

## Záróbeszámoló a „A XXI. századra várható hidroklimatológiai változások és bizonytalanságainak elemzése éghajlati és hidrológiai modellek összekapcsolásával” c. kutatási projekt eredményeiről

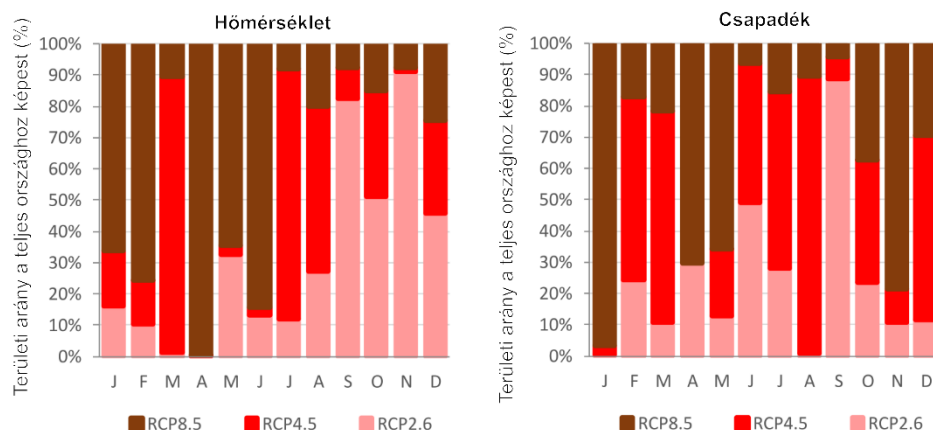
A PD138023 kutatási projekt keretében a klímaváltozás hidrológiai folyamatokra gyakorolt hatását elemeztem. A záróbeszámolót három nagyobb egységre tagolva készítettem el: a magyarországi éghajlatváltozás után a Felső-Tisza vidékre vonatkozó számítások kerülnek bemutatásra, végül pedig európai skálán ismertetem az éghajlati és hidrológiai szimulációk összekapcsolásából származó eredményeket. (Az alkalmazott módszerek, adatbázisok megfelelő szakirodalmi hivatkozásai a kutatás során készített közleményekben megtalálhatók; jelen beszámolóhoz nem készült külön irodalomjegyzék.)

### Klímváltozás Magyarországon

Az elemzéshez 11 regionális klíma-modell-szimulációt (RCM-szimulációt) használtunk fel, három különböző RCP scenárió figyelembevételével, hogy a modellekből fakadó bizonytalanság mellett az emberi tevékenység szerepéből adódó bizonytalanság mértékét is számszerűsíthessük.

A validációs vizsgálatokat (térképek, box-plotok, Taylor-diagramok, scatter-plotok, Kolmogorov-Szmirnov próba, átlagos négyzetes eltérés, trendegyütthatók) a HuClim adatbázis felhasználásával végeztük el Magyarországra: az 1991–2005-ös időszakot a modellekből adódó eltérések elemzésére választottuk ki, a 2006–2020-as periódust pedig a különböző scenáriók összehasonlításának céljából vizsgáltuk. A 11 modell által szimulált értékek átlaga jól közelíti a megfigyeléseket a hőmérséklet esetén, mind az éven belüli eloszlást, mind a térbeli szerkezetet tekintve és az abszolút eltérés is meglehetősen alacsony. A csapadék már kevésbé jó egyezést mutat, az éven belüli maximum jellemzően tavaszra esik a valódi, nyári tetőzés helyett. A validáció eredményeképp, egy összetett mutató definiálásával felállítottunk egy rangsort a modellek „jószágára” vonatkozóan.

A scenáriók összehasonlításából nem állapítható meg egyértelműen, hogy melyik scenárió alkalmazása mellett kapjuk a legmegbízhatóbb eredményeket éves szinten, az egyes hónapokra vonatkozóan azonban jól látszik, melyik áll legközelebb a valósághoz a rácspontok többségében (1. ábra). A hőmérsékletet tekintve hat hónapban az RCP8.5 forgatókönyv figyelembevételével futtatott RCM-szimulációk átlaga áll közelebb a megfigyelésekhez az ország területének többségén. Ugyanakkor a nyári csapadékot illetően az RCP4.5 scenárióval készült kísérletek mutatják a legkisebb alulbecslést.



