

Éghajlat és az éghajlatváltozás folyamata a Kárpátok térképében a 20. és 21. században Feddema alapján

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

Készítette:

Szabó Amanda Imola

Témavezetők:

dr. habil. Ács Ferenc

egyetemi docens

PhD

dr. Breuer Hajnalka

egyetemi adjunktus

PhD

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék



Eötvös Loránd Tudományegyetem

Környezettudományi Doktori Iskola

Doktori Iskola vezetője: Dr. habil. Turányi Tamás, egyetemi tanár

Környezeti földtudomány program

Doktori program vezetője: dr. habil. Szalai Zoltán, egyetemi docens

Budapest, 2023

DOI: 10.15476/ELTE.2023.117

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS	3
2. Éghajlat-osztályozási módszerek	6
2.1. Az éghajlat-osztályozási módszerek fejlődése és alkalmazása	6
2.2. A Feddema-féle éghajlat-osztályozási módszer fejlődése és alkalmazásai	13
2.3. Éghajlat-osztályozási módszerek alkalmazása a Kárpátok térségében	19
3. ADATOK	25
3.1. A CarpatClim adatbázis és a Kárpátok térségének általános éghajlati jellemzése	25
3.2. Az EURO-CORDEX adatbázis	30
4. MÓDSZERTAN	34
4.1. Feddema-féle éghajlat-osztályozási módszer	34
4.2. A Feddema-módszer összehasonlítása más módszerekkel	40
4.3. Adatfeldolgozás	42
5. EREDMÉNYEK	52
5.1. A Kárpátok térségének éghajlata az 1971–2000 időszakban Feddema alapján és összehasonlítása más leíró éghajlat-osztályozásokkal kapott eredményekkel	52
5.2. Éghajlatváltozás a Kárpátok térségében a 2019–2098 időszakra Feddema alapján	62
5.2.1. EURO-CORDEX modellegyüttessel becsült klímátípusok eloszlása és azok anomáliái	63
5.2.2. EURO-CORDEX modellegyüttessel becsült szezonális-típusok eloszlása és azok anomáliái	68
5.2.3. RCA4-EC-EARTH modellpárral becsült klímátípusok eloszlása és azok anomáliái	73
5.2.4. RCA4-EC-EARTH modellpárral becsült szezonális-típusok eloszlása és azok anomáliái	83
5.2.5. Domborzat hatása az RCA-4-EC-EARTH modellpárral becsült klíma- és szezonális-típusok eloszlására	93
6. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KITEKINTÉS	99
7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	107
8. IRODALOMJEGYZÉK	110
FÜGGELÉK	123

1. Bevezetés és célkitűzés

Kutatásom során a mesterszakos diplomamunkám (SZABÓ, 2017) tárgyát is képező Feddema-féle éghajlat-osztályzási módszert alkalmaztam (FEDDEMA, 2005), mely egy vízháztartáson alapuló Thornthwaite-féle módszer (THORNTHWAITE, 1948). A Feddema-módszer az éves hő- és vízellátottság, a hőmérséklet és a csapadék szezonaritása és a szezonaritás mértéke alapján képet ad egy terület éghajlatáról. Már a FEDDEMA (2005)-ös publikáció első olvasásakor felkeltette az érdeklődésem a közérthetőség és az oktatási alkalmazhatóság lehetősége, hiszen egy adott régió éghajlata befolyásolhatja az ott élők hétköznapjait, az ételkészítés elérhetőségétől kezdve a szükséges ruházaton át a szabadidős tevékenységekig. Ezért az éghajlati karakterisztikáknak és várható változásaiknak információja rendelkezésre kell álljon mindenki számára, ez azonban igazi tudománykommunikációs kihívás az éghajlat-területén. Az éghajlat-osztályozások fontos jellemzője, hogy segítségükkel csökkenthető a rendszert leíró dimenziók száma az alkalmazás szempontjából legfontosabb jellemzők kiválasztásával (NAVARRO ET AL., 2022). Bizonyos értelemben tehát az éghajlat-osztályozásokkal, így Feddema-módszerével is, leegyszerűsítve írhatók le az éghajlati rendszer összetett kölcsönhatásai. Ennek következtében néhány, ezeket a hatásokat összesítő paraméter használható akár oktatási céllal (FEDDEMA, 2005), akár bemeneti adatként a további kutatásokban (TAPIADOR ET AL., 2019A; TAPIADOR ET AL., 2019B; DARU, 2021).

A doktori képzés során céлом volt az éghajlatkutatáshoz szükséges készségek elsajátítása és az éghajlatváltozás folyamatának tanulmányozása, továbbá, hogy több tudományterületen hasznosítható kutatási területtel foglalkozzak disszertációmban (GARCIA ET AL., 2014; SAPTA ET AL., 2015; KNOBEN ET AL., 2018). Az éghajlat-osztályozási módszerek alapja a homogén éghajlattal rendelkező területek leírására irányuló törekvés, mely a határok meghatározására összpontosít. Ezek a határok leggyakrabban az ökológiai vagy vegetációs eloszláshoz kapcsolódnak (KÖPPEN, 1936; HOLDRIDGE, 1967; RIVAS-MARTÍNEZ ET AL., 2011; GARDNER ET AL., 2020). Az éghajlat-osztályozási módszereket amellett, hogy a jelenlegi éghajlat vizualizálására és számszerűsítésére használják (KOTTEK ET AL., 2006; PEEL ET AL., 2007; CHEN ÉS CHEN, 2013; BELDA ET AL., 2015; ROHLI ET AL., 2015; RUBEL ET AL., 2017; GANEM ET AL., 2022), más tudományterületeken is alkalmazzák. A Föld éghajlati heterogenitásának pontos ismerete szükséges például a vegetáció-eloszlás

vizsgálatához (ZHANG ET AL., 2017A; ZHANG ET AL., 2017B; KARTIKA ET AL., 2022), vagy a hő- és vízellátottság igényhez köthető ökológiai régiók meghatározásához (PAPAGIANNOPOULOU ET AL., 2018). Az éghajlat-osztályozási módszereknek az éghajlatváltozás vizsgálatában is fontos szerepük van, például éghajlattípusok jövőbeni változásain keresztül az éghajlati modellek becsléseinek (RUBEL ÉS KOTTEK, 2010; ELGUINDI ET AL., 2014; BELDA ET AL., 2016; BECK ET AL., 2018; BINDHU ET AL., 2021), továbbá az éghajlati modelleredmények validálásában (FENG ET AL., 2014; BELDA ET AL., 2015). A Feddema-módszer is egyre több tanulmányban kerül alkalmazásra, ezek a publikációk nagy arányban az ELTE Meteorológiai Tanszék kutatóinak munkáihoz köthetők és kisebb arányban más nemzetközi kutatócsoportokhoz (a Feddema-módszer alkalmazásairól részletesen a **2.1** fejezetben írok).

A doktori képzés során, Campus Mundi ösztöndíjprogram keretében a prágai Charles University Léggörfizikai Tanszékén éghajlat-osztályozási módszerek klímaszimulációkon alapuló alkalmazásával kezdtem el foglalkozni. Továbbá Johannes Feddemával is lehetőségem volt együtt dolgozni. Feddema rávilágított, hogy a módszertan további fontos előnye, hogy az éghajlatváltozás folyamata könnyen és viszonylag kis adat és számításigénnyel leírható az éghajlat-osztályozások alkalmazása során, a jellemzően kis számú változó igény és egyszerű módszertan miatt. Ezért fontosnak tartottam, hogy bemutassak különböző lehetőségeket az éghajlatváltozás folyamatának megjelenítésére a módszer segítségével.

Kutatásom célja volt az éghajlat és az éghajlatváltozás folyamatának vizsgálata a Feddema-módszer alapján a hő- és vízellátottság, valamint a szezonális tekintetében. Az általam vizsgált régióknak a Kárpátok térségét jelöltem ki, mely megfelel a CarpatClim (SZALAI ET AL., 2013) adatbázis által lefedett területnek. A CarpatClim kifejezetten ennek a térségnek az éghajlati vizsgálatára lett megszerkesztve. A 21. század végére várható éghajlati-változásokhoz az EURO-CORDEX (JACOB ET AL., 2014; JACOB ET AL., 2020) adatbázisból nyertem adatokat.

Céлом volt

- annak bemutatása, hogy a Feddema-módszerrel több információ adható egy térség éghajlati képének vizsgálata során, mint más, széles körben alkalmazott leíró osztályozások alkalmazásával azáltal, hogy egyértelműbben értelmezhető szezonális tulajdonságokat rendel egy terület éghajlatához;
 - továbbá annak megmutatása, hogy ESSENWANGER (2001) kritériumait követve eredményeim alapján Feddema módszere alkalmasabb a Kárpátok térségében jellemző éghajlat elemzésére, mint az összehasonlítás során használt más leíró módszerek;
 - továbbá, hogy a Feddema-módszerrel bemutassam a Kárpátok térségében várható éghajlatváltozás típusait és a klíma- és szezonálitás típusok várható jövőbeni eloszlását.
- Az éghajlat-osztályozásokra jellemző előre meghatározott osztályok korlátozhatják az elemzést. Például az éghajlati besoroláshoz szükséges változók éghajlati határokhoz közeli értékeivel rendelkező rácspontok az éghajlati változók jelentős változása nélkül átválthatnak egy másik klímátípus-intervallumhoz tartozó értékre. És ehhez hasonlóan egy jelentős változás nem feltétlenül változtatja meg az éghajlati változókat. Ezért céлом volt bemutatni azt,
- hogy a Feddema-módszer alkalmas a diszkrét kategóriaváltások mellett az éghajlati és szezonálitás indexekben várható folytonos eltolódás irányának és mértékének meghatározására;
 - hogy az utóbbi úgynevezett Feddema-folytonos megközelítéssel a Feddema-diszkréthez képest többet információ adható egy térség éghajlatváltozásáról. Az éghajlati karakterisztikák változásának folytonos vizsgálata esetén arról is információt ad a Feddema-módszer, hogy a különböző éghajlatváltozási folyamat (például szárazodás vagy növekvő szezonálitás) közül várhatóan melyik lesz a legjellemzőbb adott területen a kategória váltástól függetlenül.

2. Éghajlat-osztályozási módszerek

Egy terület éghajlatának megismerése és leírása vitathatatlanul fontos részét képezi az emberek életének, hiszen befolyásolhatja a mindennapokat. A globális felmelegedés miatt az egyes területeken „megszokott” klímátípusok területi eloszlásának változása várható (GUAN ET AL., 2020; GUAN ET AL., 2021). Az éghajlat és az éghajlatváltozás folyamatának leírásához szükséges éghajlati-rendszert leképező modellek összetettsége, mely a valós világ állapotára és dinamikájára épül, nem teszi lehetővé az éghajlat és az éghajlatváltozás holisztikus leírásává való redukálását. Ennek a komplexitásnak a leegyszerűsítésére alkalmasak az éghajlat-osztályozások. Ebben a fejezetben röviden ismertetem az éghajlat-osztályozási módszerek kezdeteit és a modern osztályozások fő típusait (**2.1 fejezet**). Ismertetem továbbá a dolgozatom tárgyát képező Feddema-féle leíró megközelítéshez vezető fontosabb tudománytörténeti mérföldköveket és példákat mutatok be az éghajlat-osztályozási módszerek alkalmazási lehetőségeire (**2.1 fejezet**). A **2.2 fejezet**ben bemutatom a Feddema-féle éghajlat-osztályozási módszer fejlődését és eddigi alkalmazásait. A **2.3 fejezet**ben ismertetem a korábbi tanulmányokban a Kárpátok térségében alkalmazott éghajlat-osztályozásokkal kapott eredményeket.

2.1. Az éghajlat-osztályozási módszerek fejlődése és alkalmazása

Az éghajlat-osztályozások az éghajlat vizsgálatában betöltött szerepe évezredekkel ezelőtt kezdődött és hosszú fejlődési utat járt be. A modern éghajlat-osztályozások elődeinek megszületése az ókori görög kultúrához kapcsolható. A Kr. e. 6. században egy gömb alakú Földet feltételeztek, és a nap mozgásának ismeretében azonosítottak három osztályt és azon belül egy forró, két mérsékelt, és két hideg zónát (OLIVER, 1991). Az első számszerűsített éghajlati zóna Arisztotelész nevéhez köthető, aki földrajzi és csillagászati ismeretek alapján megadta a különböző éghajlattípusok első mennyiségi határait a trópusok azonosításával. A következő fontos lépcső Ptolemaiosz (i.sz. 90–168) munkássága, aki a naphossz alapján hét zónát definiált. Fontos mérföldköv volt 1650-ben Varenius *Climata* című írása melyben megadta a napok hosszát a napfordulók idején a Föld különböző pontjain és az ez alapján megalkotott zónákból a különböző éghajlati osztályokat (OLIVER, 1991).

A naphosszon alapuló egyváltozós osztályozások után, a 19. század során egyre szélesebb hálózatot lefedő műszeres mérések lehetővé tették a több változót figyelembe vevő sémák megjelenését. HUMBOLDT (1817) készítette el az első izotermikus térképet majd Dove a 19. század közepén meghatározta a havi hőmérséklet-eloszlásokat és az egyes szélességi fokok éves középhőmérsékletét, és publikálta az első globális hőmérséklet- és csapadék-térképeket (HUMBOLDT, 1817; DOVE, 1853; OLIVER, 1991; SANDERSON, 1999). Ezután SUPAN (1879) készítette el az éghajlati övezetek első térképét az éves átlagos hőmérséklet és a legmelegebb hónap hőmérséklete alapján, majd 1884-ben olyan módszert szerkesztett meg, amelyben a zónákat regionális jellemzők alapján nevezte el (SUPAN, 1879; OLIVER, 1991).

A továbbiakban a 19. század végén és a 20. század folyamán számos éghajlat-osztályozási módszer született (ÁCS ÉS BREUER, 2013), melyek két fő csoportra oszthatóak, az egzakt és empirikus módszerekre. Az egzakt sémák az éghajlati elemek változékonyságának becslésén és azok sajátvektor-analízis és klaszterek segítségével történő osztályozásán alapulnak (GADGIL ÉS JOSHI, 1983; DIAZ ÉS BROWN, 1993; PUGA ET AL., 2022). Az empirikus sémák alkalmazásával előre megszabott kategória határok szerint határozható meg az osztályozáshoz szükséges éghajlati változók és indikátorok adott területen jellemző értékei alapján (OLIVER, 1991; ROHLI ÉS VEGA, 2018; SZABÓ ET AL., 2022). Az empirikus sémák tovább bonthatók genetikus, praktikus és generikus módszerekre (ROHLI ÉS VEGA, 2018). A genetikus osztályozások a régió időjárását alakító folyamatok, így például a meghatározó légtömegek alapján definiált kategória rendszereken alapulnak. Azaz fő szempont, hogy mely mechanizmusok alakítják az adott terület éghajlatát (ROHLI ÉS VEGA, 2018). Ide tartozik például HETTNER (1930) szélöveken alapuló módszere, vagy Péczely Györgynek a vegetációs időszak átlaghőmérsékletén alapuló éghajlat-osztályozási módszere (PÉCZELY, 1979). A genetikus osztályozások 21. századi kutatásokban is alkalmazásra kerültek, például KEIM ET AL. (2005) munkájában, melyben szinoptikus osztályozás alkalmazásával vizsgálták a légszennyező anyagok mennyiségének kapcsolatát az időjárási helyzettel. A praktikus osztályozások célja például egy adott élőlény élőhelyének, terjedésének behatárolása a létfontosságú éghajlati indikátorok ismeretében (ÁCS ÉS BREUER, 2013). A generikus módszerek esetén, melyek közé a disszertációmban alkalmazott osztályozás is tartozik, pedig az időjárást alakító mechanizmusoktól függetlenül,

valamely előzetesen meghatározott kritériumrendszer alapján történik a leíró jellegű osztályozás alkalmazása a változók megfigyelt mintái alapján (ROHLI ÉS VEGA, 2018).

A mérések és megfigyelések elterjedése nemcsak a meteorológia, hanem a természettudományok más területein is fejlődést indított el. A 19. század során HUMBOLT ÉS BONPLAND (1807), HUMBOLDT (1817), DE CANDOLLE (1855) és GRISEBACH (1866) munkáikban már rávilágítottak arra, hogy kapcsolat van az éghajlat és a növényzet között ebből következően a vegetáció eloszlása alapján is osztályozható az éghajlat. Ennek alapja, hogy az éghajlat szabályozza a növényi funkciók földrajzi határait, annak függvényében, hogy a rendelkezésre álló hő és nedvesség elegendő-e az adott vegetációtípus számára. A felismerés hatására az éghajlat növényzetre gyakorolt hatása a hő- és vízellátottság kategóriáival ábrázolhatóvá vált (CARTER ÉS MATHER, 1966). Ezeket az éghajlati jellemzőket Carter és Mather aktív tényezőknak nevezte melyek együttesen jellemezhetik egy terület éghajlatát. Bár a vegetáció szempontjából a legjelentősebb tényezők a rendelkezésre álló energia és a nedvesség, nem jelentik az éghajlat összességét. Azonban, ha minden meteorológiai változót figyelembe vennénk, azzal az éghajlati régiók annyira elaprózódnának, hogy mindegyik pontnak saját klímája lenne. Annak érdekében, hogy csak néhány éghajlati típus elegendő legyen minden régió lefedésére, egyszerűsíteni kell egy adott éghajlat meghatározásának kritériumait.

Az első hő- és vízellátottságon alapuló osztályozást Linsser készítette és jelentette meg 1867-os és 1869-es munkáiban (LINSSE, 1867; 1869). Ezt követte a mai napig legszélesebb körben elterjedt Köppen-osztályozás első verziójának megszerkesztése Wladimir Köppen meteorológus-éghajlatkutató által 1900-ban (KÖPPEN, 1900; CARTER ÉS MATHER, 1966). Köppen az éghajlati karakterisztikák és a vegetáció típusok (biomok) közötti statisztikai kapcsolat alapján meghatározta a három szintből álló osztályozási rendszeréhez tartozó küszöbértékeket a hőmérséklet és csapadék függvényében. Az eredeti módszert, melyben még leíró jellegű elnevezések szerepeltek, mint például a „pingvin” éghajlat, követte a Köppen-féle három betűs klímaképleteket tartalmazó 1918-as munkássága melyet Köppen haláláig fejlesztett (KÖPPEN, 1918; KÖPPEN, 1936). Köppen munkáját más kutatók folytatták (GEIGER, 1954; 1961; TREWARTHA, 1954; RUBEL ÉS KOTTEK, 2010) például a Köppen–Geiger osztályozással (GEIGER, 1954; GEIGER, 1961) és a Köppen-Trewartha osztályozással (TREWARTHA, 1954; RUBEL ÉS KOTTEK, 2010). A 19. és 20. század során már több kutató, Linsser és De Martonne (OLIVER, 1991) majd HOLDRIDGE

(1947) és THORNTHWAITE (1948) is felismerte, hogy a vízellátottság fontosabb mutatója az élővilág eloszlásának, mint pusztán a hőmérséklet és csapadék. HOLDRIDGE (1947) osztályozásában például kapcsolatot állapított meg a növényzet eloszlása és olyan éghajlati indikátorok között, mint biohőmérséklet, valamint évi átlagos csapadékmennyiség és a PET (potenciális evapotranszpiráció) aránya. A vízháztartáson alapuló osztályozások egyik legfontosabb alakja THORNTHWAITE (1948), aki felismerte, hogy az adott helyen az év folyamán beérkező napsugárzás mennyisége és a rendelkezésre álló nedvesség mennyisége között kapcsolat van. A párolgási adatok hiánya nehezítette a csapadék és a párolgás közötti kapcsolat használatát, mint a vízellátottság mércéje. Thornthwaite osztályozásában közelítette a PET-et, és a vízellátottságot olyan indexek segítségével, amelyek empirikusan meghatározhatóak a leggyakrabban rendelkezésre álló hőmérséklet és csapadék adatokból. A Thornthwaite-módszer jelentős előrelépést jelentett a legelterjedtebb Köppen-módszerhez képest, mert talajnedvesség függő vízellátottságot számol. A Thornthwaite-féle osztályozáshoz alkalmazott PET és P (csapadék) alapú nedvességi index jobban tükrözte a környezet vízellátottságát, mint a nyers P adatok (ELGUINDI ET AL., 2014). Azonban a nagy számításigény, és a túl sok kategória miatt ez az éghajlat-osztályozási módszer nem terjedt el olyan széleskörben mint például Köppené. FEDDEMA (2005) alkotta meg a disszertációm tárgyát képező osztályozást Thornthwaite módszere alapján, amit a **2.2** fejezetben tárgyalok bővebben.

Az osztályozások fejlesztése és egy adott kutatáshoz alkalmazandó módszertan kiválasztása során fontos szempont, hogy milyen feltételeknek tesz eleget egy jól alkalmazható éghajlat-osztályozás. Ezeket ESSENWANGER (2001) foglalta össze (ÁCS, 2017) mely alapján

- egy éghajlat-osztályozásnak a lehető legkisebb az adatigénye;
- fizikai elveken nyugszik;
- egyszerűen és egyértelműen meghatározhatóak a klímátípusok;
- az éves és a szezonális jellemzőket egyaránt figyelembe veszi;
- a klímátípusok átláthatóan megjeleníthetők térképen.

Az alkalmazandó osztályozás kiválasztásánál fontos szempont, hogy a légkört leíró változók, mint a hőmérséklet, csapadék, szél, páratartalom és ezek éves és szezonális változása közül melyek a legmeghatározóbbak az osztályozás alkalmazásának szempontjából. Figyelembe kell venni azt is, hogy mely adatok érhetőek el jó tér- és időbeli

felbontásban. Míg a hőmérséklet és a csapadék közvetlen felhasználása egy környezeti tanulmány számára nem feltétlen optimális, addig az éghajlat-osztályozások jól alkalmazhatók például az ökológia területén. Ennek oka, hogy ezen módszerek megszerkesztése során cél volt, hogy közvetlenül kapcsolódjanak az élővilág szükségleteihez (TAPIADOR ET AL., 2019A) miközben adatkövetelmények viszonylag egyszerűen biztosíthatók (BELDA ET AL., 2014).

Összegezőképp elmondható, hogy nincs olyan univerzális módszer, amely minden esetben ugyanolyan jól működne, hiszen az egyes osztályozások a felsorolt tulajdonságokat eltérő mértékben hordozzák. Az alkalmazandó módszer kiválasztása egy kutatás során erősen függ a vizsgálat céljától, ezért ezt a lehető legpontosabban kell meghatározni és az alapján kiemelni a fentiekből a legfontosabb tulajdonságokat. A legelterjedtebb alkalmazási területek

- az éghajlat és éghajlatváltozás vizualizálása és számszerűsítése (KOTTEK ET AL., 2006; PEEL ET AL., 2007; CHEN ÉS CHEN, 2013; ROHLI ET AL., 2015; BELDA ET AL., 2016);
- valamint az éghajlatváltozás vizsgálatában fontos eszköztárat képező klímaszimulációk validálása (GNANADESIKAN ÉS STOUFFER, 2006; RUBEL ÉS KOTTEK, 2010; ELGUINDI ET AL., 2014; FENG ET AL., 2014; BELDA ET AL., 2015; BECK ET AL., 2018; LÜ ET AL., 2020; BINDHU ET AL., 2021).

Az éghajlat-osztályozások kulcsfontosságúak az éghajlatváltozás hatásának vizsgálata során, hiszen az éghajlati heterogenitásának pontos ismerete szükséges az olyan társadalmi és gazdasági szempontból is fontos területeket érintő kockázatok felismerésére, mint a

- különböző növény- és állatfajok előfordulásának eloszlásváltozása (CUCULENAU ET AL. 2002; KELLY ÉS GOULDEN, 2008; SUNDAY ET AL., 2012; GARCIA ET AL., 2014; ZHANG ET AL., 2017A; ZHANG ET AL., 2017B; SONG ET AL., 2018; LENOIR ET AL., 2020; CALATAYUD ET AL., 2021; KARTIKA ET AL., 2022);
- vagy a vízgazdálkodás (CARACCILO ET AL., 2018; KNOBEN ET AL., 2018; PAPAGIANNOPOULOU ET AL., 2018).

A természettudományok és az empirikus módszerek fejlődése során felismerték, hogy a bioszféra, így az ember élete is az éghajlati-rendszer ritmusa szerint működik, emiatt a növényzet-éghajlat kapcsolat fontossága mellett lehetséges és szükséges az

- ember-éghajlat kapcsolatrendszeren alapuló humánklimatológiai osztályozások megszerkesztése (YAN, 1996; YANG ÉS MATZARAKIS, 2015; ÁCS ET AL., 2020; ÁCS ET AL., 2021A; ÁCS ET AL., 2021B; NAVARRO ET AL., 2022; ÁCS ET AL., 2022A; ÁCS ET AL., 2022B; ÁCS ET AL., 2022C).

