

Magyarország vízmérlege és az éghajlatváltozás

Báder László*

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék. 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., K épület magasföldszint 12. (E-mail: laszlo.bader@edu.bme.hu)

DOI:10.59258/HK.10410



Kivonat

A globális felmelegedéssel járó hőmérséklet-növekedéssel nő a párolgási igény. Vízmérlegünk legnagyobb tagjai (az átfolyó vízmennyiséget nem számítva) bevételi oldalon a csapadék, kiadási oldalon a párolgás. Az éghajlati energiák elosztását végző párolgásnak a szerepét azonban nem veszteségként, hanem szolgáltatásként kell értelmeznünk: egyik legfontosabb funkciója a felszín melegedésének korlátozása. A teljes lakossági-, ipari- és mezőgazdasági vízigénynél nagyobb mennyiségű vízre van most szükség a párolgás növeléséhez, azért, hogy az éghajlati víz- és energiamérleg kedvezőtlen változásait fékezzük. Még mielőtt versenyfutás kezdődne a vízárt a légköri vízigény és a felszíni (természeti és társadalmi) vízigények kielégítése között, egy rendszerszemléletű integrált légkör-víz-kör modell kidolgozására van szükség. A víz és párolgás szerepéről alkotott nézeteinket meg kell újítani. A passzív párolgáshoz képest meg kell növelni a növényzet segítségével szabályozott (és hasznosított) aktív párolgatózás mennyiségét és arányát. A civilizációk kialakulása és fejlődése során az ember képessé vált a hidrológiai ciklus stabilitását befolyásolni. A vízbiztonság érdekében ezért nem „csak” egy vízügyi problémát, hanem egy civilizációs problémát kell megoldanunk. Ez messze nem csak a vízügy feladata, a kihívás az élet minden területét érinti az oktatástól a kutatásig, a legkülönbözőbb ágazatokkal együtt. Ezzel a megközelítéssel a vízügyi ágazat szerepe is új értelmezést nyer: úttörője és motorja lehet a kedvező változásoknak.

Kulcsszavak

Hidrológiai ciklus, éghajlatváltozás, párolgás, evapotranszpiráció, klimatikus vízigény, ökoszisztéma szolgáltatások, felszínhőmérséklet, kis vízkör, vízbiztonság.

Assessing the water balance of Hungary in the shadow of climate change

Abstract

Global warming induces an increasing demand for evaporation. The largest components of the water balance equation in Hungary are precipitation on the input side, and evapotranspiration on the output side (excluding the rivers flowing through the country). The role of evaporation needs to be redefined from a simple loss factor to an important ecological service that enables the distribution of climatic energy. This invisible service protects the surface from overheating. Due to global warming evapotranspiration must be increased on land to meet the growing need of climatic energy transport, exceeding all current consumption by population, industry and agriculture. We must renew our concepts about evapotranspiration before it is too late. An integrated, system-orientated atmosphere-hydrosphere model is urgently needed. We must not fall into the pointless trap of competing for water between civilization and natural processes. This can be avoided by increasing the ratio of active transpiration through vegetation compared to passive evaporation from the surface. Human civilisation has become capable of influencing the hydrological cycle and challenge its stability. Providing access to water is by no means the only task of the water infrastructure sector. Keeping enough water in the hydrological cycle for both natural processes and civilizations is the way to ensure water security. This huge task requires an unprecedented effort and collaboration across many fields, including education, research and many other sectors of our lives. With this approach the role of the water sector gains a new perspective: it can be a pioneer and engine of much needed and urgent favourable changes.

Keywords

Hydrological cycle, climate change, evaporation, evapotranspiration, climatic water demand, ecological services, surface temperature, short water cycle, water security.

BEVEZETÉS

Az éghajlatváltozás kísérő jelenségei közé tartozik a szélsőséges időjárási események (aszály, árvíz, hőség) gyakoribbá válása. Magyarországon leginkább a meleg hőmérsékleti szélsőségek száma nőtt meg (Lakatos 2021). A szélsőségek kezelése és a következmények elhárítása egyre több és nehezebb feladatot ad a társadalom minden szegletében, a katasztrófavédelemtől kezdve a mezőgazdaságon, vízgazdálkodáson, közlekedésen át az egészségügyig. Hogyan lehet ezekre a nehézségekre felkészülni, vagy inkább megelőzni őket, miközben a vízellátás biztonsága alapvető elvárásává vált? Az ember tevékenysége mélyreható változásokat hozott a környezetben. A problémák jó részét saját magunk okozzuk: „egészen a modern időkig a víz alakította az emberi civilizációt. A jövőben ez fordítva lesz, az emberi civilizáció határozza meg a hidrológiai ciklus sorsát” (Szöllősi-Nagy 2022). Ha nekünk, embereknek kulcsszerepünk van a

hidrológiai ciklus alakulásában – és szem előtt tartjuk, hogy a víz az élet alapfeltétele –, akkor a hidrológiai ciklus alakításával tulajdonképpen saját sorsunkat határozzuk meg.

Rendszerszemlélet a vízmérleg elemzésében

A vízmérleg elemzéséhez a hidrológiai ciklus és a légkörzés egymásba fonódó folyamatait kell vizsgálnunk, mert azok nem választhatóak el egymástól. Induljunk ki onnan, hogy a légkörzés motorja az a különbség, amely az eltérő egyenlítői és sarkvidéki sugárzási egyenlegekből adódik (Geresdi és társai 2013). A víz a hőcserélő közeg szerepét tölti be a földi légkörzésben, az éghajlati energiacserélő folyamatokban, amelyekben a víz rendkívüli hőtani tulajdonságai és halmazállapot változásai semmi mással nem pótolható szerepet játszanak (Hesslerova és társai 2019, Báder 2021). A hidrológiai ciklus és a légkörzés folyamatai a csapadékon és a párolgáson keresztül elválaszthatatlanul összekapcsolódnak és egy rendszert alkotnak. Összetett folyama-

tok vizsgálatát érdemes következetesen, rendszerszemlélettel megközelíteni, amelyet egyre több kutató szorgalmaz: „A vízkészletek stratégiai szerepe világszerte felértékelődött. A víz és a környezet fenntartható kapcsolatán alapuló integrált vízgazdálkodás egyrészt a társadalmi elvárásoknak megfelelő gyakorlati feladat, másfelől megvalósulása a víz természeti és társadalmi körforgásának egységes, tudományos megalapozottságú és rendszerszemléletű figyelembevételét teszi szükségessé. Ennek megfelelően elengedhetetlenül fontos a vízrajzi és meteorológiai közszolgáltatások összehangolt szemléletű kezelése” (Bozó 2017).

A szemléletváltás azonban lassan halad, az áttöréssel, egy rendszerszemléletű integrált vízkörforgás képnek a megfogalmazásával még adósak vagyunk, pedig a szemléletek összehangolásának gondolata több mint fél évszázados: „A rendszerelmélet egy általános közelítésmód, amely messze túlmutat a technológiai problémákon és igényeken, egy szemléletváltás, amely szükségessé vált a tudományban általában, a tudományágak teljes skáláján a fizikától és a biológiától a viselkedési és társadalomtudományig, valamint a filozófiáig, ... és egy jelentős hatású új világképet vetít előre” (Bertalanffy 1968).

Ez a tanulmány a hidrológiai ciklus főbb tagjainak funkcióit elemezve tesz javaslatokat a fogalomhasználat változtatásaira, amely a szemléletváltozás kulcsa lehet. Felvázol egy egyszerű integrált légkörzés-vízkörzés modellt, amely segítségével a körforgás elemeinek funkcióiról, azok hangsúlyainak értelmezéséről szóló párbeszéd felgyorsulhat. Apróságnak tűnhet, de a helyes szóhasználat lehet a mérleg nyelve a fenntarthatóság felé vezető helyes út kiválasztásában. Apropos fenntarthatóság: fontos felhívni a figyelmet arra is, hogy az egymásba fonódó környezeti, társadalmi és gazdasági válságok megoldása nem képzelhető el a jelenlegi ágazati modellek és gyakorlatok megváltoztatása nélkül. A tudományos közélet integrált megközelítést sürget (Geresdi és társai 2013, Bozó 2017, Vida 2017), amely a környezeti problémákkal együtt a vízgazdálkodási kihívások kezelésére és megoldására is vonatkozik. A Hidrológiai Közöny a teljes 2021/3. számot a körkörös vízgazdálkodás előmozdításának szentelte. A területi vízgazdálkodásban alkalmazandó természetes vízmegtartó megoldások eszköztárának és jó gyakorlatoknak a bemutatása már ebbe az irányba vezet (Murányi 2021). A mezőgazdaság a saját nézőpontjából, a termésbiztonság felől közelíti meg a problémát (Kolossváry 2021), és mint a vízellátás-szolgáltatást igénylő ágazat lép fel, ugyanakkor a mezőgazdaság és az erdészet tipikusan olyan ágazatok, ahol a szemléletváltás és az integrált megközelítés a hidrológiai ciklus stabilitásának visszaállítását a legjobban támogathatja például a párologtatási képesség növelésével. A csapadékvíz visszatartását már számos hazai kezdeményezés sürgeti külterületen és belterületeken egyaránt (Bíró 2017).

Kitekintés: hol tart a tudomány?

Egy nemzetközi kutatócsoport a hidrológiai ciklus 464 különböző ábrázolását elemezte, amelyeket az egész világból gyűjtöttek össze (Abbott és társai, 2019). Megítélésük szerint a hidrológiai ciklus megfelelő ábrázolása és tanítása a vízzel kapcsolatos ismereteket jelentősen befolyásolja, tanulmányaik során nagyon sokan találkoznak vele már az

alapoktatástól kezdve, később pedig a szakmai és tudományos gondolkodásmódra is nagy hatással van. Megállapításuk szerint az ábrák túlnyomó többsége jelentős hiányosságokkal rendelkezik, amelyek hátráltatják a vízkörzés jelentőségének általános megértését, pedig a vízkörzés szakterületi alapismeretből, vagy érdekes kutatási témából létkérdéssé vált az emberiség számára. Más kutatások is szorgalmazzák olyan fontos témák tisztázását, mint amilyen a növényzet szerepe a hidrológiai ciklusban (Arora 2002) vagy a párologás szerepének megfelelő értékelése az energiacsere folyamatokban (Ripl 2003, Hesslerova és társai 2019). Felhívják a kutatások a figyelmet arra is, hogy a szárazföldek vízellátásának biztonsága nem csak a beérkező nedvességtől függ, lényeges szerepet játszik a folyamatban a kis vízkör működése, a növényborítás és a csapadék/párologás helyben történő újrahasonosítása is (Kravcik és társai 2007, Spracklen és társai 2018, Sušnik és társai 2022).

