

A PÁROLGÁS SZEREPE ÉS A „TÁJI HŐSZIGETEK” HATÁSA AZ ÉGHAJLATI ENERGIA- ÉS VÍZMÉRLEGRE

THE ROLE OF EVAPORATION AND THE IMPACT OF „LANDSCAPE HEAT ISLANDS” ON CLIMATIC ENERGY AND WATER BALANCE

Báder László

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízgazdálkodási és Vízépítési Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.
 laszlo.bader@edu.bme.hu

A cikk a 2021. április 12-15. között megrendezett HuPCC (Magyar Éghajlatváltozási Tudományos Testület) 1. konferencia 2b szekciójában elhangzott előadás alapján készült.

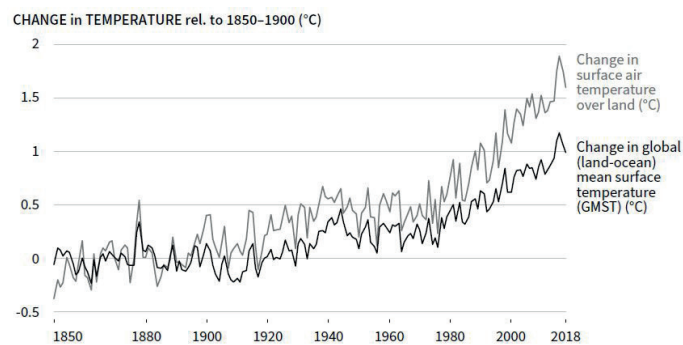
Összefoglalás: Az IPCC 2019-es jelentése szerint szárazföldeken nagyobb a hőmérséklet emelkedése, mint a felmelegedés globális átlaga. A szárazföldek területi párolgásának növekedése mutatható ki az ezredfordulóig, majd megfordult a trend. Komoly figyelmeztető jelek. A párolgás a hidrológiai ciklus meghatározó tagja, a légkörzésben a hőszállítás semmi mással nem pótolható közege. Magyarországi adatokat vizsgálva feltehető, hogy a felmelegedéshez tájhasználat változásain keresztül a párolgási viszonyok megváltoztatása is hozzájárul. Ahol jelentős a párolgáshiány a városi hőszigetekhez hasonló „táji hőszigetek” alakulhatnak ki. Az üvegházhatású gázok arányának csökkentése így csak szükséges, de nem elégséges feltétele az éghajlatváltozás problémájának megoldásában. A természetes hőcserélő folyamatok hatékonyságának megőrzése, a táji szintű vízellátás és vízkörforgás javítása is nélkülözhetetlen.

Abstract: Air temperature increases faster on the continents compared to global warming, as shown in a 2019 IPCC report. The rate of evaporation on the continents was also increasing with global warming, however the growing trend has reversed at around the end of the last century. This may be a serious warning to the vulnerability of the global heat distribution process. The heat distribution function of evaporation is limited, when there is not enough of water to pick up the surplus heat from the land surface in the form of vapour, consequently larger and larger „landscape heat islands” are formed. Controlling the carbon emission and sequestration processes is a mandatory condition to curb climate change, but may not be sufficient. A further condition to limit climate change on the continents seems to be an efficient heat distribution process. This requires the improvement of water supply at the landscape level, thus supporting sustainable land use and maintaining a healthy hydrological cycle.

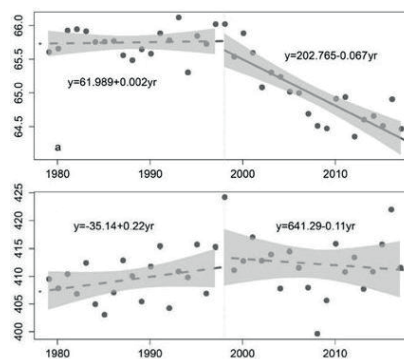
Bevezetés. A globális felmelegedés az utóbbi évtizedekben kiemelt témává vált a tudományban, közéletben és a híradásokban egyaránt. Magyarországon a levegő középhőmérsékletének országos átlaga 2020-ban 11,5 °C volt, az elmúlt 120 év alatt (1901 és 2020 között) +1,23 °C-t emelkedett (Biróné, 2021). A felszínhőmérséklet havi maximum értékei felhőmentes napokon már áprilisban elérhetik a 35 °C-t, és júliusban az Alföld jelentős részén meghaladják 42 °C-t, ahogy ez az 1961 és 1990 közötti 30 év átlagai alapján kimutatható (Mersich, 2010). A hőmérséklet emelkedésével megnőtt és tovább növekszik

mind az épített, mind a természeti környezet hőterhelése. Hogyan lehet képes a környezet reagálni a hőmérséklet-emelkedéssel járó fokozott igénybevételre?

Problémafelvetés. A külföldi kutatások adatai is megerősítik, hogy lényeges változásokról van szó, és jól érzékeltek a változások mértékét. Az IPCC a „Climate Change and Land” című 2019-es jelentésében közölt grafikon (1a. ábra) bemutatja, hogy a szárazföld hőmérsékletének növekedési üteme meghaladja a hőmérséklet emelkedésének globális átlagát. (IPCC, 2019). Eközben más kutatások szerint a párolgás növekedése globálisan megállt (Jung et al., 2010; Xiao et al., 2020). A relatív nedvesség és párolgás trendjében az ezredforduló környékén törés mutatható ki (1b. ábra).