Az 1. táblázatban röviden bemutatásra kerül néhány példa a fenti alkalmazási területek közé tartozó tanulmányokból.

1. táblázat Példák az éghajlat-osztályozások alkalmazási lehetőségeire

Témakör	Publikáció	Kutatás rövid leírása
Klímamodell validáció	GNANADESIKAN ÉS STOUFFER (2006)	A földi bioszféra szempontjából releváns, kapcsolt légkör-óceán modellekben megjelenő modellhibákat vizsgálták a Köppen éghajlat-osztályozás segítségével.
Klímamodell validáció	LÜ ET AL. (2020)	A globális modellszimulációk új generációjának, a CMIP6 ¹ eredményeinek felhasználásával alkalmazták a Köppen éghajlat-osztályozási módszert.
Vegetáció-eloszlás	CUCULENAU ET AL. (2002)	A HOLDRIDGE (1947) modellt alkalmazták a vegetáció éghajlatváltozásra való érzékenységének vizsgálatára, valamint becsülték, hogyan változik egy régió alkalmassága egy adott vegetáció típus számára.
Vegetáció-eloszlás	SONG ET AL. (2018)	Műholdadatokat alapján vizsgálták a globális felmelegedés felszínborítottságra vonatkozó hatásait. Eredményeik alapján minden éghajlati tartományban a hegyvidéki rendszerek erdőborítottsága nőtt, míg a száraz és félszáraz ökoszisztémák veszítettek a növénytakaróból.
Fajok élőhelye	LENOIR ET AL. (2020)	A fajok előfordulásának eltolódása és az izoterma-eltolódások közötti kapcsolatot vizsgálták. A több mint harmincezer esetet összegző tanulmányuk alapján arra az eredményre jutottak, hogy a tengeri fajok jobban követik az izoterma eltolódásokat, és hatszor gyorsabban mozognak a sarkvidékek felé, mint a szárazföldi fajok.
Vízgazdálkodás	CARACCILO ET AL. (2018)	Budyko megközelítését alkalmazták az éves lefolyás és annak várható változásának elemzésére a Köppen-Geiger (KOTTEK ET AL., 2006) alapján meghatározott különböző éghajlati területeken.
Humánklimatológia	ÁCS ET AL., 2020; ÁCS ET AL., 2021A; ÁCS ET AL., 2021B; ÁCS ET AL., 2022A; ÁCS ET AL., 2022B; ÁCS ET AL., 2022C	A humán termikus klíma meghatározásával kapcsolatos kutatások zajlanak az ELTE Meteorológiai Tanszékén is. A Kárpátok térségére végzett vizsgálatok alapján a környezeti tényezőket és humán jellemzőket szintetizáló ruházati index modellel számszerűsíthető, hogyan hat eltérő testalkatú, magasságú, súlyú, nemű, életkorú emberekre egy terület éghajlata.

¹ Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 – Kapcsolt modelleket összehasonlító projekt 6. fázisa

2.2. A Feddema-féle éghajlat-osztályozási módszer fejlődése és alkalmazásai

A Feddema-féle módszer a 21. században lett megszerkesztve, így korszerű módszernek tekinthető a széleskörben elterjedt, még a múlt században kifejlesztett módszerekhez képest, mint például KÖPPEN (1918), HOLDRIDGE (1947) vagy THORNTHWAITE (1948) éghajlat-osztályozása. Feddema a 2005-ben publikált munkájában ismertette éghajlat-osztályozását, melynek kiindulását Thornthwaite 1948-ban publikált módszere jelentette. Thornthwaite módszere, bár sok szempontból előrelépést jelentett Köppen módszeréhez képest, de használata mégsem terjedt el. Ennek oka, amellett, hogy a megjelenés idejében korlátozott számítógépes kapacitás miatt kihívást jelentett a PET meghatározása, és a módszertan túlságosan komplex volt. Ezért a fejlesztéshez szükség volt egyszerűsítésre és ennek eredményeképp egy olyan új módszer kialakítására, aminek eredményei a számítási háttér ismerete nélkül is értelmezhető szélesebb közönség számára. FEDDEMA (2005) részletesen tárgyalja a tanulmányában Thornthwaite-típusúként hivatkozott új osztályozás kidolgozásának menetét. Ezekből a következőkben néhány fontos észrevételt és fejlesztést emelek ki, melyek az alkalmazhatóság megkönnyítésére és az élővilág szempontjából legfontosabb éghajlati információk bemutatására irányultak.

Feddema felismerte, hogy a betűjelzések/klímaképletek (ÁCS ÉS BREUER, 2013) alkalmazása az osztályok elnevezése esetén plusz lépést jelent az értelmezés során, így módszertanában ezek helyett könnyen értelmezhető terminológia alapján kerülnek elkülönítésre az osztályok. Feddema módszertana kapcsán újragondolta a szezonális meghatározását, figyelembe véve CARTER ÉS MATHER (1966) kritikáját a nyári és téli hónapok és évszakok Thornthwaite módszerében történő alkalmazásával kapcsolatban. CARTER ÉS MATHER (1966) rámutattak, hogy ezek a kötött időszakok nem értelmezhetőek a világ minden táján, így a száraz és nedves időszakok intenzitása jobb mérőszáma lehet a szezonálisnak. Ezt kiegészítve kiemelő, hogy a gyors ütemű, antropogén eredetű éghajlatváltozás korában nemcsak olyan területeken válik kérdésessé az évszakokon alapuló módszertanok alkalmazása, mint az Egyenlítő környéke. Az északi-féltekén, így többek között Európában is mérhető az időbeli eltolódás és megváltozott időtartam az évszakok esetén és a globális felmelegedés fokozódásával várhatóan tovább változik majd az évszakok megszokott menete (PARK ET AL., 2018; WANG ET AL., 2021)

A Thornthwaite-típusú, légköri vízháztartáson alapuló Feddema-osztályozás a rendelkezésre álló energia és víz mennyiségét éves és szezonális skálán mutatja a PET és a

nedvességi index alapján (**5. Módszertan** fejezet), amely több tényleges fizikai információt tartalmaz, mint csak a T (hőmérséklet) és P használata (ROHLI ÉS VEGA, 2018). A módszer indirekt kapcsolódik a növényborítottsághoz, hiszen a hő- és vízellátottság alapvetően befolyásolja a növényzet eloszlását, azonban ez függ még további tényezőktől, mint például a terület földrajzi elszigeteltségétől (ÁCS, 2017). Feddema egységes intervallumokat használ küszöbértékek helyett a kategóriák meghatározásához, ami lehetővé teszi a finomhangolást különböző módokon (pl.: alkategóriák meghatározásával az eredeti intervallumok szimmetrikus felosztásával vagy Feddema indexek gyakoriságát figyelembe véve; ÁCS, 2017). Az éghajlat leírása és az éghajlat-osztályozások fejlesztése esetén az élővilág számára legfontosabb meteorológiai változók időbeni és térbeli eloszlásán alapuló homogén éghajlati régiók meghatározása az elsődleges cél. Azonban ezek a módszerek névlegesen meghatározott éghajlati osztályok statikus térképeit eredményezik, amelyek nem képesek mérni az osztályokon belüli gradienseket vagy időbeli változásokat. Ezért, bár Feddema módszerében szintén meghatározott kategóriákat, de rávilágított, hogy az éghajlat folyamatosan változik térben. Emiatt ezek a konkrét határok az értelmezhetőség miatt szükségesek lehetnek, de az éghajlati változók gradiens térképként is bemutatathatók. Feddema kiemelte továbbá, hogy amellett, hogy egy jó osztályozás segítségével kis számú változóval írható le egy terület éghajlata, cél az is, hogy az éghajlatváltozással kapcsolatos megfigyelt és éghajlati modellekkel szimulált folyamatok is leírhatóak legyenek mind tudományos mind oktatási céllal. A Feddema-féle éghajlat-osztályozás szerkezetéből adódóan nemcsak homogén éghajlati-osztályok meghatározására alkalmas, hanem az éghajlatváltozás vizsgálatára is. Fontos kiemelni továbbá, hogy a Feddema-séma nem hierarchikus, így a különböző jellemzők (éves és szezonális hő- és vízellátottság) együtt, vagy külön-külön is tanulmányozhatók a későbbiekben - az **4.1. fejezetben** részletesen bemutatásra kerülő Feddema-indexek alapján. Az éves hőellátottság, mely a legtöbb módszertanban az osztályozás fő típusát adja meg, globálisan a forrótól a fagyosig terjed, míg az vízellátottság az aridtól a nagyon nedvesig. Feddema módszerével meghatározható, hogy a T és/vagy a P éven belüli ingadozásához rendelhető-e hozzá a szezonális, továbbá a szezonális változékonyság mértéke kicsitől az extrémig. Feddema módszerével 36 klímátípus és 12 szezonális-típus különböztethető meg globálisan, melyek együttes meghatározásával 432 különböző klímepár határozható meg.

A 2005-ben publikált Feddema-féle éghajlat-osztályozási módszer még csak néhány esetben került alkalmazásra, jelentős részben az ELTE Meteorológiai Tanszék kutatóinak munkája során (ÁCS ET AL., 2013; ÁCS ET AL., 2015B; ÁCS ET AL., 2017; ÁCS ET AL., 2018; ÁCS ET AL., 2021A; ÁCS, 2017; BREUER ET AL., 2017; BREUER ET AL., 2018; SKARBIT ET AL., 2017; SZABÓ ET AL., 2021; SZABÓ ET AL., 2022). A publikációk évszámából és tartalmából azonban arra lehet következtetni, hogy egyre szélesebb körben figyelnek fel a kutatók az osztályozásra nemzetközi szinten is (GRUNDSTEIN, 2008; ELGUINDI ÉS GRUNDSTEIN, 2013; ELGUINDI ET AL., 2014; SYLLA ET AL., 2016; TALL ET AL., 2017; RAHIMI ET AL., 2019; TALCHABHADEL ÉS KARKI, 2022; NAVARRO ET AL., 2022; RAZIEI, 2022).

A következőkben a publikációk időrendje szerint röviden bemutatom a Feddema-módszerét alkalmazó hazai és nemzetközi tanulmányokat. A Feddema-módszer 2005-ös megjelenését követően Grundstein 2008-as munkájában került először alkalmazásra. GRUNDSTEIN (2008) az Egyesült Államok klíma- és szezonális-típusait és azok változásait vizsgálta a 20. század során. A Feddema-osztályok eltolódása alapján arra a következtetésre jutott, hogy a megfigyelt változásnak jelentős hidrológiai, ökológiai, mezőgazdasági és társadalmi hatásai lehetnek. Például az ország keleti részében megfigyelt növekedés a vízellátottságban vizsgált időszak során csökkentheti a korábbi hidrológiai kutatásokban megállapított, népességnövekedés következtében növekvő, vízellátottsággal kapcsolatos stresszt. A Feddema-módszer következő alkalmazása ÁCS ET AL. (2013) munkájában jelenik meg, melyben többféle biofizikai éghajlat-osztályozási módszert alkalmaztak Magyarországon területére, köztük a FEDDEMA (2005) osztályozást. Kiemelendő, hogy ÁCS ET AL. (2013) alapján az Alföld esetén a globális skálára megszerkesztett Feddema-módszer szerint „hűvös-száraz”, míg a Magyarországra megszerkesztett PÉCZELY (1979) osztályozás a „meleg-száraz” éghajlat kategóriába esett, de az éghajlatváltozás becsült tendenciájában nem volt jelentős eltérés (ÁCS ET AL., 2013; SKARBIT ET AL., 2014). Ugyanebben az évben jelent meg ELGUINDI ÉS GRUNDSTEIN (2013) tanulmánya, ahol regionális és globális klímamodellek eredményeinek összehasonlítására, valamint a 20. és 21. századi éghajlat és éghajlatváltozás becslésére használták a Feddema-osztályozást. Eredményeik alapján a regionális modellek jól teljesítenek az USA fő klímatiszpusainak lehatárolásában és hozzáadott értékkel rendelkeznek a nyers globális modelledmények alapján megállapítható eredményekhez képest. Az éghajlatváltozás hidrológiai és vízellátottsággal

kapcsolatos hatásaival kapcsolatban kiemelték például, hogy a hegyvidéki területek melegekedése csökkenő hóvastagsághoz és korábbra tolódó és csökkenő lefolyáshoz vezethet.

A következő évben ELGUINDI ET AL. (2014) 32 RCP4.5 és RCP8.5-ös forgatókönyveket² követő CMIP5³ modellfutás eredményeire alkalmazta a Feddema-módszert a 20. és 21. század végére vonatkozóan. Megállapították, hogy a felmelegedés miatt a már a legmelegebb torrid hőellátottság kategória sem fedi a trópusokon a várható éghajlatot és új, szupertorrid kategória bevezetésére van szükség. Továbbá ebben a tanulmányban került először alkalmazásra a Feddema-osztályozás folytonos megközelítése az éghajlatváltozás vizsgálatára. A klímátípusok területi lefedettségének csökkenése és növekedése mellett bemutatásra került, hogy a kategóriákon belül a hő- és vízellátottságot jelölő indexek eltolódása figyelhető meg, ezzel láthatóvá és könnyen számszerűsíthetővé téve a klímátípusokon belül tapasztalható változásokat. Feddema-módszerének következő alkalmazása ÁCS ET AL. (2015) tanulmányához köthető, akik Magyarország 20. századi éghajlatát és éghajlatváltozását vizsgálták az eredeti és a vizsgált régióra finomhangolt Feddema-módszer alapján. A CRU⁴ adatok alapján a globális Feddema-módszer alkalmazásával kapott eredmények esetén nem különböztek el a különböző éghajlati alterületek, de a nedvességi-index értékek gyakorisága alapján mezoskálára finomhangolt módszer már alkalmas volt a hazánkra jellemző heterogén éghajlati kép megjelenítésére.

SYLLA ET AL. (2016) tanulmányukban regionális éghajlatváltozást vizsgáltak Nyugat-Afrikára vonatkozóan a Feddema klímátípusok, azaz a hő- és vízellátottság várható eltolódása alapján. A kutatás szerint a század végére a régió egyre forróbb és szárazabb lesz, míg a nedvesebb területek kiterjedése csökken és ezen változások jelentős hatással lehetnek az ökoszisztémákra. A Száhel-övezetben a jelenleg még Feddema alapján szemi-arid területek várhatóan a szárazabb arid nedvességi típusba tolnak, mely a különböző növényfajok a korábbinál magasabb tengerszint feletti magasságú területek felé történő

² Representative Concentration Pathway - Reprzentatív Koncentrációs Nyomvonal. Éghajlati forgatókönyvek a globális átlaghőmérséklet emelkedés várható menetére vonatkozólag. Az RCP-k elnevezésében szereplő számértékek a teljes sugárzási kényszer (légkör tetején bejövő és kimenő sugárzás különbsége) megváltozásának mértékét fejezik a 21. század végére vonatkozóan Wm^{-2} -ben. [metoffice.gov.uk]

³ Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 – Kapcsolt modelleket összehasonlító projekt 5. fázisa

⁴ Climatic Research Unit – Klimatológiai Kutatási Egység

eltolódásához vezethet. Az eredmények alapján elengedhetetlenül fontos lesz a vízgazdálkodásban és a mezőgazdaságban, az éghajlatváltozás már elkerülhetetlen hatásaihoz való alkalmazkodás a régió sebezhetőségének csökkentése végett.

Feddema módszere 2017-ben már több publikációban alkalmazásra került (ÁCS, 2017; BREUER ET AL., 2017; SKARBIT ET AL., 2017; TALL ET AL., 2017). ÁCS (2017) könyvében a Feddema-osztályozás bemutatása mellett a módszerrel kapott eredmények alapján vizsgálja Európa 20. és 21. századi éghajlatát. Könyvében kitér a generikus éghajlat-osztályozási módszerek interdiszciplináris hátterére és alkalmazhatóságára, mely magába foglalja többek között a klimatológia, a földrajz, a geológia, a biogeográfia, az ökológia és a környezettudományok területét. A könyvben Ács példákat hoz a Feddema-módszer eredeti és finomhangolt alkalmazására különböző régiókra, például Magyarországra és az osztrák-svájci hegyvidékre vonatkozólag. Ugyanebben az évben BREUER ET AL. (2017) Magyarországra alkalmazta a Feddema-módszert, hogy tanulmányozza a régióban a 20. század során detektált éghajlatváltozást az eredeti és a vizsgált területre finomhangolt osztályozás alapján. Az előbbi alkalmazás eredménye a melegedést mutatja fő folyamatnak, míg a finomhangolt módszer a szárazodás és a melegedés együttes megjelenését is képes kimutatni. SKARBIT ET AL. (2017) Európa egészére végzett vizsgálatokat, a 20. és 21. századi éghajlat leírása és becslése mellett különböző PET módszereket is hasonlított össze. Megmutatta, hogy a Feddema-módszer eredményei jól visszaadják a fő éghajlatalakító tényezők, így a szélességi és hosszúsági körök, a meredekség és a nagy víztestek hatására kialakuló heterogén éghajlati képet. A 21. századi éghajlatváltozás várható hidrometeorológiai hatásait vizsgálta Szenegálra és azon belül a Guiers-tóra TALL ET AL. (2017) a Feddema-féle vízellátottsági kategóriák alapján. A becsléseik alapján a vízellátottság olyan mértékű csökkenése várható mely fokozza az öntözéses mezőgazdasági termelésre rakódó stresszt.

Ezt követően 2018-ban az Alpok osztrák-svájci területeire alkalmazta Feddema eredeti és finomhangolt módszerét ÁCS ET AL. (2018). A 20. századi éghajlatváltozás az osztrák területek esetén szárazodást, míg a svájci területek esetén főként a hőellátottság növekedését idézte elő, míg az Alpok hideg és vízellátottság szempontjából a közép-keleti területein nem volt kategória váltás. Szintén 2018-ban BREUER ET AL. (2018) teljes Európára alkalmazta a Feddema-módszert a 20. és 21. századi éghajlatváltozás bemutatására és becslésére. Az eredmények alapján a fő éghajlatváltozási folyamat a hőellátottság

növekedése, mely a hidegről hűvösre való váltásként jelenik meg a terület körülbelül 45 %-án, továbbá 8%-on a hűvösből melegbe váltás, míg 10%-on szárazodás várható. Az éghajlatváltozás fenntartható mezőgazdaságra kifejtett hatásainak feltérképezése során alkalmazta Feddema módszerét RAHIMI ET AL. (2019) Délnyugat-Ázsia 21. századi várható éghajlatváltozásának becslésére CMIP5 multimodell ensemble eredmények alapján. A század végére a torrid területek az 1971–2015-ös referencia időszakra vonatkozó 13,8%-hoz képest az RCP4.5 éghajlati forgatókönyv esetén várhatóan több mint duplájára, míg az RCP8.5 esetén közel háromszorosára nőnek. Az eredmények alapján jelentős ökológiai, hidrológiai és társadalmi hatások várhatók az éghajlatváltozás következtében, különös tekintettel a fenntartható mezőgazdasági rendszerekre. Két évvel később a Kárpátok térségére vonatkozó vizsgálat eredményeit publikálta ÁCS ET AL. (2021). A kutatás során a ruházati ellenállás index és a Feddema módszerben a hőellátottság kifejezésére szolgáló PET közötti összefüggés alapján vizsgálta a régió humán termikus éghajlatát. SZABÓ ET AL. (2021) összehasonlító elemzésében Köppen és a Worldwide Bioclimatic Classification System módszerekkel együtt alkalmazta Feddema osztályozását a Kárpátok térségére, vizsgálva, hogy mely módszer képes a terület éghajlati heterogenitásának megjelenítésére. SZABÓ ET AL. (2021) kutatása kiterjedt a különböző magassági régiók szerinti felosztásra is.

Az egyik legfrissebb Feddema alkalmazás NAVARRO ET AL. (2022) tanulmányában jelenik meg. NAVARRO ET AL. (2022) először alkalmazta a módszert a CMIP6 modellek és az ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) 6. Értékelő Jelentésében (IPCC, 2021) is alkalmazott SSP⁵ forgatókönyvek alapján. NAVARRO ET AL. (2022) a FEDDEMA (2005), és a LOHMANN ET AL. (1993) által leírt Köppen és a TREWARTHA (1954) éghajlat-osztályozások segítségével értékelték a klímamodellek teljesítményét. Vizsgálták továbbá az éghajlat-osztályozások alkalmazhatóságát az éghajlat és éghajlatváltozás GCM⁶ eredmények vizsgálata során. Megállapították többek között, hogy az egyes éghajlat-osztályozások érzékenyek a bemenő referencia adatra. Vizsgálták a GCM-ek használatából eredő korlátokat, melyeknek oka például a csapadékbecslések bizonytalansága. A Feddema-módszer több információt ad a hő- és vízellátottságról, mint a Köppen- és a Trewartha-

⁵ Shared Socioeconomic Pathways - Közös Társadalmi-gazdasági Nyomvonalak

⁶ General Circulation Model – Általános Cirkulációs Modellek

módszer. Azonban mivel a Feddema-féle nedvességi index erősen függ a csapadéktól, így a bizonytalan modellbecslés miatt a GCM ensemble átlaggal való korreláció rosszabb, mint a Köppen módszerek esetén. Szintén 2022-es publikációban, egy Irán 20. századi éghajlatát vizsgáló tanulmányban alkalmazta RAZIEI (2022) Feddema módszerét a Köppen-Geiger és az UNEP⁷ szárazsági indexen alapuló éghajlat osztályozásokkal együtt. Az eredmények összehasonlítása alapján a módszerek megfelelően képesek reprezentálni Irán fő klímátípusait. Nepál éghajlatváltozását vizsgálta a hő- és vízellátottság várható változása alapján TALCHABHADEL ÉS KARKI (2022). A kutatás során RAHIMI ET AL. (2019) munkájához hasonlóan RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyveket követő CMIP5 modell eredményeket használtak fel. A kutatás eredményei alapján a hő- és vízellátottsági típusok becsült eltolódása hatással lehet a mezőgazdasági gyakorlatokra, beleértve az öntözést. Regionális éghajlatváltozás vizsgálatára alkalmazta továbbá a Feddema-módszert SZABÓ ET AL. (2022) a Kárpátok térségének klíma- és szezonáltság-típus változásainak meghatározására. A tanulmányban ELGUINDI ET AL. (2014) után először került alkalmazásra a Feddema-módszer folytonos megközelítése az egyes klímátípusokhoz tartozó hő- és vízellátottság indexek várható eltolódásának vizsgálatával. SZABÓ ET AL. (2022) először vizsgálta továbbá a Feddema-féle szezonáltság-típusokhoz tartozó szezonáltsági indexek eltolódását kategória váltástól függetlenül.

2.3. Éghajlat-osztályozási módszerek alkalmazása a Kárpátok térségében

A Kárpátok térségének megfigyelt és becsült éghajlatváltozás-vizsgálatára vonatkozóan éghajlat-osztályozási módszerekkel kapott eredmények alapján számos tanulmány született melyek esetenként Európára vonatkozó kutatáson belül térnek ki a régióra például CASTRO ET AL. (2007), JYLHÄ ET AL. (2010), HANF ET AL. (2012), GALLARDO ET AL. (2013), SKARBIT ET AL. (2017) és BREUER ET AL. (2018) kutatásában. A publikálásra került vizsgálat a térségen belül országosszintű, vagy alrégiókra vonatkozólag, például MELO ET AL. (2013), MIHAILOVIĆ ET AL. (2015), BREUER ET AL. (2017), RUBEL ET AL. (2017), SKALÁK ET AL. (2018) és SZELEPCSÉNYI ET AL. (2018) által és csak néhány esetben történt leíró módszerekkel kutatás kiemelten a Kárpátok térségére fókuszálva például

⁷ United Nations Environment Programme – Egyesült Nemzetek Szövetségének Környezeti Programja

SZELEPCSÉNYI ET AL. (2018), ÁCS ET AL. (2015), BREUER ET AL. (2017), ÁCS ET AL. (2017), SZABÓ ET AL. (2021) és SZABÓ ET AL. (2022) esetén. Ebben a fejezetben bemutatásra kerül a Kárpátok térségének éghajlata és az éghajlatváltozás folyamata a régióra vonatkozó kutatások főbb eredményeinek bemutatásán keresztül, kezdve az európai szintű, majd az országokra vonatkozó vizsgálatokkal és főbb megállapításokkal.

