

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Nemzetközi klímamodell adatbázisok felhasználhatósága hazai éghajlati kitettségi és sérülékenységi vizsgálatokban

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Fejes Lilian

Meteorológus mesterszak,
Éghajlat kutató szakirány

Témavezető:

dr. Czira Tamás Gábor

MBFSZ, Nemzeti Alkalmazkodási Központ Főosztály

Konzulens:

dr. Torma Csaba Zsolt

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2019

Tartalom

1. Bevezetés	3
2. Szakirodalmi áttekintés	5
2.1 CORDEX	5
2.2 Hazai klímamodellzés	9
2.3 NATÉR	11
3. EURO-CORDEX adatok leválogatása	13
4. Módszertan	19
4.1 Az első NATÉR projekt éghajlati kitettségi adatbázisáról	19
4.2 Ivóvízbázisok klímaváltozással szembeni éghajlati sérülékenységi vizsgálata ..	21
4.2.1 Az ivóvízbázisok éghajlati sérülékenységének vizsgálata az első NATÉR projekt keretében.....	21
4.2.2 Az ivóvízbázisok éghajlati sérülékenységének vizsgálata a NATÉR továbbfejlesztése projekt keretében	26
4.2.2.1 A vizsgált mintaterület (vízmű illetékességi terület) kiválasztása	26
4.2.2.2 Érzékenység	35
4.2.2.3 Alkalmazkodóképesség.....	38
4.2.2.4 Sérülékenység	39
5. Összefoglalás	42
Irodalomjegyzék	44
Köszönetnyilvánítás	48

1. Bevezetés

Az éghajlati sérülékenység vizsgálatoknak egyre növekvő szerepe van egy-egy térség, vagy ágazat éghajlati alkalmazkodási stratégiájának megalapozásában és a várható kockázatok értékelésében egyaránt. Az éghajlati sérülékenység vizsgálatok egyik legfontosabb eleme az éghajlati kitettség vizsgálata, amely leskálázott klímamodell eredményekből származtatott klímaindikátorok feldolgozásán alapszik. Az éghajlati kitettség vizsgálatához a lehető legnaprakészebb modelledményeket érdemes felhasználni, amelyek már tartalmazzák azokat a feltételeket, amelyeket a világ vezető tudományos műhelyei különböző éghajlati forgatókönyveket követve határoznak meg.

A legfrissebb hozzáférhető forgatókönyvek az Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) nemzetközi tudós testület 2014-ben nyilvánosságra hozott 5. helyzetértékelő jelentésében állnak rendelkezésre. Az ún. Koncentrációváltozás Reprezentatív Pályáinak (RCP - Representative Concentration Pathways) meghatározása segítségével új generációs forgatókönyveket állítottak elő, amelyek alapján számos nemzetközi éghajlati modellezéssel foglalkozó kutató műhely új globális és regionális klímamodell futtatásokat végzett. Ennek eredményeként több olyan szabadon hozzáférhető klímamodell adatbázist is létrehozta (pl. EURO-CORDEX, Med-CORDEX), amelyek lefedik Magyarország teljes területét, s amelyek alkalmasak lehetnek éghajlati kitettségi vizsgálatokhoz.

A magyarországi éghajlati alkalmazkodási stratégiai tervezés és kutatás érdekében létrehozott Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer (NATÉR) 2016 végén elindult továbbfejlesztése keretében, a projektgazda célul tűzte ki, hogy a korábbi IPCC 4. helyzetértékelő jelentésében meghatározott SRES (Special Report on Emission Scenarios) scenáriók mellett, a rendszerbe integrálja az új generációs RCP forgatókönyvek alapján lefuttatott klímamodellek kiválasztott eredményeit is.

A NATÉR rendszer fejlesztőjénél és üzemeltetőjénél, a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálatnál végzett tevékenységem részeként ezért arra kerestem a választ, vajon a legújabb hozzáférhető európai éghajlati modellszimulációk és az ezekből kinyerhető klímaindikátorok alkalmazhatók-e a magyarországi éghajlati sérülékenység-vizsgálatokban, az éghajlati kitettség meghatározására. Rendelkezésre állnak-e az adatbázisokban megfelelő felbontásban, részletezettségben és teljességben azok a klímaindikátorok, amelyek a NATÉR rendszer éghajlati moduljaiba integrálva ki tudják szolgálni a területi és ágazati éghajlati sérülékenység vizsgálatok eltérő indikátor

igényét. Ehhez olyan, az EURO-CORDEX adatbázisból kiválasztott modellpárokat használtam fel, amelyek később a NATÉR rendszer részeként alkalmasak lesznek minden típusú éghajlati sérülékenységi vizsgálat adatigényének kiszolgálására.

Célul tűztem ki, hogy egy kiválasztott ágazati tematikus területen (ivóvízbázisok éghajlati sérülékenység vizsgálata), olyan, az adott tematikus területre vonatkozó éghajlati kitettségi indikátorokat és indexeket állítsak elő, amelyek az egész országra nézve lehetővé teszik az éghajlati kitettség számítását és térképezését, valamint kiértékelését.

Ehhez az értékelési módszertan fejlesztésére és finomhangolására is szükség volt, valamint figyelembe kellett venni az éghajlati sérülékenységi vizsgálat más paramétereinek, így az alkalmazkodási és érzékenységi indikátorok előállításából fakadó és a speciális vízi közmű ágazati jellemzők által meghatározott egyedi adatigényeket is.

Azt is célul tűztem ki, hogy az új éghajlati kitettségi adatbázisból származó klímaindikátorok és indexek, valamint az ivóvízbázisok éghajlati sérülékenység vizsgálatához szükséges indikátorok segítségével és a módszertanfejlesztés eredményeként, elvégezzem egy regionális víziközmű szolgáltató társaság illetékességi területére, komplex módon, az éghajlati sérülékenység vizsgálatot. A területi elemzéssel tesztelni akartam az új eredmények alkalmazhatóságát, valamint a módszertan fejlesztéséből fakadó új eredmények integrálhatóságát a vizsgálatokba, és a NATÉR rendszerbe egyaránt.

Mintaterületként az egyik legnagyobb kiterjedésű regionális vízművet a Dunántúli Regionális Vízmű Zrt-t választottam, azért, mert kellően reprezentálja mind a különféle típusú hazai ivóvízbázisokat (felszíni, karsztos, partiszűrűsű és porózus), mind az eltérő típusú vízhasználatokat (kistelepülési, városi, mezőgazdasági és ipari stb.). Az illetékességi terület nagy kiterjedése okán, a települési szinten elvégzett összehasonlító vizsgálatok alkalmat adtak arra is, hogy az egyes térségeket össze lehessen hasonlítani kitettségük, érzékenységük, alkalmazkodóképességük és végső soron éghajlati sérülékenységük relatív különbségei alapján.

Céлом volt, hogy vizsgálataimat a térinformatikai feldolgozás után, térképekkel is alátámasszam, ezáltal az egész mintatárság kiértékelése könnyeb és jobban szemléltethető legyen. Ennek köszönhetően lehetőségem nyílt a felhasznált éghajlati modellpárokból két klímaablakra vonatkozóan is összevetéseket végezni a kitettségi és éghajlati sérülékenység területi vizsgálat során.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1 CORDEX

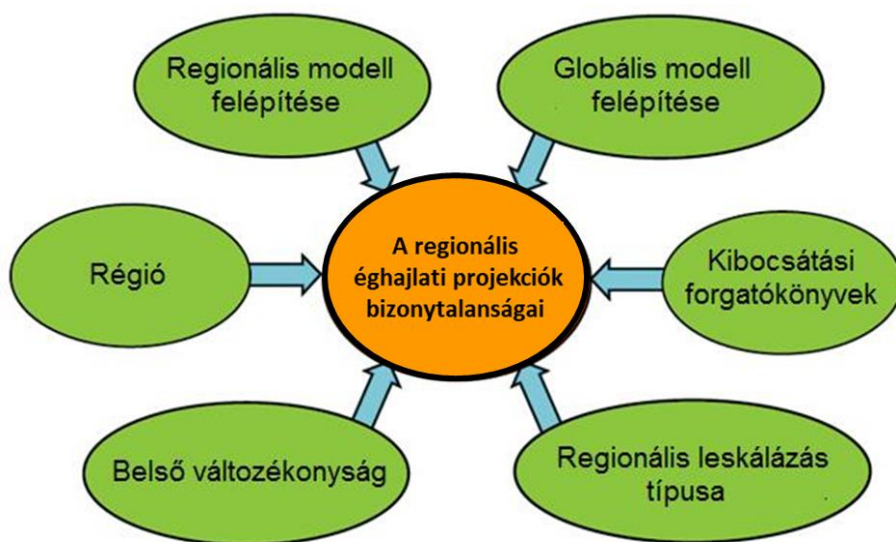
A WCRP (World Climate Research Program) egy 1980-ban a WMO (World Meteorological Organization) és az ISC (International Science Council) által alapított kutatási program, amelynek 1993-tól az UNECO- IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission) is támogatója lett [1 – wrcp-climate.org]. Célja az éghajlat kiszámíthatóságának és az emberi tevékenység éghajlatra gyakorolt hatásának meghatározása, valamint e folyamatokhoz kapcsolódva a Földi éghajlati rendszer változékonyságának elemzése, előrejelzése, ezek társadalmi alkalmazásának kiterjesztése. Főbb kutatási területei: globális és regionális éghajlati változékonyság és változás, a változást kiváltó mechanizmusok vizsgálata, numerikus modellek fejlesztése különböző tér- és időskálára, természetes és antropogén tényezők általi éghajlati érzékenységi vizsgálatok, szignifikáns globális és regionális éghajlati trendek vizsgálata és meghatározása. Ezek mind olyan kutatási területek, amelyek segítik az alkalmazkodási és felkészülési stratégiák kidolgozását társadalmi, valamint gazdasági oldalról is. Kutatási területek szerint négy fő projekt szolgál munkásságuk alapjául: a CliC (Climate and Cryosphere) a krioszféra kutatását foglalja magába, a CLIVAR (Climate and Ocean Variability, Predictability and Change) projekt az óceán és atmoszféra csatolt rendszerét vizsgálja, a GEWEX (Global Energy and Water Exchanges) egy integrált projekt, amely a légköri, teresztriális, sugárzási és hidrológiai kölcsönhatásokra összpontosít, a SPARC (Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate) projekt pedig a légkör dinamikai, kémiai vizsgálatainak vezetését látja el [1 – wrcp-climate.org]. Ezek mellett jelentős szereppel bír a diplomamunkám alapjául is szolgáló CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment), (*Giorgi et al., 2009*), amely a regionális éghajlatváltozás vizsgálatát és azzal kapcsolatos regionális klímaszimulációk megvalósítását koordinálja világszerte.

A GCM (General Circulation Models) olyan globális numerikus modellek, amelyek segítségével globális skálán tanulmányozható többek között az éghajlatváltozás. A Föld éghajlati rendszerének különböző komponenseiről, azok közötti kölcsönhatásokról, illetve visszacsatolási mechanizmusairól nyújtanak információt. Hátrányuk, hogy felbontásuk bizonyos jelenségek, folyamatok pontos leírásához túl durva (jellemzően 100-300 km), így például Magyarország területére alig néhány rácspont esik, valamint a regionális éghajlatváltozás akár ellentétes is lehet a globális tendenciákkal (*Giorgi et al.,*

2016). Ezért szükséges ezen modellek dinamikai vagy statisztikai-empirikus leskálázása. Mindkét eljárási módnak megvan a maga előnye és hátránya, a kitűzött cél és a rendelkezésre álló lehetőségek függvényében kell megválasztani a legmegfelelőbb eljárást.

A regionális klímamodellek finomabb felbontással rendelkeznek a globális klímamodellekhez képest, de a modellezés tartománya területileg kisebb térségre korlátozódik. A felszint jellemző paraméterek részletesebb figyelembe vétele és az extrémumok szimulációja megbízhatóbbá válik.

Mind a globális, mind a regionális modelleknél számolnunk kell a modellezés bizonytalanságaival. Ezek közé tartozik az éghajlat belső változékonysága, az éghajlat alakításában résztvevő fizikai folyamatok matematikai leírása és közelítések alkalmazása, parametrizációja (Giorgi et al, 2009).

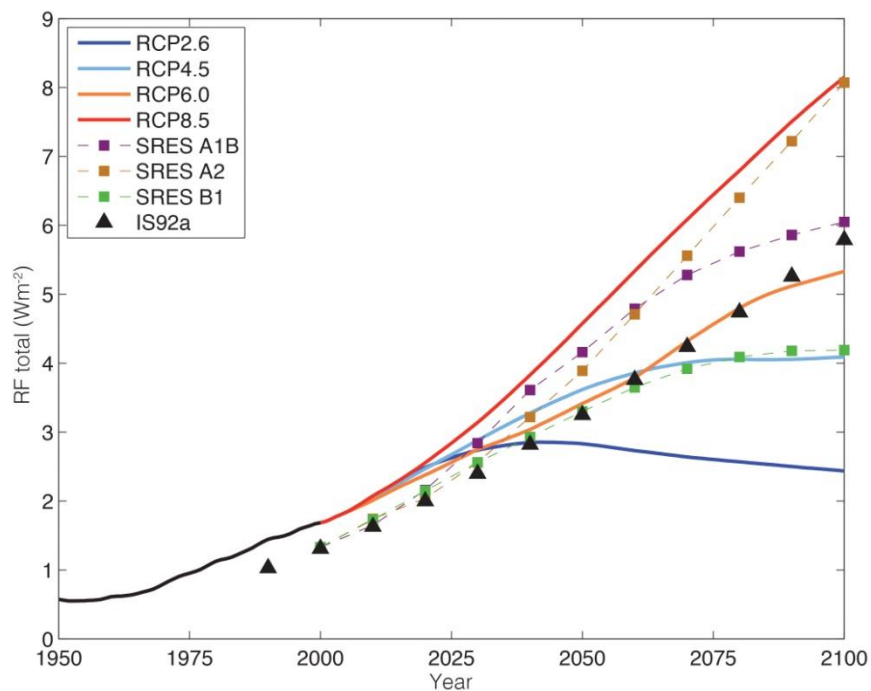


1. ábra A regionális klímamodellezés bizonytalanságainak sematikus ábrázolása (Giorgi et al, 2009).

Az egyik legfőbb bizonytalansági tényező az antropogén tevékenység, amely éghajlatra gyakorolt hatását különböző forgatókönyvek írják le. (Sábitz et al., 2015) Elterjedt forgatókönyvek az IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) negyedik helyzetértékelő jelentésében (AR4, IPCC, 2007) szereplő SRES (Special Report on Emission Scenarios) scenáriók, amelyek a kibocsátási, gazdasági és társadalmi változások egy-egy lehetséges jövőbeli tendenciáját vetítik előre. Ezekben a forgatókönyvekben még nem vették számottevően figyelembe a kibocsátáscsökkentési intézkedések hozzájárulását az éghajlatváltozás lehetséges mérséklődéséhez, valamint a

Földi rendszerek alkalmazkodóképességét. A Koncentrációváltozás Reprezentatív Pályáinak (RCP - Representative Concentration Pathways) segítségével kaphatunk becslést az üvegházhatású gázok kibocsátására és a koncentrációváltozás egy-egy lehetséges menetére (IPCC, 2014).

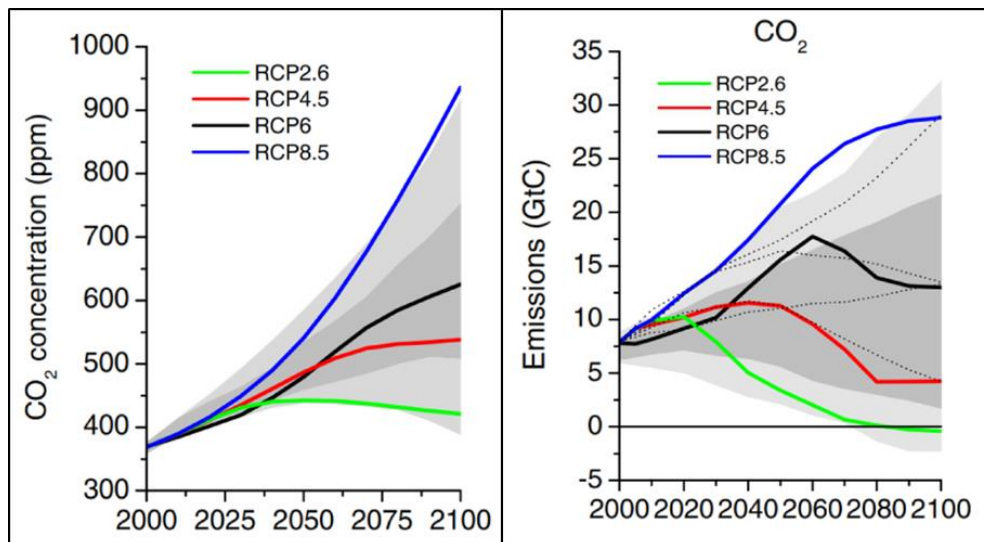
Ezek a következő generációs forgatókönyvek a kutatói közösség által kifejlesztett szcenáriók közül kerültek kiválasztásra, a szakmabeliek és a felhasználók által támasztott igények figyelembevételével.



2.ábra: a SRES és az RCP forgatókönyvek sugárzási kényszer pályáinak összehasonlítása (Cubasch et al., 2013)

A sugárzási kényszer szintjének és pályaalakjának függvényében összesen négyféle forgatókönyv típust határoztak meg a szakértők, amelyek az alapján különböztethetők meg, hogy mekkorának feltételezik a 2100-ra elért teljes sugárzási kényszer változását az ipari forradalom előtti értékhez képest: 8.5 W/m², 6.0 W/m², 4.5 W/m², vagy 2.6 W/m².

Sugárzási kényszer alatt a troposzférában elnyelt nettó sugárzási energia megváltozását értjük (IPCC, 2007).



3.ábra: Az RCP forgatókönyvekhez tartozó légköri CO₂ koncentrációk ppm egységben (bal oldal), valamint a CO₂ kibocsátási pályái Gt szén egységben (jobb oldal) (van Vuuren et al, 2011).

Az RCP 2.6 a legoptimistább forgatókönyv, 2,6 W/m²-es várható sugárzási kényszerrel 2100-ra. Az antropogén emisszió nagymértékű csökkenését feltételezi, jelentősen visszaesik az üvegházhatású gázok, szennyező aeroszolok kibocsátása, a fosszilis tüzelőanyagok használatának mérséklődése várható, valamint előtérbe kerül a megújuló energiaforrások és az atomenergia felhasználása (IPCC,2014).

Az RCP4.5-ös scenárióban a klímaváltozás mérséklése sokkal nagyobb szerephez jut. Szintén egy megadott referencia időszakhoz viszonyítottan vizsgálja a lehetséges változási irányokat. Ez a scenárió egy 2065-ös tetőpontra teszi a primerenergia felhasználás és a népesség maximumát, ezután csökkenést vetít előre. A fosszilis energiahordozók szerepe továbbra is nagymértékű, további CO₂ emelkedést eredményezve. 2080-ra a szén árak növekedéséből kifolyólag stabilizálódik a kibocsátás, így az évszázad végére 4,5 W/m² sugárzási kényszer várható (IPCC,2014).

