

A Kritikus Nyersanyagok Maraton Adatgyűjteményéből

1. Az akkumulátor gyártáshoz használt kritikus ásványi nyersanyagok rövid áttekintése

From the Critical Raw Materials Marathon data collections

1. Brief review of critical mineral raw materials for battery production

MOHAMED BADAWI¹, PhD-hallgató,
LESKÓNÉ MAJOROS LÍVIA¹, PhD-hallgató,
EVANE CÉSAR JOÃO DE CUÑHA¹, PhD-hallgató,
ELYAS HADDAD¹, MSc-hallgató,
AHMAD SAIFO¹, MSc-hallgató,
SAMUEL AYIPA ARTHUR², MSc-hallgató,
RAYHAN ALDIZAN FARRENZO², MSc-hallgató,
FÖLDESSY JÁNOS¹, Professzor emeritusz,
¹TEKH Szakkollégium, Miskolci Egyetem
²TIMREX Course, Miskolci Egyetem

A Miskolci Egyetem TEKH Természeti Erőforrás Kutatása és Hasznosítása Szakkollégiumának magyar és nemzetközi hallgatói csapata vállalkozott egy saját tervezésű projekt keretében a kritikus és stratégiai nyersanyagoknak, valamint ezek magyarországi lehetséges előfordulásainak adatgyűjtésére és előzetes értékelésére. Elsőként az elektromos energiátároláshoz szükséges alapvető nyersanyagokra vonatkozó globális körképet dolgoztuk ki és tesszük közzé. Az akkumulátorfémek az EU-ban a kritikus és stratégiai nyersanyagok csoportjába tartoznak. Ebben a csoportosításban még kevésbé ismertek Magyarországon. Különösen hiányzanak olyan ismeretek, amelyek ezeknek az anyagoknak a hazai földtani környezetekben való előfordulására vonatkoznak. Az ország ugyanakkor kiemelt nemzeti stratégiai célként jelölte meg, hogy világszínvonalú akkumulátorgyártó ipart fejleszt. Ehhez véleményünk szerint a nyersanyagok hazai forrásainak ismerete, kutatása és fejlesztése is szükséges. Az adatgyűjtemény és az erre alapozható értékelések hatékonyan segíthetik az ország új szemléletű ásványi nyersanyag-erőforrás lehetőségeinek felmérését.

Az áttekintés az adatbázisban szereplő adatok alapján készült. Ezek külön adatlapokon érhetők el, a cikkünkben olvashatónál bővebb, részletes formában. Ehhez a TEKH weboldalára kell látogatni [2]. Az adatlapokról továbblépve még bővebb háttérinformációk (pl. részletes geochemiai adatok, publikációs hivatkozások listája, fényképek, kutatási jelentések stb.) érhetők el.

Kulcsszavak: EU, kritikus nyersanyagok, Magyarország, akkumulátorfémek

A team of Hungarian and international students from the Faculty of Natural Resources Research and Utilization of the University of Miskolc, TEKH, undertook the data collection and preliminary evaluation of critical and strategic raw materials, as well as their potential occurrences of mineral raw materials in Hungary, within the framework of a project. First of all, we have drawn up and published here a global overview of the basic raw materials required for electrical energy storage. Battery metals belong to the group of critical and strategic raw materials in the EU. In this grouping, they are still little known in Hungary, and there is a particular lack of knowledge regarding the occurrence of these materials in Hungarian geological environments. At the same time, the country has identified developing a world-class battery manufacturing industry as a priority national strategic goal. In our opinion, this requires knowledge, research and development of domestic sources of raw materials. The data collection and the evaluations that can be based on it can effectively help the assessment of the country's mineral resource resources with a new approach.

The overview is based on the data in the database. These are available on separate data sheets, in more detailed form than can be read in our article. To do this, visit the TEKH website [2]. Further background information (e.g. partial geochemical data, list of publication references, photographs, research reports, etc.) is available by moving further using the links provided on the data sheets.

Keywords: EU, critical raw materials, Hungary, battery metals

Bevezetés

A Miskolci Egyetem Föld- és Környezettudományi Kar TEKH Természeti Erőforrás Kutatása és Hasznosítása Szakkollégiumának 2024. évi munkaterve az EU elfogadása előtti parlamenti vitában szereplő Kritikus Nyersanyagok Törvény javaslatának szellemében, az előre látható nemzeti feladatok előkészítése érdekében alakul. A nemzetközi körképet és a hazai információkat hallgatói csoportok dolgozzák fel oktatók irányításával egy sokoldalú adatgyűjteménnyé és ebből tanulmányokká. A bevezető cikk a *Bányászati és Kohászati Lapok* előző számában jelent meg [1].

A cikk, összegzése a címben is említett adatgyűjtemény információinak. Az adatgyűjtemény nyilvános, és az érdeklődő olvasók, kutatók és szakmai felhasználók szolgálatában áll [2].

Az információk forrásai

Legfontosabb, ugyanakkor csak ritkán elérhető adatforrásnak az egyes alapanyagokra vonatkozó hazai statisztikai, földtani és bányászati adatokat tartottuk. Kiegészítésként a Criticel program publikációit [3], valamint a programban 2012–2014 folyamán összegyűjtött, rendszerezett és még nem publikált alapadatokat vettük figyelembe. Ez akkor 14 fajta kritikus alapanyagot érintett, a lista azóta 34 tételre bővült. A nemzetközi adatokhoz az EU Joint Research Centre által közzétett SCRREEN adatlapokat vettük első információforrásnak [4], amelyet kiegészítettünk az USGS nyilvános összefoglalóiból, az ipari szövetségek jelentéseiből és a megjelent közép-európai információkból származó információkkal.

Az adatértékelések másik ágaként a nyersanyagok ismert hazai előfordulásait értékeljük. Ezekből szintén adatlapok születnek (4. táblázat) az előfordulások legfontosabb jellemzőinek ismertetésével. Szintén nagyobb csoportokba összevonva ismertetjük ezeket külön közleményekben a *Bányászati és Kohászati Lapokban*.

