

## AZ ANTROPOGÉN ÉGHAJLATVÁLTOZÁS HATÁSAINAK BECSLÉSE ÉS ELEMZÉSE A RÁCKEVEI (SOROKSÁRI)-DUNÁN

CZIRA TAMÁS – FEJES LILIAN – INCZE DÓRA

ESTIMATION AND ANALYSIS OF THE IMPACTS OF ANTHROPOGENIC CLIMATE  
CHANGE ON THE RÁCKEVE (SOROKSÁRI) DANUBE IN HUNGARY

### Abstract

Anthropogenic climate change in Hungary is already having direct and indirect effect on surface and near-surface waters by increasing the length of summer heat waves and dry periods, and by changing the amount and distribution of precipitation within the year. The Ráckeve (Soroksár) Danube branch (RSD) and its surrounding area are extremely exposed to the climatic conditions. Therefore, it is essential to determine the tendency of the changes, as well as to understand the complexity of the problems arising as a result of the effects of climate change. Our analyses confirm that climate change can be detected in the area of the RSD in recent decades. The results of climate model simulations show that the climate vulnerability of the region may continue to increase in the future without any appropriate interventions. Climate models are the most important tool to examine future changes; they provide indispensable help in mitigating the negative effects of climate change and in developing environmental and economic strategies. Based on our examination of the extreme weather events of RSD, the escalation of the impact processes can be expected in the future. In order to quantify the climatic effects on ecologically important organisms, as well as on the quality of the water, climate indicators were produced. They provide information on the current and future climate conditions of the area of the RSD, as well as on meteorological variables, which affect the state of RSD. In order to identify the hydrological processes affecting the RSD, climate analyses were also performed for the study area including a part of the Danube catchment. Based on the determined impacts, we made suggestions for the implementation of the most important interventions.

**Keywords:** climate change, climate impact assessment, water management

### Bevezetés

A Ráckevei (Soroksári)-Duna-ág (továbbiakban RSD) földrajzi fekvéséből adódóan kiemelt szerepet tölt be a fővárosban és a Budapest környéki agglomeráció déli térségében. Az RSD mint környezeti, ökológiai rendszer és egyedi tájértékekkel is bíró kultúrtaurisztikai vonzerőként is komoly társadalmi és gazdasági funkciókkal rendelkezik, horgászati és egyéb vízi szabadidős tevékenységeket magába foglaló adottságai révén kiemelten a vízi és az üdülturizmus számára.

Mivel a teljes vízfelület Natura 2000 védelemmel rendelkezik, ezért kiemelt szempontként jelentkezik az RSD aktív természetvédelme, főként a vízi élővilág – a védett madárállományok, a környező galériaerdők, a nádas-sásos társulások – magas szintű védelme. A terület kiemelkedő természeti értéke a Dunavarsány, Szigetcsép, Szigetszentmiklós és Taksony térségében húzódó, összesen 700 ha kiterjedésű, több területen is foltszerűen megjelenő úszóláp, amely Európában a második legnagyobb a maga nemében.

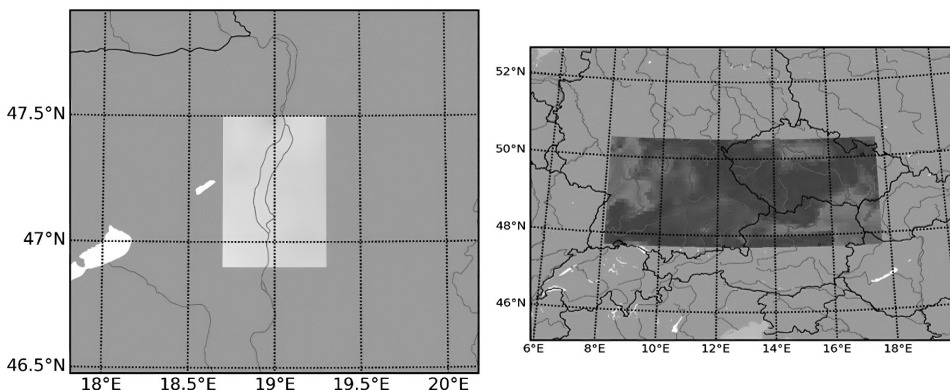
A főváros környéki vízi ökoszisztémaként és állandóan lakott térségként ugyanakkor egy igen sérülékeny rendszerről van szó, amelynek állapota erősen függ az a lakó- és üdülőövezetek kibocsátásaitól, a mezőgazdasági tevékenységektől, az esetleges havária jellegű szennyezésektől, a befolyó vizek minőségétől, de a Duna mennyiségi és minőségi viszonyaitól is.

Az RSD a magyar Duna-szakasz második legnagyobb mellékága, ami a főággal együtt a Csepel-szigetet öleli körül. A majdnem 58 km hosszú ág 1800 km<sup>2</sup>-es vízgyűjtő területtel rendelkezik, vízfelülete 14 km<sup>2</sup>, átlagos víztérfogata pedig 40 millió m<sup>3</sup>. Vízszintje a szakasz felső végén a Kvassay-, alsó végén a Tassi-zsilippel szabályozható. A mellékág felső szakaszán a legsekélyebb és legkeskenyebb, ezért itt mérhető a legnagyobb víz-áramlási sebességek. Az RSD átlagos vízsebessége csupán 0,2-0,4 km/óra, amelynél a dunai főág áramlási sebessége lényegesen magasabb, ennek következtében az RSD-ben rakódik le a Dunából érkező hordalék jelentős része, és értelemszerűen így itt a legnagyobb a szennyezettség is.

Az élővilág állapotát meghatározó vízminőséget alapvetően és elsősorban a beérkező eltérő mértékű szennyvízterhelések határozzák meg (VADADI-FÜLÖP Cs. – MÉSZÁROS G. 2007). További probléma, hogy a mellékágon a szabályozástól kezdve megindult egy rendkívül gyors ütemű eutrofizációs folyamat, mivel a szabályozás miatt a víz cserélődése a nyári időszakban 1,5-2,5 hétre tehető, míg a téli időszakban akár 3-5 hét is lehet, amivel párhuzamosan csökken a víz öntisztuló képessége is (BERINKEY L. – FARKAS H. 1956).

### A klimatológiai hatásvizsgálati módszerek és elemzési kritériumok

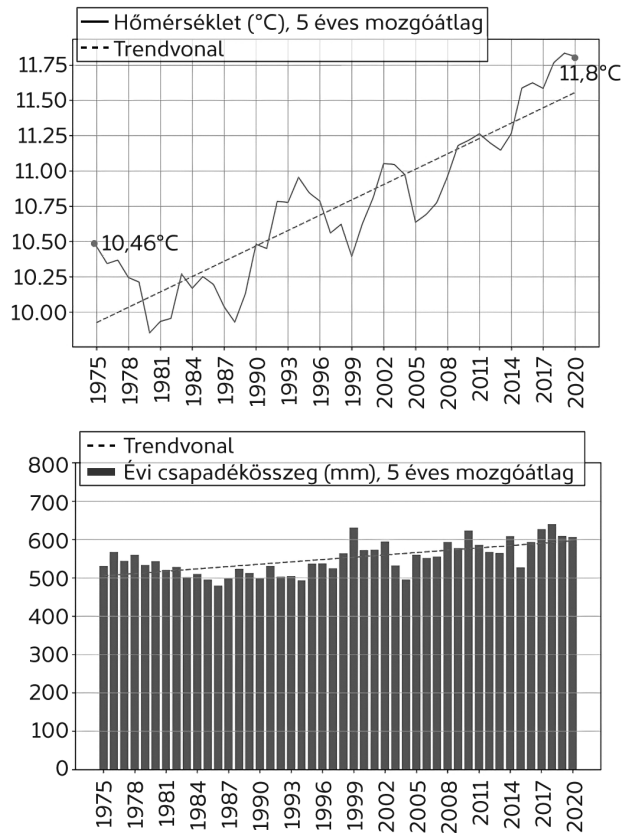
Az éghajlatváltozás hatásainak elemzése céljából olyan hatásvizsgálati módszert dolgoztunk ki, amely alkalmas a napenergia-termelő rendszerek vizsgálatára is, de akár a zöldkék infrastruktúra elemzéséhez is megfelelő eszközzel szolgál. Jelen tanulmányunk célkitűzése, hogy feltárjuk, az antropogén tényezők mellett milyen éghajlati jellegzetességek befolyásolják az RSD térségében található állat- és növényvilág életkörülményeit, illetve a mellékág vízállását és vízminőségét. Elsősorban a szélsőséges hőmérsékleti és csapadékesemények vizsgálatára helyeztük a hangsúlyt, mivel ezek előfordulási gyakorisága és intenzitása az IPCC Hatodik Értékelő Jelentése (MASSON-DELMOTTE, V. et al. 2021) alapján nagyfokú megbízhatósággal, azaz 90-100%-os bekövetkezési valószínűséggel növekedni fog a térségben. Az RSD közvetlen környezete mellett figyelembe vettük még a Duna vízgyűjtőjének a forrástól egészen a magyarországi szakaszig terjedő területét is (1. ábra). Munkánk során vizsgáltuk a kiválasztott területekre vonatkozó múltbéli és jelenlegi éghajlati viszonyokat, valamint a jövőben várható változásokat.



