

# A VÍZ ÉS A LÉGKÖRI FOLYAMATOK – A HIDROLÓGIAI CIKLUS ATMOSZFERIKUS RÉSZE

Bozó László

az MTA rendes tagja  
Országos Meteorológiai Szolgálat  
bozo.l@met.hu

**Kulcsszavak:** hidrometeorológia, éghajlati szolgáltatások, csapadékszélsőségek, mediterrán ciklon, légköri nyomanyagok

## BEVEZETÉS

Az egyes földi szférák víztározó képessége jelentős különbségeket mutat. Az óceánokban és a tengerekben mintegy 1300 millió  $\text{km}^3$  víz halmozódik fel, a jégtakarók és a gleccserek kb. 29 millió  $\text{km}^3$ , a felszín alatti vizek kb. 8 millió  $\text{km}^3$  víztérfogatot jelentenek. Ezekhez képest a légkörben található víz mennyisége szinte elhanyagolható, hiszen a számítások szerint ennek átlagos értéke nem haladja meg a 12 ezer  $\text{km}^3$ -t. A globális vízkörforgalomban azonban a légkör szerepe meghatározó jelentőségű. A párolgáson, a kondenzáción, a felhő- és csapadékképződésen, valamint a légmozgásokon keresztül a légkör játssza a legfontosabb szerepet a víz folyamatos körforgásában a természetes víztározók között. A légkörből évente mintegy 480 ezer  $\text{km}^3$  csapadék hullik ki az óceánokra, a tengerekre és a szárazföldekre. A légköri folyamatok dinamikájára jellemző, hogy a vízmolekulák átlagos tartózkodási ideje a légkörben kb. 10 nap, szemben a jégtakaróra (12 ezer év) és az óceánokra, tengerekre (3 ezer év) becsült időtartamokkal.

A Föld légkörében tapasztalható globális légkörzés mozgatója a sugárzási mérleg trópusok és pólusok közötti különbsége. Alacsonyabb földrajzi szélességeken, a trópusokon beérkező rövidhullámú napsugárzás és a felmelegedett felszín által kibocsátott hosszuhullámú sugárzás energiamérlege pozitív. Ezzel szemben magasabb földrajzi szélességeken, a pólusok körüli területeken a rövidhullámú besugárzás és a hosszuhullámú kisugárzás különbsége negatív. A két terület között kialakuló belsőenergia-különbség egy része kinetikus energiává alakul, majd a kialakuló légmozgásokra ráakodik a Föld forgásából származó eltérítő erő is. Létrejönnek az egyes földrajzi zónákat jellemző áramlási övek, így például a mérsékelt öv időjárását meghatározó nyugati szelek öve, amelyben kisebb-nagyobb légköri hullámok keletkeznek, jellegzetes örvénylési képpel bíró ciklonokkal és

anticiklonokkal. A globális cirkuláció folyamatában fontos szerepet kap a víz. A víz a fázisátalakulásokon keresztül egyfajta „energiahordozónak” tekinthető: a melegebb területekről elpárolgó vízgőz ugyanis a hidegebb területekre áramolva, majd ott kondenzálódva jelentős mennyiségű látens hőenergia felszabadulásával jár. A nyugati szelek övében kialakuló ciklonok erősségét alapvetően befolyásolja, hogy bennük mennyi vízgőz képes kicsapódni, és ezzel együtt mennyi látens hő szabadulhat fel. A ciklonokban történő nedvességkicsapódás felhő- és csapadékképződéssel jár: a nagyobb csapadékot adó ciklonok jellemzően gyorsabban fejlődnek, és mélyebbek lesznek. A ciklonokba beáramló vízgőz sokszor nagy távolságból érkezik, gyakran a trópusi meleg tengerekből jut a légkörbe, és ún. nedves szállítószalagokba rendeződve áramlik fel a nyugati szelek övébe. Másrészt viszont a ciklonok áramlási rendszerében lezajló összeáramlások és feláramlások teremtik meg a vízgőz kondenzálódásának feltételeit, vagyis a felhő- és csapadékképződést (Geresdi et al., 2013).