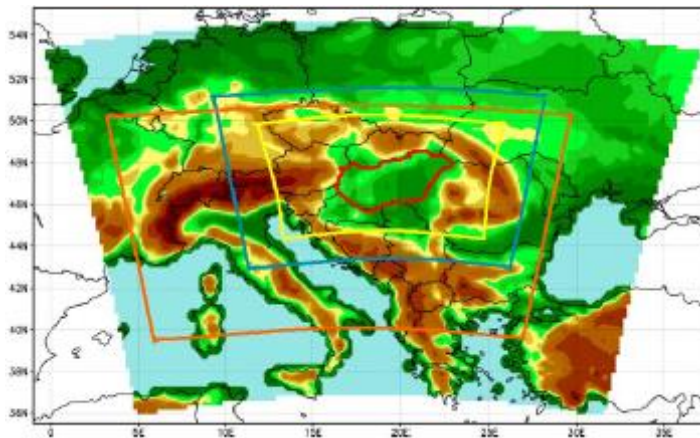
Az RCP 6.0 alapján a sugárzási kényszer 2100-ra eléri a 6 W/m²-es értéket. Ez a scenárió már figyelembe veszi a klímaváltozás mérséklésének tényét, amely azonban a referencia időszak során nem, csak a későbbiekben jelenik meg. Az üvegházhatású gázok kibocsátásának tetőzése 2060-ban várható, ezután csökkenés lesz megfigyelhető. Ebben a forgatókönyvben a megújuló energiaforrások nagyobb szerephez jutnak (IPCC,2014).

Az RCP8.5 forgatókönyv a legpesszimistább, az évszázad végére 8,5 W/m²-es sugárzási kényszert jelez előre. Nem szerepel benne az éghajlatváltozás mérséklésének faktora. Az üvegházhatású gázok koncentrációjának nagymértékű növekedését, folyamatosan

növekedő globális népességet vetít előre, amelynek következménye a megnövekedett energiaigény és a fosszilis energiahordozók még nagyobb szerepe, ami az üvegházhatású gázok még nagyobb kibocsátásához vezet (IPCC,2014).

2.2 Hazai klímamodellezés

A klímaváltozás teljes körű regionális elemzéséhez és számszerűsítéséhez megfelelő információkat a regionális klímamodellezés segítségével kaphatunk. A regionális klímamodellezés kifejlesztése Giorgi és munkatársai nevéhez köthető, amely során globális modellek képezik a regionális modellek egy bemenő paraméterét, ezáltal növelve a modell felbontását egy korlátos területen belül (Giorgi, 1990). A regionális elemzések lehetőséget nyújtanak a klímaváltozás területi hatásaira való speciális felkészülésre. Magyarországon a klímadinamikai tevékenységet a Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Program keretében 2005 és 2007 között megvalósuló „Magyarország éghajlatának dinamikai vizsgálata és a numerikus modelleken alapuló regionális klíma-előrejelzések módszertanának megalapozása” című projekt alapozta meg. Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) által koordinált projekt megvalósításában részt vett az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Meteorológiai Tanszéke, a Pécsi Tudományegyetem és az Env-in-Cent Kft. A négy regionális modell közül a REMO (Szépszó és Horányi, 2008) és az ALADIN-Climate (Csimá és Horányi, 2008) az OMSZ-nál, a RegCM (Bartholy et al., 2010; Torma et al., 2008, 2011) és a PRECIS (Bartholy et al., 2009, 2014; Pongrácz et al., 2011b; Pieczka et al., 2011, 2012) az ELTE Meteorológiai Tanszékén kerültek adaptálásra.



4.ábra: A magyarországi adaptált regionális klímamodellek integrálási tartománya. (A citromsárga, kék és narancságra területek rendre az ALADIN-Climate, RegCM és PRECIS modellek tartományát fedik le, a legnagyobb kivágat és az orográfia a REMO modellhez tartozik.) (Krüzsely et al, 2011)

Az alapok megteremtésével lehetőség nyílt a REMO modell segítségével a CLAVIER, az ALADIN-Climate és a RegCM modellek segítségével pedig a CECILIA (Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability) nemzetközi projektekbe való bekapcsolódásra. Ezek az európai uniós projektek Kelet-Közép-Európa területét vizsgálták többek között szélsőséges események, cirkulációs viszonyok, illetve vízgazdálkodás szempontjából (Sábitz *et al*, 2015). Az OMSZ és az ELTE Meteorológiai Tanszékén futtatott szimulációk eredményei kerültek felhasználásra a NATÉR, az RCMTÉR és a KRITÉR projekt keretein belül. A Copernicus Climate Change Service programjának 2016 és 2018 között futó DECM (Data Evaluation for Climate Models) projektében is részt vett az OMSZ, amely során olyan átfogó adatbázisok áttekintése és kategorizálása volt a cél, mint az EURO-CORDEX és a CMIP5 (Illy *et al.*, 2016, 2017, Szépszó *et al.*, 2017). A jelenleg is futó „Az éghajlatváltozás magyarországi hatásainak feltérképezése regionális klímamodell-szimulációk elvégzésével és reprezentatív adatbázis fejlesztésével” című KlimAdat projekt keretein belül elkészül egy, a Közép- és Kelet-Európát lefedő 10 km-es felbontású szimuláció, az RCP4.5 és az RCP8.5 forgatókönyvekre (Zsebeházi *et al*, 2018).

Az ELTE Meteorológiai Tanszékén adaptált egyik modell a trieszti Elméleti Fizikai Kutatóintézet (ICTP) által hozzáférhető RegCM (Regional Climate Model) hidrosztatikus modell, amelyet az amerikai Légköri Kutatások Nemzeti Központja fejlesztett ki (Krüzselyi *et al*, 2011). A modell egyik bemeneti paramétereként szerepel egy nagy felbontású adatbázis, amely magába foglalja a lefedett terület domborzati és felszínborítottsági paramétereit, emellett a modellbe ágyazták a szén-dioxid, ózon, vízgőz, oxigén, metán és a CFC gázok hatásait is (Bartholy *et al*. 2011). A modelladatok érzékenységvizsgálatának elemzése után a hibák minimalizálása érdekében a modell parametrizációjának finomítására került sor, amely 35-40%-os javulást eredményezett (Torma, 2011). Modellkísérletek készültek a korábbi SRES forgatókönyvekkel, valamint az újabb RCP forgatókönyvekkel is.

A PRECIS (Providing REgional Climates for Impacts Studies) modellt a Hadley Központ által fejlesztett kapcsolt óceán-légkör cirkulációs modell légköri komponenséből fejlesztették ki. Adaptálásakor a parametrizáció néhány módosítására volt szükség a pontosabb becslések elérése érdekében. Többek között figyelembe vették a szén-dioxid, a vízgőz és az ózon hatásait a sugárzási komponens esetében, a

konvekcióval, határréteg folyamatokkal és hidrológiai folyamatokkal kapcsolatos módosítások is történtek (*Bartholy et al, 2011*).

Az ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International) a francia meteorológiai szolgálat által kifejlesztett előrejelző modell, amely alapján elkészült az ALADIN-Climate korlátos tartományú regionális klímamodell, az ARPEGE-Climat globális cirkulációs modell határfeltételével. A modell parametrizációjának megváltoztatása során az integrált terület mérete lett megnövelve, ezzel kiküszöbölve a csapadékmezőben fellelt hibákat (*Szépszó et al, 2015*).

A Max Planck Intézet által fejlesztett REMO (REgional MOdell) modell a német meteorológiai szolgálat egy előrejelző modelljén alapuló regionális modell, amely az ECHAM5/MOI-OM globális általános cirkulációs modellt alkalmazza peremfeltételként, amelynek felbontása 200 km. A REMO felbontása 25 km, a modell az 1951-2100 közötti időszakot fedi le a SRES A1B forgatókönyve alapján. Az OMSZ jelenleg a modell 5.0 verzióját alkalmazza [2 – met.hu].

2.3 NATÉR

Magyarország Európa egyik legsérülékenyebb állama az éghajlatváltozást tekintve¹, így az éghajlati alkalmazkodóképesség erősítése a hazai klímapolitika egyik kiemelt feladata kell legyen. Ennek megfelelően törvényi szinten is 2012-től a hazai klímapolitikai tervezést és irányítást meghatározó jogszabályban is hangsúlyosan megjelentek az alkalmazkodást szabályozó jogszabályi részek. Az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezménye és annak Kiotói Jegyzőkönyve végrehajtási keretrendszeréről szóló 2007. évi LX. törvény 3. § (2) bekezdés c) pontja értelmében a nemzeti alkalmazkodás stratégiai keretrendszer támogatásául a nemzeti alkalmazkodási térinformatikai rendszer (továbbiakban: NATÉR) és az arra épülő területi és ágazati éghajlati sérülékenység vizsgálatok eredményei szolgálnak. A NATÉR működését szabályozó kormányrendeletet, a Kormány 2014 márciusában fogadta el.² A NATÉR-t létrehozó projekt 2013 és 2016 között zajlott a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet (továbbiakban: MFGI) önálló szervezeti egységeként működő Nemzeti Alkalmazkodási

¹ Az Országgyűlés 23/2018. (X. 31.) OGY határozata a 2018–2030 közötti időszakra vonatkozó, 2050-ig tartó időszakra kitekintést nyújtó második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégiáról; Magyar Közlöny; 2018. évi 168. szám; 2018. október 31.; 30940-30941. oldalak

² A Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer működésének részletes szabályairól szóló 94/2014. (III. 21.) Korm. rendelet

Központ koordinációjában. A projekt az Európai Gazdasági Térség Támogatási Alap (EGT ALAP) támogatásával jött létre az Alkalmazkodás az Éghajlatváltozáshoz Program keretein belül.

A NATÉR rendszer három fő részből épül fel. A metaadatbázis (1) tartalmazza a rendszert leíró legfontosabb információkat. A GeoDat adatbázis (2) tartalmazza a számítási eredményeket, amelyek a térképi megjelenítő rendszerbe (3) kikerülnek, amely egy 10*10 km-es felbontású rácshálót integráló, és több száz tematikus réteget tartalmazó rendszer.

Az első rendszerfejlesztési szakasz során előállított adatrétegek feltöltése után összesen 16 tématerületről – például hőhullámok, turisztikai klimatológia, villámárvíz veszélyeztetettség, éghajlat – található adatok jelenleg a rendszerben, amelyek 2016. május 1-jétől elérhetőek az interneten a <http://nagis.hu> vagy a <http://nater.mbfsz.gov.hu> címen. A rendszer számos ingyenesen hozzáférhető szolgáltatással rendelkezik, ezen felül a regisztrációhoz kötött szolgáltatások eléréséhez csak a NATÉR működését szabályozó kormányrendeletben meghatározott felhasználók jogosultak. A több mint 900 adatréteg és 650 térképes megjelenítés Magyarország területére vonatkozóan mutatja be az éghajlatváltozás várható hatásaival, a kitettséggel, az érzékenységgel, az alkalmazkodóképességgel, és a sérülékenységgel kapcsolatos kutatási eredményeket.

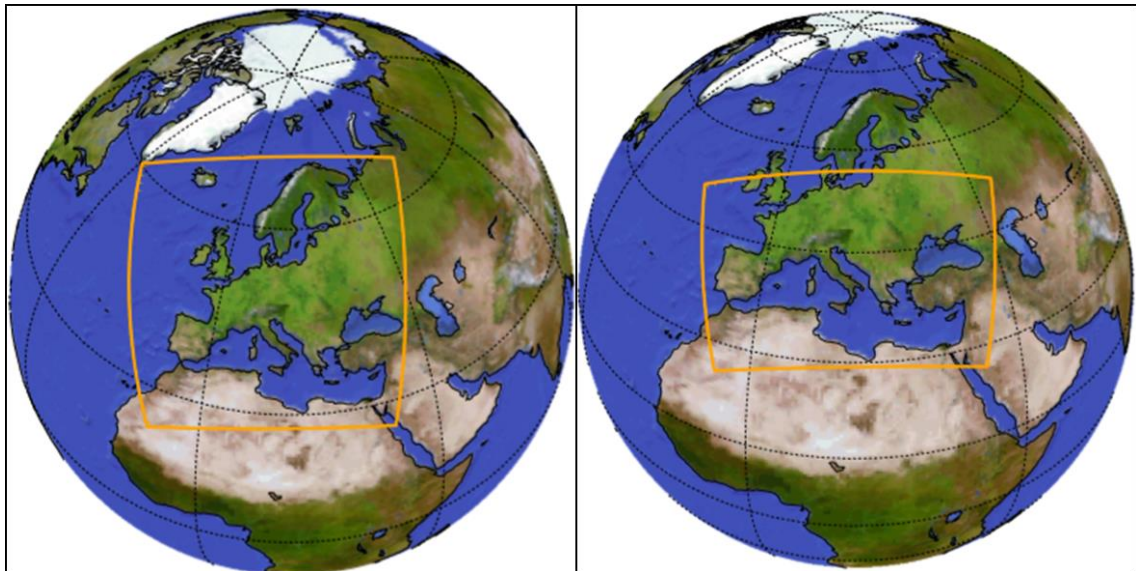
Az MFGI mellett az Alkalmazkodás az Éghajlatváltozáshoz Program társprojektjei is készítettek adatrétegeket a NATÉR rendszerbe. Ilyen társprojektek például az AGRATÉR (A NATÉR kiterjesztése az agrárszektorra) és a KRITÉR (A klímaváltozás okozta sérülékenység vizsgálata, különös tekintettel a turizmusra és a kritikus infrastruktúrákra).

A NATÉR üzemeltetését a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet (MFGI) jogutódja, a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat látja el.

A KEHOP-1.1.0-15-2016-00007 azonosító számú „NATÉR továbbfejlesztése” c. kiemelt projekt 2016 novemberében indult el, amelynek keretében – többek között – kialakításra kerülnek a NATÉR új moduljai és döntéstámogató rendszere. 2016. év végétől 2019-ig tartó kiemelt projekt keretein belül az eddigi adatbázisok, módszertanok és értékelési modulok kerülnek fejlesztésre, és nem utolsósorban megújul a rendszer klimatológiai adatbázisa is, a következő fejezetben részletesen ismertetett EURO-CORDEX adatbázisból származó adatokkal.

3. EURO-CORDEX adatok leválogatása

A CORDEX adatbázisa 14 régióra felosztva fedi le a Föld túlnyomó részét, ezek közül kettő tartalmazza Magyarországot, valamint a Kárpát-medence teljes területét. A Med-CORDEX a mediterrán térséget fedi le, míg az EURO-CORDEX Európát foglalja magában.



5.ábra: A EURO-CORDEX (bal oldal) és a MED-CORDEX (jobb oldal) régió [3–cordex.org]

Figyelembe véve a projekciók számát, illetve a térbeli kiterjedést, az EURO-CORDEX adatbázis került kiválasztásra a hatásvizsgálatok felhasználására.

Az EURO-CORDEX régió elforgatott pólusú koordinátarendszerben definiált téglalap, amelynek adatsorai $0,44^\circ$ -os és $0,11^\circ$ -os felbontással érhetőek el. A klímamodell szimulációk kiválasztása során a felbontás mértéke is szempontként szerepelt, ezért kerültek előtérbe a finomabb felbontású $0,11^\circ$ -os szimulációk. Az adatbázisban nagy számban érhetőek el a klíma projekciók, ezért a vizsgálatok céljait figyelembe véve kerültek kiválasztásra a felhasznált projekciók, amelyekről fontos megjegyezni, hogy a modellek bizonytalanságaival terheltek, ezáltal nem várható el az éghajlat jövőbeli alakulásának pontos becslése. A NATÉR hatásvizsgálataiban a két legfontosabb paraméter a hőmérséklet és a csapadék, így ezek, valamint az orográfiai adatok és a származtatott klimatológiai változók Duna vízgyűjtőre vonatkoztatott területi eloszlásainak vizsgálatával kerültek kiválasztásra a projekt során felhasznált klíma projekciók (2. táblázat). A NATÉR továbbfejlesztése egy közepesen konzervatív becslés felé irányult, a statisztikai sokaság átlagát leginkább reprezentáló projekciók

adatsorainak felhasználásával. Több mint harmincféle klíma projekció napi adatsorai kerültek letöltésre (1. táblázat), amelyekből a szimulációk kiválasztásához csapadék és hőmérséklet idősorok készültek. A megvizsgált projekciós tagokhoz tartozó modell-kombinációkat első lépésben tizenötörről nyolcra szűkítettük.

1.táblázat: A NATÉR továbbfejlesztése során megvizsgált CORDEX adatok

Regionális klímamodell	Globális klímamodell	Forgatókönyv	Regionális klímamodell	Globális klímamodell	Forgatókönyv
RCA4 (<i>Samuelsson, P. et al, 2011</i>)	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (<i>Voldoire et al., 2012</i>)	historical RCP4.5 RCP8.5	CCLM4-8-17	MPI-ESM-LR	historical RCP4.5 RCP8.5
RCA4	MOHC-HadGEM2-ES (<i>Martin, G. et al, 2011</i>)	historical RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	HIRHAM5	ICHEC-EC-EARTH	historical RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5
RCA4	ICHEC-EC-EARTH (<i>Hazeleger et al., 2010</i>)	historical RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	RACMO22E	MOHC-HadGEM2-ES	historical RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5
RCA4	MPI-ESM-LR (<i>Popke et al, 2013</i>)	historical RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	RACMO22E	ICHEC-EC-EARTH	historical RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5
CCLM4-8-17	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	historical RCP4.5 RCP8.5	REMO2009	MPI-ESM-LR	historical RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5
CCLM4-8-17	MOHC-HadGEM2-ES (<i>Collins et al., 2011</i>)	historical RCP4.5 RCP8.5	ALARO-0	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	historical RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5
CCLM4-8-17	ICHEC-EC-EARTH	historical RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	ALADIN5.3	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	historical RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5

A bizonytalansági alapú kiértékelés szempontjából fontos volt, hogy a modell-kombinációk a regionális, vagy globális modell tekintetében átfedjenek, ezáltal olyan információkra tehetünk szert, amelyekből látható a modellek későbbi eredményekre gyakorolt hatása. A forgatókönyvekből adódó bizonytalanság feltérképezéséhez felhasználtuk az RCP 2.6-os, az RCP4.5 és az RCP8.5 scenáriókat is, de ezek közül az

RCP 2.6-ost kizárólag a bizonytalanság vizsgálatához használtuk, mivel e forgatókönyv túl optimista jellege miatt már nem hasznosítható a továbbiakban.

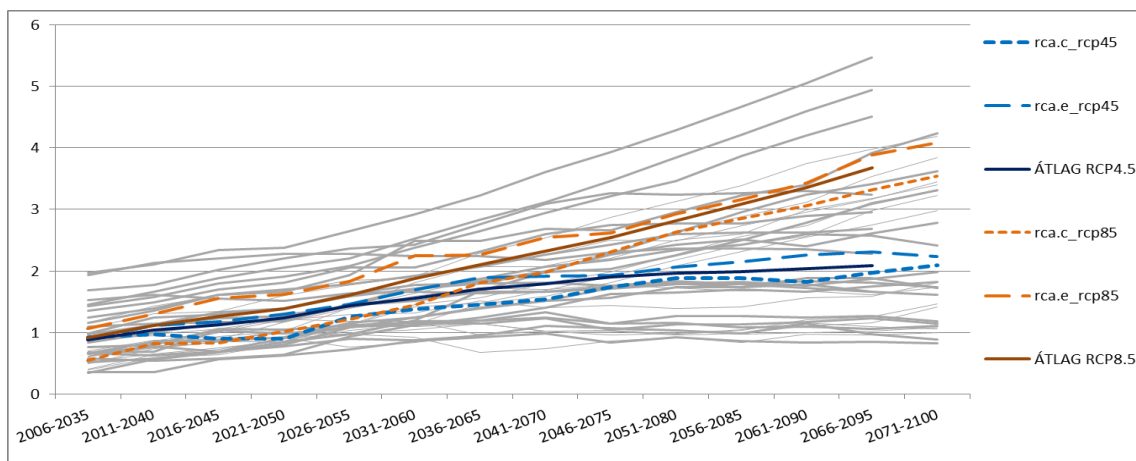
Így az éghajlati forgatókönyvek közül a két legnagyobb számban elérhető, közepesen optimista RCP4.5 és a magas sugárzási kényszert reprezentáló RCP8.5 scenáriók kerültek kiválasztásra (1.táblázat).