1. ábra Az RSD-t (bal) és a Duna vízgyűjtőjét (jobb) lefedő klimatológiai vizsgálati terület  
Figure 1 Climatological study area covering the RSD (left) and the Danube catchment (right)

Egy magyarországi térség esetében a múltbeli és az aktuális éghajlati állapotról referencia-adatbázisok felhasználásával kaphatunk átfogó képet. Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) – az Európai Unió irányelveknek megfelelően és Magyarország Kormánya által biztosított források segítségével – 2021. január 1-jétől megvalósította a nyílt meteorológiai adatpolitikát (353/2021. (VI. 24.) Korm. rendelet). A szolgálat a nyílt adatszerverein keresztül, a Meteorológiai Adattárban térítésmentesen és szabadon felhasználhatóan rendelkezésre bocsátja a mérési és a megfigyelési adatait. Tanulmányunkban a Meteorológiai Adattárban elérhető éghajlati adatok közül a napi átlag-, maximum- és minimumhőmérsékletet, valamint a napi csapadékösszeget és a napi átlagos szélesebséget használtuk fel. Az adatbázis homogenizált, 0,1°-os térbeli felbontású rácspontra interpolált éghajlati adatsorokat tartalmaz, amelyek az OMSZ mérőállomásainak adataiból származtatva készültek el. A teljes idősorok 50 éves időszakot fednek le, amelyekből további két egymástól elkülönülő 20 éves időszakot (1981–2000, 2001–2020) választottunk ki az éghajlatváltozás jelenlegi hatásainak értékelése végett.

Elemzéseink alapján az RSD térségében egy jelentősen emelkedő hőmérsékleti tendencia figyelhető meg 5 éves periódusú mozgóátlagok alapján (2. ábra). Az elmúlt 50 évre vonatkozó éves átlaghőmérséklet (fenti ábra) a vizsgált térségben 9,8°C és



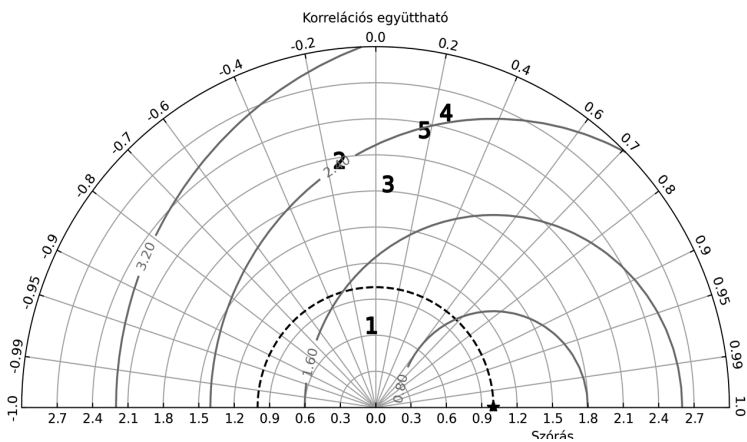
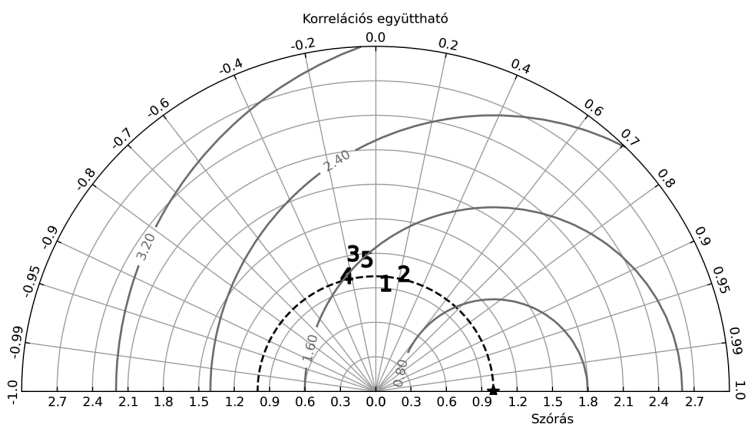
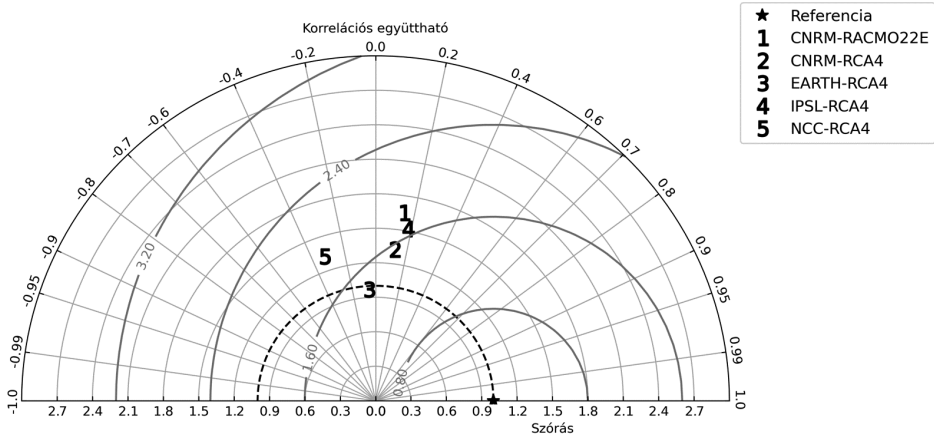
2. ábra Az éves átlaghőmérsékletre (fent) és csapadékmennyiségre (lent) vonatkoztatott (5 éves periódusú) mozgóátlagok 1971–2020 között. A tendenciák irányát és mértékét trendvonalak illesztésével szemléltettük.  
 Figure 2 Moving averages (5-year period) for annual mean temperature (top) and precipitation (down) from 1971 to 2020. The direction and magnitude of the trends are illustrated by fitting trend lines.

11,8°C között változott. Az éghajlat változékonyságát mutatja, hogy az egymást követő ötéves periódusok nem mutatnak minden esetben folyamatos hőmérsékleti emelkedést. Az átlaghőmérsékleti értékek évszakos anomáliái alapján megállapítható, hogy télen volt eddig a legkisebb mértékű változás (+0,5°C), míg nyáron 1,8°C körüli a már bekövetkezett melegedés mértéke. A vizsgált térség értékeinek térbeli eloszlásában minimális (0,1°C) eltérés volt kimutatható. Az éves csapadékmennyiségre vonatkozó értékekben (lenti ábra) több szárazabb időszak is megjelenik, azonban az elmúlt 50 év emelkedő tendenciával jellemezhető. A csapadékösszegekre kapott anomáliák alapján a téli csapadékmennyiség esetében kismértékű emelkedés volt megfigyelhető, míg tavasszal egyre hosszabban és gyakrabban jelentkeztek aszályos időszakok. A nyári csapadékmennyiség növekedésének háttérben elsősorban a hőmérséklet-emelkedésből eredő intenzívebb zivatartermékenység áll. Ezekre a folyamatokra érdemes nagyobb figyelmet fordítani, mivel az éghajlati szélsőségek (forró napok, extrém csapadékesemények) esetében már most is tapasztalhatók komoly kockázatot jelentő változások.

