

Globális és regionális változások, szélsőséges jelenségek a Föld-rendszer vízkörforgalmában

Bozó László

Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, Magyarország
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Magyarország
E-mail: bozo.l@met.hu

Beérkezett: 2022. július 27.; elfogadva: 2022. szeptember 13.

Összefoglalás

Jelen dolgozatban áttekintjük a víz körforgásának legfontosabb összetevőit, áramlási irányait. Bemutatjuk a párolgás és kondenzáció jelentőségét a légkör dinamikai folyamataiban. A jelenkori éghajlatváltozás hatásai meghatározó módon befolyásolják a globális vízkörforgalom valamennyi elemét: emelkedik a tengerek szintje, a légkörben tárolható vízgőz mennyisége, szélsőségesebbé válik a csapadék és az aszály területi és időbeli eloszlása. A csapadékinzultásra vonatkozóan a hazai megfigyelések és számítások eredményeit is bemutatjuk. Felhívjuk a figyelmet a globális hidrometeorológiai monitoring rendszerek fontosságára, valamint a vízrajzi és meteorológiai közszolgáltatások összehangolt szemléletű kezelésének szükségességére. Ez vonatkozik az egyes fizikai változók megfigyelésére, ezek várható tér- és időbeli változásainak előrejelzésére, a klímapolitikák kialakítására – beleértve a kármérséklés és az alkalmazkodás problémaköreit.

Kulcsszavak: Föld-rendszer, vízkörforgalom, éghajlatváltozás, hidrometeorológiai szélsőségek

Global and regional changes, extremes in the Earth System's water cycle

László Bozó

Hungarian Meteorological Service, Budapest, Hungary
Hungarian University of Agriculture and Life Sciences, Hungary

Summary

In this paper, we review the most important components and flow directions of the water cycle. Water is one of the special compounds of the Earth system: it can exist in solid, liquid and gaseous states under the prevailing temperature and pressure conditions on Earth, so it can be found in all terrestrial spheres. It plays a fundamental role in maintaining life, thermodynamic processes on a global scale, and regulating the climate. In the Earth's atmosphere, on average, only every ten-thousandth molecule is water, yet it plays a decisive role in shaping atmospheric energetic and dynamic processes and, in regulating the climate. Through evaporation, condensation, cloud and precipitation formation, and air movements, the atmosphere plays the most important role in the continuous cycle of water between natural water reservoirs. It is typical of the dynamics of atmospheric processes that the average residence time of water molecules in the atmosphere is approx. 10 days, compared to the durations estimated for the ice sheet (12 thousand years) and the oceans and seas (3 thousand years). Water vapor is the most important greenhouse compound in the atmosphere, responsible for approximately 60% of the total atmospheric greenhouse effect. The movement of water vapor is mainly determined by atmospheric circulation processes. The effects of present climate change have a decisive influence on all elements of the global water cycle: the sea level rises, the amount of water vapor that can be stored in the atmosphere increases, the spatial and temporal distribution of precipitation becomes more extreme. The global environmental changes attributable to natural and anthropogenic causes are largely linked to water and the variability of the global water cycle. Natural phenomena on a regional and local scale, which can also be associated with global changes, pose a serious risk to life and property protection in certain situations, can adversely

affect the conditions of agricultural management and damage natural ecosystems. Results of relevant Hungarian measurements are also presented. Floods, droughts and atmospheric storms, which are often accompanied by intense rainfall events, are collectively responsible for a very significant part of natural damage events. We draw attention to the importance of global hydrometeorological monitoring systems, as well as the need for coordinated management of hydrographic and meteorological public services. This applies to the observation of individual physical variables, the prediction of their expected changes in space and time, the development of climate policies - including the issues of mitigation and adaptation.

Keywords: Earth System, water cycle, climate change, hydro-meteorological extremes

1. Bevezetés

A jelenkori, meghatározóan antropogén éghajlatváltozással kapcsolatos természeti katasztrófák mind gyakoribbak és pusztítóbbak, évente több ezer halálos áldozattal és több tízmilliárd eurós anyagi veszteséggel járnak. A szélsőséges hidrometeorológiai események száma és intenzitása emelkedő tendenciát mutat, és valószínűleg még jelentősebb következményekkel jár majd a jövőben. A szélsőségek változása jellemzően nagyobb és kártékonyabb hatást fejt ki, mint az átlagértékek változása. Többek között emelkedik a hőség- és forró napok száma; a hóhullámok gyakorisága és intenzitása; a csapadék intenzitása (ami jelentős árvizekhez, földcsuszamlásokhoz és talajdegradációhoz vezethet); az aszályok gyakorisága és tartóssága; az átlagos tengerszint. Az éghajlatváltozással összefüggő szélsőséges hidrometeorológiai helyzetek gyakoriságának növekedése súlyos társadalmi konfliktusok kialakulásához és fennmaradásához is hozzájárul: különösen káros hatással lehet a földhasználatra, az élelmiszer-termelésre és -biztonságra, valamint a tiszta ivóvíz elérhetőségére és minőségére.

