szabályozási környezettel ellensúlyozni lehet az ellátás biztonságát veszélyeztető magatartást, akár magántulajdonról, akár államiról van szó. Azt kell biztosítani, hogy a fogyasztók mindig hozzájussanak az előírt minőségű energiahordozókhoz a szükséges mennyiségben és elfogadható áron. Ennek a feltételeit az országok adottságai és lehetőségei szabják meg. Magyarország esetében a hazai energiaforrások szerény mértéke a meghatározó, az importot terhelő sokféle bizonytalanságot (természeti, műszaki, gazdasági, politikai, társadalmi, emberi eredetű kockázatok miatt) kell ellensúlyozni. Ehhez diverzifikálni kell az ellátást energiafajták, beszerzési források és ellátási utak tekintetében, az árak volatilitását pedig hosszabb időre kötött szerződésekkel lehet ellensúlyozni. Jelenleg az ellátásbiztonság kritikus kérdése Magyarországon az erőműépítési elképzelések elbizonytalanodása. Ebben szerepet játszanak az energetikát sújtó magas adóterhek, a hitelforrások elapadása, és nem utolsósorban a törekvések a tulajdonviszonyok megváltoztatására.

A követelményeket az energiahordozók minőségére szabványok rögzítik. A villamos energia esetében a minőséget az előírt villamos jellemzők értékének betartása jelenti. Első helyen említendő a frekvencia. Az együttműködő rendszerben minden generátornak azonos frekvencián kell az áramot szolgáltatnia. Teljesítményhiány esetében a generátorok lelassulnak, csökken a frekvencia, ami sok fogyasztó működését zavarja, egyesek üzemképtelenné válnak, és a kisebb frekvencián csökken a szolgáltatott energia is. A KGST-rendszerben krónikus volt a teljesítményhiány, a frekvencia

ingadozása és bizonytalansága akadályozta a keleti és nyugati európai hálózatok összekapcsolását.

A fogyasztó berendezések a feszültség meghatározott értékei között működőképesek. Főleg a hálózat túlterhelése okozhat akkora feszültségesést, hogy egyes készülékek működésképtelenné válnak. A helyzetet vagy a fogyasztás korlátozása, vagy a hálózat bővítése oldhatja fel. Nemcsak a feszültség értéke, hanem annak időbeli lefutása is fontos jellemző, ezt főleg a hálózati elemek és a fogyasztó berendezések zavarhatják meg. A feszültség és áram lefutásának időbeli eltolódása (φ fázisszög), a hullámalak torzulása, felharmonikusok megjelenése, impulzusok szuperponálódása a leggyakoribb jelenségek, melyeket ellensúlyozni, vagy kiküszöbölni kell.

Fontos tényező az ellátás rendelkezésre állása. A villamos energiarendszerben sokféle automatika és védelmi berendezés feladata az üzemzavarok gyors ellensúlyozása, ennek eredménye, hogy az üzemzavarok miatt nem szolgáltatott villamos energia aránya nemzetközi összehasonlításban is kiemelkedően alacsony. De az üzemzavarok egy része csak személyes beavatkozással hárítható el, ami a felkészült személyzet rendelkezésre állásán múlik. A sérült szabadvezetékek helyreállítása zord időjárási viszonyok között gyakran embert próbáló feladat.

A villamosenergia-ellátás stratégiai jelentősége, valamint a bonyolult működési feltételek meghatározása érdekében az állam teljesen nem vonulhat ki az árampiacról. Egyrészt körültekintően szabályozni kell a piac működésének jogi, gazdasági és műszaki körülményeit. Ennek során érvényesíteni kell a kereslet-kínálat alakulásától független társadalmi érdekeket is (ellátásbiztonság, fogyasztóvédelem, minőségbiztosítás, élet- és egészségbiztonság, vagyónvédelem, környezetvédelem, szociálpolitika, geopolitikai tényezők figyelembevétele stb.). Állami feladat azon hatóságok működtetése is, melyek ellenőrzik a követelmények teljesülését, és szankcionálják a piaci szereplők nem megfelelő működését. A biztonságos működés szempontjából fontos tevékenységek engedélykötelesek.

9.2. Elektrolízis

Elektrolízis során elektrolitokban villamos energia kémiai energiává alakul. Az elektrolitok lehetnek oldatok, olvadékok és szilárd elektrolitok, azokban a molekulák egy része – energiaközlés hatására – töltéshordozókra disszociál. A töltéshordozók (elektronok, ionok) az elektrolitba merülő elektródák között kialakuló villamos erőter hatására az elektródákhoz vándorolnak, ott töltésüket elvesztik és kiülednek. A folyamatot kémiai reakciók kísérik, a katódnál az ionok redukálódnak (elektront vesznek fel), az anódnál oxidálódnak (elektront adnak le). Az elektródák közötti villamos feszültségnek meg kell haladnia a rendszerben érvényesülő potenciálgátak összegét. Potenciálgát eltérő anyagok érintkezésénél alakul ki a határfelületen, ekkora energiát kell közölni egy elektronnal, hogy az egyik anyagból a másikba átlépjen.

Elektrolízissel lehet vizet bontani H_2 és O_2 előállítására, színesfémvegyületekből fémeket (pl. Al, Cu) kinyerni, különféle kémiai nyersanyagokat (pl. Cl, nátronlúg) gyár-

tani. Alkalmazható az eljárás fémbevonatok készítésére is (galvanoplasztika). Szilárd anyagokban is előidézhető ionvándorlás (elektroforézis), amit főleg gélek és biológiai anyagok elválasztására alkalmaznak.

9.3. Villamos hőfejlesztés

A villamos hőfejlesztésnek többféle lehetősége van. A legegyszerűbb és leggyakrabban alkalmazott eljárás az ellenállásfűtés. Ennek közvetett módjánál az R ellenállású fűtőhuzalban fejlődő

$$P = I^2 R \quad (9.1)$$

joule-veszteséget származtatják át a felmelegítendő közegnek. Az 1300–1700 °C-ra hevített nagy ellenállású fűtőszálakat Ni, Cr, Mn, Mo, Fe, Si, Al, Cu különféle ötvözetből állítják elő. Közvetett ellenállásfűtéssel működnek a villanykályhák és a villamos fűtőtestek, a vízmelegítő bojlerok, a főzőlapok, főzőedények, sütők, a mosógépek vízmelegítése, a különféle háztartási készülékek (vasaló, kávéfőző, kenyérpírtó, mérülőforraló stb.), a forrasztópákák, szerszámok belső fűtése. Folyadékfűtőket védőburkolatba helyezett fűtőszálakkal melegítenek fel. Gázok melegítésére is alkalmazzák, pl. szárítószekrényekben. Ellenállásfűtést használnak számos ipari technológiában is.

A közvetlen ellenállásfűtésnél az áram a felmelegítendő közegen folyik át, annak belsejében, a γ fajlagos vezetőképességű térfogategység teljesítménye

$$p = \gamma E^2 \quad (9.2),$$

amit a vas- és fémiparban fémtermékek hevítésre és olvasztására, porkohászati termékek létrehozására, hegesztésre, a vegyiparban sófürdők melegítésére és olvasztására alkalmaznak. Közvetlen ellenállásfűtéssel vegyületeket (pl. ferroszilícium, kalciumkarbid) is előállítanak.

Villamosan izzított testek infravörös sugárzása is használatos melegítésre. A sugárzás tükrökkel irányítható, és a sugarakat a szilárd anyagok felülete elnyeli, de a levegő nem. Ez alkalmassá teszi térrészek irányított fűtésére, valamint nagy csarnokok alsó tereinek temperálására. Technológiai feladatokra is használják, különösen olyan anyagoknál, melyek a villamos hatásokat közvetlenül nem viselik el, pl. a textil- és papíriparban festett felületek szárítására.

Magas hőmérséklet és nagy energiakoncentráció érhető el villamos ívben, az ív talp-pontjában 4000–5000 °C, tengelyében 6000–7000 °C uralkodik. Negatív feszültség-áram karakterisztikája miatt begyűjtéséhez jóval magasabb feszültség szükséges, mint az ív fenntartásához, amit erre a feladatra tervezett berendezésekkel biztosítanak (hegesztődinamó, hegesztő-transzformátor). Az ív begyűjtása, fenntartása és az elektródok elhasználódása miatt a szükséges elektródtávolság biztosítása megfelelő szabályozást igényel. Hőforrásként használják magát az ívet, ennek legismertebb alkalmazása az ívhegesztés és az ívkemence. Az ívkemence az elektroacél gyártás legfőbb eszköze, a közvetett fűtésnél az anyag felett húzott ív lesugárzása melegít, közvetlen fűtésénél az ív egyik elektródja

az olvasztandó anyag. Anyagok előállítására is használják (pl. ammónia, salétromsav és kalciumkarbid gyártásnál). Folyadékokban alkalmazott közvetlen ívfűtésnél gyakran elektrokémiai folyamatok is kialakulnak. Az íven átáramoltatott gázokat is széleskörűen alkalmazzák, pl. a plazmatechnikában és termikus megmunkálásoknál.

Villamosan szigetelő anyagokban az E térerősség hatására a térfogategységben

$$p = \omega \varepsilon \varepsilon_0 t g \delta E^2 \quad (9.3)$$

dielektromos veszteség alakul ki, ami hővé alakul. A képletben $\omega = 2\pi f$ az f frekvenciához tartozó körfrekvencia, ε a szigetelőanyag vákuumhoz viszonyított relatív dielektromos állandója, $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ As/Vm a légüres tér dielektromos állandója, $t g \delta$ a veszteségi tényező. Mivel ε és $t g \delta$ értéke kicsi, a melegítés a frekvencia növelésével fokozható, a kezelt anyag jellegétől és a feladattól függően a használatos frekvenciák 10 kHz és 1 GHz közötti értékek, többnyire 2–40 MHz használatos. A szükséges térerősséget megfelelően hangolt elektronikus generátorokkal állítják elő, azonban a megvalósítható teljesítmény korlátozott, ami egyben az eljárás alkalmazási lehetőségét is behatárolja. A dielektromos hevítés kitűnő eljárás szigetelő anyagok nem túl magas hőmérsékletű melegítésére. Legfőbb előnye, hogy az anyagot belülről, egyenletesen és gyorsan melegíti fel. Ezt hasznosítják a mikrohullámú sütők. Szárításra még az elektródák között áramló poroknál is számításba jöhet. Alkalmas sütésre, műanyagok termikus szerkezetátalakítására (polimerizáció, polikondenzáció), kolloidkémiai folyamatok előidézésére, gumi hőkezelésére, festékrétegek gyors megkötésének előmozdítására és szárítására.

A H mágneses térerősség a mágneses anyagokban indukált örvényáram és hiszterézis révén

$$p = \omega \mu \mu_0 k H^2 \quad (9.4)$$

veszteséget okoz. A képletben ω a körfrekvencia, μ az anyag vákuumra vonatkoztatott relatív permeabilitása, $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ V/As a légüres tér permeabilitása, k a veszteségi tényező, ami figyelembe veszi a mágnesezési jelleggörbe nemlinearitását és hiszterézisét, valamint a mágneses térrel indukált örvényáramok joule-veszteségét. A mágneses veszteség ferromágneses anyagokban különösen nagy érték, ezekben kis frekvenciákkal is jelentős teljesítmény érhető el. A melegítés fokozható a frekvencia növelésével, az alkalmazott frekvencia többnyire 0,5–10 kHz, de a nagyfrekvenciás edzésnél nagyobb periódusszámot használnak. Az áramot nagyfrekvenciás generátorral, frekvenciasokszorozó transzformátorral vagy hangolt elektronikus áramkörrel állítják elő. A mágnesezési veszteséggel nagy teljesítmény és még a fémek olvadáspontját is meghaladó magas hőmérséklet érhető el. A lehetőséget a vas- és fémiparban olvasztásra, kovácsdarabok előmelegítésére, szerkezeti finomításra (edzés, lágyítás), forrasztásra, csóvágásra és egyéb műveleteknél alkalmazzák. A kohászat kemencéinek jelentős hányada indukciós hevítéssel működik. Mivel a frekvencia növelésével erősödik a szkinhatás, az áram mind nagyobb arányban szorul ki a vezetők felületére, ami előnyös a felületi edzésnél.

A hőfejlődés nem mindig kívánatos, a háztartásokban bekövetkezett tüzek jelentős részét zárlatos villamos készülékek túlmelegedése, vagy az átütéskor kialakuló szikra okozza.

9.4. Mechanikai munkavégzés

A villamossággal többféle módon lehet mechanikai munka végzésére hasznosítható erőhatásokat ébreszteni. A lehetőségek közül a legnagyobb jelentősége a villamos motoroknak van, azok működése az indukción alapul, ami szerint egy mágneses tér és egy áram átjárta vezető közötti kölcsönhatás F erőt ébreszt. Ennek értéke az l hosszúságú vezető I áramának irányára merőleges B mágneses indukció esetén

$$F = BIl \quad (9.5),$$

és iránya mind I -re, mind B -re merőleges. Ha a rendszer valamelyik eleme az erő irányában elmozdul, a rendszer mechanikai munkát végez, v sebességű mozgásnál

$$P = BIlv \quad (9.6)$$

teljesítménnyel.

A villamos hajtás a műszaki fejlődés nagyon fontos emelőjévé vált. A villamos motor megjelenése előtt az üzemekre a csoportos hajtás volt jellemző, az üzemek alapvető erőgépének – rendszerint gőzgépnek – a teljesítményét bonyolult közlőművek osztották el a hajtott gépek között. A villamos motor lehetővé tette e rugalmatlan és bonyolult rendszernek a felváltását egyedi hajtásokkal, ami a szalagszerű termelés kialakulásának is feltétele volt. A munkagéphez illeszkedő, könnyen és finoman szabályozható hajtás elengedhetetlen volt a tömeggyártás kialakulásához, majd a termelési folyamatok automatizálásához. Az a lehetőség, hogy a hajtómotort magába a munkagépbe lehet beépíteni, és a különféle funkciójú hajtásokat egymástól függetleníteni lehet, átfőrmálta magukat a munkagépeket is, hihetetlenül megnövelve a gépkonstruktőrök lehetőségeit. Az egyedi hajtás komoly energetikai előnyökkel is járt, a motor csak a tényleges szükségesség idején üzemel, elesik a központi erőgép rossz hatásfokú részterheléses üzeme, valamint a közlőművek vesztesége.

A villamos motorok választékának bővülése, a szabályozási lehetőségek finomodása, és a tömeggyártás révén elérhető alacsony ár lehetővé tette, hogy a villamos hajtás a technika szinte minden területébe behatoljon. Kevés olyan műszaki berendezés van, melynek egy vagy több villamos motor ne lenne magától értetődő alkateleme. A helyhez kötött hajtásoknál szinte kizárólagos szerepük van, és a hálózathoz, vagy áramforrásokhoz könnyen csatlakoztatható mobil berendezéseket is többnyire villamos motorokkal működtetik. Mozgatható berendezésekben (pl. gépkocsikban, elektronikus eszközökben) gyakran kémiai áramforrás táplálja a motorokat, a közlekedésben jelentős a villamos hálózathoz kötött járművek szerepe, és a gépkocsigyárak gőzerővel fejlesztik a villamos autókat. Kis villamos motorok a mindennapi életünkben használt legtöbb eszközben is megtalálhatók, a konyhai és háztartási gépekben, a számítógépekben, az audiovizuális eszközökben, a gépkocsik segédberendezéseiben stb.

A villamos motorok teljesítményválasztéka rendkívül széles, a W nagyságrendű szervomotoroktól a nagy erőművek tápszivattyúit és a kohászati hengerek hajtó 10–15 MW-os motorokig. A névleges terhelésnél a kisebb motorok hatásfoka 80–85%, a nagyobbaké 85–95%, és ez széles tartományban alig függ a terheléstől.

A mágneses erőteret rendszerint elektromágneses gerjesztéssel létesítik, kis teljesítményű motoroknál állandó mágneseket is alkalmaznak, ami lényegesen egyszerűsíti a motor szerkezetét. A mágneses erőter és a vezetőket összefogó tekercsek tengelyszimmetrikus kialakításával a fellépő erők forgó mozgást hoznak létre, a legtöbb motor működésének ez az alapja. A teljesítményt szabályozni lehet akár a mágneses erőter mértékével, illetve az azt létrehozó gerjesztőáram nagyságával, akár az üzemi áram értékével. A villamos motorok tulajdonságai lényegesen eltérőek, attól függően, hogy egyenárammal vagy váltakozó árammal működnek.

Az egyenáramú motorokban ferromágneses anyagból készített állórészszel alakítják ki a mágneses teret. Az állórészszelből a forgórész irányába pólusok nyúlnak ki, ezeken helyezkednek el a mágneses teret gerjesztő tekercsek. E tekercsekben folyó gerjesztőáram nagyságával lehet a mágneses erőter intenzitását szabályozni. Az üzemi áram a forgórészen elhelyezett armatúratekercsekben folyik. Az egyenáramú motorok fordulatszámát könnyen és rugalmasan lehet szabályozni az áramok változtatásával.

Az egyenáramú motorok viselkedését nagymértékben megszabja az armatúratekercsek és a gerjesztőtekercsek kapcsolata. A soros motoroknál a gerjesztőtekercseket sorba kapcsolják az armatúratekercsekkel, a párhuzamos (sönt) motoroknál pedig párhuzamosan. Egyes gerjesztésű motorokat is alkalmaznak, ezeknél a gerjesztőtekercsek egy részét párhuzamosan kötik, a többi sorba. A söntmotor fordulatszám-tartó, fordulatszámát a terhelő nyomaték növekedése alig csökkenti. Főleg állandó fordulatszámot igénylő hajtásra alkalmas, vagy ahol egyszerű fordulatszám szabályozásra van szükség (felvonók, szállítóberendezések, szerszámgépek, szivattyúk, kompresszorok, textil-, papír- és nyomdaipari gépek, hengerművek). A soros motor inkább teljesítménytartó, kis sebességnél nagy az indítónyomaték, fordulatszáma a terheléstől függ. Jellemző felhasználási területe a vontatás és az emelőberendezések, a villamos autókat is soros motorokkal hajtják. A egyes gerjesztés a két típus kombinációját valósítja meg, használják hengersorok, hegyi vasutak és felvonók, sajtológépek hajtására. Energetikai előnye, hogy fékezésnél a soros motorhoz hasonlóan visszatáplálásra is alkalmas, ami söntmotoroknál nem valósítható meg. Visszatáplálásnál a motor generátorként működik, a mechanikai munkát villamos energiává alakítja.

A váltakozó áram háttérbe szorította az egyenáramú motorokat, az 1950-es években úgy tűnt, hogy azokat csak néhány területen – főleg gyakran változó teljesítményű és a fordulatszám tág határok közötti változtatását igénylő hajtásoknál – alkalmazzák. Gyökeres változást eredményezett az erősáramú elektronika fejlődése, ami lehetővé tette a váltakozó áramú elosztóhálózatokról táplált egyenáramú motorok használatát. Félvezetőkből kialakított egyenirányító és vezérlő elemekkel rendkívül sokoldalú, rugalmas, veszteségmentesen szabályozható, a technológiai igényekhez simuló hajtásokat lehet kialakítani, ami az egyenáramú motorok alkalmazásának újabb fellendüléséhez vezetett. Az elektronikusan vezérelt hajtásoknak egyetlen hátránya, hogy felharmonikusokat termelnek, mivel az egyenirányítók jelleggörbéje nem lineáris, ami a villamos hálózatok üzemvitelében okoz növekvő nehézséget.

Az alkalmazott motorok döntő többsége váltakozó árammal működik, táplálásuk és működésük szerint háromfázisú és egyfázisú, illetve aszinkron és szinkron motorokat

különböztetnek meg. Az egyes típusokon belül még további felosztás is szükséges a tekerceslésben az áramutak kialakítása szerint, ami lényegesen befolyásolja a motorok üzemi tulajdonságait.

A legegyszerűbb és a legolcsóbb a háromfázisú aszinkron motor (indukciós motor). E legnagyobb darabszámban forgalmazott motorokat sokféle teljesítményre gyártják néhány W és sok MW között. Az iparban a munkagépek nagy többségét ilyen motorokkal hajtják, ettől eltérő szerkezeteket csak különleges feladatokra, vagy finom fordulatszám-szabályozás érdekében alkalmaznak. A háromfázisú aszinkron motorok szerkezete egyszerű, üzembiztonságuk nagy és könnyen kezelhetők. Állórészükben háromfázisú villamos tekerceslés forgó mágneses erőteret hoz létre, ami a forgórész vezetőiben indukció révén többfázisú váltakozó áramot kelt. Ezen áramok kölcsönhatása a mágneses erőterrel forgatónyomatékot ébreszt. A forgórész vezetői legtöbbször rövidekre vannak zárva (rövidre zárt motor). Az indítási viszonyok javítására és a fordulatszám szabályozására a forgórész vezetőit néha csúszógyűrűkön keresztül kivezetik, és változtatható ellenálláson keresztül zárják az áramköröket (csúszógyűrűs motor). Különleges célokra (pl. centrifugákhoz, nagy fordulatszámú ventilátorokhoz) alkalmazott nagyobb frekvenciával működő nagy fordulatszámú motorok forgórészét tömör vasból készítik, amiben az indukció örvényáramokat ébreszt. Az aszinkronmotor fordulatszám-tartó, de csak a tápláló hálózat periódusszámával meghatározott szinkronfordulatszám-tól eltérő fordulatszámon tud nyomatékot kifejteni, a két fordulatszám relatív különbsége (a szlip) 3–6%.

Az aszinkronmotor indítónyomatéka nagy, de a motor bekapcsolása nagy áramlökéssel jár, amit különféle módokon lehet mérsékelni. A villamos hálózat szempontjából kedvezőtlen, hogy az aszinkronmotorok meddő teljesítményt vesznek fel, a névleges teljesítménynél a $\cos \varphi$ 0,85–0,9, de kis teljesítménynél lényegesen kisebb.

A félvezető-technika fejlődése a műszaki múzeumokba száműzte a nagy teljesítményű hajtásoknál a fordulatszám szabályozására és fázisjavításra használt kaszkádkapcsolásokat. Kihalóban vannak a váltakozó áramú kommutátoros motorok is, melyeknél a részekre bontott forgórész tekerceslés végeit a tengelyre erősített kommutátor-szegmensekhez vezették ki, amiket szénkefék kapcsolnak az áramforráshoz. Az állórész és a forgórész különféle módon történő összekapcsolásával az egyenáramú gépekhez hasonló jellegű görbéket lehet kialakítani. A háromfázisú kommutátoros motorokat rugalmas és veszteségmentes szabályozást igénylő hajtásokhoz használták, az egyfázisú kommutátoros motorokat egyfázisú fogyasztók kis teljesítményű gépeinek működtetésére. A kommutáció a bizonytalan érintkezés és ívképződés miatt e konstrukciók gyenge pontja, a zavarok mérsékelhetők a periódusszám csökkentésével. Ez vezetett egyes országokban a vasutak hajtásánál alkalmazott $16 \frac{2}{3}$ Hz-es frekvencia alkalmazására.

A csak egy fázisról táplálható fogyasztók (pl. háztartási gépek, kézi szerszámok) részére fejlesztették ki az egyfázisú indukciós motorokat. Felépítésük és tulajdonságaik hasonlítanak az aszinkronmotorhoz, de jóval kedvezőtlenebb jellemzőkkel. Az indításhoz a motor mechanikus úton történő berántása helyett ma már csak a mágneses erőter és az áram közötti fázishelyzetet eltoló áramkör alkalmazása szokásos.

A szinkronmotorok tulajdonképp motorüzemben működő szinkrongenerátorok. A mágneses erőteret a forgórész tekerceszeibe csúszógyűrűkön bevezetett egyenáram

hozza létre, e forgó mágneses tér és az állórész tekercseiben folyó váltakozó áram kölcsönhatása hozza létre a forgató nyomatékot. A forgórész tekercseinek megosztásával és azokban az áramok irányának felcserélésével ellentétes polaritású mágneses pólusok alakíthatók ki, a fordulatszám a póluspárok számától függő, mereven kötött érték.

Az elektronika fejlődése a villamos hajtások teljesen új útjait nyitotta meg. Tirisztoros kapcsolásokkal szinte tetszőleges módon és nagyon kis veszteséggel nemcsak az áramok paramétereit lehet változtatni, hanem módosítható a frekvencia is, akár szaggatott áramok is előállíthatók. Ilyen áramokkal gerjesztve az aszinkronmotorok viselkedése kedvezően módosítható, pl. a frekvencia változtatásával részterhelésen is nagyon jó hatásfok érhető el. Mivel az aszinkronmotor fordulatszáma arányos a frekvenciával, a frekvencia módosításával könnyű a fordulatszám szabályozása is.

Az indukció révén nemcsak forgó mozgás valósítható meg, hanem haladó mozgás is. Síkban kiterített álló- és forgórészszel alakítható ki a lineáris motor, indukciós motornál az állórész tömör vezető is lehet, amiben örvényáram ébred. Lineáris motorokat a gyakorlatban mechanizmusok egyirányú mozgatására, valamint szállítóberendezésekben alkalmaznak. Ilyen motor használható síneken mozgó jármű hajtására is (a sín a kiterített állórész, az azon legördülő forgórész hajtja a jármű kerekét) – elsősorban mágnesesen lebegtetett vasútnál.

Villamos energiával nemcsak motorok segítségével lehet mechanikai munkát végezni, hanem erőterekben kialakuló más erőhatásokkal is, amit sokféle technológiában alkalmaznak. A q villamos töltéssel rendelkező részecskére az E villamos erőtér

$$F = qE \quad (9.7)$$

erővel hat, a B indukciójú mágneses erőtérben v sebességgel haladó q töltéshordozóra ható erőt pedig a

$$F = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (9.8)$$

vektorszorzat határozza meg. Villamos erőtérben mozgó töltéshordozókkal működnek az elektrosztatikus eljárások (festés, fémszórás, porleválasztás, testek bevonása különféle rétegekkel), sokféle elektronikus eszköz (pl. elektroncső, tranzisztor, katódsugárcső, régebbi monitorok és tv-képernyők).

Az elektrokinetikus folyamatok során villamos erőtér hatására kolloid részecskék vándorolnak folyadékokban. Főleg a katód felé irányulót (kataforézis) hasznosítják pl. bevonatok készítésére (oxidkatódok kialakítására), és újabban gyógyszerek testbe juttatására is. Ha a szilárd részecskék mozgása akadályozva van, az ellentétesen töltött folyadék mozdul el (elektroforézis), amit épületrészek, tőzeg, és más anyagok szárítására, a vegyiparban folyadékok kivonására alkalmaznak. Villamos töltéssel rendelkező folyadékokat – főleg olvadt fémeket – elektromágneses erőtérrel továbbítani is lehet, így működnek az elektromágneses szivattyúk.

A mágneses erőtér alkalmazásának hagyományos területét képviselik az elektromágneses emelőberendezések vas és acél tárgyak daruzására. Elektromágnesek más mozgatási feladatokra is szolgálnak (kapcsolók, relék, alkatrészek továbbítása).

Mechanikai energiát testesítenek meg a hanghullámok is. Technikai alkalmazásuk kezdetben csak akusztikai berendezésekre (telefon, hangszóró) korlátozódott, ez később kibővült az ultrahangok alkalmazására is kémiai reakciók előidézésére, anyagok keverésére és szétválasztására, gyógyászati célokra és más feladatokra. Ultrahangok piezoelektromos vagy magnetostrikciós módszerekkel gerjeszthetők. Piezoelektromos anyagokban a villamos erőtér méretváltozásokat idéz elő, a rezgések amplitúdója az önfrekvenciánál nagy érték. Egy 100 cm^3 -es kristály 40 kHz táján 1 kW mechanikai teljesítményt szolgáltat. Még nagyobb teljesítmény érhető el magnetostrikció útján, mivel a ferromágneses anyagok szintén változtatják a méretüket elektromágneses térben. Kis teljesítményű feladatokra hasznosítható az eltérő permittivitású anyagok határfelületén kialakuló erőtér és deformáció (elektrostrikció) is.

Űrhajók pályakorrekciós hajtóműveiben előfordul plazmahajtóművek alkalmazása, erre a feladatra a plazmát elektromágneses erőtérben gyorsítják fel. Egyesek nagy jövőt jósolnak a villamos erőtérben felgyorsított töltéshordozókkal működő ionrakétáknak űrobjektumok hajtására. Elvileg a sugárnyomás is hasznosítható kis mozgások előidézésére. A fúziós kísérleteknél fény-, illetve lézer-fotonnyalábokat is használnak a plazma összetartására.

Mágneses tér vezérli az elemi részecskék mozgását a részecskegyorsítókban, és a fúziós kísérletek plazmájában. Elemi részecskék felgyorsítását részecskegyorsítók villamos és mágneses terével már nemcsak fizikai laboratóriumok kísérleteinél használják, fejlesztik a részecskegyorsítóval vezérelt atomreaktort. Ebben a neutronfluxus a reaktorban nem elég a láncreakció beindításához, a kritikalitás eléréséhez az a többlet kell, amit a részecskegyorsító lövell a reakcióterbe. Ha ez megszűnik, a reaktor leáll.

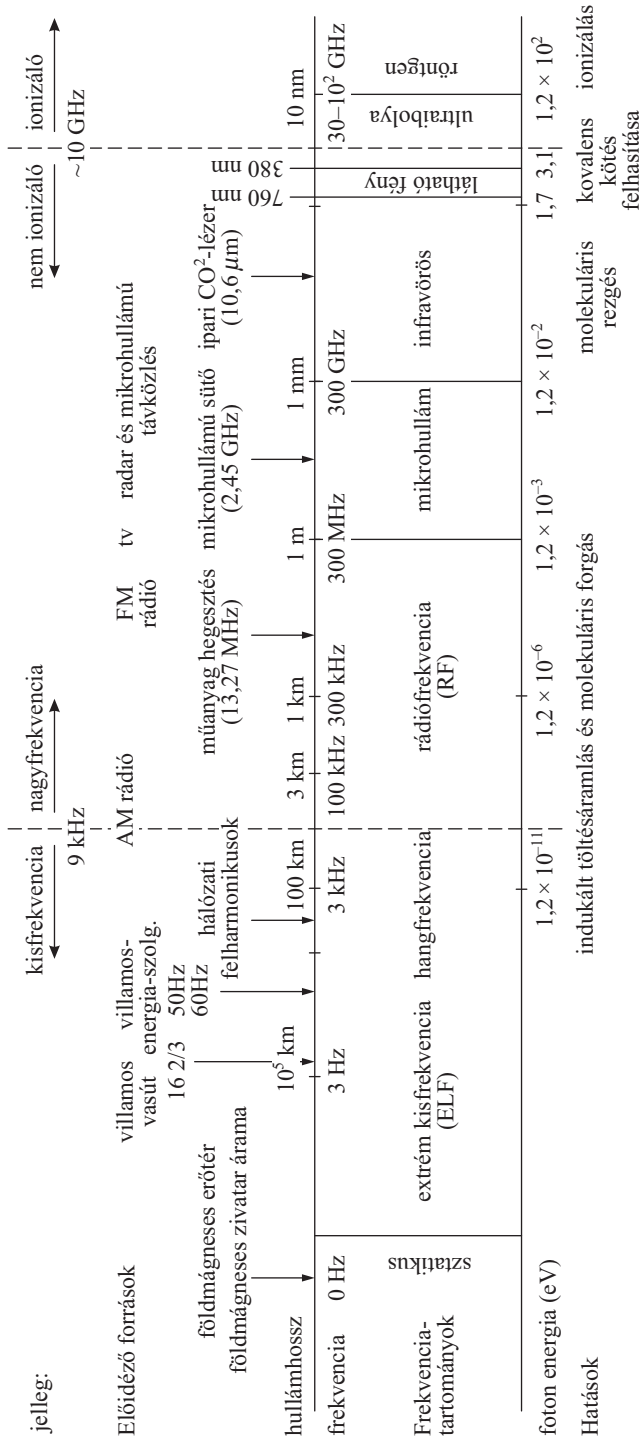
9.5. Elektromágneses hullámok

Az elektromágneses hullámok a fizikai jelenségek széles spektrumát fogják át (9.2. ábra). A frekvenciának zérustól mintegy 3 PHz -ig terjedő tartományába tartoznak a nem ionizáló sugárzások, melyeket többnyire villamos áramkörü elemekkel lehet gerjeszteni. Az ennél nagyobb frekvenciájú ionizáló sugárzások leginkább elemi részecskék energiaállapotának változásához kapcsolódnak.