Az éghajlat jövőben várható változásainak számszerűsítését a 12,5 km-es felbontású regionális klímamodellek eredményeire alapozva végeztük el. A finomabb felbontású adatok felhasználásának köszönhetően pontosabb becslést tudunk adni a szélsőséges időjárási események előfordulási gyakoriságára és intenzitására. A regionális klímamodellek eredményeinek keretrendszerbe foglalása végett jött létre a CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) kezdeményezése, amely a regionális éghajlatváltozás vizsgálatát és az azzal kapcsolatos regionális klímaszimulációk megvalósítását koordinálja világszerte. Az így felépített adatbázisból a 14 régió közül az európai régiót lefedő EURO-CORDEX (JACOB, D. et al. 2014) adatbázisában netCDF formátumban elérhető klímaszimulációkkal dolgoztunk.

Az éghajlatváltozásból eredő lehetséges problémák (DUNKEL Z. et al. 2018) feltáráshoz elsősorban a szélsőséges események azonosítására helyeztük a hangsúlyt. Ennek érdekében az adatbázisban elérhető összes lehetséges 75 modellkombináció közül azokat választottuk ki, amelyek a hidrológiai és ökológiai céloknak megfelelően a legszélsőségebb értékeket biztosító adatsorokat tartalmazták. Mivel vizsgálatainkat a két legfontosabb meteorológiai paraméterre – a hőmérsékletre és a csapadékra – alapoztuk, a kiválasztási folyamat során fennmaradó öt modellpárból a végleges két modellkombinációt elsősorban ezen változók múltra és jövőre vonatkozó értékei alapján választottuk ki. A kiválasztási folyamatban fontos szempont volt még a napi felbontás, valamint más – a vizsgálat szempontjából releváns – meteorológiai paraméterek (pl. relatív nedvesség, globálsugárzás, napsütéses órák száma, felszíni szélsébség) elérhetősége is. Végeredményben a CNRM-CM5 globális és RACMO22E regionális (továbbiakban: CNRM-RACMO22E), valamint az IPSL globális és RCA4 regionális (továbbiakban: IPSL-RCA4) modellkombinációk bizonyultak vizsgálat szempontjából a legmegfelelőbbnek.

Az elemzéseink során az RSD területére vett átlagokból képezett idősorokat hasonlítottuk össze mind az 1971–2005 közötti, mind pedig a 2006–2100 közötti időszak adataival. Előbbi esetében a mérési adatbázisból származó idősorokat is figyelembe tudtuk venni referenciaként. Az idősorok összehasonlítása mellett Taylor-diagram segítségével is vizsgáltuk a szimulációkat (3. ábra), amivel a három alapstatisztikai számítás (korreláció, átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke [RMSE], szórás) szerint validáltuk a modellek eredményeit. A Taylor-diagram alapján az a modellkombináció teljesített a legjobban, amelyiknek a hozzátartozó száma a legközelebb került a referenciához (az ábrán fekete csillaggal jelölve), azaz a mért adatokhoz. A projekt céljait szem előtt tartva igyekeztünk olyan modellkombinációkat is figyelembe venni, amelyekkel a szélsőségek jobban vizsgálhatók. A modellkombinációk között szignifikáns különbség nem mindig mutatkozott



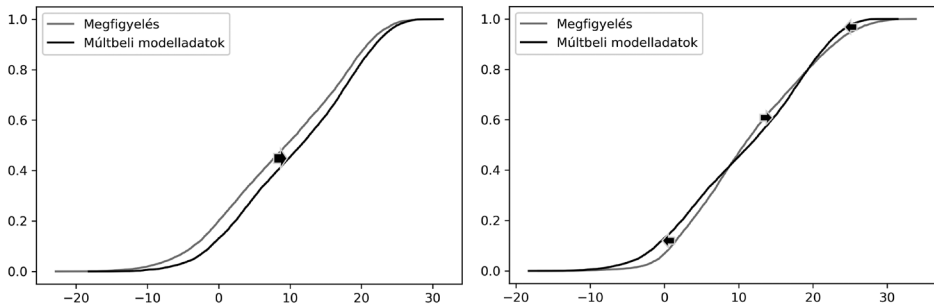
3. ábra Taylor diagram az átlaghőmérsékletre (fent), a csapadékmennyiségre (középen) és a 26°C-os átlaghőmérsékletet meghaladó napok számára (lent) vonatkozóan  
 Figure 3 Taylor diagram for average temperature (top), precipitation (middle) and number of days with average temperatures above 26°C (bottom)

meg (például a csapadékösszegek – középső ábra – esetén). A 26°C-os átlaghőmérsékletet meghaladó napok számának (lenti ábra) vizsgálatkor azonban azt kaptuk eredményül, hogy a CNRM-RACMO22E (1-es számmal jelölve) lényegesen jobb becslést adott a referencia-időszakra vonatkozóan, mint a többi modellkombináció. Ezzel szemben például az IPSL-RCA4 (4-es számmal jelölve) jelentősen felülbecsülte az átlaghőmérsékletet (fenti ábra) és a 26°C-os átlaghőmérsékletet meghaladó napok számát is, aminek kiemelt szerepe van a szélsőségekhez kapcsolódó indikátorok meghatározásakor.

A 2006–2100 közötti időszak vizsgálatában meghatározó szerepe volt az IPCC Ötödik Értékelő Jelentésében (PACHAURI, R. K. – MEYER, L. A. 2014) definiált ún. RCP (Representative Concentration Pathways) forgatókönyvek alkalmazásának, mivel a klíma-modellek jövőre vonatkozó RCP forgatókönyvekkel történő futtatásai 2006-tól indulnak és az évszázad végéig tartanak. Annak érdekében, hogy a sugárzási kényszer megváltozásának és az üvegházhatású gázok lehetséges jövőbeli koncentrációinak függvényében több lehetséges alternatíva szerint tudjuk értelmezni az éghajlatváltozás várható hatásait, végül két forgatókönyv – a közepesen optimista RCP4.5 és a pesszimista RCP8.5 – használatával kapott eredményekre alapoztuk elemzéseinket. A kiválasztott RCP forgatókönyvekkel meghajtott szimulációk alapján meghatároztuk az éves átlaghőmérsékletekre és a 26°C-os átlaghőmérsékletet meghaladó napok évi számára vonatkoztatott jövőbeli (2006–2100) értékeket. Az eredmények alapján a jövőben tovább folytatódik a melegedő tendencia. Az átlaghőmérséklet és a forró napok esetében is az IPSL-RCA4 szimulációi vetítették előre a magasabb értékeket, a CNRM-RACMO22E pedig a többi modellhez képest alulbecsülte ezek jövőben várható értékét. A szélsőséges eseményeket leíró indikátorok meghatározásához ennél fogva mindkét modellkombináció figyelembevétele célravezető.