1. ábra: A multi-modell átlag havi területi aránya a különböző RCP scenáriók esetén, amely a HuClim adatbázistól való legkisebb eltérést mutatja a 2006–2020-as időszakra vonatkozóan.

A jövőben várható átlagos változásokat tekintve Magyarországon a legnagyobb mértékű hőmérsékletemelkedés januárban és augusztusban várható az RCM-szimulációk szerint a 21. század végén, az RCP8.5 forgatókönyv alapján. A téli hónapokban a csapadékmennyiség növekedését projektálják a modellszimulációk mindhárom forgatókönyv esetén. A nyári csapadékcsökkenés csak az RCP8.5 scenárió estén jelenik meg a 2069–2098-as időszakra vonatkozóan (júliusban és augusztusban).

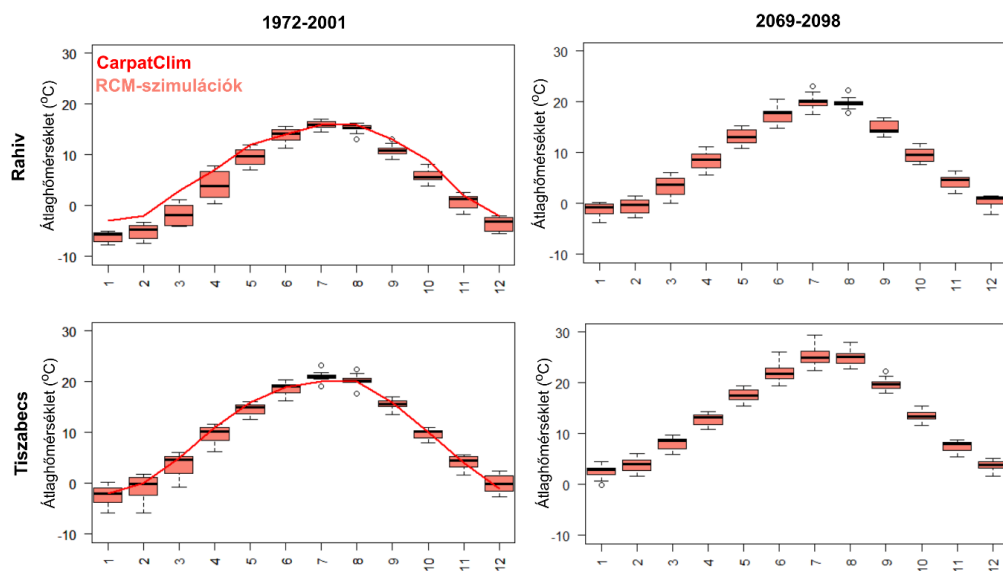
Eredményeinket az „*International Journal of Climatology*” c. folyóiratban publikáltuk részletesen.

### A Felső-Tisza vidéken várható változások

A kutatás során a Felső-Tisza vidéket, illetve a területén fekvő hat állomást is megvizsgáltuk éghajlati szimulációk és a DIWA hidrológiai modell összekapcsolásával.