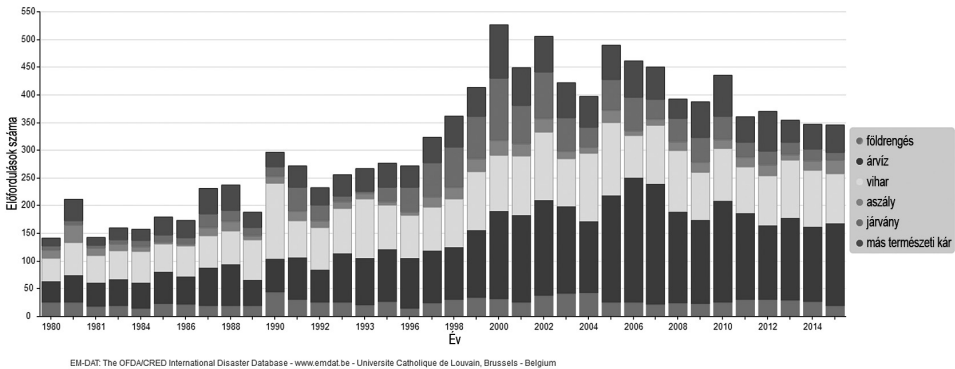
A globális cirkuláció tehát alapvetően befolyásolja a víz légköri körforgalmát. A kontinenseket sújtó aszályok, illetve az árvizeket okozó esőzések kialakulásának feltételeit legtöbbször nem a helyi légköri állapotváltozások, hanem a globális földi cirkuláció körülményei szabályozzák.

#### kihívások és lehetőségek

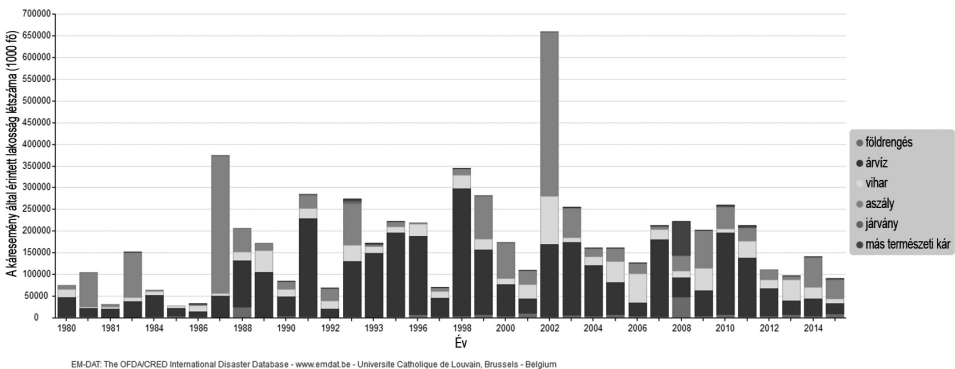
A természetes és antropogén okokra visszavezethető globális környezeti változások jelentős részben a vízhez, a víz globális körforgalmának változékony-ságához köthetők. A globális változásokkal is kapcsolatba hozható regionális és lokális léptékű természeti jelenségek bizonyos helyzetekben súlyos élet- és vagyonszervi kockázatot jelentenek. Ha megnézzük az 1980–2015 között bekövetkezett természeti káresemények számát (EM-DAT, 2016), láthatjuk, hogy az árvizek, az aszályok és a gyakran intenzív csapadékeseményekkel is kísért légköri viharok együttesen ennek jelentős részéért felelősek (1. ábra). Talán még fontosabb a 2. ábrán bemutatott adatsor (EM-DAT, 2016), ahol a természeti káreseményekben érintett személyek számát mutatjuk be ugyanerre az időszakra. Ebben az összehasonlításban a tartós és jelentős vízhiány, valamint a szélsőséges csapadékesemények nyomán kialakuló áradások összességükben domináns szerepet játszanak.