Új fogalmak is kezdenek bekerülni a köztudatba, úgy mint a „légköri folyók”, amelyek óriási mennyiségű nedvességet szállítanak az egyenlítő felől a magasabb szélességekre és a szárazföldek belseje felé, ahova a felszíni lefolyás vízmennyiségének sokszorosát juttatják el. A tanulmányok egy része a szárazföldek légköri vízellátásának elemzésével kapcsolatban használja a kifejezést (URL1), híradások a rendkívüli csapadékeseményekkel összefüggésben említik (URL2). Biztató, hogy a vizsgálatok egyre inkább a hidrológiai ciklus egészének megismerését célozzák meg.

Bertalanffynak, az általános rendszerelmélet atyjának a figyelmeztetése azonban ma is érvényes. A modern tudomány hajlamos a részletekben elmerülni, a legapróbb részletek működési mechanizmusát megismerni, miközben megfeledkezik a részek együttműködésének fontosságáról. A rendszerszemlélet célja, hogy a vizsgálat tárgyát teljes „egész-ség”-ben ismerje meg (Bertalanffy 1968). Ne feledkezzünk meg erről a továbbiakban! Nem zárt kockába rendezett igazság egy modell, hanem egy közelítés, hogy összetett dolgokat, folyamatokat átlássunk és megértsük, hogyan állnak össze a részek jól működő egészé.

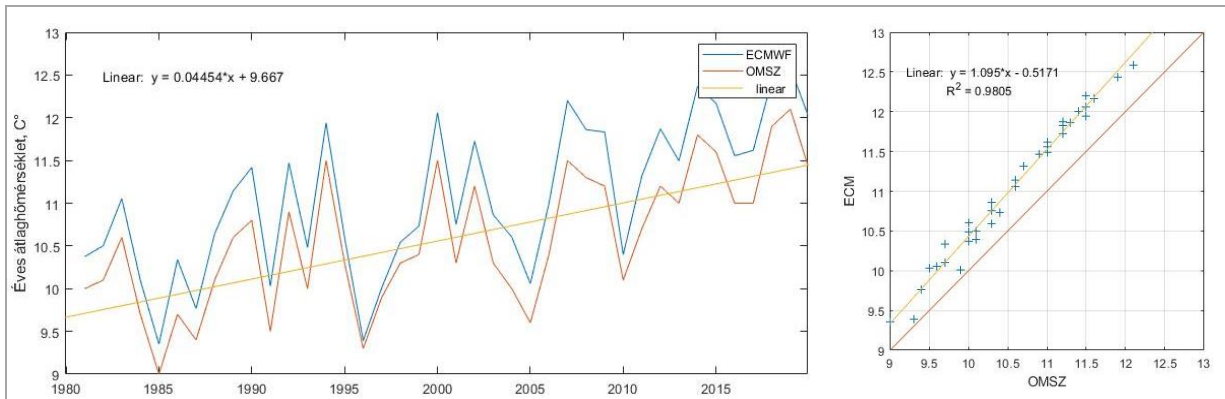
MÓDSZER

Egy rendszer működésének lényege leírható a környezetével való kapcsolatnak (bemenetek, kimenetek) alrendszerének, a rendszerelemek közötti funkcionális kapcsolatoknak, a szabályozó- és korlátozó folyamatoknak az azonosításával (Bertalanffy 1968, Sasvári 2020).

A hidrológiai ciklus esetében induljunk ki az alapvető funkcióból, a főbb tagok meghatározásából, azok szerepének és a közöttük lévő kapcsolatoknak a leírásából. A globális folyamatok helyett összpontosítsunk Magyarországra, hogy a probléma és a javasolt megoldás kézzelfogható legyen. A bevezetőben abból indultunk ki, hogy a légkörzés motorja a Nap felől beérkező rövidhullámú sugárzás földrajzi szélességek közötti eltérése. A légkörzés és a hidrológiai ciklus egymásba fonódnak, ezért a rendszer működés megértéséhez célszerű egy közös modell felvázolása. A globális felmelegedés teszi aktuálissá és sürgetővé a rendszerszemléletű elemzést. Magyarország éves átlaghőmérsékletének emelkedését mutatja be az 1. ábra az 1981-2020 közötti időszakban. Az ábra az Országos Meteorológiai Szolgálat homogenizált, rácspontra interpolált éghajlati

adatsora, illetve az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – Európai Középtávú Időjárás-

Előrejelző Központ) ERA-5 Land reanalízis adatsora alapján készült MATLAB-ban feldolgozva.



1. ábra. Balra: az éves átlaghőmérséklet emelkedése Magyarországon 1981 és 2020 között az OMSZ és az ECMWF adatai alapján. Jobbra: a két adatbázis összehasonlítása (a szerző ábrája, az adatok forrása: OMSZ rácsponti, ill. az ECMWF ERA5-Land reanalízis adatbázis).

Figure 1. Left: average temperature in Hungary between 1981-2020 based on data from Hungarian Meteorological Service (OMSZ) and ECMWF-ERA5-Land database. Right: Comparing the datasets.

Az ECMWF és OMSZ adatokat összehasonlítva látható eltéréseket nem elemzem részletesen a tanulmányban, mert a lefutások és tendenciák közel egyformák, így a levont következtetéseket érdemben nem befolyásolják. Mindkét adatbázis felbontása $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ fok, ami Magyarországon körülbelül 9×11 km-nek felel meg, 1233 rácspont fed le az országot.

Ha a hőmérséklet alakulását egy energiaelosztó rendszer működését jellemző paraméternek tekintem, akkor az emelkedő tendencia figyelmeztető jel, hogy a rendszer stabilitásával probléma van, amit ki kell vizsgálni. Ehhez meg kell határozni a rendszert, hogy tulajdonképpen mi is a probléma tárgya. Nem elég a következményeket elemezni, az egész rendszer működését kell megérteni.

A vizsgált rendszer azonosítása és lehatárolása

Rendszerek tekintsük ebben a tanulmányban a hidrológiai ciklus azon részét, amely Magyarországon a – közép-európai kontinentális viszonyokra értelmezett – légkörzessel kapcsolatban van. A lehatárolt rendszer terjedelme magába foglalja a szárazföldi légkörzés főbb funkcionális elemeit, de nem tér ki más éghajlati rendszerek, vagy az óceáni légkörzés működésének elemzésére. Terü-

letileg és funkcionálisan ezt a lehatárolt egységet vázoljuk fel rendszerként (amely egy nagyobb szuper-rendszer részének tekinthető, és azzal a kapcsolatok meghatározhatóak, de erre itt nem tudunk kitérni).

A rendszer külső határai és fizikai kényszerek

Magyarország vízmérlegének főbb tagjait mutatja be a 2001-2010 közötti 10 éves átlagok alapján a 2. ábra (Kocsis 2018). Az eredeti teljes ábrából kiemelt tagok (a csapadék, a párolgás-párologtatás /evapotranszpiráció/ és a lefolyás-beszívárgás) mind Magyarország teljes területére megadott értékek. Az átfolyás jelentős tényező – és kezelése a vízügyi ágazatnak rendkívül sok feladatot jelent – de azt most nem vesszük figyelembe, hogy a helyi rendszer működés sajátosságait tartjuk a vizsgálatunk fókuszában. (Ha mennyiségi sorrendben közelítenék meg az átfolyás hatását, az háttérbe szorítaná azokat a kiemelt tagokat, amelyek területi hatása leginkább érvényesül. A társadalmi és gazdasági vízfelhasználással hasonló a helyzet: számunkra ugyan a saját vízigényünk kielégítése a legfontosabb, de az nagyságrendileg kisebb a vizsgálandó rendszer kiemelt tagjainál, később ezeket is vizsgálhatjuk külön.)



2. ábra. Magyarország vízmérlege, részlet. Magyarország Nemzeti Atlasza (Kocsis 2018)
Figure 2. Water balance of Hungary (detail). National Atlas of Hungary (Kocsis 2018)

Az eddigi adatok az egyelőre fekete dobozként kezelt körvonalazódó rendszerünk kapcsolatát mutatják be a külvilággal. A meghatározó elemek a zártnak tekintett rendszer és a külső környezet között az energia- és vízforgalom. Lassan nevet is adhatunk a gyerekeknek, a munkahipotézisünk szerint egy olyan egységet határoltunk körbe, amelyet „éghajlati energiacserelelő- és szabályzó rendszer”-nek nevezhetünk.

Funkcionális elemzés

Fekete dobozunk sugárzási energiát és vizet, vagy átalakított formában vízpárát cserél a környezetével. Körvonalazódó rendszerünk főbb összetevőit azonosítottuk, amelyben nehezen szétválaszthatóak a hidrológiai ciklus és a légkörzés elemei. A légkörzéssel nem csak a csapadék egy része érkezik, de az energiacserelelőben is aktívan részt vesz. Az eddigi megállapításokat összegezve, a főbb elemeket az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat. A szárazföldi „éghajlati energiacserelelő- és szabályzó rendszer” főbb elemei
Table 1. Main components of the „Climatic Energy Distribution and Regulation System” on the Continents

	A RENDSZER	LEÍRÁS
1	Helye	a globális hidrológiai ciklus és a légkörzés mint szuperrendszer egyik rendszere (ne feledjük, vizsgálatunk tárgyát lehatároltuk)
2	Funkció	az éghajlati energiák különbségének kiegyenlítése, életkörülmények szabályozott tartományban tartása
3	Bemenetek	beérkező napenergia (sugárzasegyenleg), csapadék, légkörzéssel érkező energia
4	Kimenetek	a párolgással felvett energia, lefolyás, légkörzéssel távozó energia, kiegyensúlyozott hőmérséklet
5	Alrendszerek	<még nem azonosítottuk>
6	Szabályzó, korlátozó tényezők, visszacsatolások	<még nem azonosítottuk >

A főbb rendszerelemek azonosítása után szükség szerint bővebb és pontosabb meghatározásokat készíthetünk, például:

- Csapadék: az energiacserelelőhöz szükséges energiaszállító közeg, és egyszerre az életfolyamatokhoz nélkülözhetetlen különleges anyag, alapvető életfeltétel. Nagy nedvességtartalmú légtömegekkel érkezik vagy helyben keletkezik.
- Párolgás: a besugárzás, mint külső fizikai kényszer által meghatározott energiafelvétel. Történhet közvetlenül a szabad felszínről, vagy szabályozottan például a növényzeten keresztül. Mennyiségét a rendelkezésre álló víz vagy az energia korlátozza.
- Lefolyás, beszivárgás: az energiacserelelőhöz pillanatnyilag nem szükséges többlet elvezetődése és eltárolódása.