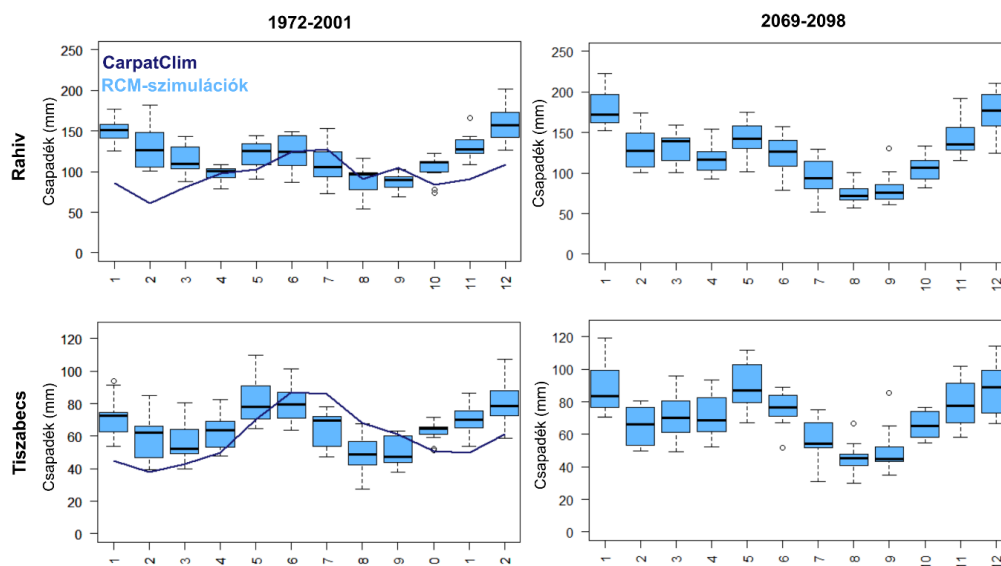
Kiszámítottuk az átlag- és minimumhőmérséklet, valamint a csapadék havi átlagértékeit az 1972–2001-es, 2021–2050-es és 2069–2098-as időszakokra. A Felső-Tisza-vidéken a legnagyobb mértékű (> 4,5 °C) átlaghőmérséklet változás a multi-modell átlag alapján a 21. század végén, az RCP8.5 scenárió szerint várható januárban, márciusban és augusztusban, a minimumhőmérséklet emelkedése pedig az 5 °C-ot is meghaladhatja januárban és februárban. A csapadék esetén nagyobb a bizonytalanság, de télen általánosságban növekedés valószínűsíthető mindhárom scenárió alapján, míg júliusban és augusztusban az RCP8.5 alapján 10% körüli csökkenés várható az évszázad végére.

A 2. és 3. ábrán két kiválasztott állomásra láthatjuk a jelenre és a jövőre becsült havi hőmérsékleti- és csapadéértékeket a 11 RCM-szimuláció (RCP8.5 forgatókönyv mellett), valamint a CarpatClim adatbázis alapján. Az RCM-szimulációk multi-modell átlaga szerint a hőmérséklet emelkedése nyáron 1,1 °C, 2,0 °C és 4,2 °C rendre az RCP2.6, RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek mellett, míg télen 1,5 °C, 2,5 °C és 4,5 °C Rahiv esetén; Tiszabecsen pedig nyáron 1,1 °C, 2,1 °C, 4,2 °C; míg télen 1,7 °C, 2,6 °C, 4,5 °C. A box-plotokból látszik, hogy a bizonytalanság a nyári hónapokban a legkisebb, míg tél végén-tavaszi elején nagyobb, amely időszak különösen fontos a lefolyás szempontjából a hó olvadásának kezdete miatt.



2. ábra: A havi hőmérsékleti értékek 1972–2001-ben és 2069–2098-ban a CarpatClim (piros, folytonos vonal), valamint az RCP8.5 forgatókönyvet alkalmazó 11 RCM-szimuláció (világospiros box-plotok) alapján Rahiv és Tiszabecs állomásokon.

A csapadék télen várhatóan mindkét állomáson növekedni fog: a valószínűsíthető változás a multi-modell átlag alapján Rahiv esetén 7%, 8% és 11%, Tiszabecsen pedig 9%, 9% és 14%, rendre az RCP2.6, RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek szerint. A nyárra becsült változások iránya már az alkalmazott scenáriótól függ: Rahiv esetén 2%, 1% és -9%, Tiszabecsen 7%, 2%, -7%.