A modellezett eredmények bizonyos mértékben szisztematikus hibával terheltek, emiatt a klíma-modellek csak korlátozott mértékben képesek meghatározni a meteorológiai paraméterek jövőben várható értékeit. Ennek következtében szükséges ún. hibakorrekciós eljárásokat alkalmazni. A hiba akkor becsülhető igazán jól, ha rendelkezésre áll egy mérési adatokat tartalmazó adatbázis (esetünkben a Meteorológiai Adattár). Számos hibakorrekciós eljárást dolgoztak ki, azonban az egyes módszerek különböző esetekben eltérő hatékonysággal alkalmazhatók. A szélsőséges események vizsgálatához elsősorban a „quantile mapping” (QM) módszert javasolja a szakirodalom (THEMESSL, M. J. et al. 2011; BAI, K. et al. 2016). Az alkalmazott módszer azon a feltételezésen alapul, hogy két adatsort akkor tekinthetünk hasonlóknak, ha az eloszlásuk közel van egymáshoz (és minél közelebb vannak egymáshoz, annál hasonlóbbak) (PONGRÁCZ R. et al. 2014). Ez alapján a módszer a referencia-időszakra kapott modellértékek és megfigyelési értékek eloszlása közötti eltérésekkel korrigálja a szimulált nyers értékekhez tartozó eloszlást. Ennek köszönhetően a modelledmények és a megfigyelések között jelentkező eltérések esetén figyelembe vesszük a változékonyságot is. A 4. ábra a megfigyelések (szürke), valamint a CNRM-RACMO22E (bal ábra) és az IPSL-RCA4 (jobb ábra) modellkombinációk (fekete) referencia időszakra vonatkoztatott hőmérsékleti eloszlásainak összehasonlítását segíti. Az ábra szemlélteti – ahogy már a modellkombinációk kiválasztási folyamatában is megállapítottuk –, hogy a CNRM-RACMO22E az 1981–2010 közötti időszakra inkább alacsonyabb hőmérsékleti értékeket adott eredményül, mint amit a mért értékek mutattak. Az IPSL-RCA4 modellkombináció ezzel szemben többnyire felülbecsülte a megfigyelési értékeket. A QM hibakorrekciós eljárás alkalmazását követően a 2031–2060, valamint a 2071–2100 közötti időszakokra a hőmérséklet és a csapadék esetén is a nyers szimulált adatokra többnyire szélsőségesebb értékeket kaptunk. Az extrém eseményekre való tekintettel ez kiemelt jelentőségű, hiszen célunk az RSD szempontjából releváns, jövőben előforduló lehető legszélsőségesebb értékek meghatározása volt.





4. ábra Hőmérsékleti eloszlások a megfigyelésekre (szürke), valamint a kiválasztott két (CNRM-RACMO22E [bal] és IPSL-RCA4 [jobb]) modellkombinációra (fekete) vonatkoztatva az 1981–2010 közötti referencia időszakot tekintve.

A fekete nyilak az eloszlások korrigálásának irányát szemléltetik.

Figure 4 Temperature distributions for the observations (grey) and for the two selected model combinations (CNRM-RACMO22E [left] and IPSL-RCA4 [right], black) for the reference period 1981–2010.

The black arrows indicate the direction of the bias correction of the distributions.

A klímaindikátorok várható változásainak számszerűsítése érdekében két 30 éves jövőbeli klímaablak (2031–2060, 2071–2100) átlagai és a referencia-időszak (1981–2010) átlaga közti eltéréseket határoztuk meg. A klimatológiai viszonylatban hosszabb, 30 éves időszakokkal az éghajlat természetes változékonyságát szűrtük ki (JUNK, J. et al. 2019). A feldolgozási és számítási folyamatokhoz a Python programozási nyelvet (VAN ROSSUM, G.–DRAKE, F. L. 2009) használtuk.

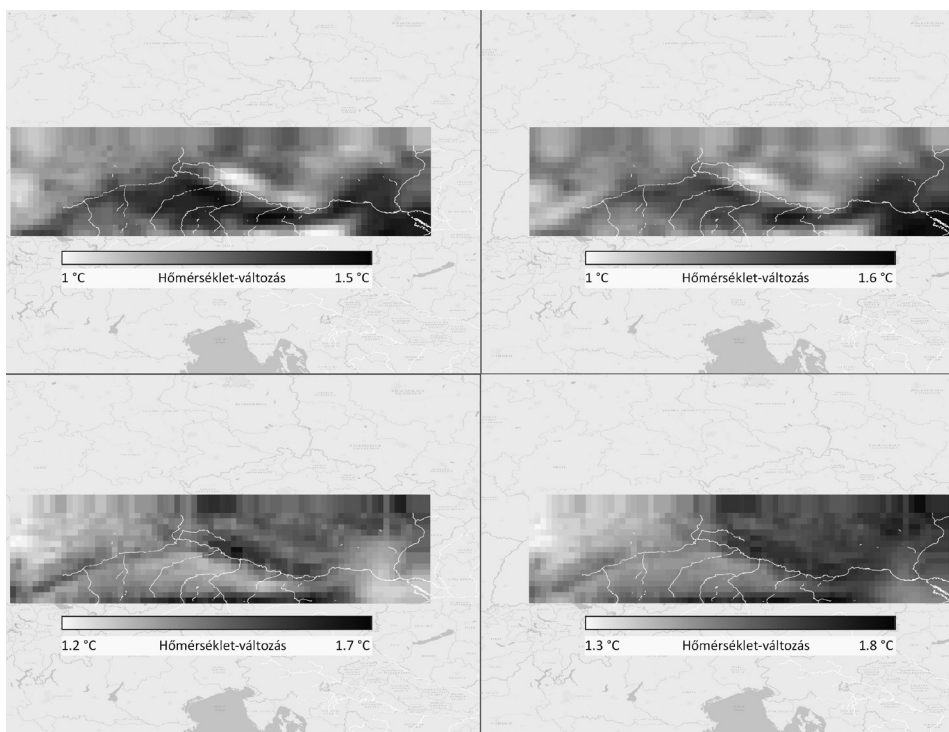
## Eredmények

### *Duna vízgyűjtőjének klimatológiai elemzése*

A Dunát tápláló vízfolyások többsége Magyarország határain kívül ered, ezért vízgazdálkodási szempontból a folyó a vízgyűjtője felvízi országainak (Szlovákia, Ausztria, Németország) erősen kitett. A felvízi országokban történő beavatkozások közvetlenül érintik hazánk vízgazdálkodását – beleértve az RSD-t is –, tekintettel a folyók vízhozamára, vízminőségére és az árvízi veszélyeztetettség mértékére. A hazai vízgazdálkodás külső tényezőkből adódó folyton változó feltételrendszere mellett az éghajlatváltozásból származtatható szélsőségek gyakoribb előfordulása is az új technológiák és integrált megoldások megvalósítását szorgalmazza (DOBÓ K. 2019).

Az éghajlatváltozás hatására – az általunk vizsgált Duna vízgyűjtő területén is – megfigyelhető a hőmérsékleti értékek emelkedése az évszázad végéig. Annak érdekében, hogy részleteiben is bemutassuk az RSD területére ható, a Duna vízgyűjtő területén várható éghajlati hatások területi eloszlását, megvizsgáltuk az évszázad közepére és végére becsült változások mértékét. Az 5. ábra szemlélteti a hőmérséklet várható változását a vizsgált területen, rácspontonként. A hőmérsékleti értékek alapján a Duna környezete több szimuláció szerint is magasabb kitettségűnek számít a környezetéhez képest. Látható, hogy az IPSL-RCA4 modell szimulációi adnak nagyobb hőmérséklet-emelkedést mindkét időszakban és mindkét forgatókönyv szerint is.