Elektromágneses hullámokat sokféle technológiában alkalmaznak anyagok vizsgálata és megmunkálására, az orvosi gyakorlatban diagnosztizálásra és terápiára, legfontosabb azonban szerepük a világításban és az információtechnikában.

9.5.1. Világítás

A mesterséges világítás biztosítása majdnem teljes körűen a villamosenergia-ellátásra hárul. A termikus sugárzást hasznosító fényforrásokat is villamos áram táplálja, a hő forrása az áram joule-vesztesége. Villamos áram táplálja a szelektív sugárzással működő fényforrásokat is. Ezek az atomok elektronburkában lejátszódó folyamatokra alapul-



9.2. ábra. Elektromágneses hullámok

nak. A gerjesztési, vagy ionizálási energia közlése megváltoztatja az atomok állapotát, ilyenkor az elektronok új – magasabb energiaszintű – pályára lépnek. Az energiaközlés történhet hő bevezetésével, ütközéssel, fénnel stb. Amikor a gerjesztett, vagy ionizált állapotú atomban az elektronok visszatérnek az eredeti egyensúlyi állapotukba, a ΔW energiakülönbséget foton alakjában lövellik ki, aminek f frekvenciája a $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js Planck-állandó figyelembevételével

$$f = \frac{\Delta W}{h} \quad (9.9).$$

Az atomokban sokféle átmeneti energiaállapot lehetséges. A fotonok frekvencia-eloszlása anyagfüggő, és a fotonok spektrumában látható fény is előfordulhat.

Az első gázkisüléssel fényforrásban, a villamos ívlámpában még keveredett a talppont hőmérsékleti sugárzása a levegőben húzott ívcsatorna szelektív sugárzásával. A nitrogén és oxigén spektrumvonalai miatt az ívlámpa kellemetlen, hideg, kékes fényt szolgáltat. Az ív nagy teljesítménye nagy fénysűrűséget eredményez, emiatt erősen kápráztat. Kedvezőtlen tulajdonságai miatt az ívlámpát ma már csak nagyon nagy fénysűrűséget igénylő különleges feladatok ellátására használják.

A fénycsövekben a gázkisüléssel kibocsátott sugárzásnak csak néhány százaléka esik a látható fény tartományába, nagy része ibolyántúli. A burkoló üveghengerre felvitt fényporokat az ibolyántúli sugárzás gerjeszti, majd a visszatérés az alapállapotba látható fény fotonjának kilövellésével történik, így a fény frekvenciáját mintegy transzformálják. A fényporok (luminoporok) szervesetlen kristályos szilárd anyagok, bárium, cink, kalcium, stroncium karbonátjai, szulfidjai és szilikátjai kevés fémszennyezéssel (réz, mangán, ezüst stb.). Az anyagok megválasztásával befolyásolható a kibocsátott fény színe. A fénycsövek energetikai hatásfoka ~20%, a fényhasznosítás a teljesítménytől és színhőmérséklettől függően 30–80 lm/W. Élettartamuk 6000–7000 óra, de 4000 óra után fényerejük erősen csökken. Ugyancsak csökkenti az élettartamot a bekapcsolás gyakorisága is (átlagosan kapcsolásonként 1 órával). A higany helyett a látható fényt jobban megközelítő rezonanciasugárzású fémgözökkel (halogén vagy Na-gőz töltéssel) 100 lm/W is elérhető, amit a nyomás növelésével 150 lm/W-ig lehet fokozni. Ugyancsak hatásos a fénycső üzemi hőfokának korlátozása a környezeti hőmérsékletre, hogy ne nőjön a fényteljesítményt csökkentő belső nyomás. A fénycsöveket eredetileg az erős megvilágítást igénylő munkahelyekre (irodák, üzletek) ajánlották, de a hagyományos izzók helyére is behelyezhető kompakt fénycsövek térhódítása a lakásokban is megkezdődött. Nagy fényhasznosításuk, és magas hatásfokuk energiamegtakarításra ad módot. Bár a kompakt fénycső jóval drágább, mint az izzólámpa, a jó hatásfok révén az üzemeltetési költségek különbsége gyorsan megtéríti a létesítési többletköltséget. Egy időben a közvilágításban is alkalmazták fénycsöveket, de erre a célra használatuk nem optimális.

A legnagyobb fényteljesítményt – több mint 200 lm/W-ot – a kisnyomású nátriumlámpákkal lehet elérni. Monokromatikus sárga fényük jó alakfelismerést, de rossz színvisszaadást eredményez, alacsony fénysűrűségük nem kápráztat. Elsődleges alkalmazási körük kritikus forgalmi helyek, valamint jó alakfelismerést igénylő szabadtéri vagy nagy csarnokokban levő munkahelyek megvilágítása.

A nagynyomású fémgőzlámpák azonos fénytéljesítményhez a hagyományos fényforrások energiafelhasználásának harmadát-hatodát igénylik. Legrégebben kifejlesztett típusuk a higanygőzlámpa, melyben a gázkisülés 8–10 bar nyomású higanygőzben alakul ki. A begyújtás előtt a hideg lámpában csak kPa nagyságrendű kis nyomás uralkodik, ilyenkor a higanygőz lecsapódik, a lámpa terét argongáz tölti ki. Ebben bekapcsoláskor segédkisülés jön létre, ez párologtatja el a higanyt, ami a nagy nyomás kialakulásával jár. Fényének színe a higany szelektív emissziójának megfelelően erősen kékes, a színfelismerést fényporokkal lehet javítani. A higanygőzlámpák fényhasznosítása 45–75 lm/W, de mind a fénytechnikai hatásfokot, mind a színképet javítani lehet különféle adalékanyagokkal. Mindenekelőtt fém-halogenidek bevitele szokásos (indium, nátrium, tallium, jódvegyületekben), ami a spektrumvonalak számát jelentősen növeli, még jobb hatást lehet elérni ritkaföldfémekkel (pl. diszpróziummal). E tökéletesített fémhalogéngőzlámpákat már jelenleg is ~100 lm/W jellemzi, de 200 lm/W is reálisan elérhetőnek tűnik. A nagynyomású higanygőzlámpákat főleg közvilágításra és nagy csarnokok, szabadtéri munkahelyek megvilágítására alkalmazták, de az utóbbi időben más fényforrások erősen háttérbe szorították. Nagy teljesítményre a nagynyomású nátriumgőzlámpákkal lehet monokromatikus sárga megvilágítást biztosítani. Mivel a kisülés 1000–1200 °C-os Na-gőzben alakul ki, kvarc anyagú kisülőcsövet igényel, ami erősen drágítja a lámpát. Az elérhető fénytéljesítmény 80–120 lm/W, főleg a közvilágításban és nagyméretű ipari csarnokok, szabadtéri munkahelyek megvilágítására előnyös.

Az elektro-lumineszcencia legújabb eredményei a félvezető technikára alapuló világító diódák (LED¹²³). Működésük arra alapul, hogy a villamos erőtér hatására az elektronoknak és lyukaknak a *p-n* átmeneten keresztül történő rekombinációja során felszabaduló energia foton formájában távozik. A félvezetők anyagának (Ga, As, Zn, P, N, Al, In különféle kombinációi) megválasztásával különféle színek kelthetők, fényporok adagolásával pedig a fehér fényt megközelítő spektrum alakítható ki. A rohamos technikai fejlődés nyomán kitűnő – 100 lm/W-t is meghaladó – fényhasznosítást sikerült elérni, az egységteljesítmény és az élettartam növelését a szerves anyagokat tartalmazó OLED¹²⁴-ektől remélik.

A legtöbb helyen csak a nap néhány órájában van szükség mesterséges világításra. Ez a viszonylag rövid üzemidő magyarázza, hogy a világítás energiaigénye szerény, a teljes energiaszükségletnek csupán néhány százaléka. E kis számból azonban elhamarkodott következtetés lenne, hogy az energetikának e területen nincs sok keresnivalója, mert egyrészt a világítás energetikai veszteségei rendkívül nagyok, másrészt az egyenlőtlen terhelés erősen érinti a villamosenergia-rendszer teljesítménygazdálkodását. A villanyvilágítás dominanciájából következik, hogy a világításra fordított energia a villamosenergia-fogyasztásnak viszont már számottevő hányada (Magyarországon mintegy 15%-a). Hibás megközelítés a megvilágítás csökkentésével elérni energiatakarékosságot. Ez nemcsak a munka minőségét csökkenti, hanem látásromlást is okoz, főleg gyerekeknél.

¹²³ Light-emitting diode.

¹²⁴ Organic light-emitting diode.

9.5.2. Információtechnika

A 9.2. ábrán látható frekvenciaspektrum 9 kHz-től néhány THz-ig terjedő szakasza az információátvitel területe. A térbe kisugárzott elektromágneses hullámok kitűnő adathordozók, amplitúdójuk, frekvenciájuk vagy hullámalakjuk módosításával, a hullámra ültetett impulzusokkal.

Az információk továbbításának módja látványos utat futott be. Morze még kézzel billentyűzgette be az egyenáramú jelek hosszával kódolt betűkből álló táviratait. De ezzel nem lehetett lépést tartani sem az információk mennyiségével, sem az áthidalandó távolsággal. Át kellett térni a nagyfrekvenciás átvitelre, a vezetékes telefónia még kHz-es hullámokkal dolgozott, a rádiófrekvencián már nemcsak beszédet, de zenét is közvetíteni lehetett. A még nagyobb frekvencián képeket, sőt filmeket is tudunk továbbítani, a mikrohullám lehetőségei pedig szinte korlátlanok. A műszaki lehetőség határát ma a vezeték nélküli továbbításban 100 GHz-ig terjedő mikrohullámok jelölik ki, a vezetékes átvitelben pedig az üvegszál kábelekben közel fénysebességgel terjedő lézerpulzusok. A határok azonban tovább bővülnek, az űrbe juttatott szondák információkat közölnek égitestek anyagi összetételéről és az ott lejátszódó folyamatokról, a genfi kutatóközpont (CERN¹²⁵) az elemi részecskék alkotóelemeinek tulajdonságairól közöl ismereteket, az új orvosi diagnosztikai módszerek (CT,¹²⁶ MR,¹²⁷ PET¹²⁸) képet adnak szerveink állapotáról és viselkedéséről, a katonák pedig irányított ellenrakétáikkal a levegőben tudják megsemmisíteni az ellenség által kilötteket.

Reménytelen vállalkozás lenne áttekinteni az információk szerepét társadalmunkban. Eszközei nélkül a vállalatok és intézmények működésképtelenek lennének, és személyes életünkben is nehezen boldogulnánk. A lehetőségek szinte napról napra bővülnek, mobiltelefonunkkal már nemcsak fényképezni lehet, hanem internetezni is, térfelügyelő rendszert nemcsak a közterületekre (vagy lakásunkba) lehet telepíteni, hanem más égitestre is, az internet segítségével otthonosan mozoghatunk Földünk bármely településén és megnézhetjük bármely múzeum kiállítását.

Az információkat hordozó jeleknek is van egy nagyon csekély energiataralma (a sok jel összesített energiája már nem kevés), de az energetikát nem ez érinti, hanem az információkat érzékelő, gyűjtő, feldolgozó, továbbító és hasznosító készülékek és berendezések működtetése. Az azonos felületen elhelyezhető mikroelektronikai elemek száma átlagosan másfél évente duplázódik, a méretcsökkentés pedig együtt jár a készülékek működtetéséhez szükséges energia csökkentésével. A forgalmazott készülékek száma azonban sokkal gyorsabban nő, mint ahogy a technika fejlődése a fajlagos energiafelhasználást csökkenti. Ehhez még hozzájárul az igények fokozódása a szolgáltatások mennyisége és minősége iránt. Az eszközöket szinte kizárólag villamos energiával táp-

¹²⁵ Centre Européen pour la Recherche Nucléaire.

¹²⁶ Számítógépes tomográf.

¹²⁷ Neutron-magneto-rezonanciás készülék.

¹²⁸ Pozitronemissziós tomográf.

lálják, a helyhez kötötteket a hálózatról, a hordozhatókat részben mobil áramforrásokról. Ez az energiafelhasználásnak gyorsan bővülő területe, ami a világ energia felhasználásának már néhány százalékát teszi ki.

9.10. Élettani hatások

Galvani híres békacomb kísérlete közel 250 éve világított rá a villamosság élettani hatására. Azóta is zajlanak a viták a hatások mibenlétéről és veszélyességéről. Villamos áramütés akkor következik be, ha az emberi test a villamos áram útjába kerül, megérintve az áramkör két vezetékét, vagy a földön állva egy feszültség alatt álló pont érintése következtében. Az áramütés súlyosságát befolyásolja az áthidalt feszültség nagysága, az áramerősség, az áramnem, a frekvencia, a behatás időtartama, az áram útja és az emberi test ellenállása. Szubjektív tényezők is szerepet játszanak, pl. az egyén egészségi állapota, vagy reakciója a sokkhatásra.

Az emberi szervezet kevésbé érzékeny egyenárammal, mint a váltakozó árammal szemben. Az egyenáram főleg hő- és vegyi hatást okoz, befolyásolja az ionos vezetési folyamatokat, beleértve a vese működését is. A váltakozó áram az idegműködés zavarát is előidézi, és mindkét áramnem égési sérüléseket is okoz. Az emberi testen átfolyó áram 0,5–1 mA táján éri el az érzetküszöböt, e felett remegés lép fel, 20 mA körül alakulnak ki izomgörcsök, pl. a vezetőt markoló kézben, majd aritmikus szív működés kezdődik, 80–100 mA-nél kamrafibrilláció lép fel, e felett bekövetkezik a klinikai halál (megszűnik a vérkeringés és a légzés). Ennek az állapotnak néhány perces fennállása vezet a biológiai (agy) halálhoz. Bár az érintésvédelemnek kiforrott eszközei és szabályai vannak, évente mégis kereken 500 ilyen baleset fordul elő Magyarországon, és ezeknek majdnem 20%-a halálos.

Nem ennyire közvetlen a hatása az erőátviteli frekvenciájú elektromágneses erőtereknek. A feltételezések szerint főleg olyan szerveket érintenek, melyek működése villamos jelekkel kapcsolatos, így az idegrendszer, valamint a szív működést és a vérkeringést. Nem azonnali következményeket tételeznek fel, hanem különféle rákokat és más krónikus betegségeket. Ezek hosszú lappangási ideje miatt az egészségügyi vizsgálatok nehezen illeszthetők a gyors technikai változásokhoz. Főleg az ultranagy feszültségek megjelenése váltott ki vitákat a szabadvezetékek és villamos alállomások erőterének hatásáról. Idővel kitűnt, hogy a szokásos méretek és távolságok mellett a villamos erőter veszélytelen, viszont a mágneses erőter szerepe nem ennyire egyértelmű, ennek tisztázása még további vizsgálatokat igényel, ami az üzemi személyzetet érinti.

Viszont a lakosságot is érinti, milyen hatása van a körülöttünk található sokféle villamos berendezésnek. Ezek mindegyikének, sőt a vezetékeknek is van elektromágneses tere, aminek a mértéke közvetlen közelükben nyugtalanítóan magas lehet. Az ipari frekvenciájú villamos erőteret ~ 50 V/m felett tartják aggályosnak, a mágneses erőterre nem alakult még ki küszöbérték. Szerencsére a térerősség a távolsággal gyorsan csökken, így otthonunkban nem kell veszélyes hatásoktól tartani. Persze ez nem jelenti, hogy célszerű egész napi munkánkat öltünkben tartott laptoppal végezni.

A nagyfrekvenciás terek a testszövetekben dielektromos veszteséget okoznak, a fejlődő hő befolyásolhatja a sejtek működését. Életterünk tele van a kommunikációs és szórakoztató elektromágneses sugárzások tömkelegével, újabb szóhasználattal elektromágneses szmogban élünk. Ezek eredő teljesítménysűrűsége azonban nagyon forgalmas térségekben sem halad meg 50 mW/m^2 -t, ami bizonyosan nem okoz nagy veszteséget. Kivétel ez alól a mobiltelefon, melynek tartós használata okozhat túlzott melegedést az agyban, ami – egyes szakvélemények szerint – okozhat káros elváltozást, esetleg agydaganatot is. A mikrohullámok területén veszélyforrás a mikrohullámú sütő is, aminek megfelelő árnyékolás az ellenszere.

10. Energiaátalakítás elektromágneses sugárzásból

Földünket kívülről az elektromágneses sugárzásoknak majdnem teljes spektruma éri a rádióhullámoktól a részecskesugárzásokig. Ezek között legnagyobb energiasűrűsége és ennek megfelelően legnagyobb jelentősége a napsugárzásnak van. Ez tartja fenn a földi életet, ettől származik energiaforrásaink legnagyobb része, ez gerjeszti a légkörben és a vizekben kialakuló mozgásokat és áramlásokat, a napsugárzás működteti az időjárást és sok más folyamatot. A napsugárzás mellett más természetes eredetű (kozmikus sugárzás, földmágnesség, zivatarok) és antropogén (műsorszórás, távközlés) sugárzások elhanyagolhatók.

Az energiaátalakítási lehetőségeket a napenergiával foglalkozó korábbi fejezetek tárgyalták.

11. Nukleáris energia átalakítása

Nincs még egy ipari tevékenység, amelyik olyan mélyen be lenne ágyazódva a tudományba, mint az atomenergetika, és nincs még egy ipari tevékenység, amelyiknek a hi-telességét a társadalom jobban kétségbe vonná.

11.1. Az atommag mint energiaforrás

A kémiai energiaciklusok az atomok elektronhéjában zajló változásokkal írhatók le, a termikus viszonyok az atomok hőmozgásától függenek, a nukleáris energia az atomok magját alkotó nukleonok (protonok, neutronok) viselkedésétől függ. A Z rendszámú, M tömegszámú elem atomjának magjában Z számú proton és $N = M - Z$ számú neutron található. Az elemek nagy részénél azonos számú protonhoz különböző számú neutron kapcsolódhat, így M -nek több értéke lehetséges, a Z rendszámú elem izotópjainak megfelelően. Jelenleg az elemeknek kerekén 1400 izotópját ismerjük, ezek közül 280 stabil, a többi instabil – radioizotóp – ami ionizáló sugárzás kibocsátása közben bomlik. A Föld őssanyagából megmaradt néhány elem (pl. ^{40}K , ^{87}Rb), valamint az urán, tórium és plutónium bizonyos izotópjából kiinduló bomlási sorok atomjai elemi részecskék kilövellése közben átalakulnak. Az így létrejövő „leányelemek” többsége szintén radioaktív, a bomlások sora addig tart, amíg stabil atom nem keletkezik, a bomlási sorok esetében ólom, vagy bizmut.

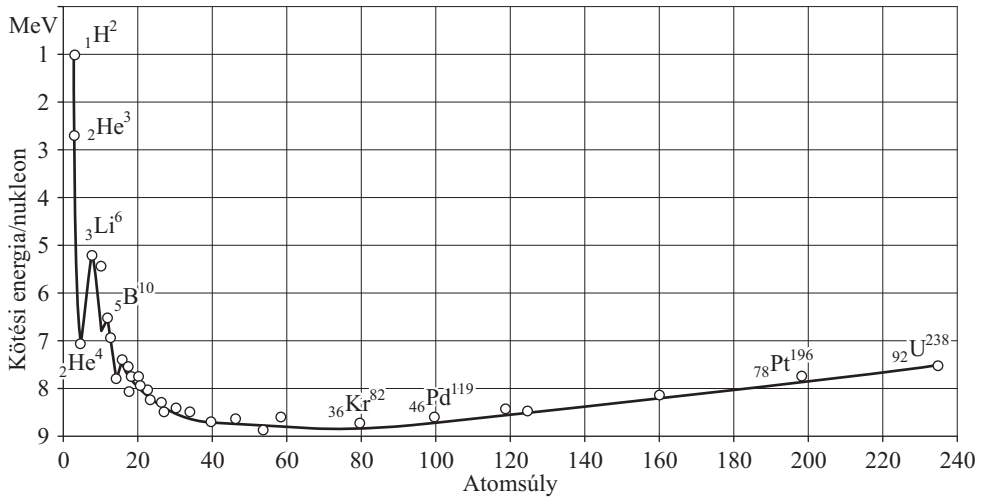
A nukleonokat összetartó magerők biztosítják a mag kötési energiáját, az elemek egy nukleonra eső kötési energiájának alakulását a *11.1. ábra* mutatja, ennek értéke 1 és 9 MeV¹²⁹ közé esik.

A nukleonok energiája csak meghatározott diszkrét értékeket vehet fel, a lehetséges kvantált változásokat elemi részecske kilépése vagy beépülése kíséri. Az ilyen magátalakulásokat általában a

$$\sum_{i=1}^n M_{1i} + \frac{W_1}{c^2} \rightarrow \sum_{i=1}^l M_{2i} + \frac{W_2}{c^2} \quad (11.1)$$

összefüggés írja le.

¹²⁹ eV = elektronvolt, az atomfizikában használt energiaegység, $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.



11.1. ábra. Nukleonokra jutó magenergia

A 11.1 képletben W_1 a közölt és W_2 a felszabadult energia, M_{1i} , illetve M_{2i} az átalakulásban részt vevő i -edik elemi részecskék tömege az átalakulás előtt, illetve után, c a fénysebesség. A kötési energia változásának fedezete a tömegváltozás, ennek során a tömegek összege megváltozik, de a nukleonok számának összege változatlan marad, viszont változhat az egyéb elemi részecskék száma. Az atommagot összetartó kötési energia egy hányada spontán vagy mesterségesen előidézett magreakciók során szabadulhat fel.

A spontán magátalakulások külső energia befektetése nélkül ($W_1 = 0$) következnek be, ezek leggyakrabban előforduló válfaja a radioizotópok bomlása, ionizáló α vagy β -sugárzás kibocsátása közben, amit gyakran γ foton kilövellése követ. Mintegy 40 természetes eredetű és 1100 atomreaktorokban, vagy részecskegyorsítóknál előállított mesterséges radioizotóp ismeretes. A radioizotópok kötése nem stabil, a sztochasztikus jellegű bomlást az

$$n = n_0 e^{-\lambda t} \tag{11.2}$$

függvény írja le, t idő alatt a radioizotópok száma n_0 -ról n -re csökken, a λ bomlási együttható által megszabott ütemben. A kezdeti aktivitás a

$$T_f = \frac{\ln 2}{\lambda} \tag{11.3}$$

felezési idő alatt csökken a felére. A bomlás ütemét megszabó felezési idő minden állapotjellemzőtől független anyagállandó, értéke izotóponként nagyon eltérő, vannak mp-es és vannak Gév-es felezési idejű izotópok. A bomlás hőfejlődéssel jár, ahogy a kilépő részecskék lefékeződnek.

11.1. táblázat. Technikailag fontos radioizotópok felezési ideje

Izotóp	Felezési idő, év
Aktinidák	
²²⁶ Ra	1600
²²⁸ Th	1,91
²³⁰ Th	$7,54 \cdot 10^4$
²³² Th	$1,4 \cdot 10^{10}$
²³³ U	$1,6 \cdot 10^5$
²³⁴ U	$2,5 \cdot 10^5$
²³⁵ U	$7 \cdot 10^8$
²³⁸ U	$4,5 \cdot 10^9$
²³⁷ Np	$2,1 \cdot 10^6$
²³⁸ Pu	87,7
²³⁹ Pu	$2,4 \cdot 10^4$
²⁴⁰ Pu	6563
²⁴¹ Pu	14,4
²⁴⁴ Cm	18,1
Hasadási termékek	
⁸⁵ Kr	10,8
⁹⁰ Sr	28,1
⁹³ Zr	$1,5 \cdot 10^6$
⁹⁴ Nb	$2,3 \cdot 10^4$
⁹⁹ Tc	$2,1 \cdot 10^5$
¹²⁶ Sn	$1,1 \cdot 10^5$
¹²⁹ I	$1,6 \cdot 10^7$
¹³¹ I	8,1 nap
¹³³ Xe	5,3 nap
¹³⁴ Cs	2
¹³⁵ Cs	$2,3 \cdot 10^6$
¹³⁷ Cs	30,0
Aktiválási termék	
³ H	12,3
¹⁴ C	5730
³⁶ Cl	$3 \cdot 10^5$
⁵⁵ Fe	2,7
⁵⁹ Ni	$7,5 \cdot 10^4$
⁶⁰ Co	5,3
⁶³ Ni	96
Ősanyag	
⁴⁰ K	10^9

A gerjesztett magreakciókat elemi részecskék ütközésével közvetített energiabefektetés hozza létre. Kis energiájú kölcsönhatás csak az atom mozgásmennyiségét módosítja, vagy az elektronburokban okoz változást (gerjesztés, ionizálás). Nagy energiahatás a magban is változásokat okozhat, részecskebefogást, proton átalakulását neutronná vagy

neutronból protonképződést, és az energetikailag legfontosabb folyamatokat: maghasadást és magegyesülést. Ha a magreakció módosítja a neutronok számát, megváltozik az M tömegszám, és más izotóp jön létre, a protonszám módosulása a Z rendszám változását vonja maga után, és más elem keletkezik.

A nukleáris energia nagyarányú hasznosítását az atommagokat alkotó nukleonok kötési energiája egy részének felszabadítása teszi lehetővé, ami számottevő tömegváltozással jár. A 11.1. ábra szerint az egy nukleonra eső kötési energia csökkenésének – vagyis jelentős energiafelszabadulásnak – két lehetősége van. Az egyik a görbe minimumától jobbra eső szakaszon a nehéz elemek hasadása közepes rendszámúakra (fisszió), a másik a balra eső szakaszon egyes könnyű elemek egyesítése nehezebb atommá (fúzió). Folyamatos energiafejlesztést szolgáló szabályozott reakciót egyelőre csak hasadás segítségével tudunk megvalósítani, fegyverek töltetében robbanást mindkét lehetőség alapján létre tudnak hozni.

Ha a magreakciók során csökken a kötési energia, a felszabaduló különbséget az atomból kilépő részecskék (hasadványok, neutronok, fotonok stb.) szállítják el. A neutronok rendszerint nagy energiával lépnek ki a magból, majd energiájukat más részecskékkel ütközve fokozatosan elvesztik. Energiájuk (és ennek megfelelő sebességük) alapján gyorsneutronokat (energiájuk >100 keV), intermedier neutronokat (100 eV – 100 keV), lassú (epitermális) neutronokat (0,033–100 eV) és termikus neutronokat ($<0,033$ eV) különböztetnek meg.

Az atomenergetikában meghatározó az urán szerepe, aminek sok izotópja létezik, azok tömegszáma 227 és 240 közötti érték. A természetben található urán azonban mindig a 11.2. táblázat szerinti három komponensből áll.

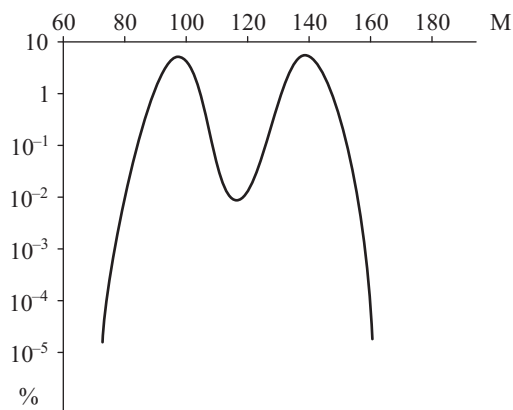
11.2. táblázat. A természetes urán összetevői

Izotóp	Felezési idő, év	Koncentráció, %	Sugárzás	
			jellege	energiája, MeV
²³⁸ U	$4,51 \cdot 10^9$	99,28	α, γ	4,21
²³⁵ U	$7,13 \cdot 10^8$	0,72	α, β	4,52
²³⁴ U	$2,48 \cdot 10^5$	0,005	α, γ	4,76

Az urán 235-ös izotópjának kitüntetett szerepe van, mert a természetben előforduló atomok közül neutronokkal ütközve egyedül az hajlamos láncreakció létrehozására. Annak a valószínűsége, hogy egy termikus neutron egy ²³⁵U maggal ütközve neutronbefogás után hasadást vált ki, kereken 0,84. Ez a nagy valószínűség magyarázza, hogy a 235-ös uránizotóp a mai termikus reaktorok alapvető üzemanyaga. A hasadásnál kilépő 2–3 gyors neutron moderátor anyagban lelassítva újabb hasadást képes előidézni. Ha a hasadásnál kilépő neutronok legalább egy újabb hasadást idéznek elő, láncreakció indul el, a folyamat önfenntartóvá válik. A láncreakció szabályozatlan formája a nukleáris robbanás, stabil teljesítményt szabályozott láncreakcióval lehet biztosítani. Az egymást követő hasadások során egy neutron által átlagosan előidézett, hasadásra hasznosítható neutronok arányát kifejező k sokszorozási tényező jellemzi a folyamatok jellegét. A lán-

reakció öfenntartó szintjét a kritikus állapot jellemzi ($k = 1$), szubkritikus állapotban ($k < 1$) a láncreakció lefékeződik, szuperkritikus állapotban ($k > 1$) viszont felerősödik.

A magátalakulások bekövetkeztének valószínűségi jellege van. A hasadás során az uránatom magja két közepes tömegszámú, nagy sebességgel mozgó töredékatom magjára esik szét. Mivel a nukleonok konfigurációja sokféle módon alakulhat, ennek megfelelően sokféle hasadvány keletkezhet. Ezek között 35 elem mintegy 300féle izotópja fordulhat elő a 70 és 160 tömegszámok közötti tartományban, előfordulásuk valószínűsége a 95, illetve 140 tömegszámok közelében helyi maximumot vesz fel (11.2. ábra). Az első maximumnál főleg Br, Kr, Sr, a másodiknál legnagyobbbrészt Cs, I, Xe izotópok keletkeznek.



11.2. ábra. Hasadványok megoszlása

A felszabaduló energiának mintegy 83%-át a hasadványok kinetikus energiája szállítja el, ami környezetükkel ütközve lefékeződik és hővé alakul (11.3. táblázat). A felszabaduló energia fennmaradó hányadát a kilépő 2–3 gyors neutron, valamint nagy energiájú γ -sugárzás, β -részecske, neutrínó szállítja el, ezek energiájának nagy része az ütközések során szintén hővé alakul. Egy ^{235}U atommag hasadása átlagosan 195 MeV ($\sim 0,3$ pJ) energia felszabadulásával jár, ennek figyelembevételével 1 g ^{235}U egyenértéke kereken 80 GJ (~ 2 t olajegyenérték), illetve az atomenergetikában használt mértékegységben ~ 1 MWnap. A legvalószínűbb energiamérleg a 11.3. táblázatban látható, a 195 MeV-ből egy nukleonra 0,83 MeV jut.