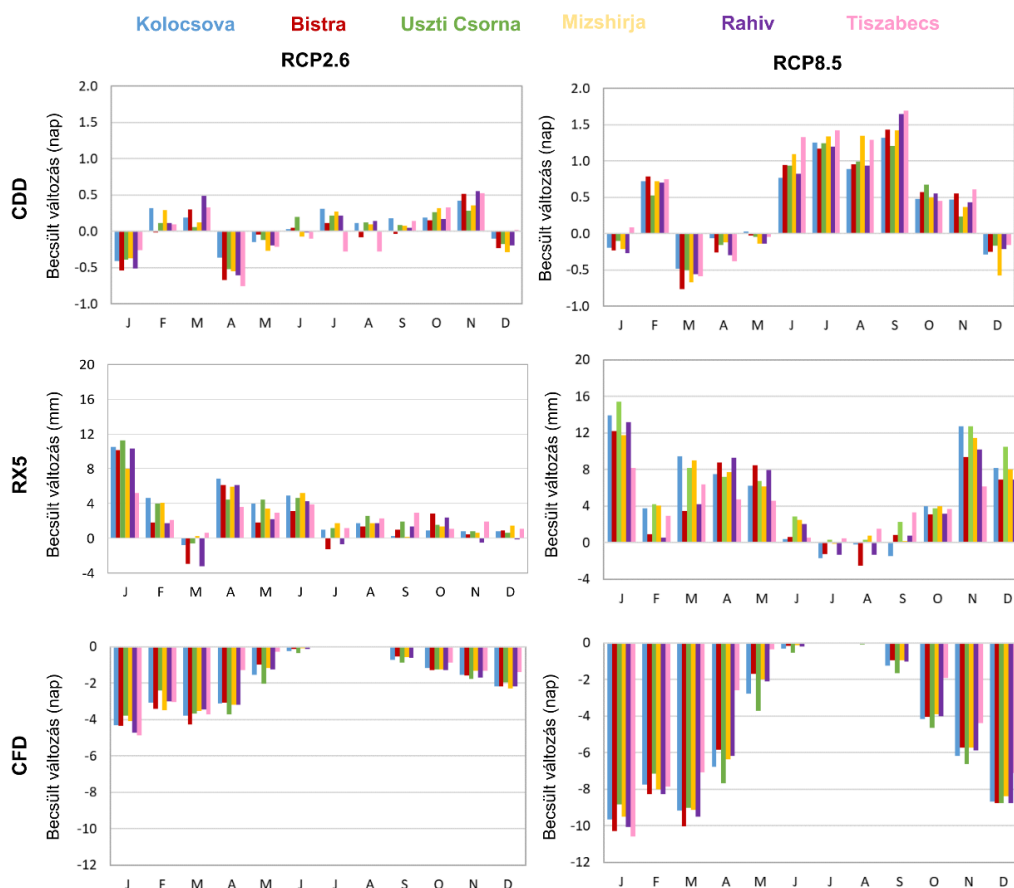
3. ábra: A havi csapadéértékek 1972–2001-ben és 2069–2098-ban a CarpatClim (sötétkék, folytonos vonal), valamint az RCP8.5 forgatókönyvet alkalmazó 11 RCM-szimuláció (világoskék box-plotok) alapján Rahiv és Tiszabecs állomásokon.

Több éghajlati index értékét és várható változását is kiszámítottuk a célterületre és az állomásokra, amelyek közül a lefolyás szempontjából leginkább meghatározó mutatókat emeljük ki a legoptimistább és a leg pesszimistább forgatókönyvre (4. ábra), nevezetesen, az egymást követő száraz napok maximális számát (CDD), az öt nap alatt lehulló maximális csapadékmennyiséget (RX5) és az egymást követő fagyos napok maximális számát (CFD).

A CDD decemberben és januárban csökkenni fog a multi-modell átlag szerint, amely összefüggésben áll az általános téli csapadéknövekedéssel. Márciusban a forgatókönyvtől függ a változás iránya, a nyári hónapokban pedig általánosságban növekedés várható, azonban ennek mértéke meglehetősen alacsony az RCP2.6 esetén és néhány állomáson csökkenést mutatnak a szimulációk. Az RCP8.5 forgatókönyv szerint viszont egyértelmű növekedés várható a CDD értékeiben mind a hat állomáson – ez a mederteltség alacsonyabb szintjét vonhatja maga után, amely így könnyebben vezethet el egy-egy esetlegesen kialakuló nagyobb árhullámot.