2. táblázat: A kiválasztott éghajlati projekciók

Regionális klímamodell	Globális klímamodell	Forgatókönyv
RCA4	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	historical RCP4.5 RCP8.5
RCA4	ICHEC-EC-EARTH	historical RCP4.5 RCP8.5

Az 6. és 7. ábrán láthatók a Magyarország területi átlagára vonatkozó hőmérséklet- és csapadék-változás idősorok a kiválasztott modell-kombinációkra, valamint a több mint 30 megvizsgált szimuláció és az ezekből készített átlag. Az idősorok éves átlagok harmincéves átlagolásával álltak elő.

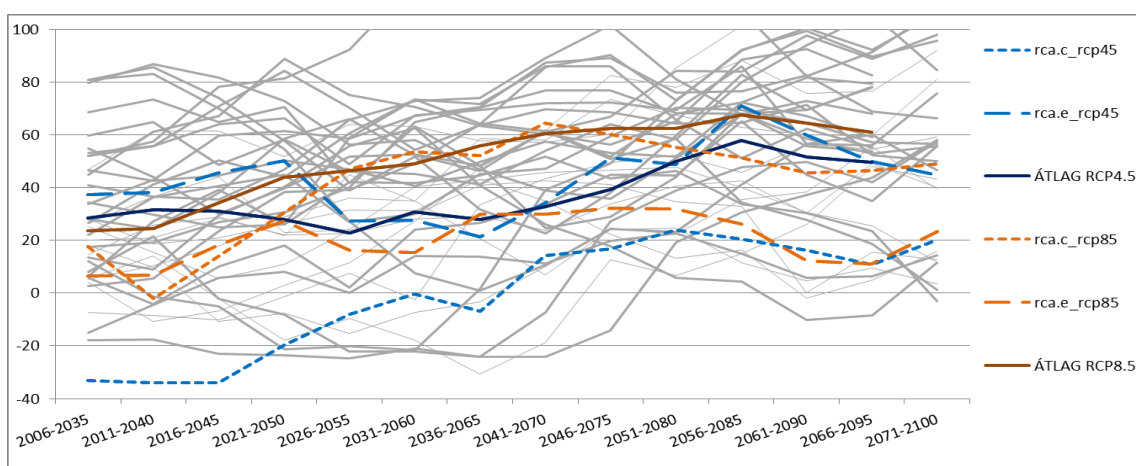
A hőmérsékleti idősorokon jól látható az évszázad végére emelkedő tendencia, illetve a két forgatókönyv közötti különbség. A két scenárió közül az RCP8.5 várható hőmérséklet-változás becslése a magasabb, az RCP 4.5-ös forgatókönyvet követő globális modellel meghajtott modell-kombinációk ennél alacsonyabb mértékű hőmérséklet emelkedést jeleznek. Az RCA4/CNRM-CM5 szimulációk a sokaság átlagához mérten alacsonyabb, az RCA4/EC-EARTH modelledmények pedig magasabb mértékű változást vetítenek előre (6.ábra).



6.ábra: Hőmérséklet-változás idősorok Magyarország területi átlagára vonatkozóan a CORDEX adatbázis CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (rca.c), EC-EARTH (rca.e) globális klímamodellek és az RCA4 regionális klímamodel kombinációjának adatai alapján.

(A függőleges tengely a várható hőmérséklet-változást adja meg °C-ban, a vízszintes tengelyen pedig az átlagolási időszak látható.)

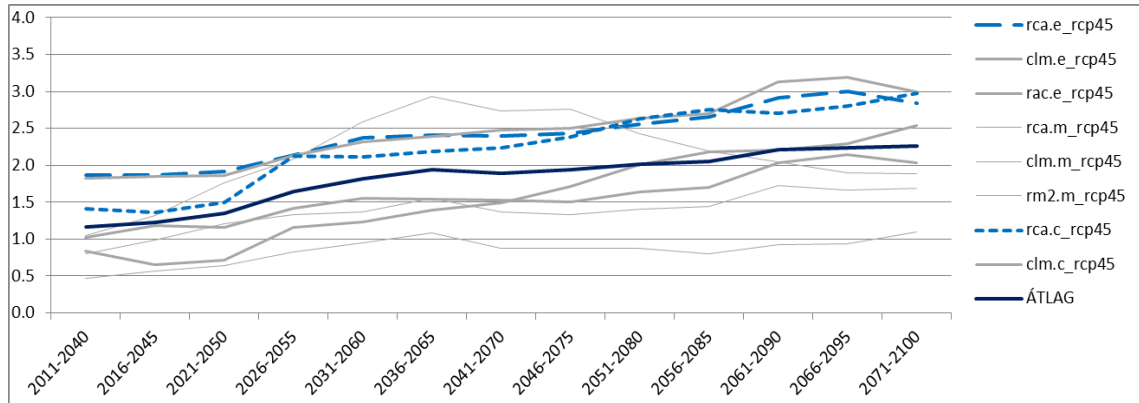
A csapadék alapú klimatológiai indikátorok esetében kevésbé hangsúlyos a differencia, mint a hőmérséklet esetében (Jacob et al, 2014). A csapadék-változás idősorok közül a CNRM-CM5 RCP4.5-ös forgatókönyvvel meghajtott szimulációjának adatsora – a többi kiválasztott szimulációval ellentétben – az évszázad első felére csökkenést projektál. A másik három kiválasztott szimuláció a csapadék mennyiségének pozitív eltolódását becsli és az általunk megvizsgált modell szimulációk átlagához jobban közelítenek (7.ábra).



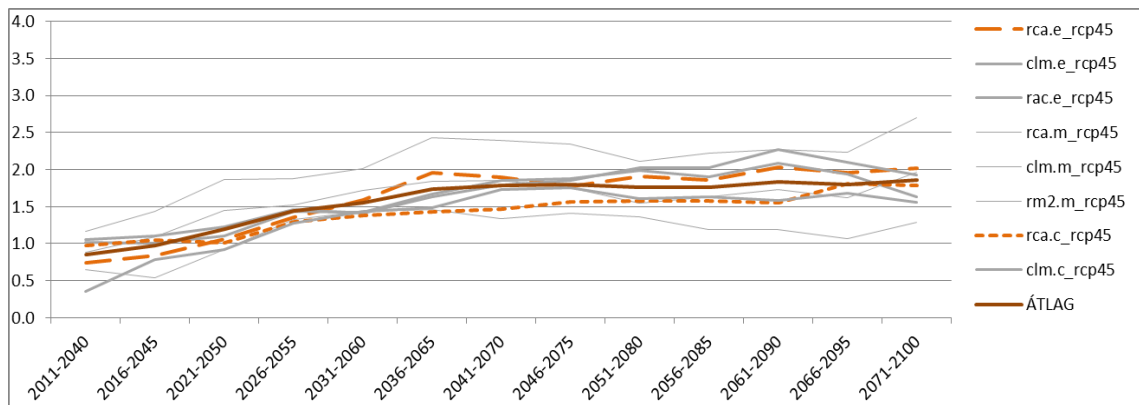
7.ábra: Csapadék-változás idősorok Magyarország területi átlagára CORDEX adatbázis CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (rca.c), EC-EARTH (rca.e) globális klímamodellek és az RCA4 regionális klímamodel kombinációjának adatai alapján.

(A függőleges tengely a várható csapadék-változást adja meg mm-ben, a vízszintes tengelyen pedig az átlagolási időszak látható.)

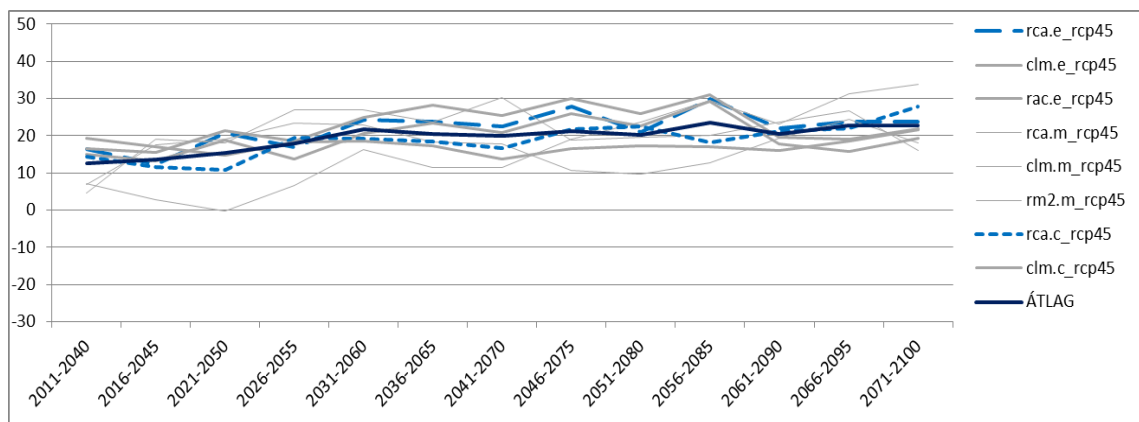
A kiválasztott projekciók adatait további elemzésnek vetettük alá. Éves adatok mellett évszakos adatokra is előálltak az idősorok kizárólag a már kiválasztott 8 modell adatsoraiból, ezáltal tovább szűkítve a projekciók számát.



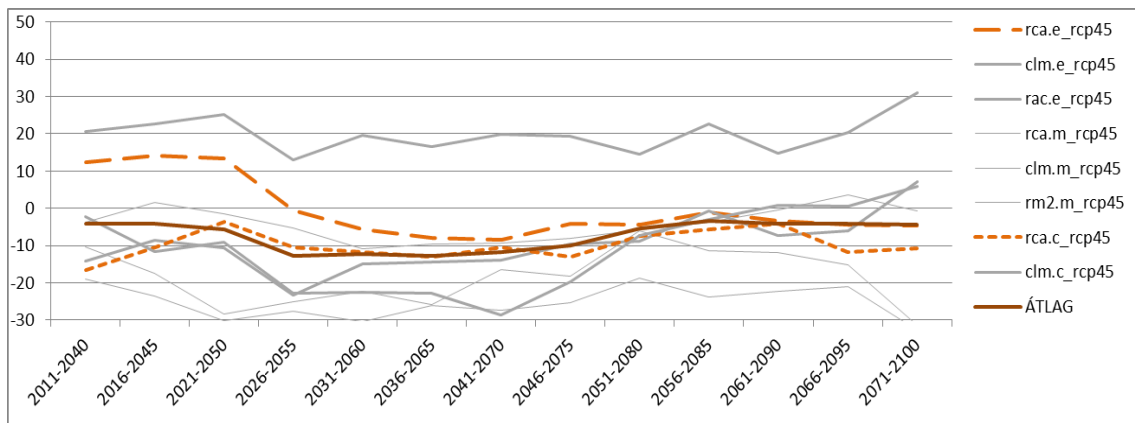
8.ábra: Téli hőmérséklet-változás idősorok Magyarország területi átlagára vonatkozóan a CORDEX adatbázis egyes tagjainak adatai alapján, az RCP 4.5-ös forgatókönyv mellett



9.ábra: Nyári hőmérséklet-változás idősorok Magyarország területi átlagára vonatkozóan a CORDEX adatbázis egyes tagjainak adatai alapján, az RCP 4.5-ös forgatókönyv mellett

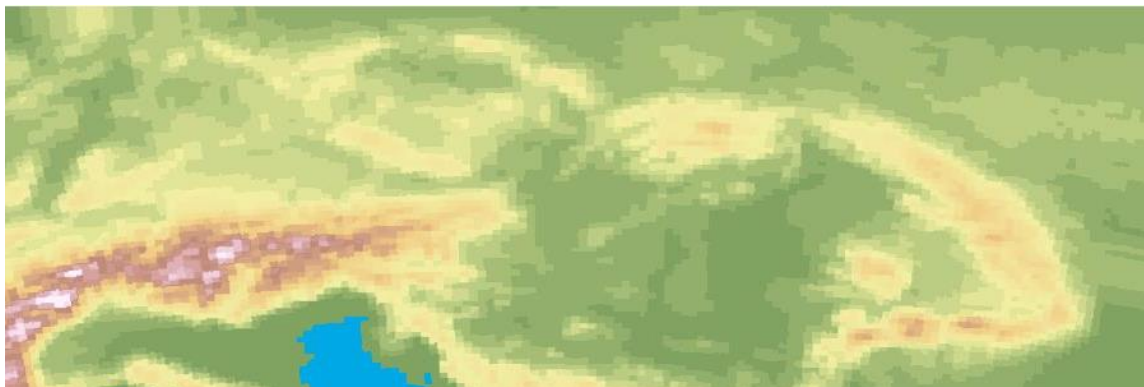


10.ábra: Téli csapadék-változás idősorok Magyarország területi átlagára vonatkozóan a CORDEX adatbázis egyes tagjainak adatai alapján, az RCP4.5-ös forgatókönyv mellett.



11.ábra: Nyári csapadék-változás idősorok Magyarország területi átlagára vonatkozóan a CORDEX adatbázis egyes tagjainak adatai alapján, az RCP4.5-ös forgatókönyv mellett.

A modellek kiválasztásánál további szempontként szerepelt, hogy a regionális modellek milyen pontossággal határozzák meg a domborzati adatokat, valamint a különböző paraméterek területi eloszlását, mivel Magyarország mellett egyes vizsgálatok kiterjedtek a Duna teljes vízgyűjtő területére.



12.ábra: A Duna-vízgyűjtő domborzati képe az RCA4 regionális klímamodell adatai alapján (A zöld színek a síkvidéki, alföldi területeket, a sárgától barnáig terjedő, sötétedő színek a hegységeket, a fehér szín az állandó hóhatárt mutatja, míg a kék szín a tengereket jelöli.)

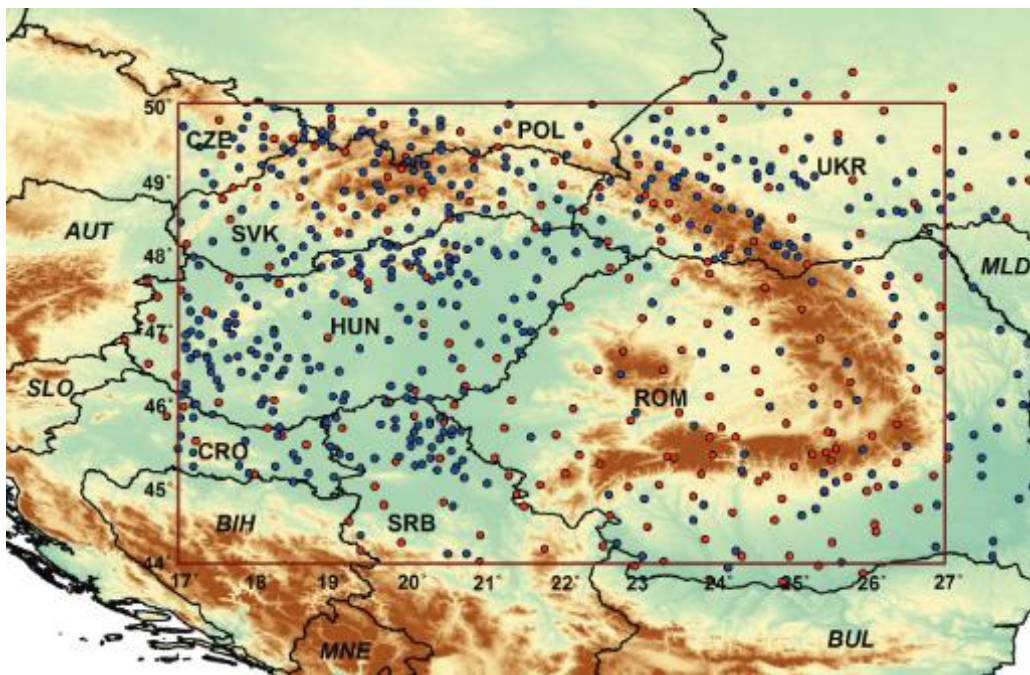
Utolsó lépésben az időjárási szélsőségek eloszlásának vizsgálatával történt a lehetséges kombinációk kiválogatása. Mindezek mellett a projekt során rendelkezésre álló számítási kapacitások figyelembevételével, projektvezetői döntés bevonásával került sor a 2. táblázatban felsorolt szimulációk kiválasztására.

4. Módszertan

4.1 Az első NATÉR projekt éghajlati kitétségi adatbázisáról

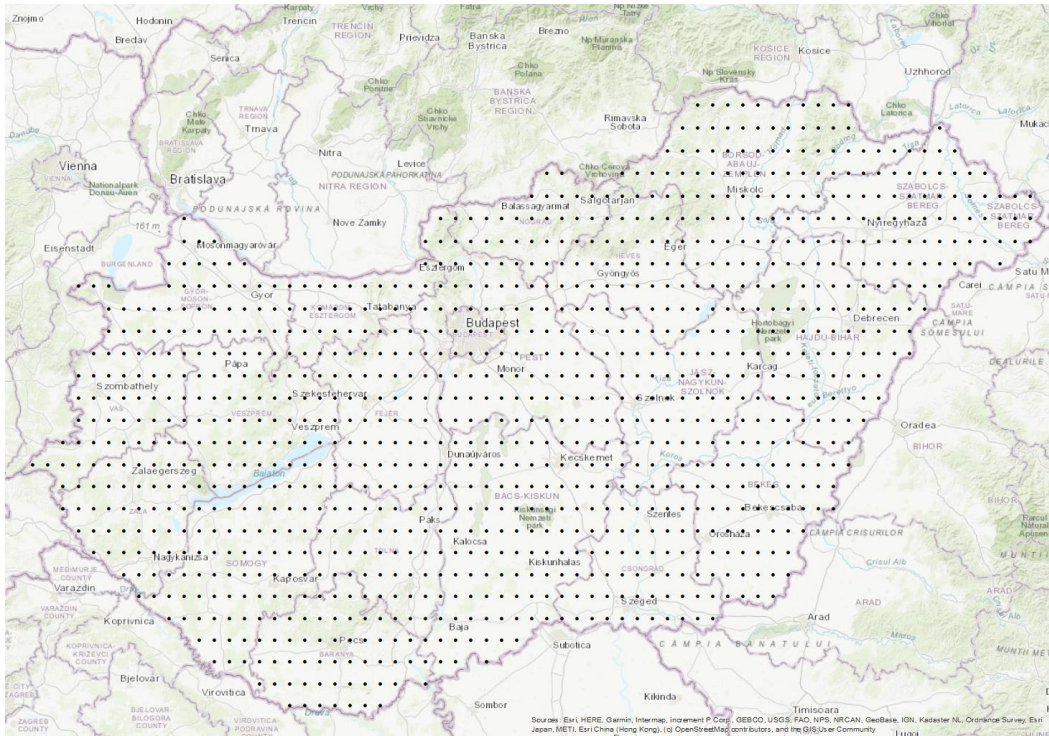
A NATÉR egy olyan átfogó térinformatikai rendszer, amely segítséget nyújt a klímaváltozáshoz való alkalmazkodás elősegítésében, a társadalmi-gazdasági hatások elemzésében, a stratégiai tervezésben, valamint különböző hatásvizsgálatokban is. A rendszer egyik legfontosabb részét az éghajlati rétegek képezik, amelyek meteorológiai méréseken (13. ábra), illetve klímamodell- adatokon alapulnak. Ezekre az adatokra épülnek az objektív hatásvizsgálatok, amelyek irányt mutatnak a megfelelő felkészüléshez (Szépszó *et al*, 2016).