11.3. táblázat. A ^{235}U hasadásának legvalószínűbb energiamérlege

Energia jellege	MeV
Hasadványok kinetikus energiája	162
Neutronok kinetikus energiája	17
γ -sugárzás	11
β -sugárzás	5
Összesen	195

A láncreakció feltétele, hogy elég sok termikus neutron ütközzön kellő számú ^{235}U atommal. Természetes uránból, illetve azt tartalmazó vegyületekből készített fűtőelemek esetén a ^{235}U kis koncentrációja miatt ennek valószínűsége kicsi.

Az ütközések számának növelésére vagy sok gyors neutronot kell lelassítani termikus sebességre, moderátor anyagok alkalmazásával, vagy fel kell dúsítani a ^{235}U atomok koncentrációját. A moderátor szerepre olyan kis tömegszámú atomok alkalmasak, melyek kevésbé hajlamosak a neutronok befogására. A legjobb moderátor a nehézvíz (D_2O), és a grafit, ezek alkalmazásával még természetes uránban is létrehozható a láncreakció. A legolcsóbb moderátor a természetes „könnyű” víz, de ez természetes uránban nem biztosítja a láncreakció feltételét.

Ha a termikus neutronok sűrűsége nem elég nagy, növelni kell a ^{235}U izotópok koncentrációját (pl. a könnyűvízes reaktorokhoz a 0,72%-ról 3–5%-ra). Ekkor kellő mennyiségű hasadóanyag jelenléte biztosítja az ütközések elég nagy valószínűségét, ennek küszöbértéke függ a hasadóanyag jellegétől és koncentrációjától, a geometriai elrendezéstől, és a jelen levő egyéb szerkezeti anyagoktól.

A reaktorok stabil, stacioner üzemének a feltétele a tartós kritikus állapot. Az energetikai reaktorok stabil üzemét a teljes terhelés és az üresjárat között minden teljesítményszinten biztosítani kell. A gyakorlatban a teljesítményszabályozást a reaktortérbe áramló neutronok sűrűségének, a neutronfluxusnak a változtatásával oldják meg, ami többnyire a reaktortérbe juttatott neutronelnyelő anyagok mennyiségének módosításával történik. A vizes reaktoroknál a gyorsabb szabályozáshoz bór- (néha kadmium-, illetve hafnium-) tartalmú ötvözetekből készített rudak benyúlását változtatják az aktív zónába. Ha a reaktor azonnali lekapcsolására van szükség, a védelmek biztosítják, hogy a rudak saját súlyuk hatására (esetleg rugóerővel gyorsítva) csússzanak be. A lassúbb teljesítményváltoztatáshoz a hűtővíz bórsav koncentrációját módosítják.

A hirtelen teljesítménynövekedés a reaktor megszaladását eredményezné, ami ellen a reakciót fékező automatikus beavatkozó szervek védenek, egyes típusoknál – így a könnyű vizeseknél – a reaktor inherens fizikai tulajdonságai is megakadályozzák a megszaladást.

A ^{235}U -on kívül néhány mesterségesen létrehozott – a természetben nem található – aktinida neutronokkal ütközve szintén hasadóanyag, ezeket főleg gyors neutronok befogásával tenyésztanyagokból lehet létrehozni, így a ^{238}U -ból ^{239}Pu , a ^{232}Th -ből ^{233}U , illetve a mesterségesen létrehozott ^{240}Pu -ból ^{241}Pu állítható elő. A magreakciók során nem kívánatos hasadóanyagok is létrejönnek (amerícium, neptúnium, curium stb. egyes izotópjai), de ezek mennyisége nem számottevő.

Kutatási és oktatási célra világszerte nagyon nagy számban működnek maghasadáson alapuló reaktorok (Budapesten a KFKI Energetikai Kutató Intézetében, és a Műegyetem Nukleáris Technikai Intézetében).

Az energiatermelő atomerőművek kiforrott ipari termékek, de az atomenergetika tovább akar lépni a nagy ígéret, a fúzió felé. A pesszimisták szerint ez álom marad, mert a Földön nem hozható létre a csillagokban zajló folyamat. De túlsúlyban vannak az optimisták, akik nagyon sok laboratóriumban kutatják a fúzió lehetőségét. A vezető ipari országok sokat áldoznak a fúzióval kapcsolatos kutatásokra, és nagyon jelentős nemzet-

közi együttműködést alakítottak ki. A kutatások nagyon költségesek, mert a tapasztalatok szerint a berendezések léptékének növelése visz közelebb a fúzió feltételeinek a megteremtéséhez. Néhány lehetséges reakció a 11.4. táblázatban látható, a legtöbb figyelem jelenleg a deutériumot és tríciumot héliummá egyesítő reakció (D+T) áll, mert ez tűnik a legkönnyebben megvalósíthatónak. A felszabaduló energia 20%-át a He atommag, 80%-át a kilépő neutron kinetikus energiája szállítja el.

11.4. táblázat. Fúzió lehetőségei

Képlet	Reakció	MeV/nukleon
4.4	$D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$	3,25
4.5	$D + D \rightarrow {}^3\text{He} + p$	4
4.6	$D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17,6
4.7	$D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$	18,3
4.8	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$	12,8
4.9	${}^6\text{Li} + D \rightarrow 2{}^4\text{He} + p$	22,4
4.10	${}^7\text{Li} + p \rightarrow 2{}^4\text{He}$	17,3

A fúzióhoz szükséges deutérium forrása a víz, így a tengerek szinte korlátlan deutériumforrást képviselnek. A természetes vizekben a deutérium tömegaránya 0,15%, minden 6700-ik hidrogénatom deutérium, D_2O - vagy DHO-molekulákban. A nehésvíz kivonására kidolgozott technikák állnak rendelkezésre. Miután a fúziónál 1 kg He keletkezése 620 TJ felszabadulásával jár, a világtengerek $1,5 \cdot 10^9$ km³-nyi vizében levő $1,9 \cdot 10^{14}$ t deutérium $5,7 \cdot 10^{31}$ J energiát képvisel, ami 11 nagyságrenddel haladja meg a világ jelenlegi éves energiafelhasználását. A nehésvíz-koncentráció 1%-os csökkentése a fogyasztás jelenlegi szintjén 1 milliárd évet meghaladó ellátottságot jelentene.

A D-T reakcióhoz szükséges trícium a vízben csak nyomokban fordul elő, azt magreakciókkal a fúziónál kilépő neutronnal lehetne előállítani lítiumból. A lítium 6-os, esetleg 7-es izotópja neutronbefogás után tríciumra és héliumra bomlik. A világ lítiumvagyonának feltételezett mértéke a D-T reakcióval fejleszthető energia nagyságrendjét a fosszilis tüzelőanyag-vagyon nagyságrendjére korlátozza. Ezt a korlátot feloldaná a D-D reakció, aminek létrehozása azonban nagyságrenddel magasabb hőmérsékletet kívánna meg.

A fúzió előállításához plazmaállapotra van szükség. A magas hőmérsékletű plazmában a pozitív töltésű deutérium és trícium ionok villamosan taszítják egymást. Hőmozgásukban nagy kinetikus energiával kell rendelkezniük, vagy ami ezzel egyenértékű, magas hőmérséklettel, hogy ennek ellenére kölcsönhatásba kerüljenek. A minimális érték 10^8 K (10 keV), aminek már a többszörösét is sikerült előállítani.

Az önfenntartó fúzióknak elég nagy reakciógyakoriság is feltétele, amihez kellően nagy számú ion elég hosszú idejű jelenlétét kell biztosítani. A hidrogénionokat időnként plazmapuskával injektálják be a reakcióterbe, a pontos adagolás és időzítés bonyolult vezérlési feladatot jelent. A számítások szerint minimálisan 10^{14} – 10^{15} ion/cm³ ionsűrűsége van szükség, amit már több berendezésben is túlhaladtak. Ez a sűrűség nagy

vákuumnak felel meg, egy néhány GW-os reaktor reakcióterében az egyidejűleg jelen levő D-T keverék mennyisége csupán néhány gramm.

A harmadik kritérium a minimális együtt maradási idő, ami legalább 1 másodperc. Ez a fúzió egyik kulcskérdése, nagyon nehéz feladat ennyi ideig összetartani a plazmát a villamos taszítóerőkkel szemben. Erre leginkább mágneses teret használnak, a legtöbb megoldásnál zárt toroidális rendszerben (TOKOMAK), de alkalmaznak több irányból belőtt fotonokat is.

Néhány percig fennálló fúziót már sikerült megvalósítani az EU Angliában (Harwell) létesített kísérleti berendezésében, a JET¹³⁰-ben. Pozitív energiamérlegű, hosszabb ideig fennálló stabil fúziót egy nemzetközi együttműködésben, Franciaországban (Cadarache) felépülő, hatalmas méretű berendezéstől (ITER¹³¹) várnak. A programra ~10 milliárd dollárt irányoztak elő, aminek legnagyobb része a 10 év alatt megépülő berendezés költsége, a többi az első tíz évben végzett kutatás fedezete. Ettől várják az erőművi megvalósíthatóság igazolását.

Az elképzések szerint a fúziós erőműnél a legfelül elhelyezkedő plazmát vákuum-szigetelés fogja körülvenni. A fúzió során keletkező He-ionok energiájukat a plazmának adják át, a plazma pedig energiájának jelentős részét hűtött felfogó felületekre sugározza ki. A neutronok és a γ -sugárzás energiáját hűtött köpenyek alakítják át hővé, ezek anyaga, vagy hűtőközege lehet a trícium tenyésztésanyagául szolgáló lítium is. A szükséges nagy mágneses teret kriotechnikailag hűtött szupravezetős tekercselések biztosítják.

A szabályozott fúzió demonstrációjától azonban még hosszú út vezet az ipari megvalósításig. Ki kell fejleszteni a szélsőséges igénybevételeknek ellenálló szerkezeti anyagokat, amire nemzetközi kutatóintézetet hoztak létre Japánban. Ki kell alakítani a bonyolult vezérlési feladatokat teljesítő rendszereket, és sok más, ma még be sem látható megoldást.

A fúzióknak nagy előnye, hogy nem jöhet létre olyan baleset, ami a környezetet veszélyezteteti ionizáló sugárzással, a fúzióknak nincs veszélyes reakcióterméke és nincsenek hosszú felezési idejű hulladékaik.

11.2. Lakossági elfogadtatás

Az atomenergetikával kapcsolatos bizalmatlanságot a szakma története magyarázza. Sajnos az atomenergia Hiroshima és Nagaszaki gombafelhőivel lépett a történelem színpadára, örökre összekapcsolódva az iszonyatos pusztulás képével. A világ jövője múltott azon, hogy a második világháborúban ki jut előbb a hatalmas pusztító erőt jelentő atombomba birtokába.¹³² A versenyfutást az Egyesült Államok nyerte meg, Németország és a Szovjet-

¹³⁰ Joint European Torus, Közös Európai Tórusz.

¹³¹ International Thermonuclear Experimental Reactor, Nemzetközi Kísérleti Termonukleáris Reaktor.

¹³² Erre a veszélyre Szilárd kezdeményezésére Einstein hívta fel Roosewelt elnök figyelmét, aki elindította a Manhattan-projektet.

unió előtt. Ebben kulcsszerepe volt a bomba kifejlesztésére létrehozott hatalmas anyagi és szellemi erőket koncentráló Manhattan-projektnek. A sikerben kiemelkedő szerepe volt néhány emigrált magyar tudós – Kármán Tódor, Neumann János, Szilárd Leó, Teller Ede, Wigner Jenő – közreműködésének. A Szovjetunió néhány év alatt utolérte az Egyesült Államokat mind az atombomba, mind a hidrogénbomba kifejlesztésében. A következő évtizedekben a két szuperhatalmat a hatalmas nukleáris arzenálokra alapuló kölcsönös elrettentés tartotta vissza attól, hogy a hidegháborút valódi háborúba fordítsák, de a háború veszélye tartós fenyegetettségben tartotta az emberiséget. Ez a helyzet jóformán az egész világot polarizálta, megerősítve a két vezető hatalom hegemoniáját saját táborán belül, ami nemcsak a katonai vonatkozásokat érintette, hanem a politika és a gazdaság jóformán minden területét. Közben fékevesztett verseny zajlott a nukleáris robbanófejek, a célbajuttatási eszközök és az irányítási rendszerek fejlesztésében, ami többek között az elektronika, a számítástechnika, a rakéatechnika hihetetlen fejlődését eredményezte. A nukleáris fegyverek fejlesztését légköri atomrobbantásokkal támasztották alá, ami nagy mennyiségű radioaktív anyagot szórt szét a légkörben. A tiltakozások hatására 1968-ban sikerült betiltani a légköri (és víz alatti) atomrobbantásokat, mert szennyezésük veszélyeztette az emberiség egészségét. A kísérleteket a föld alá helyezték át, 1996-ra érett meg a helyzet egy mindenféle kísérleti atomrobbantást betiltó egyezményre (CTBT¹³³).

A mikroelektronika területén a versenyt a Szovjetunió elvesztette, a katonai potenciál megrendülése a Szovjetunió összeomlását, és az általa vezetett tábor széthullását eredményezte. Mindez együtt járt a szocialista politikai és gazdasági rendszer vereségével is. A közel fél évszázados hidegháború vége azonban nem szüntette meg a rettegést az atomfegyvertől. Megnőtt az atomfegyverrel rendelkező országok száma, és továbbiak váltak képessé annak kifejlesztésére, a világ sokkal bizonytalanabbá vált. India, Pakisztán, Izrael, Észak-Korea atomhatalommá lépett elő, a Dél-afrikai Köztársaság megsemmisítette nukleáris robbanószerkezeit, Líbia és Románia feladta atomfegyver fejlesztési terveit, Iránról feltételezik, hogy kitart azok mellett. A két nukleáris szuperhatalom szembenállását diffúz viszonyok váltották fel, aminek a rendezésére a megmaradt egy szuperhatalom nem mutatkozott elegendőnek. Új, és kezelhetlenebb frontvonalat alakított ki a terrorizmus, aminek következtében a félelem személyesebbé vált, mikor jut hozzá egy terrorista csoport nukleáris fegyverhez, hogy megsemmisítse az én otthonomat és az én családomat?

A helyzet kivételes nemzetközi megállapodásokat váltott ki. Az államok naprakész leltárak vezetését vállalták a nukleáris és radioaktív anyagok hollétéről. A NAÜ és az EURATOM ellenőrei a helyszínen vizsgálják a nukleáris létesítményeket, a hasadóanyagok mozgását térfigyelő kamerák, biztonsági záruk és pecsétük ellenőrzik. A fegyvergyártásban szerepet játszó anyagok, eszközök, technológiák szállítására képes országok szoros együttműködésben¹³⁴ vállalták, hogy csak olyan vevőknek szállítsanak, amelyek garantálták az ellenőrzött és békés felhasználást. A rendszer működtetésébe még a hírszerző szolgálatok is bekapcsolódtak. De minél szigorúbb a tilalom, annál nagyobb

¹³³ Comprehensive Test Ban Treaty, átfogó egyezmény a kísérleti robbantások tilalmáról.

¹³⁴ Nuclear Suppliers Group, nukleáris szállítók csoportja.

hasznot ígér annak a kijátszása. A tiltott termékek szállítására titkos vállalatok alakultak, amelyek busás haszon ellenében államokat és magánszemélyeket egyaránt kiszolgál-
nak (így épült ki pl. Irán nukleáris ipara). Mindez együtt jár a hadianyagok és katonai
titkok árusításával, a megvesztegetés és a korrupció terjedésével. A kis bűnözők pedig
– egészségük kockáztatásával – csomagokban csempészik ki a titokzatos anyagokat,
amit a felállított sugárkapuk csak a határátkelőhelyeken lepleznek le, a zöld határon nem.

Az atomtechnika tudományos ismeretei és technológiai eljárásai féltve őrzött katonai
titkok voltak. Ez nemcsak a robbanószerkezetekre, hanem a szabályozott láncreakciókat
megvalósító reaktorokra is vonatkozott, mivel azok első példányai plutóniumot termeltek
az atombombákhoz, és hadihajókat hajtottak. A titkosság áldozatokkal is járt. Az 1950-
ben alakított Amerikaellenes Tevékenységet Vizsgáló Bizottság (McCarthy szenátor
vezetésével) nemcsak az államigazgatásban és a kultúra területén vizsgálódott, hanem az
atomfizikában is. A baloldali nézeteket valló, vagy ilyen kapcsolatokkal bíró személyeket
könnyen elmarasztalták, kizárólag vélemények alapján is, ami súlyos következmények-
kel járt (állásvesztés, útlevelbevonás, bírósági felelősségre vonás). Az amerikai fizikus
társadalmat súlyosan megosztotta, hogy Oppenheimer professzort – a Manhattan-pro-
jekt tudományos vezetőjét – megbízhatatlannak minősítették. Sok embert mint kémeket
ítéltek el atomtitkok elárulásáért, a Rosenberg házaspárt ki is végezték, ami nemzetközi
politikai vihart kavart.

A haditechnika állandó tökéletesítése az ismeretek folyamatos továbbfejlesztését
követelte meg, így a túlhaladottaknál már feleslegessé vált a titkosítás, annak feloldását
1953-ban jelentette be Eisenhower amerikai elnök egy genfi konferencián. A katonai
titkokat fedő lepel egyik sarkának fellebbentése eufóriát váltott ki, az atomerőmű-építés
lehetőségét sokan az emberiség második tűzgyújtásának minősítették. Számos ország
ambiciózus atomerőmű-építési programokat indított el.

A lelkesedéssel egy időben felerősödött az ellenzés is, az atomenergia alkalmazásának
betiltását követelő mozgalmak és szervezetek jöttek létre. Ezek arra a félelemre alapoz-
tak, hogy az emberek nagy része már az atom szóhoz a szörnyűséges, pusztító bombák
képét társította. Ez később párosult a félelemmel a radioaktív anyagok titokzatos, közvet-
lenül nem érzékelhető, de veszélyes ionizáló sugárzásától. Az aggodalmat felerősítették
az információk a kísérleti atomrobbantások maradandó hatásairól és a kiszivárgott hírek
az atomhatalmak néhány hulladékártó és újrafeldolgozó üzemében bekövetkezett kör-
nyezetszennyező balesetről (Hanford [USA], Kistim [SzU], Windscale, Sellafield [UK],
La Hague [F], Sanhszi [Kína] stb.). Tovább csökkentették a bizalmat sajtókampányok
radioaktív szennyezés vélt (de nem valós) előfordulásairól. Az antinukleáris mozgalmak
három fő érve: az atomerőművek nem biztonságosak, megoldatlan a veszélyes hulladé-
kok sorsa, az atomerőművek előmozdítják az atomfegyverek elterjedését.

Az egymásnak feszülő nézetek mérlege billeg, eseménytelen időszakban erősödik az
atomerőművek támogatottsága, nukleáris balesetek hírére fellángol az ellenzés. A politika
ambivalens, attól függően, hogy mi növeli a szavazóbázist. Ilyen körülmények között az
atomerőmű-építés pályája göröngyös, fellendülő és hanyatló szakaszok váltják egymást.
Befolyásolja ezt a gazdaság helyzete is, különösen a hitelek rendelkezésre állása, a ma-
gas – és a biztonsági követelmények szigorodása miatt egyre magasabb – beruházási

költség miatt. A prognózisok egy része kulcskérdésnek tekinti atomerőművek építését az energetika problémáinak megoldásához, más előrejelzések viszont ezt zsákutcának tekintik, és az atomerőművek leépülését tételezik fel. A megoldást erre a dilemmára annak a nemzetközi együttműködésben végrehajtott programnak a sikere, vagy kudarca fogja szolgáltatni, ami olyan versenyképes új megoldások kifejlesztését célozza meg, amelyek okafogyottá teszik a legfontosabb antinukleáris érveket.

A félelmek csillapítását, a biztonság érzetének növelését szolgálja az atompolitika és atomenergetika felügyeletének és működésének nagyon szigorú szabályozása. Első helyen említendők az atomfegyverekkel kapcsolatos egyezmények, a fegyverek elterjedését korlátozó atomsorompó szerződés (NPT¹³⁵), az IAEA¹³⁶ helyszíni ellenőrzése a nukleáris létesítményekben és az anyagok számbavétele, a fegyvergyártásra használható anyagok és technológiák exportjának korlátozása, az anyagok csempészetének megakadályozása, és számos más megállapodás. A NAÜ könyvtárnyi előírást és ajánlást dolgozott ki a nukleáris létesítmények biztonságának és működésének követelményeire, melyeket az országok jogszabályok és szabványok formájában hasznosítanak. A NAÜ szakértők nemzetközi bizottságaival vállalja a létesítmények és szervezetek helyszíni felülvizsgálatát és minősítését is. A bizalomerősítés szempontjából is nagy jelentősége van a nemzetközi együttműködésnek, sok szervezet (IAEA, NEA,¹³⁷ WANO,¹³⁸ EURATOM,¹³⁹ és mások) biztosít továbbképzést, rendez szakmai összejöveteleket, ahol megosztják az új ismereteket, valamint a gyakorlatban szerzett tapasztalatokat. Maguk a nukleáris intézmények és erőművek is igyekeznek megnyerni a közvéleményt, őszinte tájékoztatással, átlátható tevékenységgel. Az ellentábor mindezt jól szervezett lobbizásnak minősíti.

Mindkét tábor ragaszkodik a nézeteihez, azokban erős az érzelmek szerepe, meggyezésre nincs kilátás. A csapdahelyzetet az oldhatja fel, ha az ország lakosságának jelentős többsége támogatja valamelyik törekvést. Ennek megszerzésében nem annyira az észrvek játszanak szerepet, hanem inkább különféle kényszerek, pl. tartós és nagymértékű energiahiány, elviselhetetlen mértékű függés az energiainporttól, vagy kivételesen előnyös beruházási lehetőség.

11.3. Kémiai változások

A magreakciók kémiai változásokkal járnak, a neutronok számának módosulása más tulajdonságokkal rendelkező izotóp megjelenését jelenti, a protonszám változása pedig más elemet hoz létre, ami eltérő fizikai és kémiai viselkedéssel jár. Energetikai szempontból kitüntetett jelentősége van anyagszanyagokból neutronbefogással hasadóanyagok (²³⁹Pu, ²³³U) létrehozásának, az energetikai potenciál növelésére. Főleg a hulladékkezelés

¹³⁵ Nonproliferation Treaty, egyezmény a továbbterjedés megakadályozására (Atomsorompó Szerződés).

¹³⁶ International Atomic Energy Agency, Nemzetközi Atomenergia-ügynökség, NAÜ (ENSZ-szervezet).

¹³⁷ Nuclear Energy Agency, Atomenergia-ügynökség (OECD-szervezet).

¹³⁸ World Association of Nuclear Operators, Atomerőműveket Üzemeltetők Világszövetsége.

¹³⁹ EU-szervezet.

számára fontos radioizotópok módosítása (transzmutáció) ugyancsak neutronok segítségével. Az utóbbi eljárással hosszú felezési idejű izotópok rövid felezési idejű, vagy stabil izotópokká alakíthatók.

Sok irányban bővült az ionizáló sugárzásokkal aktivált sugárkémiai reakciók alkalmazása (monomerek polimerizálására, láncmolekulák térhálósítására, vízbontás radiolízissel stb.). Említést érdemel, hogy a magátalakulásoknak hatása van a vegyületképződési hajlamra is.

11.4. Hőfejlesztés

Maga a radioaktív bomlás is hőfejlődéssel jár, amit kis léptékű eszközökben hasznosítani is lehet. Az atomenergia békés hasznosításának fő iránya hőfejlesztés a láncreakcióval. A kilépő elemi részecskék energiájukat ütközések során vesztik el, és az hővé alakul. A konstruktőrök sokféle atomreaktor típust terveztek, melyek közül azonban csak néhány vált iparilag megvalósult, érett megoldássá.

2012 végén 437 – legnagyobbbrészt második generációs – nagy atomerőművi blokk működött 36 országban, összesített teljesítményük 370 GW. Tervezés, vagy építés alatt állt további 64 blokk (63 GW), legnagyobbbrészt már harmadik generációs, melyek néhány példánya Japánban és Kínában már üzemben van. A reaktorban fejlődő hőt elvezető közeg és a neutronokat lelassító moderátor anyaga szerinti megoszlásukat a 11.5. táblázat mutatja.

11.5. táblázat. Erőművek reaktortípusai

Típus	Hűtőközeg	Moderátor	Részarány, %
PWR ¹⁴⁰	víz nyomás alatt	víz	62
BWR ¹⁴¹	víz forrásban	víz	19
CANDU ¹⁴²	nehésvíz	nehésvíz	11
GGR ¹⁴³	gáz (CO ₂ , He)	grafit	3,5
RBMK ¹⁴⁴	víz	grafit	3,5
BR ¹⁴⁵	folyékony fém	–	1

¹⁴⁰ Pressurized water reactor, nyomottvízes reaktor.

¹⁴¹ Boiling water reactor, forralóvízes reaktor.

¹⁴² Canadian Deuterium Uranium reactor, kanadai deutérium-urán reaktor.

¹⁴³ Gas graphite reactor, gáz-grafit reaktor.

¹⁴⁴ Reaktor bolsoj mosnosztyi kanalnij, nagy teljesítményű csatornás reaktor.

¹⁴⁵ Breeder reactor, szaporító reaktor.

A működő erőművek több mint 80%-ának közönséges (de nagyon tiszta) víz a hűtő és moderátor közege. A könnyűvízes reaktorok szélsőséges mechanikai, termikus, kémiai és sugárzási igénybevételeknek kitett, vastag falú reaktortartályokban helyezkednek el. E nagyméretű tartályokat gyűrűkből és domborított véglemezekből hegesztik össze, gyártásuk csúcstechnológiát követel meg. A feladatra évente néhány tartály elkészítésére alkalmas külön gyárak létesültek, ezek kapacitása szabta meg az építhető atomerőművek számát. A tartályon kialakított csomókhoz csatlakoznak a hűtővíz el-, illetve visszavezetésére szolgáló nagy átmérőjű csövek, továbbá számos átvezetés biztosítja a vezérléshez, mérésekhez és biztonságvédelmi rendszerekhez a szükséges kapcsolatokat. A reaktortartályok az atomerőművek legnagyobb méretű és súlyú berendezései, ezek szabják meg a szállítási és emelési követelményeket. A megvalósítható méreteket a szárazföldi szállítás lehetőségei (vasúti úrszelvény, közutak görbületi sugara és megengedett tengelynyomása) korlátozzák. A reaktortartályok anyagának öregedése meghatározó szerepet játszik az atomerőművek élettartamában.

A természetes víz olcsó és könnyen kezelhető hűtőközeg, hőátadási tényezője és fajhője nagy, viszkozitása kicsi, anyagjellemzőit a sugárzás alig befolyásolja. Külön előnye, hogy a hűtésen kívül a moderátor szerepét is be tudja tölteni, de mivel a víz nemcsak fékezi a neutronokat, hanem egy részüket el is nyeli, a kritikus tömeg csak néhány százalékra dúsított urán-oxid üzemanyaggal biztosítható. Hátrányos viszont, hogy a víz kritikus hőmérséklete alacsony, ami a folyékony halmazállapotú hűtőközeg lehetséges hőmérsékletét 350 °C körül korlátozza, egyben behatárolva a turbina munkaközegének felső hőmérsékletét a hőkörfolyamatban.

A reaktor hűtőközegét magába foglaló primer kör berendezéseit (reaktortartály, csővezetékek, főkeringtető szivattyúk, armatúrák, gőzfejlesztők) ausztenites rozsdamentes acélból, vagy hasonló tulajdonságú ötvözetekből kell készíteni. A víz magas hőmérsékleten korrodálja a szerkezeti anyagokat, a sugárzás hatására disszociál (durranógáz is képződhet), a vízbe került korróziós és eróziós termékek a neutronsugárzás hatására felaktiválódhatnak, és a felületekre kiülepedve ronthatják az áramlási és hőátaszármaztatási viszonyokat. Ezért folyamatos és igényes tisztító eljárásokkal ki kell vonni a vízből a nemkívánatos szennyeződések.

A legkompaktabb konstrukció a tengeralattjárók berendezéseiből továbbfejlesztett nyomottvízes (PWR) típus, ez teszi ki az összes reaktor 62%-át. A víz forrását 120–160 bar nyomással akadályozzák meg (Paks-on a nyomás 123 bar, a vízhőmérséklet 282 °C). A reaktor hűtővizével a turbina munkaközegét hőcserélőn keresztül hevítik fel. Az adott paraméterek mellett a gőzfejlesztő szekunder oldalán csak viszonylag alacsony hőfokú telített gőz fejlesztésére van mód, a szekunder körben a nyomás 45–60 bar (Paks-on 46 bar), és a munkaközeg hőmérséklete mintegy 280 °C. A hőkörfolyamat alacsony felső hőmérséklete miatt az ilyen atomerőművek termikus hatásfoka alacsony, nem haladja meg a 31–32%-ot, ami lényegesen elmarad a korszerű hőerőművek hatásfoka mögött.

A forralóvízes (BWR) erőművek aránya 21%. Ezek reaktorában megengedik a víz forrását, a reaktortartály felső részéből elvezetett nedves gőzt – cseppleválasztó berendezés közbeiktatásával – közvetlenül a turbinákba vezetik. Az erőmű felépítése egyszerűbb, mert nincs gőzfejlesztő. Mivel nem kell gátolni a forrást, a primer körben a nyomás

mintegy fele a PWR rendszerűének, ezért a berendezések falvastagsága és súlya kisebb. A valamivel magasabb hőmérséklet következtében a hatásfok is jobb. Hátránya viszont, hogy a primerkör határai kitolódnak, a reaktor hűtővize egyben a turbina munkaközege is, a radioaktív szennyeződés ott is közvetlenül megjelenhet.

A nehézvízzel moderált és hűtött reaktorok (PHWR¹⁴⁶) jól bevált típusa a kanadai CANDU reaktor, ami a működő erőművek 8%-át teszi ki. Eredetileg a nehézvízes reaktorok előnye a dúsítatlan urán alkalmazhatósága volt, ami a függetlenséget is biztosította az atomhatalmaktól, mivel hosszú ideig csak azok rendelkeztek dúsítóművekkel (ez befolyásolta pl. Indiát és Romániát a típusválasztásban). Ma már a jobb hatásfok érdekében a CANDU reaktoroknál is dúsítanak.

A gázhűtés magasabb hőmérsékletet, és ezzel jobb hatásfokot biztosít. Az első francia és angol atomerőművek grafit moderátort és szén-dioxid hűtést alkalmaztak (GGR), az üzemanyag fémurán volt magnéziumötvözetből készült védőcsőben (Magnox reaktor). Később az Egyesült Királyságban áttértek acél burkolattal ellátott enyhén dúsított urán-oxid fűtőelemekre, és a hatásfokjavítás érdekében a hűtőközeg nyomásának és hőmérsékletének növelésére (AGR¹⁴⁷). A gáz rosszabb hőátadási tényezője miatt azonban nagyobb méretekre és a hűtőközeg intenzívebb áramoltatására van szükség, de kedvezőtlen termikus tulajdonságaik miatt így sem bizonyultak versenyképesnek. Szerepét magas hőmérsékletű reaktorként (HTGR¹⁴⁸) visszanyerheti a IV. generációs programban, főként hidrogéngyártással, vagy ipari hőigények fedezésével a kohászatban, szilikátiparban, nehézevegyiparban. Az ehhez szükséges magasabb hőmérséklet szén-dioxiddal nem valósítható meg, mivel 600 °C felett nem stabil. A nagy fajhőjű hélium a legígéretesebb, de kis sűrűsége miatt nagy nyomást kell alkalmazni, és nagy mennyiségeket kell áramoltatni. Tisztasága fontos, amit kriotechnikai szétválasztással biztosítanak. A HTGR reaktorokat sokféle üzemanyaggal lehet megvalósítani, elképzelhető természetes és különféle mértékben dúsított urán, plutónium, tórium és ezek keveréke. Az üzemanyag megválasztásával befolyásolható a hasadóanyag tenyésztés mértéke, a konverzió¹⁴⁹ különösen tórium-üzemanyagnál magas, az 1-nél nagyobb konverzió már átvezet a szaporító reaktorok területére.