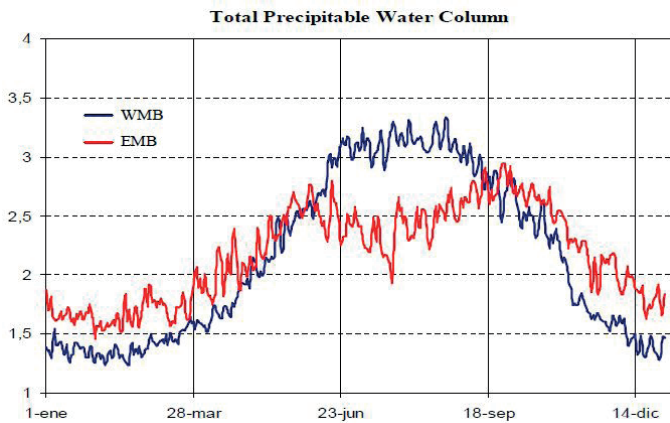
1a. ábra. A szárazföldek felmelegedése (felső vonal) gyorsabb, mint a felmelegedés globális átlaga (alsó vonal)
 Forrás: IPCC, 2019.



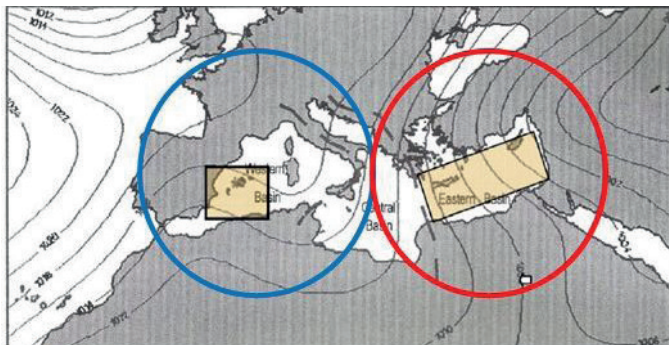
1b. ábra. A relatív nedvesség (fent, %) és a területi párolgás átlaga (lent, mm/év) 1979 és 2017 között (Xiao et al., 2020).

A Földközi tenger keleti-, és nyugati medencéjében a kihullható víztartalom mennyiségét látjuk a 2a. ábrán.

A grafikon szerint tavasztól mindkét medencében emelkedik a víztartalom, de a nyári időszakban a légköri oszlop víztartalmának növekedése a keleti medencében megáll kb. 2,5 cm-nél. Ez az eltérés a légköri folyamatok eltérő jellegére utal (Millán, 2014a). Az adatokat a 2000–2008 közötti években az Aqua és Terra műholdak MODIS műszerei gyűjtötték, és a 2b ábrán négyzettel jelölt területek 9 éves időszak napi átlagait mutatják be (Millán, 2014b).



2a. ábra. A kihullható csapadék mennyisége a Földközi-tenger keleti medencéjében (pirossal jelölve) és nyugati medencéjében (kékkel jelölve) a 2000–2008-as évek átlagában (Millán, 2014a).



2b. ábra. A 2a ábrán bemutatott napi értékek az Aqua és Terra műholdak MODIS műszerei adatainak 9 évi átlagát mutatják a négyzetekkel jelölt területekre (Millán, 2014b).

Módszer. Elgondolkodtatóak a fenti adatok, érdemes a jelenséget több oldalról megvizsgálni, majd feltenni a kérdést, hogy vajon milyen összefüggés lehet az adatok és folyamatok között? Mit jelenthetnek ezek az adatok? Hogyan értelmezzük őket?

A felmelegedés és a párolgás közötti kapcsolat tisztázásának érdekében alapvető kérdésekhez is szükséges lehet visszatérni. Az időjárás és éghajlat folyamatai leegyszerűsítve egy természetes energia-kiegyenlítő rendszer részei, amelyek a külső kényszerítő tényezők hatásait követve egyensúlyi állapot elérésére törekszenek. A fizikai kényszerek változásának ritmusát a Föld napi és éves mozgása adja meg.

A továbbiakban a magyarországi vízmérleg legfontosabb összetevői arányának ismeretében a funkcionális összefüggéseket vizsgáljuk meg, majd a rendszer energiaellátásának, valamint a légkörzés energiaszállító, kiegyenlítő képességének és a párolgásnak a szerepét.

Energiamérleg. A rendszer legfőbb hajtóereje a Földet a Nap felől folyamatos erő rövidhullámú besugárzás, amelynek értéke átlagosan 1361 W/m^2 közepes Nap–Föld távolsággal számolva. Mivel a rövidhullámú besugárzással érkező energia a forgásban lévő Föld teljes felszínén oszlik el, ezért a Nap felé néző körlejtő energiámmennyiség egynegyedével, 341 W/m^2 átlagos besugárzási teljesítménnyel számolunk a Föld energiamérlegében (Pokorný et al., 2016). A sugárzás egy része nem éri el a Föld felszínét, visszaverődik, szóródik, elnyelődik. A felszínig lejutó rövidhullámú sugárzás átlagos teljesítménye a teljes rövidhullámú sugárzás 47%-a.