A meghatározások a modell finomítása során értelem-szerűen pontosíthatók.

EREDMÉNYEK

Szemléleti alapok tisztázása

Az adatgyűjtés és irodalomkutatás során körvonalazódott, hogy az eddig megismert fogalmainkat és ismereteinket felül kell vizsgálni ahhoz, hogy egy új, egységes, rend-

szerszemléletű modellt fel tudjunk vázolni. Ez természetesen nem jelenti a felhalmozott tudás megkérdőjelezését, csak annak más nézőpontból történő megközelítését, azért, hogy össze lehessen illeszteni egy folyamatról eddig megszerzett mozaikokat egy teljesebb képpé. Így van ez a hidrológiai ciklussal is, amely mérlegegyenletének általánosan elterjedt formáját a 2. táblázat (1) egyenlete mutatja be (Hajnal és Koris 2014). Az átfolyást és a kisebb tagokat elhanyagolva, átrendezve az (1) egyenlettel azonos tartalmúak az ábrán szereplő (2)-(4) változatok is.

Ha a KIADÁS tagot funkciói alapján SZOLGÁLTATÁS tagnak nevezzük, az átrendezés segíthet abban, hogy a mérlegegyenlet lényegét, a mérleg jelleget, az egyensúlyt kihangsúlyozza. A baloldalon csak a csapadék bevételt meghagyva nyilvánvalóbb, hogy csak addig nyújtózkodhatunk a jobb oldalon a szolgáltatások igénybevételével, amennyi csapadékunk van. A jobb oldalon (a kiadási oldalon) tulajdonképpen csak a lefolyás a veszteség (az is csak a lehatárolt terület nézőpontjából, de más értelmezésben ezt is felül lehetne vizsgálni), a többi tagnak fontos szerepe van: ökológiai szolgáltatást nyújtanak a táj klímájának és élővilágának fenntartásában, beleértve a lakossági, mezőgazdasági és ipari felhasználást is. A párolgást a legfontosabb szolgáltatási tagnak kell tekintenünk!

2. táblázat. A hidrológiai ciklus mérlegegyenletének főbb tagjai (átfolyás nélkül), és a szolgáltatási jellegét kiemelő formája (3) és éves mennyiségek Magyarországon (4)

Table 2. Main components of the hydrology balance equation (without flow through) highlighting services

(1)	$\Sigma \text{ BEVÉTEL} - \Sigma \text{ KIADÁS} = \pm \Delta K \text{ (KÉSZLETVÁLTOZÁS)}$
(2)	$\Sigma \text{ BEVÉTEL} = \Sigma \text{ (SZOLGÁLTATÁS)} \pm \Delta K \text{ (KÉSZLETVÁLTOZÁS)}$
(3)	$\Sigma \text{ CSAPADÉK} = \Sigma \text{ (PÁROLGÁS + FELHASZNÁLÁS + LEFOLYÁS)} \pm \Delta K$
(4)	$56 \text{ km}^3 \sim 48 \text{ km}^3 \text{ (+ FELHASZNÁLÁS)} + 8 \text{ km}^3 \pm \Delta K$

Adódik a kérdés, hogy mi értelme van a mérlegegyenlet ilyen apró formai változtatásának, amikor mindegyik alak ugyanazt jelenti? Miért emeljük ki megkülönböztetett tisztelettel a párolgást? A párolgás fontosságának felismeréséről és a rendszerszemléletű modellek utóbbi két évtizedes

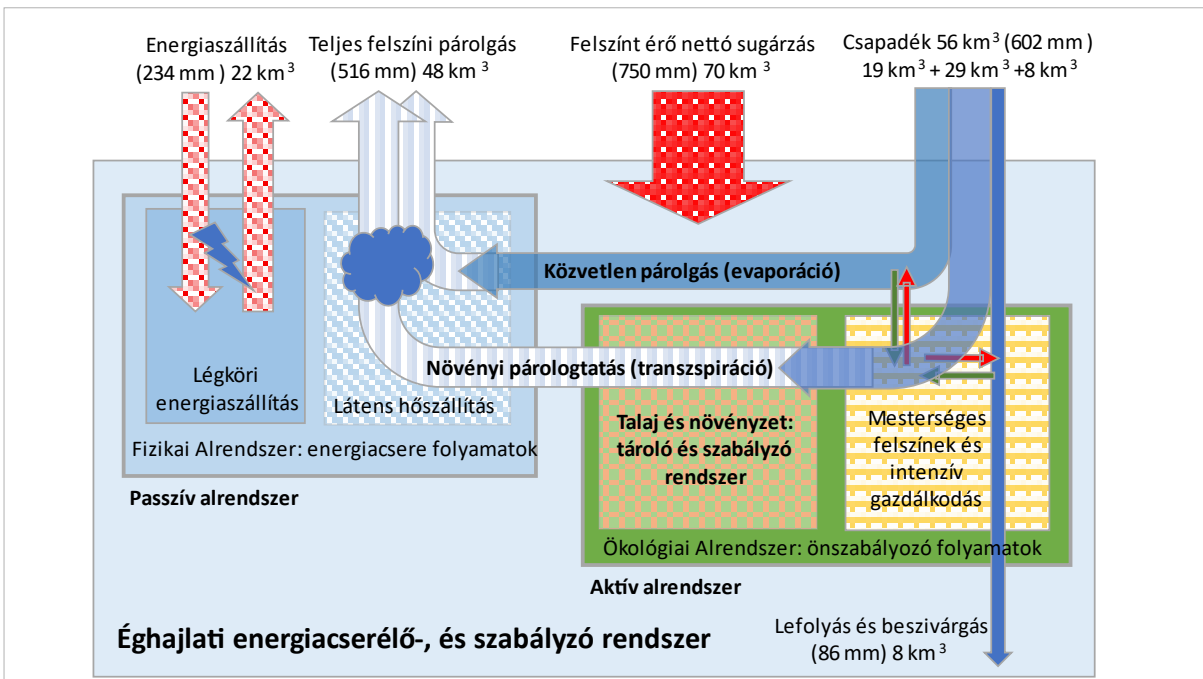
fejlődéséről jó áttekintést ad egy közép-európai kutatócsoport munkája (Hesslerová és társai 2019). Miért kell ilyen apróságnak tűnő dolgokkal foglalkozni? Erre a kérdésre is választ adhat a bevezetőben említett, a hidrológiai ciklus ábráiról készített elemzés tanulsága (Abbot és társai 2019): a

hidrológiai folyamatok működésének megváltozásában óriási szerepe van az emberiségnek. A legkisebb félreérthetőség vagy hiba a folyamatok megértésében súlyosbítja az amúgy is rosszabbodó helyzetet. A pontosabb fogalmazás, jobb modellek, alaposabb ismeretek önmagukban még nem oldják meg a környezeti problémákat, de lehetőséget adnak arra, hogy az oktatásban, kutatásban és az alkalmazásban felgyorsuljon a hatékony, természettel együttműködő megoldások megértése, kidolgozása és bevezetése.

Éghajlati energiacserélő- és szabályzó rendszer funkcionális modellje Magyarországra

Egy rendszerszemléletű modellnek fontos szerepe van az ismereteink rendezésében és az érdekeltek közötti párbeszéd és együttműködés kialakításában. Ha egyszerű és közérthető a modell, az további előny olyan esetben, amikor számos szakterület érdekelt egy probléma megoldásában. Az éghajlatváltozás és a vízbiztonság kérdése pedig ilyen. A 3. ábra felvázol egy egyszerű alapmodellt, amely

a további egyeztetések vitaindító alapja lehet. (A modell a közép-európai kontinentális éghajlatra jellemző arányokkal mutatja be a főbb rendszerelemeket. Eltérő éghajlaton az arányok és a hangsúlyok értelemszerűen mások lehetnek és további részletekre lehet szükség.) Az ábrán szerepelnek Magyarország vízmérlegének fontosabb adatai (a 2. ábra szerint), valamint a rendszermodell meghatározó tagjai: Bemenetek, Kimenetek (az 1. táblázat szerint). A légköri energiaszállítás átlagos éves értékére feltüntetett adat csak becslés a nettó sugárzás és felszíni párolgás alapján. Az energia mennyiségét eltérő mértékegységben fejezhetik ki az egyes szakterületek. SI mértékegységben az alapegység Ws (1 Watt teljesítmény 1 másodperc alatt) és $1 \text{ Ws} = 1 \text{ Joule}$. Gyakran használt származtatott energia mértékegység az 1 m^2 -ről elpárolgóló 1 liter (azaz 1 mm vízréteg) párolgásához szükséges energia. A víz párolgáshőjét 2480 KJ/kg -nek véve ez 1 kg vízre 2480 KJ -t jelent, amely kWh-ban kifejezve $2480/3600 \text{ kWh} = 0,69 \text{ kWh}$.



3. ábra. Az „éghajlati energiacserélő- és szabályzó rendszer” modellje Magyarország vízmérlegének 2001-2010. évi átlagai alapján (Kocsis 2018, a szerző szerkesztése)

Figure 3. The functional model of the „Climatic Energy Distribution and Regulation System” based on the annual average values of the water balance of Hungary in 2001-2010 (Kocsis 2018, edited by the author)

A rendszer funkcióit az alrendszerek, a köztük levő kapcsolatok és a bennük megvalósuló átalakító folyamatok látják el. Az alrendszerek meghatározásához azt kell tudnunk, hogy a rendszeren belül milyen fontosabb átalakítások történnek, milyen összefüggéssel jellemezhető a Bemenetek és Kimenetek kapcsolata, azokat milyen szabályozó és korlátozó tényezők alakítják. A légkörzés és hidrológiai ciklus összekapcsolódó folyamatai a rendszeren belül két alrendszerrel felvázolhatóak:

- Fizikai alrendszer: feladata közvetlenül a fizikai kényszerek alapján működő energiacsere. A légkörzés segítségével energiát szállít. A csapadék párolgásra – ezáltal energiaközvetítésre – történő közvet-

len „felhasználása” (vízfelszín, talaj, beépített terület stb. párolgása). Működése *passzív*, közvetlenül az adott külső kényszereket követi (energia és víz rendelkezésre állása).