Európára, a Földközi-tenger régiójára és a Közel-Keletre (EPPO) vonatkozó hibrid éghajlat-osztályozást szerkesztett BOUMA (2005) a Köppen-Geiger, a Walter-Lieth és a Thran-Broekhuizen osztályozások kombinálásával az EPPO régió agroklimatológiai szempontú felosztására a növényvédelmi termékek regisztrációja során. Ez alapján a Kárpátok térségének legnagyobb része a középső (central) típusba tartozik, ahol kontinentális növényfajok jellemzőek melyek a hideg és viszonylag száraz teleket kedvelik, és a meleg száraz nyártól egészen az esetenként nedves nyarakig nőnek. A Földközi-tenger régiójára vonatkozó vizsgálatot végzett GAO ÉS GIORGI (2008) a Köppen-Trewartha éghajlat-osztályozás, a PET-en és csapadékon alapuló UNEP aszály index és a csapadékon és a nettó felszíni sugárzáson alapuló Budyko-aszályindex alapján. Megállapították, hogy a Kárpátok térségében az alföldeken a szárazság növekedése jellemző, ami a felmelegedésnek köszönhető. Ezen felül megállapították, hogy a köppeni klímabesorolás szempontjából a vizsgált szárazföldi területek többsége éghajlati rezsim-eltolódást mutat, ami egyben a potenciális növénytakaró eltolódását is jelentheti a jövőben.

Magyarország és a Pannon-medence éghajlatát Holdridge módszere alapján vizsgálta SZELEPCSÉNYI ET AL. (2014; 2018) és Köppen alapján FÁBIÁN ÉS MATYASOVSKY (2010). A Kárpátok térségére a Holdridge módszert alkalmazta SZELEPCSÉNYI ET AL (2018) és Feddema módszerét ÁCS ET AL. (2015), BREUER ET AL. (2017), ÁCS ET AL. (2017), SZABÓ ET AL. (2021) és SZABÓ ET AL. (2022). A Köppen klímátípusok változásait 1971 és 2060 között FÁBIÁN ÉS MATYASOVSKY (2010) négy SRES⁸ emissziós forgatókönyv (A1FI, A2, B1, B2) segítségével vizsgálta. A vizsgálat az éghajlati szélsőségek erősödését és a sztyeppei klímátípus megjelenésének gyakoriságát is kimutatta. Ennél a vizsgálatnál a Köppen-féle módszert két további osztállyal bővítették, mert néhány esetben, ahol a havi

⁸ Special Report on Emission Scenarios – Kibocsátási Foratókönyvek Speciális Jelentése

középhőmérséklet nagymértékben meghaladta a nyári meleget jelző küszöböt, az eredeti Köppen-besorolás nem tudta azonosítani a várható felmelegedési trendet. ÁCS ET AL. (2013), KÖPPEN (1936), HOLDRIDGE (1947), THORNTHWAITE (1948), FEDDEMA (2005) és PÉCZELY (1979) osztályozását alkalmazták Magyarország területére a 20. századra vonatkozólag. Eredményeik alapján a legszembetűnőbb melegedés és szárazodás a Dunántúl délnyugati területein vehető észre. SKARBIT ET AL. (2014) kutatásukban Péczely György osztályozását (PÉCZELY, 1979) alkalmazták a magyarországi éghajlat 20. századi változásainak leírására. A Péczely-féle osztályok változása alapján az éghajlat területi eloszlásának homogenitása nőtt és a meleg száraz klímátípusok aránya is növekedett a hűvös, viszont a nedvesebb klímátípusok aránya csökkent. A magyarországi klímaváltozást a Feddema-módszer szerint BREUER ET AL. (2017) vizsgálta a 20. század éghajlatának számszerűsítésére és megjelenítésére. A fő folyamat a szárazodás volt, és a vizsgált terület 23,3 %-án volt tapasztalható klímaváltozás a Feddema besorolás szerint. BREUER ET AL. (2018) és SKARBIT ET AL. (2017) Európára fókuszáló tanulmányaiban a SRES A1B forgatókönyvet alkalmazták. Az SRES-t leváltó RCP-eket (MOSS ET AL., 2010) az IPCC AR5-ben (IPCC, 2014) vezették be, amelyek a különféle üvegházhatású gázok kibocsátását csökkentő stratégiák eredményeként a sugárzási-kényszerben bekövetkező változásokat képviselik. Feddema-módszerét a mai napig nem alkalmazták a klímaváltozás 21. század végére történő kimutatására a Kárpátok térségében RCP-k figyelembevételével.

Szerbia esetén HRNJAK ET AL. (2014) a De Martonne asztály index és a Pinna kombinatív index alapján osztályozta Vojvodina éghajlatát szerb állomás adatok alapján a 20. század második felére vonatkozóan. Az eredmények alapján szignifikáns szárazodás nem volt megfigyelhető. MIHAILOVIĆ ET AL. (2015) elemezte a klímaváltozás hatását a terméshozamokra és a köppeni éghajlati zóna eloszlására a SRES A1B és A2 scenárió segítségével. A tanulmány alapján a melegebb és szárazabb éghajlati típusok irányába történő elmozdulás várható, és megnövekedett terméshozamot prognosztizált a Kárpátok térségének szerbiai területein. A korábbi tanulmányokat kiegészítve RADAKOVIĆ ET AL. (2018) Szerbia középső területeinek szárazodását vizsgálta a De Martonne és a Pinna indexek alapján. Nem detektáltak változást a szárazodás trendjében, melyet az eredményeik

alapján nyár és a tél esetén a NAO⁹ míg a többi évszak esetén a helyi orografikus hatások és a konvekció alakítanak. KRSTIC ET AL. (2014; 2019) Thornthwaite PET alapú és Lang növényzet alapú bioklimatikus módszerét is alkalmazta a szerbiai Kopaonik-hegységben (KRSTIC ET AL., 2014) és Szerbia keleti dombvidékek és hegyek alkotta területének (KRSTIC ET AL., 2019) éghajlatsztályozásának vizsgálatára, különböző magassági régiókra. DENIZ ET AL. (2011) vizsgálták az erdőgazdálkodásban általánosan használt kontinentalitási indexet a Kerner-együttható alapján. Vizsgálták továbbá az aszályt a De Martonne index és folyómenti eróziós kockázatot a Fournier index alapján. A kutatások megerősítették az erdei növényzet előfordulása és fennmaradása, elterjedése, magassági differenciálódása és éghajlati jellemzői közötti kölcsönös függőséget. Ezen felül a különböző hegyvidéki régiók erdőségeinek specifikus mikroklímáit is azonosították. RUMAN (2020) a Dél-Pannon-medencében, Szerbiában modellezte a klímátípusokat a Köppen–Geiger klímaosztályozás alkalmazásával. Ez a kutatás kimutatta, hogy az antropogén hatás a környezeten növeli a szárazabb és melegebb éghajlatú területek arányát, valamint, hogy a növényzet hatással van a Pannon-medence éghajlati viszonyainak eloszlására.

Horvátországra vonatkozóan NIMAC ÉS TADIĆ (2016) vizsgálta az 1981–2010-es éghajlati normálidőszakot a korábbi 1961–1990 és 1971–2000-es időszakok éghajlatához képest horvát meteorológiai állomások adatain alapuló statisztikai vizsgálatok, valamint a Köppen-Geiger (GEIGER, 1961) osztályok változása alapján. A kutatás alapján az osztályozás hasznos mutató az éghajlatváltozás detektálására és a változások oka a csapadék rezsím változásához köthető.

Ausztria Burgenland és Alsó-Ausztria tartományaira vonatkozóan alkalmazta Köppen–Geiger módszertanát RUBEL ET AL. (2017) egy 300 éves periódusban, 1800-tól kezdődően a HISTALP¹⁰ történeti megfigyelési adatkészletének és a Rossby Center regionális légköri modelljének felhasználásával az RCP2.6 és RCP4.5 forgatókönyve szerint. Ez a tanulmány az erdő-, fa- és hóvonalak változásait mutatta ki a három elemzett évszázad során.

⁹ North Atlantic Oscillation – Észak-Atlanti Oszcilláció

¹⁰ Historical Instrumental Climatological Surface Time Series of the Greater Alpine Region – Az Alpok történelmi műszeres klimatológiai felszíni idősorai

Szlovákiát és Csehországot lefedő tanulmányt készített SKALÁK ET AL. (2018), melyben bemutatta a Köppen–Geiger osztályozás alapján a klímátípus váltásokat Közép-Európában, beleértve Szlovákiát és Csehországot is, a CECILIA¹¹ projekt szimulációinak, és az SRES A1B kibocsátási forgatókönyv felhasználásával. Ez a kutatás jelentős változásokat mutatott ki a régió klímátípus-eloszlásában a boreális és hidegebb éghajlati típusok eltűnésével a 21. század végére, és alacsonyabb növénytermesztést feltételezett az esővel táplált mezőgazdasági területeken.

Ukrajnában az erdők számára megfelelő éghajlatú területek kiterjedésének az éghajlatváltozás hatására történő változását vizsgálta SHVIDENKO ET AL. (2017), majd BUKSHA ET AL. (2021). SHVIDENKO ET AL. (2017) alapuló kutatásban vizsgálták az ukrán erdők érzékenységét SRES forgatókönyvek alapján, több megközelítés, többek között a Vorobjov-féle erdő-éghajlat modell és a Didukh-féle, a vegetáció környezeti változások amplitúdójára vonatkozó tűrészhatáron alapuló modell alkalmazásával. Eredményeik alapján várhatóan a vízstressz lesz az alföldi régiókban található erdők fő kockázati tényezője az elterjedés és az ellenállóképesség szempontjából és az erdők számára kedvező éghajlatú területek várhatóan északi és északnyugati irányba tolnak el. BUKSHA ET AL. (2021) a Vorobjov nedvességi indikátor segítségével vizsgálta, hogy az egyes területek klimatikus viszonyai mennyire megfelelőek az erdők számára ukrán meteorológiai adatok, valamint E-OBS adatok és EURO-CORDEX modelleredmények eredményei alapján. Míg a referencia időszakban az ország 50%-a volt potenciális erdőterület addig az erdők számára már nem megfelelő Vorobjov-féle száraz éghajlat a század végére az RCP4.5 forgatókönyv szerint az ország 70,5%-át míg RCP8.5 szerint 89,7%-át fedheti le, beleértve a Kárpátok egyes részeit.

Romániára vonatkozóan a Holdridge-módszertan alapján vizsgálta az éghajlatváltozás erdőkre gyakorolt hatását CUCULEANU ET AL. (2002) az éghajlatváltozás különböző erőforrás-ágazatokra gyakorolt hatásainak felmérésére a mezőgazdasági növények, erdők és vízkészletekre irányuló tanulmányban. Az eredmények azt mutatják, hogy a klímaváltozás jelentős hatást gyakorolhat Románia különböző környezeti és gazdasági szektoraira. PALTINEANU ET AL. (2007) a csapadék és a Penman-Monteith

¹¹ Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment – Éghajlatváltozás hatásai és az éghajlati sebezhetőség vizsgálata Közép- és Kelet-Európában

referencia párolgás alapján számolt klimatikus vízhiány és a De Martonne index és a Thornthwaite-féle szárazsági index segítségével vizsgálta Románia vízellátottságát és a szárazság területi eloszlásának növekedését a mezőgazdasági vízgazdálkodási rendszert érintő kockázatok csökkentésére. VLĂDUȚ ÉS LICURICI (2020) a romániai Olténia területén megfigyelhető szárazodás vizsgálatához meghatározták a De Martonne indexet, a Pinna kombinatív indexet és a Selyainov hidrotermális együtthatót (SELYANINOV, 1958), és bár az eredmények alapján nem volt megmutatható statisztikailag szignifikáns szárazodó tendencia a régióban, a szárazságra legérzékenyebb terület a síkság déli része, ezen belül a Duna-hordaléksíkság és jelentős részei ki vannak téve a félszárazság kockázatának a felmelegedés fokozódásával. Az eddigi, a Kárpátok térségére készült, éghajlati-osztályozási módszereken alapuló tanulmányok alapján látható, hogy jelentős megfigyelt és várható éghajlati változások mutathatók meg a térségben az éghajlat-osztályozások alkalmazásával.

3. Adatok

Ebben a fejezetben bemutatom a kutatásom során alkalmazott megfigyelési adatbázist, valamint a megfigyelési adatok felhasználásával a vizsgált Kárpátok térségét és annak éghajlatát (3.1 fejezet). Bemutatom továbbá a várható éghajlatváltozás becsléséhez használt éghajlati projekciókat (3.2 fejezet).

3.1. A CarpatClim adatbázis és a Kárpátok térségének általános éghajlati jellemzése

A számításokhoz szükséges havi átlag-, minimum-, és maximum-hőmérséklet és csapadék adatokat a CarpatClim megfigyelési adatbázisból (SZALAI ET AL., 2013) vettem az 1971–2000 közötti referencia-időszakra. A CarpatClim tíz magyarországi, ausztriai, horvátországi, cseh, lengyelországi, romániai, szerbiai, szlovákiai és ukrainai kutatóintézet közös produktuma. A Kárpátok térségének vizsgálatára megszerkesztett rácsponti klímaadatbázis [CARPATCLIM-EU.ORG] térben az É.sz.44°–É.sz.50° és K.h.17°–K.h.27° közötti tartományt fedi le és az adatok, valamint az ezekből származtatott indikátorok napi felbontásban érhetőek el az 1961–2010-es időszakot tekintve. A hőmérséklet-adatok 288 állomás megfigyelésein alapulnak, közelítőleg 41×41 km-enként egy állomással (1. ábra). A napi összesített csapadékadatok 643 állomás megfigyeléseiből származnak, $27,4 \times 27,4$ km-enként körülbelül egy állomással. Az állomási adatokat a MASH¹² szoftverrel homogeinzálták [CARPATCLIM-EU.ORG]. A térbeli interpoláció országos szinten zajlott, minden részvevő intézmény esetén a MISH¹³ szoftverrel. A határokon átnyúló harmonizálás érdekében az országhatárokhoz közel eső állomásokon adatcsere történt az országok között. A rácsponti adatbázis térbeli felbontása $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (körülbelül $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$) [CARPATCLIM-EU.ORG].

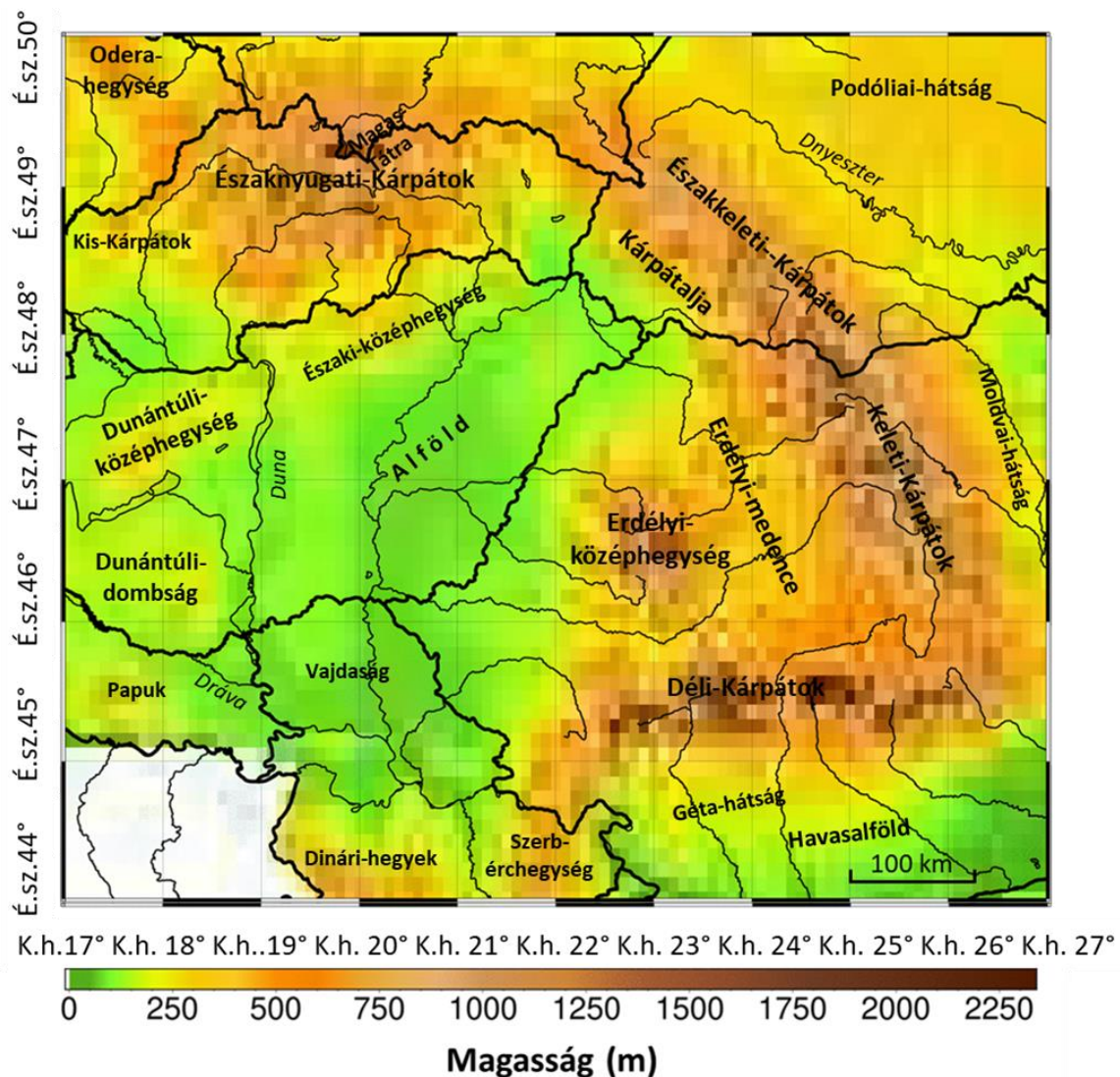
¹² Multiple Analysis of Series for Homogenization – Állomás adatsorok homogenizálása, ellenőrzése és pótlása

¹³ Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized database – Földfelszíni meteorológiai adatok interpolációja



1. ábra A CarpatClim adatbázis alapját képező állomások térbeli eloszlása. Forrás: [CARPATCLIM-EU.ORG]

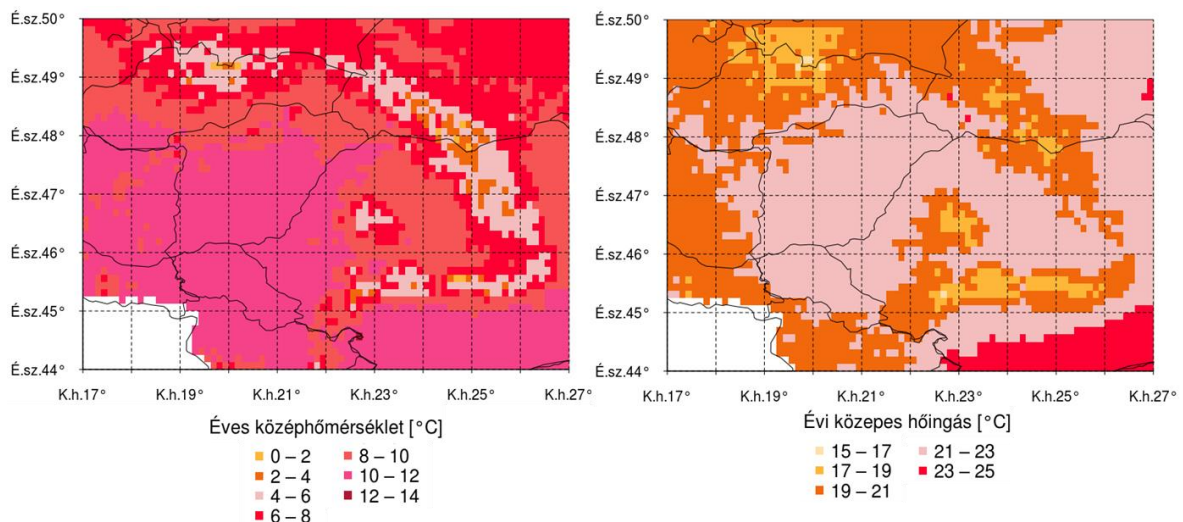
A doktori kutatásom során vizsgált terület a CarpatClim adatbázis által lefedett Kárpátok térsége, mely magába foglalja a Kárpátok teljes vonulatát és az azáltal körülölelt területet, valamint a Podóliai-hátságot, Munténiát, a Dinári-hegyek egy részét, a Papukot és az Odera-hegységet (2. ábra). A térség változatos éghajlattal jellemezhető (DOMONKOS, 2003; BARTHOLY ET AL., 2009; ANTOFIE ET AL., 2015). Az éghajlati heterogenitást nemcsak a szélességi, hosszúsági körökben és kontinentalitásban lévő különbségek okozzák, hanem a Kárpátok hegyvonulata is (PANNEX WHITE BOOK, 2019). A régió éghajlatát nyugatról, északról és keletről az atlanti tengeri, a balti és a kontinentális éghajlat befolyásolja (NISTOR ET AL., 2016). Míg a növényzet és a különböző vízgyűjtők csekély hatást gyakorolnak a Kárpátok térségének éghajlati heterogenitására, addig a különféle domborzati formákkal, például síkságokkal és dombokkal jellemezhető összetett orografikus szerkezet változatos éghajlatot alakít ki (CHEVAL ET AL., 2014).



2. ábra A Kárpátok térségének domborzata (a vizsgált térség a fehérrel jelölt Bosznia-Hercegovinát nem tartalmazza). Adatok: [carpatclim-eu.org]; SZALAI ET AL. (2013).

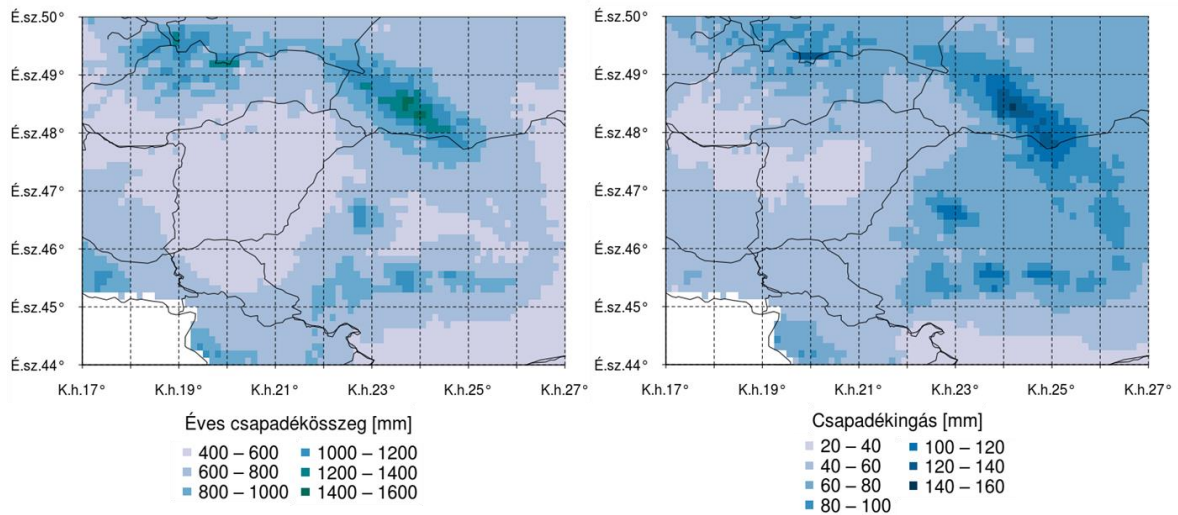
A dolgozatban referenciaként alkalmazott 1971–2000 közötti időszak éves középhőmérsékletének és évi közepes hóingásának területi eloszlása a 3. ábrán látható. A térségben mindenhol a hőmérséklet erősen korrelál a magassággal (3. ábra). A legalacsonyabb hőmérséklet az Északnyugati-Kárpátokban, a legmagasabb pedig a Vajdaságban és a Havasalföldön jellemző (SPINONI ET AL., 2015). Az átlagos éves középhőmérséklet a térség Magyarországra eső részének jó részén, valamint a Vajdaságban és attól délre egészen a Dinári-hegyek magasabb csúcsáig, valamint a Géta-hátság és a Havasalföld területén mindenhol 10 °C fölötti (3. ábra). A legalacsonyabb, 2 °C alatti középhőmérsékletek jellemzőek az Északnyugati-Kárpátok (Magas-Tátra) mellett az Északkeleti-Kárpátok déli részén, valamint a Déli-Kárpátokban. Átlagosan leghidegebb

régióknak az Északkeleti- és Keleti-Kárpátok találkozásának területe mondható. Az évi közepes hőingás a legnagyobb, 23 °C fölötti Munténiában és a Kárpátalja kisebb területein, míg a legalacsonyabb, 15–17 °C körüli az Északnyugati-Kárpátok és a Déli-Kárpátok területére eső néhány rácspont esetén (3. ábra). A térség jó részén 19–23 °C közötti a hőingás, 21 °C fölötti az Alföldön, a Vajdaságban, a Podóliai- és Moldvai-hátság területén, 19–21 °C közötti például a Dunántúli-középhegység és -dombság, vagy a Dinári-hegyek területén.