A NATÉR rendszerben felhasznált meteorológiai adatokat az OMSZ, valamint az ELTE Meteorológiai Tanszéke biztosította. Az adatok egyik részét a CARPATCLIM adatbázis klimatológiai méréseken alapuló adatbázisa képezte (13.ábra).



13.ábra: A CARPATCLIM adatbázis mérőhálózata (Spinoni *et al*, 2015)

Mivel ez nem fedi le hiánytalanul Magyarország területét, az OMSZ által biztosított CARPATCLIM-HU 0,1°-os felbontású szabályos rácstra interpolált adatbázisának 1961-2010 közötti adatai kerültek átadásra a projekt keretein belül (14.ábra). Ebből az adatsorból az 1961-1990 közötti 30 éves időszak lett kiválasztva referencia időszakként a vizsgálatokhoz (Homolya *et al*, 2017).



14.ábra: A CARPATCLIM-HU adatbázis Magyarországot lefedő szabályos rácshálója

A mérési adatok mellett az OMSZ-nál adaptált ALADIN-Climate, valamint az ELTE Meteorológiai Tanszékén adaptált RegCM regionális klímamodellek adatai szolgálták a jövőbeli klíma becslésének alapjául. A két modell adataiból az 1961-1990, 2021-2050 és a 2071-2100 közötti klímaablakokra kerültek átadásra hőmérséklet, csapadék és globálsugárzás adatok. A modellek az IPCC negyedik helyzetértékelő jelentésében szereplő SRES forgatókönyvek közül az A1B közepesen optimista forgatókönyve alapján álltak elő. A NATÉR rendszer Éghajlat témakörében elérhető származtatott paraméterek csoportjai:

- hőmérséklet,
- csapadék,
- hőmérsékleti indexek,
- aszályindexek,
- csapadékindexek,
- globálsugárzás,
- potenciális evapotranszpiráció,
- klimatikus vízmérleg.

A paraméterek mért klimatológiai és klímamodell adatokból egyaránt előálltak.

Az ALADIN4.5 és a RegCM3.1 modellszimulációkból a következő eredmények lettek elérhetők:

- 2 méteres közép-, minimum-, maximumhőmérséklet,
- csapadékösszeg,
- átlagos 2 és 10 méteres horizontális szélsőségek,
- globálsugárzás,
- 2 méteres relatív páratartalom,
- SPI aszályindex 3, 6 és 12 hónapra átlagolva (*Szépszó et al, 2016*).

Az RCMTÉR projekt során végzett fejlesztésekkel az ALADIN 5.2 és a RegCM 4.3 klímamodellek szimulációjából kerültek adatok a rendszerbe. Ezek a szimulációk már az RCP8.5 és RCP4.5-ös forgatókönyveket alkalmazták, az így előállt kéttagú ensemble segítségével képet adva az antropogén tevékenység bizonytalanságáról. A hőmérséklet változásának és a csapadék becslésének bizonytalanságainak kiértékeléséhez azonban legalább két modell két forgatókönyvvel való elemzése szükséges (*Szépszó et al, 2016*). A rendszer továbbfejlesztése során beépítésre kerülő két forgatókönyvre alapozott két modellkombináció adatai ehhez megfelelő alapot biztosítanak.

4.2 Ivóvízbázisok klímaváltozással szembeni éghajlati sérülékenységi vizsgálata

4.2.1 Az ivóvízbázisok éghajlati sérülékenységének vizsgálata az első NATÉR projekt keretében

Az első NATÉR projekt keretében, az egyik tudományos módszertani és részben modellezési kihívásokkal teli részfeladat a magyarországi ivóvízbázisok klímasérülékenységének meghatározása és jellemzése volt.

Döntően azért esett e természeti erőforrás klíma sérülékenységi vizsgálatára a projektet végrehajtók választása, mert Magyarország ivóvízkészletének 95%-a felszín alatti vizekből származik (*Pálvölgyi és Csete, 2012*), és a felszín alatti vizek jelentősége az ivóvízellátásban így megkérdőjelezhetetlen. A projektet megvalósító intézménynél nagyrészt rendelkezésre álltak a hazai ivóvízellátásban kiemelkedő jelentőséggel bíró felszín alatti víztípusokra vonatkozó területi digitális információk, víztest szintű részletezettséggel. Emellett egy olyan társadalmi gazdasági szempontból létfontosságú szolgáltatási ágazatban, mint az ivóvízellátás, a hosszú távú biztonságos működtetés

szempontjából kiemelt jelentőséggel bír a klímaváltozás hatásaira bekövetkező változások idejekorán történő felismerése és beépítése a fejlesztéseket megalapozó döntéshozatali folyamatokba.

Tény, hogy egyes múltbéli szélsőséges időjárási helyzetek okoztak már megoldandó problémát a hazai ivóvízellátásban is. Erre legjobb példák a nyári tartósan száraz időszakokban (2003, 2011) lecsökkenő vízkészletek és az ugyanekkor fokozódó lakossági és közületi vízigényből fakadó időszakos vízhiányok és ebből következő ideiglenes vízkorlátozások, vagy a szélsőségesen csapadékos időjárás hatására kialakult árvizek (2010, 2015) miatt bemosódó és a fertőzésveszélyt előidéző szennyeződések további terjedését megakadályozó intézkedések, így egyes vízbázisok vízkitermelésének ideiglenes felfüggesztése közegészségügyi okokból. Mivel ilyen szélsőséges időjárási jelenségekre egyre nagyobb gyakorisággal lehet számítani a klímaváltozás következtében, a megelőző felkészülés hatékonyságának növelése is szükségessé tette a klímaváltozás hazai ivóvízbázisokra gyakorolt hatásának újszerű és komplex vizsgálatát.

A Víz Keretirányelv³ által előírt, vízgyűjtő-gazdálkodási tervek részét képezi a változó klimatikus viszonyok figyelembevétele, azonban a részletes vizsgálatok, illetve az intézkedéseket megalapozó célirányos adatrendszerek ugyanakkor még nem álltak rendelkezésre (Rotárné Szalkai. et al., 2016).

A klímaváltozás felszín alatti ivóvízbázisokra gyakorolt hatása térségenként változó, amely elsősorban az éghajlati-, földtani-, vízföldtani adottságok függvénye. Ugyanakkor a víztestek kitétsége (éghajlati meghatározottság), a vízbázisok érzékenysége (földtani adottságok) mellett nemcsak a természeti tényezők befolyásolják egy adott térség ivóvízbázisainak éghajlati sérülékenységét, hanem az ivóvízbázisokra gyakorolt antropogén hatások, illetve a természeti és emberi hatások csökkentésére, kivédésére, megelőzésére vonatkozó, és a társadalmi-gazdasági rendszerek alkalmazkodását befolyásoló beavatkozások, folyamatok és jelenségek egyaránt. Az első NATÉR projekt ivóvízbázisainak vizsgálatakor ezért célirányosan került kialakításra egy olyan adatbázis rendszer, amely mind a klimatikus paramétereket, mind a vízföldtani adottságokat, mind az emberi beavatkozásokat számszerűsítette, és amely végső soron azt a célt szolgálta, hogy az egyes víztestek minősítésre kerüljenek az éghajlati sérülékenységük egymáshoz viszonyított és térségenként eltérő jellemzői alapján.

³ Az Európai Parlament és a Tanács 2000/60/EK irányelve (2000. október 23.) a vízpolitika terén a közösségi fellépés kereteinek meghatározásáról.

A vízbázisok klíma-sérülékenységének vizsgálatához a NATÉR rendszer egységes értékelési keretrendszereként alkalmazott, és a CLAVIER nemzetközi klímakutatási projektben kidolgozott, ún. CIVAS modellt (Climate Impact and Vulnerability Assessment Scheme) használták a kutatók. (Pálvölgyi *et al.*, 2008).

A vizsgálati keretmodell alapján az éghajlatváltozás ivóvízbázisokra gyakorolt hatásait a kutatók az eső NATÉR projektben az éghajlati kitettség (exposure), a felszín alatti közeg érzékenysége (sensitivity), az ezek eredőjeként kialakuló és az ivóvízbázisokat befolyásoló várható hatások (impact) az ezekre adott társadalmi és gazdasági válaszok, azaz az alkalmazkodás (adaptive capacity) és az ezek metszéspontjaként meghatározott éghajlati sérülékenység (vulnerability) meghatározásával értékelték ki.

Az ivóvízbázisok térségi sérülékenységének vizsgálatát teljes körűen egy regionális vízmű társaság a Duna Menti Regionális Vízmű (DMRV) Zrt. illetékességi területére készítették el a kutatók, pilot projekt jelleggel.

A felszín alatti térbe beszivárgó vizek mennyiségét jelentősen befolyásolja a csapadék éven belüli eloszlása. A téli hidrológiai félév csapadékmennyisége nagymértékben meghatározza az éves beszivárgás értékét. A nyári szárazabb félév, pedig a párolgás révén csökkenti a hasznosítható vízkészleteket. Az **összetett éghajlati kitettségi indikátort** a UNEP (United Nations Environment Programme) ariditási index és a klimatikus vízmérleg értékéből számították. Ezek segítségével mind a nyári félévek, mind a téli félévek jól jellemezhetők voltak. A partiszűrési vízbázisoknál törekedtek figyelembe venni a felszíni vizek vízjárásából adódó kitettséget is, ehhez azonban nem álltak rendelkezésre megfelelő idősorok, illetve nem tudták figyelembe venni az országhatáron túli vízgyűjtők csapadék idősorait sem (Rotárné Szalkai. *et al.*, 2016).

Az **egyes vízadók érzékenységi kategorizálását** a mintaterületen is az országos vizsgálathoz hasonló módszerrel végezték.

Az érzékenységi kategóriákat a vízbázist meghatározó vízadó képződmény hidrogeológiai jellege alapján vízbázis típusok kialakításával határozták meg:

- porózus vízadóval rendelkező vízbázisok,
- karsztos vízadóval rendelkező vízbázisok,
- repedezett vízadóval jellemzett vízbázisok,
- parti szűrésű rendszerek,
- felszíni vizek.

A hidrológiai rendszer sajátossága alapján a vízbázis típusokat további kategóriákra osztották. A porózus vízbázisokat a vízadó mélysége függvényében három

kategóriába különítették el:

- 30 m-nél sekélyebb,
- 30-100 m közötti,
- 100 m-nél mélyebb.

A karsztos vízáradókat a karsztjáratok jellege, a fedő üledékek vastagsága, illetve a közvetlen beszivárgási területet jelentő nyíltkarsztos területekkel való hidraulikai kapcsolat figyelembevételével kategorizálták az alábbiak szerint:

- járatos karsztos vízáradó,
- fedetlen karsztos vízáradó beszivárgási területtel közvetlen kapcsolatban,
- fedett karsztos vízáradó beszivárgási területtel közvetlen kapcsolatban,
- karsztos vízáradó nagy regionális áramlási rendszer mélyebb zónájában.

A klímaérzékenység mértékét mindezek alapján négy kategóriába sorolták:

- nagyon érzékeny,
- érzékeny,
- mérsékelten érzékeny,
- nincs közvetlen hatás.

A DMRV Zrt. illetékességi területén a vízbázisok pontszerű megjelenítésével elkészítették a klímaérzékenység és klímaérzékenység mértéke tematikájú kategorizálást és ezek térképi ábrázolását.

Az **alkalmazkodóképesség** jellemzésére az országosan elérhető statisztikai adatsorokból származó információkat, illetve a DMRV ZRt.-től származó infrastrukturális mutatókat használták fel.

Az alkalmazkodóképesség társadalmi–gazdasági hatótényezőiként az alábbi adatsorokat hasznosították:

- a) egy lakosra jutó ivóvízfogyasztás, 2013 (m³/fő)
- b) egy lakosra jutó összes belföldi jövedelem, 2013 (Ft/fő/év)

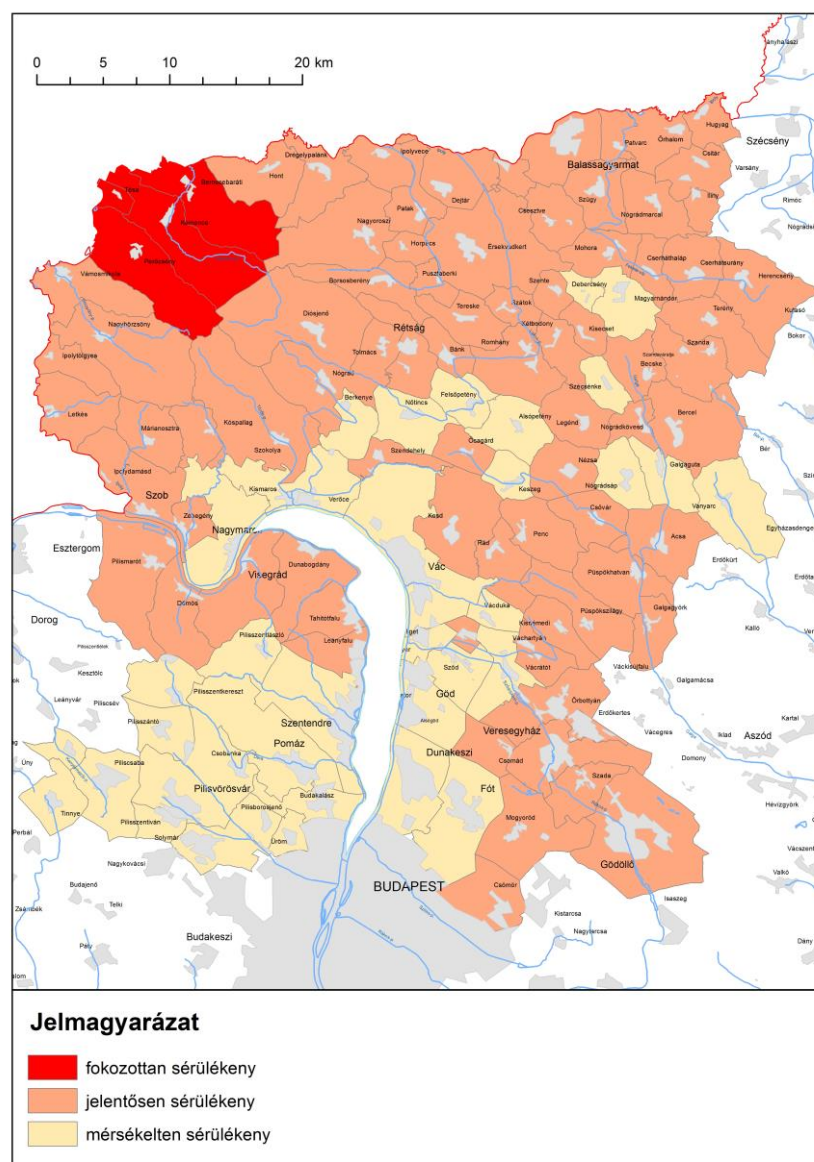
Az alkalmazkodóképesség infrastrukturális tényezőiként az alábbi három adatsort került feldolgozásra:

- a) egy adott települést közvetlenül ellátó ivóvízbázisok száma
- b) az ivóvízbázis bővíthetősége (kategória)
- c) az ivóvízellátás kapacitásának növelhetősége (kategória)

Az egyes mutatókhoz egyenként kategóriaértékeket határoztak meg, és ezen kategóriaértékek összegzésével alakították ki az egyes településekre vonatkoztatott alkalmazkodóképességet kifejező komplex mutatót.

A mintatárság ivóvízbázisai éghajlati sérülékenység mértékének meghatározására a kitettség, érzékenység, alkalmazkodóképesség mutatói alapján olyan relatív kategóriákat határoztak meg, ahol az egyes vizsgált keretmodellben szereplő tényezőket azonos súllyal vették figyelembe és a kiszámított indexekből komplex indikátorokat képeztek és ezeket kategorizálták újra.

A vízbázisok klíma-sérülékenységét mind a két ismertett klímamoddellel, a projekciókban szereplő mindkét klímaablakra meghatározták és mindezeket térképeken is ábrázolták (Rotárné Szalkai. et al., 2016).



15. ábra: Ivóvízbázisok klíma-sérülékenysége az ALADIN-Climate modell adatai alapján a 2021-2050 közötti időszakra (Rotárné Szalkai. et al., 2016)

4.2.2 Az ivóvízbázisok éghajlati sérülékenységének vizsgálata a NATÉR továbbfejlesztése projekt keretében

Munkám során az ivóvízbázisok és a hazai ivóvízellátás éghajlati sérülékenység vizsgálatának – előzőekben leírt módszertana – továbbfejlesztését végeztem el, valamint a vizsgálati adatbázisok frissítésével lehetőségem nyílt a legújabb éghajlati forгатókönyveken alapuló sérülékenységi vizsgálat kidolgozására. Az éghajlati kitettség és a vízbázisok érzékenységének azonos súlyozással történő figyelembevételével határoztam meg a klímaváltozás hatását az egyes települések vízellátására, az alkalmazkodóképesség kiszámítása pedig reprezentálja a gazdasági, társadalmi és technológiai szükségletek elérhetőségét adott vízellátási rendszerekre. Ezek együttesével kialakított komplex indexrendszer alkalmazásával határozható meg egy vízellátási rendszer klíma sérülékenysége. A kitettségi, érzékenységi és alkalmazkodási indexek esetében is településekhez kapcsolva jellemeztem a kiválasztott mintaterületet. Az adatok feldolgozása, az indikátorok kiszámítása Fortran programokkal, az indexek települési értékei, azok összegzése, illetve a komplex sérülékenységi indexek meghatározása Microsoft Excel környezetben, míg térképi ábrázolásuk ArcGIS térinformatikai szoftver segítségével készült.

4.2.2.1 A vizsgált mintaterület (vízmű illetékességi terület) kiválasztása

A mintaterület kiválasztása során fontos szempont volt, hogy egy olyan regionális vízi közmű szolgáltató területét vizsgálhassam, amely több vízbázis típusra is kiterjed, valamint területén a klímaváltozás hatásainak leginkább kitett parti szűrésű rendszer is hangsúlyosan jelen legyen. A parti szűrésű rendszerek olyan speciális, a nagyobb folyók allúviumain elhelyezkedő vízbázisokat jelentenek, ahol a kitermelt víz felszín alatti vízből származik, de a vízkészlet utánpótlása közvetve a felszíni vízből történik. Az ország geomorfológiai helyzetéből adódóan a nagyobb folyóink a Kárpát-medencét körbevevő hegyvidéki területeken erednek, illetve vízhozamuk jelentős része is innen származik. Fő vízfolyásaink vízjárását ezáltal az országhatáron kívül eső, magasabban fekvő területek klíma-kitettsége (ezen belül első sorban az ott hullott csapadék mennyisége) határozza meg (Kovács, 2009). A vízfolyások szélsőséges vízállása mennyiségi és minőségi problémát is jelenthet a parti szűrésű rendszerek állapotában. Kisvízi időszakokban a háttérterületekből származó szennyező vizek, míg nagyvízi időszakokban a szűrési folyamat felgyorsulása okozhatja a szennyezést (Kármán, 2009).