- Ökológiai alrendszer: feladata a kiegyenlítő szabályozás, a külső kényszerek hatását módosítani, csillapítani, késleltetni. Működése *aktív*, szabályozni, időzíteni képes az energiacserét. Tárolja a talajban az energia közvetítéséhez majd később szükségessé váló vizet, és késleltetve, megfelelő időben, igény szerint teszi elérhetővé (felszívás a növényzet gyökerein, párolgattatás a lombzaton keresztül stb.). A külső hatások keltette ingadozást csökkenti.

A két alrendszer szorosan együtt működik, tulajdonképpen csak a szemléletesség kedvéért érdemes őket különválasztani: együtt „dolgoznak” az energiák kiegyenlítésén. A feladat nagyobb részét az ökológiai alrendszer végzi (átlag mintegy 29 km^3 vizet párologtat évente, míg a passzív alrendszer „teljesítménye” $19 \text{ km}^3/\text{év}$!). A szárazföldeken évek százmilliói alatt fejlődött ki óriási változatoságban és gazdagságban az élővilág. A Föld élő burkoló rétege tulajdonképpen magában hordozza a vizet (Margulis 2000). A bioszféra egyszerre a víz felhasználója, raktározója, saját életfeltételeinek szabályozója. A talaj által alkalmassá vált a csapadék egy részének tárolására, tartálékolására, a növényzet pedig képessé vált az eltárolt vizet késleltetve felhasználni, akkor, amikor arra szüksége van (Ács és társai 2017). A szárazföldi környezet fenntarthatóságának a záloga a párologás (Eiseltová és társai 2012).

Az aktív és passzív alrendszer megkülönböztetésével és az elpárolgó víz útjának a két alrendszeren keresztüli láthatóvá tételével érthetőbbé válik a természeti környezet jelentősége. A növényzetnek nem „csak” életfeltétele a víz, hanem „működésével” szabályozója a víz körforgásának. Az ábrán feltüntetett kicsi piros és zöld nyilak azt mutatják, hogy a csapadék megoszlása a két alrendszer között milyen irányban változhat. A piros azt jelzi, ha a szabályozó folyamatba kevesebb csapadék jut és ezzel gyengül a szabályozó képesség, a zöld pedig azt, hogy több csapadékot juttatva az aktív alrendszerbe a szabályozó képesség javítható. Más megközelítések és ábrák a körfolyamat egyéb tulajdonságait hangsúlyozzák, például a kis vízkör, vagy a nagy vízkör működését (Kravcik és társai 2007), de nincsenek ellentmondásban a 3. ábrán bemutatott működéssel. Az itt bemutatott ábra a beérkező csapadék származását nem tünteti fel. Fontos hangsúlyozni, hogy a nagy

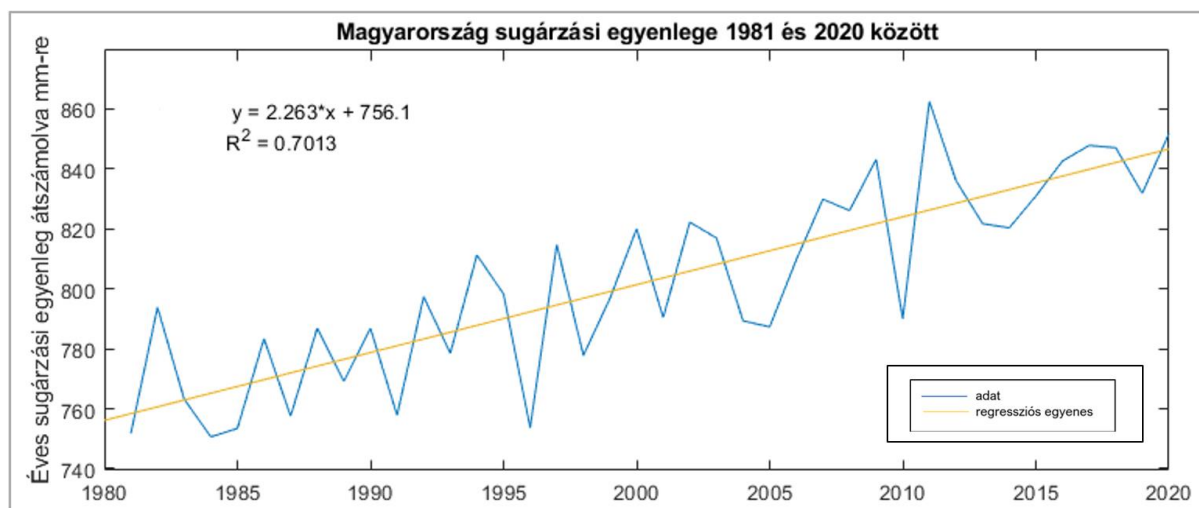
vízkör működésében is (az óceán felől érkező nedves légtömegek szállítása a kontinens belsejébe) nagy jelentősége van az ökológiai alrendszernek. A „biotikus pumpa” modell (Makarjeva és Gorshkov 2007) nélkülözhetetlen szerepet tulajdonít a növényzetnek.

Bemenetek és Kimenetek

A hidrológiai- és légköri folyamatokat a Napból érkező energia „működteti”, ezért a rendszert „meghajtó” energia a legfontosabb bemenő tag a külső határok meghatározásánál. Az ECMWF sugárzás adataiból meghatározott energiámérleg éves értékeit mm-re átszámolva látjuk a 4. ábrán, amely a nettó rövid- és nettó hosszúhullámú sugárzás egyenlege. A sugárzási egyenleg értéke párologásra átszámítva 1981 és 2020 között 756-ról 846 mm-re nőtt! Fontos megjegyezni, hogy most a felszínen rendelkezésre álló energiáról beszélünk, a légkör tetejét a Nap felől elérő ún. napállandó értéke nem mutat jelentős változást (Mika és társai 2010).

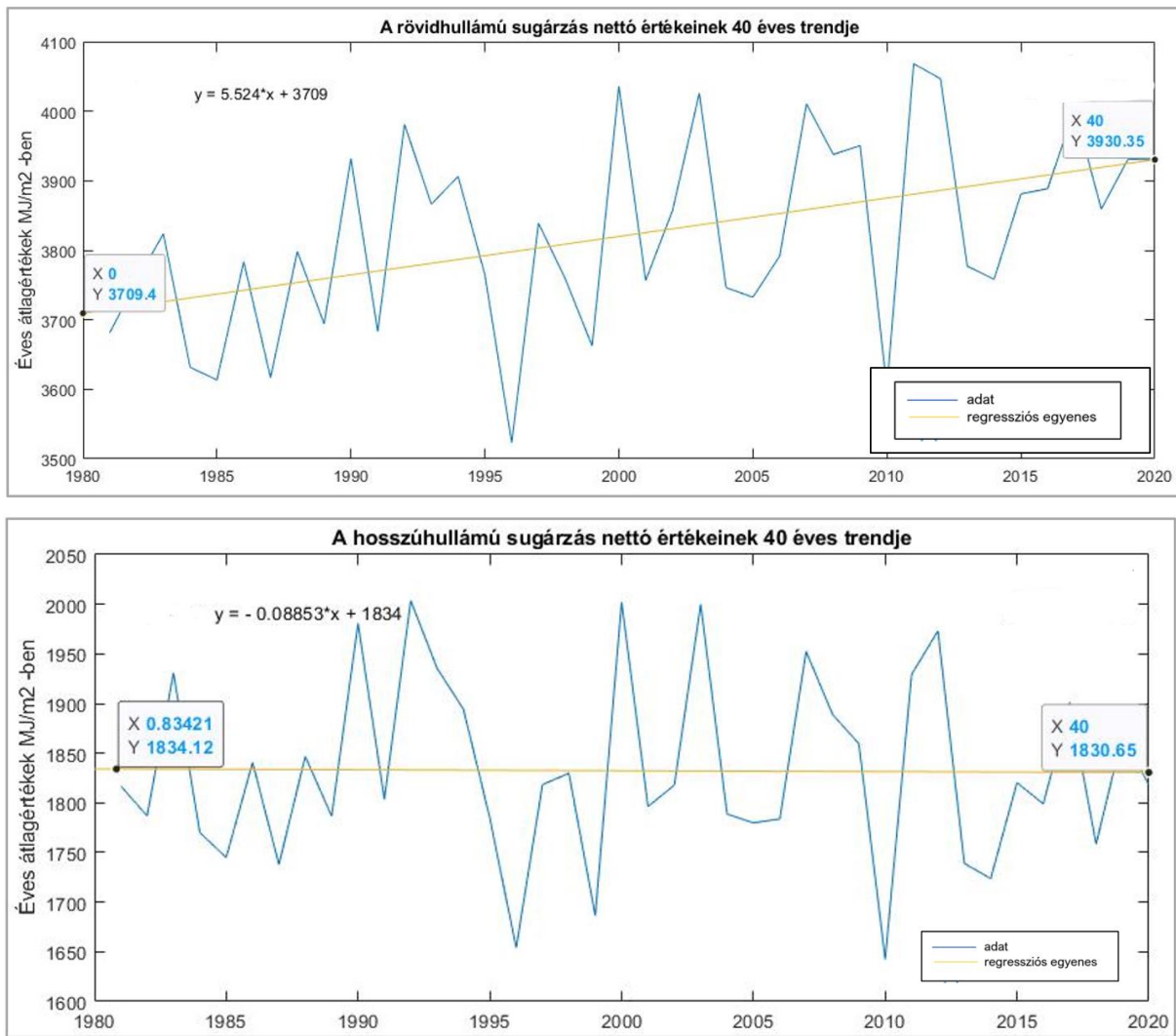
Az emelkedő tendencia okát vizsgálva az 5. ábra külön is bemutatja a sugárzási mérleg számolásához felhasznált két összetevőt.