Ha a felszín hosszú távon egyensúlyi energia-állapotban van, akkor a felszínre elért besugárzással (mint bevétellel) egyenlő a kiadás is, amely már megváltozott formában, 21%-ban hosszú hullámú kisugárzás, 7%-ban érzékelhető hő (hőáramlás és hővezetés), és 23%-ban rejtett (látens) hő formájában párolgással távozik a felszínről. Globális becslés alapján a rejtett hő mintegy háromszorosa az érzékelhető hő mennyiségének (látens hő: $70\text{--}85 \text{ W/m}^2$, illetve érzékelhető hő: $15\text{--}25 \text{ W/m}^2$), de arányaiban a becslések a legnagyobb szórást pont itt mutatják (Wild et al., 2013).

Figyeljük meg, hogy a felszíni energiamérleg kiadási oldalán a legnagyobb tag a párolgást jelentő látens hőszállítás, és ne feledjük, hogy ezek az adatok globális átlagok, a tényleges értékek ettől évszaktól, napszaktól és helytől függően lényegesen eltérhetnek.

Fizikai alapok, fogalmak. A párolgás egyszerű, de a földi élet szempontjából létfontosságú fizikai jelenség. A párolgás mennyiségét általában mm-ben, az eltávozó vízborítás magasságában szokták megadni.

A területi párolgás az a vízmennyiség, amely adott helyről, adott idő alatt, adott körülmények között ténylegesen vízpára formájában eltávozik. Mennyisége függ a hőmérséklettől, páratartalomtól, szélsébségtől, nyomástól, és a rendelkezésre álló víz mennyiségétől.

A potenciális párolgás egy adott légtér által felvehető maximális páramennyiség, vagy másként az a vízmennyiség mm-ben, ami egy adott helyen képes lenne összesen elpárologni, ha a víz korlátlanul állna rendelkezésre, és csak az egyéb körülményektől függene a párolgás mennyisége. A párolgáshiány, vagy páraéhség azt jelenti, hogy mennyi víznek kellene még elpárolognia ahhoz, hogy a potenciális párolgás szintjét elérjük.

A párolgás kifejezés alatt a továbbiakban a szabad felületről történő párolgást és a növényzet által történő párolgotatást együttesen értjük (mint az evapotranspiráció fogalmában).

Fontos még emlékeztetni a víz rendkívüli hőtani tulajdonságaira. A beton fajhője $0,88 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, a víz fajhője $4,2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, amely sokszorosa a beton (és általában az építőanyagok) fajhőjének, azaz a víz jó hőmérséklet-stabilizáló képességgel is rendelkezik (lassabban melegszik, vagy lassabban hűl, mint más anyag). A fajhőnél azonban több nagyságrenddel nagyobb a víz párolgáshője, $2480 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$.

Egy kg (1 liter) 20 °C-os víz párolgásához 2480 kJ energia szükséges! Ezt az energiát – hőt –, a felszínről elpárolgó víz a környezetéből veszi fel, és „viszi magával”, mint látens hőt (Eiseltová *et al.*, 2012). A víz tehát a folyamatban a hőcserélő közegnek tekinthető. Az éghajlati energiák szállításában, a hőcserélő folyamatokban a víz halmazállapotváltozása (a párolgás) játssza a szárazföldeken a kulcs szerepet, ami semmi mással nem helyettesíthető a globális légkörzésben.

Víz mérleg. A szárazföldek vízellátását alapvetően a csapadék biztosítja, ami a felszínről elpárolog, lefolyik, vagy esetleg tározódik. A párolgás jelentőségére összpontosítva most csak a legegyszerűbb víz mérleg egyenlet adatait nézzük meg, a legnagyobb tagokat, ahol a bevételi oldal a csapadék, a kiadási oldal a lefolyás, párolgás, és beszivárgás, amelyet bizonyos időszakokra (általában egy évre) adunk meg. A tagok részletezésétől és egyéb tagoktól eltekintünk (csapadékfajták, szivárgás, átfolyás stb.).