Akkumulátorfémek, kémiai elemek – hazai helyzet

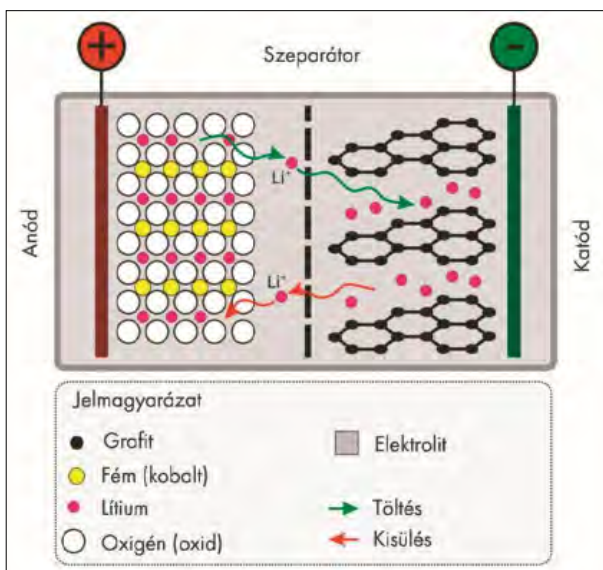
Az akkumulátorok építéséhez szükséges nyersanyagok világszerte kiemelt figyelmet élveznek az autógyártás fejlesztési irányjaival párhuzamosan. Az elektromos hajtáslánc nélkülözhetetlen eleme az energiatárolás, ebben van ezeknek az anyagoknak igen fontos szerepük. 2022-ben meghirdetett Nemzeti Akkumulátor Iparági Stratégiával összhangban Magyarország számos erőfeszítést tett a gyártókapacitások (Samsung, CATL, LG stb.) bővítésére külföldi befektetések bevonásával és a beruházások állami támogatásával.

A magyar akkumulátoripar döntően import nyersanyagokat használ fel, s ezek mindegyike túlnyomórészt tengerentúli forrásból származik. A 2020-as évek elejétől sorakozó események rámutattak arra, hogy a szállítási útvonalak bármilyen okból csökkenő biztonsága egész iparágak leállítását vonhatja maga után. 2024. januári példa erre az esztergomi Suzuki gyár ideiglenes leállítása az Ádeni-öbölben és a Vörös-tengeren teherhajók elleni terrortámadások következtében fellépő szállítási nehézségek miatt. A nyersanyagok egy részével kapcsolatban ismerünk feltáratlan hazai természetes forrásokat is, ezek értékeléséhez szükséges nemzetközi kitekintést szolgálja tanulmányunk.

Az akkumulátorok az autógyártás mellett fejlett technológiai termékek hosszú sorában kapnak szerepet (az autóktól a fűtési rendszerekig), ezekben a készülékekben az akkumulátorok egy tartozékcsoportot alkotnak. Az akkumulátorokat gyártó nagyvállalatok többsége kínai, és a teljes értékláncot is az ázsiai országok dominanciája jellemzi. A legfontosabb alapanyagok feldolgozásának 60–80%-a Kínában történik. A dél-koreai, kínai és japán cégek a vezető gyártók hazánkban. (Dél-koreai SK On Iván-csa, Komárom, Samsung SDI Göd, a japán GS Yuasa: Komárom, Miskolc). A hazai beszállítók hosszú sora kapcsolódik ezekhez az üzemekhez. A már megépült három magyarországi nagy akkumulátorgyárra az állam 138,6 milliárd forintnyi közvetlen támogatást fordított (2022-es adatok) [5]. Ezzel szemben nem jutott állami pénz nyersanyagforrások feltárására, illetve a kapcsolódó nyersanyag feldolgozási technológiák fejlesztésére.

Az akkumulátorgyártás ellátási láncát öt ásványi nyersanyaggal kezdődik, ezek a lítium, nikkel, kobalt, grafit és mangán. Mind az öt anyag szerepel az EU 2023-ban közzétett kritikus és stratégiai elemek listáján. Magának a nyersanyagnak a biztosítása csak az első előfeltétel, ezen kívül sok más (pl. műanyag, vegyi alapanyag) is elengedhetetlen a gyártáshoz. A nyersanyagok bányászati kitermelését követi a vegyi feldolgozás, finomítás tiszta végtermékké (rendszerint fémmé, fémoxidokká), majd a cella alkatrészek gyártása, összeszerelése és vezérlése, akkumulátor-csomagba helyezése, majd beszerelése, az ártalmatlantítás és újrahasznosítás.

Az egyes akkumulátor fémek piaci kereslet-kínálata időben és földrajzi térben is erősen változó. Ezeket a tendenciákat képezi le a globális földtani kutatási ipar is, ásványvagyon hatter, a nyersanyagkészletek megkutatásával, bővítésével. Az öt nyersanyagról vázolható mai pillanatképet mutatják be a következő bekezdések. A nyersanyagok adatlapjai tartalmazzák a begyűjtött és értékelt részletes információkat [2]. Ezeket a tervek szerint a TEKH félévente tekinti át és aktualizálja.



1. ábra. A Li-ion akkumulátor metszete a jellemző nyersanyagok feltüntetésével. Forrás: autotechnika.hu

A hazai előfordulásokról itt csak néhány azonosító adatot közlünk, és a *Bányászati és Kohászati Lapok* későbbi számaiban jelenik majd meg összefoglaló értékelés.

Lítium, Li

Alkáli fém, a földkéregben átlagos gyakorisága 21 g/t [6]. Stratégiai/kritikus elem minősítést azért kapott 2020-tól az EU-ban, mert mind a nyersanyag készletek, mind a jelenlegi termelés döntően tengerentúli országokban összpontosulnak (1. és 2. táblázat), és a bővülő európai autógyártás rövid- és középtávon csak ezekre a külső importforrásokra támaszkodhat.

A lítiumion akkumulátorokban hagyományosan az elektrolit szerepét tölti be (1. ábra). A lítiumot és vegyületeit számos más ipari alkalmazásban is használják, pl. hőálló üvegek és kerámiák, a repülőgépipari ötvözetek előállítására.

A fém egyik jellemzője a rendkívüli reakcióképesség. Ehhez kapcsolódik fokozott tűzveszélyessége, illetve tűz esetén az oltással kapcsolatos nehézségek is, mivel a lítium akár az oltóvízzel is hevesen reagál. Ez egyúttal az alkalmazási lehetőségeket is behatárolja.