40 év alatt a nettó hosszúhullámú sugárzás (ECMWF str paraméter) trendvonala állandó értéken maradt, míg a nettó rövidhullámú sugárzás (ECMWF ssr paraméter) emelkedő tendenciát mutat ($3\,700 \text{ MJ/m}^2$ -ről $3\,900 \text{ MJ/m}^2$ -re, mintegy 200 MJ/m^2 -rel növekszik). A besugárzás növekvő trendjének ellenőrzésére nézzünk meg egy másik forrást, az OMSZ 37 mérőállomásának homogenizált, $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ -os felbontású rácspontra interpolált napi adatainak összesítését is (6. ábra). Itt a teljes felszínre beérkező rövidhullámú sugárzási energiát látjuk, de a növekmény hasonló mértékű változást mutat, mint az ECMWF adatok.



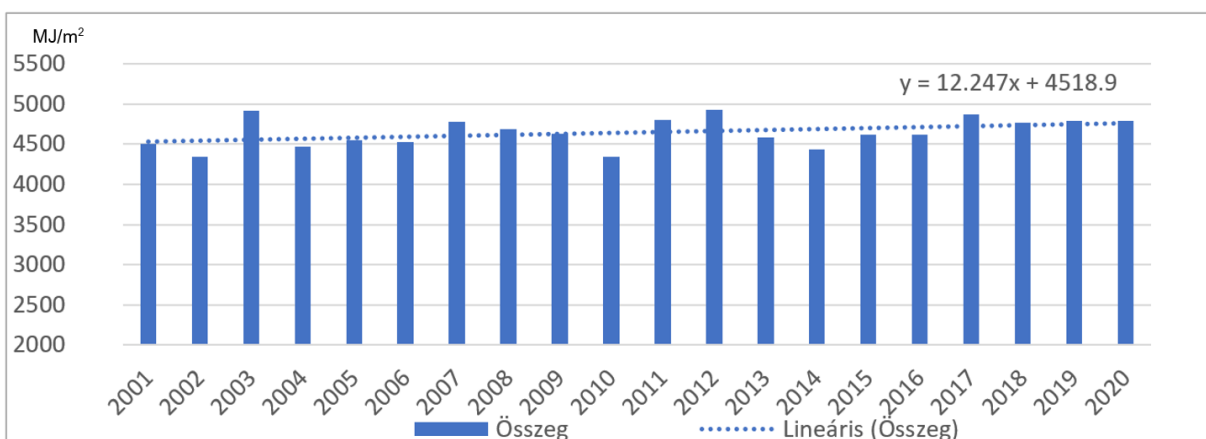
4. ábra. A nettó sugárzási mérleg éves átlagértékei Magyarországra 1981 és 2020 között, átszámolva mm-re (a szerző ábrája, az adatok forrása: ECMWF)

Figure 4. Annual values of the net radiation balance in Hungary in 1981-2020, expressed in mm of evaporation (edited by the author, data from ECMWF)



5. ábra. A sugárzási mérleg éves értékei Magyarországon 1981 és 2020 között. Fent: nettó rövidhullámú sugárzás, Lent: nettó hosszúhullámú sugárzás (a szerző ábrája, az adatok forrása: ECMWF ERA5-Land)

Figure 5. Annual values of the net-radiation in Hungary btw. 1981-2020. Top: shortwave radiation, bottom: long wave radiation (edited by the author, data from ECMWF ERA5-Land)



6. ábra. A globálsugárzás éves értékei Magyarországon 2001 és 2020 között (a szerző ábrája, az adatok forrása: OMSZ)

Figure 6. Annual values of global incoming radiation in Hungary btw. 2001-2020. (Data from the Hungarian Meteorological Service, edited by the author)

Az emelkedő trend összhangban van külföldi és hazai publikációkban leírtakkal. Szárazföldeken a globálsugárzás értéke kismértékben nőtt az 1986-2000 közötti időszakban, amely a csapadék enyhe növekedésével járt együtt. Ezek az adatok a hidrológiai ciklus gyorsulására utalnak (Wild és társai 2008). A légkör sugárzásmódosító hatásának számszerűsítése nem egyszerű feladat, hiszen a felszint elért energia mennyisége sok tényezőtől függ.

Európa középső részein – hazánkban is – a globálsugárzás növekedése várható, míg Észak- és Dél-Európában csökkenés várható (Bartók 2013). A globálsugárzás és a felhőborítás kapcsolatának fizikai modellezésével foglalkozó kutatás előrevetíti, hogy a légkör vízgőztartalmának változása eltérően alakulhat különböző területeken (7. ábra). A kihullható vízgőztartalom területi eloszlásának térképe Európában 1981 és 2006 között az ERA-INTE-RIM adatbázis adatainak felhasználásával készült.

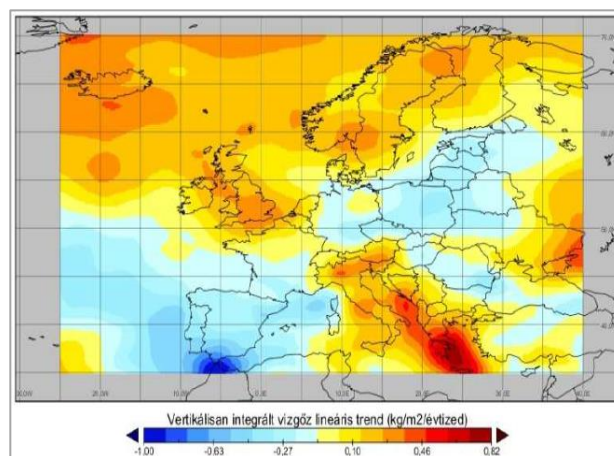
A sugárzási egyenleg változásainak további elemzése meghaladja ennek az írásnak a kereteit, de felhívja arra a figyelmet, hogy ha egy rendszer bemenő paramétere változik, az valamilyen formában hatással lesz a rendszer belső működésére és a kimenetekre is.

Az alrendszerek és működésük

Egy kiegyensúlyozott rendszer bizonyos határok között képes a működését stabilizálni, a bemenetek változásaira úgy válaszolni, hogy a rendszer főbb paraméterei változatlanok maradjanak. A tanulmányban a globális felmelegedésből indultunk ki, és az 1. ábrán Magyarország átlaghőmérsékletének növekedését láttuk. Az IPCC 2019-es jelentésében a globális felmelegedést ábrázoló grafikonján a levegő globális átlagnál nagyobb és gyorsabb ütemben növekvő felmelegedését mutatja be szárazföldeken (IPCC

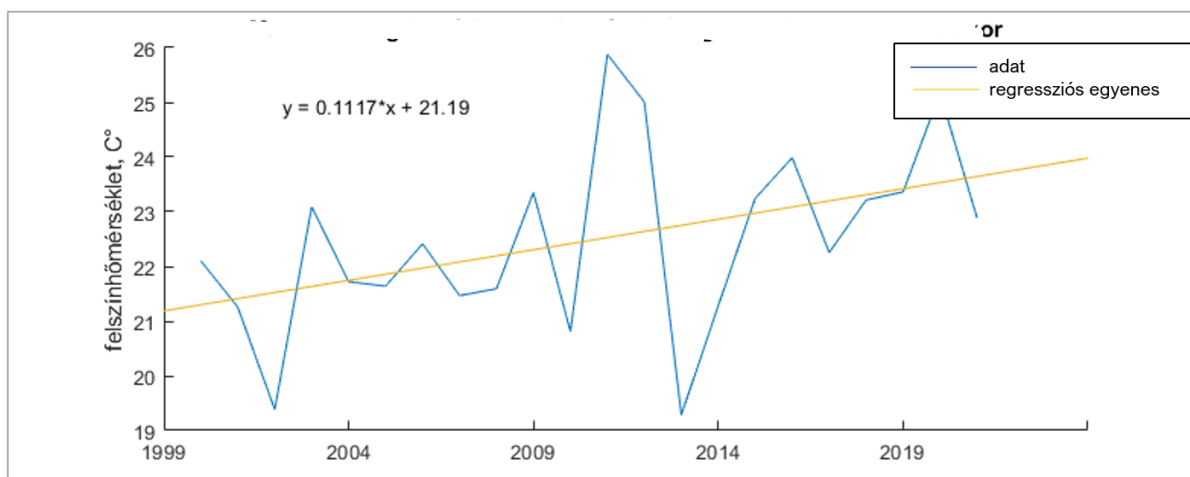
2019). Ennek a különbségnek a pontos okát nem tudjuk, de összefüggésben lehet az ökológiai alrendszer működésével és szabályzó szerepével, amit érdemes lehet részletesebben megvizsgálni (Báder 2021).

Ha a felszínhőmérséklet változásait nézzük, ott is megfigyelhetjük az emelkedő tendenciát, amelyet a szeptemberi adatok jól érzékeltetnek (8. ábra). Ezek az adatok azt jelenthetik, hogy a rendszer munkapontja elmozdult. A bejövő energiamennyiség növekedésével az alrendszerek energiacsereelő teljesítményének is növekednie kell. A változás oka lehet a bemenetek változása. Nagyobb energiaszállító képesség nagyobb víz-igényt jelent a bemeneti oldalon és több párolgást a kiadási oldalon.