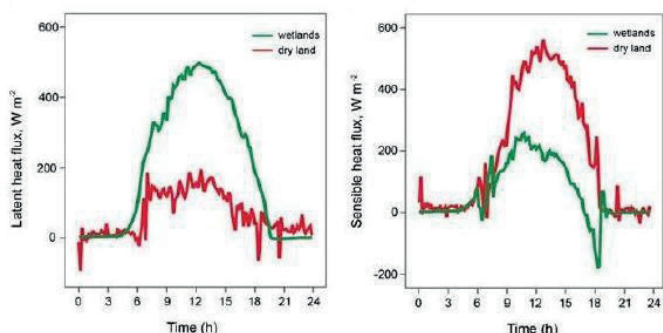
A mérlegegyenlet így: $Bevétel = Kiadás + Vízkeszlet\ változás$, azaz $Cs = P + L + B + \Delta K$, ahol „Cs” a beérkező csapadék, „P” a párolgás, „L” a lefolyás, „B” a beszivárgás és ΔK a készletváltozás. Magyarországon a csapadék éves mennyisége 56 km³, a párolgás 48 km³, a lefolyás és beszivárgás pedig csak 4,7 km³ ill. 3.3 km³, együtt is csak a csapadéknak mintegy 12%-a a 2001–2010 közötti időszak éves átlaga alapján (Kocsis, 2018b). A készletváltozást rövidebb időszakokra vonatkoztatva az egyszerűség kedvéért általában nullának tekintik. Fontos azonban megjegyezni, hogy ez az egyszerűsítés vezetett oda, hogy a kontinensek fokozatos kiszáradását nem vettük észre időben (Kravcik *et al.*, 2000). Ennek elemzése, részletezése meghaladja a jelen téma kereteit, most a hőcserélő körfolyamat kulcsát jelentő párolgás szerepét vizsgáljuk. Mivel a víz mérlegben Magyarországon a legnagyobb kiadási tag a párolgás, ez jelzi annak fontosságát a vízkörzésben és az éghajlati energiák közvetítésében.

A párolgás jelentősége a hőforgalomban. A fizikai és szemléleti alapok tisztázása után térjünk vissza a felmelegedésre, és annak okaira, következményeire. Nyár közepén a besugárzással érkező hő elszállításához a legtöbb helyen már nem áll rendelkezésre elegendő mennyiségben víz, amely elpárologva, látens hőként távozva segítené a hőkiegyenlítést. Éghajlati aszály alakulhat ki, a helyi csapadék esélye csökken, tartós aszály előfordulhat már áprilistól kezdődően (Horváth *et al.*, 2010). A párolgás hiánya súlyos rendellenességeket okoz: szabályzó – a besugárzás hatását mérséklő – negatív visszacsatolás helyett gerjesztő pozitív visszacsatolás alakulhat ki. Tovább melegszik a környezet, még nagyobb a páraigény, de nincsen a párolgáshoz elegendő víz, amelynek párolgása hűtő hatással lenne, ezért folytatódhat a felmelegedés és azzal még tovább nő a páraigény.

A felszínborítás megváltoztatása hatással van a hőmérsékletre, ahogy ez a városi hősziget jelenségénél jól kimutatható, nyáron a beépített területek a környezetüknél melegebbek (Unger és Gál, 2017). A felszínborítás változása és a párolgás csökkenése azonban nagyobb léptékben is hasonló következményekkel jár. Az intenzíven művelt mezőgazdasági tájban is megváltoznak a felszíni hőcserélő,

hőszállító folyamatok (különösen betakarítás után, nagytáblás művelésnél, amikor a határ nagy része fedetlen marad). Felmelegszik a talaj, csökken a párolgás a környező nedvesebb területekhez képest, ezáltal a párolgással elvezetett hő mennyisége (a látens hőszállítás) is csökken. Tovább melegszik a felszín, egyre nagyobb területek hőmérséklete emelkedik a környező területek hőmérséklete fölé, nagyobb méretű hőfoltok, „táji hőszigetek” alakulhatnak ki (Báder, 2020).

Csehországban megvizsgálták a látens hő és érezhető hő napi menetét és arányát különböző felszínborítás mellett (Hurina és Pokorný, 2017). A 3. ábrán megfigyelhető, hogy egy nyári napon, délidőben egyrészt a korábban említett globális átlagértékekhez képest lényegesen nagyobbak a teljesítmények, másrészt a felszínborítástól függően megváltozik az érezhető-, és a látens hő aránya. A vizes élőhelyen a látens hőszállítás a meghatározó, míg szántóföldön az érezhető hő értéke nagyobb. A felszínborításnak tehát lényeges szerepe van a hőforgalom alakulásában.



3. ábra. Vizes élőhely (zöld vonal) és szántóföld (piros vonal) hőforgalmának összehasonlítása egy forró nyári napon. Dél-Csehország, 2011 július. (Hurina és Pokorný, 2017). Balra: a látens hőszállítás, jobbra az érezhető hő napi menete.

	W/m ²	A rövidhullámú sugárzás megoszlása %-ban	A felszínre elérő rövidhullámú sugárzás %-ban	Vizes élőhely és szántóföld hőforgalmának összehasonlítása %-ban
Teljes bejövő rövidhullámú sugárzás	341	100	-	-
Felszínre elérő rövidhullámú sugárzás	161	47	-	-
Hosszúhullámú kisugárzás	57	17	41	na
Érzékelhető hő (levegő + talaj)	20	6	14	10–20% (vizes élőhely) 70–80% (szántó)
Látens hő (párolgással távozó rejtett hő)	84	25	45	80–90% (vizes élőhely) 20–30% (szántó)

1. táblázat. A Föld sugárzási egyenlegének főbb összetevői (Wild *et al.*, 2013), valamint vizes élőhely és szántóföld hőforgalmának összehasonlítása (Hurina és Pokorný, 2017). A földfelszínre elérő sugárzási energia legnagyobb része, átlagosan 45% látens hővé válik, de az arány a felszínborítástól függően 20–90% között változhat.