A lítium több geológiai környezetben alkot jelentős előfordulásokat:

Földtani helyzet	Fő lítiumtartalmú összetevők
Gránit pegmatitok	spodumen $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$
Vulkanogén agyagos üledékek	hektorit $\text{Na}_{0,4}\text{Mg}_{2,7}\text{Li}_{0,3}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Salar sós tó, evaporitok	Li-karbonát, Li_2CO_3
Termálvizek	oldott Li-sók

A lítiumpiac az autóipar villamosításával párhuzamosan globális kérdéssé vált. Az árak olyan ingadozóak, mint a kereslet előrejelzése. Jelentős csúcsra szöktek az árak a COVID utáni időszakban a termelő kapacitások egyidejű újrandulásával, majd komoly áresés volt tapasztalható, a lítium ára a 60 000 USD/tonna közeli csúcsertékről 13 000 USD/tonna körüli csúcsra csökkent. Ennek oka elsősorban a megnövekedett lítiumkutatás és az alternatív energiatároló rendszerek keresése, valamint az elektromos autók gyártásának lassabb üteme, a mérsékelt piaci kereslet, illetve, az ársúcs vonzotta befektetések bővítő hatása a felderített ásványvagyron források szegmensében. A pillanatnyi fémárak mellett a 10 USD/tonna érc helybeli értéket a kb 750 g/t Li-tartalom jelenti.

A világon mind az ásványvagyronok listáján, mind az elsődleges ásványi nyersanyagtermelés területén Chile, Ausztrália és Kína vezet, a kitermelés több mint 90%-át adva. Európában a 2010-es évek elején megnövekedett piaci kereslet hatására számos lítiumérc-kutatási projekt indult Írországban, az Egyesült Királyságban, Franciaországban, Spanyolországban, Németországban, Ausztriában, Csehországban és Finnországban. Németországban kísérleti stádiumban van a geotermikus magas sótartalmú mélységi vizekből kinyert lítiumtermelés. 2024-ben várhatóan több bányászati projekt lép termelésbe Európában, a legfontosabbak a Cinovec (Németország, Cseh Köztársaság), a United Downs (Egyesült Királyság) lelőhelyei [4].

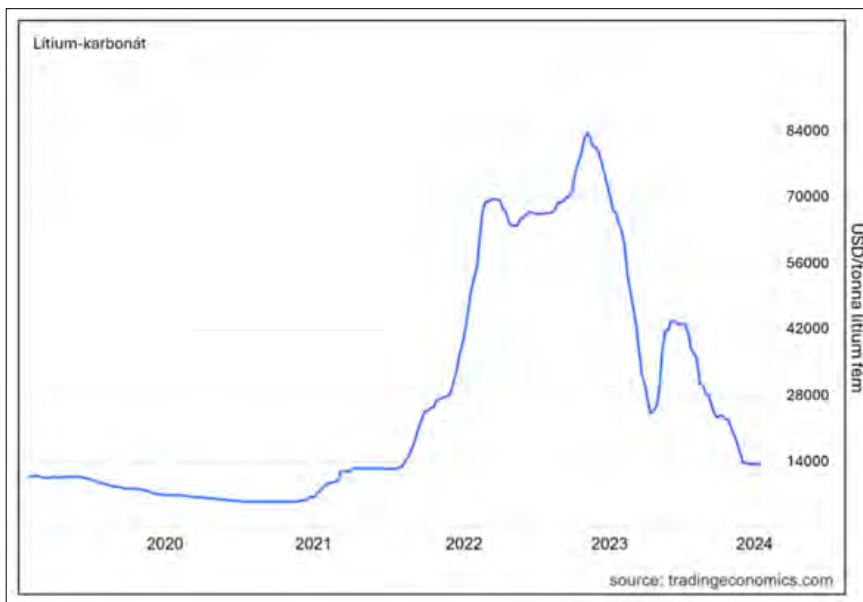
Magyarországhoz legközelebb Szerbiában található a Jadar előfordulás tartalmazza Európa legnagyobb lítiumérc ásványvagyont, de ennek fejlesztése jelenleg a kitermeléssel kapcsolatos környezetvédelmi kérdések rendezéséig felfüggesztették.

A Miskolci Egyetem bevonásával sikeresen lezárultak (CHPM 2030) vagy jól haladnak a sótartalmú termálvizekből történő kitermelésre irányuló nemzetközi kutatási programok, mint például a Brine-RIS [7]. Hazai előfordulások közül az alföldi termálvizekben mutatkoztak első ígéretes eredmények [8] (4. táblázat).

Mangán, Mn

A mangán a külső kontinentális kéreg gyakorisági listáján a 12. legnagyobb mennyiségben előforduló elem, körülbelül 0,1 tömegszázalékos átlagos mennyiségével [6].

Azért került fel az EU stratégiai nyersanyagai közé, mert nagy tisztaságú, szennyeződésmentes mangánként a Li-ion-akkumulátorok katódjának fő komponense (Ni és Co elemekkel együtt). A termelt mangán több mint 90%-át a kohászati iparban használják fel, ahol erős redukálószer, elengedhetetlen az acélgégyártásban. Jelentős mennyiségben ferromangán ötvözetként kerül a piacra. Legfontosabb nem kohá-