Az RX5 növekedést mutat mindkét scenárió szerint a teljes évben, a legtöbb állomás esetén; a legnagyobb emelkedés (RCP2.6: 9 mm, RCP8.5: 12 mm átlagosan) januárban valószínűsíthető. Kivételt képez azonban az RCP8.5 forgatókönyv alapján júliusban, augusztusban és szeptemberben, illetve az RCP2.6 esetén márciusban egy-egy állomás, amelyeken egy kisebb mértékű csökkenés várható. Az RX5 növekedése hozzájárulhat egy-egy nagyobb árhullám kialakulásához.

A CFD minden hónapban, mint a hat állomáson, mindkét scenárió szerint csökkenni fog (nyáron azért nem láthatók változások, mert ekkor eleve nem fordul elő fagyos nap a területen). A legnagyobb csökkenés januárra becsült (RCP2.6: 4 nap, RCP8.5: 10 nap átlagosan), amely a hóolvadás, illetve a havazás arányának szempontjából bír kiemelt fontossággal.

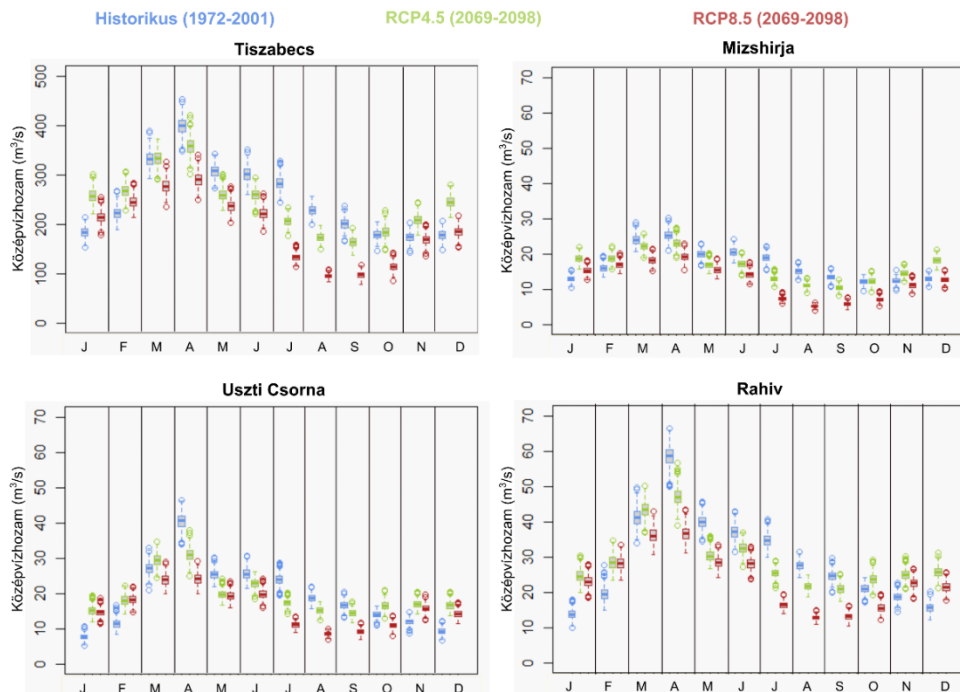


4. ábra: Az egymást követő száraz napok maximális számának (CDD), az öt nap alatt lehulló maximális csapadékmennyiségének (RX5) és az egymást követő fagyos napok maximális számának (CFD) várható változása 11 RCM-szimuláció multi-modell átlaga alapján az RCP2.6 és RCP8.5 forgatókönyvek esetén a hat állomáson.