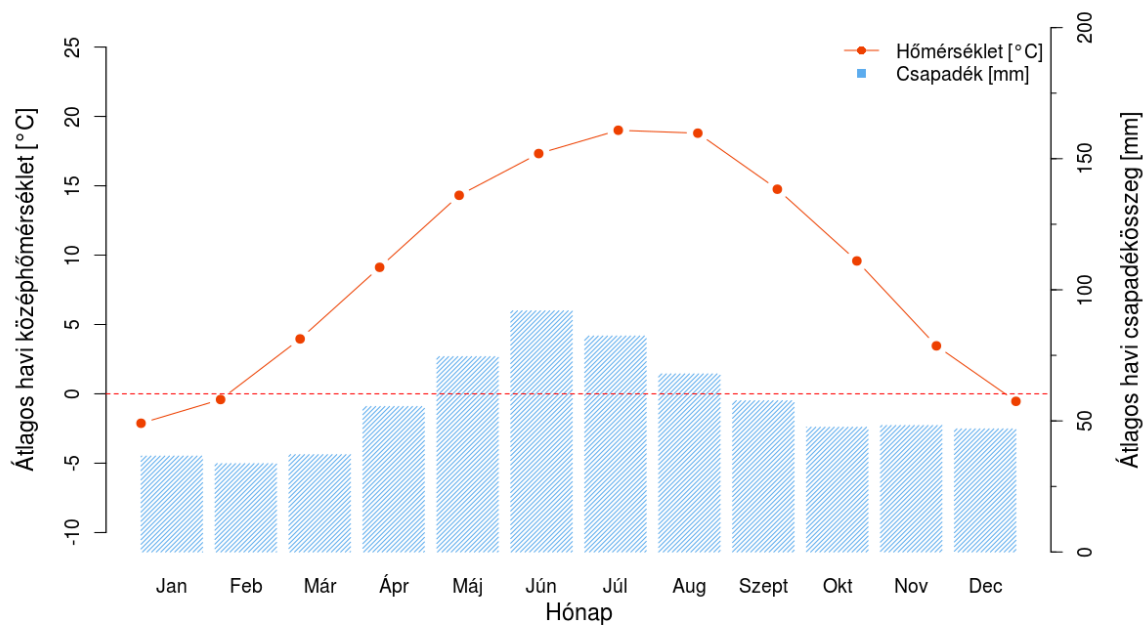
3. ábra Az átlagos éves középhőmérséklet (bal) és átlagos éves közepes hőingás értékek (jobb) területi eloszlása a Kárpátok térségében az 1971–2000 időszakra vonatkozóan a CarpatClim adatok alapján

Az átlagos éves csapadékösszeg területi eloszlásában jelentős, több mint 1000 mm-es eltérés is előfordul a Kárpátok térségének egyes régiói között (4. ábra), magasabb értékek jellemzőek a magashegyi régiókban (éves átlag >1200 mm), mint a Magyarország déli és keleti területein meglévő alacsonyabb tengerszint feletti magasságok esetén (CHEVAL ET AL., 2014). A legcsapadékosabb az Északnyugati- és Északkeleti-Kárpátok régiója, szárazabbak pedig például hazánkban az Alföld, vagy Romániában a Havasalföld. Míg a hőmérséklet esetén a magas tengerszint feletti magasságok esetén kisebb volt a hőingás, mint az alföldi területeken, addig a csapadékingás a legmagasabb régiókban a legjelentősebb (4. ábra). Az Északnyugati- és Északkeleti-Kárpátok estén több mint 120 mm, míg például az Alföld középső részein, vagy a Kis-Kárpátoktól és a Géta-hátságtól délre csak 20–40 mm közötti.



4. ábra Az éves átlagos csapadékösszeg (bal) és éves átlagos csapadékingadozás értékek (jobb) területi eloszlása a Kárpátok térségében az 1971–2000 időszakra vonatkozóan a CarpatClim adatok alapján.

A teljes területre átlagolt havi hőmérséklet és csapadék értékek alapján látható (5. ábra), hogy a referencia időszak során a Feddema-féle osztályozásban fontos bementi adatként szolgáló (a módszertanról bővebben a **4. fejezetben** írok) éves hőmérséklet ingadozás több mint 20 °C, míg csapadék tekintetében átlagosan 60 mm körüli az éves szezonális. A január a legalacsonyabb, július pedig a legmagasabb átlaghőmérsékletű hónap, csapadék esetén a minimum szintén februárban, a maximum júniusban jellemző.

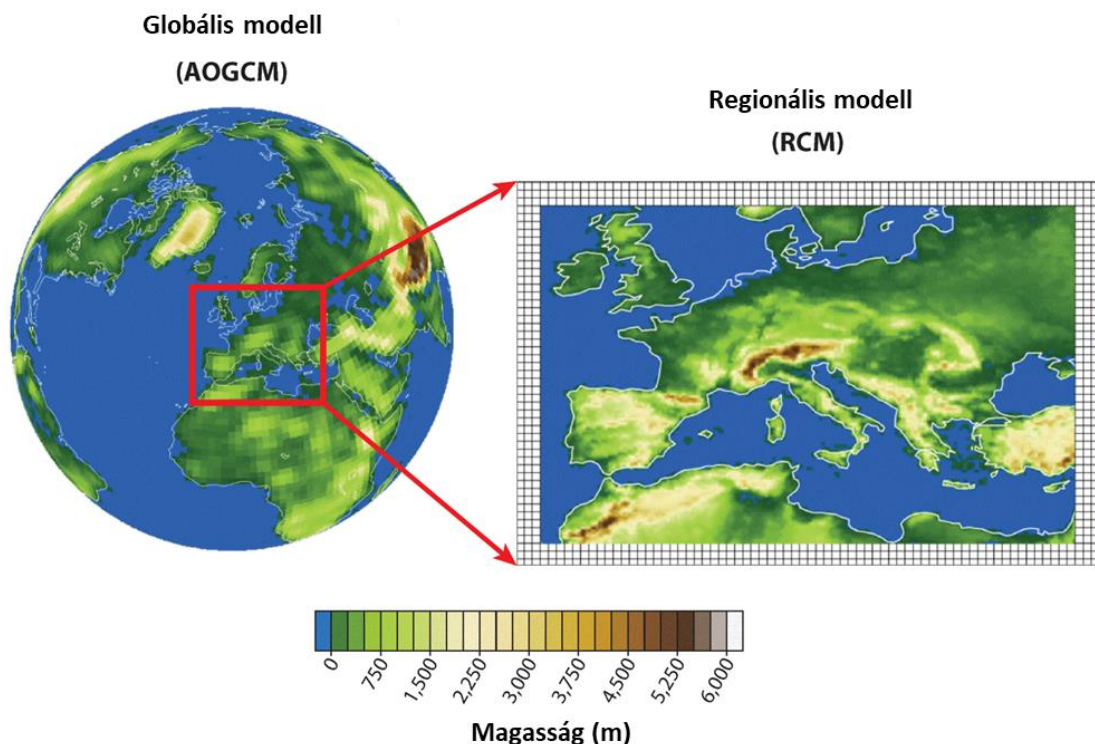


5. ábra Átlagos havi középhőmérséklet és csapadékösszeg adatok területi átlaga a Kárpát régióban az 1971–2000 időszakra átlagolva a CarpatClim adatok alapján

A régióra vonatkozó, a CarpatClim alapján végzett éghajlatváltozással kapcsolatos tanulmányok eredményei alapján a megfigyelt változások szoros összhangban vannak a topográfiai különbségekkel (SPINONI ET AL., 2015). Megfigyelték továbbá az átlag- és maximumhőmérséklet szignifikáns növekedését a 20. század során (LAKATOS ET AL., 2013; SPINONI ET AL., 2015) továbbá LAKATOS ET AL. (2013) a csapadékos napok számának jelentős csökkenését mutatták ki az Északnyugati-Kárpátokban. A forró napok számának legnagyobb növekedése a Déli- és Keleti-Kárpátoktól délre húzódó területein tapasztalható, Magyarországon nagyobb arányban, mint a régió erdélyi részén. Az Északkeleti-Kárpátok ukrainai részén és az Erdélyi-középhegységben jelentősen növekedett a nedves napok száma.

3.2. Az EURO-CORDEX adatbázis

A 2019–2098 közötti időszakra vonatkozó havi hőmérsékleti és csapadék projekciókat az EURO-CORDEX adatbázisban elérhető szimulációkból vettem (JACOB ET AL., 2014; JACOB ET AL., 2020). Az EURO-CORDEX a World Climate Research Program (WCRP) alprogramja, amelynek keretében a CMIP5 GCM-ek eredményeit nemzetközi együttműködés keretében skálázták le regionális modellekkel (RCM) Európára (6. ábra). A szimulációk minőségét és pontosságát az RCM és a meghajtó GCM egyaránt meghatározza. A különböző paraméterezésekkel, modellkonfigurációkkal létrehozott klímaszimulációk olyan korlátozásokat tartalmaznak, mint a forgatókönyv bizonytalansága, a belső éghajlati változékonyság reprezentációja, valamint a jelenlegi éghajlati állapotban érvényes statisztikai összefüggések stacionaritásának feltételezése a jövőre vonatkozólag is. (BENESTAD, 2021). Egy RCM-GCM kombináció csak egyet jelent a sok lehetséges kimenetel közül. Az egyes RCM-ekhez és/vagy GCM-ekhez kapcsolódó lehetséges kimenetek és bizonytalanságok miatt van szükség több modellkombináció alkalmazására.



6. ábra Az RCM beágyazási technikával elérhető domborzati és tengerparti finomítások. Az RCM belső tartományát körülvevő négyzetes terület az oldalsó pufferezőterületet jelenti. Forrás: GIORGI ÉS GUTOWSKI (2015).

Dolgozatomban az éghajlatváltozással kapcsolatos vizsgálataim megkezdésekor folytonosan elérhető és letölthető EURO-CORDEX szimulációkat használtam fel (BENESTAD ET AL., 2021). A 10-10 GCM és RCM modelltől összepárosított 19 GCM és RCM modellkombinációk futásának eredményeiből kapott szimulációk (2. táblázat) EUR-44 ($0,44^\circ$, ami körülbelül 50 km-es ráctávolságnak felel meg), vagy EUR-11 ($0,11^\circ$, ami körülbelül 12,5 km-es ráctávolságnak felel meg) felbontásúak. A kutatásom során felhasznált szimulációk stabilizációs (RCP4.5), vagy ún. „business-as-usual” (RCP8.5) éghajlati-forgatókönyvet követnek. Az RCP4.5 forgatókönyv azt feltételezi, hogy a sugárzási kényszer $4,5 \text{ Wm}^{-2}$ -nél stabilizálódik a század végére, míg az utóbbi változatlan-üzletmenetet, vagyis a mitigáció hiányát és nagy kibocsátást feltételező forgatókönyv (MOSS ET AL., 2010; ROGELJ ET AL., 2012). Az RCP8.5 a sugárzási kényszer folyamatos növekedését feltételezi a 21. században, és 2100-ra eléri a $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ -t (MOSS ET AL., 2010). Fontos megjegyezni, hogy az EURO-CORDEX szimulációk $0,44^\circ \times 0,44^\circ$ és $0,11^\circ \times 0,11^\circ$ -os térbeli felbontása nem elég finom ahhoz, hogy ne torzítsa a Kárpátok térségének változatos domborzatát. A simított, a valós domborzatnál durvább felbontású szimulációk a valós domborzat kényszereihez képest valamelyest torzított eredményeket adnak.

2. táblázat A kutatás során felhasznált GCM-RCM modell párok (General Circulation Model – Általános Cirkulációs Modell, Regional Climate Model – Regionális Klímamodell)

GCM-RCM pár			Referencia	Alkalmazott felbontás és forgatókönyv			
Meghajtó GCM és az intézet rövidítése	RCM	Intézet (RCM)		EUR-11		EUR-44	
				RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
CNRM-CM5	ALADIN53	CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques, FRA)	Colin et al., 2010	x	x	x	x
CNRM-CM5	ALADIN52	HMS (Hungarian Meteorological Service, HUN)	Colin et al., 2010				x
CCCma-CanESM2	WRF	UCAN (Universidad de Cantabria, ES)	Fernández et al., 2019			x	
IPSL-CM5A-MR	WRF	IPSL (Institut Pierre Simon Laplace, FR)	Vautard et al. (2013)	x			x
ICHEC-EC-EARTH	WRF	IDL (Instituto Dom Luiz, PT)	Jacob et al. (2020)				x
ICHEC-EC-EARTH	HIRHAM5	DMI (Danish Meteorological Institute)	Christensen et al. (2007)	x	x	x	x
ICHEC-EC-EARTH	RACMO	KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, NED)	van Meijgaard et al. (2008)	x	x	x	x
ICHEC-EC-EARTH	RCA4	SMHI (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, SWE)	Stranberg et al. (2014)	x	x	x	x
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCA4	SMHI (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, SWE)	Stranberg et al. (2014)	x	x	x	x
IPSL-IPSL-CM5A-MR	RCA4	SMHI (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, SWE)	Stranberg et al. (2014)		x	x	
MPI-M-MPI-ESM-LR	RCA4	SMHI (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, SWE)	Stranberg et al. (2014)		x	x	x
CCCma-CanESM2	RCA4	SMHI (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, SWE)	Stranberg et al. (2014)			x	x
MIROC-MIROC5	RCA4	SMHI (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, SWE)	Stranberg et al. (2014)			x	x
NCC-NorESM1-M	RCA4	SMHI (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, SWE)	Stranberg et al. (2014)			x	x
NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	RCA4	SMHI (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, SWE)	Stranberg et al. (2014)			x	x
MOHC-HadGEM2-ES	RCA4	SMHI (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, SWE)	Stranberg et al. (2014)	x	x		x
MOHC-HadGEM2-ES	REGCM-4-2	DHMZ (Croatian Meteorological and Hydrological Service, HR)	Giorgi et al. (2011)			x	
MOHC-HadGEM2-ES	RACMO	KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, NED)	van Meijgaard et al. (2008)			x	x
MOHC-HadGEM2-ES	COSMO	WEGC (University of Graz, AT)	Rockel et al. (2008)			x	

A kutatás során magassági régiókra bontva is végeztem vizsgálatokat, a disszertációmban. A 3. táblázaton látható, hogy a CarpatClim referencia adatbázis és az EUR-11 felbontás esetén a felbontásból eredő különbség az egyes kategóriákba eső területek százalékos arányában a legnagyobb az alacsonyszintű hegységek esetén, mindössze 1,12%. A magashegységek kategóriájába kevesebb mint 0,2% tartozik, ezt nem jelenítettem meg külön.

3. táblázat Magassági kategóriákhoz tartozó területek százalékos aránya a teljes területhez képest (tengerszint feletti magasság – tszfm.)

	CarpatClim	EUR-11
Alföld (tszfm.< 200 m)	39,47	38,49
Dombság (200 m < tszfm.< 500 m)	36,73	36,72
Alacsonyszintű hegység (500 m < tszfm. < 1000 m)	17,64	18,76
Közép-és magashegység (tszfm. > 1000 m)	6,16	6,03

A Közép-Európára vonatkozó, Kárpátok térségét is magába foglaló tanulmányokban COPPOLA ET AL. (2021) EURO-CORDEX adatok felhasználásával megállapította, hogy a régióban a hőmérséklet a globális átlagnál nagyobb mértékben emelkedik. Eredményeik alapján az RCP8.5 esetén az átlaghőmérséklet várhatóan télen több mint 4,5 °C-kal, nyáron pedig több mint 3,6 °C-kal lesz magasabb az 1981–2010 közötti referencia-időszakhoz képest. Az RCP8.5 alapú EURO-CORDEX szimulációk szerint télen a csapadékmennyiség növekedése várható a század végére kb. 20%-kal, nyárra pedig mintegy 7%-os csökkenés (COPPOLA ET AL., 2021).

4. Módszertan

A **4.1 fejezetben** bemutatom a Feddema éghajlat-osztályozási módszer során használt éghajlati indexeket és a módszertanhoz tartozó kategóriarendszert a diszkrét éghajlati-osztályok meghatározására. Bemutatom továbbá a Feddema-féle indexek folytonos változóként való alkalmazásának lehetőségét az éghajlatváltozás tanulmányozásában (**4.1 fejezet**). A Feddema-módszer alkalmazása mellett kutatásom során Feddema módszerét és a módszertan alapján a Kárpátok térségének éghajlati képét összehasonlítottam más, globális leíró jellegű éghajlat-osztályozási módszerekkel és az alkalmazásukkal kapott eredményekkel. Ezeket az éghajlati-osztályozási módszereket a **4.2 fejezetben** ismertetem röviden. A fejezetben csak azon éghajlati-osztályokhoz tartozó kritériumokat tüntettem fel melyek az eredményeim alapján előfordulnak a Kárpátok térségében az általam vizsgált időszakokban. A disszertációmban felhasznált klimatológiai adatokon előfeldolgozást végeztem, ennek menetét a **4.3 fejezetben** mutatom be.

4.1. Feddema-féle éghajlat-osztályozási módszer

Feddema az éghajlat-osztályozási módszerének kidolgozása során (FEDDEMA, 2005) a THORNTHWAITE (1948) éghajlat-osztályozási módszert fejlesztette tovább. A módszer segítségével laikusok számára is könnyen értelmezhető információk adhatók mind egy terület éghajlati típusáról, mind a terület szezonálisáról, továbbá az éghajlatváltozás folyamatának irányáról is (SZABÓ ET AL., 2022). A módszer alkalmazásához bemeneti adatként szükség van havi átlagos csapadék és hőmérséklet adatokra és a földrajzi szélesség ismeretére minden rácspont esetén. Ezek alapján meghatározhatóak a területre vonatkozóan a Feddema-féle termikus és nedvesség indexek értékei. A legtöbb éghajlat-osztályozási módszer esetén különböző, előre definiált küszöbértékekhez köthetőek az egyes osztályok, például a vegetáció eloszlás alapján (SZABÓ ET AL., 2021). A Feddema-féle éghajlat-osztályozási módszer (és a módszer alapját képező Thornthwaite-módszer) egyik fontos különbsége a legszélesebb körben használt KÖPPEN (1936) éghajlat-osztályozási módszerhez képest, hogy a kategóriák nem kötődnek szorosan vegetáció határokhoz. THORNTHWAITE (1948) és FEDDEMA (2005) felismerte, hogy az éves és szezonális hő- és vízellátottság leírásához használt változók ugyanis, bár fontos szerepet játszanak például a növényföldrajz vonatkozásában, térben folytonosak. Azonban a Feddema-indexekben

várható változások kapcsolódhatnak a vegetáció eloszláshoz, melyre kitérek az eredményeim ismertetése során SZELEPCSÉNYI ET AL. (2018) a térségre megállapított Holdridge-féle biom-modell életzónákban várható változásokat figyelembe véve.

Feddema módszere esetén a változók értéktartományának egyenletes felosztásának eredményei az egyes osztályok. Ezt a megközelítést továbbiakban Feddema-diszkrétnek nevezem. Ezen kategóriák tovább alkatégoriákra bontása vagy újra definiálására is lehetséges, azaz finomhangolása (BREUER ET AL., 2017). A következőkben bemutatott Feddema-indexek értékei alapján történő osztályzással meghatározhatók a különböző klíma- és szezonáltság-típusok. Az egyes területek a következő négy tulajdonsághoz tartozó Feddema-féle klímaindexek értékei alapján sorolhatók be: a klímátípust meghatározó éves hő- és vízellátottság, valamint a szezonáltság típusát együttesen meghatározó szezonáltság mértéke és a szezonálisan ingadozó meteorológiai változó. A klímátípus és a szezonáltság-típus alapján minden rácspontra meghatározható egy klímapár az éves és éven belüli változások együttes kifejezésére.

Hőellátottság

A hőellátottságot FEDDEMA (2005) a PET-tel fejezi ki. Feddema a PET-et a THORNTHWAITE (1948) osztályozásban is használt Thornthwaite- és Mather-féle módszerrel határozza meg. Ennek az empirikus képletnek az alkalmazásához a legszélesebb körben elérhető átlagos havi hőmérsékleti adatok, valamint a szélességi fokra és a naphosszra vonatkozó információk szükségesek, így a módszer alkalmas olyan vizsgálatokra, ahol más adatok, például szélesség, napsugárzás, vagy gőznyomás nem állnak rendelkezésre. A Thornthwaite-féle PET kiszámításának módját ÁCS ÉS BREUER (2013) és ELGUINDI ET AL. (2014) alapján foglalom össze. A PET becslése az 1. és 2. egyenletekkel történik, melyek bemenő adatai az $i=1, \dots, 12$ havi átlagos hőmérséklet (T_i) °C-ban megadva.

$$PET_i' = \begin{cases} 0, & \text{ha } T_i < 0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 16 \left(\frac{10T_i}{I} \right)^a, & \text{ha } 0 \leq T_i < 26,5 \text{ } ^\circ\text{C} \\ -415,85 + 32,24T_i - 0,43T_i^2, & \text{ha } T_i \geq 26,5 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

$$PET_i = PET_i' \cdot \left(\frac{L_i}{12} \right) \left(\frac{N_i}{30} \right) \quad (2)$$

A hónap hossz és a napsütéses órák hosszában megjelenő eltérések figyelembevétele a 2. egyenlettel történik. N_i az adott hónap napjainak számát, L_i pedig a nappalok hosszának havi átlagát jelöli órában az adott hónap 15. napja alapján becsülve (ÁCS ÉS BREUER, 2013). A T és a PET kapcsolatát leíró a THORNTHWAITE (1948)-ban bemutatott I hőindex és a együtthatók az 3. és 4. egyenletekkel adhatók meg.

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad (3)$$

$$a = 6,57 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49 \quad (4)$$

Feddema a hőellátottsági kategóriákat a globális szinten előforduló havi PET-értékek éves összegeinek egyenlő, 300 mm-es intervallumokba történő beosztásával határozta meg a fagyos területektől a forrókig, melyek közül a 4. táblázatban szereplő kategóriák fordulnak elő a Kárpátok térségében.

4. táblázat A Kárpátok térségében előforduló FEDDEMA (2005) hőellátottsági kategóriák

Hőellátottsági kategóriák	PET [mm év ⁻¹]
Meleg	900 < PET ≤ 1200
Hűvös	600 < PET ≤ 900
Hideg	300 < PET ≤ 600

A Kárpátok térségére vonatkozóan vizsgálta a Thornthwaite-féle PET megbízhatóságát LAKATOS ET AL. (2020). Tanulmányukban bemutatták a Thornthwaite-féle PET számítással kapott eredmények összehasonlítását a Penman-Monteith féle ET_0 meghatározásával kapott eredményekkel, utóbbit gyakran használják referenciaként más empirikus módszerek ellenőrzésére (LANG ET AL., 2017; LAKATOS ET AL., 2020). A kutatás során az 1960–2010-es időszakra becsülték meg az átlagos éves és szezonális ET_0 és PET értékeket a Kárpátok térségére. Mindkét becslés eredményeit befolyásolja a földrajzi elhelyezkedés és az orográfiai adottságok. Az eredmények alapján a legnagyobb eltérések az éves átlagok között az alacsonyabb tengerszint feletti magasságú régiók középső és délkeleti részén jelentkeznek. A Thornthwaite-módszerrel kapott eredmények validálásához

meghatározták a relatív eltérést és az RMSE¹⁴ értékeket a Penman-Monteithhoz képest. Az éves eltérés alapján a Thornthwaite-módszer alábecsüli a PET-et az ET₀-hoz képest. Az alföldeken a legnagyobb, 20% feletti az alulbecslés mértéke, míg a hegyvidéki területeken néhány pontban körülbelül 4%-os felülbecslés fordul elő. Az eredmények alapján a hegyvidéki területeken mindkét statisztikai módszer esetében 10%, vagy az alatti a Thornthwaite-módszerrel kapott alulbecslés mértéke (az alacsony hőmérsékletek miatt).