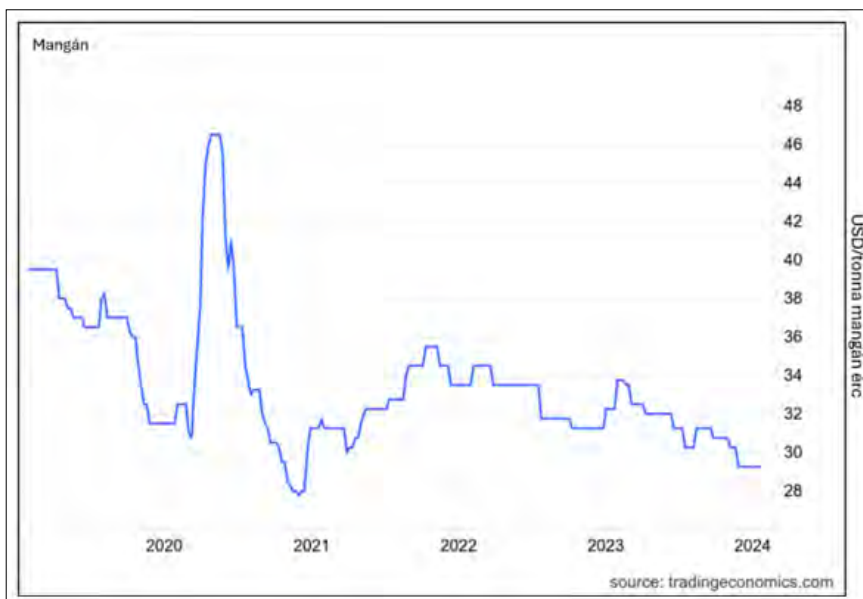
2. ábra. A lítium-karbonát világszertei árának alakulása 2019–2024 között

szati célú felhasználása a szárazelemek gyártása, ahol mangán-dioxid formájában alkalmazzák. Emellett számos más gazdasági ágban is felhasználják, mint például nyomdafestékek, vegyipar, mezőgazdaság (műtrágyák, gombaölők stb.), alumíniumötvözetek gyártásában.

A kereskedelmi szempontból mangánércként forgalmazott nyersanyag MnO 44% referenciaminőségű [11].

A mangánérctelepek négy főbb csoportra oszthatók [12]:

- ❑ magmás képződményekhez kapcsolt,
- ❑ üledékes mangántelepek,
- ❑ szerkezeti zónák ércei és
- ❑ metamorf (többnyire az üledékes típus átalakulásával létrejött) dúsulások.



3. ábra. A mangánércek piaci árának alakulása 2019–2024 között

Számos ásvány tartalmaz mangánt, de ezek közül csak néhány fontos a fő ércásványként: ezek a piro-luzit (MnO_2), a pszilomelán ($Ba \cdot (H_2O)Mn^{3+}_5O_{10}$), rodok-rozít ($MnCO_3$), a manganiit $MnO(OH)$, hausmannit ($Mn^{3+}_3O_4$), braunit ($Mn^{2+}Mn^{3+}_6SiO_{12}$).

A mangán áringadozása az acél iránti kereslet változásait tükrözi. 2020 elején a kínai elektrolitikus mangánpiac összesített működési üteme jelentősen csökkent a COVID-19 világjárvány idején bevezetett szigorú intézkedések miatt, de jó támogatást mutatott a mangánárak későbbi, 2021-es korrekciójához.

A világ legjelentősebb mangánérc ásványvagyónál Dél-Afrika, Ausztrália és Gabon rendelkezik. Európában Ukrajna ásványvagyona jelentős. Koszovóban és kisebb mértékben Romániában és Magyarországon jelentős kiaknázatlan készleteket tartanak nyilván. A mangánércek legnagyobb globális termelői és exportőrei szintén Dél-Afrika, Gabon és Ausztrália. Európában Ukrajna mangánérc-termelése volt jelentős, de Bulgária is ide számít (2021) [4].

A piaci forgalomban a mangánérc 4–6 USD/tonna érc (44% MnO) tartományban mozgott 2016–2021 között [9]. Jóval magasabb árfekvésű az akkumulátorfém minőségű (nagy tisztaságú) mangán piaca (elektrolit mangán 1750 USD/tonna).

Magyarország két leállított mangánérc lelőhelye Urkút és Eplény, egyúttal ritka földfémek és kobalt jelentős dúsulását is tartalmazza, és átértékelésre szorul [3].

Kobalt, Co

Átmeneti fém, a felső kontinentális kéregben átlag koncentrációja 17 ppm.

A teljes akkumulátorellátási lánc kulcsfontosságú nyersanyaga, az akkumulátorokban a katódhoz szükséges egyik fém, így elektromos járművek és a hordozható elektronika gyártásában nélkülözhetetlen szerepet tölt be. 2011 óta szerepel a kritikus elemek listáján [10].

A kobalt ércként a természetben három földtani környezetben alkot jelentős előfordulásokat [4]:

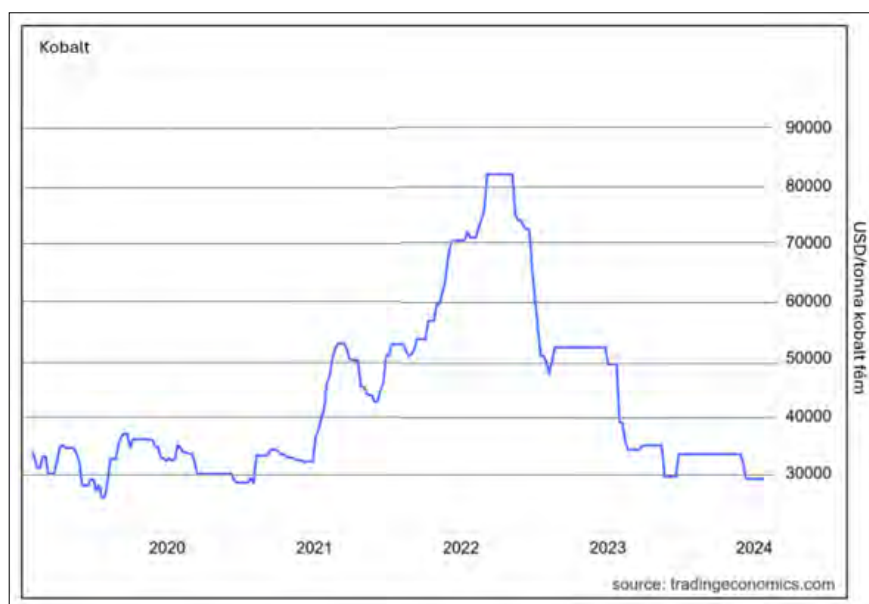
- ❑ Réteggövető Cu-Co lelőhelyek – Katanga (DR Congo), Talvivaara (Finnország)
- ❑ Ni-Co lateritek ultramafikus kőzetek, különösen peridotit és szerpentin felszíni mállása nyomán (Brazília, Kamerun, Kuba, Új-Kaledónia, Indonézia és a Fülöp-szigetek, Ausztrália, az Egyesült Államok, Madagaszkár és Oroszország).
- ❑ Magmás Ni-Cu (-Co-PGE) szulfid ércetek, köpeny eredetű magmás kőzetekben Kiemelkedő példák: Sudbury (Ontario, Kanada) és Nor’ilsk (Szibéria, Oroszország).