A hidrológiai szimulációt a DIWA modellel végeztük el, amelynek a bemeneti meteorológiai paramétereit a HadGEM-mel meghajtott RegCM regionális klímamodell-szimuláció szolgáltatta. Annak érdekében, hogy a klímamodell szisztematikus hibáit kiküszöböljük, hibakorrekciót hajtottunk végre, amelyhez a DIWA-SWG időjárás generátort alkalmaztuk. Nevezetesen, a referenciaként szolgáló CarpatClim adatbázissal hajtottuk meg az időjárás generátort, majd a hőmérsékletre, nedves és száraz tartamokra, valamint a csapadékmennyiségre is meghatároztuk az eloszlásfüggvényeket. A hibakorrekciót az eloszlásfüggvények paramétereinek illesztésén keresztül valósítottuk meg (az RCM szimuláció historikus időszakra vonatkozó paramétereit igazítottuk a CarpatClim alapján kapott paraméterekhez), majd Monte Carlo (MC) ciklusba ágyazva végeztük el a hidrológiai futtatásokat a hibakorrigált bemeneti meteorológiai idősorokkal, így több száz, azonos valószínűséggel bekövetkező idősor állt rendelkezésünkre.

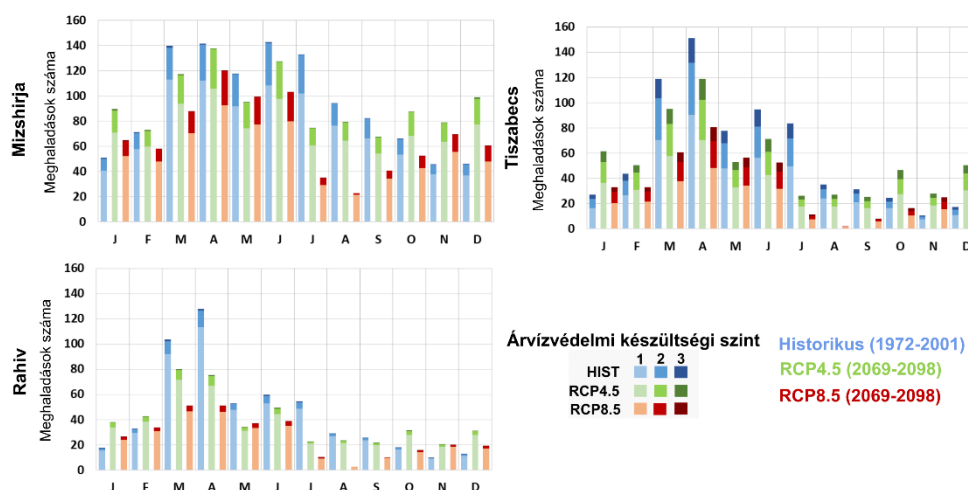
A DIWA modellel végzett számítások szerint a napi középvízhozamok az év nagy részében (RCP4.5: áprilistól szeptemberig, RCP8.5: márciustól októberig) várhatóan csökkenni fognak a 21. század végére (5. ábra), különösen a nyári időszakban, amely összefüggésben állhat a becsült csapadékcsökkenéssel, illetve a magasabb hőmérsékletből eredő fokozott párolgással. Tiszabecs, Rahiv és Mizshirja esetén a márciusra és áprilisra becsült csökkenés is jelentős (bár a bizonytalanság sem alacsony), különösen az RCP8.5 mellett – a változás összefüggésben lehet a havazás arányának csökkenésével, illetve az olvadási folyamatok esetleges korábbra tolódásával. A legnagyobb mértékű emelkedés januárban várható a szimulációk szerint, az RCP4.5 alapján.

A kritikusan alacsony vízszintek gyakoriságában általános növekedésére számíthatunk, a legnagyobb emelkedés az RCP8.5 szcenárió esetén várható a júliustól novemberig tartó időszakban. Rahiv esetén december és március között pedig jelentős csökkenés valószínűsíthető.



5. ábra: A középvízhozamok alakulása a hibakorrigált HadGEM/RegCM időszoraival meghajtott, MC ciklusba ágyazott DIWA szimulációk alapján az 1972–2001-es időszakban, valamint 2069–2098-ban két különböző scenárió (RCP4.5 és RCP8.5) szerint.