2. A víz körforgása a természetben

A víz a Föld-rendszer egyik különleges vegyülete: szilárd, folyékony és légnemű halmazállapotban egyaránt előfordulhat a Földön uralkodó hőmérsékleti és nyomásviszonyok között, így valamennyi földi szférában megtalálható. Alapvető szerepet játszik az élet fenntartásában, a globális léptékű termodinamikai folyamatok, valamint az éghajlat szabályozásában.

Az egyes földi szférák víztároló kapacitásai között jelentős különbségeket tapasztalhatunk. Az óceánokban és a tengerekben 1400 millió km^3 víz halmozódik fel, a jég-takarók és a gleccserek mintegy 29 millió km^3 , a felszín alatti vizek pedig 15 millió km^3 víztérfogatot képviselnek. Ezekkel összehasonlítva a légkörben található víz mennyisége szinte elhanyagolható: a számítások szerint ennek átlagos értéke nem haladja meg a 13 ezer km^3 -t, ami a teljes légköri tömeg mindössze 2,5 ezreléke (*Trenberth et al. 2007*). A felszíni jég-takarók és gleccserek elolvadása esetén hozzávetőleg 80 méterrel emelkedne a világóceánok szintje. A légkörben található vízgőz kondenzált formában, folyékony halmazállapotban a Föld felszínén egyenletesen szétterülve 26 mm magasságú víztakarót eredményezne.

Az óceánokból a kontinensek fölé mintegy 40 ezer km^3 víz áramlik évente, ezt lényegében kiegyenlíti a szárazföldi vízfolyások óceánok felé tartó éves hozama. A légkörből évente mintegy 480 ezer km^3 csapadék hullik ki az óceánokra, a tengerekre és a szárazföldekre. Ennek nemcsak tér- és időbeli eloszlása, hanem földrajzi eredete is jelentős változékonyságot mutat. A Csendes-óceán esetében a párolgás-kondenzáció-csapadék ciklus döntő mértékben az óceán felett játszódik le, viszonylag kicsi a kontinensek és az óceán közötti nettó vízáram. Az Atlanti-óceán és az Indiai-óceán esetében ezzel szemben szignifikáns a kontinensek és az óceánok közötti víz-áramlás. Észak- és Dél-Amerika, Európa és Afrika víz-áramlásainak meghatározó része az Atlanti-óceánból származik, majd az itteni felszíni és felszín alatti vízfolyások is ide térnek vissza. Az óceánok és a kontinensek közötti víz-áramok közel kétharmada az Atlanti-óceánhoz, mintegy egyharmada pedig az Indiai-óceánhoz köthet (*Bengtsson 2010*).

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 fellemegetett felszín által kibocsátott hosszúhullámú sugárzás energiamérlege pozitív. Ezzel szemben magasabb földrajzi szélességeken, a pólusok körüli területeken a rövidhullámú besugárzás és a hosszúhullámú kisugárzás különbsége negatív. A két terület között kialakuló belső-energia-különbség egy része kinetikus energiává alakul, majd a kialakuló légmozgásokra ráakadik 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 kondenzáció 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–Horváth–Bozó 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 állapotváltozók, hanem a globális földi cirkuláció körülményei szabályozzák.