Annak figyelembevételével, hogy a jelenleg Magyarországon üzemelő parti szűrésű rendszerek döntően a Duna mentén helyezkednek el, illetve az érzékenység és alkalmazkodóképesség vizsgálatához szükséges adatok legteljesebb mértékben az egyik legnagyobb hazai illetékességi területű vízműtől érkeztek be időben, a NATÉR továbbfejlesztése projekt során kiválasztott tíz szolgáltató közül a Dunántúli Regionális Vízmű Zrt. (DRV) került kiválasztásra. Azért is volt megfelelő választás a DRV Zrt., mert a működési területén kellően reprezentálja mind a különféle típusú hazai ivóvízbázisokat (felszíni, karsztos, partiszűrésű és porózus), mind az eltérő típusú vízhasználatokat (kistelepülési, városi, mezőgazdasági és ipari stb. A DRV Zrt. Baranya, Fejér, Somogy, Tolna, Veszprém és Zala megyékben 378 település és ezáltal 830.000 fő ivóvízellátását biztosítva az ország legnagyobb vízi közmű szolgáltatója. Éves ivóvíztermelése 43 millió m³, amelynek 46%-a karsztvízből, 24%-a felszíni vízáradóból, 16%-a rétegvízből és 14%-a parti szűrésű vízből származik. Több regionális ivóvízrendszer működtetését látja el, köztük a Balatoni regionális ivóvízrendszerét is. További szolgáltatásaik közé tartozik a szennyvízkezelés, diagnosztika, laboratóriumi vizsgálatok, vízmérők hitelesítése és építési munkálatok is [4 – drv.hu].

4.2.2.1 Kitettség

Az éghajlati kitettség vizsgálatához a CARPATCLIM-HU adatbázis 1971-2000 közötti időszaka, valamint a kiválasztott klímamodell-kombinációk 1971-2000, 2021-2050 és 2071-2100 közötti klímaablakainak adatai kerültek feldolgozásra, az IPCC ötödik helyzetértékelő jelentésében szereplő újabb éghajlati forgatókönyvek felhasználásával. Az elemzéshez kétféle indikátor került kiválasztásra, a hidrológiai félévek csapadékösszegeinek aránya és a klimatikus vízmérleg.

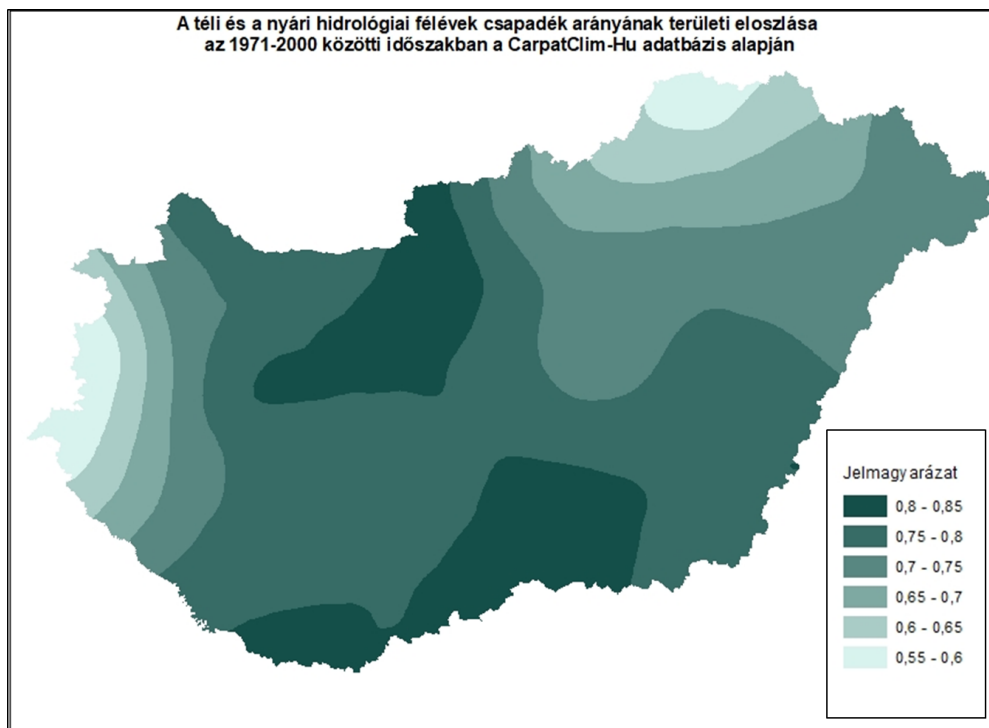
A csapadék éves eloszlása nagy hatással van a felszín alatti rétegekbe beszivárgóvíz mennyiségére, különös tekintettel a téli félévben lehullott csapadékmennyiségre. (Kessler, 1954). A téli és a nyári hidrológiai félévek csapadékviszonyainak vizsgálatának céljából került bevezetésre az a dimenzió nélküli arányszám (P_a), amely a két időszak hányadosaként áll elő:

$$P_a = \frac{P_{\text{tél}}}{P_{\text{nyár}}} \quad (1)$$

A téli félév ($P_{\text{tél}}$) az adott évet megelőző év november 1-jétől az aktuális év április 31-ig tartó időszak. A nyári félév ($P_{\text{nyár}}$) május 1-jétől október 31-ig tart. Ezen két időszak csapadékösszegeinek hányadosából áll elő a csapadékarány. Amennyiben az arányszám

egynél nagyobb, az a téli félévre vonatkozó csapadéktöbbletet jelent, az egynél kisebb érték a nyári hidrológiai félév többletét jelenti (Rotárné Szalkai et al, 2015). Napi adatokból kerültek kiszámításra az éves arányszámok, azokból pedig a harmincéves átlagok. A klímaablakok és a referencia időszak harmincéves átlagainak különbségéből számított differencia értékek kerültek felhasználásra a vizsgálat során a változás mértékének kimutatása céljából.

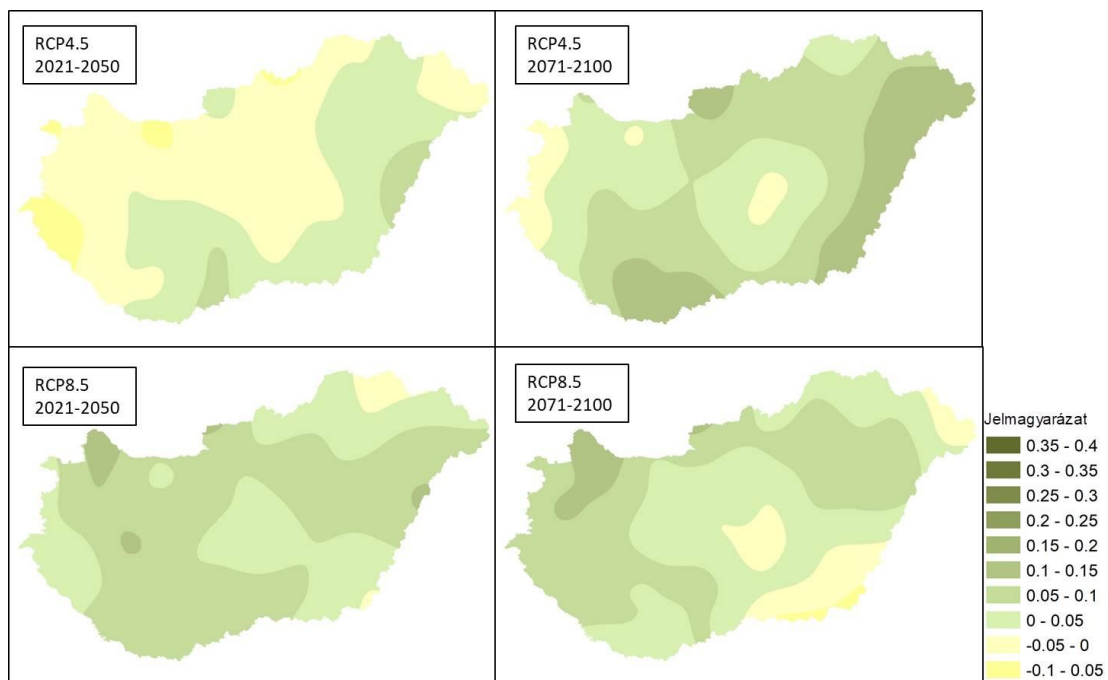
A CARPATCLIM-HU adatbázis felhasználásával számított 1971-2000 közötti időszak téli és nyári hidrológiai félévek csapadékarányának 30 éves átlaga látható a 16.ábrán. Az ország területét ebben az időszakban nyári csapadéktöbblet jellemezte a téli félévéhez képest. A legalacsonyabb értékek az ország nyugati és északkeleti térségében fordultak elő, ezeken a területeken volt a legnagyobb különbség a két félév csapadékösszegei között.



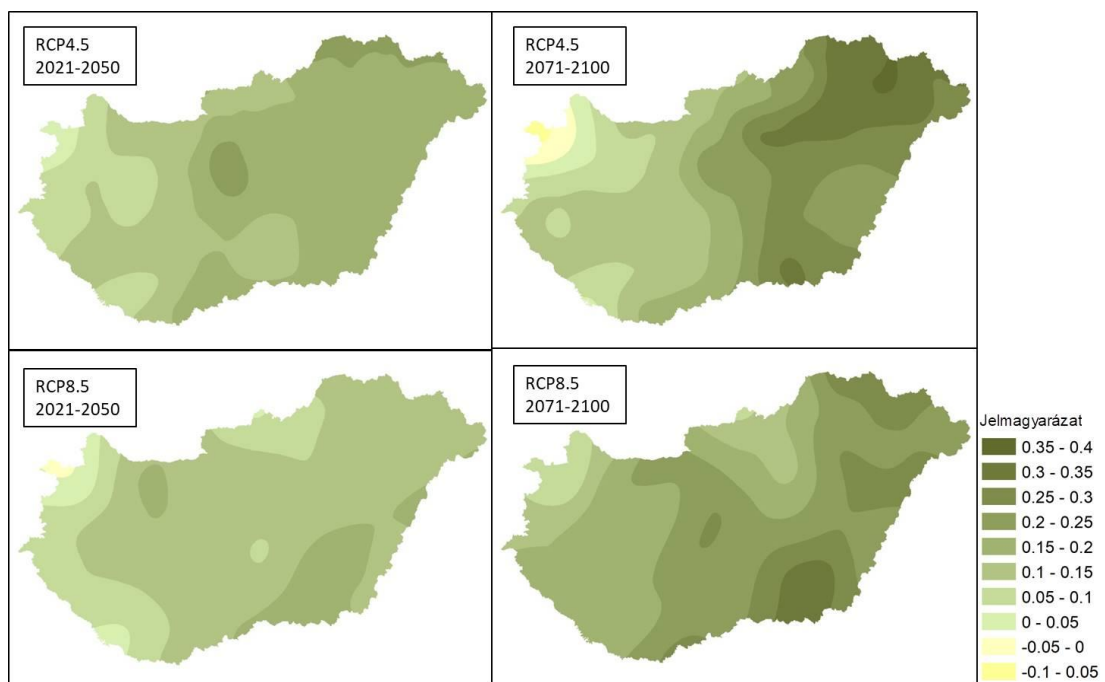
16.ábra: A téli és a nyári hidrológiai félévek csapadék arányainak eloszlása Magyarország területén 1971-2000 között a CARPATCLIM-HU adatbázis alapján

Az EC-EARTH modellel meghajtott szimuláció (17.ábra) a csapadékarány kis mértékű, de az ország kétharmadára kiterjedő negatív eltolódását feltételezi az évszázad közepére az RCP4.5-ös forgatókönyv mellett. A modell minden szimulációjában található negatív eltolódások, az RCP8.5-ös forgatókönyv mellett ez az ország kisebb, északkeleti, illetve alföldi, délalföldi régióit érintve. A CNRM-CM5 modellfuttatásai (18.ábra) alapján a csapadékarány túlnyomó többségében pozitív irányba tolódik el, legerőteljesebben az ország keleti hányadában.

Összesítve a modellpárok eredményeit, a csapadékarány pozitív eltolódását feltételezik, a lehulló csapadékmennyiség arányosan a téli félévben lesz több, ezáltal a nyári félév szárazabbá válása várható.



17.ábra: A téli és a nyári hidrológiai félév csapadékarányának várható változása a CNRM-CM5 globális klímamoddellel meghajtott RCA4 regionális klímamodell szimulációval, az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek alapján a 2021-2050 és a 2071-2100 közötti időszakokra az 1971-2000 közötti referencia időszakhoz viszonyítva



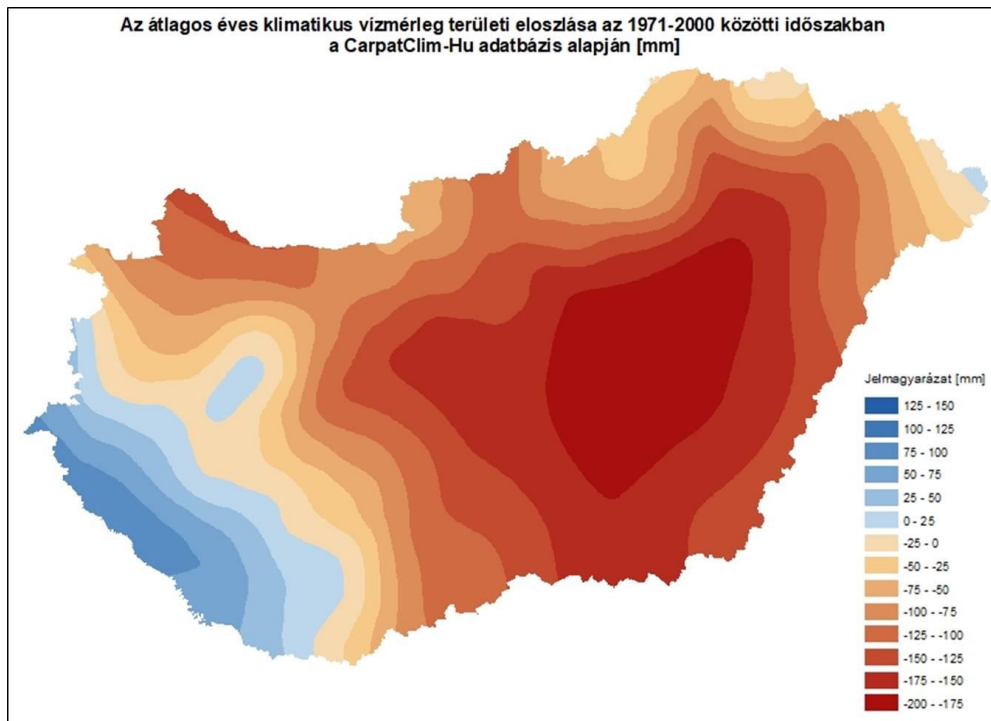
18.ábra: A téli és a nyári hidrológiai félév csapadékarányának várható változása az EC-EARTH globális klímamoddellel meghajtott RCA4 regionális klímamodell szimulációval, az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek alapján a 2021-2050 és a 2071-2100 közötti időszakokra az 1971-2000 közötti referencia időszakhoz viszonyítva

A klimatikus vízmérleg (WB) a vízellátottság elemzéséhez szolgáltat információt, ami az éves csapadékösszeg (P) és az éves potenciális evapotranszpiráció (PET) különbségeként áll elő.

$$WB = P - PET \quad (2)$$

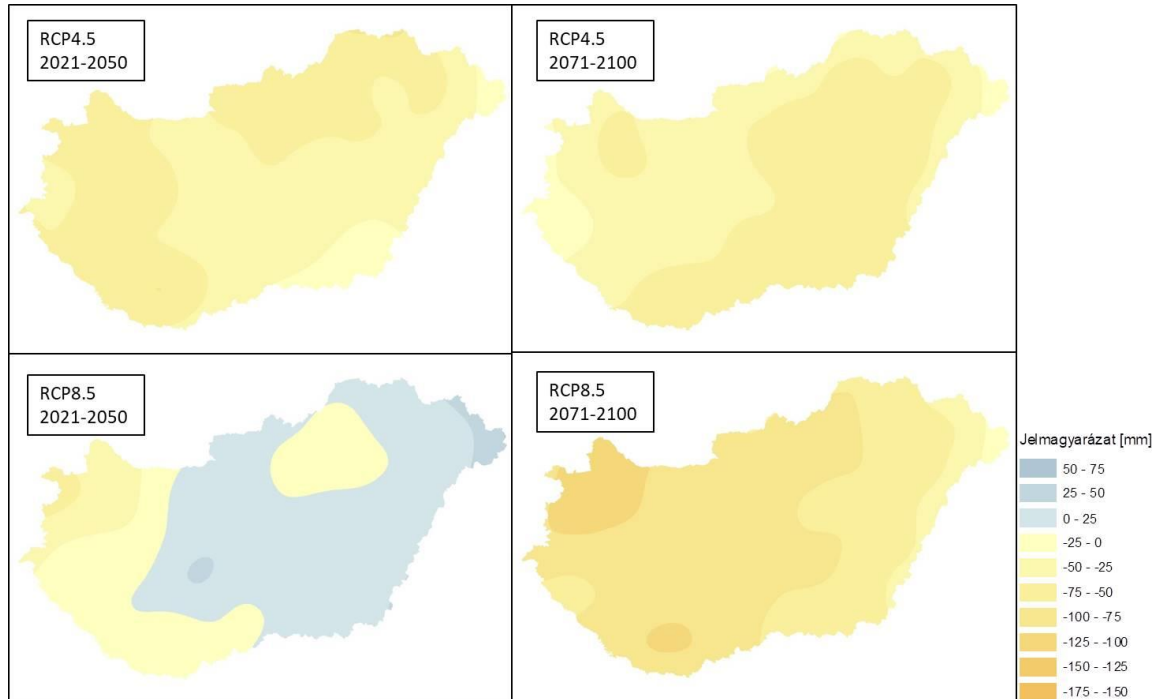
A potenciális evapotranszpiráció kiszámításához Thornthwaite módszerével került kiszámításra (Ács *et al*, 2013), havi hőmérsékleti adatsorok felhasználásával.

Az 1971-2000 közötti harminc év vízellátottságáról ad információt a klimatikus vízmérleg területi eloszlása (19.ábra). Látható az alacsonyabban fekvő alföldi területekre jellemző negatív klimatikus vízmérleg, amely csapadékhiányos állapotra utal. A legalacsonyabb érték ezen a területen elérte a -200 mm-t, míg az ország délnyugati területein a maximális 150 mm-es értékkel csapadéktöbblet mutatkozik. Látható, hogy az ország nagyobb hányadában jelentkeznek negatív értékek, a tengerszint feletti magasság növekedésével az érték emelkedése figyelhető meg, azonban jellemzően a vízmérleg negatív tartományban marad.