Az árvízvédelmi készültségi szintek meghaladásának gyakoriságában általánosságban márciustól szeptemberig csökkenés valószínűsíthető, különösen augusztusban, mindegyik állomás esetén (6. ábra). A tavaszi árvizek ritkábbá válására számíthatunk a szimulációk szerint, amely ismételten a havazás csökkenésével, illetve az olvadás korábbra tolódásával hozható összefüggésbe. Novembertől januárig növekedés valószínűsíthető, hiszen a téli csapadék általános emelkedése mellett az esőzés is gyakoribb lehet a melegebb körülmények miatt, amely rögtön a lefolyás részévé válva magasabb vízszinteket eredményezhet.



6. ábra: Az árvízvédelmi készültségi szintek előfordulási gyakorisága 100 éven belül a historikus időszakban és a 21. század végén az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriók szerint, a hibakorrigált HadGEM/RegCM időszoraival meghajtott, MC ciklusba ágyazott DIWA szimulációk alapján.

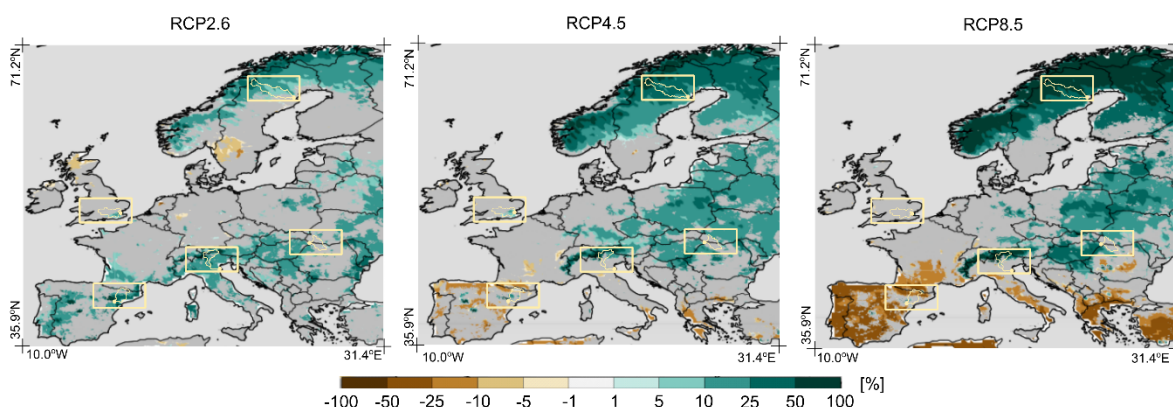
A kutatás során megvizsgáltuk az árvízvédelmi készültségi szinteket meghaladó esetek számát kifejezetten a múltra vonatkozóan is. A klímaváltozás következtében a jövőben a hőmérséklet további emelkedése valószínűsíthető a célterületen, a csapadék éves mennyiségében pedig ugyan nem várható jelentős változás, azonban annak időbeli eloszlásában (és esetlegesen a halmazállapotában) igen. Ezen becsült változások eredőjeként a Felső-Tiszán a téli árhullámok gyakoriságának növekedése várható. A reggeli vízállás adatok alapján 1924 és 2022 között ritkán (100 év átlagában 30 alkalom) fordult elő fokozatot elérő jégmentes árhullám a tiszabecsi vízmércén, azonban 2023/2024 telén öt olyan jégmentes árhullám vonult le a Felső-Tiszán, amely fokozatot ért el (I. vagy II. fokú árvízszint), vagy befutott a készültségi szint közeli vízszint tartományba. Feltételezéseink szerint a már most észlelt változások is összefüggésben állnak a klímaváltozással, miszerint a magasabb hőmérsékleti értékekből eredően a hó arányaiban csökken és így a téli csapadék nem kerül tározásra, hanem rögtön a lefolyás részévé válhat, magasabb téli vízszinteket eredményezve a vízhálózaton.