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 összehan-

golt szemléletű kezelése. Ez vonatkozik az egyes fizikai változók megfigyelésére, ezek várható tér- és időbeli változásainak előrejelzésére, a klímapolitikák kialakítására – beleértve a kármérséklés és az alkalmazkodás problémaköreit – és természetesen a kutatási és fejlesztési tevékenységek összehangolására. A hazai és nemzetközi tudományos hálózat kiépítése – *networking* – kiemelt jelentőségű ezen a teljes földi térskálát felölelő szakterületen, beleértve az MTA intézeteit, az egyetemi kutatóműhelyeket, az érintett államigazgatási intézményeket és természetesen azokat a nemzetközi tudásközpontokat, amelyek például a determinisztikus és valószínűségi modelleken alapuló globális skálájú rövid és középtávú időjárás-előrejelzés (ECMWF) vagy a műholdak által gyűjtött légkörtudományi vonatkozású információk feldolgozása (EUMETSAT) területén, tagországi finanszírozás keretében a mindennapi életünkhöz, valamint az élet- és vagyonvédelmi célú tájékoztatáshoz és riasztáshoz nélkülözhetetlen szolgáltatásokat nyújtanak.



1. ábra. Természeti káresemények száma, 1980–2015



2. ábra. Természeti káreseményekben érintettek száma, 1980–2015

A komplex víztudomány és vízgazdálkodás előtt álló egyik legnagyobb kihívás a szakterülethez kapcsolódó többléptékű és egyre összetettebb környezeti és társadalmi válság kezelése, a lehetséges károk mérséklése, illetve az alkalmazkodási stratégiák kialakítása és végrehajtása. Számos vizsgálat igazolja, hogy a szélsőséges időjárási események száma és intenzitása növekszik, ezek egy része pedig közvetlenül kapcsolódik a víz globális körforgalmához. A hidrometeorológiai megfigyelőrendszerek, valamint az előrejelzési szolgáltatások folyamatos fejlesztése és bővítése elengedhetetlenül szükséges annak érdekében, hogy a csapadék területi és időbeni eloszlásának, intenzitásának változásait egyre pontosabban és megbízhatóbban nyomon követhessük, elősegítve a kármérséklési és alkalmazkodási feladatok végrehajtását is az árvízi és belvízi védekezés során, a hirtelen lehulló, nagy mennyiségű csapadék nyomán kialakuló villámárvizek (flash-flood) következményeinek kezelésében, valamint az aszály okozta várható károk mérséklésében. A Meteorológiai Világszervezet (WMO) által szakmailag és technikailag globálisan koordinált és a WMO tagországai által a szárazföldeken, a tengervizek felszínén, a légkörben és a világűrben üzemeltetett meteorológiai és egyéb környezetmegfigyelő rendszerek képezik az alapját annak, hogy levegőkörnyezetünk, illetve a hidroszféra fizikai és kémiai állapotáról valós idejű információt nyerjünk, valamint ebből kiindulva a rövid és középtávon várható változásokat előre jelezzük. A WMO alapvető célkitűzése a tagországok hidrometeorológiai tevékenységének összehangolása, a mérőrendszerek egységesítése és ellenőrzött működtetése, valamint az adattovábbítás és a megfigyelésekre épülő szolgáltatások megszervezése.

A Meteorológiai Világszervezet 2012 októberében Genfben tartott rendkívüli kongresszusán a tagországok kormányzati képviselői elfogadták azt a cselekvési tervet, amelynek célja az időjárási és éghajlati katasztrófákra való felkészülést segítő éghajlati szolgáltatások fejlesztése és bővítése. A természeti katasztrófák a fejlődő és fejlett országokban egyaránt súlyos károkat okoznak, ezért közös érdek egy, a veszélyek kockázatait csökkentő globális éghajlati szolgáltatási keretrendszer (Global Framework for Climate Services, GFCS) kialakítása. A tudományosan megalapozott és jól szervezett éghajlati szolgáltatások segítséget jelentenek a katasztrófák kockázatainak csökkentésében – több milliárd ember életét befolyásolva ezzel. Jelenleg mintegy hetvenre tehető azon WMO-tagországok száma, ahol rendkívül hiányosak, vagy egyáltalán nem léteznek megfelelő színvonalú éghajlati szolgáltatások. A jelenlegi kutatások és adatsorok elaprózottsága nem teszi lehetővé az összehangolt, de mégis helyspecifikus klímaadaptációs intézkedések elindítását, ezek hiányában pedig egyes térségek versenyképessége néhány ágazatban erősen csökkenhet, így a területi és társadalmi egyenlőtlenségek az éghajlatváltozás hatására tovább mélyülhetnek. A GFCS összesen öt támogatandó, a globális környezeti változásokhoz közvetlenül kapcsolódó prioritást nevezett meg: a vízgazdálkodás, az emberi egészség, a természeti katasztrófák kockáza-