Nemzetközi figyelem irányul a Dél-afrikai Köztársaságban létesülő golyós üzemanyag-töltettel működő, magas hőmérsékletű PBMR¹⁵⁰ erőműtípusra. A mintegy 450 000 golyó folyamatosan áramlik az aktív zónán keresztül. Az erőmű versenyképes lesz a hagyományos hőerőművekkel, és megvalósul az inherens biztonság követelménye is, mert egyrészt a nagy hőkapacitás miatt a termikus időálló nagy, másrészt a természetes légáram a teljes hűtőközeg elvesztésekor is biztosítani tudja az elnyújtott alakú reaktorban fejlődő hő elszállítását.

¹⁴⁶ Pressurized heavy water reactor, nyomott nehézvízes reaktor.

¹⁴⁷ Advanced gas-cooled reactor, fejlett gázhűtésű reaktor.

¹⁴⁸ High temperature gas-cooled reactor, magas hőmérsékletű gázhűtésű reaktor.

¹⁴⁹ A keletkező Pu és az elhasított U aránya.

¹⁵⁰ Pebble bed modular reactor, kavicságyas modulrendszerű reaktor.

Grafit moderátor és forrást is megengedő vízhűtés jellemzi a szovjet tervezésű RBMK típusú reaktorokat, a dúsított urán fűtőelemek egy hatalmas grafitömbben lévő csatornában helyezkednek el. A csernobili katasztrófa kiterjedésében jelentős szerepe volt a grafitnak, annak 10 napig tartó égésével táplált felhajtóerő sok km magasságba emelte a kibocsátott radioaktív anyagokat, és így azokat a légáramlatok Európának szinte minden pontjára el tudták juttatni. Ilyen reaktorok létesítését több körülménnyel indokolták: nincs szükség a csak korlátozott számban és nagyon igényes technológiával előállítható reaktortartályra, a csatornák számának szaporításával a reaktor teljesítménye szinte tetszőlegesen növelhető, a fűtőelemeket üzem közben lehet cserélni, ezért magas a kihasználási óraszám, a hasadóanyag hasznosítást javítja a konverzió nagy mértéke, a hűtőközeg magas állapotjellemzői jó termodinamikai hatásfokot biztosítanak. A hátrányok azonban sokkal jelentősebbeknek bizonyultak, és meghatározó szerepet játszottak a csernobili katasztrófa kialakulásában. A reaktor nagy mérete miatt egyrészt nem lehet kialakítani a nukleáris részeket teljesen körülölelő hermetikus konténmentet, ami egy balesetnél vissza tudja tartani a radionuklidokat. Másrészt a zóna nagy kiterjedése miatt nagyon bonyolult a neutronfluxus egyenlőtlenségeinek ellensúlyozása és az üzem szabályozása. Az utóbbival függ össze, hogy gőzfejlődés során bizonyos üzemiállapotokban a reaktivitás hőfokkifejtője pozitív, vagyis a reaktor labilissá válik. Az Egyesült Államokban az ilyen reaktorok polgári alkalmazását elvetették, mert szabályozhatóságukat és a biztonságukat nem tekintették kielégítőnek, de a titkosság légkörében ez a minősítés nem vált ismertté.

Az említett típusokban a termikus neutronok játsszák a fő szerepet a láncreakcióban, a gyors (szaporító) reaktorban (BR) pedig a hasadásnál kilépő gyorsneutronok. Míg a termikus reaktorokban a konverziós tényező jóval kisebb 1-nél, a szaporítóknál több hasadóanyag képződik, mint amennyit a láncreakció felemészt. Egy időben ambiciózus tervek születtek olyan erőműrendszerekre, melyekben a termikus és szaporító reaktorok megfelelő arányával kiküszöbölhető az uránbányászat és a dúsítás, mivel a tenyésztéssel több termikus reaktor látható el üzemanyaggal.

A gyorsreaktorokban nincs moderátor, és a hűtőközeggel szemben is követelmény, hogy ne tartalmazzon nagyobb mennyiségben neutronlassító könnyű atomokat. A reaktorok nukleáris biztonsága nagy, mivel kis nyomáson üzemelnek, nagy a hőtehetetlenségük, a reaktivitás hőmérséklet és teljesítmény függése pedig negatív. A megépített gyorsreaktorok többsége folyékony fémhűtésű (LMFBR¹⁵¹). A fémeket nagy hőátadási tényező jellemzi, viszonylag kis térfogatban nagy teljesítménysűrűséget lehet elérni, alkalmazásukhoz magas hőmérsékleten sem feltétel a nagy nyomás. A folyékony fémek szivattyúzásához bonyolult berendezésekre van szükség, és a hűtőkörök leghidegebb pontjain is biztosítani kell az olvadáspontonál magasabb hőmérsékletet, nehogy a fém megfagyjon. A lehetséges anyagok (Hg, Pb, Li, K, Na, Bi stb.) közül a nátrium termikus tulajdonságai a legkedvezőbbek, olvadáspontja alacsony, forráspontja magas, 350–600 °C hőmérséklet tartományban folyékony halmazállapotú. Nukleáris tulajdonságai közül előnyös a kis neutronabszorpció, viszont hátrányos hajlama a felaktiválódásra. Ezért

¹⁵¹ Liquid metal fast breeder reactor, folyékony fém(hűtésű) gyors szaporító reaktor.

a megvalósított nátriumhűtésű rendszerekben három hűtőkört alkalmaztak, a primer Na hűtőkör és a turbina munkaközege közé egy második Na-os hűtőkört iktatva, hogy a felaktiválódott nátriumot elszigeteljék a környezettől. A nátrium az acélt és a cirkóniumot nem támadja meg, viszont a levegővel és vízzel heves reakcióba lép, az utóbbival hidrogén felszabadulás közben. Ilyen okból gyakran alakult ki nátriumtűz a berendezésekben, ami hozzájárult a szaporító reaktorokba vetett bizalom megrendüléséhez. Az érintkezést a levegővel inert gáz védőatmoszférával gátolják, a kölcsönhatást a vízzel pedig nagyon gondosan kialakított hermetikus tömítésekkel. A plutónium szerepe miatt kialakult társadalmi ellenzés hatására a szaporító reaktorok fejlesztése lekerült a napirendről. Az érdeklődés a szaporító reaktorok iránt újjáéledőben van, mert ezekben látják a nagyaktivitású hulladékprobléma megoldásával kecsegtető transzmutáció lehetséges eszközeit.

A IV. generációs programban Na és Pb-Bi hűtésű szaporító reaktorok is szerepelnek. Kísérleteznek sóolvadékokkal (MSBR¹⁵²) is, pl. Li- és Be-fluorid-sók alkalmazásával, amiben oldható a tórium- illetve plutónium-fluorid fűtőelem. E kompakt homogén reaktorok folytonosan reprocessálhatók, jól ki lehet vonni a ²³³U lánreakciójának hasadványait és bomlástermékeit.

Visszatérően keresik a módját, hogyan lehetne az atomenergiát a fogyasztók hőigényének a kielégítésére felhasználni, mivel ez teszi ki az energiaszükséglet legnagyobb tételét. Számos atomerőmű szolgáltat hőt a közeli településeknek, de ez nagyon marginális tevékenység, a hatékony és nagy léptékű megoldás atomfűtőművek létesítése lenne. A nagy energetikai gépgyártó vállalatok kidolgoztak terveket 10–100 MW_t teljesítményű, inherens biztonságú fűtőművekre (Pius, Termie, Slowpox stb.). Miután a szükséges hőmérséklet alacsony és nincs szükség nagy nyomásra, könnyen biztosítható a környezetre veszélytelen üzem, és a létesítményeket a nagyvárosok területén is el lehetne helyezni. A kezdeti érdeklődést azonban derékba törte a csernobili katasztrófa, és az atomfűtőművek ügye lekerült a napirendről. Oroszországban foglalkoznak hajóra telepített kis teljesítményű atomerőművekkel, távoli települések energiaellátására.

11.5. Erőműépítés

Az első atomreaktor (Hanford, USA) rendeltetése hasadóanyagok előállítására volt az atombombához, az első gyakorlati alkalmazás rakétákkal felszerelt tengeralattjárók hajtása volt nyomottvízes reaktorokkal. Az atomerőművek első generációja a katonai létesítmények adaptációja volt. Az első villamosenergia-termelő reaktort 1954-ben helyezték üzembe (Obnyinszk, SZU). A katonáknál azonban a biztonság követelménye háttérbe szorult a hatékonyság mögött, ezért a polgári alkalmazás céljára új biztonsági filozófiát érvényesítő második generációs atomerőművek kifejlesztésére került sor. Ma már csak a Szovjetunió volt tagállamainak területén található néhány első generációs veterán.

¹⁵² Molten salt breeder reactor, sóolvadékos szaporító reaktor.

Az EU csatlakozási feltételként írta elő az ilyen erőművek leállítását Bulgáriában, Litvániában és Szlovákiában. Oroszországban és Ukrajnában még egy ideig üzemen marad néhány példánya a Csernobilban alkalmazott típus erősen korszerűsített válfajának. Már az első generációs erőműveknél is olyan a reaktor konstrukciója, hogy atomrobbanás nem alakulhat ki. Ez – sokak hiedelmével ellentétben – Csernobilban sem következett be, ott egy hatalmas termikus robbanás, majd ezt követően egy ugyancsak nagy kémiai robbanás vetette szét a létesítményt.

Az atomerőművekkel szemben a legsúlyosabb kifogás, hogy egy súlyos balesetnél az emberek életét és egészségét veszélyeztető radioaktív anyagok szabadulnak ki. Mivel az atomerőműben található radionuklidok több mint 99%-a a fűtőelemekben található, az atomreaktorok legsúlyosabb üzemzavarát az aktív zóna sérülése vagy olvadása jelenti. Ennek oka a termikus egyensúly megbomlása, vagy a reaktor hőteljesítményének nagyon erős megnövekedése a hűtés elvesztése, illetve erős lecsökkenése miatt. Ha a fűtőelemek túlhevülnek, burkolatuk elvesztheti a hermetikusságát, esetleg elroncsolódnak, a hatalmas radioaktív anyagmennyiség egy része kiszabadulhat, és ionizáló sugárzásával veszélyezteti az embereket és az élővilágot. Számos védelmi berendezés és automatikus beavatkozó szerv szolgál az ilyen folyamatok megelőzésére, a bekövetkezett hiba el-lesúlyozására, pl. üzemzavari tartalék-hűtőrendszerek beiktatásával, illetve a működés leállítására. A biztonsági filozófia azonban nem elégszik meg az aktív védelemmel, egymást körülölelő fizikai gátakat kíván meg az esetleg kiszabadult radioaktivitás elszigetelésére. E mélységben tagolt, többszintű védelem elemei: a hasadóanyag stabil oxidkeramikus szerkezetbe foglalása, a fűtőelemek szélsőséges hatásoknak ellenálló hermetikus burkolata, az aktív rendszert magába foglaló, nagy igénybevételekre méretezett primer kör, az esetleg kiszabadult aktivitás visszatartására szolgáló konténment. A zónaolvadásnál kiszabadult radionuklidok nagy része a zóna olvadékába kerül, és főleg az illékonyak (nemesgázok, jód, cézium és trícium) juthatnak tovább gázok, gőzök és aeroszolok formájában. A konténmentben a fizikai elszigetelésen kívül különféle technológiai eljárások (szűrés, oldás, kicsapatás) feladata a mobillá vált radionuklidok visszatartása. A durranógáz-képződés megakadályozására gondoskodni kell az esetleg fejlődő hidrogén rekombinálásáról.

A második generációs atomerőműveket úgy tervezték, hogy az erőmű mellett élők egészségi kockázata ne legyen nagyobb más tevékenységekből származó kockázatnál. Ennek feltétele, hogy a zónaolvadás kockázata ne legyen nagyobb 10^{-5} /év-nél, vagyis 100 000 évnél gyakrabban ne fordulhasson elő. Ez iszonyatosan nagy idő, körülbelül ennyivel ezelőtt jelent meg a Földön ősünk, a Homo sapiens. De ez még nem jelenti a környezet szennyezését, ahhoz egyidejűleg a konténmentnek is meg kell sérülni, ami egy nagyságrenddel csökkenti a kockázatot.

Megjegyzendő, hogy tökéletes biztonság nem létezik, a kockázat azt fejezi ki, hogy minden folyamatnak van bizonyos veszélyessége, legyen az természetes, vagy emberi eredetű. Bármilyen körülményben terveznek is egy műszaki létesítményt, annak veszélyességét csak csökkenteni lehet, a kockázatot teljesen kiküszöbölni nem, mert anyagok tönkremenetele, előre nem látható természeti hatások, emberi hibák előidézhetnek veszélyes helyzeteket. Az adott esetben a veszély feltétele, hogy környezetbe kikerülő

radioaktív részecskék sugárzása meghaladja a mindig mindenütt érvényesülő természetes eredetű háttérsugárzást, aminek éves dózisa területenként ingadozik (Magyarországon 3,1 mSv).

Az 1960-as években ambiciózus atomprogramok születtek, amiknek nagy lendületet adott az olajkrízis, világszerte nagy számban épültek az atomerőművek. Ezt a lendületet törte meg a Three Mile Island (TMI) atomerőmű balesete 1979-ben Harrisburgban (USA). Emberi hibából a reaktor túlmelegedett, a fűtőelemek megolvadtak és azokból radioaktív anyagok szabadultak ki. A környezetbe azonban nem kerültek ki, mert a nukleáris berendezéseket körülölelő védőgát – a konténment – teljesítette a feladatát, és visszatartotta azokat. Így ionizáló sugárzás senkinek sem okozott bajt. A helyzetet azonban rosszul kommunikálták, a média is hozzájárult a félretájékoztatáshoz, a kormányzó katasztrófaállapotot rendelt el és pánik tört ki. A menekülő lakosság körében közlekedési balesetek, koraszülések, szívrohamok fordultak elő. Az atomerőmű súlyos balesetének lehetősége erős antinukleáris közhangulatot váltott ki, néhány országban népszavazás döntött az atomprogram elutasításáról, több állam moratóriumot vezetett be atomerőművek építésre, az Egyesült Államokban 30 évig szóba sem jöhetett új atomerőmű építése, Ausztriában népszavazás utasította el a felépült atomerőmű üzembe helyezését.

A heves ellenérzések idővel lecsillapodtak, az atomerőművek stabil és biztonságos üzeme megnyugtatólag hatott. Az atomenergetika ismét erőre kapott, amit azonban derékba tört az emberiség legnagyobb technikai eredetű katasztrófája, a Csernobili szörnyűség 1986-ban. Egy hibás – lényegében első generációs – konstrukció, és az üzemviteli utasítások sorozatos durva megszegése termikus és kémiai robbanásokra vezetett, a szétrombolódott fűtőelemekből kiszabadult a radioaktív anyagok mintegy 4%-a. A reaktor nagy mérete miatt a nukleáris rendszert körülölelő teljes konténmentet nem építettek ki, a kiszabadult radionuklidok kijutottak a környezetbe. Azokat egy a reaktort körülvevő hatalmas grafittömb tíz napig tartó égéséből származó felhajtóerő közel 1 km magasságra juttatta, ahol a légáramok egész Európa felett szétterítették. Az áldozatok és károk szabatos felmérése lehetetlen, a mértékadó nemzetközi szakmai szervezetek közelítő becsléseket tettek közzé. A média és az antinukleáris civilszervezetek a következményekre időnként megalapozatlanul sok nagyságrenddel nagyobb értékeket publikálnak, a katasztrófa e propagandisztikus célú túlzások nélkül is elég borzalmas.

A katasztrófa nemcsak az érzelmeket és indulatokat szabadította el, hanem a szakma hitelét is aláasta. Az emberek jelentős része az életét és egészségét fenyegető veszélyt lát az atomerőművekben, amelyek félelmetes és érzékszervekkel nem észlelhető hatásoknak teszik ki az emberiséget. A kiszolgáltatottság érzése erősen befolyásolta a közhangulatot, ami politikaformáló erővé vált. Az antinukleáris mozgalmak erőteljes propagandával, egyesek még erőszakos akciókkal is igyekeztek az érzelmekre hatni, és indulatokat szítani. A politikai döntéseket nem a viszonyok tárgyyszerű elemzése motiválta, hanem a szavazatvesztés veszélye. Néhány ország harcosan atomerőmű-ellenesé vált, másokat is ennek követésére ösztönözve. Ausztria politikája ambivalens, hevesen harcol a cseh és szlovák atomerőművek ellen, viszont a szomszédos svájci és magyar erőműveket tolerálja. A politikai nyomás hatására egyes országokban (pl. Svédország, Németország) még a jól működő atomerőművek időelőtti leállítását is elhatározták.

A kialakult helyzet szükségessé tette az atomerőművek új, harmadik generációjának kifejlesztését, a biztonság és a gazdaságosság lényeges javítására. Ezt szolgálta az eleve 60 évre tervezett élettartam, valamint a zónaolvasásra legalább egy nagyszámszemponttal kisebb kockázat. Az Egyesült Államokban elvárás, hogy az atomerőművek okozta balesetek kockázata ne haladja meg az összes balesetek kockázatának 1%-ét, és hasonlóan az okozott rákos megbetegedések ne haladják meg az összes rákos megbetegedés 1%-ét.

Az idő ismét enyhítette az ellenérzést, az atomerőművek nagyon biztonságos létesítményeknek bizonyultak, és a világ kritikus energiahelyzetében az atomerőművek több problémára megoldást kínáltak (növelik az ellátásbiztonságot, nem bocsátanak ki üvegházgázokat, viszonylag olcsón termelik a villamos energiát). Az atomenergia reneszánsza kezdett kibontakozni, nagyvívű atomerőmű-építési programok láttak napvilágot, számos fejlődő ország is erre az útra kívánt lépni. És ekkor (2011-ben) bekövetkezett a harmadik nagy katasztrófa Fukusimában. Eddig elképzelhetetlen mértékű, 9-es fokozatú földrengés és 15 m-es szökőár pusztított a japán erőműben, radioaktivitás jutott ki a környezetbe (főleg a tengerbe). A károkról még nincs hiteles felmérés, a veszélyeztetett lakosságot idejében kitelepítették, így sikerült az áldozatok számát minimalizálni. A távolabbi khatások még nem ítélték meg, Németország, Svájc és Belgium bezárja az atomerőműveit, sok ország lassítja atomprogramját, néhányan elvetették azt.

A nukleáris biztonság növelését több nemzetközi egyezmény is szolgálja. Három évente tartott felülvizsgálati konferenciákon kell beszámolni az államoknak a biztonság helyzetéről és a megtett intézkedésekről. A magyar helyzetet a nemzetközi közösség az eddigi konferenciákon megfelelőnek minősítette. Ez nemcsak az erőműre vonatkozik, hanem a biztonsági hatóság kompetenciájára is, és hogy befolyásoktól függetlenül tudja-e rendeltetését betölteni.

Az amerikai Energia Minisztérium nagyszabású kutatási programot indított a negyedik generációs (Generation IV.) atomerőművek kifejlesztésére. 10 iparilag fejlett ország és az EU is csatlakozott a programhoz, a közreműködésre magyar szándék is van. Olyan új elveken működő megoldásokat kívánnak kialakítani mind az erőművekre, mind az üzemanyagciklusra, melyek okafogyottá teszik az atomerőmű-ellenes érveket. A célok között szerepel, hogy veszélyes helyzet kialakulását fizikai folyamatok lehetetlenné tegyék, az erőműből ne kerüljenek ki fegyvergyártásra használható anyagok, és ne legyen szükség a hulladékok nagyon hosszú idejű tárolására. A kiválasztott típusok: héliumhűtésű gyorsreaktor, ólomhűtésű gyorsreaktor, nátriumhűtésű gyorsreaktor, olvasztott sók reaktor, szuperkritikus vizes reaktor és nagyon magas hőmérsékletű reaktor (többek között hidrogéngyártásra). Az IAEA a teljes üzemanyagciklust is magában foglaló reaktorfejlesztési programot indított (INPRO¹⁵³). Az utóbbi években felvetették a gyorsítóval vezérelt szubkritikus reaktor gondolatát is. Ennél a kritikus állapot megvalósításához

¹⁵³ International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles, nemzetközi projekt innovatív atomreaktorokra és üzemanyagciklusra.

szükséges többlet neutronokat a gyorsító szolgáltatóra, annak leállításával a láncreakció biztosan megszakad, védelmet szolgáltatva a reaktor megszaladása vagy termikus labilitása ellen. Sokan kétlik a szükséges nagy teljesítményű gyorsítók megvalósíthatóságát, ezért a megoldásnak nem az energiatermelésben látják a jövőjét, hanem a nagyaktivitású hulladék kezelésében.

11.6. Atomenergia Magyarországon

1966-ban egyezményt kötöttünk a Szovjetunióval egy atomerőmű szállítására, amit 1969-ben bizonytalan időre elhalasztottunk. A halasztás legfőbb oka, hogy ebben az időszakban, az olcsó olaj korszakában, sokkal kevesebbe került egy olajerőmű létesítése és üzemeltetése, mint egy atomerőműé. Az is motiválta a döntést, hogy nyugaton alkalmazni kezdtek olyan biztonságnövelő megoldásokat (védőburok, üzemzavari hűtés, fejlettebb védelmek és irányítástechnika stb.), melyek bevezetésében mi is reménykedtünk. A nekünk szánt első generációs erőművet Bulgáriában építették meg, annak leállítását az Európai Unió csatlakozási feltételként szabta meg, a nem kielégítő biztonság miatt. Az olajkrízis hazánkban ismét időszzerűvé tette atomerőmű létesítését, akkor már második generációs létesítmény szállítására került sor.

Az erőmű négy blokkját az 1980-as években helyeztük üzembe, azóta megbízhatóan működnek. Rendelkezésre állásuk nemzetközi összehasonlításban is kiemelkedő, radioaktív anyagok kibocsátása a környezetbe nagyságrenddel kisebb a megengedettnél, a környezetben élő lakosság sugárterhelése jelentéktelen. Egy számottevő súlyosabb üzemzavar fordult elő 2003 áprilisában, az sem az energiatermelő rendszerben, hanem egy elszennyeződött fűtőelemek megtisztítására kiépített berendezésben. Ennek konstrukciós hibája rossz döntésekkel párosulva a tisztítóban levő fűtőelemek túlmelegedését, majd roncsolódását okozta. Az üzemzavar senkinek sem okozott egészségkárosodást, és nem érintette az erőmű alapvető technológiai berendezését. Az anyagi kár viszont jelentős: a tönkrement fűtőelemek értéke, a következmények felszámolásának költsége, a blokk hosszú kényszerszünete miatt elmaradt villamosenergia-termelés és annak pótlása. Ennél is súlyosabb az itthon és külföldön elszenvedett presztízsesvesztés. Az üzemzavar többféle ok szerencsétlen egybeesésének a következménye, ezek közül azonban kettő – a jövőre vonatkozó tanulság miatt – külön kiemelendő. Az egyik a biztonsági követelmények háttérbe szorulása a gazdasági érdekek mögött. A másik a biztonsági kultúra romlása, amiben szerepet játszott a túlzott magabiztosság is, de főleg a zilált, konfliktusokkal teli munkahelyi légkör. Az utóbbinak legfőbb oka a politikai indíttatású, gyakori és nagyarányú személycserék a vezető beosztásokban.

A Paksi Atomerőmű üzemeltetését eredetileg 30 évre tervezték. A mértékadó nemzetközi szakmai és politikai intézmények az erőmű biztonságát egyenértékűnek tekintik a vele egykorú nyugati atomerőművékével. A tapasztalatok azt mutatták, hogy a főberendezések öregedése a vártnál lassabb, így az erőmű üzemidejét – viszonylag kis ráfordításokkal – meg lehet hosszabbítani, anélkül, hogy ez a biztonság rovására menne. Ennek a lehetőségnek a kihasználása a magyar energiaellátás kulcskérdése. Jelentős

tényező az atomerőmű stabilizáló szerepe az energetikai ellátásbiztonság erősítésében. Az energiahordozók helyettesíthetősége révén ez a stabilizáló hatás az energiaellátás más szektorait is kedvezően befolyásolja. Az energiaimport nagy részarányából származó bizonytalanságok ellensúlyozására egyéb eszközeink szerények, hazai ásványi és megújuló energiavagyonunk csekély, geopolitikai helyzetünk és gazdasági erőnk kevés lehetőséget ad az import diverzifikálására. Fontos körülmény, hogy az atomerőmű annyi szén-dioxid-kibocsátást takarít meg, amennyi az összes többi magyar erőmű emissziója, ezért Paks leállítása lehetetlenítené kiotói vállalásunk teljesítését. Az sem közömbös, hogy a magyar erőművek között a Paksi Atomerőmű önköltsége a legalacsonyabb, ami hozzájárul a lakosság közhangulatát erősen befolyásoló energiaárak leszorításához. Az erőműépítés bizonytalansága is az élettartam-hosszabbítás mellett szól, ugyanis a következő 15 évben mintegy 6 GW-nyi új erőműre lesz szükség, amit Paks bezárása 2 GW-tal növelne és 3 Mrd m³-rel növelné a földgázszükségletet. Gondot okozna a Paksot helyettesítő hőerőmű számára a szén-dioxid kvóta biztosítása is. Mindez meggyőzően hatott a politikai pártokra, az Országgyűlés majdnem egyhangúlag támogatta a törekvést az atomerőmű üzemidejének meghosszabbítására, amire az OAH – a követelmények teljesülésének ellenőrzése után – 2012 végén az engedélyt kiadta.

A Paksi Atomerőmű kedvező helyzetében nagy szerepe van annak, hogy előrelátóan sikerült létrehozni egy jól felkészült szakembergárdát. Ennek köszönhetően már az erőmű létesítése előtt rendelkezésre állt egy színvonalas szellemi háttér a kutató, tervező, oktató intézményekben, ami nagyban hozzájárult az erőmű és a beszállító vállalatok műszaki gárdájának kialakításához. A szakemberekre támaszkodva az erőmű létesítése során olyan – a szocialista táborban teljesen szokatlan – minőségbiztosítási rendszert sikerült kialakítani, ami megalapozta a hatékony és biztonságos üzemet. A hozzáértő szakmai háttér a későbbiekben is jelentős szerepet játszott az üzemeltetés, karbantartás és felújítás során felmerült műszaki problémák megoldásában. Nem lebecsülendő az a támogatás, amit a nemzetközi együttműködés és tapasztalatcsere jelentett. E lehetőség kihasználása is felkészült szakembereket kíván meg, akik nemcsak az ismeretek megszerzésére képesek, hanem aktív szerepet tudnak vállalni a nemzetközi szakmai közösség működésében. A tudomány és az ipar új fejleményeinek követése a jövő megalapozása érdekében is fontos. A Paksi Atomerőmű pótlására nem látszik más kiút, mint új atomerőmű építése, az viszont már egy új generáció tagja lesz, a jelenlegitől lényegesen eltérő működési elvekkel. Az erre vonatkozó döntésnek fontos feltétele megfelelő arányú társadalmi támogatás (pl. egy pozitív kimenetelű népszavazással), valamint a beruházás pénzügyi hátterének biztosítása külföldi befektetőkkel.*

* A kézirat lezárás után született döntés Paks bővítéséről.

11.7. A hulladékprobléma

Az atomenergetika neuralgikus kérdése a radioaktív hulladékok sorsa. A radioizotópok alkalmazásánál és a nukleáris létesítményekben mindig keletkeznek hulladékok, amiket úgy kell kezelni és tárolni, hogy sugárzásuk ne károsítsa az emberek egészségét. Ez jó közelítéssel a felezési idő hússzorosánál következik be, az alatt a sugárzás egy milliomod részére csökken. Néhány radioizotóp felezési idejét a *11.1. táblázat* mutatta be.

Az izotópkalkuláció hulladékainak aktivitása többnyire kicsi, és a felezési idejük is rövid. Ilyen hulladékok elhelyezésére Püspökszilágyiban létesült tároló, a felszínen kialakított medencékkel. A létesítmény több mint négy évtizede megfelelően működik. A nagyobb aktivitású preparátumokat (pl. fémes anyagokat vizsgáló izotópokat) átmenetileg gyűjtik, végleges elhelyezésükre egy másik létesítményben kerül sor.

Összetettebb a feladat a nukleáris létesítmények – mindenképp az atomerőmű – hulladékaival. A kis és közepes aktivitású, nem túl hosszú felezési idejű (< 30 év) hulladékok sorsa megoldott. Azokat megfelelően elszigetelve pár száz évig kell tárolni stabil környezetben. Erre alkalmas létesítmények mind felszíni, mind felszín alatti kivitelben sok országban működnek. Létrehozásuk nem mindig egyszerű, a helybeli lakosság féltelmei, a környezetvédők ellenkezése, a hatóságok követelményei miatt. Ezt tükrözte a hazai megoldás sorsa is.

A tervezők eredetileg a Mecsekben Magyaregyred környékén találtak megfelelő helyszínt erre a célra. A helybeliek azonban féltek, hogy elvész a jövedelmük, amit külföldiek vadásztatásából nyernek, mert feltételezték, hogy a létesítmény el fogja riasztani a vadászokat. Ezért mindenféle negatív szakvéleményt és társadalmi összeköttetést igénybe vettek az elképzelés elhárítására. Így változott a tervezett hely Ófalura. Itt az ellenzés szervezettebb lett, szakértői véleményekkel és társadalmi megmozdulásokkal alátámasztva. A rendszerváltás előtti izgatott légkörben a média felkarolta a tiltakozást, követelve, hogy az állam vegye figyelembe az érintett emberek véleményét. Ófalu politikai ügyévé vált. Bár az illetékes szakértők (még az MTA erre létesített bizottsága is) a helyszínt minden szempontból alkalmasnak tartotta felszíni radioaktív hulladéktároló létesítésére, azt nem engedélyezték a társadalmi egyeztetés hiánya miatt.

A zsákutcából kivezető utat az OAB¹⁵⁴ találta meg. Felmérette az ország területét, hol található alkalmas helyek a hulladéktárolásra, az ottani településeket megkérdezte, hajlandók-e annak befogadására. Hosszas egyeztetések és vizsgálatok után Bátaapátira esett a választás, ahol nemcsak a földtani adottságok voltak kedvezőek, hanem egy helyi népszavazással megerősített készség a befogadásra. Az alkalmasságot nagyon részletes földtani és egyéb kutatásokkal kellett igazolni, és rendkívül szigorú hatósági követelményeknek kellett eleget tenni az engedély megszerzéséhez. A létesítményt gránitban alakították ki 250 méterrel a felszín alatt, azt 2012-ben helyezték üzembe, és az erőmű teljes élettartama alatt be tudja fogadni a keletkező kis és közepes aktivitású

¹⁵⁴ Országos Atomenergia Bizottság.

hulladékot. A felszín alatti létesítés 20–30-szor került többre az országnak, mint Ófalunál a felszínre tervezett ~1 milliárd Ft.