A Föld légkörében átlagosan csak minden tízezeredik molekula víz, mégis meghatározó szerepet játszik a légköri energetikai és dinamikai folyamatok alakításában, az éghajlat szabályozásában. 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 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 vízgőz a legjelentősebb üvegházhatású vegyület a légkörben, hozzávetőleg a teljes légköri üvegházhatás 60%-áért felelős. A vízgőz mozgását döntően a légköri cirkulációs folyamatok határozzák meg. Ha képzeletben nyomon követnénk egy vízmolekula útvonalát a légkörben, azt tapasztalnánk, hogy viszonylag rövid tartózkodási ideje ellenére, az összetett vertikális és horizontális mozgások során számos kondenzációs és párolgási szakaszon megy keresztül. A vízgőz az úgynevezett erősen változó gázok közé tartozik, átlagos koncentrációja a légkörben körülbelül harmada–negyede a szén-dioxidnak. A kondenzációs és csapadékképződési folyamatoknak köszönhetően azonban közel négy nagyságrenddel gyorsabban cserélődik ki a légkör víztartalma, mint annak szén-dioxid-tartalma. A gyors kicserélődés miatt a vízgőz nem képes egyenletesen elkeveredni a légkörben, a légnedvesség jelentős tér- és időbeli változékonyságot mutat. Általában a felszín közelében a legnagyobb a vízgőz koncentrációja, itt átlagosan néhány gramm található 1 m^3 -nyi levegőben. A magassággal gyorsan csökken az egységnyi térfogatban lévő vízgőz mennyisége, például 8 km magasan már csak néhány tized grammnyi vízgőzt tartalmaz 1 m^3 -nyi levegő.

A vízgőz légköri mennyiségét a meteorológiai szolgálatok felszíni, rádiószondás és műholdas módszerekkel széleskörűen mérik. Ezzel szemben a csapadék mennyiségének és intenzitásának megfigyelése sokkal több problémába ütközik, elsősorban az óceánok felszínén, ahol csak a mozgó hajók biztosítanak mérési platformot. A hiányok pótlására közelítő módszereket alkalmaznak, melynek során a felszíni *in situ* méréseket és a műholdas megfigyeléseket is felhasználják.

3. Globális változások a vízkörforgalomban

A természetes és antropogén okokra visszavezethető globális környezeti változások jelentős részben a vízhez, a víz globális körforgalmának változékonyságához köthetők. A globális változásokkal is kapcsolatba hozható regionális és lokális léptékű természeti jelenségek bizonyos helyzetekben súlyos élet- és vagyoni védelmi kockázatot jelentenek, hátrányosan érinthetik az agrárgazdálkodás feltételeit, és károsíthatják a természetes ökoszisztémákat. Az árvizek, az aszályok és a gyakran intenzív csapadékeseményekkel is kísért légköri viharok együttesen a természeti káresemények igen jelentős részéért felelősek.

A vízkészletek stratégiai szerepe világszerte felértékelődött, ezért elengedhetetlenül fontos a vízrajzi és meteorológiai közszolgáltatások összehangolt 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 nemzetközi tudományos hálózat kiépítése kiemelt jelentőségű ezen a teljes földi térskálát felölelő szakterületen, beleértve a nemzetközi tudásközpontokat, amelyek például a determinisztikus és valószínűségi modelleken alapuló globális skálájú rövid és középtávú időjárás-előrejelzés, vagy a műholdak által gyűjtött légkörtudományi vonatkozású információk feldolgozása területén, a mindennapi életünkhöz, valamint az élet- és vagyoni védelmi célú tájékoztatáshoz és riasztáshoz nélkülözhetetlen szolgáltatásokat nyújtanak.

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 globális átlagban melegedő légkör a termodinamika törvényszerűségei szerint exponenciálisan növekvő mennyiségű vízgőzt képes magában tartani. Becslések szerint 1 °C-os légkörihőmérséklet-emelkedés 6-7%-kal növeli meg a légkör vízgőztartalmát (Bengtsson 2010), ami a látens hőforgalmon keresztül hatással van a légkör dinamikai folyamataira is. Ezek a változások a víz teljes globális ciklusára kihatnak. Bár a párolgás és a csapadék mennyisége csak 1-2%-ot változik, területi és időbeli eloszlása mind szélsőségesebbé válik. Általánosságban azt mondhatjuk, hogy a korábban is jó vízellátottságú területek egyre nedvesebbé, a vízhiányos területek pedig egyre szárazabbá válnak (Held–Soden 2006). A trópusi övezetben, Amerika és Európa északi részein növekszik, míg a mediterrán régióban, Afrika és Ausztrália déli vidékein csökken az évi átlagos csapadékösszeg. A közepes földrajzi szélességeken nem tapasztalható az éves csapadékösszegek szignifikáns változása, az eloszlás szélsőségei azonban növekednek.