Eredményeinket a *Hidrológiai Közlönyben* ismertettük részletesebben, valamint az *Európai Meteorológiai Társaság* (EMS) 2023-as és 2024-es konferenciáján mutattuk be egy-egy előadás, illetve poszterbemutató keretében, továbbá az *EGU konferencián* is tartottam egy prezentációt. A téli árhullámok elemzését a *Magyar Hidrológiai Társaság 41. Vándorgyűlésén* mutattuk be egy előadás és egy összefoglaló keretében, amelyet elismerő oklevéllel jutalmaztak.

### Az éghajlatváltozás hidrológiai hatásai öt európai vízgyűjtőn

Európa öt, különböző éghajlati karakterisztikákkal jellemezhető vízgyűjtőjét, illetve azok egy-egy szelvényét is megvizsgáltuk hidrológiai szempontból a *Copernicus Climate Change Services* alkalmazásának felhasználásával. Referencia időszakként az 1971–2000-es periódus szolgált, a jövőbeli időszakot pedig a 21. század vége (2071–2100) jelentette.

Általánosságban elmondható, hogy a magasabb sugárzási kényszerrel számoló forgatókönyvek esetén alacsonyabb a projekciók közti bizonytalanság. A modellek közti egyezés az évi átlagos vízhozam változását illetően a Brit-szigeteken és Nyugat-Európában alacsonyabb, mint a kontinens többi térségében, még az RCP8.5 scenárió esetén is (7. ábra). A legnagyobb mértékű növekedés (> 50%) Skandináviában várható, míg Dél-Európában az alkalmazott forgatókönyvnek van meghatározó szerepe a projektált változás előjelében.



7. ábra: Az átlagos vízhozam várható változása 2071–2100-ra (1971–2000-hez képest) három különböző RCP scenárió alapján, nyolc RCM-szimuláció és két hidrológiai modell átlaga alapján. A szürke területeken a szimulációk kevesebb mint 75%-a ért egyet a változás előjelét illetően. A sárga keret a választott vízgyűjtőket jelzi. Az ábra a Copernicus Climate Change Service information (2024) felhasználásával készült.

A maximális vízhozam általánosságban növekedni fog Európában a szimulációk szerint, de az RCP2.6 esetén meglehetősen nagy a bizonytalanság. 50%-nál nagyobb mértékű változás csak a Temzén valószínűsíthető a vizsgálatban szereplő vízgyűjtők közül, az RCP8.5 forgatókönyv esetén. A 10-éves visszatérési idejű árvizek vízhozama várhatóan szintén növekedni fog (25-50%-kal) a

skandináv szelvény kivételével, az RCP8.5 scenárió szerint. Az 50-éves visszatérési idejű árvizek esetén hasonló következtetésekre jutottunk.

Eredményeink a szélsőségek erősödését jelzik, ami a felkészülési stratégiák mielőbbi kidolgozását teszi szükségessé a potenciális károk mérséklésének érdekében.

Az eredményeket a *Hydrological Sciences Journal* c. folyóiratban publikáltuk, továbbá a 2024 novemberében megrendezésre kerülő *Meteorológiai Tudományos Napokon* ismertetjük egy előadás keretében.

#### **A kutatáshoz kapcsolódó publikációs tevékenység**

A kutatás eredményeit bemutató tudományos közlemények jegyzékét az MTMT rendszeréből importáltam a „Közlemények” fül alá. Az ott feltüntetett publikációk mellett további két cikk került beadásra, azonban a zárójelentés benyújtásáig ezek nem jelentek meg – a részletek alább láthatók:

- Kis A., Szabó P., Pongrácz R.: Analysis of detected and future extreme drought conditions – a case study for the Great Hungarian Plain. *Theoretical and Applied Climatology (Major review folyamatban)*
- Kis A., Pongrácz R.: Scenario-dependent future trends of consecutive dry days from July to September: a case study for Hungary. *Moravian Geographical Reports (Awaiting Admin Processing)*