Gyakori kobalt tartalmú ércképző ásványok szulfidok és szulfoarzenidek: kobaltin (CoAsS), karrollit ($\text{Cu}(\text{Co},\text{Ni})_2\text{S}_4$), eritrit ($\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) és szkutterudit ($(\text{Co},\text{Ni})\text{As}_{3-x}$).

Az elmúlt öt év ártrendje a 4. ábrán látható. A kobalt fém jelenlegi világpiaci ára körülbelül 30 000 USD/tonna.

A országokénti kobaltérc ásványvagyontlistát Kongó, Ausztrália és Kuba vezeti. A Kongói Demokratikus Köztársaság rendelkezik a világ legnagyobb megkutatott kobalt érckészletével. A világ legnagyobb termelője is Kongó, melyet Indonézia és Oroszország követi (2021). A világszerte kitermelt kobalt nagy része (98%) egyéb érc (pl. nikkel) bányászatából származó melléktermék, önállóan a kobalt mindössze 2%-ban fordul elő, 38% nikkel-kobalt ércből, valamint 60% réz-kobalt ércből származik. A finomított kobalt fém kohászati előállítását Kína uralja (76%).

A kobalt esetében meg kell említenünk az etikus bányászat problémáját. A kongói illegális kobaltérc-bányákban gyakran alkalmazott gyermekmunka miatt



4. ábra. A kobalt fém világpiaci árának változása 2019–2024 között

a kongói bányászati termékek bojkottját, illetve visszaszorítását kezdeményezik. Kongónak a piacon elfoglalt erős pozíciója miatt ez jelentős globális ellátási kockázatot jelent.

Görögországban a laterites nikkellelőhelyekről bejelentett előfordulások körülbelül 95 000 tonna kobaltot tartalmaznak. A Lengyelországban felsorolt készletek 75 000 tonna kobaltot tartalmaznak. Európában 104 kobaltlelőhelyet azonosítottak, amelyek többsége Finnországban, Norvégiában, Svédországban és Görögországban van. Jelentős, de még feltáratlan lelőhelyek Svédországban és Spanyolországban találhatóak [13]. Szlovákiában Hodkovce és Dobsina a két legígéretesebb előfordulás [14].

Az EU-n belül az elmúlt öt évben 140–2300 tonna kobaltot (a világtermelés 1-2%-át) bányásztak ki, mindet Finnországból. Európa legnagyobb üzemelő bányája a Talvivaara Ni-Cu-Zn-Co-szulfid ércelelep Finnországban. További jelentős finnországi előfordulások: Hannukainen Fe-Cu-Au, Kevitsa Ni-Cu-PGE, Sakatti Ni-Cu-PGE, Hautalampi Ni-Cu-Co és Juomasuo Au-Co.

Magyarországon több, még nem kutatott, de anomális kobaltdúsulás ismert, Recsk, Úrkút, Eplény, Répáshuta szerepel a listán (4. táblázat).

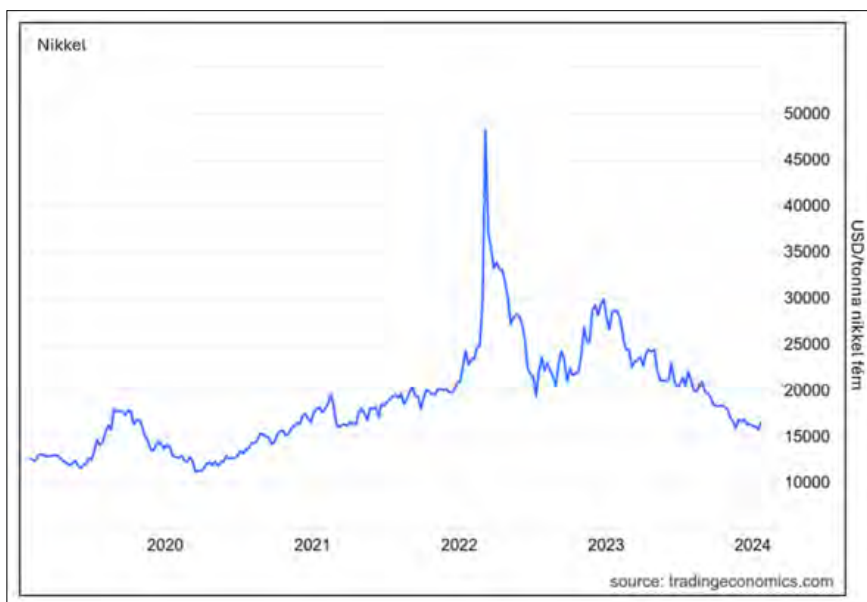
Nikkel, Ni

Átmeneti fém, közeli rokonságban az arzén, antimon, kobalt elemekkel. Átlagos koncentrációja a felső kontinentális kéregben 47 g/t.

2020 óta stratégiai nyersanyagként szerepel az EU listáján az akkumulátorhoz szükséges minőségű (az 1. osztályú, >99.8% tisztaságú Ni) változat. A hibrid járművekben használt akkumulátorok katódja egyik fő komponenseként (Ni-Mn-Co, Ni-Cd és nikkel-fém-hidrid akkumulátorok) egyre növekszik az alkalmazása. Más ágazatokban főleg ötvözetek, például rozsdamentes acél előállítására használják. Mivel a nikkel ellenáll a korróziónak, ezért más fémek bevonatolására is használják, korrozióvédelem céljából.