A Duna vízgyűjtő területére számított 30 évre vonatkozó havi középhőmérsékletek és csapadékösszegek átlagait a 6. ábra mutatja. Az ábra alapján elmondható, hogy az 1971–2000 közötti időszak (bal ábra) havi középhőmérsékleti értékei (fenti ábra) mind a két

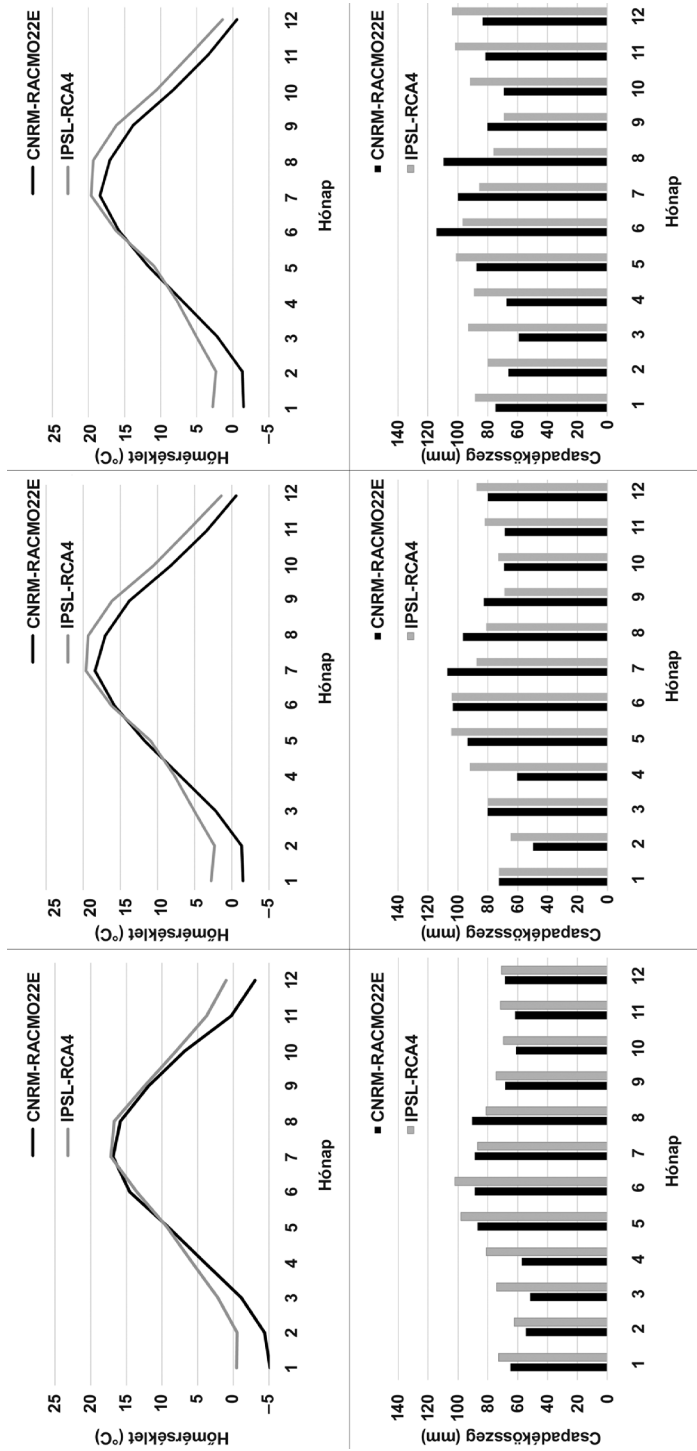


5. ábra Az átlaghőmérséklet várható változása a 2031–2060 közötti időszakra az 1981–2010 közötti referencia-időszakhoz képest (fent: CNRM-RACMO22E, lent: IPSL-RCA4, balra: RCP4.5, jobbra RCP8.5)

Figure 5 Projected change in mean temperature for the period 2031–2060, compared to the 1981–2010 reference period (top: CNRM-RACMO22E, bottom: IPSL-RCA4, left: RCP4.5, right RCP8.5)

modellkombináció esetén alacsonyabbak, mint a 2071–2100 közötti időszakra vonatkozó, az RCP4.5-ös (középső ábra) és az RCP8.5-ös (jobb ábra) forgatókönyvek használatával kapott átlagos havi középhőmérsékletek. Az IPSL-RCA4 modellkombináció (szürke) mind a két forgatókönyv mellett a legtöbb hónapban magasabb értékeket prognosztizál, mint a CNRM-RACMO22E (fekete). A legmelegebb hónap a július lesz várhatóan az évszázad végén is, az átlagos havi középhőmérséklet 20–25°C között alakulhat. A hőmérsékleti értékek éven belüli eloszlását tekintve a téli időszakban várható a nagyobb mértékű változás, a téli hónapokban ugyanis akár 5–6°C-kal is emelkedhet a havi középhőmérséklet. A téli fagyok csökkenése, esetleges hiánya az ökoszisztémát érintheti, a meleg őszi és az enyhe tél a vízben élő állatokra és a rovarokra is hatással van. A havi csapadékösszeg (lenti ábra) az évszázad végére (középső és jobb ábra) mind a két forgatókönyv használatával mellett jellemzően növekedni fog a térségben az 1971–2000 közötti időszakhoz képest (bal ábra). A nyári hónapoktól, valamint a szeptembertől eltekintve az IPSL-RCA4 magasabb havi csapadékösszegeket prognosztizál az évszázad végére a CNRM-RACMO22E modellkombinációhoz képest mindkét forgatókönyv használatával. A modellkombinációk összességében a csapadék időbeli eltolódását vetítik előre a tél javára, illetve a nyár rovására. Nyáron várhatóan jellemzőbbek lesznek a rövid idő alatt lehulló nagymennyiségű csapadékkal társult szélsőséges események. Általánosságban azonban elmondható, hogy a nagyobb bizonytalanságok a csapadék előrejelzését illetően tapasztalhatók.





6. ábra Átlagos havi középhőmérsékletek (fent) és esapadékösszegek (lent) az 1971–2000 közötti időszakra (bal).

valamint a 2071–2100 közötti időszakra az RCP4.5-ös (középső) és az RCP8.5-ös (jobb) forgatókönyvek használata mellett a Duna vízgyűjtőterületére átlagolva a két kiválasztott (CNRM-RACMO22E [fekete] és IPSL-RCA4 [szürke]) modelkombináció szerint

Figure 6 Average monthly mean temperatures (top) and amount of precipitation (bottom) for the period 1971–2000 (left) and 2071–2100 averaged over the Danube catchment using the RCP4.5 (middle) and RCP8.5 (right) scenarios for the two selected model simulations (CNRM-RACMO22E [black] and IPSL-RCA4 [grey])

Annak érdekében, hogy az RSD közvetlen környezetét befolyásoló, vízminőségi és ökológiai szempontból releváns éghajlati információkat elemezzük, a vizsgálatok céljaihoz igazodó éghajlati indikátorokat határoztunk meg. Ezekkel az indikátorokkal témaspecifikusan tudjuk a jelenlegi klimatológiai viszonyokat elemezni, valamint a klímamodell-szimulációk eredményire alapozva a jövőre vonatkozóan is becslést tehetünk azokról az éghajlati folyamatokról, amelyek hosszú távon is befolyásolni fogják az RSD környezetét és állapotát. Az előállított indikátorok megadják a hatásvizsgálatok alapját, amelyekkel beazonosíthatóvá válik, hogy az adott hatásterületeken melyek a klímaváltozás által is negatívan érintett hatásviselők, továbbá hogy az adott rendszerlemek esetében milyen metódusú és léptékű beavatkozásokra lehet szükség, valamint melyek azok a területek, amelyeket priorizálni szükséges. Első lépésként az RSD-t érintő két legrelevánsabb problémakört határoztuk meg, majd a kapcsolódó problémákat, okokat és hatásokat fogalmaztuk meg. Az időjárás viszonyokkal összefüggő legnagyobb problémát az RSD-n az extrém csapadékos időszakok, valamint az extrém száraz, aszályos időszakok okozzák.