19.ábra: Az átlagos éves klimatikus vízmérleg eloszlása Magyarország területén 1971-2000 között a CARPATCLIM-HU adatbázis alapján

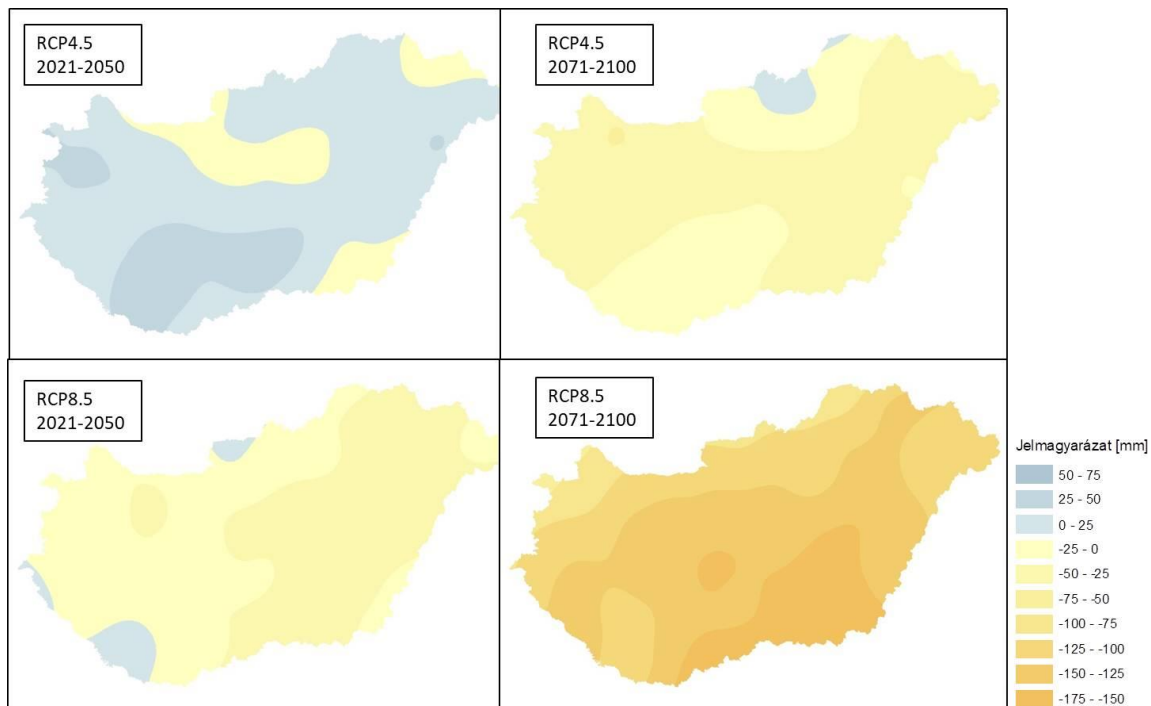
A CNRM-CM5 globális modellel meghajtott szimulációk (20.ábra) közül – az RCP8.5-ös forgatókönyv az évszázad közepére projektál emelkedést a klimatikus vízmérleg értékeiben.



20.ábra: A klimatikus vízmérleg várható változása a CNRM-CM5 globális klímamodellel meghajtott RCA4 regionális klímamodell szimulációival, az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek alapján a 2021-2050 és a 2071-2100 közötti időszakokra az 1971-2000 közötti referencia időszakhoz viszonyítva

Ezzel ellentétben az EC-EARTH globális modellel meghajtott szimuláció (21.ábra) ugyan erre az időszakra - szintén a pesszimista forgatókönyvre alapozva - a vízmérleg csökkenését jelzi, míg a közepesen optimista forgatókönyv mellett erre az időszakra az értékek emelkedése látható.

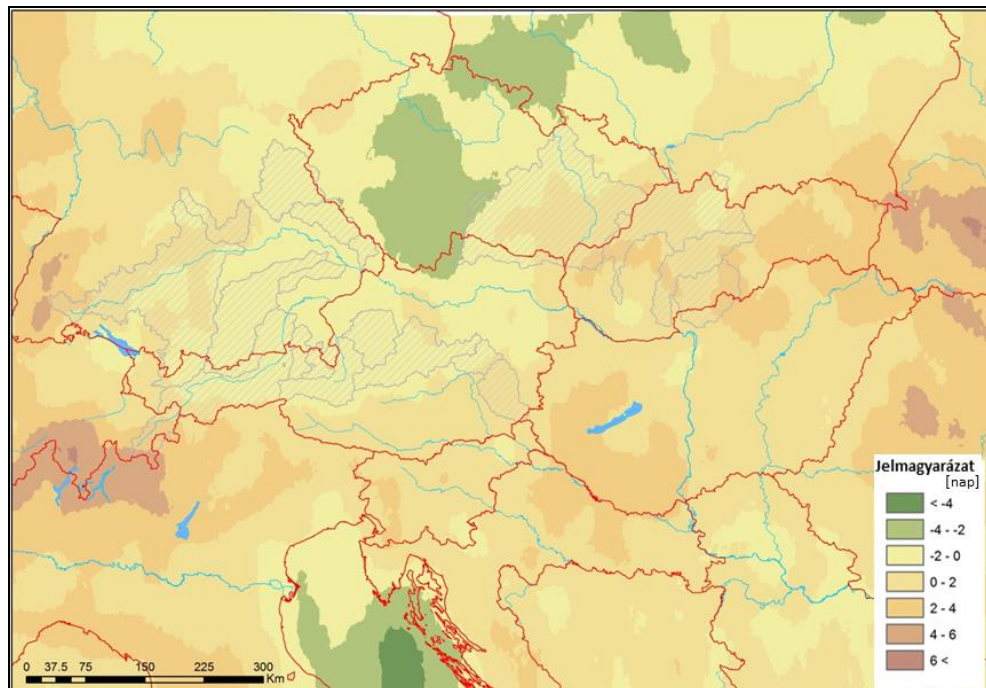
A szimulációk közötti különbség a modellek bizonytalanságából származtatható. A legnagyobb negatív differencia értéket az EC-EARTH RCP8.5-ös szimulációja adja az Alföld délkeleti régiójában, amely akár 175 mm-es negatív eltolódást is jelenthet az évszázad végére a referencia időszakhoz képest.



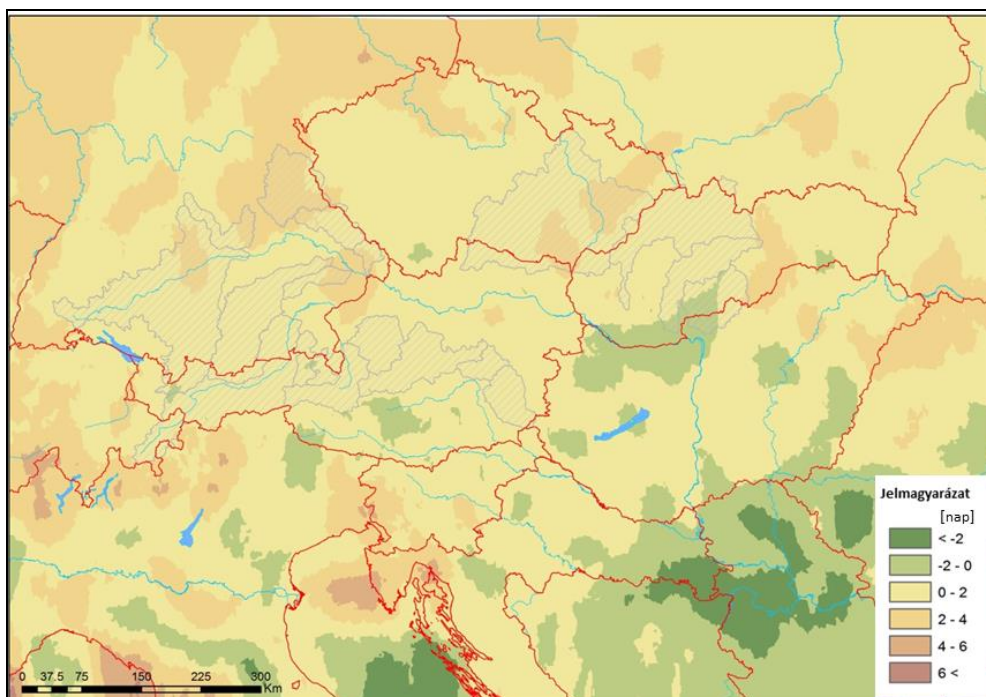
21.ábra: A klimatikus vízmérleg várható változása az EC-EARTH globális klímamoddellel meghajtott RCA4 regionális klímamoddell szimulációval, az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek alapján a 2021-2050 és a 2071-2100 közötti időszakokra az 1971-2000 közötti referencia időszakhoz viszonyítva

Az összetett kitétségi index számításához, a parti szűrésű vízbázisok kisvízi időszakainak figyelembevétele érdekében, a teljes Duna vízgyűjtő területére kiterjedő csapadék idősorokat használtam, amelyekből meghatároztam a csapadékmentes napok számának (22.ábra) és a száraz időszakok maximális hosszának változását (23.ábra). Az 1 mm-nél kevesebb csapadékösszegű napot nevezzük csapadékmentes napnak. Egy adott időszakon belüli leghosszabb egymást követő csapadékmentes periódust jelöli a száraz időszakok maximális hossza. A 22. ábrán látható a CNRM-CM5 klímamoddellel meghajtott RCA4 regionális modell RCP4.5-ös forgatókönyvére alapozott csapadékmentes napok számának változása az évszázad közepére. A szimuláció szerint a Duna vízgyűjtő területének döntő hányadán a csapadékmentes napok számában kismértékű, -2 és +2 nap közötti változás várható. A 23. ábrán látható EC-EARTH modellel meghajtott RCA4 regionális modell RCP8.5-ös szimulációja a száraz időszakok maximális hosszának emelkedését vetíti előre a Duna vízgyűjtő térségének nagyobb részére, a délkeleti területeken várható az időszak csökkenése. Magyarország területén változatos a változás iránya, a déli és északnyugati területeken negatív, az ország többi részén kismértékű pozitív értékek lehetnek az évszázad végén. Ezek a származtatott paraméterek kizárólag a parti szűrésű vízbázissal rendelkező

területek indexeinél kerültek bele a számításba, annak alapján súlyozva, hogy hány százalékban vesz részt a vízellátásban a többi vízbázishoz viszonyítva.



22.ábra: Csapadékmentes napok számának várható változása a nyári félévben a Duna vízgyűjtő területére, a CNRM-CM5 globális klímamoddellel meghajtott RCA4 regionális klímamodell szimulációval, az RCP4.5-ös forgatókönyv alapján a 2021-2050 közötti időszakra az 1971-2000 közötti referencia időszakhoz viszonyítva

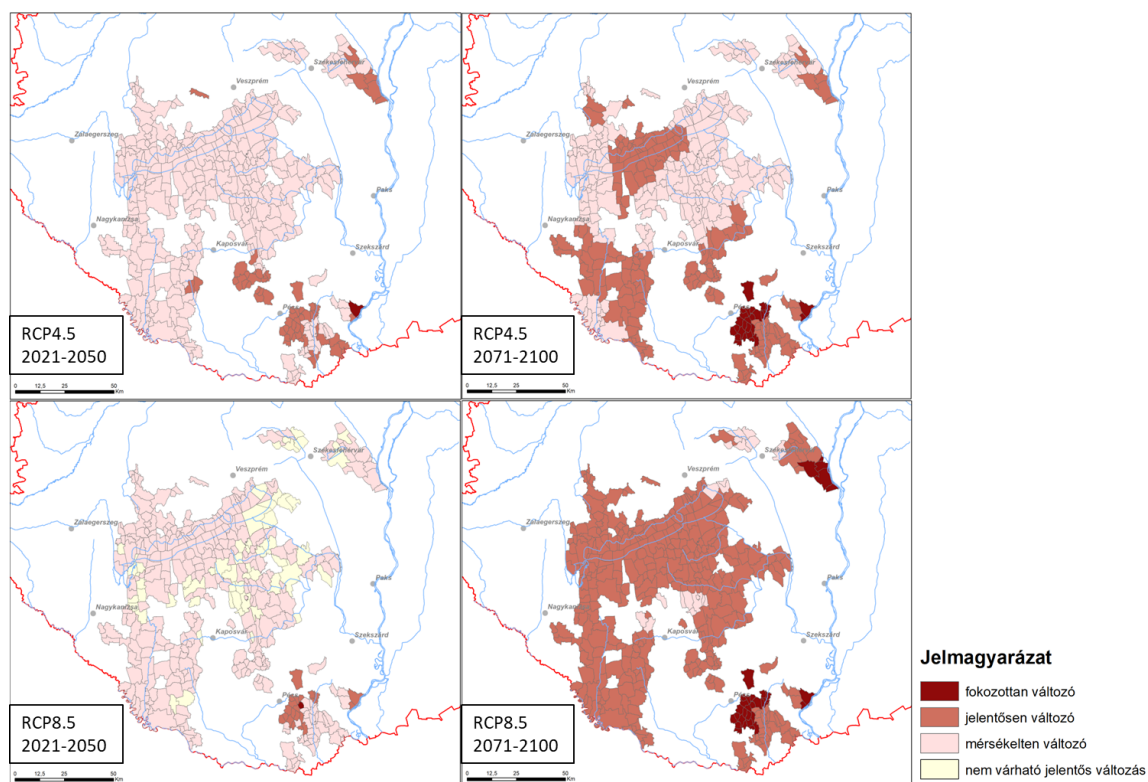


23. ábra: Száraz időszakok maximális hosszának várható változása a nyári félévben a Duna vízgyűjtő területére, az EC-EARTH globális klímamoddellel meghajtott RCA4 regionális klímamodell szimulációval, az RCP4.5-ös forgatókönyv alapján a 2071-2100 közötti időszakra az 1971-2000 közötti referencia időszakhoz viszonyítva

A komplex kitettségi index meghatározásához a klimatikus vízmérleg és a hidrológiai félévek csapadékarányának értékeit négy kategóriába soroltam be:

- nem várható jelentős változás,
- mérsékelten változó,
- jelentősen változó,
- fokozottan változó.

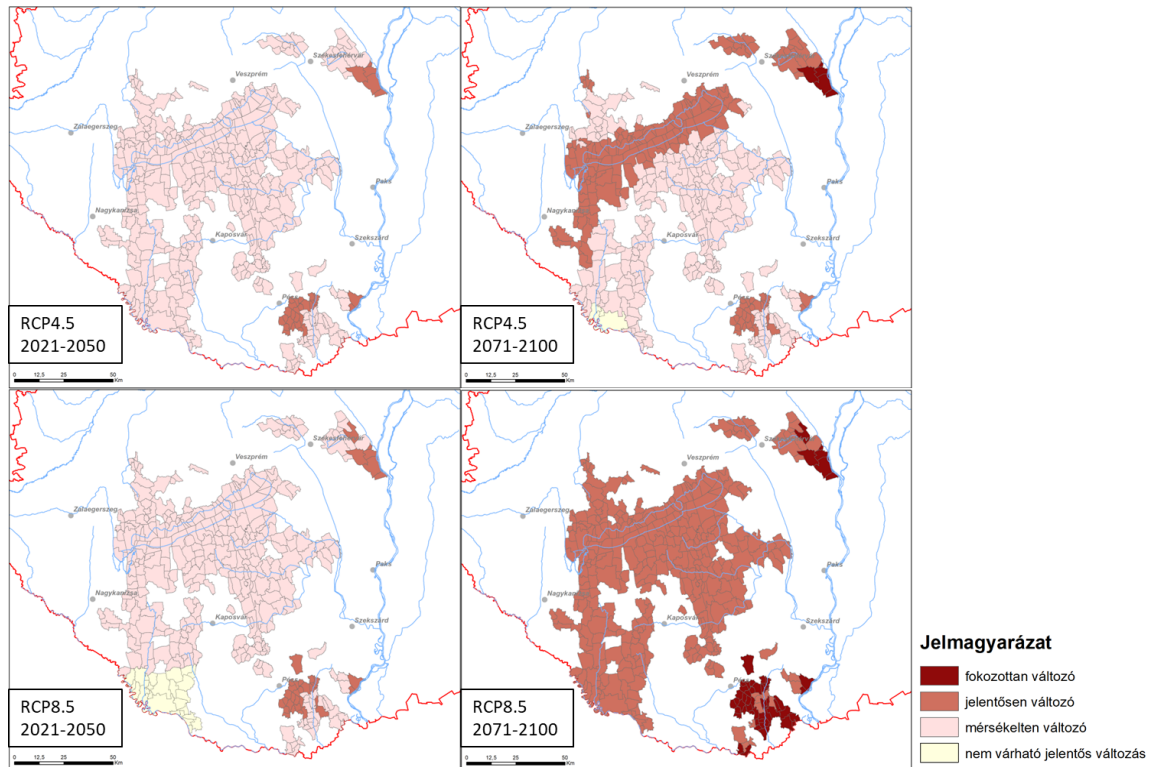
A vízmérleg és a csapadékarány kategóriákhoz rendelt értékeinek településekre számított átlagának, illetve a partiszűrésű vízbázissal rendelkező településeknél figyelembe vett érték hozzáadásával számítottam ki a komplex kitettségi indexet. Az index előállt minden kiválasztott klímamodell-kombinációra (24. és 25. ábra), amelyekből látható a térség kitettségének emelkedő tendenciája az évszázad végéig.



24.ábra: Települések éghajlati kitettsége a CNRM-CM5 globális klímamoddellel meghajtott RCA4 regionális klímamodell szimulációval, az RCP4.5 és RCP8.5-ös forgatókönyvek alapján, a 2021-2050 és 2071-2100 közötti időszakokra

Az évszázad közepére vonatkozó kitettségi térképeken a települések nagyobb része a mérsékelten változó kategóriába esett, a partiszűrésű vagy karsztos vízbázissal rendelkező települések kerültek a jelentősen, vagy fokozottan változó kategóriákba. Az

évszázad végére már egyértelműen látszik a Balaton térségének jelentős kitettsége. Az RCP8.5-ös forgatókönyvre alapozott szimulációk szerint a mintaterület egésze – néhány település kivételével – a jelentősen változó kategóriába esik. A partiszűrűsű vízbázissal rendelkező települések pedig a fokozottan változó kategóriába tartoznak.



25.ábra: Települések éghajlati kitettsége a EC-EARTH globális klímamoddellel meghajtott RCA4 regionális klímamodell szimulációval, az RCP4.5 és RCP8.5-ös forgatókönyvek alapján, a 2021-2050 és 2071-2100 közötti időszakokra

4.2.2.2 Érzékenység

A klímaérzékenység vizsgálatához hidrogeológiai és földtani tulajdonságok alapján elkülönített 15 vízbázis típus négy érzékenységi kategóriába sorolását a 3. táblázat szemlélteti. A kialakított négy érzékenységi kategória a következő:

- nincs közvetlen hatás
- mérsékeltlen érzékeny
- érzékeny
- nagyon érzékeny.