A kieső helyen fekvő, nem nagyon jómódú, kis faluból Bátaapáti korszerű, viruló településsé vált. Tetemes jövedelme van a hulladéktárolóból (adó, foglalkoztatás, szolgáltatások, turizmus stb.), infrastruktúráját nagyvárosok is megirigyelhetik. A fellendülés a környező településekre is kiterjed (még Ófalura is).

Gond a nagy aktivitású hulladékkal van, elsősorban a kiégett fűtőelemekkel. A sugárvédelem még ezeknél is megoldható, probléma a hosszú élettartamból adódik. A kiégett fűtőelemekben egy-két hasadványnak, és főleg a keletkezett aktinidáknak nagyon hosszú a felezési ideje, ezért azokat 10 000–100 000 évre kell elszigetelni a környezettől. Jogos aggály, hogy ilyen hosszú időre elképzelhető-e a megoldás maradandósága? Természeti, politikai, társadalmi változások hatására néhány évtized is elegendő, hogy elhatározások, cselekedetek, intézmények feledésbe merüljenek.

Jelenleg a kiégett fűtőelemeket 5 évig vízzel teli medencében pihentetik, mialatt aktivitásuk és a remanens hőfejlődés jelentősen csökken. Ezt követően, ellenőrzött körülmények között, átmeneti tárolóban helyezik el ~100 évre. Egy ilyen létesítmény a Paksi Atomerőmű szomszédságában épült meg. A végleges elhelyezésre – a jelenleg általánosan elfogadott felfogás szerint – stabil geológiai formációban kell lehetőséget találni. Eddig egyetlen ilyen tároló létesült katonai eredetű nagyaktivitású hulladéknak (Karlsbad, USA). Több országban folyik előkészítő munka ilyen erőművi hulladéktároló létesítésére, leginkább gránitban, vagy agyagban. Az elképzelések többsége a kiégett fűtőelemek közvetlen temetését irányozza elő, betonkonténerekbe ágyazva. A temetendő mennyiség két nagyságrenddel csökkenthető, ha újrafeldolgozással különválasztják a nagyaktivitású alkotókat, és üvegbe ágyazva csak azokat kell elhelyezni.

A kiégett fűtőelemeket néhány évig visszaszállítottuk a Szovjetunióba. Az ottani rendszerváltás aláásta ezt a konstrukciót. Elvileg van mód egy hasonló új megállapodás megkötésére, jelentős költségek fejében. De ennek komoly bizonytalansági tényezője az Ukrán tranzit. (Más, pl koreai szállítónál is előfordul, hogy magára vállalja a kiégett fűtőelemek sorsát.)

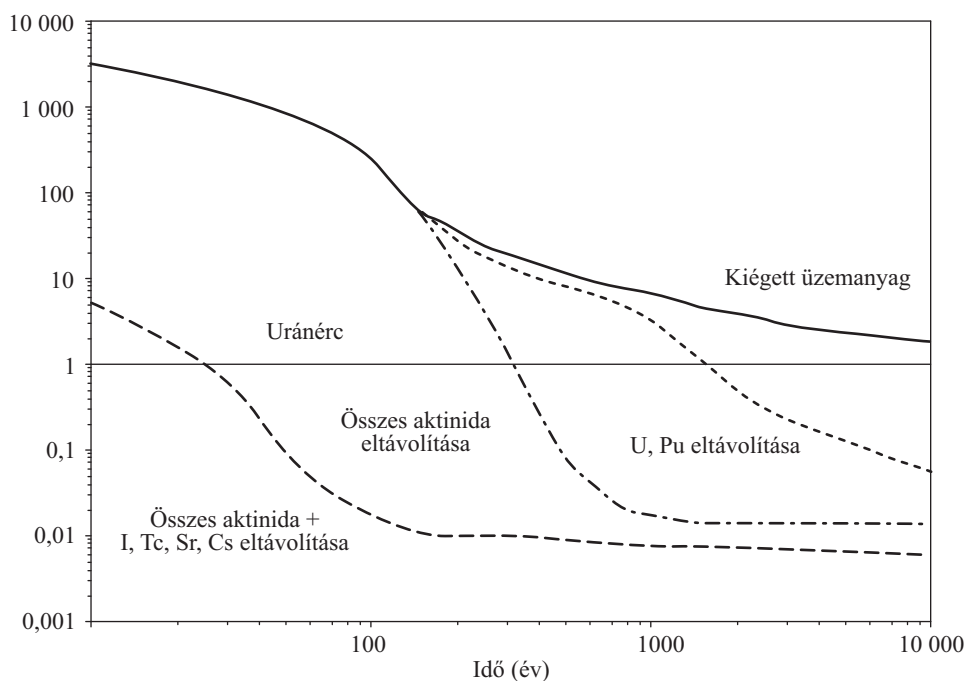
A Mecsekben Boda térségében találtak egy előnyös tulajdonságú agyagformációt (aleorulit), amiben elképzelhető a nagyaktivitású hulladék elhelyezése. Egyelőre azonban célszerű kivárni, hogyan alakulnak a külföldi elképzelések, lehetséges, hogy adódik számunkra előnyösebb megoldás a közvetlen temetésnél.

Intenzív kutatómunka folyik, hogyan lehetne elkerülni a nagyon hosszú elszigetelési időt. Laboratóriumi körülmények között már igazolták a transzmutáció lehetőségét, ami alkalmasan megválasztott neutronok ütközésével a hosszú felezési idejű izotópokból rövid felezési idejű, vagy stabil elemeket hoz létre. Kérdés, hogy ez ipari méretekben gazdaságosan megvalósítható-e. Egy másik lehetőség a hasadóanyagok „égetése”, vagyis a hosszú felezési idő eliminálása hasadás létrehozásával. Ennek során kémiai módszerekkel el kell különíteni a legkellemetlenebb hosszú felezési idejű izotópokat (hasadványokból Tc, I, Cs, aktinidákból Am, Np, Cm, és – ha nem hasznosítják – a Pu-t), majd gyorsreaktorban vagy gyorsítóval vezérelt reaktorban történne az átalakítás energiater-

meléssel összekapcsolva. Az ilyen megoldások kifejlesztése a IV. generációs program része. A 11.3. ábra érzékelteti, hogyan csökkenthető a szükséges tárolási idő.

Vannak szervezési javaslatok is a hulladékprobléma megoldására, pl. nagy nemzetközi tároló egy sivatagban (ARIUS¹⁵⁵), vagy, hogy a fűtőelemeket az erőművek csak lizingeljék az energiatermelés idejére, azok végleges sorsáról gondoskodjanak a szállítók (GNEP¹⁵⁶).

Az urán láncreakciójának legellentmondásosabb terméke a ²³⁹Pu. Egyrészt nagy lépésekben kibővíti az energiabázist, hiszen szaporító reaktorokban az uránvagyon több mint 99%-át kitevő, de láncreakcióra nem fogható 238-as uránizotóp nagy részéből 239-es plutónium hasadóanyag válik. Másrészt bombakészítéshez előnyösebb anyag az uránnál, jóval kisebb a kritikus tömege, és nagyobb a láncreakció valószínűsége.



11.3. ábra. Az aktivitás lecsengése

A ²³⁹Pu-t eredetileg a Manhattan-projekt keretében, az e célra létrehozott reaktorokban állították elő, de a konverzió kisebb mértékben minden atomreaktorban létrejön, és a kiegészített fűtőelemek reprocesszálásával a plutónium kinyerhető. Ez az alapja az an-

¹⁵⁵ Association for Regional and International Underground Storage, egyesülés regionális és nemzetközi föld alatti tárolásra.

¹⁵⁶ Global Nuclear Energy Partnership, Globális Atomenergia-társulás.

tinukleárisok azon érvének, hogy az atomerőművek előmozdítják az atomfegyverek elterjedését. Ezért tiltotta be Carter amerikai elnök a polgári célú újrafeldolgozást, de a példát más országok nem követték. Sőt az angol és francia reprocesszálók üzletszerűen is vállalták kiégett fűtőelemek újrafeldolgozását, a lehetőséggel Németország és Japán él is. Időközben kitűnt, hogy az újrafeldolgozás polgári célokra is előnyös, ezért Obama elnök a tilalmat feloldotta.

A 239-es plutónium kellemetlen anyag, kezelése nagy elővigyázatosságot igényel, ami fokozott biztonsági és őrzési követelményekkel jár együtt. Tárolása körülményes, a tárolótartály törése is bekövetkezhet, mert egyrészt maga a plutónium erősen kiterjed a hőmérséklet növekedésével, másrészt a fejlődő gázok nyomása is jelentős (ezért a szállításnál háromszoros védőburkolatot alkalmaznak). Több éves tárolása problematikus, mert bomlása során erősen sugárzó amerícium képződik, amit el kell távolítani. Kémiai mérgező is, bár veszélyességének mértéke vitatott. A plutónium rideg és alacsony forrtpontú, fémekkel reakcióra hajlamos anyag, ezért önmagában nem, csak vegyületekben vagy ötvözetekben alkalmas üzemanyag. A nukleáris nagyhatalmak ma az atomfegyverekből kiszertelt felesleges plutóniumkészleteik leépítésére keresik a megoldásokat. Oroszország jelentős mennyiségű plutóniumot szállít az Egyesült Államokba, további feldolgozásra. A társadalmi elfogadtatás szempontjából a fő kérdés felhasználásának megakadályozása fegyvergyártásra. Ez lehetséges megbonthatatlan kémiai vagy fizikai kötések kialakításával, amire vannak megoldások, de a gyakorlatban nem alkalmazzák. A plutónium jövője lehet közvetlen temetés, de nagy felezési ideje miatt hosszú időre kell elszigetelni a környezettől, ami hasítással lerövidíthető. Ígéretesebb lehetőség visszavezetése az energiatermelésbe, a jelenlegi könnyűvízes reaktorokban, vagy jövőbeli felhasználás gyorsreaktorokban. Néhány második generációs reaktorban már jelenleg is használnak urán- és plutónium-oxidok keverékéből készült MOX¹⁵⁷ fűtőelemeket. A ²³⁹Pu bekeverése helyettesíti az urán dúsítását, a MOX fűtőelemek egyszer-kétszer reprocesszálhatók is. De a plutónium újra termelődik, így sorsa véglegesen nem oldódik meg, csak időben eltolódik.

Az atomerőmű hulladékainak elhelyezése nem olcsó. Ennek pénzügyi fedezetét a Nukleáris Pénzügyi Alap biztosítja, ami a nukleáris létesítmények évenkénti befizetéséből gyűlik össze. A kötelezettség mértékét az Országgyűlés szabja meg, már jócskán meghaladja évenként a 10 milliárd Ft-t. Ugyancsak ebből kell finanszírozni az erőmű lebontását is.

11.8. Mechanikai munka

Egy időben kezdeményezték a nukleáris robbantásokat polgári feladatokra is, pl. nagy léptékű földmunkákhoz, föld alatti üregek kialakításához, szénhidrogén-termelés fokozására. Ezek a kezdeményezések azonban nagyon éles társadalmi ellenállást váltottak

¹⁵⁷ Mixed oxide, oxidkeverék.

ki, egyrészt a környezet szennyezésének veszélye miatt, másrészt az ilyen tevékenységet nehéz megkülönböztetni a fegyverfejlesztést szolgáló robbantásoktól. Időközben az ilyen alkalmazásoktól elálltak, mivel nemzetközi egyezmény a nukleáris robbantások minden módját tiltja.

Gyakran merülnek fel elképzelések atomhajtású járművekre, de ez ténylegesen csak olyan hajóknál valósult meg, melyek hosszú ideig a kikötőktől távol tartózkodnak a tengereken; repülőgép anyahajók, jégtörők, tengeralattjárók. Az atomrakétákkal felszerelt atomhajtású tengeralattjárók a katonai elrettentő stratégia legfontosabb eszközei, hiszen félelmetes fegyverükkel váratlanul az óceánok bármely pontján felmerülhetnek.

11.9. Villamosenergia-fejlesztés

Természetesen a nukleáris villamosenergia-fejlesztés fő irányát az atomerőmű jelenti, de léteznek közvetlen átalakítási lehetőségek is. A villamosan töltött α - és β -részecskék kilépése tulajdonképp töltéshordozók szétválasztása, ami a villamosáram-források működésének alapja, így működő kis teljesítményű áramforrásokat készítenek is. A többnyire β -sugárzó radioizotópot az egyik elektródán elhelyezve és a kilépő elektronokat a másikon összegyűjtve, néhány mW teljesítményű, hosszú ideig stabil feszültséget szolgáltató áramforrás alakítható ki. Az áramforrás úgy is megvalósítható, hogy az elektronokat egy katód emittálja, a ráeső ionizáló sugárzás hatására. Nagyobb teljesítmény nyerhető a radioaktív bomlás hőjéből. Ilyenkor a sugárzást elnyelő anyagokban fejlődő hőből termovillamos vagy termoionos átalakítással villamos áramot állítanak elő, a megvalósítható kapocsfeszültség mV és V közötti érték. Előszeretettel alkalmaznak ilyen áramforrásokat az űrtechnikában. Az alkalmazott izotóp 1–10 W teljesítményre többnyire ^{90}Sr , 10–100 W teljesítmény tartományban ^{238}Pu . Legfőbb előnyük hogy a hosszú felezési idejű izotópok sokéves felügyeletmentes üzemet tesznek lehetővé. Az áramforrás szétbontásakor a benne levő radioaktív anyag sugárveszélyes, ezért csak megfelelő őrzéssel, vagy megközelíthetetlen helyeken alkalmazhatók.

11.10. Elektromágneses hullámok

Radioizotópok bomlása elemi részecskék, illetve fotonok (α , β , γ , n) kibocsátásával jár, melyek az atomokat ionizálni tudják. Ezt az ionizáló sugárzást sokféle célra alkalmazzák, anyagvizsgálatra, mérési feladatokra, reakciók kiváltására, mezőgazdasági termékek besugárzására, a nyomjelző izotópokat folyamatok követésére. A legfontosabb hasznosítási terület a nukleáris medicina, az élettani folyamatok és a szervek működésének diagnosztikája, és esetenként terápiája.

Az ionizáló sugárzás legfontosabb kérdése hatása az élő szervezetekre, mindennek előtt az emberi sejtekre. A hatás a dózistól, vagyis az idő során elnyelt energiától függ. Az emberi faj fejlődése során bizonyára alkalmazkodott a mindig mindenütt érvényesülő háttérsugárzáshoz, amit a talajban található radioizotópok és a kozmikus sugárzás hoz

létre. Értéke a felszínközeli közet jellegétől és a tengerszint feletti magasságtól függ. A sugárzás szintjét emberi eredetű hatások is növelik, épített környezetben az építőanyagokban található radioizotópok, a légköri atomrobbantások utóhatása, és az orvosi diagnosztika és terápia szerepe. (Sugárzó anyagok még az élőlényekben – az emberek testében is – vannak.)

Ionizáló sugárzás érheti az embert a környezetből (külső sugárzás) vagy az anyagcsere során a szervezetbe került radionuklidokból (belső sugárzás). A sugárzás ionizálja a sejteket alkotó atomokat, így reakcióképes gyökök vagy molekulák képződnek, melyek reakcióba lépve biológiailag aktív szerves vegyületekkel megváltoztatják azok szerkezetét és működését. Ha a sejt anyagcseréjében szerepet játszó vegyület számottevő hányada megváltozik, károsulhat az élő sejt szerkezete és működése (alak, nagyság, osztódás, genetikai anyag), ez érintheti a sejtek anyagcseréjét (enzimek változása, kölcsönhatások módosulása), befolyásolhatja a sejtek funkcióit is (struktúraváltozás, funkciómódosulás) és szélsőséges esetben a sejt pusztulására is vezethet. Az ionizáló sugárzás leginkább a sejtműködés irányításában kulcsszerepet játszó DNS-molekulákra hat, részben közvetlenül, részben biokémiai reakciókon keresztül. A DNS-molekulák módosulásának következménye lehet sejtek rákos burjánzása, illetve ivarsejtek sérülése esetében genetikai mutáció, bár az utóbbi embereknél nincs egyértelműen bizonyítva. A tapasztalatok szerint néhány száz mSv-es dózis felett rák kialakulásának valószínűsége arányos a dózissal. Ezt a lineáris kapcsolatot extrapolálják a kis dózisokra is, küszöbérték nélkül. A kis dózisok ilyen szerepe nincs bizonyítva (a DNS-molekulákat javító enzimek működését és más korrekciós mechanizmusokat gerjesztő kedvező hatásokról is vannak indikációk), mégis az általánosan elfogadott felfogás szerint minden többletdózis élettani hatása káros.

Mivel a kis dózisok és következményük között oksági kapcsolat nem bizonyítható, csupán sztochasztikus összefüggést lehet feltételezni, vagyis minél nagyobb a dózis, annál nagyobb a rákos megbetegedés valószínűsége. Ez a megközelítés azonban csak populációkra alkalmazható, egyénekre nem. Ezért vezették be a kollektív dózis fogalmát, ami a dózisok összegét jelenti, amit egy csoport kapott. Ezen az alapon becsülték meg a nemzetközi szervezetek, hogy a csernobili kibocsátás következtében egész Európában 50 év alatt néhány ezer rákos megbetegedés következhetett be. Természetesen az ionizáló sugárzás okozta rákok nem különböztethetők meg a sokféle karcinogén hatás következményeitől, melyek Európában évente mintegy 1 millió új rákos megbetegedést tesznek ki.

A rákos megbetegedés jellege és lefolyása nagyon különböző, attól függően, hogy milyen szervet ért a sugárzás. A sztochasztikus jellegnek megfelelően a sugárzás csupán a betegség kiváltó oka, a dózistól csak a megbetegedés valószínűsége függ, a további lefolyás, annak súlyossága és kimenete attól független. A következmények a besugárzást követő hosszabb lappangási idő után jelentkeznek. A leukémia átlagos lappangási ideje 8 év, a többi ráké ennek 2–3-szorosa, a betegség lefolyása ezt követően 1–2 évtized. Vannak gyógyítható és gyógyíthatatlan típusok, lefolyásuk lehet gyors, vagy lassú, egyes rákok áttételeket is okozhatnak. Nem minden rák halálos, a mortalitás a megtámadott szervtől, a szervezet ellenálló képességétől és a gyógyítás lehetőségétől függően nagyon

eltérő: pl. a tüdőrák szinte bizonyosan halálos, a pajzsmirigyráknak viszont csak nagyon kis hányada letális. Különösen érzékenyek a karcinogén hatásra a vérképző szervek (főleg a csontvelő), a tüdő, a máj, és a női emlő. A csernobili katasztrófa következményeként eddig konkrétan csak pajzsmirigyrák-eseteket tapasztaltak, a pajzsmirigyben felhalmozódó jód hatására, egyéb rákos megbetegedések szaporodására nincsenek egyértelmű indikációk. A kibocsátott ^{131}I (felezési ideje 8 nap), a levegő – fű – tehén – tej hatásláncon keresztül, az erőmű körüli övezetben mintegy 2000 többlet megbetegedést okozott a korábbi átlaghoz képest, főleg gyerekeknél. A pajzsmirigyrák jól gyógyítható, a halálos kimenetek aránya ezrelék nagyságrendű.

Bizonyos dózis felett az ionizáló sugárzás megöli a sejteket, szövetek halnak el és a következmények determinisztikussá válnak, sugárbetegség alakul ki. A determinisztikus és sztochasztikus hatások választóvonalára 0,5–1 Sv körüli érték, a szervezet ellenálló képességétől függően. A kétféle következmény összemosása sok zavar forrása. A sugárbetegség súlyossága arányos a dózissal, enyhébb válfaja gyógyítható, súlyosabb esetben az életidőt csökkentő maradandó hatással jár, és néhány Sv-nél nagyobb dózissal rövid időn belül többnyire halálos kimenetű.

Kisebb dózissal (0,5–1 Sv) a heveny sugársérülés kimenete enyhe, csak a bőrön keletkeznek égési sebek, esetleg émelygéssel és hányással párosulva, kialakulhat a fertilitás zavara is. Nagyobb (1–2 Sv) dózis a szemén hályogot okoz, súlyosabb esetben károsodnak a vérképző szervek is, melyeknek azonban jelentős a regenerálódó képessége, így van lehetősége a gyógyításnak. 2–5 Sv-nyi dózissal a vérképző szervek – főleg a csontvelő – károsodása már olyan fokú lehet, hogy az 1–2 hónapon belüli halálos kimenet valószínűsége jelentős. Az ennél nagyobb, 5–15 Sv-nyi dózis a tápcsatorna nyálkahártyáját és az emésztőrendszert is károsítva 1–2 héten belül nagy valószínűséggel halálos. 15 Sv felett a sugárzás az idegrendszert és érrendszert is megtámadja, néhány napon belüli elhalálózást okozva. Egészen nagy dózissal belső vérzés lép fel, megindul a fehérvérsejtek és vérlemezkék lebomlása, a halál órákon belül beáll.

Sugárbetegséget okozó nagy dózis csak a nukleáris berendezések közvetlen közelében érvényesülhet, baleseteknél, vagy az előírások súlyos megsértése során. Ekkora, 1–20 Sv-nyi dózist a csernobili katasztrófánál is csak a sérült reaktor közvetlen közelében tartózkodó személyzet – kárelhárítók, tűzoltók, mentők – kapott. A sugárbetegséggel kezelt mintegy 200 személyből 27 rövid időn belül, további néhány sérült az ezt követő 10 éven belül meghalt. Az erőművön kívül élő lakosságot csak a környezetbe kibocsátott radioaktív anyagok sugárzása érthette, ezek sugárzásának szintje legfeljebb sztochasztikus következmények kiváltására képes. A 10 napig tartó kibocsátásból Magyarország területét két hullám érte el, az egyéneket ért sugárzás 50 évre számított kumulált hatása kevesebb, mint a természetes háttérsugárzás egyévi dózisének negyede.

Természetesen az egyéni ellenálló képesség szerint a kimenetek erősen szórnak, Csernobil és a japán atomtámadások után is életben maradtak, illetve gyógyíthatóknak bizonyultak egészen nagy dózist kapott személyek is. Csernobil túlélőiről nagyon bizonytalanok és ellentmondásosak az információk. A 30 km-es zónából kitelepítettek 10–100 mSv nagyságrendű sugárdózist is kaphattak, de távolabbi körzetekben is előfordult hasonló mértékű hatás. Európa többi országában a dózis 1–2 mSv alatt maradt.

Számos más megbetegedésért (fertilitási, keringési és emésztési zavarok) is a katasztrófát teszik időnként felelőssé, de erre bizonyíték nincs. Vitathatatlanok viszont a félelem és stressz kiváltotta pszichoszomatikus zavarok, egyrészt az életmód drasztikus változása miatt a kitelepítés és áttelepítés következtében, másrészt a rettegés hatására a sugárzás egészségi következményeitől.

Az érintett területi szervek, sőt kormányok is időnként áldozatok megalapozatlanul óriási számáról tesznek közzé adatokat. Nehéz megítélni, hogy ezek mennyiben célozzák a közvélemény szimpátiájának és a nemzetközi szervezetek támogatásának a megnyerését, és mennyiben tükrözik az antinukleáris szervezetek túlhajtott érvelésének befolyását.

III. RÉSZ

Energiaszállítás

Az energiaforrások egyenlőtlen földrajzi eloszlása miatt az energiaellátáshoz nagy volumenű szállítási tevékenységre van szükség. Egyrészt biztosítani kell az energiahordozók továbbítását az energiaforrások helyétől a végső felhasználókhoz, gyakran nemzetközi forgalomban, esetleg több országon át, és nemritkán energiaátalakítási eljárásokon keresztül. Másrészt a felhasználóknál (üzemek, intézmények, háztartások stb.) újabb szállítási (elosztási) tevékenységekkel kell eljuttatni az energiát minden fogyasztóhelyre, esetenként egy vagy több energiaátalakítási eljárást is igénybe véve. A fejlődés során az energiaszállításra sokféle megoldást alkalmaztak, az éghető hulladékok gyűjtögetésétől a vezetékes ellátási módokig. A jelenlegi, kontinenseket csövekkel és villanyvezetékekkel sűrűn behálózó, bonyolult rendszerek aligha tekinthetők végleges megoldásnak. Nehéz elképzelni, mi lesz helyettük, talán az autonóm energiaellátás? Egyes elemei ennek már megjelentek, a háztetőkre szerelt napkollektorok és napelemek, a hőszivattyúk, a szélkerekek, a mikrobiológiai eljárások hidrogén előállítására, a zsugorodó méretű nukleáris áramforrások, és még várnak ránk a tudomány sok meglepetést okozó, újnál újabb felfedezései. Lehet, hogy az energiahálózatok egyszer majd egy elavult technika maradványaivá válnak, és a hatalmas energiaátalakító művek egy része műszaki dino-szauruszokként fog kihalni?

12. Energiahordozók külkereskedelme

A világkereskedelem legnagyobb tétele a fosszilis energiahordozók hihetetlenül megnőtt – sok milliárd tonnára rúgó – forgalma, aminek bonyolításához mindennapos gyakorlattá vált azok szállítása, akár több ezer km-es távolságra is, mind szárazföldön, mind a tengereken. A 12.1. táblázat szemlélteti, hogy alakult az energiahordozók nemzetközi kereskedelme 2011-ben.

12.1. táblázat. Energiahordozók világkereskedelme

Primer energiahordozó	Felhasználás, Mtoe	Import, Mtoe	Import/ felhasználás, %	Részesedés energia- importból, %
Szén	3 475	641	18	13
Kőolaj	4 159	2 295	55	47
Földgáz	2 727	817	39	17
Primer villamos energia	1 018	75	7	2
Biomassza	1 776	10	1	–
Egyéb	173	–	–	–
Világfelhasználás	13 330	3 838	29	100
Szekunder energiahordozó Folyékony üzemanyag	3 430	1 051	30	21

Az import fedezi a világ energiafelhasználásának mintegy harmadát, az Európai Unióban az arány ennek kétszerese, Magyarországon pedig mintegy 80%, külkereskedelmi mérlegünkben az energiainport kereken 10%-ot tesz ki.

Az alapvető nemzetközi energiaszállításokat többnyire hosszabb időre kötött magánjogi kereskedelmi szerződések szabályozzák, amit esetenként állami garancia, vagy kormányközi megállapodás is támogat. A nagy horderejű konstrukciókat hosszas gazdaságdiplomáciai tárgyalások készítik elő, amiben az államok legmagasabb szintű vezetői is aktív szerepet vállalnak. A megállapodások gyakran technikai kérdésekre is kiterjednek, pl. energiaforrások közös kiaknázására, magisztrális szállító rendszerek közös építésére, az ellentételezések konkrét módjára. Az érdekek érvényesítését a tárgyaló felek össze szokták kapcsolni energetikán kívüli kérdések megoldásával, esetleg vitás kérdések rendezésével. Magát az energetikát is érinthetik a viták, pl. az Európai Unió és Oroszország között évek óta húzódnak a tárgyalások, hogy az oroszok tegyék magukévá az Unió liberalizált energiapiaci módszereit, viszont az Unió ne korlátozza az oroszok tulajdonszerzési törekvéseit ezen a piacon.

Az energiagazdálkodás operatív lépéseinek bonyolítására piaci ügyletek szolgálnak. A kőolaj és az üzemanyagok már régen tőzsdei cikkek, az azonnali üzletekre vonatkozó spot piac a földgázra és a sárga pogácsára is kialakult, az utóbbi években létrejöttek a villamosenergia-tőzsdék is.

A jelentős energiaforrások kiaknázásához szükséges beruházásokra és az energia nagy távolságú szállítására gyakran alakulnak nemzetközi konzorciumok. Ezek előmozdítására jött létre sokéves egyeztetés után 1994-ben az Energia Karta Egyezmény, alapvetően a kelet-nyugati energiakereskedelmi és -szállítási feltételek megteremtésére. Az egyezmény célja volt, hogy a FÁK területén található hatalmas energiavagyont hozzáférhetővé tegye az OECD-országok számára, meghatározva a piaci magatartás szabályait. Bár az egyezmény gyakran hivatkozási alap, alapvető rendeltetése meghiúsult. Oroszország épp kőolaj- és földgázexportjának bevételeire támaszkodva stabilizálta politikai és gazdasági helyzetét, és nem szorulva a nyugati tőkére, öntörvényű erős szénhidrogén exportórré vált.

Az energiahordozók külkereskedelmének bonyolításához szövevényes műszaki, gazdasági, jogi és politikai követelményeknek kell eleget tenni. A feltételrendszer összetett, eleget kell tenni nemzetközi megállapodásoknak, ki kell elégíteni kereskedelemtechnikai, vámeljárási, szállítástechnikai, biztosítási stb. követelményeket, a szokásos pénzügyi megállapodások kiegészülnek sajátos elszámolástechnikai kérdésekkel (tarifák, szállítás ütemezése, paraméterek hatása). A szállítmányok veszélyessége miatt megkülönböztetett szerepe van az élet- és vagyónbiztonságnak, aminek követelményeit részletes nemzetközi előírások szabályozzák, különös figyelmet érdemelnek a veszélyes anyagokra vonatkozó kikötések. A szerződésekben a szerteágazó feltételek jogi megalapozása nagyon fontos, mivel a jogszabályok országonként eltérőek, és jogviták kritikus kérdése lehet, hogy mely ország törvényei vagy milyen nemzetközi megállapodás tekintendő mértékadónak.

Nemritkán szállítási optimalizáció dönti el az energiaellátás jellegét. Előnyösebb-e a kőolaj-finomítót a tengeri olajkikötők közelébe telepíteni és azok termékeit szállítani a fogyasztókhoz, vagy célszerűbb-e a fogyasztói centrumban végezni a kőolaj-feldolgozást, oda szállítva a kőolajat? Olcsóbb-e a fogyasztói súlypontban levő erőműbe szállítani a szenet, vagy a bánya mellé telepített erőműből villamos vezetékeken továbbítani az energiát?

Az energiaellátás stratégiai jelentősége miatt nagy súlya van a politikai szempontoknak. A nagy léptékű energiaszállítások a KGST-tagországokba jelentős szerepet játszottak a Szovjetunió befolyásának növelésében. A több országot átszelő energiaszállító vezetékek létesítése és üzeme körül a gazdasági érdekellentéteken túlmenően nemritkán nemzetközi politikai konfliktusok is kialakulhatnak. Nemcsak a gazdasági szempontok, hanem a hatalmi érdekek is mozgatták az éveken keresztül zajló vitát, milyen útvonalon szállítsák Európába a földgázt a Kaszpi-tenger körüli országok, és nem véletlenül kellett több állam vezetőjének parafálni a csővezetékek nyomvonalára kötött szerződéseket. A magyar – nemritkán változó – döntéseket is sokszor a szállítási lehetőségek és feltételek motiválják, hogyan célszerű diverzifikálni szénhidrogénimportunkat, hogyan alakítsuk villamosenergia- és földgázhálózatunkat.

Energiaimportunk nagy részaránya miatt számunkra különösen fontos a nemzetközi szállítások időnként változó feltételeinek figyelembevétele. Földrajzi helyzetünkől

adódik, hogy rendszerint több országon keresztül kell a különféle energiahordozók tartós tranzitálásának politikai, műszaki és gazdasági feltételeit biztosítani. Gyakori hazai igény, hogy az Európai Uniót rá kellene bízni olyan közös energiapolitika kialakítására, ami optimalizálja az energiaimportot. Ez illúzió a tagállamok nagyon divergáló érdekei és törekvései miatt. A nemzetközi szállításoknak vannak kockázatai is, pl. a balkáni háborúk több évre lehetetlenítették az Adria-vezeték üzemét és időnként a dunai szállítás lehetőségét is megbénították. Ukrajnával is voltak viták, főleg a csővezetékes szállítások tranzitdíjai és a nukleáris anyagok szállításának biztonsága és fizikai védelme körül.