Az ásványi nyersanyagként bányászott nikkelérc két fő típusba sorolható [15]:

- ❑ Ni-lateritek, ebben a fő ércásványok a nikkeltartalmú limonit $[(\text{Fe},\text{Ni})\text{O}(\text{OH})]$ és a garnierit $(\text{Ni},\text{Mg})_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – trópusi éghajlaton, bázisos és ultrabázisos kőzeteken keletkezett laterit,

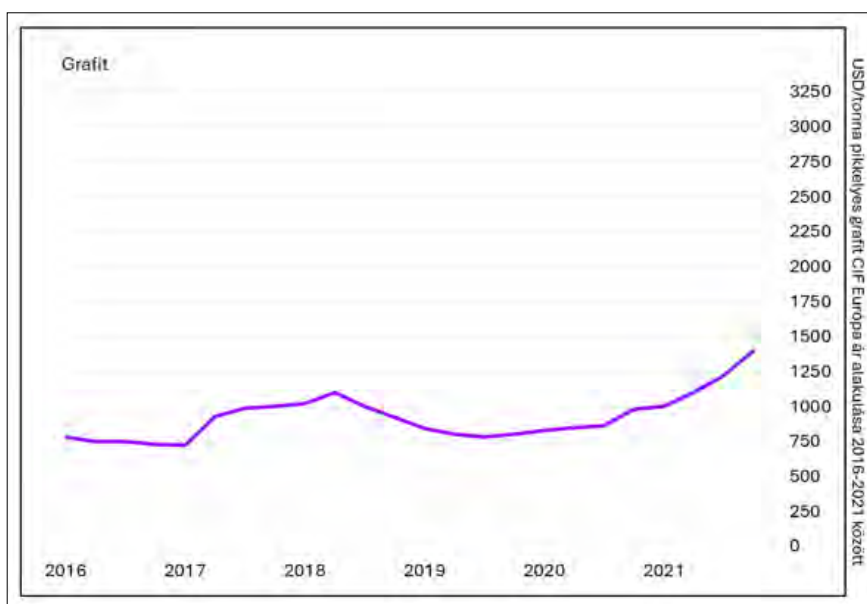


5. ábra. A nikkelfém árának alakulása 2019–2024 között

- magmás szulfid érctelepek, bázisos és ultrabázisos kőzetekben ahol a fő ércásványa a pentlandit [(Ni,Fe)₉S₈].

A nikkelfém a fémtőzsdék egyik jelentős szereplője. Az elmúlt 10 évben a nikkelfém értékesítési ára 10 000 és 20 000 USD/tonna között ingadozott, jelenleg az azonnali ára 16 000 USD/tonna.

A nikkelfém ércérek ásványvagyoni listáján egyre inkább a laterit típusú előfordulásokkal rendelkező országok foglalják el az első helyeket (Indonézia, Fülöp-szigetek, Új-Kaledónia), míg a hagyományos nikkelfém ércérek termelői (Oroszország, Ausztrália, Kanada) hátrébb szorulnak (2. táblázat)



6. ábra. A nagy-kristályos grafit ára Európában 2016–2021 között. Forrás: [16]

A nikkelfém készletek globálisan 94 millió tonnára becsülhetők. A listát itt Indonézia (22,4%), Ausztrália (21,3%), Brazília (17%) vezeti. Európában a kitermelésre alkalmas nikkelfém készletei javarészt Finnországban találhatóak, kisebb előfordulásokat Spanyolországban, Görögországban, Törökországban, Macedóniában, Koszovóban és Ukrajnában tartanak nyilván (3. táblázat).

A globális termelés néhány országra koncentrálódik. 2022-ben a világtermelés több mint fele Ni-laterit lelőhelyekből származott (Indonézia, Fülöp-szigetek, Új-Kaledónia,

Kuba stb.). Az EU-ban három ország számolt be nikkelfém termeléséről a 2016–2020 közötti időszakban: Finnország (38 kt), Görögország (18 kt), Lengyelország (1 kt).

Magyarországon anomális nikkelfém dúsulások ultrabázisos képződményeinkben ismertek, Felsőcsatáron, Tornakápolnán (4. táblázat).

Grafit, C

A grafit a szén polimorf változata. Fémessé válik, kiváló hő- és elektromos vezető, inert, hőálló és jó kenőképeségű.

A nyersanyag 2011 óta minősül kritikusnak az EU-ban. Fő alkalmazási területei az acélgyártás (32%), az akkumulátorok (25%) és a kenőanyagok (13%). A grafitot kopórétegek kialakításában, ceruzákban, elektronikai eszközökben, égésgátló anyagokban és üzemanyagcellákban is használják. A természetes grafit fémessé és nemfémessé tulajdonságainak kombinációja miatt igen változatosan felhasználható.

A grafit kialakulása a széntartalmú anyagokban gazdag üledékes kőzetek metamorfózisának eredménye. Az ércitust az ipari osztályozásban amorf, kristályos vagy teleres grafitnak minősítik a kristályosodás foka, szemcsemérete és morfológiája szerint (az

1. táblázat. A világ legjelentősebb akkumulátorfém ásványvagyonával rendelkező országai

	Lítium	Mangán	Nikkel	Kobalt	Grafit
	2021	2022	2021	2021	2021
1	Ausztrália	Dél-Afrikai Közt.	Indonézia	Kongói Dem. Közt.	Kína
2	Chile	Gabon	Fülöp-szigetek	Oroszország	Brazília
3	Kína	Ausztrália	Oroszország	Ausztrália	Mozambique
4	Argentína	Kína	Új-Kaledonia	Fülöp-szigetek	Oroszország
5	Brazília	Ghana	Ausztrália	Kanada	Madagaszkár
6	Zimbabwe	India	Kanada	Kuba	Ukrajna
7	Portugália	Brazília	Kína	Papua New Guinea	Norvégia
8	Kanada	Ukrajna	Kuba	Madagaszkár	Észak-Korea
9	USA	Malaysia	Brazília	Marokkó	Kanada
10		Cote d'Ivoire	Dél-Afrikai Köztársaság	Indonézia	Vietnam
Source	[11]	[11]	[4]	[11]	[11]

amorf a legolcsóbb, a nagykristályos teléres grafit a legdrágább változat).