Vízellátottság

A vízellátottság a WILLMOTT ÉS FEDDEMA (1992) féle I_m (moisture) nedvességi index alapján kerül meghatározásra az 5. egyenlet alkalmazásával (a PET és a P havi és éves összeg is lehet, előbbi esetén a havi, utóbbi esetén az éves I_m kerül meghatározásra):

$$I_m = \begin{cases} 1 - \frac{PET}{P}, & \text{ha } P > PET \\ 0, & \text{ha } P = PET = 0 \\ \frac{P}{PET} - 1, & \text{ha } P \leq PET \end{cases} \quad (5)$$

Ha I_m pozitív értéket vesz fel, akkor a légköri vízmérleg is pozitív, ami víztöbbletet jelöl (több csapadék hullik, mint amennyi az adott területre beérkező sugárzásmennyiség alapján elpárologhatna). Ha I_m negatív akkor a vízmérleg is negatív, ami vízhiányt jelez, míg a nulla körüli I_m értékek esetén a vízigény és a rendelkezésre álló vízkészlet egyensúlyát jelöli. A nedvességtípusok meghatározása az éves PET és P összeg alapján meghatározott I_m éves értékeinek egyenlő, 0,33-as lépésközönként globálisan 6 kategóriába történő beosztása alapján történik, melyek közül a 5. táblázatban szereplők fordulnak elő a Kárpátok térségében.

¹⁴ Root Mean Square Error – Négyzetes középérték hiba

5. táblázat A Kárpátok térségében előforduló FEDDEMA (2005) vízellátottsági kategóriák

Vízellátottsági kategóriák	Éves I_m
Nagyon nedves	$0,66 < I_m \leq 1,00$
Nedves	$0,33 < I_m \leq 0,66$
Nyirkos	$0,00 < I_m \leq 0,33$
Száraz	$- 0,33 < I_m \leq 0,00$
Szemiarid	$- 0,66 < I_m \leq (-0,33)$

Szezonálisitás

A Feddema-módszerrel kétféle index alapján jellemezhető egy terület szezonálisítása. Az A_s (seasonality attribution) index a szezonálisitást vagy éven belüli hőingásnak vagy a csapadékingadozásnak, vagy a kettő kombinációjának tulajdonítja. A dolgozatban a Feddema által bevezetett eredeti index (FEDDEMA, 2005) Feddema által (személyes kommunikáció során) javasolt módosított verziója kerül alkalmazásra (SZABÓ ET AL., 2022), mely alapján a kapott eredmények könnyebben interpretálhatóak (6. táblázat). Az új képlet az I_m kiszámításához hasonlóan épül fel, bemeneti változóként a havi P és PET értékek éves változásának tartománya szerepel (6. egyenlet) a következő jelölésekkel:

- $\Delta PET_{\text{évi}}$: az év során előforduló legmagasabb és legalacsonyabb havi PET összegek különbsége;
- $\Delta P_{\text{évi}}$: az év során előforduló legmagasabb és legalacsonyabb havi P összegek különbsége;

$$A_s = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta PET_{\text{évi}}}{\Delta P_{\text{évi}}}, & \text{ha } \Delta P_{\text{évi}} > \Delta PET_{\text{évi}} \\ 0, & \text{ha } \Delta P_{\text{évi}} = \Delta PET_{\text{évi}} = 0 \\ \frac{\Delta P_{\text{évi}}}{\Delta PET_{\text{évi}}} - 1, & \text{ha } \Delta P_{\text{évi}} \leq \Delta PET_{\text{évi}} \end{cases} . \quad (6)$$

6. táblázat Szezonálisan változó elem kategóriák (FEDDEMA, 2005)

Szezonálisan változó elem	A_s
Hőmérséklet	$A_s < -0,5$
Hőmérséklet és csapadék	$-0,5 < A_s \leq 0,5$
Csapadék	$0,5 < A_s$

A szezonális változékonyság mértékét kifejező I_s (seasonality) index az éves I_m változás tartománya alapján határozható meg (7. táblázat) a 7. egyenlet alapján mely a következő jelöléseket tartalmazza:

$I_{m \text{ havi max}}$: az év során előforduló legmagasabb havi I_m érték

$I_{m \text{ havi min}}$: az év során előforduló legalacsonyabb havi I_m értékek

$$I_s = I_{m \text{ max}} - I_{m \text{ min}} \cdot \quad (7)$$

Az I_m kis változása alacsony szezonális változásokat, míg a magas értékek intenzívebb szezonális változást jelentenek.

7. táblázat Szezonális ingadozás mértékének kategóriái (FEDDEMA, 2005)

Szezonális ingadozás mértéke	$I_s (I_{m \text{ max}} - I_{m \text{ min}})$
Alacsony	$0,0 < I_s \leq 0,5$
Közepes	$0,5 < I_s \leq 1,0$
Magas	$1,0 < I_s \leq 1,5$
Extrém	$1,5 < I_s \leq 2,0$

Feddema az éghajlatot jellemző folytonos változókat diszkrétizált a klíma- és szezonális-típusok meghatározására (FEDDEMA, 2005). Egy terület éghajlata és éghajlatváltozása azonban nemcsak a Feddema-diszkrét megközelítés kategóriáin alapuló klíma- és szezonális-típusokon és ezek változásain, hanem az éves és szezonális jellemzőket kifejező indexek értékein és azok folytonos változásain keresztül is becsülhető. Ugyanis, bár egy éghajlat-osztályozási módszer alapján meghatározható kategóriák diszkrét, az éghajlati változók a valóságban folytonosan változnak egyik helyről a másikra (CARTER ÉS MATHER, 1966). Emiatt, ha az éghajlatváltozást a Feddema-módszer diszkrét megközelítésével vizsgáljuk, kategóriaváltást tapasztalhatunk abban az esetben is, ha az egyes Feddema-indexek esetén kismértékű változás tapasztalható. Emellett nagy eltolódás esetén is lehetséges, hogy a kiindulási kategórián belül marad az adott index értéke.

A fent leírtak megjelenítésére alkalmaztam a Feddema-módszer diszkrét kategóriákat elhagyó megközelítését. Ezt megközelítést először alkalmazom kutatásomban a térségre (SZABÓ ET AL., 2022), korábban magyar nyelven íródott munkában még nem került alkalmazásra és a továbbiakban Feddema-folytonosnak nevezem. A Feddema-folytonos esetén nemcsak az vizsgálható, hogy mely diszkrét kategóriákba sorolhatók az egyes

területek, hanem az is, hogy a kategorizálás alapját képező Feddema-indexek milyen értéket vesznek fel és hogyan változnak időben. A módszer segítségével céloim megmutatni, hogy melyek azok a területek, ahol az egyes Feddema-indexek a kategória határokon helyezkednek el. Megmutatom továbbá, hogy melyek azok a régiók, ahol kis változás is kategória váltáshoz vezet, valamint ahol nagy változás játszódik le ugyanazon kategórián belül. Ez nemcsak a klíma- és szezonáltság-típusokra vonatkozóan mutatható be, de az is megjeleníthető, hogy egyes típusok esetén mely Feddema-indexhez rendelhető hozzá a változás. Bemutatható továbbá a Feddema-módszer alapját képező PET és I_m értékek vizsgálatával, hogy a hő- és vízellátottságban várható változás mértéke statisztikailag szignifikáns-e (ELGUINDI ET AL., 2014). Az **5. fejezetben** többféle ábratípus segítségével mutatom be, hogy a Feddema-folytonos megközelítéssel a diszkrét-módszerhez képest több információ jeleníthető meg.

4.2. A Feddema-módszer összehasonlítása más módszerekkel

E fejezetben a Feddema-féle (diszkrét) modellt más éghajlat-osztályozási módszerek struktúrájával hasonlítom össze, ami segített a Feddema-féle módszer értékelésében. Bár dolgozatom tárgya a Feddema-osztályozás, az eredmények értelmezésének megkönnyítéséhez az összehasonlításhoz használt módszereket is röviden bemutatom. Az összehasonlításban szereplő módszerek a KÖPPEN (1936) és a Worldwide Bioclimatic Classification System (WBCS, RIVAS-MARTÍNEZ ET AL., 2011) biofizikai éghajlat-osztályozások, melyek alkalmazásához szükséges indexeket és kategóriarendszereket részletesebben is bemutatom a függelékben (F.1 és F.2 fejezetek).

A világon legszélesebb körben alkalmazott Köppen éghajlatosztályozás az éghajlat és a biomok közötti összefüggésen alapul és ezt a kapcsolatot havi hőmérséklet és csapadékmennyiség ismeretében adja meg (KOTTEK ET AL., 2006). A fő kategóriák határai a különböző vegetációtípusokhoz köthető kritikus hőmérsékleti küszöbértékeken alapulnak (THORNTHWAITE, 1933) de fontos megjegyezni, hogy ezen határokat átmeneti zónákként kell kezelni. A Köppen-féle módszerrel egy terület klímátípusa a három betűből álló klímaképlet mindhárom szintjének meghatározásával adható meg, melyek közül a második és harmadik betű a különböző hő- és vízellátottsággal jellemezhető szezonáltságtól függ. A Köppen-féle klímátípusokat meghatározó három betűből álló formulák (SANDERSON, 1999;

RUBEL ET AL., 2017) meghatározásához használt kritériumokat az F.1 fejezetben és az F.1. táblázatban találhatók.

A WBCS (RIVAS-MARTÍNEZ ET AL., 2011) különböző éghajlati elemek és bioklimatikus indexek hierarchikus rendszere alapján különít el osztályokat (F.2 fejezet, F. 2. és F.3. táblázat), mely rendszer, Köppenhez hasonlóan, az éghajlati karakterisztikák és a növényfajok és növényközösségek térbeli eloszlása közötti összefüggésen alapul, azonban a WBCS séma jóval komplexebb, mint Köppené (vagy Feddemáé). Az osztályozás elméleti hátterét képező geobotanikai meghatározások részletesen megtalálhatók a WBCS honlapján [GLOBALBIOCLIMATICS.ORG] és LOPEZ FERNANDEZ ÉS LOPEZ FERNANDEZ (2018) útmutatójában az osztályozás használatáról. A WBCS a különböző vegetációs csoportok éghajlati toleranciáján alapul, figyelembe veszi például, hogy milyen környezeti körülmények esetén állnak le, vagy indulnak be bizonyos életfunkciók, mint például a víztranszport (LOPEZ FERNANDEZ ÉS LOPEZ FERNANDEZ, 2018; QUADERI ET AL., 2019). Az osztályozás alkalmazásához szükség van bemeneti adatként a havi átlagos minimum és maximum hőmérsékletre, a havi átlaghőmérsékletre, a havi csapadékösszegre, továbbá minden rácspont esetén a földrajzi szélességre és a tengerszint feletti magasság ismeretére. A hierarchikus kritériumrendszerben három szint különböztethető meg: az első, legnagyobb egységet képezik a makrobioklimák, melyek a Föld globális skálán meghatározható éghajlataihoz, biomjaihoz és biogeográfiai régióihoz hivatottak kapcsolódni. A második szinten a bioklimák és azok változatai helyezkednek el, melyek a makrobioklimákon belül előforduló éghajlati-környezeti forgatókönyvek, azaz a nagy egységen belül megvalósuló különböző altípusok a vegetáció típus változásokat hivatottak kifejezni. A harmadik szintbe tartoznak a hő- és vízellátottság kategóriák, melyek együttesen kiadnak egy bioklimatikus övezetet.

A módszertani összehasonlítás során vizsgáltam, hogy az egyes osztályozásokkal lehetséges-e az éves és szezonális hő- és vízellátottság jellemzése. Az *éves hőellátottság* kifejezésére Feddema az éves PET-et használja. Köppen módszerében ezt a tulajdonságot a fő klímátípusok fejezik ki, amit a klímaképlet első betűje jelöl, a WBCS esetén pedig ezt a kontinentalitási I_c és a termikus I_t index alapján a hőellátottság kategória reprezentálja. Az *éves vízellátottságot* Feddema az I_m index alapján adja meg, mely a P és a PET arányán alapul, a Köppen módszer esetén nincs külön index a Kárpátok térségében előforduló

klímátípusok esetén. A WBCS ezt a jellemzőt az I_o nedvességi indexel fejezi ki, mely a P és a T arányán alapul.

A szezonalitást tekintve figyelemreméltó különbség, hogy a Feddema a szezonalitást a PET és I_m havi és éves értékek alapján adja meg, míg Köppen esetén konkrét félév míg a WBCS esetén az éven belül évszakok kerülnek elkülönítésre. A *hőellátottság és a vízellátottság szezonális változását* Feddema az éven belüli PET és P változás alapján adja meg. Ezzel szemben a másik két módszer előre definiált évszakokkal számol, a Köppen-módszer két, hat hónapos évszakot határoz meg és a szezonális termikus jellemzőket a klímaképletek harmadik szimbóluma (az „a”, „b” vagy „c”) jelképezi a legmelegebb havi hőmérséklet és a 10 °C feletti hőmérsékletű hónapok száma alapján. A WBCS esetén 2–4 hónapos időszakok szerepelnek és a hőmérséklet-ingadozások függvényében fejezhető ki. A *vízellátottság szezonális változását* a Köppen módszerében a klímaképlet második betűje hivatott kifejezni.

4.3. Adatfeldolgozás

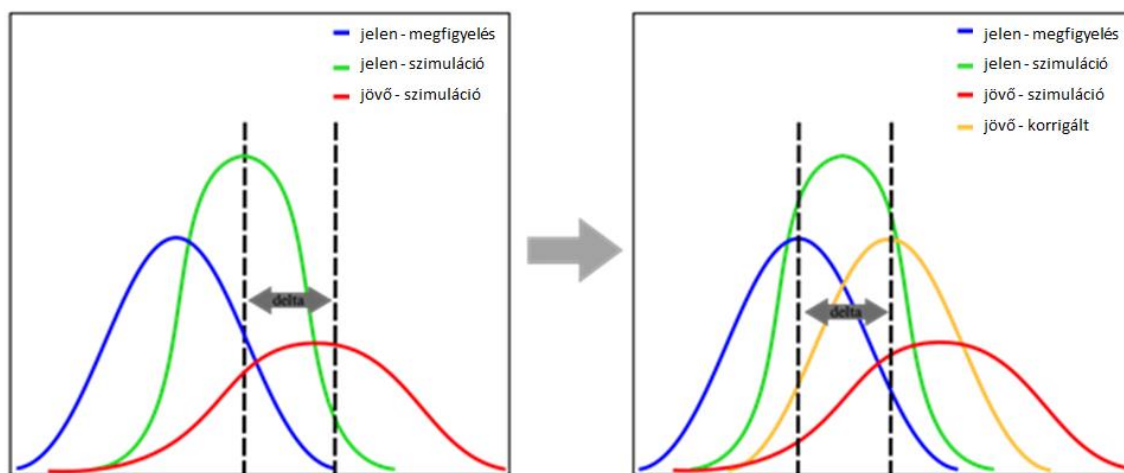
A **3.1 fejezetben** ismertetett referencia adatokat a **3.2 fejezetben** bemutatott klímamodell-tartományok felbontására skáláztam fel a CDO éghajlati adatok kezelésére szolgáló parancscsomag segítségével (SCHULZWEIDA, 2019). A hőmérsékleti adatok esetén bilineáris interpolálást, a csapadékadatok esetén pedig elsőrendű konzervatív újracsoportosítást alkalmaztam [CLIMATEDATAGUIDE.UCAR.EDU]. Továbbá, mivel a klímamodell eredmények a múltbeli mérésekkel nem vethetők össze közvetlenül, ezért a **3.2 fejezetben** bemutatott 19 felhasznált EURO-CORDEX szimuláció eredményeit a delta-módszerrel (DÉQUÉ, 2007; WANG ET AL., 2016) korrigáltam. A delta-módszer az éghajlatkutatásban gyakran használt hibakorrektív eljárás, mely az adott globális vagy regionális modell éghajlatváltozásra adott válaszát figyelembe véve módosítja a megfigyeléseket a korrigált jövőbeni adatsor meghatározásához a várható jövőképek becslésére (7. ábra). Emiatt a megfigyelési adatbázis minősége határozza meg a hibakorrektív eljárás minőségét, az eljárással csökkentve a modellek hibáit, mint az esetleges alul- és felülbecslés és biztosítva a homogenitást a megfigyelési és a modellezett éghajlati időszakok között (HANF ET AL., 2012). A szakirodalom alapján a delta-módszer a disszertációmban tárgyalt éghajlat-osztályozások alkalmazásához szükséges klimatológiai átlagértékek vizsgálata esetén mind a hőmérséklet, mind a csapadék adatokra alkalmazható

a klímamodell szimulációk átlagos hibájának kiszűrése végett (DÉQUÉ, 2007; WANG ET AL., 2016; MARAUN ÉS WIDMANN, 2018; NAVARRO-RACINES, 2020). A delta-korrekción a havi felbontású rácsponti adatokra alkalmaztam a hőmérséklet adatok esetén a 8. egyenlet, míg a csapadék adatok esetén a 9. egyenlet alkalmazásával (WANG ET AL., 2016 alapján):

$$X'_m = X_m \cdot (\mu_{sz'} - \mu_{sz}) \quad (8)$$

$$X'_m = X_m \cdot \left(\frac{\mu_{sz'}}{\mu_{sz}} \right) \quad (9)$$

A 8. és 9. egyenletben az m jelöli a megfigyelési adatokat (CarpatClim) az sz pedig az éghajlati szimulációkat (EURO-CORDEX). Aposztróffal jelöltem a jövőbeni időszakot, anélkül a referencia időszakot, X -szel az idősort, μ -vel az időablakra átlagolt adatokat. A zárójelben szereplő tagok a delta értékek, ami a referencia időszak és a jövőbeni időszak között várható változás mértéke. A referencia időszakra vonatkozó megfigyelési adatsor delta értékkel történő eltolásának eredménye a korrigált szimulált idősor. A disszertációhoz szükséges számítások elvégzése során a korrigált havi idősorokból az adott időablakra vonatkozó 30 éves havi átlagokat képeztem és ezeket az előfeldolgozott adatsorokat használtam fel a Feddema-osztályozás alkalmazásához.



7. ábra A delta-módszer sematikus alkalmazása a korrigált szimulációk előállítására. A korrekció során a referencia időszak adatainak eltolása történik a jövőbeni korrigálatlan szimulációk és a historikus korrigálatlan szimulációk eltéréseivel. Forrás: [rcmes.jpl.nasa.gov]

A korrekciót a 2019–2048, 2029–2058, 2039–2068, 2049–2078, 2059–2088 és 2069–2098 időablakokra végeztem el az 1971–2000 periódust bázisként tekintve. A referencia időszakként használt időablak a CarpatClim adatsor középső 30 éves időszaka (1971–2000).

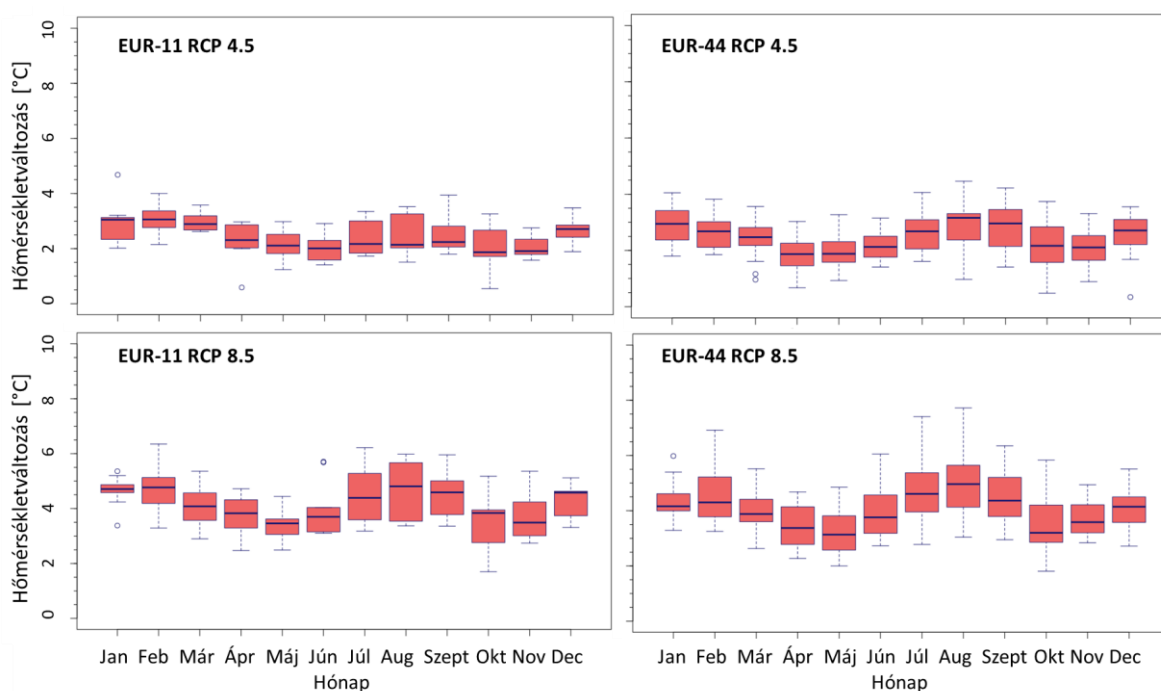
A jövőbeni időablakok esetén az utolsó 2069–2098 időszak került először kiválasztásra oly módon, hogy a kiválasztott szimulációk mindegyike esetén a teljes időszakra elérhetőek legyenek az adatok. Több szimuláció esetén például 2100-ra, vagy 2099 utolsó hónapjára nem volt elérhető adat. Ezek után meghatároztam a további 30 éves időablakokat 10 évenként, ügyelve arra, hogy az első időszak átlaga és a referencia időszak vége között legalább 30 év különbség legyen. Ez az időintervallum már kellően hosszú, hogy éghajlati skálán vizsgáljam a változást.

Az EURO-CORDEX szimulációk futásának kezdő időpontja (2006) és a vizsgált, korrigált időablakok közötti időszak (2006–2018) esetén összevettem a disszertációmban részletesen elemzett RCA4-EC-EARTH modellpárhoz tartozó korrigálatlan modelldatokat és a 2006–2018 időszakra vonatkozó ERA5 reanalízis¹⁵ adatokat (F.3 fejezet, F.1 ábra). A reanalízis adatokat a Copernicus Climate Data Store-ból töltöttem le [CDS.CLIMATE.COPERNICUS.EU]. A havi átlaghőmérsékletek esetén az RCA4-EC-EARTH mindkét forgatókönyv esetén alulbecsli az ERA5-öt. Utóbbi esetén egy emelkedő trend látszik, ez az RCP4.5-esetén még nem jelenik meg a szimulációban, az RCP8.5 forgatókönyvnél már igen. A szimulált évek közötti hőingás nem minden esetben követi a reanalízisben megjelenő változásokat, az RCP4.5 forgatókönyv esetén a 2008, 2012, 2015 és 2016-os években ellentétes a változás iránya (az előző év esetén feltüntetett hőmérsékleti értékhez képest). Az RCP8.5 forgatókönyv esetén ez figyelhető meg a 2010, 2012, 2015, 2016, 2017-es évek esetén. A csapadékösszegek összevetésén látszik, hogy az RCA4-EC-EARTH jól becsülte például a 2011-ben bekövetkezett jelentős csökkenést mindkét forgatókönyv esetén (F.1 ábra). A modelldat 2007-után az éven belüli csapadékingás is követi az ERA5 menetét, kivéve 2013 és 2014-es éveket. Az RCP8.5-öt követő szimuláció 2014 és 2015-ben ellentétes irányú változást mutat az ERA5-höz képest, az időszak végén viszont mindkét adatsor esetén megjelenik egy csökkenő éven belüli ingadozás. Azonban kiemelendő, hogy a regionális klímamodellek eredményeknek nem kell az évről-évre való

¹⁵ Az éghajlati reanalízisek előállításánál a múltbeli megfigyeléseket éghajlati modellekkel kapott eredményekkel kombinálják, hogy több éghajlati változóból álló konzisztens idősorokat állítsanak elő. [climate.copernicus.eu]

változékonyságot teljesmértékben visszaadni, hiszen a modelleredményeknek csak a statisztikai sokasága értelmezhető, adott időpont nem.