Az extrém csapadékos eseményekhez köthető probléma a tisztítatlan és csapadékvízzel keveredő szennyvíz bekerülése az élővízbe: a Dél-pesti szennyvíztisztító telep ugyanis nem tudja a hirtelen lezúduló nagy mennyiségű csapadékot befogadni, mivel a budapesti víziközmű-hálózat jelentős része egyesített rendszerű, így a csapadékvízzel keveredett szennyvíz egyenesen az RSD-be kerül (Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.), nagymértékű vízminőségi romlást előidézve ott. A szennyvíz bekerülésével főként a foszfor-, valamint a nitrogéntartalom növekedik meg a víztestben, ami eutrofizációhoz, azaz fokozott algásodáshoz vezet, aminek következtében az éjjeli időszakban a vízi növényzet nem oxigént termel, hanem oxigént von el a környezetétől, emellett az oxigénhiányos környezet a mellékág állatvilágára, főként a halakra is negatívan hat, azok pusztulásához vezet. Az eutrofizáció növeli a mellékág eliszapolódását is, ami a szabályozásból, illetve a korábbi ipari tevékenységből adódóan már eleve jelentős mértékű. A régóta fennálló problémára megoldást jelenthet a megfelelő kotrási technológiai kiválasztásával és megfelelően megtervezett kivitelezéssel történő iszapeltávolítás, amely nagymértékben javítana az RSD környezeti állapotán. Magas vízállás esetén további probléma a Dunából érkező nagyobb mennyiségű üledék bekerülése és lerakódása a folyó lassabb folyású szakaszain. Tovább erősíti a bejutó kevert szennyvíz káros hatását, ha az RSD magas vízállása miatt le kell zárni a Kvassay- és Tassi-zsilipeket, aminek hatására az RSD gyakorlatilag ideiglenesen állóvízként viselkedik. A Duna, valamint a környező folyóvizek magas vízállása esetén a folyó menti talajvizekben megnövekedhet a szennyező anyagok koncentrációja, amelyek a felszínről, illetve a felszín közeli talajrétegekből a növekvő hidrosztatikus nyomás hatására juthatnak a talajvizekbe, onnan pedig az RSD-be.

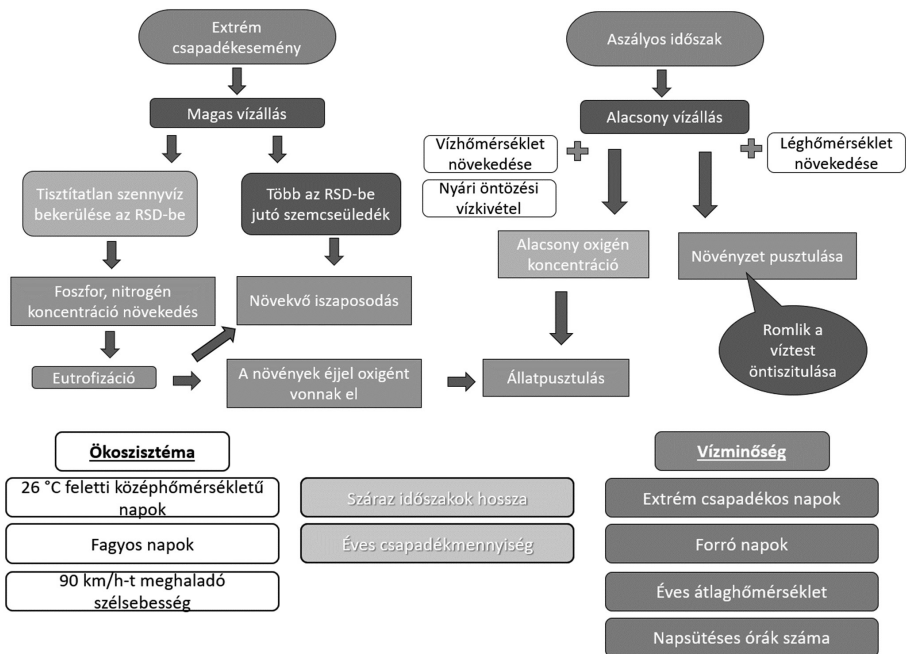
A lehulló csapadék befolyásolhatja a természetes vizek vízhozamát, így közvetlenül is hatással van a felszíni vizekben zajló kémiai folyamatokra. A vízhozamok csökkenése érzékenyebbé teszük a vízfolyásokat a szennyező anyagok terhelésével szemben, azaz csökken azok hígulásának mértéke. Ezzel szemben az intenzív csapadékesemények növelik a felszíni vizekbe jutó szennyező anyagok mennyiségét, ezáltal pedig a szervesen összetevők feldúsulását eredményezhetik. A csapadékvíz keletkezése pillanatában már gázokat old ki, továbbá szennyező anyagokat (port, radioaktív anyagokat) mos ki a levegőből. Az alapgázok közül legjobban a szén-dioxid oldódik, ami miatt a csapadékvíz pH-ja 5,6 körüli, azaz enyhén savas (BOYD, C. E. 2020). A csapadékosabb időjárás eredményeként a nitráterheltség is nőhet a mezőgazdasági területek felől érkező bemosódásnak köszönhetően. A feldúsulási folyamatokhoz a megélénkülő szélerezio szintén

hozzájárulhat. A szél pozitív hatása, hogy az oldott oxigén tartalmában kedvező változások mehetnek végbe a víz felkeverésének köszönhetően, azonban előidézheti a toxikus gázok üledékekből történő felszabadulását is.

Aszályos időszakok esetén a mellékág vízszintje nagymértékben le tud csökkenni. Nyáron a vízszint csökkenését tovább erősíti az öntözési vízkivételből származó deficit is. A Duna alacsony vízállása esetén leáll a gravitációs vízbetáplálás, ami ez esetben is a zsilipek lezárásához vezet, így az RSD ekkor is egy tóként funkcionáló mellékággá válik, az oldott oxigén koncentrációja nagymértékben lecsökken, pedig a nyári időszakban megemelkedett vízhőmérséklet esetében már eleve alacsonyabb az oxigéntelítettség (WOYNÁROVICH A. et al. 2018).

Az élőlényekre gyakorolt éghajlati hatások közül a felmelegedésnek kiemelt szerepe van. A legtöbb élőlény nem képes a környezetétől jelentősen eltérő hőmérsékletet túlélni. Emiatt a helyhez kötött szervezeteknek vagy a területüket nehezen megváltoztató állatoknak az élőhelyük által fenntartott teljes évi hőmérséklettartományt szükséges elviselniük (LANCASTER, L. T. – HUMPHREYS, A. M. 2020; SPENCE, A. R. – TINGLEY, M. W. 2020). Az éghajlatváltozás hatására ez a hőmérsékleti tartomány egyre szélsőségesebb lesz, amely veszélyezteti a helyi ökoszisztéma fennmaradását. Ezek a hatások vízi élőlények számára stressz-állapotot idéznek elő, nagymértékű állapotpusztulást eredményezve. A vízszint csökkenésének hatására a léghőmérséklet emelkedésével a növényzet kiszáradhat, ami a problémát tovább fokozza, hiszen a parti növényzet jelentős mértékben hozzájárul a víztest öntisztító képességéhez.

Megállapítható tehát, hogy az alacsony és magas vízálláshoz köthető kockázatok külön-külön is erőteljes hatást gyakorolnak az RSD-re, azonban a legnagyobb veszélyeztetettséget a két hatás együttállása eredményezi. Abban az esetben, mikor egy tar-



7. ábra Az Ráckevei (Soroksári)-Duna-ág éghajlatkockázati hatástérképe  
 Figure 7 Climate risk impact map of the Ráckeve (Soroksár) Danube

tós száraz időszakot egy erőteljes zivatarvekenység követ, a már állapotában amúgy is romlott minőségű víztest kiemelt kockázatnak van kitéve a nagy mennyiségben bekerülő szennyezőanyagok miatt. A kisvízfolyások esetében a vízhozam rendkívül szélsőségesé válhat, a hosszú nyári száraz időszakok során azok tartósan kiszáradhatnak. A talaj kedvezőtlen tulajdonságai, valamint a növényzet vízhiánya okán a beszivárgó víz nagy része a növényi életfeltételek azonnali javítására használódik fel, és evapotranszpirációval távozik a talajból. A hirtelen ismétlődő, több napon át tartó csapadékesemények ezzel szemben a talajfelszín áteresztő képességének csökkenését, a beszivárgás lassulását okozhatják, ennek következtében megnövekedhet a felszíni lefolyás, ami a környező csatornák és egyéb felszíni szennyeződéshelyek elmosásával szennyezőanyagok további szállítását eredményezi a folyómeder felé. Ezek a jelenségek a légkörben felgyülemlt többlet-energiatranszport miatt nemcsak a nyári, hanem a kora őszi időszakban is gyakrabban fordulhatnak elő, sok esetben heves széllel, viharokkal, jégesővel kísérve. A vihar-események gyakoriságának és erősségének növekedésével az orkánerejű szél komoly károkat tud okozni a folyómeder egyes szelvényeiben, megbontva a mederrézsűt, további anyagbemosódást okozva a mederbe vagy károkat okozva egyes gyengébb mesterséges felépítményekben (stégek, csónakházak).