A grafit minőségét két paraméterrel jellemzik. Az egyik a TCG (Total Carbon as Graphite) – összes széntartalom grafit formában, a másik a kristályméret – amorf, 1 mm alatti, 1–6 mm közötti, illetve 6 mm feletti kristályméretek osztással. A nyersanyagoknak nincs jól követhető világpiaci ár jegyzése. A különböző változatok ára szélsőséges tartományokban mozog, A kristályos grafit európai ára a 2016–2021 közötti időszakban 750–1250 USD/tonna körül ingadozott [16].

Az ásványvagyonlistán a grafit esetében Kína, Brazília és Mozambik szerepel a dobogós helyen. Európában Oroszország, Ukrajna és Norvégia forrásai említendők. Termelőként Kína (67%) (2018-ban termelése 1,25 millió tonna), Brazília (8%), Mozambik (5%), India (5%) és Észak-Korea (5%) fedi le a világtermelés közel 90%-át. Az Európai Unió, a természetes grafit esetében 97%-ban importfüggő.

Jelenleg két aktív mélyművelésű bánya működik az EU-ban: az ausztriai Kaisersberg és a németországi Kropfmühl. Az európai kontinensen a legnagyobb grafitbánya az unión kívül az észak-norvégiai Skotlandban található, ahol kiváló minőségű kristályos grafitot állítanak elő, évente körülbelül 10 000 tonna grafitércből.

Romániában a múltban kiaknázták a grafitlelőhelyeket, ilyen volt pl. a Catalinu és Ungurelaşu bánya. Kristályos grafit előfordulások ismertek Szlovákiában, Kokova nad Rimavicouban és Hodkovceban [14].

Magyarországon az Upponyi hegység és a Szendrői hegység területén van adat grafitelőfordulásról (4. táblázat).

Összesített globális, európai és hazai körkép

Európa a világ egyik élenjáró autógyártó országcsoportja. Az elektromos hajtásra való fokozatos áttérés az akkumulátorgyártáshoz szükséges nyersanyagok forrásainak ismeretét nélkülözhetetlenné teszi. Kiemelten igaz ez a hazai gyártásunkra, amely jelenleg semmilyen belföldi ásványi nyersanyag háttérrel nem rendelkezik.

Az ásványvagyon bizonyos szinten már megismert, gazdaságos kitermelésre feltehetően alkalmas természeti erőforrást jelent. Egy jövőbeli ásványi nyersanyagtermelés alapját ennek az erőforrásnak a technológia, gazdaságosság és környezeti hatás szempontjából értékelt része, a készlet jelenti. Ezekről nem állnak rendelkezésre megbízható, összevethető globális adatok. Ennek oka elsősorban a kategorizálás eltérő szabályozása. Az akkumulátorfémek legnagyobb ásványi erőforrásaival rendelkező országok listája azonban összeállítható (1. táblázat). Az anyagfajtánként az első tíz országot felsoroló listánkon 29 ország szerepel, 5 Ázsiából, 9 Afrikából, 6 Amerikából, 6 Óceániából, 3 Európából (ebből csak egy az EU-ból). Az összes anyagra a legnagyobb ásványvagyon-háttérrel Ausztrália, Kína, Oroszország és Brazília rendelkezik. Európában csak Ukrajna (mangán és grafit), Norvégia (grafit), Portugália (lítium) van a nyersanyagokként nyilvántartott első tíz legnagyobb ásványvagyonnal rendelkező ország között. Mivel Európa a Zöld Átmenet hosszú távú stratégiáját tűzte zászlajára, kitettsége és sérülékenysége a megvalósításhoz szükséges nyersanyagellátás területén igen jelentős és nagyrészt biztonsági kérdés is. Ez a jelenlegi, hosszadalmas vitán áteső Kritikus Nyersanyag Törvény háttere is.

2. táblázat. Az akkumulátorfém ásványi nyersanyagkészletek nagysága és minősége az európai országokban (2022)

	Bizonyított	Minőség	Bizonyított	Minőség
	kt	%	kt	%
Lítium				
Ausztria	4 320	0,7	3 120	0,8
Csehország			432	0,7
Finnország	1 140	1,1	6 260	0,2
Németország	16 500	0,7	14 700	0,6
Portugália	10 700	1,1		
Mangán				
Koszovó	790 836	22,2	596 350	
Románia	1 000		17 000	
Ukrajna	1 851 000		2 500 000	
Nikkel				
Spanyolország	1	0,6		
Finnország	100	0,6	1 500	0,3
Oroszország	15 000			
Macedonia	5 600	1,0		
Koszovó	8 812	1,2		
Törökország	29 700	1,1		
Kobalt				
Finnország	525	0,0	72	0,0
Spanyolország	3	0,0		
Grafit				
Svédország	63 580	15,0		
Finnország	26 700	4,8		
Norvégia	1 780	22,0		
Ausztria	160			
<i>Forrás: [4]</i>				

Hasonló, de még élesebb kitétség jellemzi a hazai helyzetet, ahol a feldolgozó autó-, akkumulátorgyártási ipari centrumok kiépültek, a nyersanyagellátás hazai forrásainak kutatása viszont több évtizede szünetel. Az akkumulátorfémek csoportjában egyedül a mangánércből rendelkezünk kimutatott ásványvagyonnal, de az akkumulátorgyártáshoz szükséges ércfeldolgozási és kohászati technológia nélkül. A kutatási lemaradások pótlására, a hazai földtani információk újraértékelésére van sürgősen szükség.

A megkutatott és ipari felhasználásra alkalmas ásványi nyersanyagkészletek európai összesítésében

(2. táblázat) a skandináv országok, az Ibériai félsziget országai, és a Balkán térsége szerepel az élen. A jelentős lítiumkészletekkel rendelkezők között szerepel Ausztria és Németország (geotermális mélységi vizek jövőbeli hasznosításával).

Ebben az összegzésben sem a másodnyersanyagokkal, sem az újrahasznosítással nem foglalkozunk. Az egyes ásványi nyersanyagok átfogó, részletes elemzése is terjedelmi korlátokba ütközne, de az érdeklődő olvasó további geológiai, bányászati és gazdasági információkat érhet el az egyes nyersanyagokról a honlapunkon [2].