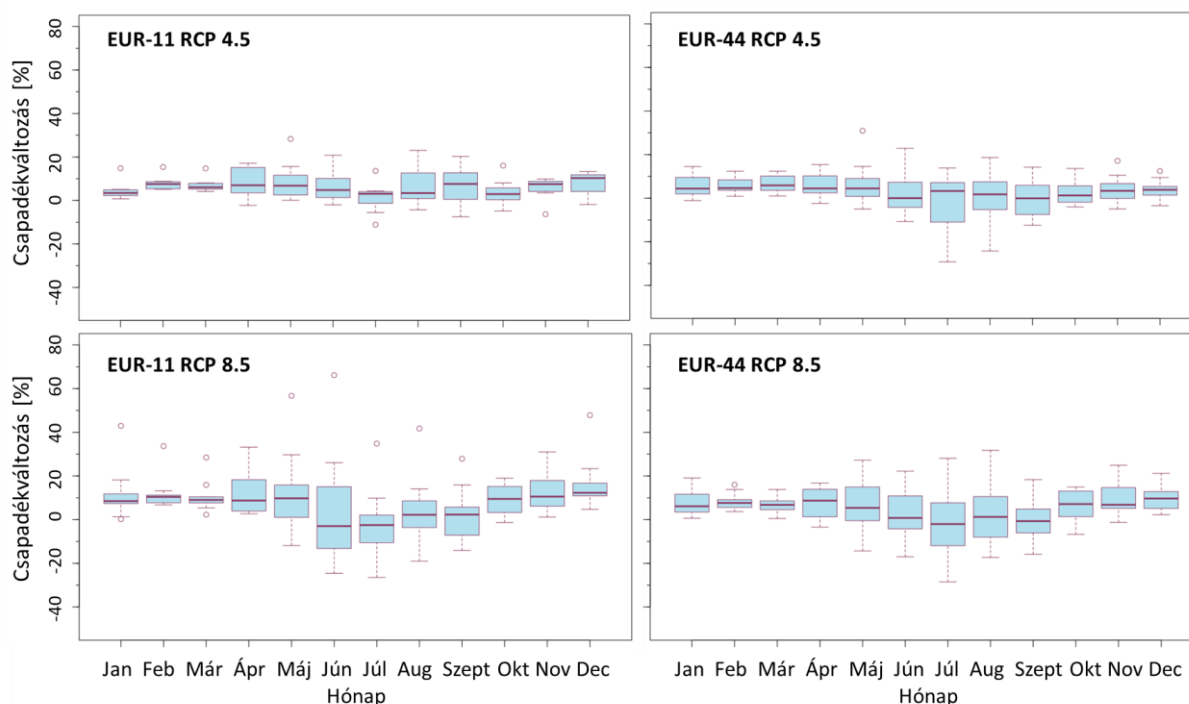
A következő ábrákon bemutatom a korrigált, valamint a referencia adatok közötti eltérést, továbbá a korrigálatlan modellszimulációkat és a korrigált és korrigálatlan szimulációk közötti eltérést a 2069–2098 jövőbeni és az 1971–2000 referencia időszakra vonatkozólag. A korrigált és referencia hőmérséklet adatok közötti eltérés esetén látható, hogy az EUR-44 felbontás esetén nagyobb az adatok szórása (8. ábra), mint az EUR-11 esetén. Az előbbi felbontással többféle globális modellel hajtott regionális modell adat került felhasználásra. Megfigyelhető továbbá, hogy az interkvartilis tartomány nagyobb az RCP8.5 esetén az RCP4.5-höz képest mindegyik felbontásra, azaz a pesszimistább forgatókönyv esetén „nyílik az olló”. Az említett tartomány az EUR-11 szimulációknál mindkét RCP-re július és augusztus hónapokban a legnagyobb, míg EUR-44 esetén ebben nincs konzisztencia (8. ábra).



8. ábra A vizsgálatban felhasznált EUR-11 (bal) és EUR-44 (jobb) felbontású, RCP4.5 (fent) és RCP8.5 (lent) forgatókönyveket követő 2069–2098-ra átlagolt korrigált jövőbeni és az 1971–2000-re átlagolt CarpatClim adatok átlagos havi hőmérséklet értékek területi átlagából számított abszolút eltérés szórása. A számítás 7 EUR-11 felbontású RCP4.5, 8 EUR-11 felbontású RCP8.5 és 15 EUR-44 felbontású RCP4.5 és RCP8.5 szcenáriót követő RCM-GCM pár alapján történt.

A referencia időszakra vonatkozó és a jövőbeni korrigált csapadékösszegek esetén jelentős eltérés látható az egyes forgatókönyv-domain párosításokkal kapott statisztikákban

(9. ábra). Hasonlóságként általánosságban elmondható, hogy jóval több kiugró (outlier) érték szerepel, mint a hőmérséklet esetén (8. ábra). Az interkvartilis tartomány októbertől márciusig jellemzően kisebb, mint az év másik felében. Látható továbbá, hogy leginkább az RCP8.5 forgatókönyv esetén jellemző a bizonytalanság a változás irányát tekintve főleg a nyári hónapok során (9. ábra). A nyárra vonatkozó becslések bizonytalanságát főként a különböző RCM-ek esetén eltérő konvekcióra vonatkozó parametrizáció befolyásolja (RAJCAK ÉS SCHÄR, 2017).

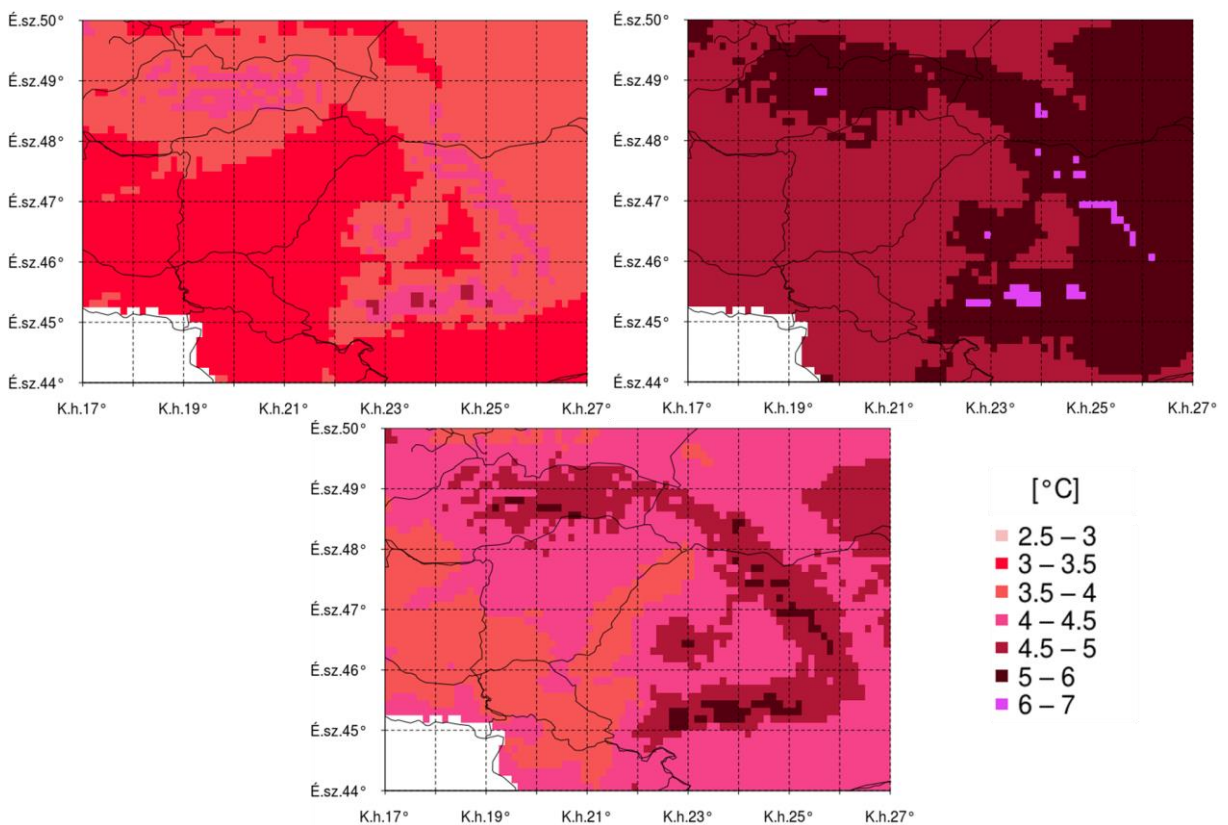


9. ábra A vizsgálatban felhasznált EUR-11 (bal) és EUR-44 (jobb) felbontású, RCP4.5 (fent) és RCP8.5 (lent) forgatókönyveket követő 2069–2098-ra átlagolt korrigált jövőbeni és az 1971–2000-re átlagolt CarpatClim havi csapadékösszeg értékek területi átlagából számított relatív hiba szórása. A számítás 7 EUR-11 felbontású RCP4.5, 8 EUR-11 felbontású RCP8.5 és 15 EUR-44 felbontású RCP4.5 és RCP8.5 scenáriót követő RCM-GCM pár alapján történt.

A korrigált szimulációk alapján, a század végére (2069–2098) várható hőmérséklet és csapadékmennyiség referencia időszakhoz képest vett eltéréseinek területi eloszlását a legkisebb (RCA4-CNRM-CM5), a legnagyobb (RCA4-HadGEM2-ES), illetve egy átlagos mértékű (RCA4-EC-EARTH) hőmérséklet emelkedést prognosztizáló modell segítségével mutatom be (10. ábra). Az utóbbi modellpárral kapott eredményeket részletesen elemzem az **5.2.3, 5.2.4 és 5.2.5 fejezetekben**. Kiemelendő, hogy a regionális modell mindhárom esetben az RCA4, míg a globális modell eltérő, azaz a meghajtó modelltől függően szórnak az eredmények. A kiválasztott szimulációk EUR-11 felbontásúak, melyek esetén jobban

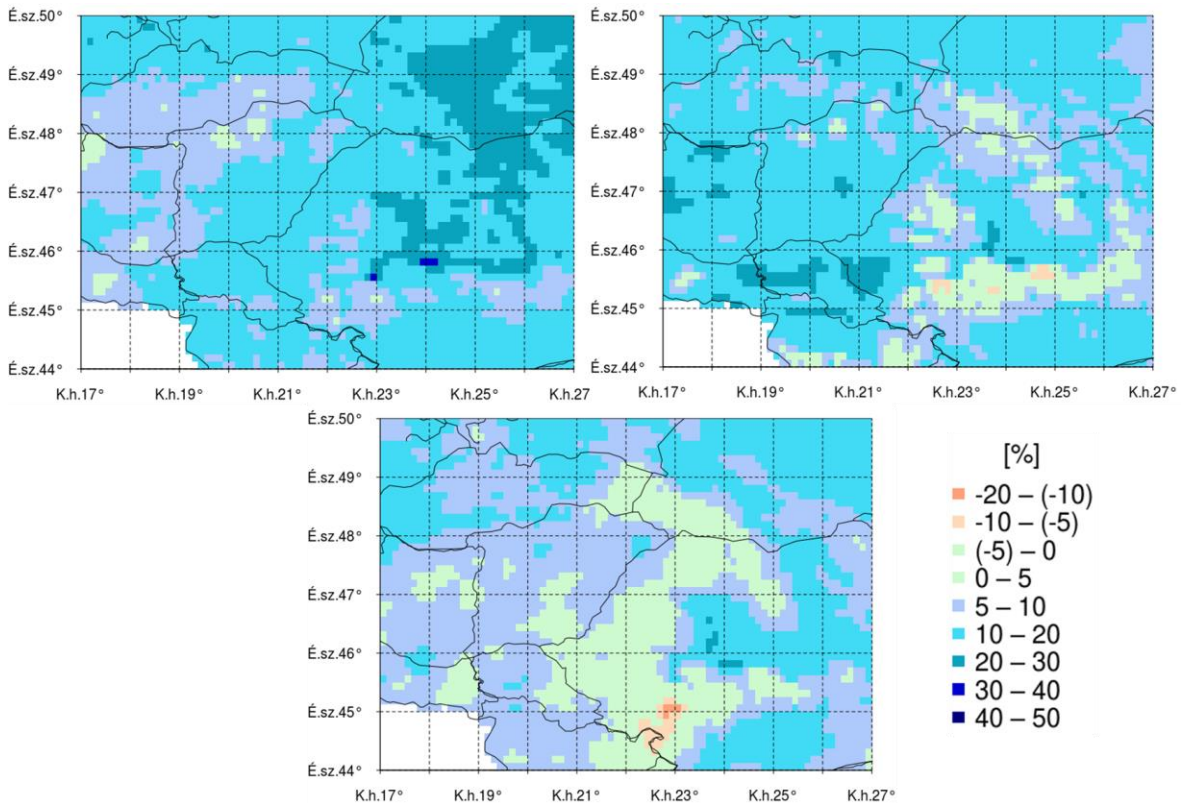
látszódik a különböző tengerszint feletti magasságokon várható felmelegedés mértéke (a finomabb felbontás következtében). A területi eloszlás bemutatására RCP8.5 forgatókönyvet követő szimulációkat választottam, mert az aktuális, törvénybe iktatott klímapolitikai törekvések alapján várható felmelegedés mértéke ehhez a scenárióhoz közelíthető inkább (SCHWALM ET AL., 2020).

Megfigyelhető, hogy a legmagasabb hegyvidéki területeken, például a Kárpátok vonulatán, vagy a Magas-Tátrában akár 2 °C hőmérsékletkülönbség is van a várható növekedésben az egyes szimulációk között, ez az RCA4-HadGEM2-ES esetén több, mint 6 °C a referencia időszakhoz képest. Mindhárom szimuláció esetén legalább 3 °C-os emelkedés várható a teljes vizsgált területen.



10. ábra Az EUR-11 felbontású, RCP8.5 forgatókönyvet követő 2069–2098-ra vonatkozó korrigált jövőbeni és az 1971–2000-re vonatkozó CarpatClim átlagos éves hőmérséklet értékek abszolút eltérése az RCA4-CNRM-CM5 (bal), RCA4-HadGEM2-ES (jobb) RCA4-EC-EARTH (lent) modell párok esetén

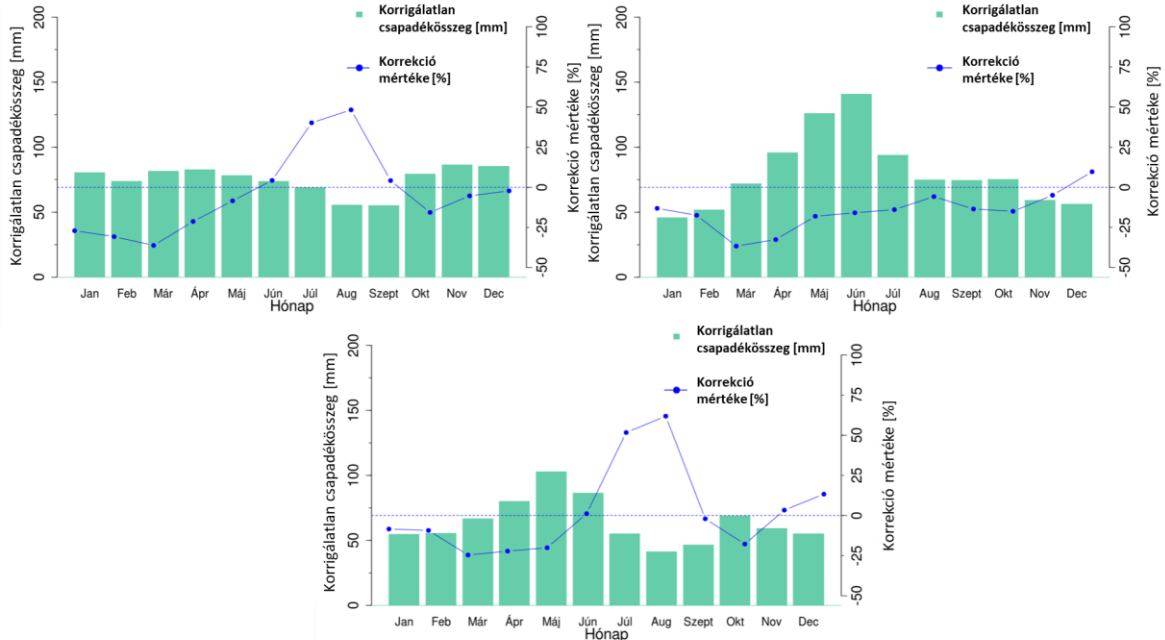
A 10. ábrán bemutatott modellekkel kapott és korrigált szimulációk esetén, a 21. század vége és a referencia időszak közötti csapadékmennyiség relatív hibájának területi eloszlása látható a 11. ábrán. Megfigyelhető, hogy az egyes szimulációk jelentősen eltérő területi eloszlást eredményeznek. A világos zölddel jelölt területeken a változás iránya bizonytalan, míg a kék árnyalatok esetén növekedés várható. A legtöbb területen 10–20%, a legcsapadékosabb esetben az RCA4-CNRM-CM5 esetén akár 40–50%-os emelkedés várható.



11. ábra Az EUR-11 felbontású, RCP8.5 forgatókönyvet követő 2069–2098-ra vonatkozó korrigált jövőbeni és az 1971–2000-re vonatkozó CarpatClim átlagos éves csapadékösszeg értékek relatív hibája az RCA4-CNRM-CM5 (bal), RCA4-HadGEM2-ES (jobb) RCA4-EC-EARTH (lent) modell párok esetén

Bemutatom továbbá a korrigálatlan szimulációk alapján, a század végére (2069–2098) várható átlagos havi csapadékösszeg értékeket és a korrigált és korrigálatlan szimulációk közötti relatív hibát (12. ábra). A 12. ábrán látható a csapadékmennyiség legkisebb éven belüli változékonyságát mutató RCA4-CM5A-MR modellpár, a legnagyobb változékonyságot mutató ALADIN53-CM5 modellpár és az RCA4-EC-EARTH modell pár. A bemutatott, EUR-11 felbontású, RCP8.5 forgatókönyvet követő szimulációk alapján jól látszik, hogy az egyes modellpárok szerint jelentős eltérés lehet a várható havi csapadék

menyiségében és továbbá a relatív hibával megadott korrekció mértékben is (a hőmérséklet esetén a korrekció havi mértéke nem, de a menete hasonló mintát mutat minden szimuláció esetén).



12. ábra Az EUR-11 felbontású, RCP8.5 forgatókönyvet követő 2069–2098-ra vonatkozó korrigálatlan szimulációk várható átlagos havi csapadékösszegének területi átlaga és a korrigált és korrigálatlan szimulációk közötti relatív hiba (korrekció mértéke) területi átlaga az RCA4-CM5A-MR (bal), ALADIN53-CM5 (jobb) RCA4-EC-EARTH (lent) modell párok esetén

Az RCA4-EC-EARTH modellpár esetén összevettem a disszertációban részletesen elemzett 2069–2098 időszakhoz tartozó korrigált és korrigálatlan adatok relatív hibájával megadott korrekció mértékét és a referencia időszak és a jövőbeni időablak között várható változás mértékét (F.3 fejezet, F.2 ábra). Az RCP4.5 forgatókönyv esetén a hőmérsékletben várható változás április és május kivételével magasabb, mint a korrekció mértéke (a korrigált és korrigálatlan szimuláció eltérése). A korrekció mértéke a legnagyobb májusban (3 °C) és a legkisebb júliusban, -0,1 °C körüli, ebben az esetben tehát a korrigálatlan szimuláció adott magasabb értékeket. A változás mértéke a legnagyobb februárban (3,3 °C) és a legkisebb novemberben (1,75 °C). A korrekció mértékében nagyobb az éven belüli változékonyság, mint a várható változásban. Az RCP8.5 esetén már mindkét esetben nagy változékonyság jelenik meg és a változás mértéke minden hónapban magasabb, mint a korrekció legalább 1 °C-kal. A változás mértéke a legnagyobb januárban és ekkor a legkisebb a korrekció. A csapadék esetén mindkét forgatókönyvet követő szimulációk esetén a változás mértékére

kapott relatív eltérés nagyobb, mint a korrekció mértéke esetén legalább 0,3 mm-el. Az RCP4.5 esetén a legnagyobb változás februárban, míg a legkisebb szeptemberben várható. A korrekció mértéke a nyári hónapokban és szeptemberben a legnagyobb. Az RCP8.5 esetén a legnagyobb különbség a változás és a korrekció mértéke között februárban található, nyáron pedig a legkisebb, amikor legkisebb változás és a legnagyobb korrekció mértéke.

Az adatok előzetes feldolgozása után havi felbontású referencia adatok és a hibakorrigált éghajlati szimulációk felhasználásával osztályoztam a Kárpátok térségének éghajlatát a következőkben ismertetett módokon.

A térség 20. század végére vonatkozó éghajlati képének leírásához meghatároztam:

- a Feddema-indexeket, alkalmaztam a Feddema-diszkrét éghajlat-osztályozási módszert és meghatároztam a Feddema-klímapárokat;
- a módszertani összehasonlítás során alkalmazott éghajlat-osztályozási módszerek (Köppen és WBCS) alapján a térségre vonatkozó klímátípusokat;
- a térségben előforduló éghajlat-osztályok számát tengerszint feletti magassági régiók szerint mind Feddema, mind az összehasonlítás során alkalmazott módszerek szerint;
- a módszertani összehasonlítás során referencia osztályozásként felhasznált Köppen-módszer alapján kapott adott klímátípus esetén milyen klíma- és szezonáltság típusok jellemzik a területet a Feddema- és a WBCS-módszerek alapján.

A 21. század során várható éghajlatváltozásra vonatkozó vizsgálataimhoz meghatároztam:

- a század végére várható klíma- és szezonáltság-típusokat és azok területi lefedettségének százalékos arányát a Feddema-diszkrét megközelítés alapján;
- a várható klímátípus- és szezonáltság-típus változást és annak területi eloszlását;
- hogy szignifikáns-e a Feddema-osztályozás alapját képező hő- és vízellátottságban várható változás;
- a referencia időszak során és a század végére várhatóan a klíma- és szezonáltság-típusok területi eloszlását;
- továbbá a klíma- és szezonáltság-típusok számának változását különböző magassági kategóriákra;

- a Feddema-módszer folytonos megközelítése alapján az egyes klíma- és szezonálítás-típusokhoz tartozó Feddema-indexek átlagában várható változás irányát és mértékét továbbá az egyes típusokhoz tartozó terület százalékos arányának változását;
- hogy a referencia időszakban egy adott klíma- és szezonálítás-típusba sorolt területek esetén átlagosan milyen mértékű változás várható a Feddema-indexekben a jövőben;
- hogy a referencia időszakban egy adott klíma- és szezonálítás-típusba sorolt területek esetén rácspontonként milyen mértékű változás várható a Feddema-indexekben a jövőben;
- hogy a század végére várhatóan újonnan megjelenő típusba sorolt rácspontok milyen irányú és mértékű változás következtében kerültek az újonnan megjelent kategóriába (szezonálítás esetén nem jelent meg új típus).

Az adatfeldolgozáshoz a már említett CDO parancscsomag alkalmazása mellett, Fortran 90 program- és Shell scriptnyelveket alkalmaztam. A disszertációban bemutatott térképeket és grafikonokat a Generic Mapping Tools (GMT v5.2.1) nyílt forráskódú szoftvercsomag (WESSEL ET AL., 2013), az R programnyelv (R CORE TEAM, 2019) és az Excel szoftver alkalmazásával készítettem.

5. Eredmények

A **5.1-es fejezetben** bemutatom a Kárpátok térségének FEDDEMA (2005) módszerének alkalmazásával kapott éghajlati képét majd eredményeimet összevetem a Feddema sémánál jóval szélesebb körben alkalmazott KÖPPEN (1936) és WBCS (RÍVAS-MARTÍNEZ ET AL., 2011) módszerekkel kapott eredményekkel. Az **5.2. fejezetben** bemutatom Feddema módszere alapján a 21. század végére a Kárpátok térségében várható éghajlatváltozást a klíma- és szezonális-típusok eloszlásán és annak változásán, valamint a Feddema-indexekben várható eltolódáson keresztül.