7. ábra. A légkör víztartalmának évtizedes változása 1981 és 2006 között Európában (Bartók 2013)

Figure 7. Decadal Changes in the Vertically Integrated Water Column in Europe from 1981 to 2006 (Bartók 2013)



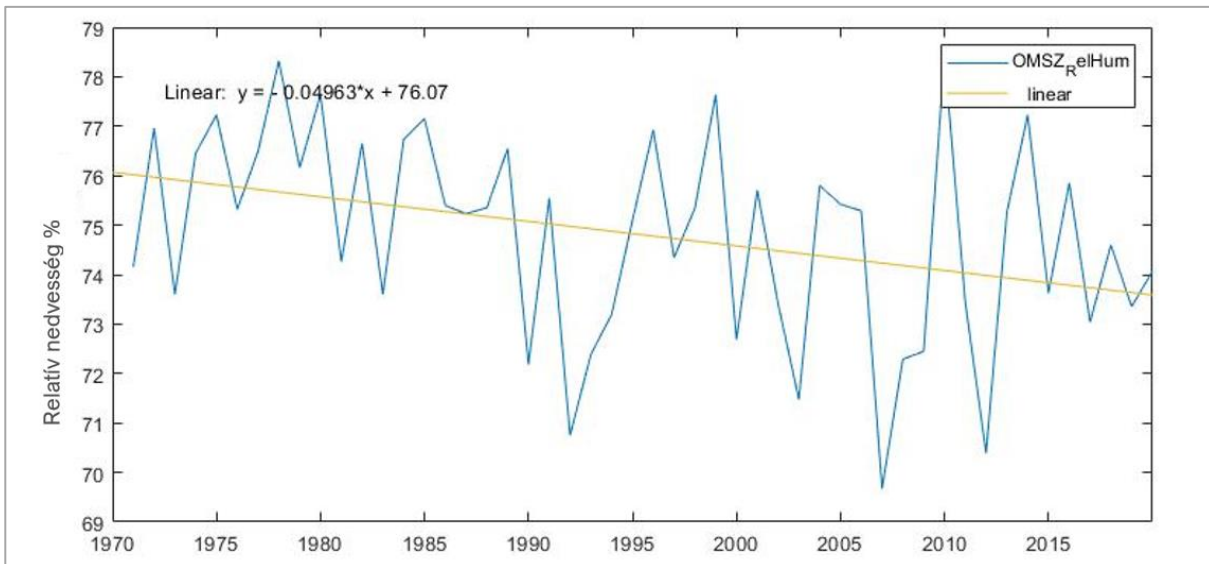
8. ábra. Átlagos felszínhőmérséklet Magyarországon szeptemberben 10:30-kor, 2000 és 2021 között

(A szerző ábrája, MODIS Terra műhold adatai: NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, LP DAAC)

Figure 8. Average surface temperature in September in Hungary at 10:30, btw. 2000-2021, based on MODIS Terra satellite data, by the author (Edited by the author, source: NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, LP DAAC)

A hőmérséklet emelkedésével az energiaszállító közeg mennyiségének a növekedése is szükséges. A nagyobb teljesítményhez több víznek kell rendelkezésre állnia a folyamat stabil „működéséhez” (Báder 2020). Jelezheti ezt a megnövekedett igényt a relatív páratartalom csökkenése is az 1971 és 2020 közötti években (9. ábra). Persze óvatosan kell kezelnünk a páratartalom

csökkenésének grafikonját, hiszen azt önmagában a hőmérséklet emelkedése is magyarázhatja (nagyobb a melegebb levegő párafelvévő képessége). A 7. ábrán azonban azt láttuk, hogy Magyarország túlnyomó részén kevesebb lett a légkör víztartalma 1981 és 2006 között, amely rámutat arra, hogy részletesebben is meg kell vizsgálni a folyamatot.



9. ábra. A relatív nedvesség éves átlagos alakulása Magyarországon 1971 és 2020 között
(a szerző ábrája, az adatok forrása: OMSZ)

Figure 9. Annual average of relative humidity in Hungary btw. 1971-2020.
(Data from the Hungarian Meteorological Service, chart by the author)

Ha indikátorként értelmezzük a 7. és 9. ábra adatait, akkor arra az eshetőségre is gondolnunk kell, hogy az éghajlati energiacsere- és szabályozó rendszer változásairól van szó: az aktív szerepet játszó ökológiai alrendszer teljesítő-képessége romlik, mert nem képes annyit párologtatni, mint amennyit a megnövekedett sugárzási egyenleg és hőmérséklet kényszere okoz. Ha pedig a párologással a felszínről el nem szállított hőmennyiség szenzibilis (érzékeny) hővé válik, és nő az aránya a párologással elszállított látens (rejtett) hőszállításhoz képest, akkor egyre inkább a száraz, kopár területekre jellemző hőszállítási mintázatok felé tolódik el a felszín hőszállítása (Kravcik és társai 2007, Unger és társai 2012, Sušnik és társai 2022).

Szabályzó, visszacsatoló, korlátozó elemek

Egy rendszer elemeiben a változások törvényszerűek, de attól rendszer egy rendszer, hogy a kilengéseket képes kezelni, szabályozni és működését egy ellenőrzött tartományban tartani. Az éghajlati energiákat kiegyenlítő rendszeren belül a szabályozás két eltérő formáját látjuk. A fizikai alrendszerben egyszerű fizikai törvényszerűségeken alapul: a víz és az energia elérhetősége (a külső kényszerek) megszabják a párologás és az energiaszállítás mértékét (ezt neveztük *passzív alrendszernek* „Az alrendszerek és működésük” fejezetben). Összetettebb szabályozásra képes az ökológiai alrendszer, amely tározó, időzítő képességével akkor is hatékonyan tudja támogatni az energiacsere- és szabályozó folyamatokat, amikor a felszínen már nincs annyi víz, aminek az elpárologása képes lenne az energia elszállítására: ekkor a talajban tárolt tartalékokhoz nyúl (ezt neveztük *aktív alrendszernek*). Természetesen itt is a fizikai törvényszerűségek érvényesülnek, de a növényzet keresztül közvetett módon.

Az energiacsere folyamatok önszabályozó képessége a fenntarthatóság kulcsa. Kecskemét környéke területi és potenciális párologásának és a levegőhőmérsékletnek a 3 havi átlaga látható a 10. ábrán a nyári hónapokban (június-július-augusztus) az 1981-2020 években. A baloldali skála

a párologást mutatja milliméterben, a jobb oldali a hőmérsékletet °C-ban. Az adatok forrása: ECMWF 0,1' cella (19,6E 46,9N, kb. 9x11 km).

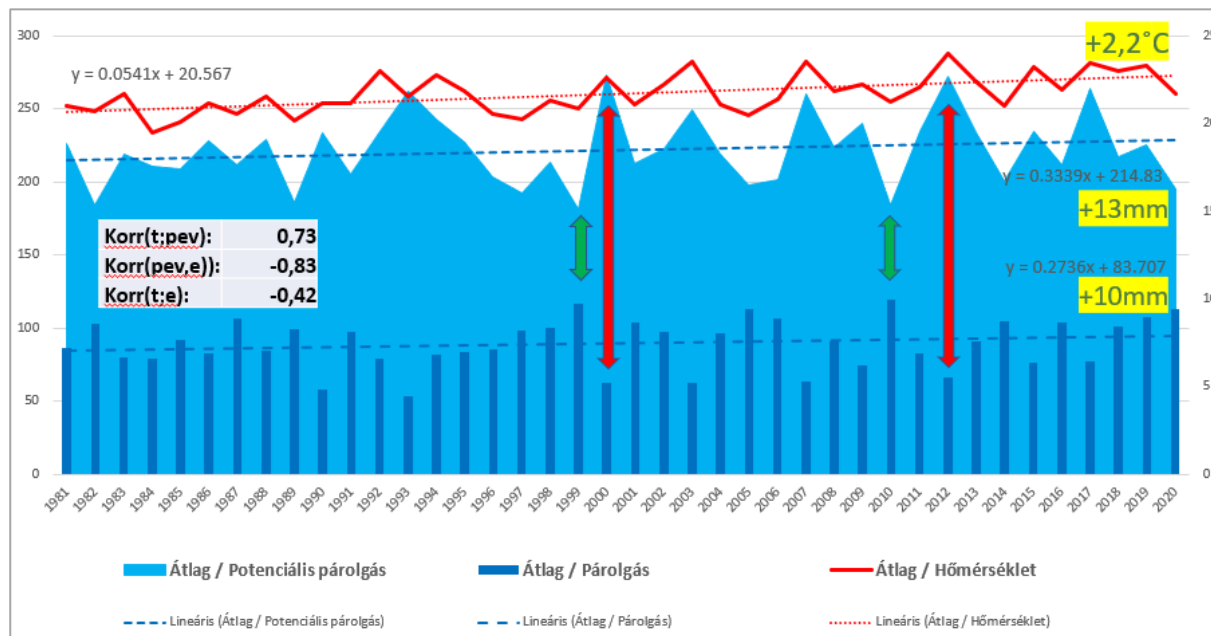
Azokban az években, amikor a párologás értéke nagyobb, mint az előző vagy következő években (pld. 1999 és 2010), látható, hogy a hőmérséklet csökken, és vele együtt a potenciális párologás is (10. ábra). A párologás szabályozó szerepe felismerhető. A rákövetkező években (2000 és 2011-2012) kevesebb a párologás, ismét jelentősen megnő a potenciális párologás és a hőmérséklet is. Zöld és piros nyilak jelölik az ábrán a változást. A trendek növekedési értéke még nem tűnik önmagában jelentősnek, de figyelmeztető jel, hogy nyílik az olló a tényleges és potenciális párologás között, amely a rendszer stabilitásának csökkenéséhez, és ebben a térségben a sivatagosodáshoz vezethet.

Az energiacsere folyamatok hatékonyságát növelheti az elpárologott víz újrahasznosítása a kis vízkörben. A csapadékhöz és a párologáshoz szükséges víz „származásának” vizsgálatok kimutatták ennek a hatékonyságot növelő fontos tényezőnek a szerepét. A sokkal nagyobb energiaforgalmat „bonyolító” forró égővi régiókban (Kelet-Afrika, Amazónia északi része) a párologás 60-90%-a csapadékként tér vissza a kontinensen belül (Ent és társai 2014)! Más kutatások arra figyelmeztetnek, hogy a meggyengült önszabályozó képesség negatív hatással van egy egész térség éghajlatára és megnő az aszályok gyakorisága és intenzitása (Zemp és társai 2017, Sušnik és társai 2022). A víz helyben való hasznosításának ismerete még általános volt a hagyományos kultúrákban (Andrásfalvy 2013), most tudományosan is megerősítést nyernek a népi tapasztalatok.

A relatív nedvesség alakulását vizsgálták globális szinten is, ahol 1979 és 2000 között előbb enyhén emelkedő tendencia jelentkezett, majd 2000-tól 2017-ig hasonló mértékű csökkenést mutattak ki (Xiao és társai 2020). A tanulmány a trend megfordulását a szárazföldi növényzet párologtató képességének csökkenésével hozza összefüggésbe.

Magyarországon Csáki (2019) vizsgálta a különböző CORINE felszínborítási kategóriák szerint a párolgást a CREMAP (Complementary Relationship based evaporation MAPping) eljárással készült 1 kmx1 km felbontású párolgástérképeket felhasználva (Szilágyi és Kovács 2010). A vizsgált 2000-2008-as időszakban, átlagban a mesterséges felszínek párolgása a legkisebb (471 mm/év),

ennél alig több a mezőgazdasági területek párolgása (499 mm/év). Az erdők-természetközeli területek, vízenyős területek párolgása sorrendben: 576 mm/év, ill. 671 mm/év (Csáki 2019). A vízfelületek párolgásának értéke 861 mm/év. Az eltérő felszínborításokra adódó nagyobb értékek egyben az ökológiai alrendszer energiacserélő- és szabályozó funkcióknak való jobb megfelelését is mutatják.