Energiaimportunk nagy részaránya miatt különösen fontos a szállításokat terhelő bizonytalanságok nagyon gondos felmérése. A behozatalt politikai, gazdasági, műszaki, természeti, társadalmi kockázatok terhelik, ezeket csak több lábra támaszkodva lehet ellensúlyozni, ezért importunkat diverzifikálni kell mind energiafajták, mind energiaforrások és a szállítási útvonalak tekintetében. Nem könnyű ennek optimumát kialakítani, az ellentmondó üzleti és politikai érdekek között.

13. Energiaforgalom a tengereken

Az energiaszállítás útjában a tengerek sem jelentenek akadályt, a kőolaj, a földgáz és a szén nemzetközi kereskedelmének nagy részét a világtengereken keresztül bonyolítják. A tengeri forgalom módot ad az energiaimport származási helyének és szállítási útvonalának szabad megválasztására, vagy szükség esetén módosítására, ami növeli az ellátás rugalmasságát és biztonságát. Ezzel szemben a szárazföldi szállítás adott szállítási infrastruktúrához (vasút, közút, vízi út) vagy vezetékhez kötött.

A tengeri szállítás viszonylag olcsó, költsége nem éri el a kőolajár 10–15%-át, de a szállítási tarifa változó, amit befolyásol az üzemanyagár, az útvonal, a hajópark kihasználtsága, előre nem látott események, pl. sztrájkok, és más tényezők. A váratlan kiadások kiküszöbölésére a vásárlók igyekeznek a kirakó kikötőben jelentkező CIF¹⁵⁸ áron szerződni a behajózási kikötőben érvényesülő FOB¹⁵⁹ ár helyett. A kettő közötti különbség a fuvar költségen kívül a biztosítási, kirakási, tárolási és átrakási költségből tevődik össze.

A világkereskedelem áruforgalmából évente mintegy 6–7 milliárd t-nyit szállítanak a tengereken keresztül, aminek kerekén a felét energiahordozók (kőolaj, kőolajtermékek, földgáz, szén) teszik ki. Ebben a kőolaj a legnagyobb tétel, nemzetközi kereskedelmének mintegy 90%-a a világtengereken bonyolódik, nagyrészt több száz kt kapacitású tartályhajókkal. A több ezer tartályhajóból álló kőolajszállító park kapacitása sok száz Mt, ezek teszik ki a világ tengeri hajóparkjának több mint harmadát. A tengereket szinte uralják a sűrű forgalmat bonyolító olajtankerek, a legnagyobb kapacitású és a legjobban automatizált teherhajókat, a szupertankereket kőolajszállításra építették. A legnagyobb – több száz kt kapacitású – szupertankerek (VLCC,¹⁶⁰ ULCC¹⁶¹) 400–500 m hosszú, 60–80 m széles, 20–35 m merülésű hajóóriások. Jó néhányuknak a szállítási kapacitása elér 0,5 Mt-t, sőt épült 1 Mt-s gigász is. Nagy hátrányuk, hogy a számítógép-irányítású navigálás ellenére mozgékonyaságuk korlátozott (több km-es fékút és hasonló fordulási sugár). A tankerek élettartama rövid (~15 év) az olajból kiüledő korrozív iszaplerakódás következtében. Ennek eltávolítására a hajókat tisztítani kell, ami a szigorú korlátozások hatálya alá lépéséig a tengerek szennyezésének számottevő forrása volt. Ma már a tengerek súlyos ökológiai katasztrófáit a sérült tankerek olajszennyezése okozza.

¹⁵⁸ Cost, insurance, freight, fuvardíjjal és biztosítással számított költség.

¹⁵⁹ Free on board, díjmentesen a fedélzetre szállítva.

¹⁶⁰ Very large crude carrier (160 000–320 000 DWT/deadweight tonnage).

¹⁶¹ Ultra large crude carrier (>320 000 DWT).

A kőolaj-szállítás hatalmas forgalma ösztönözte a tengerhajózás fejlesztését, ennek eredményeképp erősen leszorították a tengeri szállítóhajók fuvar költségét és fajlagos energiafelhasználását. A Közel-Keletről még Afrika megkerülésével is ez a legolcsóbb szállítási mód Európába, annak ellenére, hogy a hajókat hajtó 20–25 MW teljesítményű erőgépek üzemanyag-fogyasztása nem jelentéktelen.

A hatalmas hajók fogadására megfelelő kikötőkre van szükség, ahol a nagy merülés lehetséges, ott bővítették a kikötőket, ahol nem, ott újakat építettek, vagy biztosították a feltételeket a kőolaj átszivattyúzásához kisebb tankhajókba. Európa legfontosabb kőolajkikötői (Rotterdam, Hamburg, Trieszt) óriási forgalmat bonyolítanak.

A folyékony üzemanyagok tengeri forgalma is jelentős, de sokkal kisebb volumenekben és jóval rövidebb távolságokra. Ezért a szállításokra kisebb tankhajókat alkalmaznak, melyek mozgékonyabbak, és a kisebb kikötőket is meg tudják közelíteni.

A nemzetközi földgázforgalom harmada is a tengereken keresztül bonyolódik, cseppfolyósított formában (LNG), amikor a földgáz térfogata a gázhalmazállapotnak kétszeresére, azaz kétszeresére csökken. Az erre szolgáló tartályhajókon -161 °C -nál alacsonyabb hőmérséklet kell biztosítani a cseppfolyós halmazállapot fenntartásához. A szállítás különleges infrastruktúrát igényel, a feladóállomáson cseppfolyósító, a fogadó állomáson elpárologtató berendezéseket, és a szállító járművön a kriotechnikai feltételek biztosítását. A tankereken a hőmérséklet stabilizálásának kényes feladatát úgy oldják meg, hogy a folyékony fázis felett annyi metángőzt szívznak el, amennyinek a párolgási hője ellentételezi a hőszigetelésen keresztül belépő hőt. Ez a napi 0,2–0,3%-nyi veszteség a hajó hajtására használható. A technológia tűz- és robbanásveszélyes, a biztonsági követelmények nagyon szigorúak. A szállító flotta gyorsan bővül, a legnagyobb tartályhajók kapacitása már $250\ 000\ \text{m}^3$ -t is meghalad, és vannak rendelések még nagyobbakra. Ugyancsak gyorsan szaporodnak Európa partjain a fogadó terminálok, az ellátásbiztonság növelése érdekében. A tengeri gázzalítás fajlagos költsége kétszerese az olajszállításénak, a szállítás és a halmazállapot-változtatási folyamatok mintegy 20%-nyi veszteséggel járnak. Az LNG-t szállító tankerek, ma már a nemzetközi földgázforgalom harmadát bonyolítják.

A magyar energiapolitikában többször felvetődött bekapcsolódásunk az LNG-forgalomba. Egy időben nagy reményeket fűztünk csatlakozásunkhoz az Adrián előirányzott horvát, valamint a Balti-tengeren tervezett lengyel terminálhoz. Bejelentettük részvételünket az AGRI¹⁶² egyezményben, mely a Fekete-tengeren keresztül cseppfolyósítva tankerekben irányozta elő a földgázzalítást. Ezek a remények azonban szertefoszlottak, a koncepciók lekerültek a napirendről, egyrészt a világgazdasági válság következtében erősen visszaestek az európai földgázigények, másrészt a palagáz színrelépése megakasztotta a cseppfolyós földgázforgalom gyors növekedését. Az is szerepet játszott, hogy a robbanásveszélyes LNG-tankerek forgalmát a keskeny tengerszorosokban és a sűrűn lakott partvidékek mellett hevesen ellenezték.

¹⁶² Azerbejdzsán–Grúzia–Románia Interkonnektor.

A szén világkereskedelme a második világháború után lendült fel, a termelésnek kereken 15%-át értékesítik a külkereskedelmen keresztül, aminek 90%-a a tengereken keresztül bonyolódik 30–150 kt-s hajókkal. A szénszállító teherhajók jóval kisebbek a tankereknél, rakodásuk az ömlesztett tömegárúknak megfelelően történik. Nagy távolságra csak jó minőségű, kevés ballasztanyagot tartalmazó feketeszenet gazdaságos szállítani. A kínálat nagy, a hatalmas külfejtésekből (Ausztrália, Dél-Afrika, Kolumbia, Egyesült Államok, Indonézia) származó, olcsón kitermelhető szén még a tengeri szállítással is versenyképes. Az európai erőművek jó része importálja a szenet, a fő forgalmat az Atlanti-óceán európai partján fekvő ARA kikötők (Amsterdam, Rotterdam, Antwerpen) bonyolítják. Az Európai Unió 2020-ra már szénfelhasználásának kétharmadát fogja importból fedezni.

Időnként felvetődik import szénre erőmű építése a Duna mentén (pl. Mohácsnál). Az elképzelés gyenge pontja a tüzelőanyag-ellátás. Az ARA kikötőkből a továbbszállítás vasúton elviselhetetlen költséget jelentene, a Rajna–Majna–Duna vízi úton pedig épp a magyar szakasz bizonytalan hajózhatósága a korlát. Az utóbbi vonatkozik a Fekete-tenger felőli dunai szállításra is. Így megvalósítható változatnak a lengyel szén importja tünik vasúton, de a versenyképességet megkérdőjelezi a szállítás több országon keresztül.

A tengeri forgalomnak vannak sérülékeny keresztmetszetei. A legtöbb gondot a Perzsa-öböl okozza, ami a világ legfontosabb tranzitútvonala. Ezen keresztül bonyolódik a Közel-Kelet (Irán, Irak, Kuvait, Szaúd-Arábia, Emirátusok) olaj- és földgázforgalmának nagy része. Egyedül a sűrűn áthaladó szupertankerek sok millió t kőolajat szállítanak el naponta, itt halad át a világ kőolajforgalmának negyede. Már az öböl neve is konfliktusok forrása, sok ország az Arab-öböl megnevezéshez ragaszkodik. Legszűkebb szakasza a 39 km széles Hormuzi-szoros, aminek lezárásával fenyegetőzik Irán, az ellene irányuló szankciók retorziójaként, egyes szakaszai el is vannak aknásítva. A forgalom biztosítására az Egyesült Államok 5. flottájának hadihajói rendszeresen járőröznek az öbölben. A zsúfolt öbölben hajók összeütközése, és kisebb fegyveres összecsapások is előfordulnak. A térségben uralkodó feszültség miatt súlyosabb következmények sem zárhatók ki, ez a közel-keleti háborús konfliktusok egyik lehetséges góca. A szoros megkerülésére Szíriából a Földközi-tengerhez, Irakból Arábián keresztül az Ománi-öbölhöz épül ki nagy kapacitású csővezeték.

Európa energiaellátásában fontos szerepe van a Szezei-csatornának. Az Európa és Ázsia közötti forgalmat biztosító csatornát több ezer évvel ezelőtt már az egyiptomi fáraók megépítették, de az betemetődött. A hajózási útvonalat többször újjáépítették (Traianus, Omár kalifa), de az nem bizonyult időtállóknak. A modern csatornát 1869-ben nyitották meg. Ezen a 163 km hosszú, helyenként csak 300 m széles szállítási útvonalon keresztül csak a kisebb merülésű hajók tudnak áthaladni (mintegy 150 kt-ig), így a nagyobbak kerülő útvonalakra kényszerülnek, pl. a Perzsa-öbölből csak Afrika megkerülésével juthatnak el Európába. A csatornán így is a világ kőolajforgalmának 5–6%-át bonyolítják.

A Szezei-csatorna megléte óta konfliktusok forrása. 1956-ban államosították, a forgalom biztosításának ürügyén Anglia, Franciaország és Izrael háborút indított Egyiptom ellen. A feszült nemzetközi helyzetben (amiben a magyar forradalomnak is szerepe volt),

egy új világháborútól tartva az USA politikai és gazdasági nyomással kikényszerítette a háború befejezését. A közel-keleti háborúk miatt később is előfordult, hogy a csatornát rövidebb-hosszabb időre lezárták. A csatorna megkerülésére építették ki a Vörös-tenger és a Földközi-tenger között a Sumed-vezetékét.

Az útvonalnak egy másik veszélyes térsége a Vörös-tenger bejárata (Bab el-Mandab), ahol nem államok közötti konfliktus, hanem kalóztámadások fenyegetik a forgalmat. Ennek megakadályozására több ország küldött ide hadihajókat, egyelőre kevés sikerrel. A korszerűen felfegyverzett kalózok, fűge és gyors csónakjaikkal sok hajót kerítettek hatalmukba, köztük tankert is.

A Szezei-csatorna egy időben a magyar energiapolitikában is szerepet játszott. Az 1960-as években egy barterügylet megvalósítására törekedtünk, mely szerint a Közel-Keletre exportált magyar termékeket az olajországok kőolaj szállításával ellentételezték volna a Szezei-csatornán keresztül. Ennek továbbítására létesült az 1970-es években a Horvátországi Krk szigetén fekvő Omisaljából induló és Százhalombattáig tartó Adriakőolajvezeték. A koncepció – az olajországok érdektelensége miatt – meghiúsult, a vezetéken nem sok olajat szállítottak, a balkáni háborúk óta gyakorlatilag üzemen kívül van.

A hajóforgalomnak másutt is vannak különféle okokból veszélyeztetett szűk keresztmetszetei, pl. a Perzsa-öbölből a Távols-Keletre irányulónak az Indonézia és Malajzia között húzódó Malakkai-szoros, vagy a Fekete- és Földközi-tenger közötti forgalom útvonala a Boszporuszon és a Dardanellákon keresztül.

14. Energiaforgalom a szárazföldön

Az energiahordozók eljuttatása a térben szétszórtan elhelyezkedő és időben változó igényű fogyasztókhoz komplex logisztikai feladat. Magyarországon kereken 4,6 millió háztartást, fél millió vállalatot, kereken 3000 települést, közel 4 millió hazai gépkocsit (és nagyszámú külföldit) kell többféle energiahordozóval ellátni. A t.km-ben mért szállítási teljesítmények figyelembevételével az energiahordozók veszik igénybe a vasúti áruszállítás negyedét, a közúti szállításnak mintegy tizedét és a csővezetéki továbbításnak 87%-át.

A szárazföldi energiaforgalom mindig szállítási infrastruktúrához – vasút, közút, vízi út, csővezeték, villanyvezeték – kapcsolódik. Ezek átbocsátó képessége eleve korlátozza az energiaellátás lehetséges mértékét, a forgalom akadozása, vagy lehetetlenülése pedig az energiaellátás folyamatosságát. A szállítás egyenetlenségeinek, illetve az üzemzavarok áthidalására tartalékokra van szükség, energiahordozó készletekre, járulékos termelő kapacitásokra, párhuzamos szállítási útvonalakra. Tartalékokra az eltérő időbeli lefolyás kiegyenlítésére is szükség van az energiatermelés és felhasználás között.

14.1. Hagyományos energiaszállítási módszerek

A tüzelőanyagok szállítása hosszú ideig nem tért el a más áruk mozgatásának és továbbításának módjától. A legegyszerűbb az energiaforrás és a fogyasztó közötti közvetlen kapcsolat. A szénbányák közelébe telepített erőművek szénterére a bányából induló kötélpályára, vagy áthidaló vasszerkezetekre függesztett csillékbán hordják a szenet. Kisebb távolságra szállítószalagos megoldás is használatos, példázza a Mátrai Erőmű lignitellátása a visontai bányából.

Nagyobb távolságra a vasút a legkézenfekvőbb megoldás. Az ország vasúti hálózata meglévő adottság, ahhoz csak egy leágazó iparvágánnyal kell becsatlakozni a bányának, illetve – ahol gazdaságos – a nagyfogyasztóknak. A vasútnak mindig fontos feladata volt a tüzelőanyag-szállítás, amit speciális szerelvényekkel lát el, a szenet önürítő vagonokkal, a folyékony üzemanyagokat és tüzelőanyagokat megfelelő tartálykocsikkal. Az erőltetett magyar szénbányászat időszakában az elsőbbséget élvező szénzállítás erősen túlterhelte a MÁV teherforgalmát, a vagon- és mozdonyhiány gyakran okozott súlyos fennakadásokat a vasúti forgalomban. A szénfelhasználás visszaszorulása megszüntette ezt a problémát.

Jelenleg a MÁV áruszállítási kapacitásának negyedét köti le a különféle energiahordozók forgalmazása, aminek zömét a folyékony energiahordozók teszik ki. A közúti

szállításra hárul a kisebb fogyasztók, pl. az üzemanyag-töltő állomások ellátása, valamint a településeken belüli elosztás.

A szénfelhasználás és szállítás egyenetlenségeit tárolással egyenlítik ki. Jelentős mennyiségű szén könnyen tárolható mind a bányák, mind a nagy felhasználók szénterein. A szabadtéri elhelyezés hosszabb idejű tárolásnál a minőség romlásával jár, nedvesedés, aprózódás, illó alkotók párologása miatt. Különösen kényes kérdés az oxidálódás, nem megfelelően hűtött garmadákban a fűtőérték 10%-os csökkenésére is vezethet, túlmelegedett göcökben pedig öngyulladás is bekövetkezhet. Erősen nedves szenek nagy hidegben összefagyhatnak, lehetetlenítve a szállítást, ami néhányszor már komoly zavart okozott a hazai villamosenergia-ellátásban. A szénszármazékok (kocsz, brikett) tárolása kevesebb problémával jár.

Vasúton szállítják a nukleáris fűtőelemeket, mind friss, mind kiegészített állapotban. Erre a célra olyan konténereket fejlesztettek ki, amelyek nemcsak az ionizáló sugárzást nyelik el a környezet védelme érdekében, hanem épségüket a legsúlyosabb közlekedési balesetben is megőrzik. Az ilyen szállítmányok fizikai biztonságáról fegyveres őrzéssel kell gondoskodni, amit az illetékes állam rendőrsége, vagy katonasága biztosít. Az atomerőművek radioaktív hulladékait többnyire közúton szállítják, a sugárzás ellen védelmet nyújtó hordókban, vagy betonba ágyazva. A csomagolásnál ilyenkor is ki kell küszöbölni, hogy közlekedési balesetknél sugárzó anyag szóródjon ki.

A kedvező lehetőségekkel rendelkező fejlett országok nagy jelentőséget tulajdonítanak a belső vízi utak kiépítésének, melyek gyakran alapvető nagy kiterjedésű szállítási útvonalakká fejlődtek (pl. Duna–Rajna–Majna, Volga–Don, amerikai Nagy-tavak rendszere). Nyugat-Európában a teherforgalomnak negyedét-felét bonyolítják uszályokkal a belső vízi utakon. Vízi úton főleg szenet és folyékony üzemanyagokat szállítanak. A szállítási mód olcsó, de az infrastruktúra kiépítése csak hosszú időre biztosított kihasználással gazdaságos, mert a kikötők, rakodógépek és hajóterek létesítése költséges. A hajók hordképességét a folyók vízjárása korlátozza. A folyók és csatornák egy részén kényszerű üzemszünetet okoz a jégzajlás, a folyók befagyása, az árvíz és a köd (évente átlagosan a Dunán 25–30, a Tiszán 50 nap). Egyes folyamszakaszokon időnként az alacsony vízállás is korlátozza a hajók terhelhetőségét a megengedhető merülés mértékéig. Ilyen okból a Duna–Rajna–Majna vízi út szűk keresztmetszete a Nagymaros feletti Duna-szakasz, ahol duzzasztás híján a mederfenékből egyre jobban kiemelkedő sziklahátak korlátozzák a forgalmat. A folyamszabályozással a korlátozások jelentős hányadát ki lehet küszöbölni, de még így sem lehet minden vízi utat az év minden időszakában teljes mértékben rendelkezésre álló szállítási útvonalnak tekinteni. A szállítmányok nagy része azonban a forgalomnak ezt a szezonálisát elviseli. Sajnos a belvízi szállításra nálunk alig van lehetőség, mert hiányoznak a megfelelő kikötők, a rakodáshoz és tároláshoz szükséges berendezésekkel, és a megfelelő hajópark sem áll rendelkezésre.

Időnként felmerül egy import szénre alapozott erőmű építése a Duna partján, amihez ideális megoldás lenne a belvízi szállítás, akár az Atlanti-óceántól a Rajna–Majna–Duna vízi úton, akár a Fekete-tengertől. A dunai beszállítás lehetősége azonban problematikus, egyrészt az infrastruktúra hiánya, másrészt a magyar szakasz korlátozott hajózhatósága miatt. Sajnos az Atlanti-óceán európai partján a szén fő forgalmát bonyolító ARA

(Amsterdam, Rotterdam, Antwerpen) kikötőktől távol fekszünk és a továbbszállítás költsége vasúton akár az atlanti-óceáni, vagy balti-tengeri kikötőkből, akár földközi-tengeri vagy fekete-tengeri fogadóállomásról nagyon drága lenne. Ezek figyelembevételével a legelfogadhatóbb megoldásnak a lengyel szén behozatala tűnik, vasúton.

14.2. Szállítás csővezetéken

Nagy mennyiségű cseppfolyós és légnemű energiahordozók szállítására egyenletes és nagy kihasználás mellett csővezetékek jelentik a legolcsóbb megoldást, a fajlagos szállítási költség vasúton nagyságrenddel drágább, közúton pedig két nagyságrenddel kerül többre. További előny, hogy a szállítás folytonos, könnyen szabályozható, és kevés emberi munkaerőt igényel. Ennek ellentétele a magas beruházási költség, a 14.1. táblázat a különféle szállítási módok állóeszközterhének arányát mutatja be.

14.1. táblázat. Állóeszköz terhek aránya

Szállítási mód	Állóeszközterhek, %
Vasút	5
Közút	15
Tankhajó	20–30
Csővezeték	65–75

A csővezetéseken a szállítási sebesség néhány km/h, az áramlást helyenként beiktatott szivattyú, illetve kompresszor állomások biztosítják. Ezek energiaszükséglete nem jelentéktelen, tonna.km-re vetítve 0,1–0,2 MJ.

Csőveket friss víz és szennyvíz szállítására már az ókori birodalmakban is alkalmazták. A hőszolgáltatás és fűtés területén a különböző hőmérsékletű folyékony víz, valamint vízgőz csővezetékes szállítása a 19. században alakult ki. Majd megjelent a gázvilágítás, a városi gázhálózatok gyorsan terjedtek. Jelentős lépés volt a vezetékes szállítási mód megjelenése a kőolajiparban (1865). Rockefeller hatalmas olajbirodalmának megalapozásában jelentős szerepe volt annak, hogy megszerezte az olajvezetékek nagy részének tulajdonjogát. Kiterjedt csőhálózatok szolgálják az épületek központi fűtését, és a távhőszolgáltatást.

A magas beruházási költség miatt a csővezetékek sok évtizedes üzemre létesülnek, ami felveti az ellátás biztonságának gondját. Azt sokféle kockázat terheli, első helyen a műszaki biztonság említhető. A hosszú élettartam alatt öregedés, kifáradás, korrózió csökkentheti a megbízhatóságot, aminek ellensúlyozására rendszeres karbantartásra, időnként felújításra van szükség, különösen vonatkozik ez az armatúrákra és a gépészeti berendezésekre. A KGST-időszakban létesült magisztrális kőolaj- és földgázvezetékek esetében ez növekvő veszély, a fél évszázados életkoruk miatt. A hosszú vezetékek fokozottan ki vannak téve a természeti erőknek, földrengés, árvíz, vihar, talajsüllyedés, jegesedés és hasonló hatások zavarhatják meg a működésüket. 1987 különlegesen zord

januárjában az armatúrák lefagyása bénította meg hazánk földgázellátását. Az emberi károkozás spektruma is széles, üzemanyag-vezetékek megcsapolása, berendezések ellopása, vezetékek felrobbantása (így a Közel-Keleten terroristák jó néhány kőolajvezetékét bénították meg) a példái ennek. Társadalmi megmozdulások (sztrájkok, erőszakos konfliktusok, forradalmak) sem zárhatók ki a kockázatok közül, és több kőolajvezeték zártak le országok közötti politikai konfrontáció miatt. Végül gazdasági kérdések is okozhatnak zavarokat, például amikor tranzitországok (Belorusszia, Ukrajna) árvita miatt lezárták az orosz olaj, vagy földgáz útját Európába. Mindez az ellátásbiztonság fokozott jelentőségét támasztja alá. Különösen vonatkozik ez kőolaj és földgáz ellátásunkat biztosító, két Oroszországból kiinduló extrém hosszú magisztrális vezetékre.

Csővezetéseket tengerek fenekére is fektetnek, ez főleg a földgáz nemzetközi forgalmában játszik szerepet. Amerikában zagy vagy szuszpenzió formájában néhány mm-es szemmagyságú szén csővezetéki szállítása is előfordul (létezik 1700 km hosszú vezeték is). Ez a szállítási mód nagy mennyiségek szállításánál gazdaságos, csak kemény szekenél jöhet számításba, mert a barnaszének mállanak és eltömődést okozhatnak. A szállításhoz legalább a szén mennyiségével azonos mennyiségű víz is szükséges, és az áramlás fenntartása jelentős energiabefektetést igényel. Ugyancsak energiaigényes a felhasználás helyén a szén leválasztása (szűréssel, centrifugálással) és esetleges szárítása hővel.

14.2.1. Folyékony energiahordozó szállítás

A kőolajat kizárólag csővezetéken továbbítják a termelő kutaktól a kőolaj-finomítóba, vagy a tengerparti feladó kikötőkbe; a kőolajtankereket fogadó kikötőkből szintén a kőolaj-feldolgozó üzemekbe irányulnak a csővezetékek. Az ellátásbiztonságot a kőolajfinomítók többirányú táplálásával biztosítják, a kőolajvezetékek sűrűn behálózzák Európát. Magyarországon a százhalombattai DKV¹⁶³ tölt be centrális szerepet.

Hazánk kőolajimportjának zöme egy a Volga menti Szamarából induló, több országot ellátó magisztrális kelet–nyugati csővezeték (Barátság) két leágazásán keresztül érkezik. A számos országot átszelő vezeték hossza meghaladja a 4000 km-t, kapacitása 100 Mt/év. A forgalom zavartalan, kivéve azt a két napot, amikor 2007-ben egy orosz–belorusz árvita következtében a Barátság vezetékét lezárták, ami érintette Európa jelentős részének kőolajellátását, és kiváltotta az Európai Unió heves reakcióját. A magyar kőolajellátás tartalékát az Adria-vezeték biztosítja, annak kapacitása az orosz szállítások zavara esetén elegendő teljes behozatalunk átvitelére, és a tengeri forgalomban – normális körülmények között – mindig hozzá lehet jutni kőolajhoz. Így kőolajimportunk ellátásbiztonsága megfelelőnek tekinthető. Az Adria-vezeték üzemét ugyan néhány hónapig a Balkán-háborúk lehetetlenítették, jelenleg pedig környezetvédelmi aggályokat vetnek fel, de ez nem akadályozza szükség esetén a szállítás biztosítását. Ez természetesen

¹⁶³ Dunai Kőolajipari Vállalat.

pénzbe kerül, ellátásunk az Adria-vezetéken 2–5 USD/bbl többletköltséget jelentene a Barátság vezetékhez viszonyítva.

A kőolaj-finomítóból a kőolajtermékeket a legnagyobb fogyasztókhoz (erőművek, vegyi művek, nagy elosztó központok) termékvezetéken (összesített hosszuk Magyarországon 1200 km) juttatják el. A közepes fogyasztókat többnyire vasúton látják el, a kisfogyasztók és a több mint 1000 töltőállomáson kialakított üzemanyag kúthálózat igényeit pedig közúton tartálykocsikkal szolgálják ki. A kúthálózat viszonylag egyenletesen fedi le az ország területét, 20–30 km-en belül mindenfelé lehet töltőállomást találni. Az üzemanyag kiskereskedelemben több külföldi társaság (Shell, OMV, Conoco, Agip, Lukoil) is részt vesz kúthálózat működtetésével, a nagykereskedelemben viszont a MOL-nak szinte kizárólagos szerepe van a Százhalombattai finomító centrális elhelyezkedésének köszönhetően. Az ellátásbiztonság szempontjából előnyös, hogy a térségben egymást kisegíteni képes három kőolajfinomító (Százhalombatta, Schwechat, Pozsony) között kicsik a távolságok, és azokból akár hajón, vasúton, vagy közúton is biztosítható ellátás, ha a termékvezetékek kiesnének.

Eltelítve az 1973. évi olajkrízist követő néhány héttől, a világ kőolaj- és üzemanyag-ellátása kiegyensúlyozott. Ebben nagy szerepe van a ma már általánosan érvényesülő néhány hónapos tartalékképzésnek, valamint a tengereken úszó tankhajókban található hatalmas készleteknek. A feltörő országok (főleg Kína és India) dinamikus növekvő üzemanyag-szükségletével a feldolgozó kapacitások bővülése nem mindig tart lépést, ami átmeneti zökkenőket okozhat, nem annyira a forgalomban, mint inkább az árakban.

A folyékony üzemanyagok tárolását – az 1970-es évek olajkrízisének tapasztalatai alapján – nemzetközi előírások szabályozzák. Az IEA az import, az EU a felhasználás háromhavi mennyiségének tárolását írja elő. Hazánkban e tartályokban tárolt készletek kezelése erre a célra létrehozott szervezet¹⁶⁴ feladata. Ha a fogyasztóknál tárolt készleteket is figyelembe vesszük, a hazai tartalék mértéke meghaladja a négy hónapot. A tengeri nagyhatalmak még nagyobb stratégiai tartalékokat képeznek, aminek tárolására tartályokon kívül felhasználhatók föld alatti üregek, felhagyott bányák, kiselejtett tankhajók, vagy nem termelő olajmezők is. A legnagyobb stratégiai tartaléka (~120 Mt) az Egyesült Államoknak van, az elnök közvetlen rendelkezése alatt. Kritikus időszakokban e hatalmas készletből piacra dobott mennyiségekkel befolyásolni lehet a kőolaj világpiacát is.

14.2.2. Földgázellátás

A földgázforrásoktól és az LNG-termináloktól a gázvezetékek a fogyasztói súlypontokba irányulnak, esetenként elosztó csomópontok közbeiktatásával. A földgáznak nagy előnye, hogy a forrástól a fogyasztóig csővezetéken szállítható, ez a kevés emberi munkát igénylő ellátás nemcsak kényelmes, hanem termelékeny is. Hátrány viszont, hogy ennek az infrastruktúrának a kiépítése költséges, a földgáz szállításához kétszeres

¹⁶⁴ Magyar Szénhidrogén Készletező Szövetség.

csőátmérő és ötszörös költség tartozik, mint azonos hőmennyiségű olaj szállításához. Ezért a vezetéképítés többnyire konkrét szállításokhoz kapcsolódik, a szállítási kapacitás minél teljesebb tartós kihasználásával.

A csővezetékes szállítási technika csúcspontját a néha több ezer km-es interkontinentális export vezeték képviseli, kapacitásuk meghaladhat 100 Mrd m³/év-et, a csőátmérő 2 m-t, a kezdőnyomás megközelítheti a 100 bar-t (a Kék Áram tenger alatti szakaszán 250 bar). E vezeték építése nagy követelményeket támaszt mind az acélszőgyártó üzemekkel, mind a vezetéképítési technológiával szemben. Hosszú vezetékknél a súrlódási veszteséget fedező nyomásesést 150–200 km-enként beiktatott kompresszorállomásokkal egyenlítik ki, melyek több MW-os gázturbináit földgáz működteti. A nemzetközi szállításokat bonyolító, nagy nyomású és nagy kapacitású vezeték a fejlett világban kontinenseket behálózó hurkolt hálózatokat alkotnak. Csővezetékkel tengerek fenékeire is fektettek, pl. a Földközi-, a Fekete-, az Északi- és a Balti-tenger alatt.