A tengerszint emelkedése az utolsó glaciális maximumot (kb. 21 ezer évvel ezelőtt) követően indult el. Az emelkedés üteme nem volt egyenletes, összesen mintegy 120 méteres szintemelkedés történt ebben az időszakban. Az utolsó nyolcezer évben az emelkedés lelassult, majd a legutolsó mintegy kétezer évben a vízmagasság stabilizálódott. A huszadik század elejétől kezdve – nagy valószínűséggel antropogén okokkal magyarázhatóan – egyre gyorsuló mértékben tapasztalhatjuk a szintemelkedést, melynek átlagos mértéke az elmúlt évtizedben 3,6 mm év⁻¹ volt. Az emelkedést nagyjából fele-fele arányban a jégtakarók és a gleccserek olvadása, illetve az óceánok felmelegedése következtében létrejövő hőtágulás okozza. A folyamatosan emelkedő vízszint nemcsak a tengerszint közvetlen közelében elhelyezkedő lakott területeken, hanem az ökoszisztémákban és a mezőgazdasági művelés alatt álló területeken is visszafordíthatatlan károkat okozhat.

A permafroszt kiterjedésének csökkenése szintén meggyőzően mutatja az átlaghőmérséklet emelkedését. A permafroszt fogalmát olyan talajra használjuk, mely legalább két éven keresztül fagyott állapotban van. A jelentős mennyiségű állati és növényi maradványokat is tartalmazó permafroszt mélysége változó, a legvastagabb réteg elérheti az 500 métert is. Elsősorban a sarkvidékek környékén, az északi régiókban – így többek közt Oroszországban, Kanadában, Alaszkában –, illetve magashegységekben fordul elő, például a Himalája hegyei között elterülő Tibeti-fennsík. A jelenség az üvegházhatást tovább erősíti (pozitív visszacsatolás), hiszen jelentős mennyiségű metán és szén-dioxid szabadul fel az olvadás

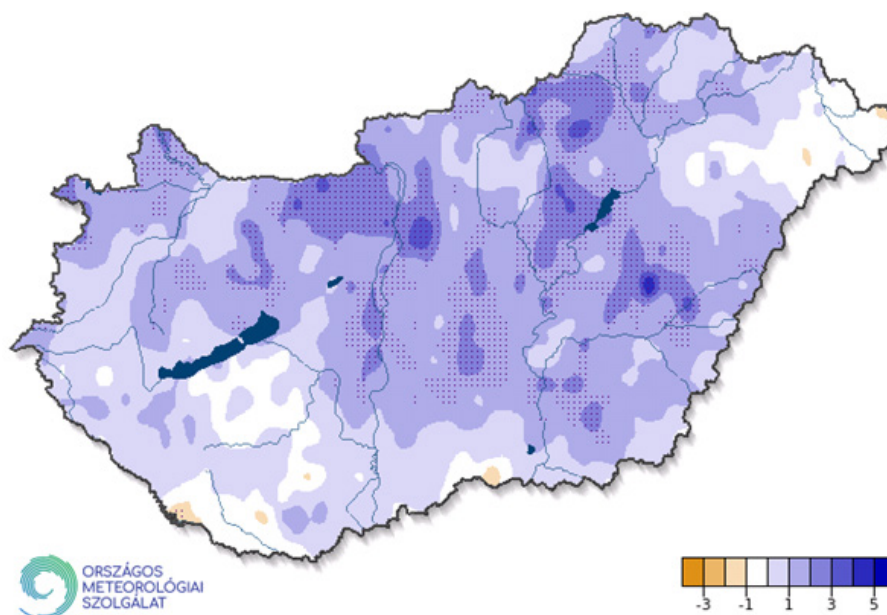
és a szerves anyagok bomlási folyamatainak felgyorsulása során. Az állandó fagyhatár emelkedése az ázsiai magashegységekben csökkenti az itt tárolt természetes jégtömeget, ami egyúttal a hozzáférhető ivóvízbázis szűkülésével is együtt jár. Ez kritikus helyzetet eredményezhet a térségben, hiszen közvetlenül vagy közvetve több milliárd ember ivóvizét biztosítják ezek a források.

A csapadék egyre szélsőségesebb megjelenése azt is eredményezi, hogy az aszályosság szempontjából sérülékenyebb területek talajtakarója folyamatosan veszít nedvességtartalmából, és termőképességét elveszítve sivatagossá válhat. Ez a veszély ma már számos európai régiót is fenyeget. Magyarországon a Duna–Tisza közti Homokhátságot említhetjük példaként, ahol a talajvízszint folyamatos süllyedése mellett a negatív talajtani és ökológiai változások is megfigyelhetők. A talaj és a növényzet szárazodásától nem független jelenség az erdőtüzek kiterjedésének és intenzitásának növekedése. Európában korábban csak a dél-európai országokban jelentett problémát, de ma már a kontinens középső, sőt északi területein is rendszeres előfordulására kell felkészülnünk. Észak-Amerikában és Ausztráliában térben és időben is egyre kiterjedtebbek lettek az erdőtüzek, amelyek a teljes erdei ökoszisztéma működését is felborítják.