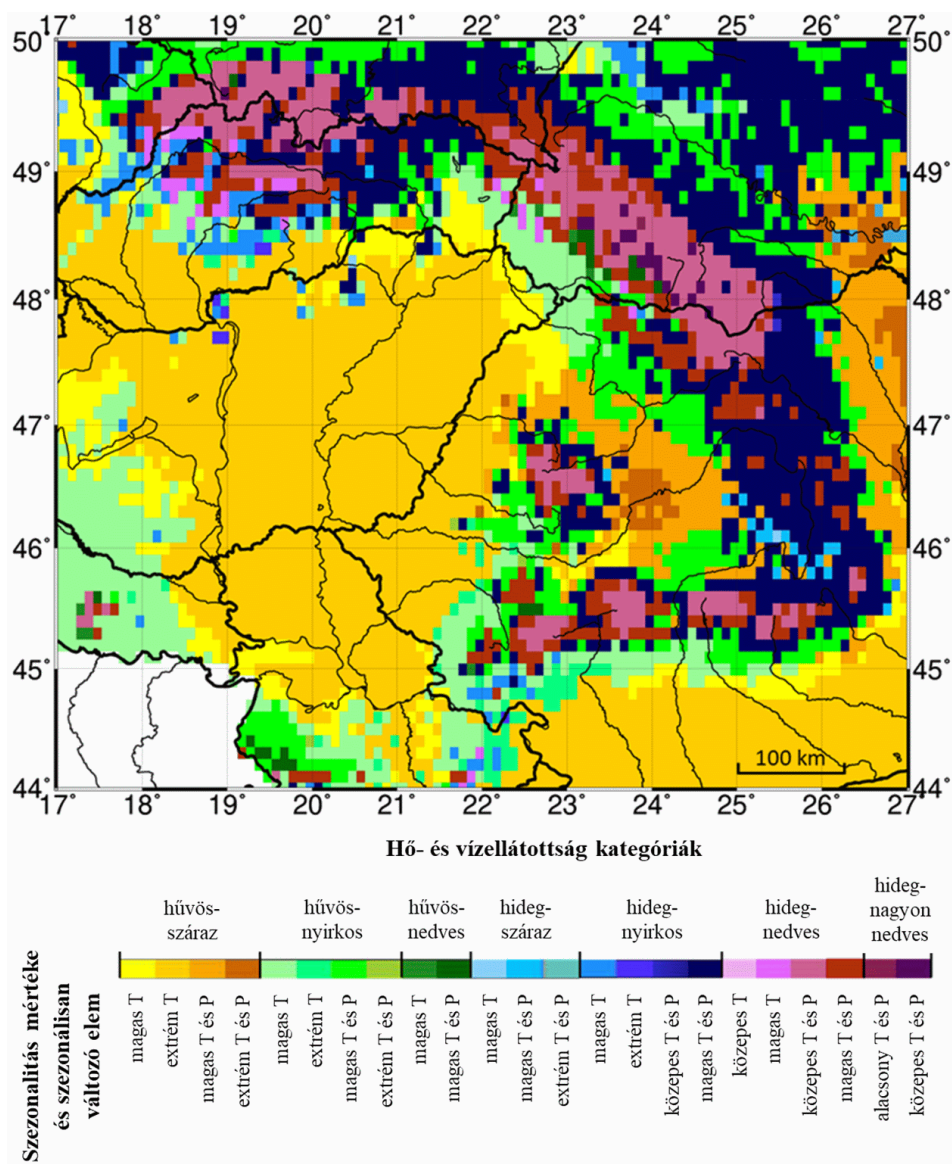
5.1. A Kárpátok térségének éghajlata az 1971–2000 időszakban Feddema alapján és összehasonlítása más leíró éghajlat-osztályozásokkal kapott eredményekkel

A Kárpátok térségének éghajlatát a Feddema-féle és más leíró éghajlat-osztályozások alkalmazásával vizsgáltam 1971–2000 időszakra vonatkozólag a teljes területre, valamint alföldekre (tszf. magasság < 200 m), dombokra (200 és 500 m közötti tszf. magasság), alacsony szintű hegységekre (500 és 1000 m közötti tszf. magasság) és középhegységekre (1000 és 2000 m közötti tszf. magasság). Továbbá, bár a terület mindössze 0,17 %-a esik a magashegységek kategóriájába (tszf. magasság > 2000 m), dolgozatom összehasonlító elemzésében ezeket a területeket is külön csoportként vizsgáltam, a módszerek magasságfüggésének tanulmányozása érdekében (MEYBECK ET AL., 2001).

A Feddema-módszerrel meghatározott klíma- és szezonális-típusok alapján huszonegy klímapárt különíthetünk el a Kárpátok térségében (13. ábra). Az alföldeken tizenegy, „hűvös” hőellátottsági kategóriába eső klímapár fordul elő. A „T szezonális” főleg a legalacsonyabb tengerszint feletti magassággal rendelkező területeken jellemző, például az Alföldön, míg „T és P” szezonális az Erdélyi-fennsíkon. Az éghajlat a dombvidéken a legheterogénebb, tizenkilenc klímapárral. „Hűvös” és „hideg” területek is megtalálhatóak együtt a „száraztól” a „nyirkoson” át a „nedves” vízellátottsági kategóriákig. Az alacsony szintű hegységek területének éghajlata a második legheterogénebb tizenhét éghajlati típussal. A nagyon nedves vízellátottsági kategória csak alacsony, közepmagas és magas hegyvidéki régiókban található meg. Az alacsony szintű hegységek és középhegységek régióit uralkodóan a „T és P magas és extrém” szezonális, míg e régiók

legmagasabb csúcsait a „T és P közepes és alacsony” szezonalitása jellemzi. A magashegységek klímája hét klímapárral írható le, vízellátottság terén nedves és nagyon nedves, a szezonalitás szempontjából pedig a „T és P közepes” szezonilitásával jellemezhető területeken.

A legelterjedtebb a „hűvös-száraz” klímátípus „T extrém szezonilitásával”, megtalálható az Alföldön, Románia nyugati határán, Szlovákia nyugati felén, a Pannon-medence északnyugati részén és Szerbia északi felén. Mint látjuk, a Feddema-módszerrel megkülönböztethető az alföldek klímája a Kárpátok éghajlatától, de az Alföld éghajlata csak részben különböztető meg a Dunántúli-középhegység éghajlatától.

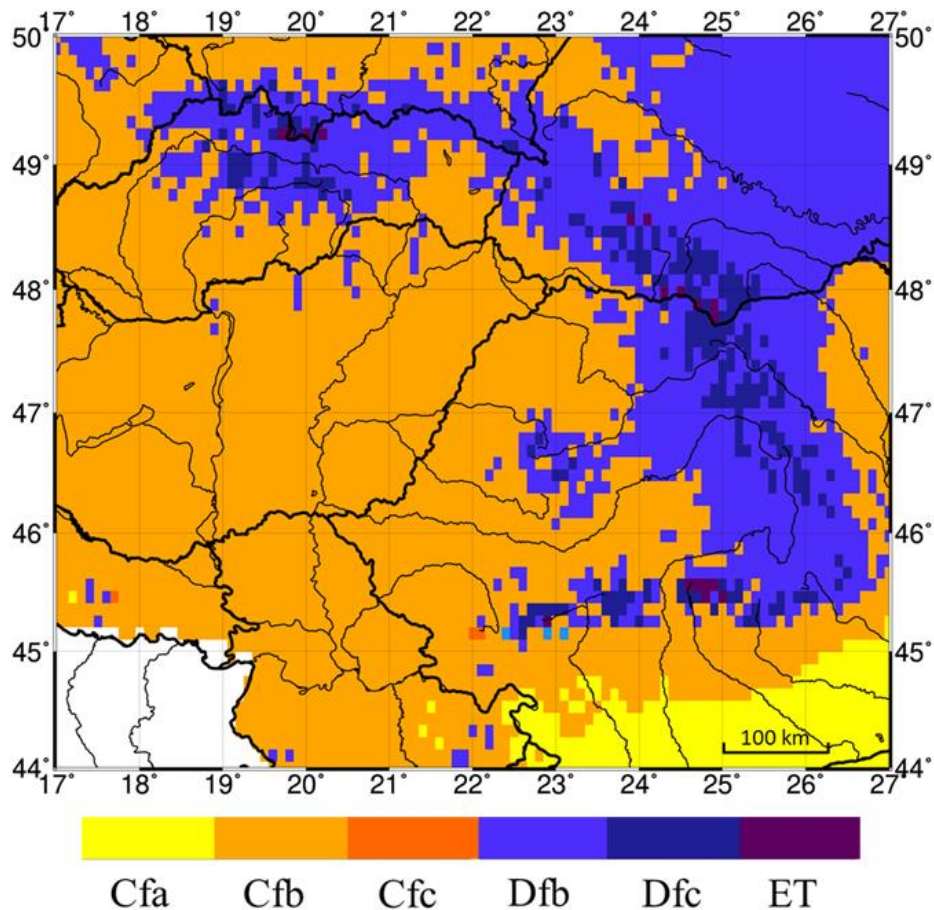


13. ábra FEDDEMA (2005) klímapárok területi eloszlása a Kárpátok térségében az 1971–2000 időszakra vonatkozóan CarpatClim adatbázis alapján

A Feddema-módszerrel kapott eredményeket összehasonlítottam a jóval elterjedtebb, szintén globális skálára megszerkesztett KÖPPEN (1936) és a Worldwide Bioclimatic Classification System (RIVAS-MARTÍNEZ ET AL., 2011) leíró jellegű biofizikai éghajlat osztályozásokkal. Fontos hangsúlyozni, hogy a módszertani hasonlóságok ellenére nincs egzakt összehasonlítási alap, ugyanakkor a módszertanok összehasonlítása hasznos eszköznek bizonyult a Feddema-módszer előnyeinek és hátrányainak leírására és az eredmények kontextusba helyezésére.

A legszélesebb körben alkalmazott Köppen-módszerrel hat klímátípus különböztethető meg a Kárpátok térségében (14. ábra). Ezek a következők: *Cfa*, *Cfb*, *Cfc*, *Dfb*, *Dfc*, *ET*. Az alföldeket a *Cfa*, *Cfb* és *Dfb* mérsékelt és boreális éghajlati típusok jellemzik, amelyek a dombvidéken is megtalálhatók. Az alacsony és középszintű hegységeket a *Cfb*, *Cfc*, *Dfb* és *Dfc* által jelzett hidegebb mérsékelt és boreális éghajlat jellemzi, kivéve a Kárpátok középmagas hegyvidékeit, ahol a *Cfc* nem található meg. A leghidegebb éghajlati típus, az *ET* tundra klímája szintén a magassági hegyvidéken található. Csak tíz rácpont van, mely *ET* klímával jellemezhető, ezek mindegyike a magashegyi régiókban.

Összesen a terület közel kétharmadán jellemző a *Cfb* klímátípus, amely a Pannon-medencét, Románia nyugati részét, valamint Szlovákia nyugati részét, Szerbia északi részét és Horvátország keleti részét fedi le. Az alföldeket és dombokat Köppen alapján többnyire ugyanazok az éghajlati típusok jellemzik, így vizuálisan nem választhatók el egymástól. Annak ellenére, hogy az alacsonyszintű hegységekben mindössze négy, a középhegységek esetén négy, a magashegységek esetén pedig csak egy éghajlattípus jelenik meg, a hőmérsékleti gradiens miatt a Kárpátok vonulata egyértelműen megkülönböztethető az alföldi régióktól.



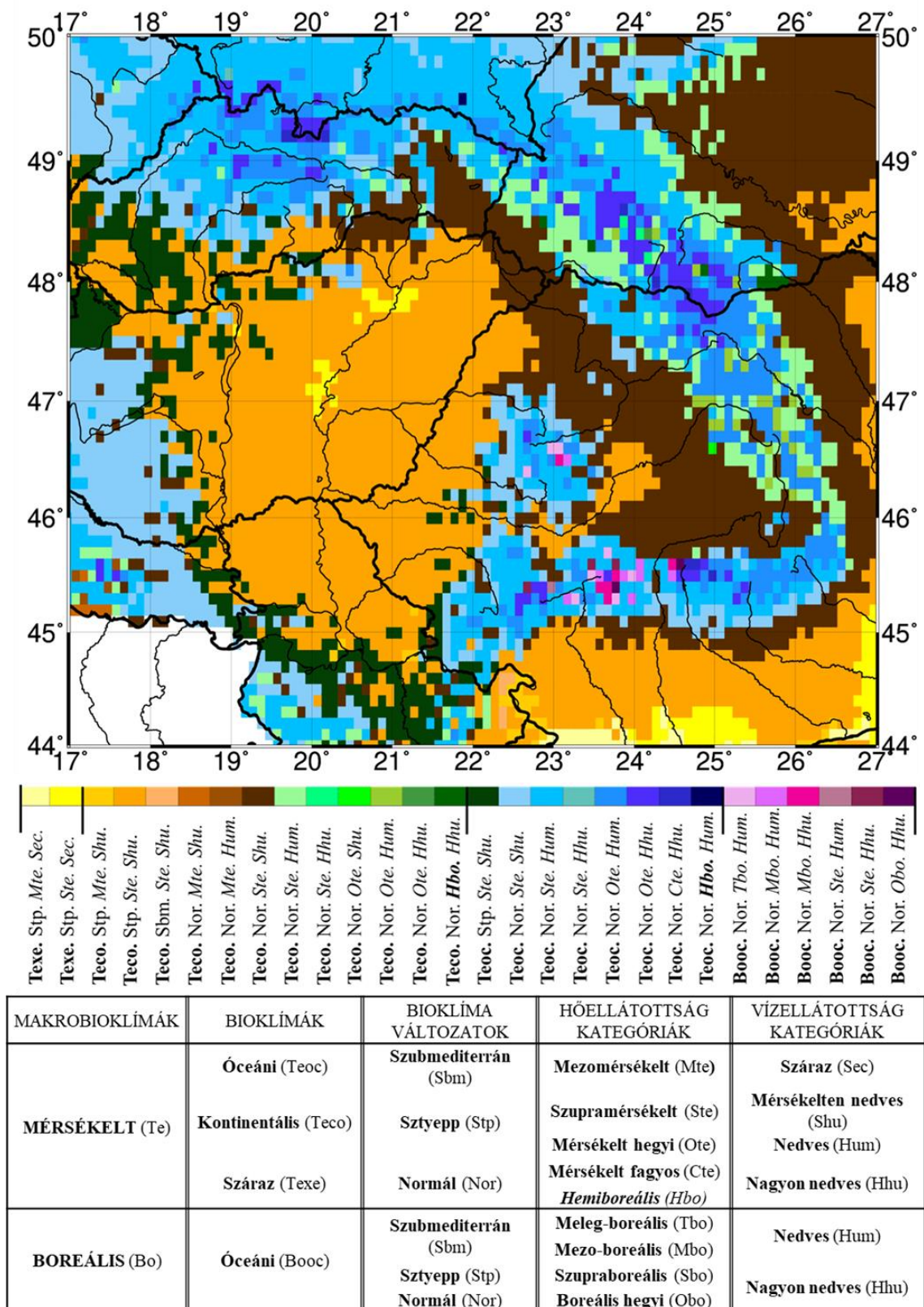
14. ábra A KÖPPEN (1936) klímatispusok területi eloszlása a Kárpátok térségében az 1971–2000 időszakra vonatkozólag CarpatClim adatbázis alapján

A WBCS (RIVAS-MARTÍNEZ ET AL., 2011) a Kárpátok térségében huszonnyolc klímatispus (amit a RIVAS-MARTÍNEZ ET AL., 2011 tanulmányban angolul „isobioclimate”-nek azaz izobioklímának is neveznek) különböztet meg (15. ábra). Az alföldi régiókban tizenkét klímatispus található. A száraz vízellátottságú klímatispusok a térség alföldi területeinek legszárazabb részén, a Havasalföldön találhatók. Az alföldeken található tizenkét klímatispus közül öt a sztyeppe kategóriába sorolható. A szerb-román határ menti terület *mérsékelt kontinentális szubmediterrán szubhumid*. A további alföldeken megtalálható klímatispusokhoz a „normál” bioklíma változat rendelhető hozzá. Az alföldek a vízellátottsági kategóriától függően mérsékelt nedves vagy nedves kategóriába tartoznak, de előfordulnak száraz területek. Az alföldi régiókban a két domináns klímatispus a *mérsékelt kontinentális sztyepp szupramérsékelt mérsékelt nedves* és a *mérsékelt kontinentális normál szupramérsékelt mérsékelt nedves* típus.

A dombvidék éghajlata tíz klímátípusba sorolható. Hat a mérsékelt kontinentális, négy pedig a mérsékelt óceáni bioklíma kategóriába tartozik. Az éghajlat a dombvidéken többnyire normál bioklimatikus változat kategóriába sorolható, vízellátottság szempontjából pedig mérsékelttel nedves vagy nedves. A *mérsékelt óceáni normál hemiboreális nedves* klímátípus csak kis számú rácspontban fordul elő, és egy átmeneti zónát képez a mérsékelt kontinentális és a mérsékelt óceáni bioklímák között.

A középhegységek régiójának éghajlata a legheterogénebb, tizennégy klímátípussal, az alacsonyhegységek régiója pedig a második legheterogénebb éghajlati képpel jellemezhető, tizenhárom éghajlat-típussal. A mérsékelt kontinentális és a mérsékelt óceáni bioklíma itt is megtalálható. A boreális makrobioklíma jellemző a középhegységekben és magashegyi régiókban, például a Déli-Kárpátokban vagy az Erdélyi-középhegységben. A hegyvidéki régiók többnyire a normál bioklíma változatba sorolhatók. Megtalálhatóak azonban a *mérsékelt kontinentális sztyepp szupramérsékelt mérsékelttel nedves* és a *mérsékelt óceáni sztyepp szupramérsékelt mérsékelttel nedves* klímátípusok is, amelyek átmeneti zónák a dombvidék és az alacsonyszintű hegyek között, például Szlovákiában a Kis-Kárpátokban. A *mérsékelt kontinentális normál hemiboreális nedves* átmeneti klímátípus csak egy rácspontban található az Északkeleti-Kárpátok és a Keleti-Kárpátok között.

A magashegységek éghajlata a legkevésbé heterogén, három klímátípus tartozik ide. Ezt a régiót a normál bioklíma variánsa jellemzi és boreális makrobioklíma jellemző ezeken a legmagasabban fekvő területeken, például a Déli-Kárpátokban vagy az Erdélyi-középhegységben.



15. ábra Klímátípusok területi eloszlása a WBCS (Worldwide Bioclimatic Classification System; RIVAS-MARTÍNEZ ET AL., 2011) a Kárpátok térségében az 1971–2000 időszakra vonatkozólag a CarpatClima alapján

Az eredmények összehasonlíthatók az alapján, hogy az egyes éghajlatosztályozások képesek-e reprodukálni a Kárpátok térségének éghajlati heterogenitását a különböző magassági régiókban (8. táblázat). A Feddema- és WBCS-módszerekkel kapott eredményeket a Köppen- módszer eredményeivel vettem össze, mivel ez utóbbi széles körben, sok esetben referenciaként használt klímaosztályozás (LOHMANN ET AL., 1993; CANNON, 2012; CHEN ÉS CHEN, 2013; BECK ET AL., 2018). A 8. táblázat szerint a vizsgált régió Köppen módszerével kapott éghajlati térképe valamivel heterogénebb az alacsonyszintű hegységekben és a középhegységekben, mint az alföldeken és a dombvidékeken. Feddema éghajlati térképe heterogénebb a dombvidéken és az alacsony hegyvidéki régiókban, mint az alföldeken. A WBCS éghajlati térképe az alföldi és a középső hegyvidéki régiókban a legheterogénebb. Mindegyik módszer a legkevésbé heterogén eredményeket a tíz magashegységben található rácspont esetén adja.

8. táblázat Klímátípusok és klímapárok száma a Kárpátok térségében a KÖPPEN (1936), a WBCS (RIVAS-MARTÍNEZ ET AL., 2011) és a FEDDEMA (2005) módszerek alapján alföldekre, dombokra, alacsony-, közép- és magashegységekre az 1971–2000 időszakra vonatkozóan (tengerszint feletti magasság – tszfm.)

	Köppen (1936)	WBCS (Rivas-Martínez et al., 2011)	Feddema (2005)
Teljes területen előforduló klímátípusok száma	6	28	23
Alföld (tszfm. < 200 m)	3	12	11
Domság (200 m < tszfm. < 500 m)	3	10	19
Alacsonyszintű hegység (500 m < tszfm. < 1000 m)	4	13	17
Középhegység (1000m < tszfm. < 2000 m)	4	14	7
Magas-hegység (2000 m < tszfm.)	1	3	2

A 16. ábrán azon WBCS klímátípusok és a Feddema klímapárok területi eloszlása látható, amelyek egy adott Köppen klímátípus esetén legalább húsz rácspontban jelentek meg. A grafikonok színei megegyeznek a 13. és 15. ábra színeivel. A *Cfb* és *Dfb* klímátípusok a vizsgált terület több mint 90%-át fedik le. A *Cfb* a leggyakoribb Köppen klímátípus a Kárpátok térségében. Mind a *Cfb*, mind a *Dfb* klímátípus megtalálható az alföldeken, dombokon, alacsony és középhegységben is, ugyanakkor a *Cfb* területeket tizennégy WBCS és tizenkilenc Feddema klímátípus képviseli. Hasonlóképpen, a *Dfb* területeket tizenhárom WBCS és húsz Feddema klímátípus írja le.

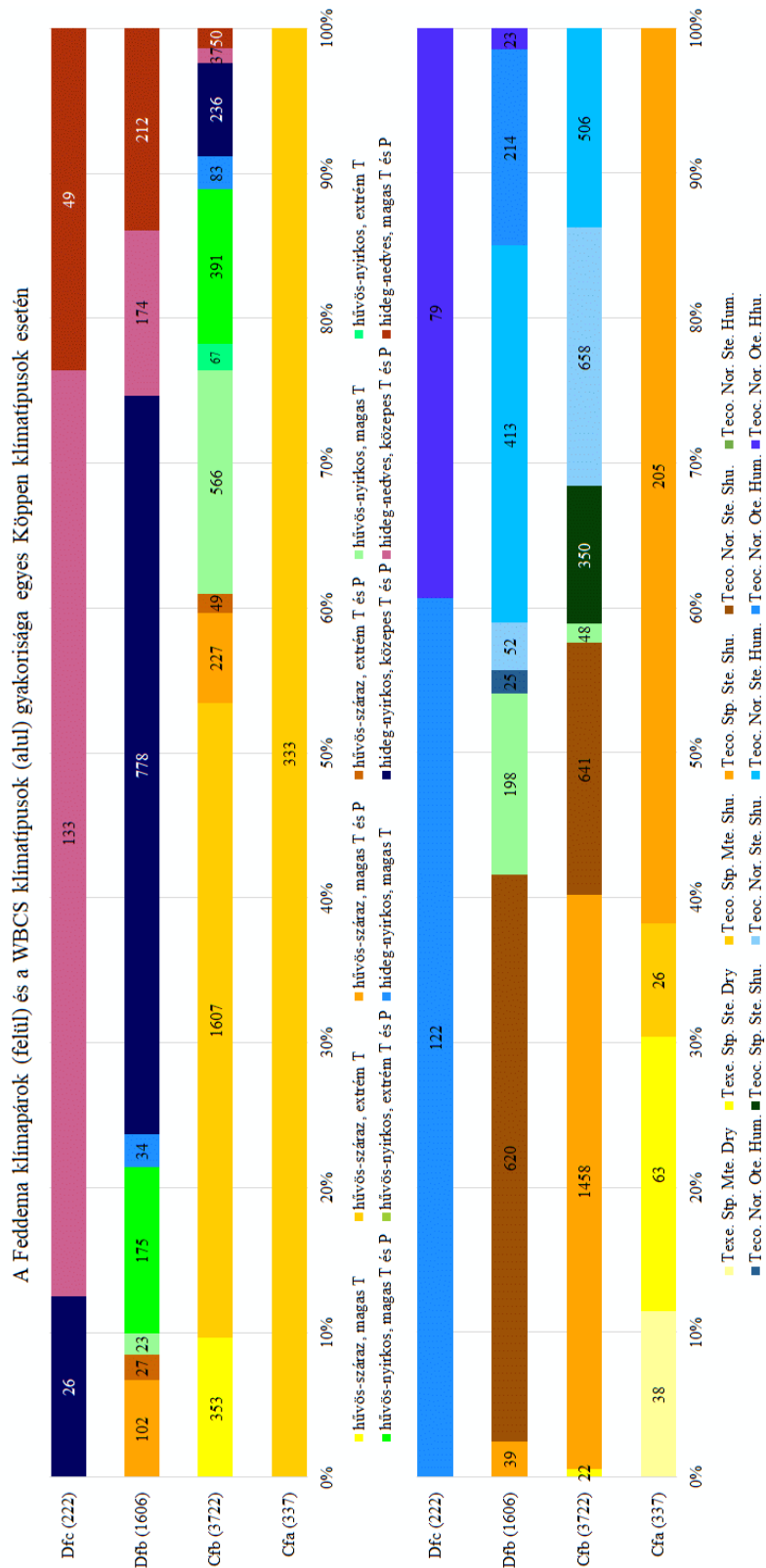
A 8. táblázat alapján a Feddema-módszer és a WBCS körülbelül négyszer több klímapárt/klímátípust eredményez a Kárpátok térségében, mint a Köppen-módszer alapján

kapott klímátípusok száma. Feddema módszerét és a WBCS-t a hő- és vízellátottság reprezentációja szempontjából is összehasonlítottam. A „száraz” vagy „mérsékelten nedves” Feddema vízellátottsági kategóriába eső területeket, ahol a „T vagy P magas” szezonális jellemző, a WBCS sztyepp bioklimatikus változattal jellemzi. Az összesen 5895 rácspontból Feddema módszere szerint körülbelül 2600, a WBCS szerint pedig körülbelül 1850 jellemezhető az adott módszer szerint a térségben előforduló legszárazabb klímátípussal. Az összehasonlító ábrán látszik, hogy Feddema módszere szerint a térség éghajlata nedvesebb, mint a WBCS szerint. A hőellátottságot tekintve látható, ahol a Köppen-módszer a *Dfc* és *Dfb* klímátípusokat eredményezi ott a hideg (Feddema) és mérsékelt hegyi (WBCS) kategória jelenik meg a másik két módszer esetén. Ez leginkább a Kárpátokban figyelhető meg, ahol körülbelül 1400 rácspont számít Feddema-féle „hidegnek”, és kevesebb, mint 500 WBCS féle mérsékelt hegyinek, tehát Feddema módszere hidegebb éghajlati képet eredményez, mint a WBCS.