A Magyarországon lefektetett, mintegy 9000 km-nyi szénhidrogén-szállító csővezeték 80%-át földgázvezeték teszik ki. A belföldi gázellátási rendszer különböző nyomású vezetékekből áll. A földgázforrásokat, az import fogadó állomásokat és a fogyasztói súlypontokat összekötő gerinchálózatot 300–900 mm átmérőjű nagy nyomású (64 bar) vezeték alkotják. Ebből átadó állomásokon keresztül leágazó elosztó vezetékeken látják el a nagyfogyasztókat és a településeket, Budapestet 40 bar-os körgyűrű szolgálja ki. Főleg nagyfogyasztók és távoli települések ellátását nagyközepnyomású (< 25 bar) vezeték biztosítja, a többségében 6 bar-on üzemelő közepnyomású elosztórendszer táplálja a fogadó állomásokat, melyekből a fogyasztókat ellátó 20–33 mbar kisnyomású, vagy 75–100 mbar növelt kisnyomású vezeték kiindulnak.

Az 1960-as években a sikeres földtani kutatások Magyarországon számottevő földgázvagyont találtak. Ennek hasznosítására kormányprogramot indítottak, különféle eszközökkel ösztönözve a földgáz felhasználását. Az 1973-as olajkrízis újabb lökést adott az áttérésre a hőfejlesztésben a kőolajtermékekről földgázra. Ez különösen az erőművek, ipari kazánok és a hőszolgáltatás területén növelte a felhasználást. A kormányok a földgázár leszorításával a lakosságot is a gázfűtés irányába terelték, a települések mindent elkövettek bekapcsolódásuk érdekében a vezeték gázellátásba. A hazai települések kerekén 80%-a (2700 helység) be van kapcsolva a gázhálózatba, a lakások mintegy 80%-ának a fűtése földgázra alapul (~65% gázfűtés, ~15% gázalapú távfűtés). Mindezek hatására a földgázfelhasználás nagyon erősen megnőtt, részaránya jelenleg az energiamérlegben 40% körül mozog. Ez az egyoldalú, nagy arány akadályozza a kiegyensúlyozott energiagazdálkodást, visszatérő igény ennek csökkentése. Ezt azonban nem sikerül valóra váltani, többek között azért, mert az új erőműveket legnagyobb részben gázra telepítik. A lakosság is nehezen tér el ettől a kényelmes, könnyen szabályozható és tiszta fűtési módtól.

Az egyre növekvő igényeket a visszaszoruló hazai termelés képtelen volt fedezni, importra kényszerültünk, ma már az igények háromnegyedét importból fedezzük. A nagy volumenű, hosszú időre kötött szállítási szerződésekben a gázárat többnyire a kőolajárhoz kapcsolják, ezért a kőolaj nagyarányú drágulása a gáz drágulását vonta maga után. Mivel az importált gáz ára sokkal magasabb a hazai termelésű önköltségénél, a fo-

gyasztói árak erősen megnöttek, ami a gázfűtés és a távfűtés költségében tükröződött. Az alacsony jövedelmű családok közül sokan képtelenné váltak a fűtés költségének megfizetésére, a kialakult szociális feszültség politikai problémává vált, ami kihatott a parlamenti választások kampányára is. A 2002-es választásoknak szinte fő témája volt, melyik párt tud olcsóbb gázt biztosítani a lakosságnak. A szociális feszültség csökkentésére a kormány gázártámogatási rendszert vezetett be, aminek egyre növekvő terhe azonban a költségvetésből finanszírozhatatlanná vált. A rendszert rászorultsági feltétellel egészítették ki, ami bonyolult és áttekinthetetlen helyzetet teremtett. Végül állami árszabályozást vezetve be, adminisztratív árcsökkentést írtak elő, amit kiterjesztettek a lakossági rezszi minden elemére. Ez kitűnő eszköz volt politikai szimpátia szerzésére, de gazdasági hatása katasztrofális.

Az említett lépésekkel tulajdonképp az energiagazdálkodásra terhelték át a szociálpolitikai teendőket, deformálva a piaci viszonyokat. A támogatási rendszerek igazságtalanok, mert a sokat fogyasztóknak – vagyis a nagy jövedelműeknek, akik nincsenek is rászorulva – juttatja a legtöbbet. Az árak voluntarista eltérítése a tényleges költségtől gyengíti terelő hatásukat (pl. az energiatakarékosság ösztönzését), és hibás döntésekre vezet. Az energiaszolgáltatók a kieső jövedelem ellensúlyozására törekednek a minőség rovására, törölnek beruházásokat, kevesebbet költenek felújításra és karbantartásra, csökkentik a létszámot. Keresztf finanszírozás is kialakul, a lakossági bevétel csökkenését a nagyfogyasztói díjak növelésével ellentételezik, rontva azok versenyképességét. A többletköltség megjelenik a termelő vállalatok termékeinek árában, amit végső soron a lakosság fizet meg.

A magyar földgázimport egy a szibériai Orenburgból kiinduló, 1,5 m csőátmérőjű, 3000 km hosszú Együttműködés (leánykori nevén Testvériség) gázvezetéken érkezik. Eredetileg a vezeték nyomvonalát Magyarországon keresztül tervezték, de mi ezt akkor (1970-ben) erősen elleneztuk, amit két érveléssel indokoltuk: egyrészt nem szorulunk importra, másrészt kár értékes mezőgazdasági területet vezetéképítésre elpazarolni. Ezért került a nyomvonal Csehszlovákiába (Szlovákia ma földgázszükségletét a tranzitbevételből finanszírozza), nekünk csak egy Beregdarócnál belépő leágazás jutott.

A magisztrális gázvezeték egészében jól teljesíti a feladatát, 1–2 napos szállítási fennakadások azért néhányszor előfordultak, egy ízben egy nagyon kemény téli időjárás következtében, két alkalommal pedig az ukránok zárták el a csapot az oroszokkal folytatott árvitájuk nyomatékosítására. Ezek bizonyították, hogy egy vezeték nem jelent megfelelő ellátásbiztonságot, azt valamilyen módon meg kell növelni. Az LNG-re alapuló elképzelések meghiúsultak. Egy időben nagy reményeket fűztünk kapcsolódásunkhoz a nyugat-európai gázhálózathoz. Meg is épült a HAG¹⁶⁵ vezeték Győr és az osztrák Baumgarten csomópont között. Kitűnt azonban, hogy erről nagy volumenű importra nem lehet alapozni, mert lényegében orosz gáz reexportját bonyolítják megfelelő felárral, így inkább átmeneti és kiegészítő szállításokra alkalmas. Az árak szövevényes rendszere furcsa helyzeteket is teremthet, előfordulhat, hogy nyugatról olcsóbban jutunk orosz

¹⁶⁵ Hungarian Austrian Gaspipeline.

gázhoz, mint az Együttműködés vezetékén. A legtöbb szerződés a tartós szállításokra lekötött mennyiség kötelező átvételét írja elő (take or pay), így előfordulhat, hogy a nem szükséges mennyiséget még olcsón is érdemes tovább adni. Néha számunkra is kifizetődő az orosz gáz reexportja Ukrajnába.

A jelentős gázfelhasználó országokban a fogyasztás szezonális különbségeinek kiegyenlítésére vannak kereskedelmi tárolók. Magyarországon ezeket leművelt gázmezőkben alakították ki, a tárolt gáz mennyisége az ország éves felhasználásának mintegy fele. Üzemviteli tartaléknak tekinthető a megszakítható és alternatív fogyasztóknál tárolt tüzelőolaj készlet, amit akkor használnak fel, amikor földgázzal olajtüzelésre térnek át, a csúcsterhelés enyhítésére. Az áttérítésre a gázszolgáltatóval kötött szerződés ad módot, árkedvezmény fejében, de a folyékony tüzelőanyagok drágulása erősen mérsékli a figyelembe vehető nagyfogyasztók hajlandóságát.

Az Országgyűlés – nem nagyon szerencsésen – egy önálló biztonsági gáztároló létesítését határozta el, egyhavi felhasználás (~1,2 Mrd m³) fedezésére. Egy önálló, csak stratégiai készletezést biztosító tároló, valamint a feltöltéséhez és kiterheléséhez szükséges infrastruktúra hosszú ideig kihasználatlanul álló létesítmény. Ez nemcsak gazdaságilag hátrányos az országnak, hanem a vészhelyzeti működőképesség is bizonytalan a hosszú állásidő miatt. Az import-vezeték kiesését sem pótolja, mert sokkal kisebb a gáz kibocsátás teljesítménye (20 Mm³/nap).

Az önálló biztonsági tároló helyett a stratégiai készletezést folyamatosan működő, kereskedelmi célokat is kiszolgáló tárolókban célszerű megvalósítani, az azokban tárolt gáz egy részét kijelölve biztonsági tartaléknak, amit csak a jogszabályokban meghatározott módon lehet igénybe venni. Egy ilyen megoldás növelné az üzembiztonságot, csökkentené a stratégiai készlet koncentráltóságából adódó hátrányokat, és a területileg szétszórt tárolók a földgázellátó-rendszer megtáplálását kiegyensúlyozottabbá tennék. Az Európai Unióban a magas költségek miatt a stratégiai tárolók létesítésére irányuló kezdeményezések zátonyra futottak. A kormányzat kezdi átlátni a döntés hibáját, és a tároló működtetését kezdi átalakítani szokványos kereskedelmi tározóvá.

A kereskedelmi tározás ellátásbiztonsági szerepe kitűnően vizsgázott az egyik kiesésnél. A rendszerirányító a kelet–nyugati gázáramlást rövid idő alatt ellenkező irányra váltotta, és a tározókra támaszkodva zavartalan ellátást biztosított, még déli szomszédaink kisegítésére is teltt. Erre azonban nem lehet tartósan alapozni, mert föld alatti tározóink fő feladata a téli és nyári fogyasztás kiegyenlítése.

Földgázszükségletünk ellátásbiztonságára a legjobb megoldás egy eltérő nyomvonalon haladó második magisztrális vezeték más földgázforrásból. Nehezíti ennek megvalósítását, hogy a vezetéképítési elképzelések körül erős gazdasági, stratégiai és politikai érdekek ütköznek. A gazdasági érdekek kézenfekvőek. Nagy üzlet a részvétel egy ilyen sok milliárd euróba kerülő beruházásban, hatalmas bevételt biztosít a sok évtizeden keresztül áramló óriási gázmennyiség értékesítése és az érintett országoknak nagyon komoly bevétele származik a tranzitdíjból. Az érdekek érvényesítése többnyire a kuliszszák mögött zajlik, a lehetőséget remélő vállalatok erős lobbitevékenysége közepette, a jövedelmek felosztásában jelentős szerepe van a létesítést finanszírozó pénzintézeteknek. Sajnos a gázellátás kérdéseire mind a nemzetközi, mind a belpolitika rátenyerelt.

A stratégiai szempontok között a legjelentősebb az Egyesült Államok és Oroszország szembenállása. Az oroszok törekvése, hogy megőrizték hegemon szerepüket az energia-ellátásban, ütközik az Egyesült Államok érdekével. Ezért korlátozni igyekszik a politikai és gazdasági befolyásolás eszközeként tekintett orosz energiaszállítások mértékét, annak csökkentésére erős nyomást fejt ki az érintett országokra – köztük Magyarországra is. Az Európai Unió stratégiai szempontjai ellentmondásosak, egyrészt törekszik függetlenedni az orosz energiaszállításoktól, másrészt kiemelt célja az energetikai együttműködés erősítése Oroszországgal. Összehangolt külpolitika és energiapolitika híján a törekvések érvényesítése meglehetősen vérszegény, ezért a tagállamok saját nemzeti érdekeiket követik.

Az orosz energiafüggés enyhítésére a nyugat-európai országok kezdeményezték a Nabucco vezetékét, hogy azon Közép-Ázsiából szállítsanak földgázt Európába. Ez az ellátásbiztonság növelésére számunkra is ideális megoldás lett volna, de a projekt alapvető kérdéseire egy évtized során sem sikerült megoldást találni. Az eredeti elképzelés szerint a gáz a Kaszpi-tenger térségéből (Üzbegisztán, Tadzsisztán, Kazahsztán) származott volna, ezeket a forrásokat azonban a Gazprom lekötötte, és Oroszországon keresztül történő exportjukra gyűjtővezetékét épített. Ezután iráni gázra irányult a figyelem, ami azonban az USA heves ellenállását váltotta ki, nehogy Irán a bevételét atombomba fejlesztésére és a terrorizmus támogatására fordíthassa. Azeri gáz is számításba jöhet, de kérdéses a Sah Deniz mező kitermeléséhez szükséges beruházás finanszírozása. Így ma is nyitott kérdés, honnan kerül gáz a Nabucco vezetékbe. A gigaprojekt finanszírozására sem sikerült megoldást találni, és a vezeték nyomvonala sem tisztázott, hogyan lehet a Közel-Kelet veszélyeit elkerülni, és mely országokat kell figyelembe venni fogyasztóként. Az azeri gáz szállítására a Nabuccótól eltérő elképzelések is születtek (TAP,¹⁶⁶ illetve TGI¹⁶⁷), az olajtársaságok meglévő vezetékén keresztül a Balkánon át szállítanák nyugatra, Magyarország elkerülésével.

Oroszország konkurens – tenger alatti – vezetékek építését kezdeményezte, kikerülve a szállításokat néha megzavaró tranzitországokat (Belorusszia, Lengyelország, Ukrajna). A Balti-tenger alatt Németországba, és onnan további országokba irányuló Északi Áramlat meg is épült, és a szállítás meg is indult. Az Ukrajnát a Fekete-tenger alatt elkerülő első koncepció a Kék Áram volt. Ez a Törökországot már ellátó vezeték meghosszabbítása lett volna a Balkán, és Magyarország felé. Putyin elnök magyarországi elosztóközpont létesítését is felvetette. A túlzott török igények miatt a koncepció lekerült a napirendről, és a Déli Áramlat váltotta fel. Ennek a Fekete-tenger alatt Bulgária felé irányuló, és a Balkánon többfelé elágazó vezetéknek magyar szakasza is elő volt irányozva.

Amikor a magyar kormány felmérte, hogy belátható időn belül a Nabucco létesítése illúzió, és a gázellátás orosz import nélkül nem oldható meg, csatlakozott a Déli Áramlathoz. A döntést sokan bírálták, azt a nyugati törekvések cserbenhagyásának és az orosz befolyás erősítésének minősítve. Az Egyesült Államok különösen erős nyo-

¹⁶⁶ Trans Adria Pipeline.

¹⁶⁷ Törökország, Görögország, Itália.

mást gyakorolt külügyminisztériumán, budapesti nagykövetén és az amerikai médián keresztül a magyar kormányra, álláspontjának megváltoztatására. A Gyurcsány-kormány Canossa-járáásra kényszerült, hangsúlyozta, hogy a magyar ellátásbiztonságot minden új gázvezeték növeli, de ebben prioritása van a Nabuccónak. Kormánybiztost neveztek ki a projekt előmozdítására, nemzetközi tanácskozásokat szerveztek a vezeték gazdasági és műszaki kérdéseinek megvitatására, Budapest szinte a Nabucco projekt lelkiismeretévé vált. Mindez azonban egy tapodtat sem vitte előre az ügyet.

A konfliktus a belpolitikát sem hagyta érintetlenül. Az ellenzék rendkívül hevesen reagált csatlakozásunkra a Déli Áramlathoz, a megállapodást a magyar nép elleni puccsnak minősítette, és felmondását követelte. Élesen kikelt az orosz törekvések ellen (nem leszünk a Gazprom legvidámabb barakkja!¹⁶⁸), és a kormányt az orosz befolyás kiszolgálójának tekintette. E viták hatására lehetséges kimenetnek tűnt, hogy a Déli Áramlattal Magyarországot dél felől elkerüljék. Kormányra kerülve a Fidesz hamar felmérte a realitásokat, határozottan elhatárolódott a Nabuccótól, és állást foglalt a Déli Áramlat mellett. Sikerült kieszközölnie, hogy annak legalább egy ága Magyarországon keresztül haladjon. Hogy a kormánypárt korábbi, élesen oroszellenes magatartását mennyire sikerült feledtetni a szoros együttműködés szükségességének ismételt hangsúlyozásával, azt az ártárgyalások fogják megmutatni.

A hosszú időre kötött gázszállítási szerződések 2014-ben lejárnak. A Nabucco nehézségeit látva az Unió legtöbb importőre (Ausztria, Belgium, Bulgária, Csehország, Dánia, Németország, Franciaország, Görögország, Olaszország, Románia, Szlovákia) 15–20 évre szóló szállítási megállapodást kötött a Gazprommal. Magyarország ebből a folyamatból kimaradt, aminek pótlását az idő sűrgeti. A kilátások megítélését nehezíti, hogy az importot eddig bonyolító EON leányvállalatot az állam kivásárolta, és feladatát az MVM-re bízta. Az MVM-nek nincs tapasztalata a gáz üzletágban, és tárgyalási pozíciója sokkal gyengébb, mint az EON-é. Az utóbbi több országot képviselve, nagyságrenddel nagyobb gázmennyiség vásárlásáról tárgyal, amit mennyiségi kedvezménnyel szoktak honorálni.

¹⁶⁸ Utalás a szocializmust karikírozó viccre: mi vagyunk a legvidámabb barakk.

15. Villamosenergia-átvitel

A fejlett országokban minden épület, minden létesítmény valamennyi helyiségében található néhány csatlakozási hely, amiről táplálhatók villamos energiával működtethető fogyasztó készülékek. Ez magyarázza, hogy sokan a villamos energetika fő feladatának az energiaszállítást tekintik. Természetesen ennek az a lehetősége ad értelmet, hogy a villamosság nagyon sokféle közvetlen és közvetett energiaátalakítási eljárással bármely más energiafajtába átalakítható, és így nagyon sok emberi szükséglet kielégítésére ad módot.

A villamos hálózatok feszültségintjét a szállítandó energia mennyisége és az áthidalandó távolság nagysága szabja meg. A francia mérnökszövetség színvonalához méltatlan utópiának minősítette Deprez-nek azt a kijelentését, hogy a villamos vezetéseken átvihető energia nagyságát és az átvitel távolságát tetszőlegesen növelni lehet a paraméterek megfelelő megválasztásával. Abban az időben csak egyenáramot használtak, a feszültesítés és a vezetékvesztés valóban korlátozta a lehetőségeket. A korlátokat a transzformátor feltalálása oldotta fel (1885), ami lehetővé tette a váltakozó áram alkalmazását, és ennek révén az átvitel feszültségének és a szállítás távolságának ugrásszerű növelését.

A hálózatokat és a berendezéseket a névleges feszültségükkel jellemzik, a csereszabotosság érdekében az alkalmazható értékeket nemzetközi szabványok írják elő. Mivel a villamos berendezések rendeltetésszerűen csak a feszültség meghatározott intervallumban működnek, a szabványok rögzítik a hálózati feszültség megengedhető eltéréseit is. A Magyarországon használatos feszültségek a 15.1. táblázatban láthatók.

15.1. táblázat. Szabványos feszültségek

Kisfeszültség, volt	
Egyenfeszültség	Váltakozó feszültség
6	6
12	12
24	24
36	
48	48
60	
72	
96	
110	110
220	230
440	400/230*
600**	690/400*
750**	1000*

Nagyfeszültség, kV	
Egyenfeszültség	Váltakozó feszültség
1**	3
3**	6
	11
	15(16 2/3 Hz)**
	20
	25(50 Hz)**
	30
	35
	120
	220
	400
	750

* Háromfázisú rendszer.

** Vasúti vontatási rendszer.

A kisfeszültségek tartománya 1000 voltig terjed, ezen belül helyezkednek el a robbanás-, vagy érintés-veszélyes helyeken, valamint a játékoknál alkalmazott törpefeszültségek (6, 12, 24, 48 V). A hordozható elektronikus fogyasztó berendezések tápfeszültsége néhány V, de a félvezető elemek vezérlésére még kisebb feszültségek is használatosak, ezek nincsenek szabványosítva. A nagyfeszültségek között megkülönböztetnek közép-feszültséget (1–60 kV), valamint ultranagy feszültséget (>400 kV).

Az erőműveket egymással és a fontos fogyasztói csomópontok állomásaival összekapcsoló magyar alaphálózat eredetileg 120 kV-on épült ki, de a teljesítmények növekedése a feszültség fokozatos növelését tette szükségessé, szintje jelenleg 400 kV (összesített vezetékossza 3500 km). Ebbe csatlakoznak be a nemzetközi távvezetékek is, melyek között van még egy-két 220 kV-os kapcsolat, valamint egy, a nagy orosz import számára épült 750 kV-os vezeték is. Az alaphálózat üzemét a rendszerirányító (MAVIR¹⁶⁹) irányítja, beleértve az erőművek terhelését és az importot. Feladata a fejlesztést szolgáló távlati tervek készítése is.

A magyar alaphálózatnak erős távvezetési összeköttetései vannak minden szomszédos országgal. A nemzetközi távvezetési kapcsolatok növelik az ellátás biztonságát, szükség esetén módot adva egyrészt villamosenergia-importra, másrészt kisegítésre üzemzavarok során. A piac liberalizálása fokozza e kapcsolatok jelentőségét, mivel megnöveli a feljogosított fogyasztók lehetőségét az energiaforrások megválasztásában. A hálózati kapcsolatok lehetővé teszik az országunkon keresztül bonyolított villamosenergia-tranzitot, ami egyrészt gazdasági haszonnal jár (peázsdíj), másrészt többlet villamos energia vételezéséhez juthatunk. Az erős nemzetközi kapcsolatoknak hátrányai is vannak. Az egymástól távol fekvő külföldi szerződő felek között a magyar hálózaton keresz-

¹⁶⁹ Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító.

tül előre nem látható áramok folyhatnak, mivel az áramlás útját nem a kereskedelmi megállapodások, hanem a közbenső hálózatok impedancia-viszonyai szabják meg. Ez egyes vezetékek túlterhelődését is előidézheti, megzavarva a hazai energiaszállítások körülményeit.

Az 1960–1980-as években nagy mennyiségű villamosenergia-importot bonyolítottunk, részaránya meghaladta a teljes hazai felhasználás negyedét. Ez kedvező gazdasági és műszaki feltételek mellett tüzelőanyag és erőmű-beruházás megtakarítására adott módot. A villamosenergia-felhasználás erős csökkenése a rendszerváltás után lehetővé tette a behozatal jelentős csökkentését, később viszont az import szerepe megnőtt a teljesítménymérleg kiegyenlítésében, és az előírt kapacitástartalék biztosításában.

Az alaphálózatról ágaznak le a topológiai viszonyoktól és a szállítandó teljesítménytől függő feszültségű elosztóhálózatok (összesített nyomvonalhosszuk 76 000 km), kiterjedésük többnyire az áramszolgáltató vállalatok ellátási területét fedi le. Feszültségük a szállítandó teljesítménytől függően 120, 35, 20 és 10 kV. A fogyasztói súlypontokat és a legnagyobb üzemeket 120 kV-on táplálják, a többi nagyfogyasztó ellátása középfeszültségen (20, 10 kV) történik. Nagyobb ipari fogyasztóknál és a sínhez kötött járműveknél 400 V és néhány kV közötti más feszültségek is előfordulnak. Az elosztóhálózatok irányítása a körzeti diszpécser központok feladata. A kisfogyasztókat néhány kW terhelésig egyfázison 230 V-on látják el, azon felül háromfázisú 400/230 V-on szolgálják ki, ezen kisfeszültségű elosztóhálózataink 80 000 km-t tesznek ki.

A nagyfeszültségű hálózatok tervezésénél alapelv, hogy egy elem kiesésének nem szabad veszélyeztetni az ellátást ($n-1$ elv). Az ellátás rövid idejű megszakadása is súlyos következményekkel járhat, ennek megakadályozására sokféle gyorsműködésű védelemi eszköz és automatika gondoskodik a sérült berendezések vagy vezetékszakaszok kiiktatásáról és a fogyasztók átkapcsolásáról más ellátási útra. Az ellátás folytonosságára kényes fogyasztóknál kettős táplálást is alkalmaznak, a két tápvezetéknek néha egymástól független hálózati csomópontokból indítják.

A nagyfeszültségű hálózaton a korszerű hálózatvédelmek és automatikák másodpercekben belül ki tudják iktatni a hibás elemeket, és az energiaszállítás más útvonalra téríthető át, amivel a lehetséges minimumra korlátozzák az üzemzavarok kihatását és időtartamát. Ennek sikertelensége esetén az operátor beavatkozására van szükség (pl. hálózatrészek kiiktatása, fogyasztók korlátozása). Különösen nehéz, és veszélyes feladat a tápvezetékek szélsőséges időjárás okozta tönkremenetelének helyreállítása, gyakran zord körülmények között. Az elosztóhálózaton – különösen annak kisfeszültségű szakaszán – nem mindig áll rendelkezésre tartalékút, ilyenkor elkerülhetetlen a manuális beavatkozás az üzemzavar elhárítására. Az ellátatlan fogyasztók („sötét címek”) visszakapcsolása a bejelentéstől számított néhány órán belül megvalósítható, ennek átlagos időigénye a karbantartás és hibaelhárítás színvonalát jellemző minőségi mutató. Mindezek eredménye, hogy az üzemzavari kiesések miatt nem szolgáltatott villamos energia mennyisége Magyarországon az értékesített energiamennyiség néhány tized ezreléke, ami nemzetközi összehasonlításban is kitűnő eredmény. Kérdés, hogyan fogja befolyásolni ezt a színvonalat az energiaszolgáltató vállalatok gazdasági megszorítása.

A villamosenergia-felhasználást növelő körülmények (urbanizáció, életszínvonal-emelkedés, fogyasztó készülékek szaporodása stb.) miatt a vezetékek terhelése nő. Emiatt nő a vezeték menti feszültségésés, a tápponttól távoli fogyasztóknál a feszültség oly mértékben lecsökkenhet, hogy egyes fogyasztó készülékek működésképtelenné válnak. Ilyenkor új fogyasztók bekapcsolását le kell tiltani (zárolt körzet), amíg a helyzetet meg nem szüntetik a transzformátorkapacitás és a vezeték-keresztmetszet bővítésével, ahogy erre a szükséges pénzforrások rendelkezésre állnak.

A növekvő terheléshez a nagyfeszültségű hálózatot is bővíteni kell. Sűrűn lakott területeken nagy gond az engedélyek megszerzése új szabadvezetékek létesítésének nyomvonalához, a lakosság ellenállása miatt. Ebben szerepet játszik az elfoglalt terület elvesztése, a föld értékének csökkenése, a táj képének romlása és ezért vonzerejének csökkenése, a vezetékek nagyfrekvenciás zavaró hatása, félelem a feltételezett élettani hatástól stb. A szabadvezetékeknél nagyságrenddel drágább földbe fektetett kábelek csak sűrűn lakott városi településeken és nagyon kényes fogyasztóknál jöhetnek számításba, nem túl hosszú nyomvonallal. A problémát a meglévő nyomvonalak jobb kihasználásával igyekeznek áthidalni, a vezeték-keresztmetszet növelésével, nagyobb feszültségű, illetve többrendszerű vezetékek létesítésével.

Mind a teljesítmény szabályozásához, mind a váratlan események ellensúlyozásához tartalékok szükségesek. A jogszabályok a hőerőművek számára energiahordozó-tartalékokat is előírják, hagyományos erőművekben tüzelőanyagból 8 napi normatív (üzemviteli) és 8 napi biztonsági (stratégiai) készletet, atomerőművekben 1 évre elegendő normatív és további 1 évre elegendő biztonsági fűtőelem készletet. A földgázellátás csúcsidőszakában egyes erőművek ellátása szerződés alapján megszakítható, ezekben a földgázt helyettesítő folyékony tüzelőanyag készletezéséről is gondoskodni kell.

A biztonságos üzemvitelhez erőművi kapacitás tartalékokra is szükség van, aminek mértékére általában elegendőnek tartják a csúcsterhelés 20–25%-át. Ezen belül a tartalékok mobilizálásának többféle rendeltetése van. Az erőművi blokkok teljesítménye bizonyos határokon belül változtatható, ezt használja ki a primer szabályozás, ami a frekvenciaváltozást érzékelve automatikusan igyekszik a nagy erőművi blokkok teljesítményének módosításával az egyensúlyt 30 másodpercen belül helyreállítani. A primer tartalékokra legalább a rendszer csúcsterhelésének 2,5%-át kívánják meg. Az együttműködésnek az is feltétele, hogy a teljesítményhiányt 15 percen belül helyreállítsák (szekunder szabályozás), amihez vagy üzembe vehető tartalék, vagy nemzetközi kiségités szükséges. A szekunder tartalék megkívánt minimuma a csúcsterhelés négyzetgyökének háromszorosa, amit nálunk gázturbinák biztosítanak. A kompenzáció sikertelensége esetén a nemzetközi összeköttetések is kikapcsolódhatnak. Végül fel kell készülni a rendszer legnagyobb egység teljesítményű blokkja (ez nálunk a paksi reaktor 500 MW-os teljesítménye) kiesésének ellensúlyozására, az erre szolgáló tercier tartalékot legfeljebb egy negyedórán belül mobilizálni kell, hogy ki tudja váltani a szekunder tartalékot. Mindezek a magyar rendszerben együttesen ~800 MW-nyi tartalékkapacitást képviselnek. Szélsőségesen nagy teljesítményhiány esetén fogyasztói korlátozásra is sor kerül, ennél a fogyasztók előre kijelölt csoportjait kapcsolják le a frekvenciasökkenés mértékétől függő lépcsőzés szerint.

A szabadvezetékek legfőbb veszélye az áramütés, ami elsősorban a szerelőket és karbantartókat veszélyezteti, de kívülállók sérülése, sőt halálos balesete is előfordul. Ha egy vezető tárgy, vagy személy túlságosan közel kerül egy vezetőhöz, a levegő szigetelőképessége letörik, villamos íven keresztül zárlat alakul ki. Ez következhet be a távvezeték alatt áthaladó autó rakománya, vagy egy távvezetéki oszlopra felmászó gyerek esetében. A súlyos következménnyel nemcsak az áramütés járhat, hanem annak hatására a test zuhanása a földre. Az is áramütést okozhat, ha földzárlat hatására a talajban folyó áram egy arra haladó ember két lába között okoz feszültségkülönbséget (lépésfeszültség). A szabadvezetékekbe csapó villámoknak közvetett hatása is veszélyforrás.

Főleg az információs eszközök (pl. rádió, tv, mobiltelefon) működését zavarja a vezetékek korona kisülése, ami a levegő villamos szilárdságának helyi letörése, fényjelenség és zizegő hang kíséretében. A vezetőkön kialakuló sugárzás kedvezőtlen időjárásban felerősödik, különösen erős a sugárzás a függesztő szerelvények élein. A sugárzás elektromágneses hullámok és impulzusok formájában érzékelhető.