Az az 1. táblázat összefoglalja az energiamérleg felsorolt összetevőinek arányát, valamint azok változását a felszínborítás függvényében. Az utolsó oszlop az érzékelhető és

rejtett hő arányának jelentős különbségét mutatja be egy vizes élőhelyet és egy szántóföldet összehasonlítva. Az „Érzékelhető hő” sorban a vizes élőhelyhez tartozó 10–20% mutatja, hogy a párolgás miatt kevés hő „marad a tájban”, miközben ez az arány szántóföldön 70–80%, ami magyarázatot ad a nagyobb felmelegedésre. A „Látens hő” sorban az arány fordított, a vizes élőhelyről a beérkező energia 80–90%-a vízpárával eltávozik, de a szántóról csak 20–30%!

A hőmérséklet és párolgás eloszlásának összehasonlítása Magyarországon. Az országos átlagos évi csapadékmennyiség az 1981–2010-es 30 éves időszakban 580 mm körül volt (Kocsis, 2018a), bár az egyes évek csapadékösszege jelentősen eltérhet egymástól. A legkevesebb évi csapadék az ország középső területein és délkeleten hullik, mintegy 500 mm. A legtöbb, 700 mm feletti a csapadék a délnyugati megyékben, Zala, Somogy és Baranya megyékben. Ha a nyári hónapok csapadéka területi eloszlását nézzük (június-július-augusztus), akkor azt láthatjuk, hogy pont az Alföldön a legkevesebb a csapadék, ott, ahol a legnagyobb a besugárzás (mintegy 4800–5000 MJ/m²/év), és a legtöbb (2000 óra feletti) a napsütéses órák évi száma (Kocsis, 2018).

Ha összevetjük a 2000–2008-as 9 éves időszaknak a műholdról mért nappali felszíni hőmérséklet átlagának térképét a becsült átlagos éves párolgás térképével (Kovács, 2011), akkor jól látható az ország délkeleti részén a melegebb terület, ahol az Alföld hatalmas „táji hőszigetként” jelenik meg (4a. ábra), ugyanítt a táji szintű vízhiány jól felismerhető (4b. ábra). A műholdas észlelések segítségével az eddigieknél részletesebb felszíni hőmérséklet- és párolgástérképek készítésére nyílik lehetőség, amelyeken a párolgási folyamat dinamikája is jobban felismerhető. Ezt a korábbi, kizárólag a felszíni mérésekre épülő párolgástérképek még nem tették lehetővé. Magyarországra az első 1 km x 1 km felbontású párolgásbecslés térképek jól mutatják a módszerben rejlő lehetőségeket.

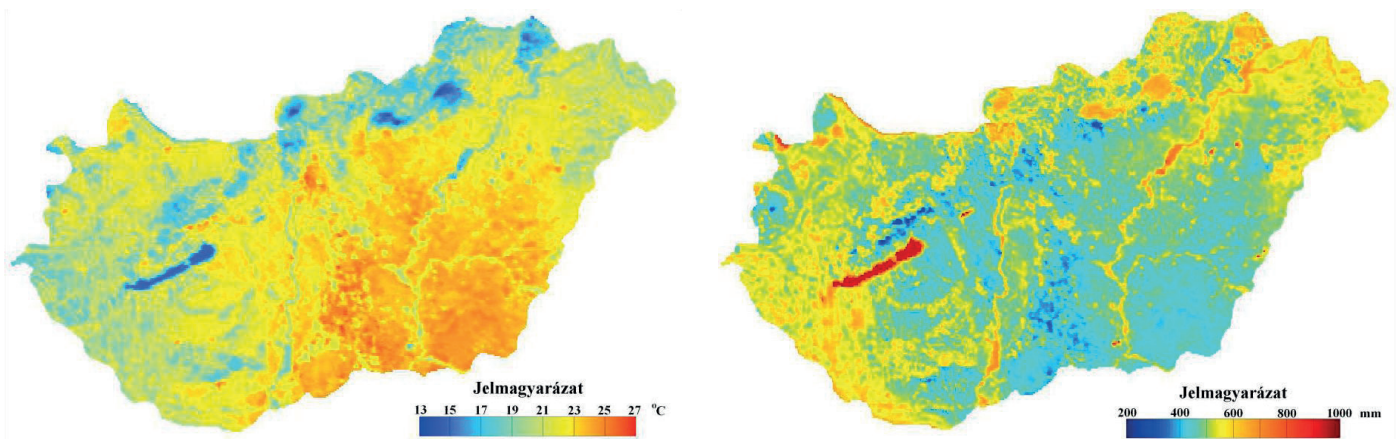
A magasabb hőmérsékletű területeken a párolgás kisebb, nincs elegendő víz a párolgáshoz. Nyílik az olló, többet kellene párolgatni, de hiányzik a hő elvezetéséhez szükséges víz. Ha hiányzik a víz, több hő marad a tájban, nagyobb

a felmelegedés, még több víz kellene. Az Alföldön júliusban, az 1961–1990-es időszakban, 100 mm alatti volt az átlagos párolgás, miközben potenciálisan 180 mm-nél több is képes lenne elpárologni (Mersich, 2010).