Vizsgálataink során a jövőre vonatkozóan szimuláltunk egy magas és egy alacsony hőmérsékleti környezetet. Előbbi azonosításához a 26°C-os középhőmérsékletet meghaladó napok számának változását választottuk ki, amelynek fennállása esetén a maximum hőmérséklet legalább 35–37°C körüli vagy afeletti értékkel jellemezhető. Utóbbi esetén a fagyos napok számának változását alkalmaztuk indikátorként, amely esetén a napi minimum hőmérséklet 0°C-nál alacsonyabb. A 21. század közepére elkészült különböző modellszimulációk alapján a 26°C feletti középhőmérsékletű napok száma átlagosan 5–13 nappal emelkedhet a referencia-időszakhoz képest. Az IPSL-RCA4 szimuláció esetében a pesszimistább forgatókönyv már a század közepére is jelentős változást prognosztizál 10–12 napos emelkedéssel. A század végére a közepesen optimista forgatókönyv továbbra is az 5–13 nap közötti értékek skálájával írható le, szemben a pesszimista forgatókönyvvel, ahol mindkét modell jelentős emelkedéssel számol: 20–36 nap közötti a növekedés mértéke. A forró napok számának változását – az éves átlaghőmérséklet változásával összhangban – az évszázad közepéig és végéig növekedés jellemzi. A legnagyobb mértékű növekedést szintén az IPSL-RCA4 modelleredményeinél tapasztaltuk. A projekciók alapján a forró napok száma a 2031–2060 közötti időszakig 4–6 nappal, míg a 2071–2100 közötti időszakig szélsőséges esetben akár 14–20 nappal is nőhet a referencia-időszakhoz képest. A térségre jellemző fagyos napok száma 80–110 között változik. Az eredmények figyelembevételével megállapítható, hogy a század közepére szcenárióktól és modelltől függetlenül a fagyos napok számának az 1/3-a, a század végére a pesszimista forgatókönyvek szerint pedig akár a 2/3-a is eltűnhet.

A hőmérséklet mellett a csapadék és a szél is kulcsfontosságú tényező a vízi ökoszisztéma szempontjából. A vízkörforgás az ökológiai rendszerekben döntően a csapadékon és az evaporáción keresztül valósul meg, emiatt a csapadékmennyiség szezonális változása jelentősen meghatározza a vízhozamot. Az egyik fő probléma, hogy a hosszan tartó száraz időszakok érzékelhetően egyre gyakrabban fordulnak elő, ami szélsőséges vízhiányhoz, ennek következtében akár a folyómedrek kiszáradásához is vezethet. A másik megemlítendő probléma a csapadékkal kapcsolatban a légköri eredetű erősödő savasodás megjelenése a felszíni vizekben, ami a vízi élővilág további károsodását eredményezi. A szél felkeverő hatása – ami főként a felső rétegben érvényesül – ezzel szemben akár kedvező is lehet, mivel a szél keltette vízmozgásokkal segített légköri diffúzió jó oxigénellátottságot biztosít az élő szervezetek számára.

Az éves csapadékösszeg és az extrém csapadékos napok száma várhatóan emelkedni fog az az RSD környezetében. Az éves csapadékösszeg növekedése az évszázad közepéig nem lesz jelentős egyik modellkombináció szerint sem. Ezzel szemben a 2071–2100 közötti időszakot tekintve már nagyobb mértékű a növekedés, de az általunk vizsgált modellkombinációk (CNRM-RACMO22E és az IPSL-RCA4) a pesszimista forgatókönyv használatakor ellentétes irányú változást mutatnak a közepesen optimista scenárióhoz képest. Előbbi modellkombináció az RCP4.5 forgatókönyv mellett, míg utóbbi az RCP8.5 scenárióval prognosztizál nagyobb éves csapadékösszegeket. A legnagyobb változás mértéke mindkét modellkombináció szerint 22–27%. Az extrém csapadékos napok számának változására kapott eredmények közül szintén az évszázad végi értékek a magasabbak. Ez összhangban van a különböző forgatókönyvek szerinti melegedési mértékkel, ami fokozza a konvektív zivatarok kialakulását is.

### Következtetések

Elemzéseink alátámasztják, hogy az eddig bekövetkezett éghajlati változások mellett a jövőben várható éghajlati változásokra és azok hatásaira is kiemelt figyelmet kell fordítanunk, mivel az éghajlatváltozás komoly kihívások elé állítja az olyan sérülékeny vízi ökoszisztémákat és kiemelt ökoturisztikai térségeket, mint például az RSD térsége. Az éghajlati paraméterek változásának figyelembevétele, a várható, irányok és tendenciák becslése és számszerűsítése, valamint ezen jelenségeknek a monitoring jellegű tartós és folyamatos nyomon követése elengedhetetlen a megfelelő felkészülés és a tartós környezetjavító megoldások megtalálása és helyes alkalmazása érdekében. Hangsúlyozzuk, hogy az antropogén éghajlatváltozás hatásai nélkül is sürgős megoldást kellene találni az RSD komplex revitalizációjára, azonban a klímaváltozás hatásai ezeket a folyamatokat várhatóan felgyorsítják, lerövidítve ezáltal a reagálásra fordítható időt.

Mindezek figyelembevételével ezért az első és egyik legfontosabb javaslatunk, hogy tovább kell fejleszteni az RSD környezeti monitoringrendszerét. Ezt azonban nem elégséges a vízminőségre, hordalékszállításra, illetve az ökológiai folyamatok megfigyelésére koncentrálni megoldani, hanem figyelemmel kell lenni a klimatológiai monitoringra is. Ehhez elengedhetetlen további akkreditált meteorológiai mérőállomások telepítése, amelyekkel biztosítható a helyi éghajlati folyamatok nyomon követése, valamint a jövőbeli klimatológiai vizsgálatokhoz – validáláshoz, hibakereséshez – szükséges alapinformációk biztosítása.

Folyamatosan biztosítani kell a legújabb éghajlati forgatókönyvek alapján előállított klímamodell-eredmények alapján leskálázott regionális klímamodell-adatok feldolgozását, és a klimatológiai indikátorok fejlesztését, úgy, hogy azok tartósan beépíthetők legyenek a hidrológiai, hordalékmozgási, szennyezésterjedési, valamint ökológiai modellekbe.

A konkrét megelőzési és védelmi beavatkozások tekintetében több olyan fejlesztés megvalósítása szükséges lesz a közeljövőben, amelyek tartósan befolyásolhatják – remélhetőleg pozitív irányba – az RSD és környezetének állapotát.

Ma már bebizonyosodott, hogy a felgyülemlett iszap pontosan beazonosított helyszínekről, megfelelő módszerekkel történő eltávolítása és hasznosítása nem elodázható. Az iszapban felgyülemlett és onnan időnként felszabaduló szennyezőanyagok, feldúsult tápanyagok részben növelik a vízminőségi problémákat, másrészt fokozhatják az eutrofizációt is. A mindenkori klimatológiai helyzettől függően adott situációban a szennyező anyagok felszabadulása és az eutrofizáció magas foka miatt állati és növényi társulások kerülhetnek veszélybe, vagy pusztulhatnak el tömegesen. Ezek az események megelőz-

hetők lennének egyrészt egy szervezett iszapeltávolítással, másrészt ezután úgynevezett iszapcsapadék és egyéb hordalékfogó műtárgyak alkalmazásával. Emellett azonban meg kell oldani az eltávolított iszap ártalmatlanítását is, gondoskodva annak esetleges energetikai felhasználásáról, vagy a szennyezettség mértékétől függően a mederüledék újrahasznosítási, komposztálási megoldási alternatíváiról.