3. táblázat. A világ és Európa legfontosabb akkumulátorfém ásványi nyersanyagtermelői (2022)

	Lítium	Mangán	Nikkel	Kobalt	Grafit
	2022	2022	2022	2022	2022
Ország	tonna				
Argentína	6 200				
Ausztrália	61 000	3 300 000	160 000	5 900	
Brazília	2 200	400 000	83 000		87 000
Kanada	500		130 000	3 900	15 000
Chile	39 000				
Kína	19 000	990 000	110 000	2 200	850 000
Kongó Dem. Közt.				130 000	
Cote D'Ivoire		360 000			
Kuba				3 800	
Gabon		4 600 000			
Ghana		940 000			
India		480 000			8 300
Indonézia			1 600 000	10 000	
Dél-Korea					17 000
Madagaszkár				3 000	110 000
Malájzia		360 000			
Marokkó				2 300	
Mozambik					170 000
Új-Kaledonia			190 000		
Norvégia					10 000
Papua New Guinea				3 000	
Fülöp-szigetek			330 000	3 800	
Portugália	600				
Oroszország			220 000	8 900	15 000
Dél Afrikai Közt.		7 200 000			
Tanzánia					8 000
Törökország				2 700	
Ukrajna		400 000			
USA	939		18 000	800	
Zimbabwe	800				
Többi ország	136	970 000	440 000	5 200	9 700
Világ összesen	130 474	20 000 000	3 281 000	190 000	1 300 000

4. táblázat. Akkumulátorfémek ismert magyarországi dúsulásai

Irányítószám	Helység	CRM	Irányítószám	Helység	CRM
5919	Pusztaföldvár	Li	3559	Répáshuta	Co
7300	Komló, Sikonda	Li	8082	Gánt	Bauxit, Co
8409	Úrkút	Mn, Co, REE	9794	Felsőcsatár	Ni
8413	Eplény	Mn, Co, REE	3761	Tornakápolna	Ni
3395	Demjén	Mn	3622	Uppony	Grafit
3245	Recsk	Cu, Co, Sb, As, PGE	3752	Szendrő	Grafit
	REE = ritka földfémek PGE = platina fémek	Forrás: [2]			

A globális termelési adatok azt tükrözik, hogy melyek az európai és egyúttal hazai akkumulátor gyártásának lehetséges import nyersanyagforrásai (3. táblázat). Kiemeltük nyilvántartásokban megjelenő és a nyilvános listákon szereplő néhány európai termelő országot. Megállapítható, hogy az európai termelők egyetlen nyersanyag esetében sem érik el a piac teljes méretének 2%-át.

A jelentősebb európai termelők túlnyomórészt nem EU-országok (Törökország, Norvégia, Ukrajna). A nyersanyagforrások többsége pedig távoli tengerentúli régiókban van, vagy közelebb ugyan, de a jelenlegi geopolitikai helyzetben elérhetetlen helyzetben (Oroszország, Ukrajna).

Az akkumulátorfémek lehetséges magyarországi előfordulásait a 4. táblázat tartalmazza. Ezeket az előfordulásokat külön adatlapokon ismertetjük, melyek a TEKH honlapján érhetők el. Az azonosítás érdekében a települések irányítószámait feltüntettük. Részletes értékelésüket külön cikkben fogjuk ismertetni.

Összefoglalás

Az akkumulátorfémek ásványi nyersanyagai kevésbé ismertek Magyarországon, miközben az ország nemzeti célként jelölte meg, hogy világszínvonalú akkumulátorgyártó ipart fejleszt ki a közeljövőben. Ehhez véleményünk szerint a nyersanyagok hazai forrásainak kutatása és fejlesztése is szükséges. Az áttekintésünk és az összegyűjtött adatok segíthetik az ország több ismert hagyományos ásványlelőhelyének ilyen célú korszerű erőforrás-felmérését. Az információkat a kritikus és stratégiai elemek külön adatlapjai alapján összesítettük, amelyek a TEKH honlapján érhetők el. Ezekről az adatlapokon további információk (geokémiai adatok, publikációs hivatkozások stb.) találhatóak.

Irodalomjegyzék

- [1] Földessy J., Márai F. (2023): Bevezető egy új sorozathoz: Kritikus és stratégiai nyersanyagok az Európai Unióban és Magyarországon – multimédia-adatgyűjtés építése a Miskolci Egyetemen. Bányászati és Kohászati Lapok, 156, 25-31, https://ombke.hu/wp-content/uploads/2023/12/BKL_2023-4.pdf
- [2] <https://tekh.uni-miskolc.hu/>
- [3] Földessy J. (szerk.) (2014): Basic research of the critical raw materials of Hungary. Milagrossa, Miskolc, 159 p. https://kritikuselemek.uni-miskolc.hu/files/files/egyetem10_vegso_okt26.pdf
- [4] <https://screen.eu>
- [5] <https://novekedes.hu/elemezsek/terkepre-tettuk-a-hazai-akkumulatoripart>
- [6] Rudnick R. L., Gao S. (2003): Composition of the continental crust. Treatise of Geochemistry, 4, 1–64. Elsevier, Amsterdam. ISBN 0-08-044338-9.
- [7] https://brine-ris.eu/wiki/Main_Page
- [8] <https://www.vg.hu/energia-vgplus/2023/11/mol-fontos-dontesek-elott-all-a-litiumprojekt>
- [9] <https://www.statista.com/statistics/247633/manganese-price-forecast/>
- [10] <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/eu-critical-raw-materials>
- [11] <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/>
- [12] Pál-Molnár E., Bíró L. (szerk.) (2013): Szilárd ásványi nyersanyagok Magyarországon. 249 p. Geolitera, Szeged.
- [13] Horn S., Gunn A. G., Petavratzi E. (2021): Cobalt Resources in Europe and the Potential for New Discoveries. Ore Geology Reviews, 130. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103915>
- [14] Baco P., Bacova Z., Németh Z., Repciak M. (2015): Potential occurrence of selected, mainly critical raw materials at the territory of the Slovak Republic in respect to EU countries needs. Slovak Geol. Mag., 15, 87–120.
- [15] Dill H. (2010): The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. Earth Science Reviews, 100, 1–420. DOI: 10.1016/J.EARSCIREV.2009.10.011
- [16] <https://www.northerngraphite.com/about-graphite/graphite-pricing/>