A 4b. ábrán a párolgás értékeinek becslése CREMAP (Complementary Relationship based evaporation MAPPING) eljárással készült (Szilágyi és Kovács, 2010). A mintegy félévszázados komplementáris párolgásbecslési elmélet lényege, hogy miközben csapadék után egy terület száradása során a párolgás csökken, eközben a potenciális párolgás nő, és ez a változás matematikai kapcsolatba hozható. A számításokhoz kevés bemenő adat szükséges (hőmérséklet, páratartalom, besugárzás, nyomás, szélesség), de nem feltételezi a felszíni folyamatok részletes ismeretét, mert azok hatását a bemenő adatok magukban foglalják. A termodinamikai összefüggések feltárása (Szilágyi, 2021) és az eljárások fejlődése várhatóan segíteni fogja a módszer terjedését.

A 4b. ábrán bemutatott párolgástérkép adatainak 250 m × 250 m felbontásra leskálázását végezte el a közelmúltban egy másik kutatás CORINE felszínborítás adatbázis alapján (Csáki, 2019). Az eltérő felszínborításokra különböző értékek adódnak. A vizsgált 2000–2008-as időszakot felölelő 9 év átlagában a mesterséges felszín párolgása a legkisebb (471 mm/év), amelynél alig több a mezőgazdasági területek párolgása (499 mm/év). Az erdők természetközeli területek, vizenyős területek és vízfelületek párolgása pedig sorrendben: 576 mm/év, 671 mm/év, 861 mm/év. Az Alföld délkeleti részének kis párolgása igazolni látszik „táji hősziget” jelenséget, de az összefüggések elemzése és hatásvizsgálata még további kutatásokat igényel.

Diszkusszió. A kontinenseken a környezeti problémák jelentős részét feltételezhetően a területi és éghajlati adottságoknak hosszú távon nem megfelelő tájhasználat okozza. Ha alulértékeljük a párolgás szerepét a hőforgalomban és nem tartalékolunk elég vizet a tájban a melegebb időszakok párolgására, akkor a táj párolgató képességének csökkentésével a táj hőszállító, hőszabályozó képességét is csökkentjük.



4. ábra. Balra: Magyarország 1 km*1 km-es felbontású 9 éves átlagos nappali felszíni hőmérséklete a 2000–2008 időszakban a Terra és Aqua műholdak adatai alapján. Jobbra: a becsült éves területi párolgás átlaga ugyanerre az időszakra (Kovács, 2011).

A bemutatott adatok és ábrák alapján felmerülhet a kérdés, hogy mi lehet az ok, és mi az okozat a felszín fokozottabb felmelegedése és a kisebb párolgás között (akár egy szántóföldet, vagy nagyobb léptékben egy tájegységet, vagy az egész Alföldet vizsgálva)?

Egyrészt a táj fokozottabb felmelegedéséből következik, hogy nő a párolgási igény. Ekkor a felmelegedés lehet az ok, a víz (és a párolgás) iránti megnövekedett szükséglet pedig a következmény.

Másrészt megközelíthetjük a problémát fordítva is. Ha egy tájban a párolgáshoz szükséges vízmennyiség csökken (a rendszerből elvesztjük a hőcserélő folyadékot), akkor kevesebb lesz a párolgás, ez lehet az ok, következményként pedig a hőszállító, hőcserélő folyamatok gyengülnek. Az lesz az eredmény, hogy több hő marad a tájban, így a felmelegedés a következmény.

Természetesen nem lehet csak az egyik, vagy csak a másik feltevésből kiindulni, mert az időjárás és a felszínborítás alakulása dinamikusan változik. Tágabb összefüggéseket is szükséges vizsgálni. Például az Alföld esetében elég csak a középkortól felidézni és felsorolni a fontosabb változásokat: az erdősültség és vizes területek csökkenése, a legelők és szántóterületek arányának növekedése, vízrendezés, „tévesítés”, gépesített mezőgazdaság, nagyüzemek és nagyábrás művelés kialakulása (Andrásfalvy, 2009). Ezek a beavatkozások túlnyomóan a párolgásra rendelkezésre álló víz mennyiségét csökkentették, amely így „kellő időben” egyre kevésbé vált elérhetővé.

Törvényszerű-e a térségünkre jellemző, a táj kiszáradása felé vezető folyamat, amely helyenként már a sivatagosodás határát súrolja? Van-e megoldás? Ha megvizsgáljuk Magyarország vízmérlegét, megállapíthatjuk, hogy több víz lenne elérhető környezetünkben a párolgáshoz, igaz nem mindig akkor és ott, ahol éppen szükség lenne rá. Az éghajlati vízhiány arányaiban nagyon tűnik a társadalmi vízigényhez képest, de a Duna vízgyűjtőjének hatalmas vízmennyisége lehetővé teszi a tájszintű vízpótlást, amely a párolgáshiány enyhítéséhez szükséges. A kívánatos többlet párologtatás nem jelent azonban veszteséget a rendszerben, mert annak egy része még a vízgyűjtőn belül újra hasznosul (Ent et. al., 2014), amikor az elpárolgott víz része csapadék formájában ismét lehullik.