Mind a szennyezőanyag beamosódását, mind az RSD öntisztulását tartósan hátrányos helyzetbe hozhatnak olyan havária események, amelyek emberi felelőtlenség miatt (például szándékos szennyezés), illetve az időjárási extrém helyzetek gyakoribbá válása miatt is bekövetkezhetnek. Ilyen jellemző esemény, amely sajnos egyre gyakrabban előfordul az RSD térségében, hogy az egyesített rendszerű csatornahálózaton extrém csapadékesemények esetén a szennyvíztisztító telep kapacitását meghaladó vízmennyiség jelenik meg, amely részben vagy egészen tisztítatlanul jut be az RSD-be. Ez elfogadhatatlan, amennyiben az RSD-t élővízként meg akarjuk óvni, és egy tipikusan olyan állapot, amely az éghajlatváltozás, elsősorban a szélsőséges események gyakoribbá válása miatt már a közeljövőben egyre nagyobb és mind sűrűbben előforduló terhelést fog okozni. Ezért olyan fontos, hogy a Dél-pesti szennyvíztisztító telep tisztított vagy havária eseménykor tisztítatlan szennyvizei ne az RSD-be jussanak közvetlenül, hanem a sokkal nagyobb öntisztuló képességgel rendelkező nagy Duna-ágba.

A szélsőséges csapadékesemények gyakoribbá válása miatti hirtelen vízmennyiségek nemcsak szennyvizeket, hanem egyéb, a talaj felszínén vagy a talajban lévő mezőgazdasági, ipari vagy lakossági eredetű szennyező anyagokat is akadálytalanul az RSD-be moshatnak. Ezt megelőzendő és kezelendő célszerű lenne megvizsgálni záportározók létesítését a térségben, amelyek egyrészt segíthetnek a nagy csapadékesemények határfolyamatainak elnyújtásában, másrészt biztosíthatnák a nyári tartósan száraz és szélsőségesen meleg időszakokban a mezőgazdaság és a kertészet számára a többlet-öntözővizek rendelkezésre bocsátását.

Tanulmányunk alapján is jól érzékelhető, hogy e fejlesztési és védelmi javaslatok megfogalmazásához a klimatológiai hatásvizsgálatok nélkülözhetetlenek, de az is, hogy ezen fejlesztési beavatkozások megvalósítása nélkül – a felgyorsuló éghajlatváltozás káros hatásainak gyakoribbá válása miatt – a helyzet a jelenleginél is rosszabb lesz. Kényszerpályán van az RSD és annak ökoszisztémája, de ahogy a negatív hatással bíró változások felgyorsulnak, a változások hatásvizsgálati eredményei ki fogják kényszeríteni és remélhetőleg fel is fogják gyorsítani a megoldások megtalálását.

### **Köszönetnyilvánítás**

A cikk alapjául szolgáló kutatás a *Ráckevei (Soroksári)-Duna revitalizáció-előkészítés* projekt keretében valósult meg.

A tanulmány a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

---

CZIRA TAMÁS

BCE, Fenntartható Fejlődés Intézet, Budapest  
EnviAdapt Klíma- és Környezetkutató Intézet Kft.  
tamas.czira@enviadapt.com



FEJES LILIAN

ELTE TTK, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, Budapest  
EnviAdapt Klíma- és Környezetkutató Intézet Kft.  
lilian.fejes@enviadapt.com

INCZE DÓRA

ELTE TTK, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, Budapest  
EnviAdapt Klíma- és Környezetkutató Intézet Kft.  
dora.incze@enviadapt.com

## IRODALOM

- BAI, K. – CHANG, N. – YU, H. – GAO, W. 2016: Statistical bias correction for creating coherent total ozone record from OMI and OMPs observations. – *Remote Sensing of Environment* 182. pp. 150–168. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.007>
- BERINKEY L. – FARKAS H. 1956: Haltáplálék vizsgálatok a Soroksári-Dunaágban. – *Állattani Közlemények* 45. pp. 45–58.
- BOYD, C. E. 2020: Carbon dioxide, pH, and alkalinity. – *Water Quality*. pp. 177–203. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23335-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23335-8_9)
- DOBÓ K. 2019: Változások kora az árvízvédelemben. – *Műszaki Katonai Közöny* 29. 1. pp. 57–64. <https://doi.org/10.32562/mkk.2019.1.5>
- DUNKEL Z. – BOZÓ L. – GERESDI I. 2018: Az éghajlatváltozás hatására fellépő környezeti változások és természeti veszélyek. – *Földrajzi Közlemények* 142. 4. pp. 261–271. <https://doi.org/10.32643/fk.142.4.1>
- JACOB, D. et al. 2014: EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. – *Regional Environmental Change* 14. pp. 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- JUNK, J. – GOERGEN, K. – KREIN, A. 2019: Future heat waves in different European capitals based on climate change indicators. – *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16. 3959. <https://doi.org/10.3390/ijerph16203959>
- LANCASTER, L. T. – HUMPHREYS, A. M. 2020: Global variation in the thermal tolerances of plants. – *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117. pp. 13580–13587. <https://doi.org/10.1073/pnas.1918162117>
- MASSON-DELMOTTE, V. – ZHAI, P. – PIRANI, A. – CONNORS, S. L. – PÉAN, C. – CHEN, Y. – GOLDFARB, L. – GOMIS, M. I. – MATTHEWS, J. B. R. – BERGER, S. – HUANG, M. – YELEKÇI, O. – YU, R. – ZHOU, B. – LONNOY, E. – MAYCOCK, T. K. – WATERFIELD, T. – LEITZEL, K. – CAUD, N. (szerk.) 2021: IPCC 2021: Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- PACHAURI, R. K. – MEYER, L. A. (szerk.) 2014: IPCC 2014: Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – IPCC, Geneva. 151 p.
- PONGRÁCZ R. – BARTHOLY J. – KIS A. 2014: Estimation of future precipitation conditions for Hungary with special focus on dry periods. – *Időjárás* 118. 4. pp. 305–321.
- SPENCE, A. R. – TINGLEY, M. W. 2020: The challenge of novel abiotic conditions for species undergoing climate-induced range shifts. – *Ecography* 43. pp. 1571–1590. <https://doi.org/10.1111/ecog.05170>
- THEMESSL, M. J. – GOBIET, A. – LEUPRECHT, A. 2011: Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. – *International Journal of Climatology* 31. 10. pp. 1530–1544. <https://doi.org/10.1002/joc.2168>
- VADADI-FÜLÖP CS. – MÉSZÁROS G. 2007: A Ráckevei-Soroksári Dunával kapcsolatos zooplankton és makrogerinctelen kutatások áttekintése. – *Hidrológiai Közöny* 87. 3. pp. 60–63.
- VAN ROSSUM, G. – DRAKE, F. L. 2009: Python 3 Reference Manual. Scotts Valley, CA: CreateSpace.
- WOYNÁROVICH A. – KOVÁCS É. – NAGY S. A. 2018: A vízminőség állapotának felmérése és értékelése. – Agrárminisztérium, Halgazdálkodási Főosztály. Budapest 98 p.

### Internetes források

- Meteorológiai Adattár. Országos Meteorológiai Szolgálat. <https://odp.met.hu/>. Letöltés dátuma: 2022.04.11.
- CORDEX adatbázis. World Climate Research Program. Deutsches Klimarechenzentrum. <https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>. Letöltés dátuma: 2022.05.
- Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.: A Ráckevei-Soroksári Duna-ág és a valóság. <https://www.fcsm.hu/sajto-szoba/hirek-informaciok/a-rackevei-soroksari-duna-ag-es-a-valosag>