tainak mérséklése, az agrárgazdaság/élelmiszer-biztonság, valamint az energia-gazdálkodás. Fontos megjegyeznünk, hogy a vízzel történő észszerű gazdálkodás mint önálló prioritás mellett a másik négy kiemelt terület is közvetlenül vagy közvetve kapcsolódik a víz globális körforgalmának változékonyságához, illetve az ebből eredő természeti és társadalmi kockázatokhoz.

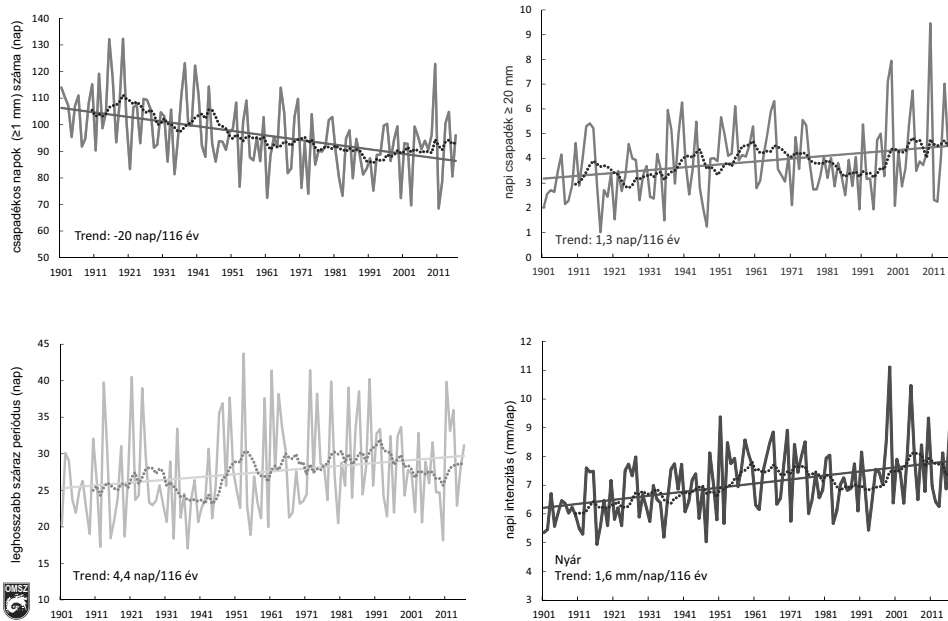
### IDŐJÁRÁSI JELENSÉGEK VÁLTOZÁSAI TÉRSÉGÜNKBEN

A Kárpát-medence időjárását alapvetően a nagytérségű folyamatok határozzák meg. A mérsékelt övi ciklonok mind gyakoribb északabbra húzódásával térségünket sokszor az időjárási frontoknak csak a déli ága érinti. Az országunkban mért éves csapadék jelentős részét ezek a frontátvonulások, illetve a fölöttünk hullámozó légköri frontok adják. A hidegfrontok térségünket éppen csak elérő déli ága legtöbbször csak a szél északira fordulását, majd a viharos szelet hozza magával, rendszerint kevés csapadékkal (Horváth – Nagy, 2012).