3.táblázat: Vízbázisok érzékenységi besorolása

<i>vízbázis típus</i>				<i>érzékenység mértéke</i>	
porózus	30 m-nél sekélyebb			nagyon érzékeny	
	30-100 m			mérsékelten érzékeny	
	100 m-nél mélyebb			nincs közvetlen hatás	
karsztos	sekélykarszt	fedetlen (nyíltkarszt)	járatos	nagyon érzékeny	
			repedezett	érzékeny	
		fedett karszt	közvetlen beszivárgással jellemzett	járatos	érzékeny
			repedezett	mérsékelten érzékeny	
	mélykarszt	regionális áramlási rendszerhez tartozó	közvetett beszivárgással jellemzett	járatos	mérsékelten érzékeny
			repedezett	mérsékelten érzékeny	
	mélykarszt	önálló áramlási rendszer része		nincs közvetlen hatás	
				nincs közvetlen hatás	
repedezett				mérsékelten érzékeny	
partiszűrés	partiszűrésű			nagyon érzékeny	
	vízfolyás által befolyásolt			nagyon érzékeny	
felszíni				nagyon érzékeny	

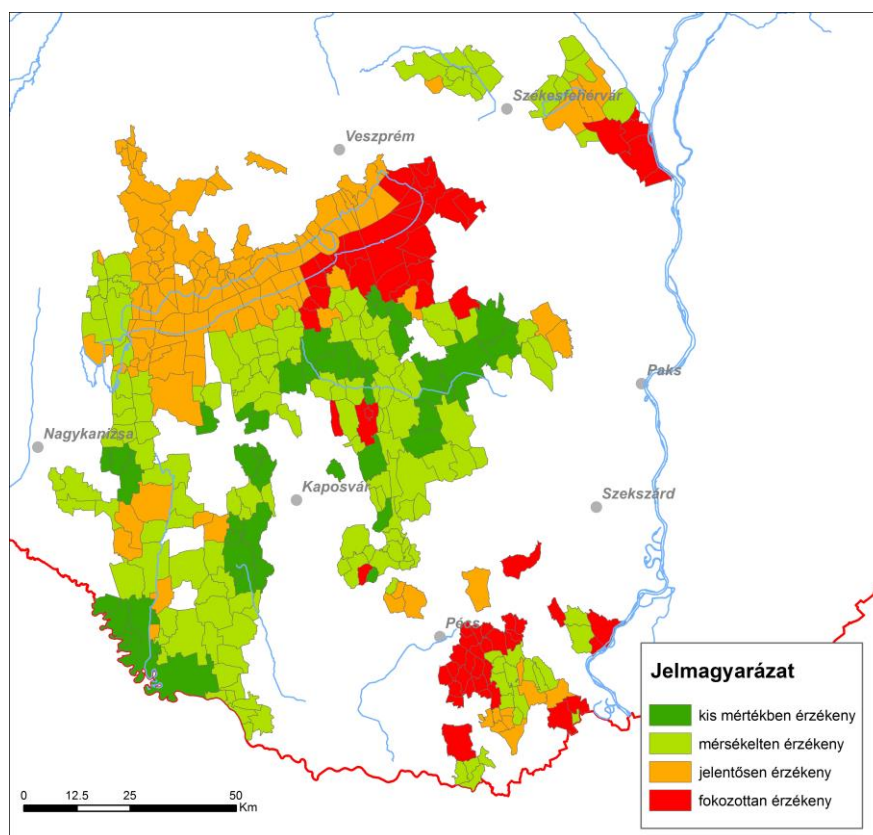
A klímaérzékenységi vizsgálatok során a korábbi módszertanhoz képest részletesebb kategorizálásra volt lehetőség az adatszolgáltatás függvényében. A települések jellemzése érdekében az ellátó vízbázisok számát és a legjobb vízbázis klímaérzékenységének mértékét vettem figyelembe, ezek alapján pontoztam. Ezek kombinált átlagával hat érzékenységi kategóriába soroltam be a településeket:

- egy vízbázis, ami klíma-érzékeny,
- egy vízbázis, ami kevésbé klíma-érzékeny,
- több vízbázis, ahol összes vízbázis azonos típus és klíma-érzékeny,
- több vízbázis, különböző vízbázis típus, de mindegyik klíma-érzékeny,
- több vízbázis, különböző vízbázis típus, de van olyan, amelyik kevésbé klíma-érzékeny,

- az ellátó vízbázisnál más vízműtől átvett víz van.

Amennyiben egy település a saját vízbázisról is kap vizet, úgy az jellemezi, az átadott víz csak a vízbázis számot növeli meg. A víztermelések hatása egyes térségekben jelentős vízszintcsökkenést eredményezett a felszín alatti vizekben. A 100 méternél mélyebb porózus vízbázisokra értelmezhető az igénybevétel miatti vízszintcsökkenés, így ennek mértékét ezeknél a vízbázisoknál vettem figyelembe. Az így kapott átlagolással levezetett **érzékenységi indikátor** került a sérülékenység számításához felhasználásra.

A DRV Zrt. működési területén a települések komplex klímaérzékenysége igen változatos (26.ábra). Az érzékenységi index eloszlása párhuzamosságot mutat a vízbázisok érzékenységgel. A legérzékenyebb területek a felszíni vízbázisokból, illetve a partiszűrűsű rendszerekből ellátott településeket érintik, ennek megfelelően a Balaton keleti medencéjének térségében és a Duna mentén (Ercsi és Mohácsi regionális vízellátó rendszerek területe) figyelhetők meg. Külső-Somogy tájegységen két település – Ráksi és Somogyszil – vízellátása fokozottan klíma-érzékeny. Mindkét esetben a 30 m-nél sekélyebb mélységet is érintő ivóvízbázisok eredményezik a fokozott érzékenységet.



26.ábra: A Dunántúli Regionális Vízmű Zrt. területén található települések komplex klímaérzékenysége

A felsoroltakhoz képest kevésbé, de szintén érzékeny a Balaton nyugati térsége, amely a Balaton nyugati medencéje körüli településeket, a Déli-Bakony nyugati peremét, a Keszthelyi-hegység térségét és a Balaton északi partjának településeit foglalja magába. A térség ivóvízellátása döntően nyílt karsztos, vagy annak közelében elhelyezkedő, a felszín alatti vizek beszivárgási területével közvetlen kapcsolatban lévő karsztos vízáradókból történik. Ezeken kívül néhány klíma-érzékeny település megjelenése az Északi-Bakony előterében, illetve a Mecsek térségében szintén a klíma-érzékeny karsztos vízbázisokhoz kapcsolódik.

4.2.2.3 Alkalmazkodóképesség

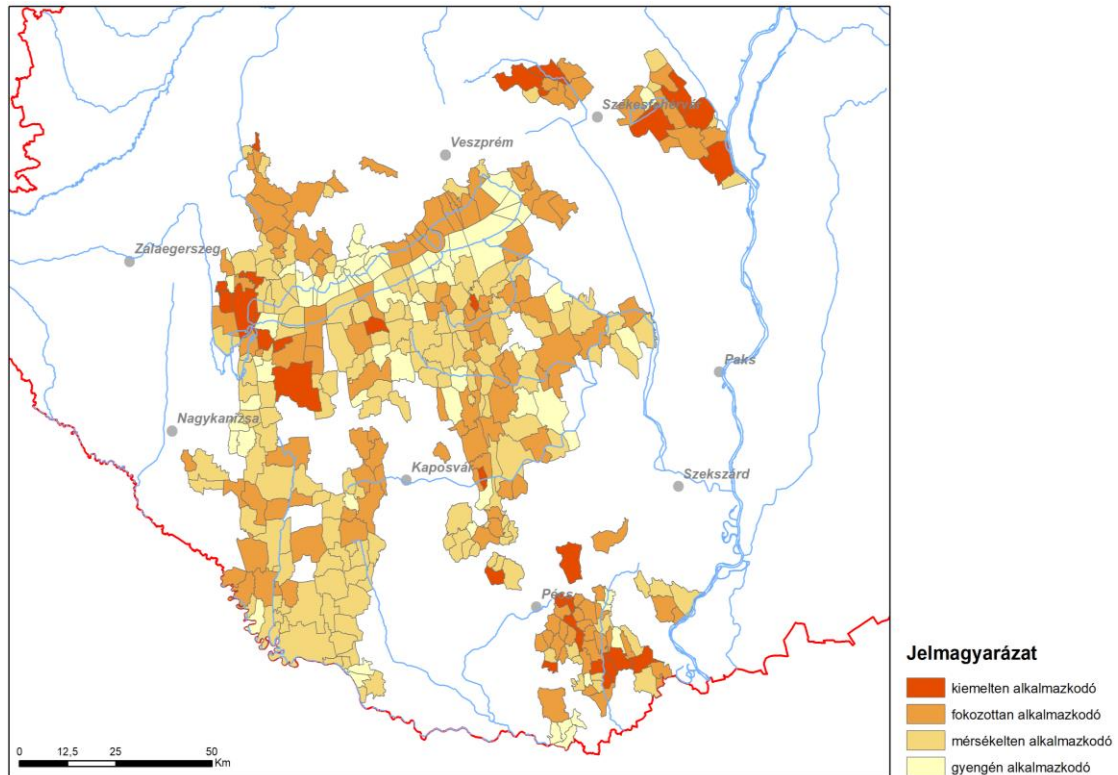
Az alkalmazkodóképességgel a klímaváltozás általi változásokra adható társadalmi, gazdasági és infrastrukturális válaszok jellegét és erősségét lehet kifejezni. A vízi közmű szolgáltatóval történt folyamatos egyeztetéssel határoztuk meg a felhasznált adatköröket. Az adatok többsége a 2017. évre vonatkozik, a társadalmi-gazdasági adatok a 2016. évből származnak. Az alkalmazkodóképesség komplex mutatóját a következő tényezők átlagolása adta meg:

- a települést közvetlenül ellátó ivóvízbázisok száma
- az ivóvízbázis fejleszthetősége (vízbázis bővíthetőségének és kapacitás növelhetőségének összefüggése)
- egy lakosra jutó ivóvízfogyasztás ($m^3/fő$)
- egy lakosra jutó összes belföldi jövedelem (Ft/fő/év),
- fogyasztói érzékenység (a vízdíj és az egy főre jutó jövedelem összefüggése, %).

Ezek közül a vízbázisok száma szerinti kategorizálás és az egy lakosra jutó ivóvízfogyasztás került kétszeres súlyozással a mutatóba. Végül négy kategóriába kerültek besorolásra a települések alkalmazkodóképességük mértéke szerint:

- gyengén alkalmazkodó,
- mérsékelten alkalmazkodó,
- fokozottan alkalmazkodó,
- kiemelten alkalmazkodó.

A mintaterületen található települések alkalmazkodóképessége döntően a mérsékelten és a fokozottan alkalmazkodó kategóriákba esik. Gyenge alkalmazkodóképességgel főként a Balaton délkeleti és északi partközeli települései rendelkeznek (27.ábra).



27.ábra: A DRV Zrt. területén található települések alkalmazkodóképessége

4.2.2.4 Sérülékenység

A fentiekben bemutatott kitettség, érzékenység és alkalmazkodóképesség együttes levezetésével kapjuk meg a terület ivóvízellátásának relatív klíma sérülékenységét. Az összetett kitettségi és érzékenységi indexek normalizált összege képezi az éghajlatváltozás hatását (H) a települések vízellátására:

$$H = \frac{(K_x - K_{min})}{(K_{max} - K_{min})} + \frac{(E_x - E_{min})}{(E_{max} - E_{min})}, \quad (3)$$

ahol K_x a kitettségi index településhez rendelt értéke a parti szűrés súlyozásával, K_{min} az adott szimuláció kitettségi indexeinek minimuma, K_{max} az adott szimuláció kitettségi indexeinek maximuma, E_x az érzékenységi index településhez rendelt értéke, E_{min} az érzékenységi indexek minimuma, E_{max} az érzékenységi indexek maximuma. Az alkalmazkodóképesség normalizált értéke:

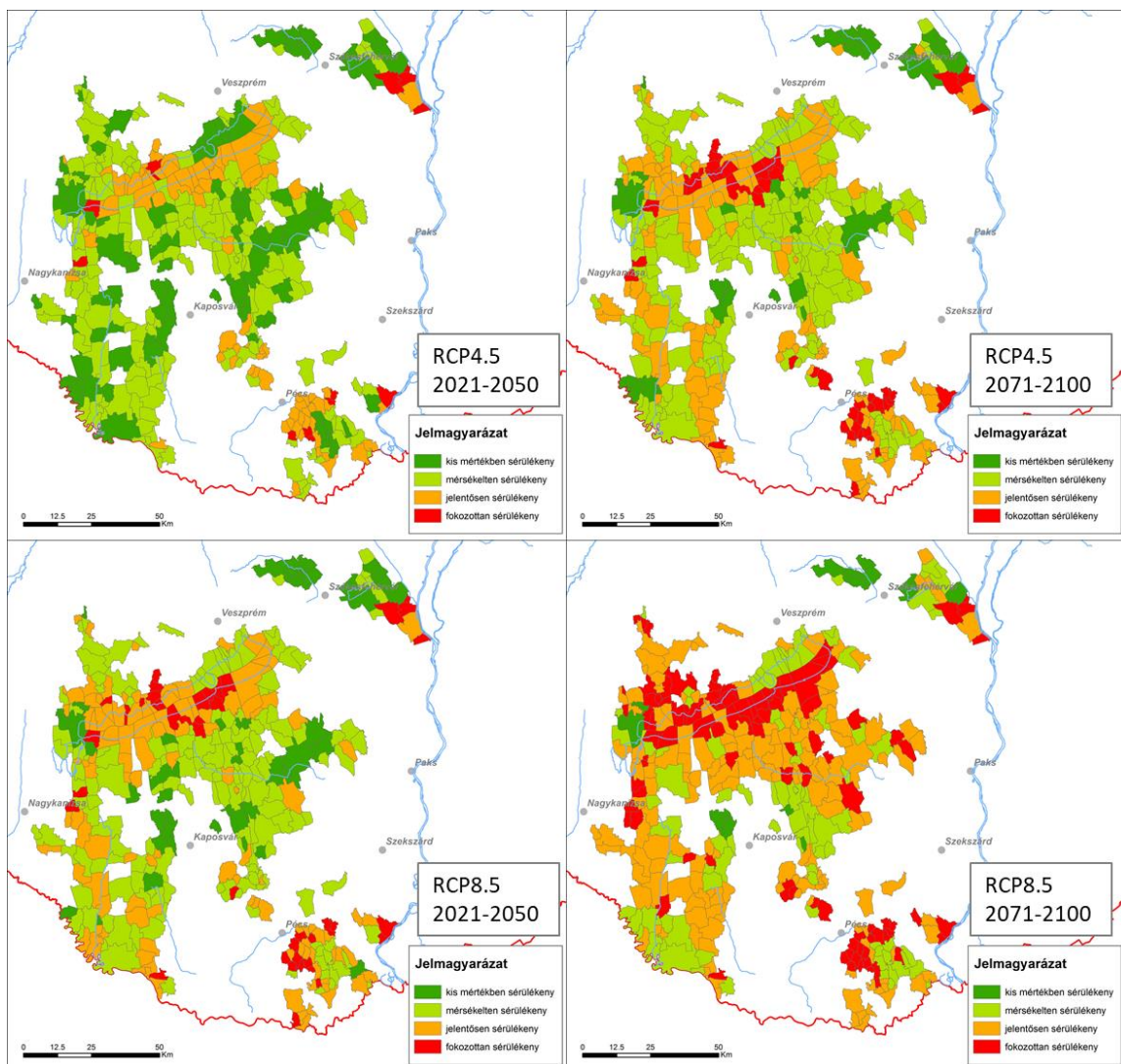
$$A = \frac{A_x - A_{min}}{A_{max} - A_{min}}, \quad (4)$$

ahol A az alkalmazkodóképesség, A_x az alkalmazkodási index településhez rendelt értéke, A_{min} az alkalmazkodási indexek minimuma, A_{max} az érzékenységi indexek maximuma.

A sérülékenységi (S) értékét a hatás (H) és az alkalmazkodás (A) összege adja:

$$S = H + 2A \quad (5)$$

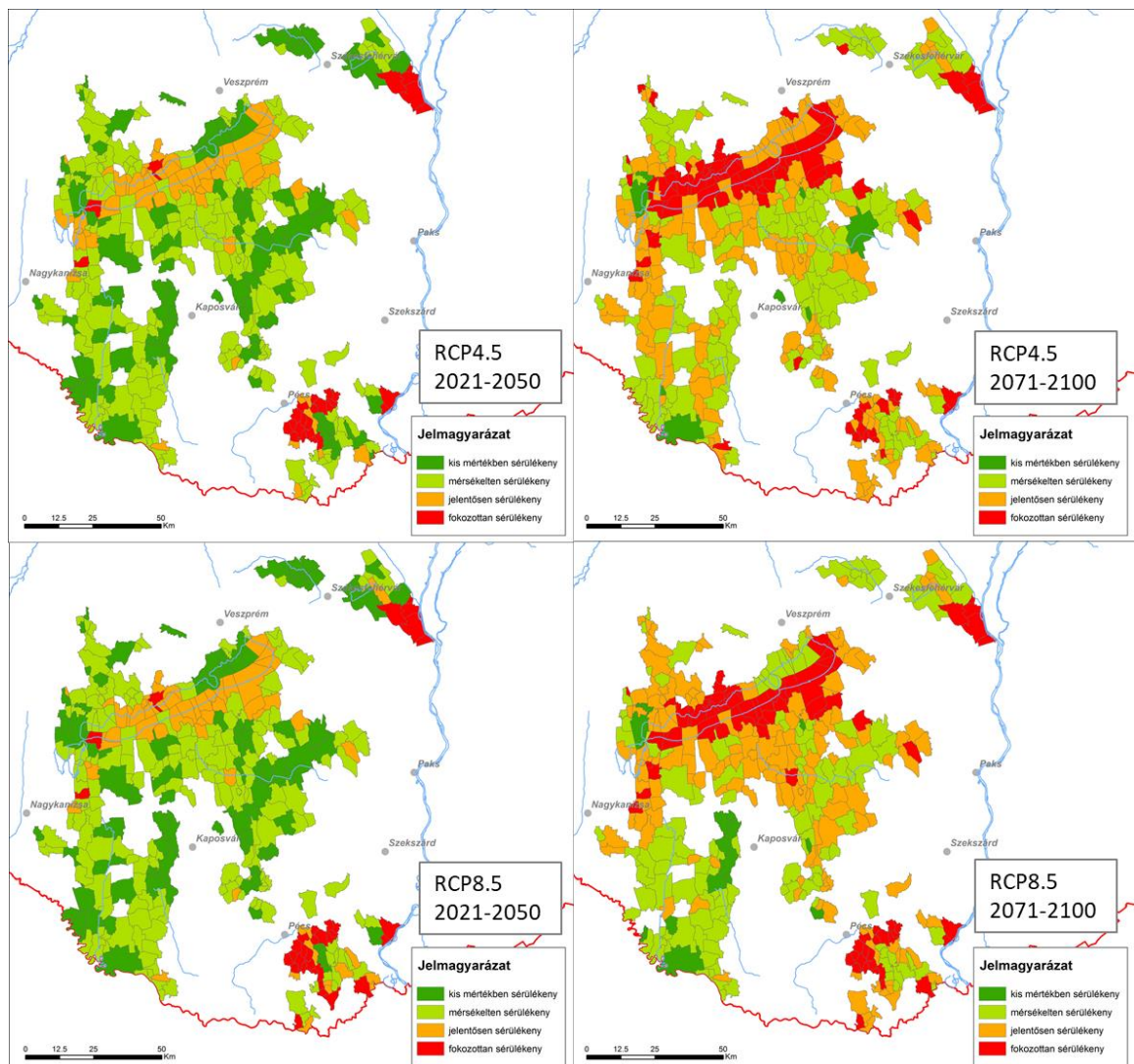
Az alkalmazkodóképesség kétszeres értékkel került a számításba annak érdekében, hogy a kitettséggel és az érzékenységgel azonos súllyal kerüljön az összetett sérülékenységi mutatóba (5). Az így számított települési szintű összetett sérülékenységi mutatót előállítottam mind a négy kiválasztott klímamodell-kombinációra. Az ennek alapján elkészített nyolc térkép (28. és 29. ábra) segítségével átfogó kép adható a mintaterület várható jövőbeli sérülékenységről, az éghajlati forgatókönyvek tükrében. Négy sérülékenységi kategóriát határoztam meg (kis mértékben, mérsékelten, jelentősen és fokozottan sérülékeny).



28.ábra: Települések ivóvízellátásának sérülékenysége a CNRM-CM5 globális klímamoddellel meghajtott RCA4 regionális klímamodell szimulációval, az RCP4.5 és RCP8.5-ös forgatókönyvek alapján, a 2021-2050 és 2071-2100 közötti időszakokra

Mivel egy közepesen optimista és egy pesszimista scenárióval is előállt a mutató, a klímaváltozás mértékének figyelembevételével vizsgálhatjuk a sérülékenységi értékeket.