Irodalom

- Árpási M.: A geotermális energia készletek és hasznosításuk helyzete hazánkban. *Energiagazdálkodás*, 46. évf. (2005) 1. sz. 14–18.
- Arcscott, L.: Sustainable development in the oil and gas industry. *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 126 (2004) no. 1. 1–5.
- Ashok, P. et al.: *Biofuels. Alternative feedstocks and conversion processes*. Academic Press, Oxford, 2011.
- Aszódi A.: *Az atomerőművek felépítésének és működésének alapjai*. (Előadás, 2010. március 2.) http://www.reak.bme.hu/paksibovites/eloadasok/03_AszodiAttila_AE_fel-epites_20100302_Miskolc.pdf
- Bácsai A.: A földhő hasznosítás módjai. I–III. *Bioenergia*, 3. évf. (2008) 1–3. sz. (1: 7–10; 2: 5–8; 3: 2–5.)
- Bajbakov, N. K.–Garusev, A. R.: *Kőolajlelőhelyek leművelésének termikus módszerei*. Ford. Nasinszky D. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983.
- Bárdossy Gy.: A világ atomerőműveinek uránérc-ellátottsága. *Magyar Tudomány*, 172. évf. (2011) 3. sz. 317–321.
- Bárdossy Gy.: Szénhidrogének szerepe a jövő energiaellátásában. *Fizikai Szemle*, 58. évf. (2008) 5. sz. 197–199.
- Barótfi I.: *A biomassza energetikai hasznosítása*. Energia Központ, Budapest, 1998.
- Bársony I.–Gyulai J.: Napelemek. In: *Tanulmányok a magyarországi energetikáról*. Szerk. Szentgyörgyi Zs. MTA, Budapest, 2008. (http://mta.hu/data/cikk/12/90/28/cikk_129028/83BarsonyGyulaiNapelemek.pdf)
- Beér, J. M.: Combustion technology developments in power generation in response to environmental challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 26. (2000) no. 4–6. 301–327.
- Bell, D.: *The coming of post-industrial society*. Basic Books, New York, 1976.
- Berez E.: *Fizikai kémia*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1980.
- Berez E.–Achs M.: *Gázhidrátok*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1980.
- Berényi D.: Klímaváltozás, globális felmelegedés, CO₂-hatás. *Magyar Tudomány*, 172. évf. (2011) 1. sz. 18–31.
- Bertani, R.: World geothermal power generation in the period 2001–2005. *Geothermics*, vol. 34 (2005) no. 6. 651–690.
- BGR: *Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2011*. BGR, Hannover, 2011. http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-08.html
- Bobok E.–Tóth A.: A geotermikus energia helyzete és perspektívái. *Magyar Tudomány*, 171. évf. (2010) 8. sz. 926–936.

- Boldizsár T.: A kimeríthetetlen geotermikus energia. *Magyar Tudomány*, XXIII. köt. (1978) 2. sz. 96–110.
- Bošnjaković, Fr.: *Technische Thermodynamik*. Steinkopff, Dresden, 1972.
- Boyle, G.: *Renewable energy*. Oxford University Press, Oxford, 1996.
- BP: *Statistical Review of World Energy 2012*. BP, London, 2012. http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Statistical-Review-2012/statistical_review_of_world_energy_2012.pdf
- Bridgwater, A. V.–Boocock, D. G. B.: *Developments in thermochemical biomass conversion*. Blackie, London, 1997.
- Burton, T. et al.: *Wind energy handbook*. Wiley, Chichester, 2001.
- Büki G.: A földben termelt energia. *Fizikai Szemle*, 60. évf. (2010) 6. sz. 181–189.
- Büki G.: *Energiaátalakítás, gáz- és gőzerőművek*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2002.
- Büki G.: Gázturbinák a gőzerőművek megújításában. *Magyar Energetika*, 10. évf. (2002) 3. sz. 3–9.
- Büki G.: *Megújuló energiák hasznosítása*. MTA, Budapest, 2010.
- Büki G.: A biomassza energetikai hasznosítása. I–III. *Bioenergia*, 3. évf. (2007) 4. sz. 2–5; 5. sz. 2–6; 6. sz. 2–6.
- Campbell, C. J.: The assessment and importance of oil depletion. *Energy, Exploration and Exploitation*, vol. 20 (2002) no. 6. 407–435.
- Chaturvedi, M. C.: *Water resources systems planning and management*. McGraw-Hill, New Delhi, 1987.
- Chen, C. J.: *Physics of solar energy*. Wiley, Hoboken, NJ, 2011.
- Cheremisnoff, N. P. et al.: *Biomass*. M. Dekker, New York, 1980.
- Cohen, A. J. et al.: The global burden of diseases due to outdoor air pollution. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, vol. 68 (2005) no. 13–14. 1301–1307.
- Considine, D. M. et al.: *Energy technology handbook*. McGraw-Hill, New York, 1977.
- Curtis, C. et al.: Heavy-oil reservoirs. *Oilfield Review*, vol. 14 (2002) no. 3. 30–51.
- Czelnai R.: *Bevezetés a meteorológiába*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1996.
- Csom Gy.: *Atomerőművek*. Magyar Atomfórum Egyesület, Budapest, 2004.
- Deák Gy.–Bartha L.: Technológiai módszerek a szén-dioxid földtani szerkezetekbe történő visszajuttatására. *Magyar Tudomány*, 172. évf. (2011) 4. sz. 465–472.
- Delfino, R. J. et al.: Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. *Environmental Health Perspectives*, vol. 113 (2005) no. 8. 934–946.
- Dencs B.: *Az energianövények termesztésének és hasznosításának magyarországi helyzete*. OMFB, Budapest, 1999.
- Deudney, D.: *Rivers of energy*. Worldwatch Inst., Washington, 1981.
- Dijk, J.: *The network society*. Sage, London, 2006.
- Dijkers, A. J.: *Geology in petroleum production*. Elsevier, Amsterdam, 1985.
- Dinya L.: Biomassza-alapú energiatermelés és fenntartható energiagazdálkodás. *Magyar Tudomány*, 171. évf. (2010) 8. sz. 912–925.
- Drysdale, D.: *An introduction to fire dynamics*. Wiley, Chichester, 2011.
- Dufka, J.: *Fűtési módok házban, lakásban*. Ford. Lovász P. Cser Kiadó, Budapest, 2006.

- Economic Commission for Europe: *United Nations International Framework Classification for Reserves/Resources. Solid Fuels and Mineral Commodities*. UN, New York, 1997.
- Ellis, A. J.: Geothermal Energy. In: El-Hinnawi, E.–Bismas, A. K. (eds.): *Renewable sources of energy and the environment*. Tycooly, Dublin, 1981.
- Energy Information Administration: *International Energy Outlook 2011*. US DOE/EIA, Washington, 2011.
- Energy Information Administration: *International Energy Outlook 2009*. US DOE/EIA, Washington, 2009.
- Energy Information Administration: *World Shale Gas Resources*. US DOE/EIA, Washington, 2011.
- European Commission: *ExternE: Externalities of Energy*. European Commission, Directorate-General XII, Brussels, 1995.
- Falus Gy. et al.: A hazai földtani szerkezetek felmérése a szén-dioxid-visszasajtolás szempontjából. *Magyar Tudomány*, 172. évf. (2011) 4. sz. 450–458.
- Farkas I.: A napenergia hasznosításának hazai lehetősége. *Magyar Tudomány*, 171. évf. (2010) 8. sz. 937–946.
- Farkas I.: Termikus napenergia potenciál a mezőgazdaságban. *Energiagazdálkodás*, 46. évf. (2005) 1. sz. 3–7.
- Ferenczi Ö.: *Áramtermelés nap- és szélenergiából saját „mini” erőművekkel*. Cser Kiadó, 2009.
- Fischhoff, B. et al.: Defining risk. *Policy Sciences*, vol. 17 (1984) no. 2. 123–139.
- Foster, R. et al.: *Solar energy. Renewable energy and the environment*. CRC Press, Boca Raton, 2010.
- Fritzsche, A. F.: *Gesundheitsrisiken von Energieversorgungssystemen*. TÜV Rheinland, Köln, 1988.
- Fritzsche, A. F.: The health risks of energy production. *Risk Analysis*, vol. 9 (1989) no. 4. 565–577.
- Fülöp L. et al.: A napenergia passzív hasznosításának hazai potenciálja. *Energiagazdálkodás*, 46. évf. (2005) 1. sz. 8–13.
- Gadó J.: A maghasadásra alapuló energiatermelés kilátásai Magyarországon. (http://mta.hu/data/cikk/12/90/28/cikk_129028/68GadoNuklhu.pdf) MTA, Budapest, 2009.
- Gadó J.: A maghasadásra alapuló energiatermelés kilátásai. (http://mta.hu/data/cikk/12/90/28/cikk_129028/61GadoNuklvilag.pdf) MTA, Budapest, 2009.
- Gerse K.: A villamos-energiarendszer új működési modellje. *A Magyar Villamos Művek Közleményei*, 36. évf. (1999) 5. sz.
- Gerse K.: Miért kell tározós vízerőmű? *A Magyar Villamos Művek Közleményei*, 44. évf. (2007) 1–2. sz. 10–20.
- Gevorkian, P.: *Sustainable energy systems in architectural design*. McGraw-Hill, New York, 2006.
- Giampietro, M.–Pimentel, D.: The tightening conflict. Population, Energy use, and the ecology of agriculture. *The NPG Forum*, October 1993. (http://www.npg.org/forum_series/TheTighteningConflict.pdf)

- Gibbs, D. F.–Greenhalgh, M. E.: *Biotechnology, chemical feedstocks and energy utilization*. Pinter, London, 1983.
- Goulding, J. R. et al.: *Energy conscious design*. Batsford, London, 1992.
- GWPC: *Modern shale gas development in the United States: A Primer*. (Prepared for US DOE.) US DOE, Washington, 2009.
- Gyulai I.: *A biomassza dilemma*. MTVSZ Föld Barátai Mo., Budapest, 2009.
- Häfele, W. et al.: *Energy in a finite world*. Ballinger, Cambridge, 1981.
- Hagoort, J.: *Fundamentals of gas reservoir engineering*. Elsevier, Amsterdam, 1988.
- Halász I.: *Tüzeléstechnika*. Tankönyvmester, Budapest, 2008.
- Hallett, S.–Wright, J.: *Life without oil. Why we must shift to a new energy future*. Prometheus Books, 2011.
- Hastings, S. R.–Wall, M.: *Sustainable solar housing*. Earthscan, London, 2007.
- Haszpra L.: Az éghajlati rendszer és mozgatói. *Magyar Tudomány*, 172. évf. (2011) 5. sz. 570–579.
- Hegedűs M.: *Bioüzemanyag: megváltás vagy hiú ábránd?* GKI, Budapest, 2008.
- Heier, S.: *Grid integration of wind energy conversion systems*. Wiley, Chichester, 2006.
- Heinberg, R.: How to avoid oil wars, terrorism, and economic collapse. *Energy Bulletin*, July 31, 2005. <http://dev.energybulletin.net/node/7552>
- Holland, S. P.: Modeling peak oil. *The Energy Journal*, vol. 29 (2008) no. 2. 61–79.
- Homola V.: Korszerű szénórómű irányzatok. *Magyar Energetika*, 3. évf. (1995) 4. sz. 19–24.
- Hózer Z.: *Atomerőművek üzemanyag-ellátása, a kiegészítő üzemanyag és a radioaktív hulladékok kezelése*. (Előadás, 2010. március 2.) http://www.reak.bme.hu/paksibovites/eloadasok/05_HozerZoltan_20100302_Miskolc.pdf
- Hunt, J. M.: *Petroleum geochemistry and geology*. Freeman, New York, 1996.
- IAEA: *One decade after Chernobyl: environmental impact and prospects for the future*. (Document IAEA/J1-CN-63.) International Atomic Energy Agency, Vienna, 1996.
- IEA: *Energy Technology Perspectives*. OECD/IEA, Paris, 2010.
- IEA: *Oil Information 2012*. OECD/IEA, Paris, 2012.
- IEA: *Passive and Hybrid Solar Low Energy Buildings*. IEA, Washington, 1990.
- IEA: *Technology Responses to Global Environmental Challenges*. (Conference proceedings.) IEA, Kyoto, 1991.
- IEA: *World Energy Outlook 2010*. OECD/IEA, Paris, 2010.
- IEA: *World Energy Outlook 2012*. OECD/IEA, Paris, 2012.
- IIASA: *Emissions of Air Pollutants for the World Energy Outlook 2012 Energy Scenarios*. IIASA, Laxenburg, 2012.
- Imre L.–Bohoczky F.: *Magyarország megújuló energetikai potenciálja*. MTA Energetikai Bizottság tanulmánya, Budapest, 2006.
- Inzelt Gy.: *Az elektrokémia korszerű elmélete és gyakorlata*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1999.
- IPCC: *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge University Press, Cambridge, 2011.
- IPCC: *Special Report: Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

- Jánosi I.: A szélenergia hasznosításának hazai perspektívái. In: *Tanulmányok a magyarországi energetikáról*. Szerk. Szentgyörgyi Zs. MTA, Budapest, 2008. (http://mta.hu/data/cikk/12/90/28/cikk_129028/87JanosiSzel.pdf)
- Jog, M. C.: *Hydro-electric and pumped storage plants*. Wiley, New York, 1989.
- Johansson, T. B. et al.: *Renewable Energy*. Island Press, Washington, 1992.
- Johnson, G. L.: *Wind energy systems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1985.
- Juhász Á. et al.: *Megújuló energiák*. Sprinter, Budapest, 2009.
- Jungerman, H. et al.: *Risikokontroversen. Konzepte, Konflikte, Kommunikation*. Springer, Berlin, 1991.
- Justyák J.: *Magyarország éghajlata*. Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen, 1998.
- Kaboldy E.: A napenergia aktív hasznosításának hazai potenciálja. *Energiagazdálkodás*, 46. évf. (2005) 1. sz. 19–23.
- Kádár P.: *A vízimalmoktól a vízerőművekig*. Új Mandátum, Budapest, 2010.
- Kajati Gy.: *A lignit szerepe Magyarország villamosenergia-termelésében*. (Geográfus Doktoranduszok VII. Országos Konferenciája. ELTE, Budapest, 2002.) http://geogr.elte.hu/PHD_konferencia_ELTE_2002/doktori_konferencia_anyagai_2002/kajati-gyorgy.pdf
- Kallenbach, U.–Thone, E.: *Gesundheitsrisiken der Stromerzeugung*. TÜV Rheinland, Köln, 1989.
- Kaltschmitt, H.: *Energie aus Biomasse*. Springer, Berlin, 2001.
- Kanyár B.: A hazai lakosság járulékos sugárterhelése a csernobili baleset következtében. *Orvosi Hetilap*, 143. évf. (2002) 19. sz. 1007–1012.
- Kecse Zs. R.: A cseppfolyós földgáz, azaz az LNG szerepe Európában. *International Relations Quarterly*, vol. 1 (2010) no. 4. (http://www.southeast-europe.org/pdf/04/DKE_04_M_KECSE_LNG.pdf)
- Kerényi A. Ö.: *A magyar villamosenergia-ipar története*. G-Mentor Kft., Budapest, 2006.
- Kertai Gy.: *A kőolaj és a földgáz vegyi összetétele és keletkezése*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1978.
- King Hubbert, M.: Energy from fossil fuels. *Science*, vol. 109 (1949) no. 2823. 103–109.
- King Hubbert, M.: The energy resources of the Earth. *Scientific American*, vol. 225 (1971) no. 3. 60–70.
- Kinghorn, R. R. F.: *An introduction to the physics and chemistry of petroleum*. Wiley, Chichester, 1983.
- Kisházi A. (szerk.): *Termikus kőolajtermelési módszerek*. NIMDOK, Budapest, 1980.
- Koch, F. H. (ed.): Hydropower, society, and the environment in the 21st century. *Energy Policy*, vol. 30 (2002) no. 14.
- Komlós F. et al.: *Hőszivattyús rendszerek*. Dunaharaszti, Komlós F., 2009.
- Kovács F.: Széntüzelésű erőművek környezetbarát üzemeltetésének lehetőségei. *Bányászati és Kohászati Lapok. Kohászat*, 139. évf. (2006) 3. sz. 24–30.
- Kovács, F.: Energiaigények és a világ szénkészletei. *A Miskolci Egyetem Közleményei. A sorozat, Bányászat*, 71. köt. (2007) 63–74.
- Kozák M.: *Folyami és üzemvízcsatornás vízerőművek környezeti hatásai*. OMIKK, Budapest, 1994.

- Köteles Gy.: A csernobili baleset miatt bekövetkezett lakossági sugárterhelés egészségi kockázatai. *Orvosi Hetilap*, 143. évf. (2002) 23. sz. 1411–1414.
- Kubus P.: A CCS-projekt realitása a hazai olajipar szempontjából. *Magyar Tudomány*, 172. évf. (2011) 4. sz. 459–464.
- Kuhlman, A. (Hrsg.): *I. Weltkongress für Sicherheitswissenschaft. Tagungsbericht. Leben in Sicherheit*. TÜV Rheinland, Köln, 1990.
- Laczó D. (szerk.): *A megújuló energiaforrások kézikönyve*. Környezettudományi Központ, Budapest, 2012.
- Lakatos I.–Szabó J.: A nem konvencionális szénhidrogének jelentősége a 21. században. *Bányászati és Kohászati Lapok. Kőolaj és Földgáz*, 141. évf. (2008). 2. sz. 1–19.
- Laky J.: *A lámpa története*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1988.
- Láng I. et al.: *A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok. VAHAVA-jelentés*. Szaktudás, Budapest, 2007.
- Leigh, J.: Beyond peak oil in post globalization civilization clash. *The Open Geography Journal*, vol. 1 (2008) no. 1. 15–24.
- Levegő Munkacsoport: A porszennyezés miatti halálozásban elsők vagyunk. (2009. június 26.) http://www.levego.hu/sites/default/files/kapcsolodo/pm10_0907.pdf
- Lund, J. W. et al.: Direct application of geothermal energy. 2005 Worldwide review. *Geothermics*, vol. 34 (2005) no. 6. 691–727.
- Luque, A.–Hegedus, A.: *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Wiley, Chichester, 2003.
- Lyons, W. C.–Plisga, G. J.: *Standard handbook of petroleum and natural gas engineering*. Elsevier, Boston, 2005.
- Magyar Bányászati és Földtani Hivatal: *Magyarország ásványi nyersanyagvagyon*. Budapest, 2011.
- Major Gy.: A Föld éghajlatának vázlatos története. *Debreceni Szemle*, 18. évf. (2010) 4. sz. 221–231.
- Marx Gy.: Kockázat és társadalom. *Energia és Atomtechnika*, 44. évf. (1991) 12. sz. 301–311.
- Mayer I.: Vízenergia-hasznosítás Magyarországon. In: *Tanulmányok a magyarországi energetikáról*. Szerk. Szentgyörgyi Zs. MTA, Budapest, 2008. (http://mta.hu/data/cikk/12/90/28/cikk_129028/89MayerViz.pdf)
- McAlister, R.: *The solar hydrogen civilization*. American Hydrogen Association, Mesa, AZ, 2005.
- McCallister, T.: Impact of unconventional gas technology in the Annual Energy Outlook 2000. EIA, US DOE, 2002. http://www.eia.gov/oiaf/analysispaper/unconventional_gas.html
- Meadows, D. H. et al.: *The Limits to Growth*. Universe Books, New York, 1972.
- Meadows, D.–Randers, J.–Meadows, D.: *A növekedés határai harminc év múltán*. Ford. Déri A. Kossuth, Budapest, 2005.
- Merkel, J.–Hasche-Berger, A.: *Uranium, mining and hydrogeology*. Springer, Berlin, 2008.
- Mészáros E.: *Levegőkémia*. Egyetemi Kiadó, Veszprém, 1997.

- Mészáros E.–Somlyódy L.: Beszélgetés a környezet két fontos közegéről – a vízről és a levegőről. *Magyar Tudomány*, 173. évf. (2012) 10. sz. 1160–1205.
- Meyers, R. A. et al.: *Coal Handbook*. M. Dekker, New York, 1981.
- Michel, B.: Oil production: a probabilistic model of the Hubbert curve. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, vol. 27 (2011) no. 4. 434–449.
- Mika J.: A globális és a regionális klímaváltozás újdonságai. *Ezredforduló*, 2007/2. sz. 19–24.
- MIT: *The future of coal*. (An interdisciplinary MIT study.) Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- Mosonyi E.: A hazai vízgazdálkodás távlati feladatai. *A Magyar Villamos Művek Közleményei*, 44. évf. (2007) 1–2. sz. 63–67.
- Mosonyi, E.: *Water power development*. Ford. Szilvássy Z. et al. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1987.
- Mousdale, D.: *Biofuels. Biotechnology, chemistry, and sustainable development*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2008.
- Nashawi, I. S. et al.: Forecasting world crude oil production using multicyclic Hubbert model. *Energy & Fuels*, vol. 24 (2010) no. 3. 1788–1800.
- NEA, IAEA: *Nuclear Power Plant Operational Experience*. (From the IAEA/NEA International Reporting System for Operating Experience 2009–2011.) OECD, Paris, 2012.
- NEA, IAEA: *Uranium 2009. Resources, Production and Demand*. (The Red Book.) OECD, Paris, 2010.
- NEA, IAEA: *Uranium 2011. Resources, Production and Demand*. (The Red Book.) OECD, Paris, 2012.
- NEA: *Chernobyl: ten years on radiological and health impact*. OECD, Paris, 1995.
- NEA: *Forty years of Uranium Resources, Production and Demand in Perspective*. OECD, Paris, 2006.
- NEA: *Nuclear Energy Data 2011*. OECD, Paris, 2011.
- NEA: *Nuclear Energy Outlook 2008*. OECD, Paris, 2009.
- Newman, P.: Beyond peak oil: Will our cities collapse? *Journal of Urban Technology*, vol. 14 (2007) no. 2. 15–30.
- Oil and Gas Inst.: Worldwide look at reserves and production. *Oil & Gas Journal*, vol. 109. (2011) no. 49.
- Oláh Gy. et al.: *Kőolaj és földgáz után: a metanolgazdaság*. Better, Budapest, 2007.
- Olah, G. A.–Molnár, Á.: *Hydrocarbon chemistry*. Wiley, New York, 1995.
- Oláh, Gy.–Ánizsfeld, R.: Új generációjú üzemanyagcellák. *Magyar Tudomány*, XLVII. köt. (2002) 12. sz. 1564–1569.
- Olson, J. B. et al.: *The Healy Clean Coal Project*. US DOE Pittsburgh Energy Technology Center, 1991.
- Orlov, D.: The five stages of collapse. *ClubOrlov*, Feb 22, 2008. <http://cluborlov.blogspot.hu/2008/02/five-stages-of-collapse.html>
- Otto, P.–Sonntag, P.: *Wege in die Informationsgesellschaft. Steuerungsprobleme in Wirtschaft und Politik*. Deutscher Taschenbuch, München, 1985.
- Pálfy M.: Magyarország szoláris fotovillamos energetikai potenciálja. *Energiagazdálkodás*, 45. évf. (2004) 6. sz. 7–10.

- Pápay J.: A kőolaj és földgáz várható szerepe Földünk energiaellátásában. *Bányászati és Kohászati Lapok. Kohászat*, 144. évf. (2011) 4. sz. 36–42.
- Pápay J.: A szén-dioxid visszasajtolásának tapasztalatai az olajipar területén. *Magyar Tudomány*, 172. évf. (2011) 4. sz. 444–449.
- Pápay J.: Kőolaj és földgáztermelés a 21. században. *Földtani Közlöny*, 137. évf. (2007) 1. sz. 41–61.
- Pátzy Gy.: *Atomenergetika és nukleáris technológia*. (BME, egyetemi tananyag.) Typotex, Budapest, 2011.
- Penninger A. et al.: *Kalorikus gépek*. BME, Budapest, 2011.
- Ragland, K. W.–Bryden, K. M.: *Combustion engineering*. CRC Press, Boca Raton, 2011.
- Ranney, M. W.: *Oil shale and tar sands technology*. NDC, Park Ridge, 1979.
- Rasmussen, N. C.: *Reactor Safety Study. WASH-1400*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, 1975.
- Rastler, D. M.: A framework for commercializing fuel cell power plants. *Power Engineering*, vol. 94 (1990) no. 9. 46–48.
- Reményi K.: A konszenzus és evidencia nem tudományos érv. *Magyar Tudomány*, 171. évf. (2010) 1. sz. 44–48.
- Reményi K.: *A tűz örök energiaforrás*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2013.
- Reményi K.: *Energetika, CO₂, felmelegedés*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2010.
- Roberts, L. E. J. et al.: *Power generation and the environment*. Oxford University Press, Oxford, 1990.
- Robyns, B. et al.: *Electricity production from renewable energies*. Wiley, Hoboken, 2012.
- Rossi, C. A.: *The completion of the oil era. The economic impact*. Nova Science Publisher, New York, 2010.
- Rowe, W. D.: *An Anatomy of Risk*. Wiley, New York, 1977.
- San Martin, R. L.: *Environmental emissions from energy technology systems*. US DOE, Washington, 1989.
- Sathyajith, M.: *Wind energy. Fundamentals, resource analysis, and economics*. Springer, Berlin, 2006.
- Schull, W. J.: *Effects of Atomic radiation*. Wiley, New York, 1995.
- Schwartz, J.: Air pollution and daily mortality: a review and meta analysis. *Environmental Research*, vol. 64 (1994) no. 1. 36–52.
- Show, E. W.: *Hőszolgáltatás és melegvíz-ellátás*. Ford. Kiss B. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985.
- Slovic, P.: Perception of risk. *Science*, vol. 236 (1987) no. 4799. 280–285.
- Smith, J. S.–Hui, Y. H.: *Food processing: principles and applications*. Blackwell, Ames, IA, 2004.
- Sonntag, P.: *Die Zukunft der Informationsgesellschaft*. Haag & Herchen, Frankfurt, 1983.
- Speight, J. G.: *The chemistry and technology of petroleum*. M. Dekker, New York, 1999.
- Stehr, N.: *Knowledge & economic conduct. The social foundations of the modern economy*. University of Toronto Press, Toronto, 2002.
- Stern-jelentés*. <http://www.humusz.hu/hirek/stern-jelentes-osszefoglaloja-magyarul/1831>
- Sunggyu, L.: *Symposium on clean coal technology*. M. Dekker, New York, 1996.

- Swedish Risk Academy: *Radiation and Society*. (Conference proceedings.) IAEA, Vienna, 1994.
- Szabó B.: *Atomkorkép*. Új Palatinus, Budapest, 2004.
- Szalai S. et al.: A szélenergia helyzete Magyarországon. *Magyar Tudomány*, 171. évf. (2010) 8. sz. 947–958.
- Szarka L.: Mozaikok az éghajlatkutatáshoz. *Magyar Tudomány*, 171. évf. (2010) 5. sz. 609–611.
- Szarka L.: Szempontok az energetika és a környezet kapcsolatához. *Magyar Tudomány*, 171. évf. (2010) 8. sz. 979–989.
- Szatmáry Z.: Súlyos üzemzavar a paksi atomerőműben. *Fizikai Szemle*, 53. évf. (2003) 8. sz. 266–271.
- Szatmáry Z.–Aszódi A.: *Csernobil*. Typotex, Budapest, 2005.
- Szeredi I. et al.: A vízenergia-hasznosítás szerepe, helyzete, hatásai. *Magyar Tudomány*, 171. évf. (2010) 8. sz. 959–978.
- Szeredi I.: *A szivattyús energiatárolás helyzetének elemzése*. GKI, Budapest, 2011.
- Szilas A. P.: *Kőolaj és földgáz termelése és szállítása*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1985.
- Szpunar, C. B.–Gillette, J. L.: *Comparative analyses for selected clean coal technologies*. Argonne National Laboratory, 1990.
- Tajthy T.–Tar M.: *Tüzelőanyag felhasználásokból származó légköri emissziók számítása*. Jelentés. VEIKI, Budapest, 1989.
- Tamada, M. et al.: Cost estimation of uranium recovery from seawater with system of braid type adsorbent. *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*, vol. 5 (2006) no. 4. 358–363.
- Tar K.: *A szélenergia hasznosítása*. Dashöfer, Budapest, 2009.
- Tar, K.: Diurnal course of potential wind power with respect to the synoptic situation. *Időjárás*, vol. 111 (2007) no. 4. 261–279.
- Timár P.: *Gázellátás*. Tankönyvmester, Budapest, 2007.
- Turns, S. R.: *An introduction to combustion: concepts and applications*. McGraw-Hill, New York, 2012.
- UNCED: *Report of the United Nations Conference on Environment and Development (Rio de Janeiro, 1992)*. UN, New York, 1993.
- United Nations Environmental Program: *The Environmental impacts of production and use of energy*. UNEP, Nairobi, 1979.
- UNPD: *World Population Prospects*. UN, New York, 2010.
- US DOE: *Critical Materials Strategy*. DOE, Boulder, 2010.
- US DOE: *Uraniferous phosphate resources and technology and economics of uranium recovery from phosphate resources, United States and free world*. (Open-file rep. GJBX–110[79].) Washington, 1979.
- US Energy Information Administration: *World Oil Transit Chokepoints*. www.eia.gov/security/
- USGS: *An estimate of undiscovered conventional oil and gas resources of the world, 2012*. U.S. Geological Survey, Reston, 2012.

- USGS: *Variability of distributions of well-scale estimated ultimate recovery for continuous (unconventional) oil and gas resources in the United States*. (Open-file rep. 2012–1118.) U.S. Geological Survey, Reston, 2012.
- USGS: *World Petroleum Assessment 2000*. U.S. Geological Survey, Denver, 2000.
- Vajda Gy.: *Energiellátás ma és holnap*. MTA, Budapest, 2004.
- Vajda Gy.: *Energetika*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1981.
- Vajda Gy.: *Energia és társadalom*. MTA, Budapest, 2009.
- Vajda Gy.: *Energiapolitika*. MTA, Budapest, 2001.
- Vajda Gy.: *Kockázat és biztonság*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1998.
- Valaska J.: A szén-dioxid-leválasztás és -visszasajtolás szükségessége és korlátai a hazai szénalapú erőművek esetében. *Magyar Tudomány*, 172. évf. (2011) 4. sz. 441–443.
- Varjú Gy.: Kisfrekvenciás erőterek egészségi és elektromágneses összeférhetőségi kérdései. *Magyar Tudomány*, XLVII. köt. (2002) 8. sz. 1048–1064.
- Vass I.: Megújuló fotoszintetikus energiatermelés napfényből és vízből – elvi lehetőség vagy gyakorlati realitás? *Magyar Tudomány*, 171. évf. (2010) 11. sz. 1344–1352.
- Végh J.: *Harmadik generációs reaktor technológiák*. (Előadás, 2010. március 2.) http://www.reak.bme.hu/paksibovites/eloadasok/04_VeghJanos_20100302_Miskolc_v4.pdf
- Vicsek F.: *A bomlás melege*. Magvető, Budapest, 1988.
- Vojuczki P.: Szénenergia. In: *Tanulmányok a magyarországi energetikáról*. Szerk. Szentgyörgyi Zs. MTA, Budapest, 2008.
- Wackernagel, M.–Rees, W.: *Our ecological footprint. Reducing human impact on the Earth*. New Society, Philadelphia, 1995.
- Warren, M. et al.: *Handbook of heat transfer*. McGraw-Hill, New York, 1973.
- Whipple, T.: Peak oil review. *Energy Bulletin*, Nov 23, 2009. <http://dev.energybulletin.net/node/50777>
- World Commission on Environment and Development: *Our Common Future*. (Report of the Brundtland Commission.) Oxford University Press, Oxford, 1987.
- World Energy Council – International Institute of Applied System Analysis: *Global energy perspectives to 2050 and beyond*. WEC, London, 1995.
- World Energy Council: *2007 Survey of Energy Resources*. WEC, London, 2007.
- World Energy Council: *2010 Survey of Energy Resources*. WEC, London, 2010.
- Yen, T. F.–Chilingarian, G. V.: *Oil shale*. Elsevier, Amsterdam, 1976.
- Zöld A.: *Épületgépészet*. Tankönyvkiadó, Budapest, 2001.