Szintén megfigyelhető a Földközi-tenger medencéjében kialakuló mediterrán ciklonok gyakoriságának csökkenése. A mediterrán ciklonok vagy legalább azok csapadéksávja gyakran okoz jelentős mennyiségű csapadékot hazánkban is, így azok elmaradása ugyancsak hozzájárul az aszályos időszakok kialakulásához. Amikor viszont ősszel a sivatagi hatás visszahúzódik, a nyáron felmelegedett Földközi-tenger jelentős mennyiségben adja át a nedvességet a hűvösebb légkörnek, és a déli részeken igen erős csapadékot adó, heves ciklonok jöhetnek létre. A hurrikánhoz hasonlítva, a mediterrán jelzővel társítva újabban „medicane” névvel jelölik a jelenséget (Horváth – Nagy, 2012). A medicane-t a hurrikánok esetében is megfigyelhető lassú mozgás, a trópusi jellegű mag és a jól szervezett zivatarfelhőzet jellemzi. Mozgási energiáját és víztartalmát a meleg Földközi-tengerből nyeri. A rendszerben jelentős nyomásváltozás mérhető, kiadós esőzéseket, igen erős szeleket és széllekeéseket okoz. Gyakorisága és pusztító hatása nem éri el a hurrikánokét, hiszen a kialakulás és fennmaradás geográfiai feltételei, valamint a tengervíz mélysége és termodinamikai jellemzői különbözőek.

Az átlagosnál jelentősebb csapadékkal vagy tartós szárazsággal járó események, periódusok előfordulási gyakoriságát az extrém csapadék indexeinek idősorával és a bekövetkezett változásukkal jellemezhetjük. Országos átlagban csökken a csapadékos napok száma ahogy a jelenhez közelítünk (3. ábra), a 20 mm-es összeget meghaladó csapadékos napok viszont enyhe növekedést mutatnak. A száraz időszakok hossza, vagyis az a leghosszabb időszak, amikor a napi csapadékösszeg nem éri el az 1 mm-t, a megfigyelések szerint megnövekedett a 20. század eleje óta. A napi intenzitás, más néven átlagos napi csapadékoság – egy adott periódusban lehullott összeg és a csapadékos napok számának hánya-

dosa – a nyári évszakban szintén nőtt. Az átlagos napi csapadékok növekedése arra utal, hogy a csapadék egyre inkább rövid ideig tartó, intenzív záporok, zivatarok formájában hullik (Lakatos et al., 2016).



**3. ábra.** Néhány extrémcsapadék-klímaindex homogenizált és rácshálóra interpolált országos átlaga a tízéves mozgó átlag görbéjével és a becsült lineáris trenddel, 1901–2016

### LÉGKÖRI NYOMANYAGOK A FELHŐ- ÉS CSAPADÉKVÍZBEN

A légkörben különböző halmazállapotokban található víz a fizikai folyamatok mellett a légkör kémiai összetételét is szabályozza, és hatással van a felszíni ökoszisztémák állapotára. A természetes és antropogén folyamatok révén a légkörbe kerülő aeroszol részecskék egy része kondenzációs magvakként szolgál a felhőelemek kialakulása során, így bizonyos nyomanyagok már a felhő keletkezésének pillanatában a felhővízbe jutnak. A nyomanyagok a rendezett légköri mozgások segítségével felszíni forrásterületeiktől jelentős távolságra is elszállíthatnak. A felhőképződés során a felhős levegőben maradt kisebb részecskék Brown-mozgásuk miatt a már kialakult felhőcseppekbe ütközhetnek. A felhővíz elnyeli a különböző nyomgázokat, amelyek a folyadékfázisban lépnek kémiai reakcióba. Levegőkémiai szempontból lényeges folyamat a vízben ionokat képző nyomgázok oldódása. Idetartozik többek között a szén-dioxid is: a levegőben nem vesz részt ugyan kémiai reakciókban, vízben viszont jól oldódik. Ennek eredményeként a

légköri felhő, köd és csapadék egyensúlyi pH-értéke nem 7, hanem hőmérsékletfüggően 5,6–5,7 körül van, tehát savas irányba tolódik el.