A térképeken egyértelműen megfigyelhető a partiszűrészű, felszíni és repedezett nyíltkarsztú vízbázissal ellátott települések fokozott klíma sérülékenysége. Az évszázad közepére a térség településeinek nagyobb hányada a kis mértékben vagy mérsékeltén sérülékeny kategóriákba esik, a Balaton déli részén található felszíni vízbázissal rendelkező települések és az északi térségében elhelyezkedő repedezett nyíltkarsztos, a partiszűrészű vízbázissal rendelkező települések, illetve néhány karsztos terület sorolható a jelentősen és a fokozottan sérülékeny kategóriákba. Az évszázad végére készült sérülékenységi vizsgálat is ezeket a területeket jellemzi jelentősen és a fokozottan sérülékeny mutatóval.



29.ábra: Települések ivóvízellátásának sérülékenysége az EC-EARTH globális klímamoddellel meghajtott RCA4 regionális klímamodell szimulációval, az RCP4.5 és RCP8.5-ös forgatókönyvek alapján, a 2021-2050 és 2071-2100 közötti időszakokra

5. Összefoglalás

A diplomamunkám kidolgozása során arra a megállapításra jutottam, hogy az általam az éghajlati kitettség vizsgálatához felhasznált, és már az új forgatókönyveket tartalmazó nemzetközi klímamodell adatbázisokból (EURO-CORDEX) származtatott indikátorok megfelelően alkalmazhatók Magyarország jövőbeli kitettségének és klíma sérülékenységének jellemzésére. A kitettségi mutatók – az ivóvízbázisok érzékenységi mutatói mellett – döntően befolyásolják a vizsgálatom tárgyának választott ivóvízellátási ágazat éghajlati sérülékenységét.

Az éghajlati indikátorok segítségével kialakított komplex kitettségi index és a komplex érzékenységi indikátor felhasználásával jól szemléltethető a klímaváltozás ivóvízbázisokra gyakorolt, településenként eltérő hatása. Ugyanakkor a teljeskörű éghajlati sérülékenység-vizsgálatokhoz szükség van az alkalmazkodóképesség összetett mutatójának kialakítására is, amelyekhez egyedi szolgáltatói adatokra és társadalmi-gazdasági mutatókra egyaránt szükség van. Ezek összegyűjtése megkezdődött már országos szinten a NATÉR továbbfejlesztése projekt keretében, de egységes adatbázis még nem áll rendelkezésre. A vízellátásra vonatkoztatott alkalmazkodóképességgel szemléltethető, hogy adott hatást egy kiválasztott mintatárság – a DRV Zrt. illetékességi területén lévő települések és a szolgáltató vállalat – gazdasági és technológiai eszközökkel milyen mértékben tudják ellensúlyozni.

A diplomamunkámban bemutattam, a magyarországi ivóvízellátás sérülékenység vizsgálatára továbbfejlesztett módszertan alkalmas – a kitettség, érzékenység és alkalmazkodóképesség együttes levezetésével – a lehetséges jövőbeli klimatikus viszonyok figyelembevételével az éghajlati sérülékenység komplex mutatójának meghatározására, ezáltal mind a vízi közmű társaságok, mind a települések eredményesebben tudnak felkészülni a várható változásokra.

A jobb érthetőség és értékelhetőség érdekében vizsgálataim eredményéről minden esetben települési szintű tematikus térképeket készítettem, amelyek segítségével az egyes térségek és települések közti relatív különbségek jól bemutathatók. Ezek értelmezésekor azonban figyelemmel kell lenni az adatok korlátozott rendelkezésre állására és azok frissíthetőségére egyaránt.

Az alkalmazott módszertan kiterjesztése mindenképp ajánlott lenne országos szintre is, azonban további együttműködésre és rendszeres adatszolgáltatásra lenne szükség minden hazai vízi közmű szolgáltató bevonásával.

Ez csak széleskörű partneri együttműködéssel biztosítható a jövőben.

Bízható, hogy a NATÉR továbbfejlesztése projekt keretein belül már tíz nagy regionális szolgáltató társaság illetékességi területére kerülnek átadásra az érzékenység és alkalmazkodóképesség levezetéséhez szükséges adatok, amelyek felhasználásával a közeljövőben átfogóbb képet kaphatunk az ország ivóvízellátásának éghajlati sérülékenységről. Ezek közül elsőként a DRV Zrt. illetékességi területére vonatkozó elemzés és értékelés készült el teljes egészében.

Mivel az általam elvégzett vizsgálat egyik alappilléret a klímamodell adatbázisokból származtatott indikátorok képezik, nem szabad megfedkeznünk a modellezés bizonytalanságairól sem. Olyan értékek, amelyek szignifikánsan eltérnek a tendenciától rövidebb időszakok vizsgálatakor problémát okozhatnak, ezekben az esetekben különböző hibakorrekciós eljárásokkal csökkenthető a hiba mértéke. Bizonytalansági kiértékelés szempontjából több regionális klímamodell adatainak felhasználása szintén célszerű lehet, azonban ezek tovább terhelik a számítási igényeket és erőforrásokat. Mindezek mellett fontos, hogy a jövőre vonatkozó becsléseket fogalmazzanak meg az előállított mutatók, amelyek értelmezésekor a változások irányát és mértékét kell szem előtt tartanunk.

Irodalomjegyzék

- Az Országgyűlés 23/2018. (X. 31.) OGY határozata a 2018–2030 közötti időszakra vonatkozó, 2050-ig tartó időszakra kitekintést nyújtó második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégiáról. Magyar Közlöny, 2018. évi 168. szám; 2018. október 31. , 30940-30941.
- A Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer működésének részletes szabályairól szóló 94/2014. (III. 21.) Korm. rendelet. Magyar Közlöny, 2014. évi 42. szám, 2014. március 21., 4346-4352.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Torma, Cs., Pieczka, I., Kardos, P., Hunyady, A., 2009: Analysis of regional climate change modelling experiments for the Carpathian basin. *Int. J. Global Warming*, 1: 238–252.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Torma, Cs., 2010: A Kárpát-medencében 2021-2050-re várható regionális éghajlatváltozás RegCM-szimulációk alapján. *Klíma-21 Füzetek*, 60: 3–13.
- Bartholy, J., Bihari, Z., Horányi, A., Krüzselyi, I., Lakatos, M., Pieczka, I., Pongrácz, R., Szabó, P., Szépszó, G., Torma, Cs. 2011: Hazai éghajlati tendenciák. In: *Klímaváltozás – 2011. Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére* (szerk.: Bartholy, J., Bozó, L., Haszpra, L.). MTA, ELTE, Budapest. 145-234.
(<http://nimbus.elte.hu/~klimakonyv/Klimavaltozas-2011.pdf>)
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Práger, T., Pieczka, I., Torma, Cs., Kelemen, F., 2012: Regionális klímamodellek adaptációja, parametizációs kísérletei a Kárpát-medence térségére. *Légekör* 57. évfolyam 150-152.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Pieczka, I., 2014: How the climate will change in this century? *Hungarian Geographical Bulletin*, 63: 55–67.
- Collins, W.J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C.D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A. and Woodward, S., 2011: Development and evaluation of an Earth-System model-HadGEM2. *Geosci. Model Dev.*, 4, 1051-1075.
- Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M.C., Frame, D., Mahowald, N., Winther, J.G., 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 146.
- Csima, G., Horányi, A., 2008: Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás* 112, 3–4, 155–177.
- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *Journal of Climate* 3, 941-963.
- Giorgi, F., Jones, C., Ghassem, A., 2009: Addressing climate information needs at the regional level, *The CORDEX framework*. *WMO Bulletin* 58(3) .
- Giorgi, F., Torma, Cs., Coppola, E., Ban, N., Schär, C., Somot, S., 2016: Enhanced summer convective rain at Alpine high elevations in response to climate warming., *Nature Geoscience*, 9:584-589.
- Hazeleger, W., Severijns, C., Semmler, T., Stefanescu, S., Yang, S., Wang, X., Wyser, K., Dutra, E., Baldasano, J.M., Bintanja, R., Bougeault, P., Caballero, R., Ekman, A.M.L., Christensen, J.H., van den Hurk, B., Jimenez, P., Jones, C., Källberg, P., Koenigk, T., McGrath, R., Miranda, P., van Noije, T., Palmer, T., Parodi, J.A., Schmith, T., Selten, F., Storelvmo, T., Sterl, A., Tapamo, H., Vancoppenolle, M., Viterbo, P., and Willén, U., 2010: EC-EARTH: a seamless Earth system prediction approach in action. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 91: 1357-1375.

- Homolya, E., Rotárné Szalkai, Á., Selmeczi, P., 2017: National Adaptation Geo-information System in climate adaptation planning. *Időjárás*, Vol 121, No. 4, 345-370.
- Illy, T., Szabó, P., Szépszó, G., Otto, J., Viktor, E., Madsen, M.S., Christensen, O.B. Ruosteenoja, K. 2016: Catalogue on CMIP data provision, applicability and volume. ABC4CDE (C3S_51_Lot4) projekt D2.1 beszámoló, 68 p.
- Illy, T., Szabó, P., Szépszó, G., Otto, J., Madsen, M.S., Christensen, O.B., Kämäräinen, M., Mäkelä, A., Ruosteenoja, K. 2017: Catalogue on CORDEX data provision, applicability and volume. DECM (C3S_51_Lot4) projekt D2.2 beszámoló, 74 p.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- 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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Bössing Christensen, O., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., De'que, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kro'ner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2014: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Change* 14., 563–578.
- Kármán, K., 2009: Hydrogeochemical and stable isotope geochemical study on riverbank filtrated aquifers in the Szentendre Island (in Hungarian). M.Sc. Thesis, Department of Petrology and Geochemistry, Eötvös University, Budapest, 108 p.
- Kovács P., 2009: *Vízjárástípusok és a vízjárás stabilitása a Duna vízgyűjtőterületén*. Doktori Értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Földtudományi Doktori Iskola, Földrajz-Meteorológia Program, Budapest.
- Martin, G. M., Bellouin, N., Collins, W. J., Culverwell, I. D., Halloran, P.R., Hardiman, S. C., Hinton, T. J., Jones, C. D., McDonald, R. E., McLaren, A. J., O'Connor, F.M., Roberts, M. J., Rodriguez, J.M., Woodward, S., Best, M. J., Brooks, M.E., Brown, A. R., Butchart, N., Dearden, C., Derbyshire, S., Dharssi, I., Doutriaux-Boucher, M., Edwards, J. M., Falloon, P. D., Gedney, N., Gray, L., Hewitt, H. T., Hobson, M., Huddleston, M. R., Hughes, J., Ineson, S., Ingram, W. J., James, P. M., Johns, T. C., Johnson, C. E., Jones, A., Jones, C.P., Joshi, M. M., Keen, A. B., Liddicoat, S., Lock, A. P., Maidens, A. J., Manners, J. C., Milton, S. F., Rae, J. G. L., Ridley, J. K., Sellar, A., Senior, C. A., Totterdell, I. J., Verhoef, A., Vidale, P. L., Wiltshire, A., 2011: The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geosci. Model Dev.*, 4, 723–757.
- Pálvölgyi, T., Hunyady, A., 2008: Common methodological framework of CLAVIER Impact Case Studies (in: Database on the statistical-empirical interrelations between the high resolution climate indicators and the parameters of impact issues). CLAVIER Report. (www.clavier-eu.org)
- Pálvölgyi, T., Csete, M., 2012: A magyarországi természeti erőforrások állapota és fenntartható hasznosításukat befolyásoló tényezők. *Gazdálkodás* 56. évf. 1 szám, 26-43.
- Pieczka, I., Pongrácz, R., Bartholy, J., 2011: Comparison of simulated trends of regional climate change in the Carpathian Basin for the 21st century using three different emission scenarios. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 7: 9–22.

- Pieczka, I., Bartholy, J., Pongrácz, R., 2012: Klímaváltozási scenáriók a Kárpát-medence térségére a PRECIS klímamodell eredményei alapján. In: Korszerű földtudományi oktatás – versenyképes gazdaság. HUNGEO-2012 Konferenciakötet. (Mika J., Dávid Á., Pajtókné Tari I., Fodor R., szerk.) Eszterházy Károly Főiskola, Eger. 249–254.
- Pieczka I., Pongrácz R., André K., Kelemen F.D., Bartholy J., 2016: Sensitivity Analysis of Different Parameterization Schemes Using RegCM4.3 for the Carpathian Region. *Theoretical and Applied Climatology*.
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Pieczka, I., Torma, Cs., 2011: Az ELTE regionális klímamodelljei: PRECIS és RegCM. In: 36. Meteorológiai Tudományos Napok – Változó éghajlat és következményei a Kárpát-medencében (Lakatos, M., szerk.). Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 102–112. (http://www.met.hu/doc/rendezvenyek/metnapok-2010/36.Meteorologiai_Tudomanyos_Napok_osszefoglalo_2010.pdf)
- Popke, D., Stevens, B. and Voigt, A., 2013: Climate and climate change in a radiativeconvective equilibrium version of ECHAM6, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, Vol. 5, 1-14.
- Rotárné Szalkai, Á., Homolya, E., Selmeczi, P., 2015: A klímaváltozás hatása az ivóvízbázisokra. Kutatási jelentés. Magyar Földtani és Geofizikai Intézet, 59 p.
- Samuelsson, P., Jones, C. G., Willén, U., Ullerstig, A., Gollvik, S., Hansson, U., Jansson, E., Kjellström, C., Nikulij, G., Wyser, K., 2011: The Rossby Centre Regional Climate model RCA3: model description and performance. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. Vol.63 – Issue 1. 4-23.
- Spinoni, J., Szala, S., Szentimrey, T., Lakatos, M., Bihari, Z., Nagy, A., Németh, Á., Kovács, T., Mihic, D., Dacic, M., Petrovic, P., Krzic, A., Hiebl, J., Auer, I., Mikovic, J., Stepánek, P., Zahradnicek, P., Kilar, P., Limanowka, D., Pyrc, R., Cheval, S., Birsan, M-V., Dumitrescu, A., Deák, Gy., Matei, M., Antolovic, I., Nejedlik, P., Stastny, P., Kajaba, P., Bochnicek, O., Galo, D., Mikulová, K., Nabyvanets, Y., Skrynyk, O., Krakovska, S., Gnatiuk, N., Tolasz, R., Antofie, T., Vogt, J., 2015: Climate of the Carpathian Region in the period 1961-2010: climatologies and trends of 10 variables. *International Journal of Climatology* 35:1322-1341.
- Sábitz, J., Szépszó, G., Zsebeházi, G., Szabó, P., Illy, T., Bartholy, J., Pieczka, I., Pongrácz, R., 2015: A klímamodellekből levezethető indikátorok alkalmazási lehetőségei. NATÉR (EEA-C11-1) tanulmány (szerk.: Szépszó G.) 111 p. (https://www.met.hu/RCMTeR/doc/reports/C11-1_indikatorok_tanulmany)
- Szépszó, G., Horányi, A., 2008: Transient simulation of the REMO regional climate model and its evaluation over Hungary. *Időjárás* 112, 3–4, 203–231.
- Szépszó, G., Illy, T., Szabó, P. 2016: A regionális klímamodellek eredményeinek utó-feldolgozása és a NATÉR számára szükséges paraméterek előállítás. Országos Meteorológiai Szolgálat, 15 p.
- Szépszó, G., Illy, T., Szabó, P., Otto, J., Viktor, E., Madsen, M.S., Christensen, O.B., Kämäräinen, M., Mäkelä, A., Ruosteenoja, K., 2017: Inter-comparison matrix for CMIP and CORDEX data used in climate service. DECM (C3S_51_Lot4) projekt D2.3 beszámoló, 43 p.
- Zsebeházi, G., Bán, B., Szabó, P., Bihari, Z., 2018: 44. Meteorológiai Tudományos Napok, Klímaváltozás és alkalmazkodás, Az előadások összefoglalói, Reprezentatív adatbázis létrehozása az éghajlatváltozási hatásvizsgálatok és a döntéshozatal támogatására – A KlimAdat projekt, 5 p.
- Krüzseli, I., Bartholy, J., Horányi, A., Pieczka, I., Pongrácz, R. 2011: The future climate characteristics of the Carpathian Basin based on a regional climate model mini-ensemble, *Advances in Science and Research* 69-73 p.
- Torma, Cs., Bartholy, J., Pongrácz, R., Barcza, Z., Coppola, E., Giorgi, F., 2008: Adaptation and validation of the RegCM3 climate model for the Carpathian Basin. *Időjárás*, 112: 233–247.

- Torma, Cs., Coppola, E., Giorgi, F., Bartholy, J., Pongrácz, R., 2011: Validation of a high resolution version of the regional climate model RegCM3 over the Carpathian Basin. *J. Hydrometeorology*, 12: 84–100.
- Torma, Cs., 2011: Átlagos és szélsőséges hőmérsékleti és csapadék viszonyok modellezése a Kárpát-medencére a XXI. századra a RegCM regionális klímamodell alkalmazásával. Doktori értekezés. ELTE, Budapest (témavezető: Bartholy, J.). 125 p.
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., 2011: The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5–31.
- Voltaire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Mélia, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L., and Chauvin, F., 2012: The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Clim. Dyn.*, 40.
- [1 – wrcp-climate.org] <https://www.wrcp-climate.org/core-projects>
- [2 – met.hu] <https://www.met.hu/omsz/tevekenysegek/klimamodellezes/modellkiserletek/>
- [3 – cordex.org] http://cordex.org/wp-content/uploads/2012/11/images_pdf_documentation_CORDEX_domain_description_230615.pdf
- [4 – drv.hu] <http://www.drv.hu/rolunk>

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom Dr. Czira Tamás témavezetőmnek, a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat Nemzeti Alkalmazkodási Központja főosztályvezetőjének, a diplomamunka kidolgozása során nyújtott sok hasznos segítségéért, türelméért és azért, hogy támogatta, hogy munkám mellett elegendő idő álljon rendelkezésre a dolgozat megírására.

Kiemelt köszönet illeti Dr. Torma Csaba Zsolt, belső konzulensemét is, aki az ELTE Meteorológiai Tanszék MTA posztdoktori ösztöndíjas tudományos munkatársaként, és a CORDEX adatbázis szakértőjeként, rengeteg hasznosítható információval látott el az elméleti és gyakorlati munkafázisok kidolgozása során, és végig támogatta hasznos tanácsaival, javításaival a dolgozat elkészítését.

Köszönöm a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat munkatársainak, név szerint Rotárné Szalkai Ágnesnek és Selmeczi János Pálnak, hogy biztosították a nem klimatológiai adatok rendelkezésre bocsátását, és rendszeresen konzultáltak velem módszertani kérdésekben. Köszönöm Varga Rékának és Demény Krisztinának, hogy segítséget nyújtottak a térinformatikai adatok ábrázolásában, a térképek előállításában.

Köszönettel tartozom továbbá Homolya Emesének, az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársának, hogy segítette a klimatológiai adatok feldolgozását programozási tapasztalatával és tanácsaival.

Külön köszönet a DRV Zrt. szakmai kapcsolattartóinak Bálint Anettnek, Büki Attilának, Pintér Ágnesnek, akik a DRV Zrt. illetékességi területére vonatkozóan szolgáltatták a víziközmű adatokat.

Köszönöm a családomnak, páromnak és a kollégáimnak a sok türelmet és megértést, amivel nagyban támogatták, hogy ez a dolgozat elkészülhessen.