4. A hidrometeorológiai jelenségek változásai Magyarországon

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 hullámzó légköri frontok adják. A hidegfrontok térségünket éppen csak elérő déli ága legtöbbször csak a szél északi irányúra 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 szélökéseket okoz. Gyakorisága és pusztító hatása nem éri el a hurrikánokét, hiszen



1. ábra | A nyári átlagos napi csapadékinzítás (átlagos csapadékoság) változása az 1981–2020 közötti időszakban. A szignifikáns változást (90%-os megbízhatóság) fekete pontok jelölik. Forrás: OMSZ.

a kialakulás és fennmaradás geográfiai feltételei, valamint a tengervíz mélysége és termodinamikai jellemzői különbözőek. A Földközi-tenger mint zárt beltenger még a mérsékelt övi ciklonok aktív támogatása esetén sem képes megfelelő mennyiségű konvektív energiát biztosítani, így a medikánok megmaradnak a Földközi-tenger sajátos légörvényeinek.

Az átlagosnál bőségesebb csapadékkal vagy tartós szárazsággal járó események, periódusok előfordulási gyakoriságát néhány csapadékindex idősorával jellemezhetjük. Kevesebb a csapadékos nap országos átlagban, ahogy a jelenhez közelítünk. A 20 mm-t meghaladó csapadéku napok növekedést mutatnak, s a száraz időszakok hossza (vagyis a leghosszabb időszak, amikor a napi csapadék nem éri el az 1 mm-t) is nőtt a XX. század eleje óta. A napi intenzitás, más néven átlagos napi csapadékoság (egy adott periódusban lehullott összeg és a csapadékos napok számának hányadosa) nyáron szintén megnövekedett (1. ábra). Az átlagos napi csapadék növekedése arra utal, hogy a csapadék egyre inkább rövid ideig tartó, intenzív záporok, zivatarok során hullik. Az elfolyás miatt ennek hasznosulása a talajban kevésbé hatékony, mint a gyakoribb, de kisebb intenzitású csapadékoké, ráadásul a talajeróziós folyamatokat is erősíti.

Rövidebb időszak – az 1981 és 2020 közötti évek – változásait vizsgálva megállapítható, hogy a 20 mm fölötti csapadéku napok száma szignifikáns, 2 napos emelkedést jelez. A csapadékos napok száma nőtt 1981 és 2020 között, rövidülni látszanak a leghosszabb száraz időszakok, emelkedő a nyári csapadékinzítás, de ezek a változások statisztikailag nem szignifikánsak (Lakatos et al. 2021).

5. Összefoglalás

A globális felmelegedés és az ehhez kapcsolható szélsőséges hidrometeorológiai események tudományos bizonyítékainak feltárása helyi, regionális és globális léptékű földfelszíni és távérzékelési megfigyelések alkalmazásával történhetett meg. A különböző intenzitású és léptékű pozitív és negatív visszacsatolási folyamatok megértését, valamint a jövőre vonatkozó szcenáriók kidolgozását éghajlatdinamikai modellek segítik. Mindezek nélkülözhetetlenek a kármérséklési beavatkozások, és a társadalom éghajlatváltozáshoz történő alkalmazkodási lehetőségeinek megtervezéséhez.

Irodalomjegyzék

- Bengtsson, L. (2010) The global atmospheric water cycle. *Environmental Research Letters*, Vol. 5. No. 2. 025202.
- Geresdi I., Horváth Á. & Bozó L. (2013) A víz szerepe a légköri folyamatokban. *Magyar Tudomány*, Vol. 174, pp. 1293–1299.
- Held, I. M. & Soden, B. J. (2006) Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of Climate*, Vol. 19. pp. 5686–5699.
- Horváth Á. & Nagy A. (2012) 2011–2012 rendkívüli aszályai. *Természet Világa*, Vol. 143. pp. 544–547.
- Lakatos M., Bihari Z., Izsák B., Marton A. & Szentés O. (2021) Megfigyelt éghajlati változások Magyarországon. *Léggör*, Vol. 66. pp. 5–11.
- Trenberth, K. E., Smith, L., Qian, T., Dai, A. & Fasullo, J. T. (2007) Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 8. pp. 758–769.