A felhő párolgása során a korábban elnyelt anyagok visszakerülnek a levegőbe. Ha viszont csapadék képződik, akkor a vízben lévő anyagok a nagy esési sebességű csapadékelemekkel elhagyják a felhőt. A csapadékelemek függőleges mozgásuk során a felhő alatt további gázokat abszorbeálnak, illetve az esési sebesség különbsége miatt ütközhetnek is a légkörben található nagyobb méretű aeroszol részecskékkel.

A csapadékhullásnak tehát jelentős légköri tisztító hatása van. A felszínre hulló csapadékvíz különböző anyagokat juttat az egyes környezeti szférákba. A légszennyeződés így a nedves ülepedésen keresztül kihat a talajra, a vízre, a jégtakaróra és természetesen a bioszférára is. A csapadékvíz a különböző ökoszisztémáknak könnyen felvehető oldott tápanyagokat szolgáltat. Ha azonban a légkör szennyezettsége meghalad egy bizonyos szintet, a csapadékvízzel kiülepedő anyagok a bioszférában akár visszafordíthatatlan károkat is okozhatnak (például savas esők, toxikus nehézfémek vagy nehezen lebomló szerves vegyületek ülepedése). A csapadékvíz kémiai összetételének meghatározása, időbeli változásainak folyamatos nyomon követése ezért a levegőkörnyezeti megfigyelőhálózatok programjának fontos részét jelenti. A WMO Globális Megfigyelő Programja (Global Atmosphere Watch, GAW) abból a célból jött létre, hogy elősegítse a légkör működésének pontosabb megértését, a légkör, az óceánok és a bioszféra kölcsönhatásainak megismerését, továbbá segítséget nyújtson az egyes környezeti szférák jövőben várható állapotának meghatározásához. A program részeként a GAW lehetővé teszi többek között a légkörben zajló fizikai és kémiai folyamatok közötti összefüggések tanulmányozását és a légkör-óceán-bioszféra rendszerben a kémiai összetevők antropogén és természetes körforgalmának megismerését.

Az emberiség az 1960-as évek vége felé szembesült azzal a ténnyel, hogy bizonyos légszennyező anyagok nemcsak forrásaik közelében, hanem jelentős távolságban, a kibocsátó ország határain túl is káros környezeti hatást fejthetnek ki. Olyan területek ökoszisztémái is károsodhatnak a légköri szennyező anyag ülepedése eredményeként, amelyek távol esnek a közvetlen ipari, energetikai, közlekedési, mezőgazdasági vagy egyéb kibocsátó forrásoktól. A szennyezés hatástávolságát az adott nyomanyag légköri tartózkodási ideje határozza meg. A kén- és nitrogénvegyületek esetében ez átlagosan néhány nap hosszúságú, ami azt jelenti, hogy ezek az anyagok a felszíni kibocsátó forrásaiktól több száz kilométeres távolságra is eljuthatnak, mielőtt kihullanak a légkörből. Ebben a felhő- és csapadékképződési folyamatok mellett természetesen a légköri rendezett mozgásoknak is meghatározó szerepük van.

## IRODALOM

- EM-DAT (2016): *The OFDA/CRED International Disaster Database*. Université catholique de Louvain, Brussels, Belgium [www.emdat.be](http://www.emdat.be)
- Geresdi István – Horváth Ákos – Bozó László (2013): A víz szerepe a légköri folyamatokban. *Magyar Tudomány*. 174, 1293–1299. <http://www.matud.iif.hu/2013/11/03.htm>
- Horváth Ákos – Nagy Attila (2012): 2011–2012 rendkívüli aszályai. *Természet Világa*. 143, 544–547. <http://www.termeszetvilaga.hu/szamok/tv2012/tv1212/horvath.html>
- Lakatos Mónika – Bihari Zita – Szentimrey Tamás (2016): Csapadékszélsőségek alakulása. [http://www.met.hu/eghajlat/eghajlatvaltozas/megfigyelt\\_valtozasok/Magyarorszag/](http://www.met.hu/eghajlat/eghajlatvaltozas/megfigyelt_valtozasok/Magyarorszag/)