Fontos azonban megjegyezni, hogy nem szabad csak öntözésre és más technikai megoldásokra gondolni, amikor vízpótlásról beszélünk. Az öntözés csak töredéke annak a vízmennyiségnek, amely az éghajlati energiaforgalom kiegyensúlyozottabb működéséhez, a párolgás növeléséhez szükséges. Olyan összetett feladatról van szó, amihez a műszaki, emberi és tudásbéli adottságaink megvannak, de óriási szemléletváltásra és kölcsönös előnyökre alapuló együttműködésre van szükség a megvalósításhoz az élet minden területén. Csak néhány kiragadott példa: az erdőgazdálkodásban a folyamatos erdőborítással járó erdőkezelés terjesztése, az erdősültség növelése; mezőgazdaságban a talajtakarásos, forgatás nélküli szántóföldi művelés, vízigényes növények termesztése, tőrendszerek

kialakítása; városokban a zöld tetők, zöld falak, parkok, lugasok terjedése; lakott területeken a csapadékvíz visszatartása, beszivárgás segítése stb. Végeláthatatlanul lehetne még sorolni a lehetőségeket, ahol a víz megtartását, beszivárgását segíthetjük és elpárolgását lehetővé tudjuk tenni valamilyen formában akkor, amikor arra legnagyobb szükség van.

Összefoglalás: A párolgás az élő táj elemi szükséglete, amelynek napi és éves ritmusa van, funkciója a hőki-egyenlítés (Ripl, 2003), a globális felmelegedés felől nézve éghajlatunkon a többelhető elvezetése (Pokorný et al., 2016). A bemutatott közép-európai adatok és kutatások egybevágóan megerősítik, hogy a párolgás és vízkörforgás folyamata kulcsszerepet játszik a táj működőképességének megőrzésében (Kravcik et. al., 2000).

A közérthető megfogalmazás segíthet elvezetni a megoldandó problémák pontosabb körülhatárolásához, és egy fenntartható természetszemlélet kialakításához. Az alábbiak szerint foglalható össze a felvázolt helyzetelemzés üzenete:

1. A víznek rendkívüli szerepe van a globális hőforgalomban, a légkörzésben a hőcserélő közeg szerepét tölti be. A párolgás és az általa elszállított hő a szárazföldek hőháztartásának a kulcsa. A folyamat hatékonyságát a halmazállapotváltozás biztosítja. A víz hiánya a teljes hőcserélő rendszer működésének zavaraihoz, szélsőségekhez és sivatagosodáshoz vezethet.
2. A globális felmelegedésnek szárazföldön nem csak következménye, de egy másik alapvető oka a területi párolgás csökkenése, amely a tájhasználat változásaira vezethető vissza.
3. A légköri szén-dioxid arányát csökkentő intézkedések szükségesek, de nem elégséges feltételei a szárazföldek felmelegedésének és a sivatagosodásnak a megállítására. További szükséges feltétel a szárazföldi vízkörzés javítása, a párolgáshoz szükséges táji szintű vízellátás biztosítása.
4. A fenntarthatóságához nemcsak a lakossági, ipari, mezőgazdasági vízigényeket kell kielégíteni, hanem az éghajlati vízigényt is. Sőt, elsősorban azt kell kielégíteni, mert a vízkör „jó működése”, a víz körforgása teremti meg a kiegyensúlyozott környezeti állapotokat, és ezáltal biztosítja a vízellátás feltételeit.

Az éghajlatváltozás kezelése soha nem látott kihívás elé állítja az emberiséget. A természetet csak erőforrásnak tekintve nem juthatunk el a probléma gyökeréig. Rendszerszemlélettel, a táji elemek rendszerfunkcióinak megértésével – és azok működésének megőrzésével – tudunk csak fenntartható megoldásokat kialakítani (Agócs, 2018). A feladat óriási, de megoldható. Olyan kultúra és értékrend vezethet ki bennünket az önpusztító fogyasztásnövekedés zsákutcájából, ahol a bennünket fenntartó természeti folyamatok igényeit a saját igényeinkkel egyenrangúnak, vagy akár előtte állónak tartjuk, értük felelősséget vállalunk. Az eddigi civilizáció

megoldási kísérletek nem vezettek eredményre, nem sikerült megoldást találni évezredek át, mert a „használjuk ki a lehetőségeket” szemlélet nem változott.

A vízkörzés stabilitásának megőrzéséhez, a táj-növényborítás-vízör rendszer kiegyensúlyozott működése szükséges (Báder, 2006). Paradox módon az éghajlatváltozás, sivatagosodás és a vízbiztonság problémáinak megoldásához az vezet, hogy „elegendő” mennyiségű vizet „pazaroljunk” párolgásra. A vízbőség esetén jól működik a táj hőcserélő rendszere, kevesebb vízre lesz szükség a kiegyensúlyozott vízkörforgáshoz, abból pedig jut elég az emberi szükségletek kielégítésére is.