10. ábra. A 3 nyári hónap hőmérsékletének, párolgásának és potenciális párolgásának havi átlaga Kecskemét környékén 1981 és 2020 között. A baloldali skála a párolgást mutatja milliméterben, a jobb oldali a hőmérsékletet °C-ban (az adatok forrása: ECMWF ERA5-Land)

Figure 10. Monthly average temperature, evapotranspiration, and potential evaporation around Kecskemét calculated for the 3 summer months. Scale on the left axis shows evaporation in mm, right axis in °C (source of data: ECMWF ERA5-Land database)

A rendszer működésének értékelése

Magyarország vízmérlegére a bemutatott paraméterek alakulása jelentős hatással lehet. Kiemeltem és felértékelendőnek tartom a párolgás szerepét a vízmérlegben. Veszteségi tagból a legfontosabb szolgáltatási taggá léphet elő, ha kellő súllyal értékeljük az éghajlati energiák elosztásában betöltött szerepét. A párolgáshoz-párologtatáshoz (a passzív fizikai alrendszerhez és az aktív ökológiai alrendszerhez) szükséges vízmennyiség rendelkezésre állása határozhatja meg az ország éghajlatának alakulását. A víz hiánya a sivatagosodás felé vezethet, megfelelő intézkedésekkel a folyamatot lassítani vagy megállítani is lehetséges.

Jogosan merülhet fel a kérdés, akkor tulajdonképpen mennyivel több vízre van szükségünk, mennyivel több párolgás szükséges a felmelegedés jelen üteme mellett annak hatásait ellensúlyozni? Az elméleti értéknek a maximális párolgás és a rendelkezésre álló víz különbségét tekinthetjük (potenciális párolgás - csapadék). Ez az érték túlbecsüli ugyan az éghajlati vízhiányt, de nagyságrendje így is elgondolkodtató, többszöröse a teljes lakossági-, ipari- és mezőgazdasági vízfelhasználásnak. A potenciális párolgás leggyakrabban használt becsült értéke 750 mm (Stelczer 2000). Ez átszámolva mintegy 70 km³ víz, így az éghajlati

vízhiány éves értékére 14 km³-t kapunk. (A megadott értékek országos átlagok. Fontos felhívni a figyelmet, hogy regionális szinten ettől jelentősen eltérő átlagértékek is lehetségesek. A hiány akkor is jelentős, ha a vízigényt „csak” a potenciális párolgás 80%-ának számoljuk.)

Az országos adatok mellett a Tisza magyarországi vízgyűjtőjére kigyűjtött adatok (Ungvári és társai 2012) elemzése jelzi a veszélyét annak, hogy mi várható, ha nő a különbség a területi párolgás és a potenciális párolgás között. Lokális szinten (ez alatt több megyényi területet is érthetünk) a potenciális párolgás meghaladhatja az 1000 mm/év értéket, miközben a tényleges párolgás 500 mm/év alá csökken. Pozitív, gerjesztő visszacsatolás jöhet létre. Ha tovább folytatódik a melegedés, annak csillapításához még több vízre lenne szükség. A teljes csapadék elpárolgása sem lenne elegendő a felszínen az energiaegyensúly megtartásához. Az éghajlati vízhiány értéke pedig már most is többszöröse a jelenlegi lakossági-ipari-mezőgazdasági vízhasználatnak. A Nemzeti Vízstratégia, a Kvaszay Jenő Terv (URL3) által megcélzott öntözés mennyisége messze nem elegendő a légköri vízhiány pótlására. Más megoldásokban is kell gondolkodnunk, az öntözés csak elsőséggel lehet.

ÖSSZEZGÉS

A globális felmelegedéssel járó hőmérséklet növekedéssel nő a párolgási igény. A tanulmányban ezért a párolgás mértékét és folyamatát vizsgáltam meg rendszerszemlélettel közelítve. Javaslatot tettem egy egyszerű rendszer-szemléletű integrált légkör-víz kör modellre, amely Magyarország felszínére szűkítve a vízkörzés főbb tagjainak működését írja le (az átfolyás nélkül). A kialakult kép azt sugallja, hogy a párolgást nem veszteségként, hanem az éghajlati energiák elosztását végző szolgáltatásként kell értelmeznünk: funkciója a felszín melegedésének korlátozása. A teljes lakossági-, ipari- és mezőgazdasági víz-igénynél nagyobb mennyiségű vízre van szükség a párolgás növeléséhez, ahhoz, hogy az éghajlati víz- és energiamegteremtés kedvezőtlen változásait fékezzük. Egy modell azonban nem eredmény, hanem eszköz, amely a probléma megértését, a párbeszédet és az együttműködést segítheti.

A civilizációk kialakulása és fejlődése során az ember képessé vált a hidrológiai ciklus stabilitását befolyásolni. Egyre fejlettebbek és hatékonyabbak vagyunk, mégis egyre inkább ki vagyunk szolgáltatva a külső tényezők változásainak? Itt valami nincs rendben. Most ezért nem „csak” egy vízügyi problémát, hanem egy civilizációs problémát kell megoldanunk. Ha a bevezetőben említett súlyos állítások igazak, hogy az ember természetátalakító képessége annyira megnőtt, hogy meg tudja határozni a vízkörzés sorsát, akkor tulajdonképpen saját sorsát is képes meghatározni. Ha a hatékonyságunkat magunk ellen fordítjuk (az erőforrások gyors felélésével, vagy a környezeti állapotok gyors és kedvezőtlen irányú változtatásával) akkor velünk van a baj, nem a külső környezet kedvezőtlen változásaiban kell kizárólagosan (és önigazolásként) keresni a problémák okát. A víz- és a természeti környezet szerepét kell újraértékelnünk, megértenünk és meg kell tanulnunk együttműködni vele. Ne akarjuk legyőzni a Természetet, mert akkor Ő fog legyőzni bennünket.

A dolgozat főbb megállapításainak összefoglalása segíthet a társadalmi együttműködés kialakításában, és a Természettel való együttműködés helyreállításában:

1. A vízmérleg egyenletében a párolgás nem veszteség, hanem az éghajlati energiák szállítását végző rendkívüli jelentőségű környezeti szolgáltatás.
2. A hidrológiai ciklus funkciójának értelmezésekor szerencsésebb a mérlegegyenlet olyan formáját használni, ahol a bevételi oldallal szemben tüntetjük fel a szolgáltatási tagokat, amelyek közül a legnagyobb – és a környezeti stabilitást jelentő – tag a párolgás.
3. Ha a közvetlen passzív párolgásról az ökológiai rendszereken keresztül történő önszabályzó párolgás felé tolódik el az arány az összesített párolgásban (evapotranszpiráció), az a hidrológiai ciklus és a légkörzés stabilitását és kiegyensúlyozottságát egyaránt segíti.
4. Az édesvízi készletek folyamatosan megújulnak a szárazföldeken, amelyhez a nagy vízkör működése mellett (az óceáni nedvesség szállítása) a kis vízkör hozzájárulására is szükség van (amikor a párolgás segíti a csapadék képződését és újrahasznosul).

5. A víz körforgásának bármely pontján az emberiség számára kivett készleteket felhasználás után vissza kell juttatni a körforgásba, az ökológiai vízigények pótlására vagy tartalékolásra, és a lehető legkevesebbet a lefolyásba. Ekkor a természeti és társadalmi szükségleteket egyaránt fenntartható módon ki lehet elégíteni.

6. Az oktatás minden szintjén azt a képet kell kialakítani a vízről, hogy a víz sokkal több, mint erőforrás, amely mindenki számára hozzáférhető. A víz, mint energiaközvetítő, a szárazföldön egy önszabályozó életfenntartó körfolyamat része, amelynek működése létérdekünk és általános emberi kötelességünk.

7. A vízügyi ágazat tevékenységi körét újra kell értelmezni. A vízellátás feladatköre a jelenlegi lakossági, mezőgazdasági és gazdasági igényeken túl ki kell, hogy terjedjen az éghajlati energiaki egyenlítő körfolyamathoz, a párolgáshoz szükséges víz biztosítására is.

Még mielőtt versenyfutás kezdődne a vízért a légköri vízigény és a felszíni (természeti és társadalmi) vízigények kielégítése között, sürgősen cselekedni kell. A megoldás felé vezető út az, ha a passzív párolgáshoz képest az ökológiailag szabályozott (és hasznosított), éghajlati igényekhez igazodó aktív párolgást növeljük. Ez messze nem csak a vízügyi feladata, a kihívás az élet minden területét érinti az oktatástól a kutatásig, a legkülönbözőbb ágazatokkal együtt. Az élet minden területén új szemléletre van szükség a vízzel kapcsolatban. Minden szektor hozzá tud járulni a vízkörzés stabilitásának megőrzéséhez. Ezzel a megközelítéssel a vízügyi ágazat szerepe is új értelmezést nyer: úttörője és motorja lehet a kedvező változásoknak. Minden ágazatnak ki kell azonban dolgoznia a saját feladatait, amelyek azonos alapelven működnek: a Föld felszínének energiaforgalmát segítsék aktívan a természetes folyamatok. Csak néhány területet kiragadva a körkörös megoldások bevezetésére adódó számtalan lehetőség közül: a mezőgazdaságban a talajtakaró és talajjavító gazdálkodás elterjesztése (amely lefedi és védi a felszínt, növeli a beszivárgást, segíti a párolgást a csapadékmentes időszakokban), az erdőgazdálkodásban a folyamatos erdőborítással járó üzemmódok, az urbanizált területeken a kék-zöld infrastruktúrák (zöld fal, zöld tető, esőkertek stb.) terjesztése.