Irodalom

- Agócs, J., 2018: Rendkeresés. Ekvilibrium Kiadó, Budakeszi.
- Andrásfalvy, B., 2009: Árvíz és társadalom a magyar történelemben. In (Géczy, G. et al.): Az élő és éltető táj. Ekvilibrium Kiadó, Budakeszi, p. 93–122.
- Báder, L., 2006: Öltöztessük fel a Földet – az éghajlatváltoz(tat)ás testközelből. Palocsa Egyesület, Zalkod.
- Báder, L., 2020: „Táji hőszigetek” és hatásuk az éghajlati energia- és vízmérlegre. *J. Lands. Ec.* 18, 87–96.
- Bíróné, Kircsi A., 2021: A 2020 év időjárása. *Légekör* 66, 35–38.
- Csáki, P., 2019: A klímaváltozás hatása a vízkészletekre a felszínborítás figyelembevételével. PhD értekezés, Soproni Egyetem, Sopron.
- Ent, R.J. van der, Wang-Erlandsson L., Keys, P.W and Savenije, H.H.G., 2014: Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle – Part 2: Moisture recycling. *Earth Syst. Dynam.* 5, p.471–489
- Eiseltová, M., Pokorný, J., Hesslerová, P., and Ripl, W., 2012: Evapotranspiration – A Driving Force in Landscape Sustainability. Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling, Ayse Irmak, IntechOpen. DOI:10.5772/19441
- Horváth Sz., Jankó Szép I., Makra L., Mika J., Pajtók-Tari I., and Utasi Z., 2010: Effect of evapotranspiration parameterisation on the Palmer Drought Severity Index. *Phys. Chemist. Earth* 35, 11–18.
- Hurina, H. and Pokorný, J., 2016: The role of water and vegetation in the distribution of solar energy and local climate: a review. *Folia Geobotanica* 51, 191–208.
- IPCC, 2019: P.R. (eds.: Shukla, J. Skea, R. Slade, R. van Diemen, E. Haughey, J. Malley, M. Pathak, J. Portugal Pereira) Technical Summary. 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.
- Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P. et al., 2010: Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature* 467, 951–954 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09396>
- Kovács, Á., 2011: Tó- és területi párolgás becslésének pontosítása és magyarországi alkalmazásai. PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.
- Kravčik, M., Pokorný, J., Kohutiar, J., Kovač, M., and Tóth, E., 2000: Víz a harmadik évezrednek (Voda pre tretie tisícročie). *Ludia a voda (Emberek és víz egyesület)* Kosice (Kassa)(Szlovák nyelven)
- Mersich, I. (szerk.), 2010: Magyarország éghajlati atlasza. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest.
- Kocsis, K. (szerk.), 2018: Magyarország nemzeti atlasza. II. kötet: Vizek. MTA CSFK Földrajztudományi Intézet, Budapest p. 70
- Kocsis, K. (szerk.), 2018a: Magyarország nemzeti atlasza. II. kötet: Természeti környezet, éghajlat. MTA CSFK Földrajztudományi Intézet, Budapest, 58–67.
- Millán, M., 2014a: Drought in the Mediterranean and (summer) floods in the UK and Central-Eastern Europe: What Global Climate Models cannot see regarding the hydrological cycles in Europe, and why. Gammeltoft-RACCM-CIRCE Report, revised 2014 for the EC's Conference Land as a Resource, 80–81.
- Millán, M., 2014b: Extreme hydrometeorological events and climate change predictions in Europe. *J. Hydrol.* 518, 206–224.
- Pokorný, J., Hesslerová, P., Hurina, H., and Harper, D., 2016: Indirect and direct thermodynamic effects of wetland ecosystems on climate. In (ed.: Vymazdal, J.), Natural and constructed wetlands. *Springer*, Cham. 91–108.
- Ripl, W., 2003: Water, the bloodstream of the biosphere, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 358(1440), 1921–1934.
- Szilágyi, J. and Kovács, Á., 2010: Complementary-relationship-based evapotranspiration mapping (cremap) technique for Hungary. *Civil Engineering* 54/2, 95–100. doi: 10.3311/pp.ci.2010-2.04
- Szilágyi, J., 2021: On the thermodynamic foundations of the complementary relationship of evaporation. *J. Hydrol.* 593, 125916.
- Unger, J. és Gál, T., 2017: A városi hősziget jelenségköre és modellezési lehetőségei. Meteorológiai Tudományos Napok, 2017. november 23–24, 43.
- Wild, M., Folini, D., Schär, C., Loeb, N., Dutton, E., and König-Langlo, G. 2013: A new diagram of the global energy balance. AIP Conference Proceedings 1531, 628–631.
- Xiao et al., 2020: Stomatal Response to decreased relative humidity, *Environ. Res. Lett.* 15, 094066