Az éghajlatváltozás problémájának megoldása az emberiség egyik legnagyobb kihívása, ami a vízügyi ágazat számára is hatalmas feladat. Az élet alapfeltétele a víz, de a környezeti fenntarthatóság záloga is egyben. Az összefogás nélkülözhetetlen, ezért a kutatásban, ágazatok közötti együttműködésben is össze kell hangolni azokat a programokat, amelyek ebbe az irányba mutatnak és elsőbbséget kell nekik adni, mert a feladat megoldható, azonban minél később fogunk hozzá ebben a szellemben, annál nehezebbé tesszük saját munkánkat. A magyar vízügyi ágazat jelentős tapasztalatokat halmozott fel, amelyekre építve ennek az óriási kihívásnak a megoldásában újabb szintet léphet előre.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm Szilágyi Józsefnek, Gribovszki Zoltánnak és Zsugyel Mártonnak a kézirat javításához tett észrevételeit. Köszönöm Nagy Eszternek az ECMWF adatok, Farkas Máténak a MODIS adatok letöltéséhez nyújtott segítségét. A bemutatott kutatás a BME-NVA-02 számú projekt részeként az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatással, a TKP2021 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

IRODALOMJEGYZÉK

Arora, V. (2002). Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models. *Reviews of Geophysics*, 40, 2 May 2002. pp. 3.1-3.26. doi:10.1029/2001RG000103

Abbott, B., Bishop, K., Zarnetske, J., Minaudo, C., Chapin, F., Krause, S., Hannah, D., Conner, F., Ellison, D., Godsey, S., Plont, S., Marçais, J., Kolbe, T., Huebner, A., Frei, R., Hampton, T., Gu, S., Buhman, M., Sayedi, S., Ursache, O., Chapin, M., Henderson, K., Pinay, G. (2019). Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nature Geoscience*, Vol 12 July 2019. pp. 533-540. doi:10.1038/s41561-019-0374-y

Andrásfalvy B. (2013). A víz a magyar történelemben. In: *Víz határok nélkül II. Magyar Tudomány*. 2013. II. pp. 1313-1321.

Ács F., Breuer H., Szász G. (2017). A talaj légkörre gyakorolt hatásának modellezés-szemponitú áttekintése. In: *A talajtakaró geonómiája. ELTE Meteorológiai Tanszék*. pp. 230-248. ISBN 978-963-284-918-8 (online)

Bartók B. (2013). A globálsugárzás változásai Európában. Egyetemi doktori (PhD) értekezés. Debreceni Egyetem, Földtudományi Doktori Iskola. p. 81.

Báder L. (2020). „Táji hőszigetek” és hatásuk az éghajlati energia- és vízmérlegre, *Tájökológiai Lapok / Journal of Landscape Ecology* 18: 2. pp. 87-96. doi:10.56617/tl.3487

Báder L. (2021). A párolgás szerepe és a „táji hőszigetek” hatása az éghajlati energia-és vízmérlegre. *Léghő 66. évf. 3. sz. pp. 16-21.*

Bertalanffy, L. von (1968). *General System Theory*. George Braziller New York. pp. 30-53.

Bíró T. szerk. (2017). Országos települési csapadékvíz-gazdálkodási konferencia tanulmányai, Baja. ISBN 978-615-5845-22-2 https://vtk.uni-nke.hu/document/vtk-uni-nke-hu/Kézikönyv_csapadék.pdf

Bozó L. (2017). A víz és a légköri folyamatok – a hidrológiai ciklus atmoszferikus része. *Magyar Tudomány* 178. pp. 1198-1205. doi:10.1556/2065.178.2017.10.3

Csáki P. (2019). A klímaváltozás hatása a vízkészletekre a felszínborítás figyelembevételével. Soproni Egyetem, PhD disszertáció.

Eiseltová, M., Pokorný, J., Hesslerová, P., Ripl, W. (2012). Evapotranspiration – A Driving Force in Landscape Sustainability, In: *Evaporation – Remote Sensing and Modelling*. Ayse Irmak, IntechOpen. ISBN 978-953-307-808-3. doi:10.5772/19441

Ent, R.J., Wang-Erlandsson, L., Savenije, HHG. (2014). Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle – Part 2: Moisture recycling. *Earth Syst. Dynam.*, 5. pp. 471-489. doi:10.5194/esd-5-471-2014

Geresdi I., Horváth Á., Bozó L. (2013). A víz szerepe a légköri folyamatokban. *Magyar Tudomány*. 174. pp. 1293-1299.

Hesslerová, P., Pokorný, J., Hurina, H., Harper, D. (2019). Wetlands and Forests Regulate Climate via Evapotranspiration. In: An, S., Verhoeven, J. (eds) *Wetlands: Ecosystem Services, Restoration and Wise Use*, Ecological Studies 238, Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14861-4_4

Hajnal G., Koris K. (2014). Hidrológia I. Fizikai hidrológia, Jegyzet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. p. 13.

IPCC2019 (2019). Technical Summary, SPM_Updated-Jan20. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Szerk. Shukla et al.

Kolossváry G. (2021). Körforgásos gazdaság a mezőgazdaságban, a vízzel összefüggésben. *Hidrológiai Közöny* 101. évf. 3. szám. pp. 31-39.

Kocsis K. főszerk. (2018). *Magyarország nemzeti atlasza – Természeti környezet*. MTA CSFK Földrajztudományi Intézet. Budapest. p. 187.

Kravcik, M., Pokorný, J., Kohutiar, J., Kovac, M., Tóth E. (2007). *Water for the Recovery of the Climate – A New Water Paradigm*. People and Water NGO, Kosice, Slovakia

Lakatos M. (2021). Kiterjedt, gyors és egyre intenzívebb az éghajlatváltozás az IPCC 6. értékelő jelentése szerint. *Léghő 66. évf. 3. szám. p. 29.*

Margulis, L. (2000). *Az együttműködés bolygója*. Vince Kiadó. Budapest. ISBN 963-9192-52x.

Makarieva, A. M., Gorshkov, V. (2007). Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11. pp. 1013-1033. doi:10.5194/hess-11-1013-2007

Mika J., Dunkel Z., Utasi Z. (2010). Satellite observations for climate science, in *COST ACTION 734 (European Cooperation in Science and Technology): Satellite data availability methods and challenges for the assessment of climate change and variability on European agriculture*. pp. 115-134.

Murányi G. (2021). A körkörös gazdasági modell kiaknázása a területi vízgazdálkodásban. *Hidrológiai Közöny* 101. évf. 3. szám. pp. 16-30.

Ripl, W. (2003). Water, the bloodstream of the biosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 358(1440). pp. 1921-1934. doi:10.1098/rstb.2003.1378

Sasvári P. (2020). *Rendszerelmélet*. Dialóg Campus Budapest. doi: 10.36250/00734.00

Spracklen, DV., Baker, JCA., Marsham, JH. (2018). The Effects of Tropical Vegetation on Rainfall. *Annu.*

Rev. Environ. Resour. 2018. 43. pp. 14.1–14.26. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030136>

Stelczer K. (2000). A vízkészlet-gazdálkodás hidrológiai alapjai. ELTE Eötvös Kiadó. ISBN 963-463-249-1

Sušnik, J., Masia, S., Kravčík, M., Pokorný, J., Hesslerová, P. (2022). Costs and benefits of landscape-based water retention measures as nature-based solutions to mitigating climate impacts in eastern Germany, Czech Republic and Slovakia. *Land Degradation & Development*, 1-14. doi:10.1002/ldr.4373

Szilágyi J., Kovács Á. (2010). Complementary-relationship-based evapotranspiration mapping (cremap) technique for Hungary. *Civil Engineering* 54/2. pp. 95-100. doi:10.3311/pp.ci.2010-2.04

Szöllősi-Nagy A. (2022). A globális víz helyzet – tényleg akkora a baj? Öntözzünk, de miből? A Magyar Természettudományi Társulat konferenciasorozata. 2022. március 8.

Unger J., Sümegehy Z., Kántor N., Gulyás Á., (2012). Kisléptékű környezeti klimatológia. JATEPress, Szeged, ISBN 978-963-315-068 9

Ungvári G. Molnár Zs., Varga Gy., Ellison D. (2012). Ökoszisztéma-szolgáltatások nagyságrendi becslése vízgyűjtő szinten a vízkörforgást leíró vízháztartási jellemzők alapján. Regionális Energiagazdálkodási Kutatóközpont, Budapest. Műhelytanulmány (working paper). Utolsó hozzáférés: 2020. március 20. <https://www.researchgate.net/publication/274912006>, <http://unipub.lib.uni-corvinus.hu/560/>

Vida G. (2017). Közös otthonunk a Föld. Szent István Tudományos Akadémia. Előadás, 2017. április 3.

Wild, M., Grieser, J., Schaer, C. (2008). Combined surface solar brightening and increasing greenhouse effect support recent intensification of the global land-based hydrological cycle. *Geophysical Research Letters* 35. doi:10.1029/2008GL034842

Xiao, M., Yu, Z., Kong, D., Gu, X., Mammarella, I., Montagnani, L., Arain, A., Merbold, L., Magliulo, V., Lohila, A., Buchmann, N., Wolf, S., Gharun, M., Hörtnagl, L., Beringer, J., Gioli, B. (2020). Stomatal Response to decreased relative humidity, *Environ. Res. Lett.* 15 094066. doi:10.1088/1748-9326/ab9967

Zemp, DC., Schleussner, CF., Barbosa, H., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G., Staal, A., Wang-Erlandsson, L., Rammig, A. (2017). Self-amplified Amazon Forest loss due to vegetation–atmosphere feedbacks. *Nat. Commun.* 8, doi:10.1038/ncomms14681

Internetes hivatkozások:

URL1 (2018). Fred Pearce: Rivers in the Sky: How Deforestation Is Affecting Global Water Cycles. <https://e360.yale.edu>. Utolsó hozzáférés: 2022.05.01.

URL2 (2021). Rivers in the Sky: 6 facts you should know about atmospheric rivers. <https://www.usgs.gov>. Utolsó hozzáférés: 2022.05.01.

URL3 (2015). NEMZETI VÍZSTRATÉGIA, KVASAY JENŐ TERV. <http://www.vizugy.hu/index.php?module=vizstrat&programelemid=143>. Utolsó hozzáférés: 2022 április 28.

SZERZŐ



BÁDER LÁSZLÓ mérnök–geográfus, az MHT tagja. Jelenleg a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem doktorandusza az Építőmérnöki Karon, a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéken. Kutatási területe a párolgás becslése és az éghajlati víz- és energiamérleg alakulásának vizsgálata. A versenyszektorban szerzett munkahelyi tapasztalatokat, közben társadalmi szervezetekben is dolgozott és több országos programban, például a Nemzeti Erdőstratégia kidolgozásában vett részt.