Összegezve, a 13., 14., 15. és 16. ábrákon látható, hogy a Feddema-féle éghajlat-osztályozás és a WBCS heterogénebb éghajlati képet eredményez, mint Köppen módszere. A Köppen *Cfb* klímátípus a vizsgált terület 63%-án figyelhető meg, míg a leggyakoribb Feddema klímapárok és WBCS klímátípusok a terület kevesebb, mint 40%-án. Köppen módszere nem tudja különválasztani az alföldet és a dombságot, így például a Dunántúli-hegység éghajlati képét homogénnek mutatja (14. ábra).

FEDDEMA (2005) módszere és az összehasonlító elemzés során használt KÖPPEN (1936) és WBCS (RIVAS-MARTÍNEZ ET AL., 2011) éghajlat-osztályozási módszerek meglehetősen eltérő számú Feddema klímapárt és Köppen és WBCS klímátípust eredményeztek. Megfigyelhető, hogy minél nagyobb az osztályozáshoz szükséges kritériumok száma, annál változatosabb a végeredményül kapott klímaterkép. A nagy komplexitás azonban nem feltétlenül előny, mert bonyolítja a módszertant és növeli a számítási igényt, ami ellentétes a jó osztályozást jellemző ESSENWANGER-féle (2001) kritériumokkal. A széleskörben használt Köppen-módszerrel kapott klímátípusok száma az eredményeim alapján nem elegendő a Kárpátok térségére jellemző nagymértékű éghajlati heterogenitás bemutatására. Ezért eredményeim alapján a Kárpátok térségének éghajlati vizsgálatára a Feddema-módszert, vagy a WBCS-t javaslom mezoskálájú tanulmányokhoz. ESSENWANGER (2001) kritériumait követve eredményeim alapján Feddema módszere a legalkalmasabb a Kárpátok térségében jellemző éghajlat elemzésére, mivel kevesebb

bemeneti adatot igényel, és egyszerűbb módszer a Köppenél jobbnak bizonyult WBCS-nél. A Feddema-féle közérthetőbb terminológia és az egyenlő elosztású intervallumok is megkönnyítik a Feddema-módszer eredményeinek értelmezését a többi módszerhez képest (RAHIMI ET AL., 2019). Fontos megemlíteni továbbá, hogy a Feddema-módszer finomhangolható, így az éghajlat nemcsak mezo- β skálán (20–200 km), hanem még kisebb léptékben is alkalmazható (ÁCS, 2017). Ez nem érvényes a Köppen-módszerre vagy a WBCS-re, amelyek a vegetációs mintázat alapján határozzák meg a küszöbértékeket, így a növényzethez köthető felbontásnál kisebb léptékre nem finomhangolhatók. A 8. táblázat alapján bizonyos magassági intervallumok között a sémák eltérően működnek. Feddema például heterogénebb éghajlati képet adott a dombvidéken és az alacsony hegyvidéki régiókban, mint az alföldeken, míg a WBCS az utóbbi esetén az egyik legrészletesebb. Az eredmények arra utalnak, hogy a szükséges adatok, a módszertani szerkezet és a finomhangolhatóság lehetősége, fontos szerepet játszhat a Kárpátok térségének éghajlati szerkezetére irányuló tanulmányok során.



16. ábra A FEDDEMA (2005) klímák és a WBCS (RIVAS-MARTÍNEZ ET AL., 2011) klímák gyakorisága egyes KÖPPEN (1936) klímák esetén a Kárpátok térségében az 1971–2000 időszakra vonatkozóan a CarpatClim adatbázis alapján. A KÖPPEN klímák után zárójelben az egyes klímák által lefedett rácspontok száma szerepel.

5.2. Éghajlatváltozás a Kárpátok térségében a 2019–2098 időszakra Feddema alapján

A Feddema-féle hő- és vízellátottság kategóriapárok meghatároznak egy-egy klímátípust, míg a szezonális ingadozás nagysága és a szezonálisan változó elem együttesen meghatározza a szezonális típusát. A klímátípusokat és azok szezonális-típusait ebben a részben a referencia-időszakra (1971–2000) és a 21. századra vonatkozólag különböző harminc éves időszakokra mutatom be. A 21. századra vonatkozó vizsgálatok esetén az RCP4.5 és az RCP8.5 forgatókönyveket követő EUR-11 és EUR-44 felbontású klímaszimulációkat. A klímátípusok és szezonális-típusok Kárpátok térségére vonatkozó területi kiterjedésének százalékos aránya mind a különböző éghajlati forgatókönyvek, mind az alkalmazott klímaszimulációk eltérő felbontásának esetében eltérő mértékű és esetenként eltérő irányú változást mutat a kutatásom során felhasznált 19 GCM-RCM klímamodell-párral (2. táblázat) kapott eredményeim szerint. Az eltérő modelleredmények okozta bizonytalanság bemutatása végett az ensemble vizsgálatból kapott statisztikák is ismertetésre kerülnek.

Disszertációm egyik célja a Kárpátok térségének éghajlatának a 21. század végére várható változásának bemutatása az éves és szezonális jellemzők változásai alapján. A **5.2.1** és **5.2.2 fejezetek**ben bemutatom a 19 felhasznált szimulációval kapott eredményeket. A modellegyüttessel kapott eredmények ábráin feltüntettem a modellt futtató intézményt is, először az RCM esetén és ezt követi a GCM. Az eredmények elemzése során a szövegben csak az RCM és GCM-ek neveit tüntettem fel, ebben a sorrendben. A **5.2.3** és **5.2.4 fejezetek**ben pedig ismertetem a Feddema klíma- és szezonális-típusokban és a Feddema-karakterisztikákban várható változásokat a 21. század végére vonatkozólag. A **5.2.5 fejezet**ben bemutatom a referencia időszakban és a 21. század végén várható klíma- és szezonális-típusok területi eloszlását. Az **5.2.3, 5.2.4 és 5.2.5 fejezetek**ben szereplő eredmények bemutatására az EC-EARTH globális modellel meghajtott RCA4 regionális modellel kapott szimulációkat használtam fel. Ezen modellpár a szakirodalom szerint nem becsüli kifejezetten alul vagy túl a jelenlegi hőmérsékletet vagy csapadékot a régióban (STRANDBERG ET AL., 2014). Továbbá átlagos PET-értékeket eredményez mind a két különböző forgatókönyv, mind az alkalmazott modellfelbontások esetén a többi kutatásom során alkalmazott szimulációkkal összevetve. Az említett, RCA4-EC-EARTH-el kapott

eredményeknél az EUR-11 felbontású szimulációkat elemeztem, mert a felbontásbeli különbség hatására az EUR-44 szimulációk felhasználásakor, EUR-11 esetén egyes kis területen előforduló klíma- és szezonáltság-típusok nem jelennek meg. A Feddema-féle éghajlati indexek, valamint a klíma- és szezonáltság-típusok változásának és a referencia időszakban és a 21. század végén várható klíma- és szezonáltság-típusok területi eloszlásának elemzését nemcsak a teljes területre, hanem a következő magassági régiókra is elvégeztem: alföldekre (tszf. magasság < 200 m), domboságokra (200 és 500 m közötti tszf. magasság), alacsony szintű hegységekre (500 és 1000 m közötti tszf. magasság), és a közép- és magashegységekre (tszf. magasság > 1000 m) (MEYBECK ET AL., 2001, **5.2.5 fejezet**). A hő- és vízellátottság területi eloszlásában várható változások bemutatását kiegészítem a Holdridge-féle biom-modell életzónái alapján megállapítható növényföldrajzi vonatkozásokkal SZELEPCSÉNYI ET AL. (2018) eredményeinek segítségével (**5.2.5**).

5.2.1. EURO-CORDEX modellegyüttessel becsült klímátípusok eloszlása és azok anomáliái

A 19 modellpár alapján az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek esetén az EUR-11 és EUR-44 felbontás alkalmazásával kapott klímátípusok esetén meghatároztam a területi eloszlás teljes területhez képest vett várható változásainak mediánját, alsó és felső szélsőértékét, a szélső értékek közötti tartományt (9. táblázat és 10. táblázat). Meghatároztam továbbá az egyes szimulációk esetén várható klímátípusok területi lefedettségének százalékos eloszlását (17., 18., 19. és 20. ábra). A legnagyobb együttes medián érték a „hűvös-nyirkos” klímátípusok területi kiterjedésének növekedése esetén figyelhető meg 14% és 12,9%-kal és a „hideg-nyirkos” típusú terület csökkenése esetén 13,8% és 15,1%-kal az RCP4.5 szerint az EUR-11 és az EUR-44 térbeli felbontású adatok alapján. Az RCP8.5 forgatókönyv esetén a legnagyobb medián növekedés az EUR-11 felbontás esetén a „hűvös-nyirkos” területen (10,2%) míg a legnagyobb medián csökkenés a „hideg-nyirkos” területen (15,5%) várható (9. táblázat). Az EUR-44 felbontás esetén a legnagyobb medián növekedés szintén a „hűvös-nyirkos” területen (8,9%) míg a legnagyobb medián csökkenés a „hideg-nyirkos” területen 17,6% várható (10. táblázat). Az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek szerint a szemiárid vízellátottsági és az RCP8.5 forgatókönyv szerint a „meleg” hőállottsági kategóriába sorolható területek megjelenése várható a

Kárpátok térségében, melyek a vizsgált 20. századi időszak során nem fordultak elő. Ezek esetén a területnövekedés megegyezik a területi lefedettséggel. A „meleg-nyirkos” és „meleg-száraz” klímátípusokra esetén is 0,3%-os együttes medián területi lefedettség várható az RCP8.5-öt követő EUR-11 felbontású szimulációk alapján. A „meleg-száraz” klímátípus esetén a különböző RCP8.5-öt követő modellpárok alapján várható lehetséges területi lefedettségre kapott értékek tartománya 14%. Az RCP8.5 forgatókönyvet követő szimulációkból EUR-44 felbontás esetén kapott becslések szerint a RCA-4-CanESM2 modellpár eredményezi a „meleg-szemiarid” és a RACMO-HadGEM2-ES a „meleg-száraz” klímátípusok legnagyobb várható területi lefedettségét (18. ábra). A projekciók bizonytalanságának tartománya a lefedettség várható változásának mértékében az említett klímátípusokra 17,8%, illetve 17% (10. táblázat). A „hűvös-szemiarid” klímátípus esetén az RCP4.5-öt követő különböző modellpárok alapján becsült várható területi lefedettség százalékos aránya EUR-11 felbontásnál 1,4%-os tartományt fed le, míg az RCP8.5 esetén már bizonytalanabb a várható területi lefedettség, 12,6%. Az EUR-44 esetén ezek rendre 15% és 15,3%.

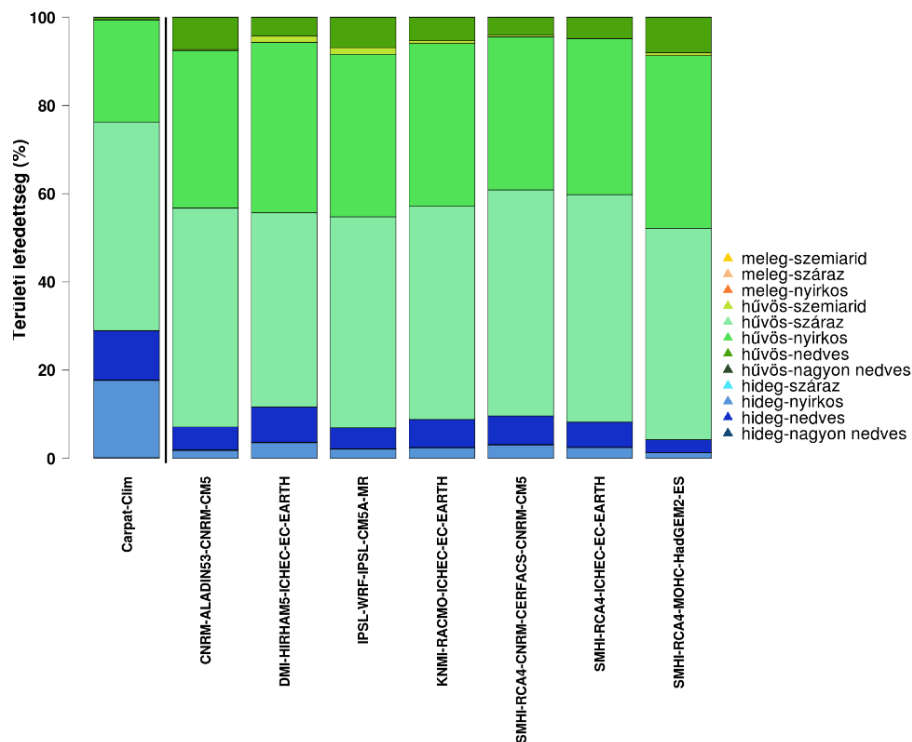
9. táblázat Klímátípusok területi lefedettségének százalékos változásai a teljes területhez képest a 2069–2098 időszakra az 1971–2000 referencia időszakhoz képest (CarpatClim adatok) az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriók szerint, az EUR-11 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján. A táblázatban látható az adott szimulációkkal kapott értékek mediánja, alsó és felső szélsőértéke és a szélsőértékek közötti tartomány.

Klímátípusok	RCP 4.5				RCP 8.5			
	medián	alsó érték	felső érték	tartomány	medián	alsó érték	felső érték	tartomány
meleg-szemiariid	-	-	-	-	4,3	0,7	10,7	10,0
meleg-száraz	-	-	-	-	0,3	0,1	14,2	14,0
meleg-nyirkos	-	-	-	-	0,3	0,3	0,3	0,0
hűvös-szemiariid	0,6	0,1	1,5	1,4	3,1	0,3	12,9	12,6
hűvös-száraz	0,3	-4,0	3,5	7,5	1,76	-3,78	12,38	16,2
hűvös-nyirkos	14,0	11,8	16,3	4,5	10,2	-3,6	12,9	16,4
hűvös-nedves	4,6	3,3	7,3	4,0	5,6	3,4	10,3	7,0
hűvös-nagyon nedves	-	-	-	-	2,8	0,1	12,9	12,8
hideg-száraz	-	-	-	-	-	-	-	-
hideg-nyirkos	-13,8	-14,9	-12,6	2,2	-15,8	-16,1	-14,5	1,6
hideg-nedves	-6,1	-8,8	-3,8	5,1	-9,6	-11,4	-8,8	2,6
hideg-nagyon nedves	-0,1	-0,2	0,0	0,2	-0,2	-0,2	0,2	0,4

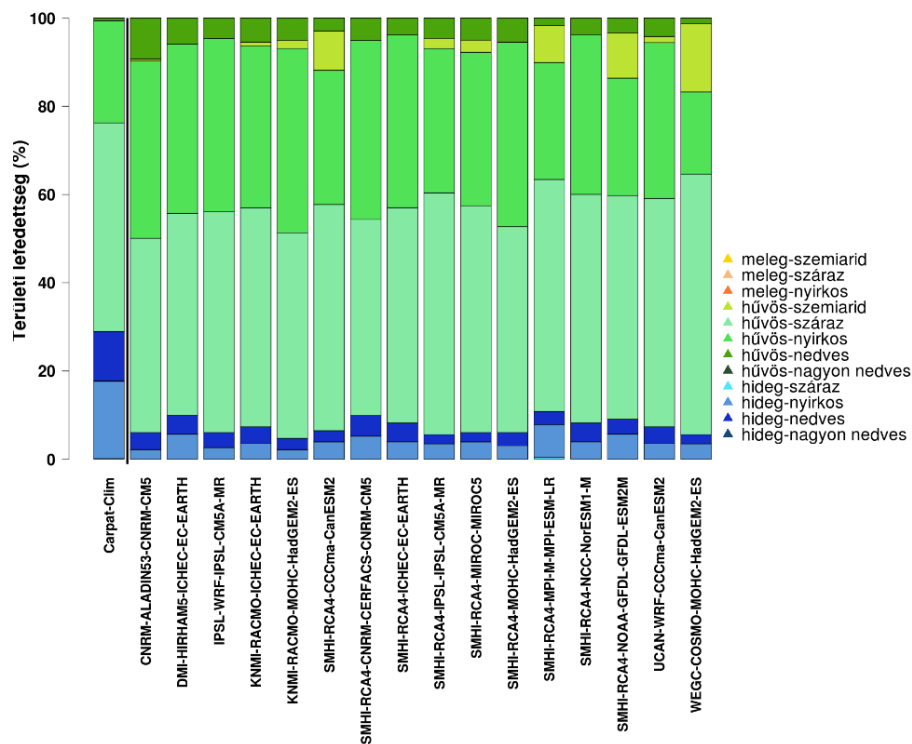
10. táblázat Klímátípusok területi lefedettségének százalékos változásai a teljes területhez képest a 2069–2098 időszakra az 1971–2000 referencia időszakhoz képest (CarpatClim adatok) az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriók szerint, az EUR-44 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján. A táblázatban látható az adott szimulációkkal kapott értékek mediánja, alsó és felső szélsőértéke és a szélsőértékek közötti tartomány.

Klímátípusok	RCP4.5				RCP8.5			
	medián	alsó érték	felső érték	tartomány	medián	alsó érték	felső érték	tartomány
meleg-szemiariid	-	-	-	-	4,6	0,5	18,2	17,8
meleg-száraz	-	-	-	-	3,2	0,5	17,5	17,0
meleg-nyirkos	-	-	-	-	0,4	0,4	0,9	0,4
hűvös-szemiariid	2,5	0,4	15,5	15,0	3,6	0,9	16,2	15,3
hűvös-száraz	3,8	-2,6	12,4	15,0	2,9	-9,0	9,4	18,4
hűvös-nyirkos	12,9	-4,9	18,3	23,2	8,9	-5,2	20,9	26,0
hűvös-nedves	4,2	0,8	8,9	8,0	4,2	1,7	8,9	7,2
hűvös-nagyon nedves	-	-	-	-	-	-	-	-
hideg-száraz	0,4	0,4	0,4	0,0	0,4	0,4	0,4	0,0
hideg-nyirkos	-15,1	-16,7	-11,4	5,2	-17,6	-18,4	-16,2	2,2
hideg-nedves	-7,2	-8,5	-5,9	2,6	-9,1	-10,2	-8,0	2,1
hideg-nagyon nedves	-	-	-	-	-	-	-	-

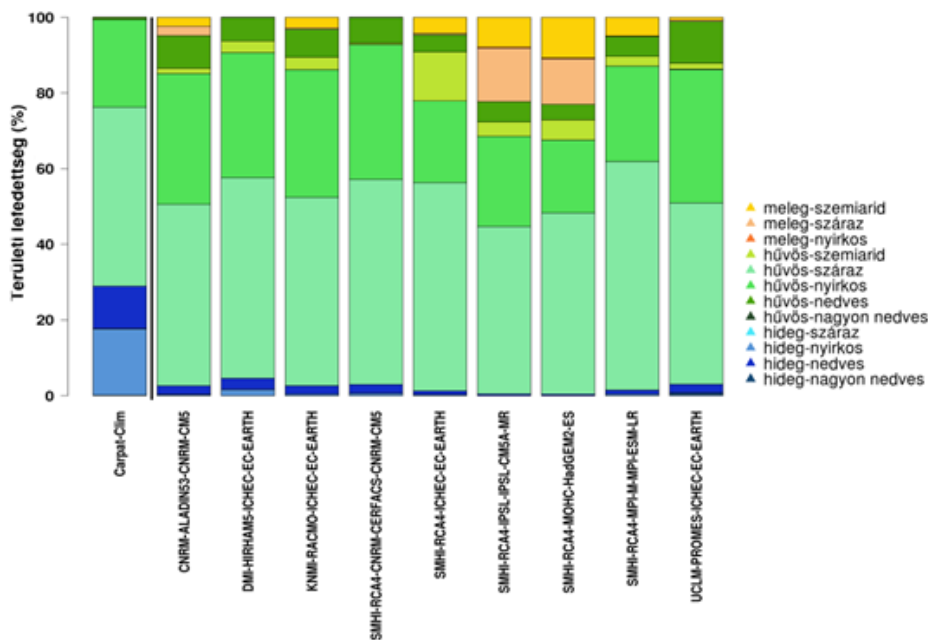
A 17. ábrán látható, hogy az EUR-11 felbontás esetén az RCP4.5 alkalmazásával a legnagyobb mértékű növekedés a hőellátottságban az RCA4-HadGEM2-ES modellpár, míg a legkisebb mértékű növekedést a hőellátottságban a HIRHAM5-EC-EARTH modellpár becsüli. Az EUR-44 felbonbontású modellpárokból a kevésbé pesszimista forgatókönyv esetén a legnagyobb mértékű hőellátottság növekedést a RACMO-HadGEM2-ES, és a legkisebb mértékűt az RCA4-MPI-ESM-LR eredményezi (18. ábra). Utóbbi esetben a legnagyobb csökkenést a vízellátottságban a térségre a COSMO-HadGEM2-ES szimuláció becsüli. Az RCP8.5 forgatókönyv szerinti becslések esetén látszik, hogy az EUR-11 felbontású szimulációkból 9-ből 7 esetén már megjelenik a „meleg” hőellátottságú kategória is (19. ábra). Az RCA4-CM5A-MR modellpár projektálja a legnagyobb növekedést a hőellátottságban, míg a HIRHAM5-EC-EARTH a legkisebb mértékűt. Az RCA4-HadGEM2-ES valószínűsíti a legnagyobb csökkenést a vízellátottságban. Az EUR-44 szimulációk esetén a RACMO-HadGEM2-ES adja a legnagyobb hőellátottság növekedést a térségben, míg az RCA4-CanESM2 a legnagyobb vízellátottság csökkenést (20. ábra).



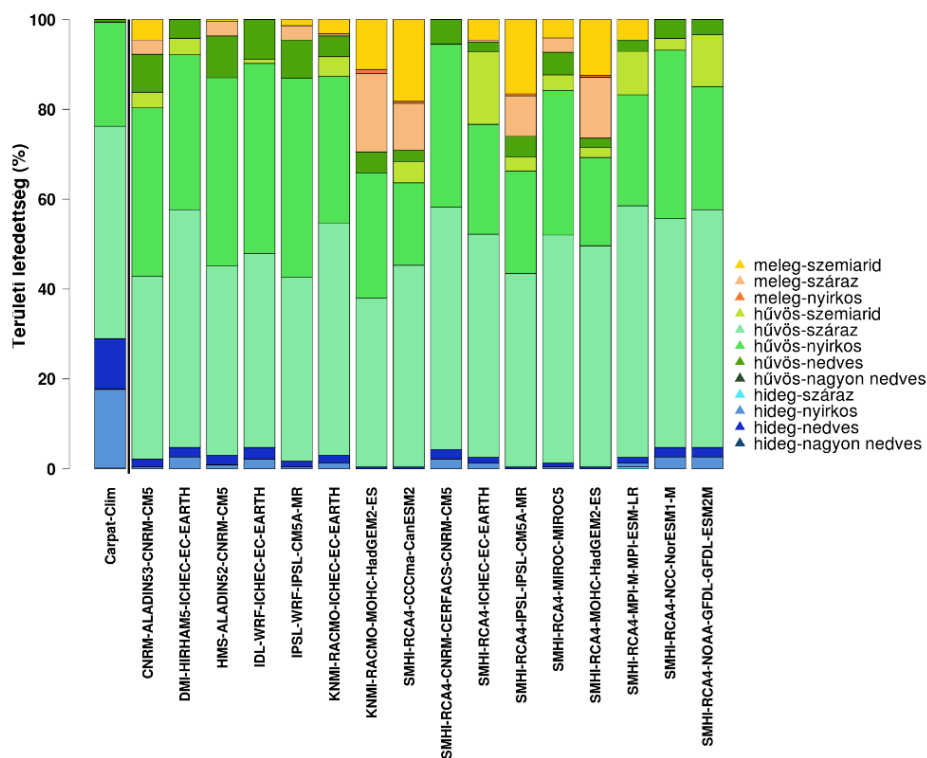
17. ábra Klímátípusok területi lefedettségének százalékos aránya a teljes vizsgált területhez képest. Az első oszlop az 1971–2000 időszakra vonatkozik a CarpatClim adatok alapján, a további oszlopok a 2069–2098 időszakra az RCP4.5 scenárió esetén, az EUR-11 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján.



18. ábra Klímatispusok területi lefedettségének százalékos aránya a teljes vizsgált területhez képest. Az első oszlop az 1971–2000 időszakra vonatkozik a CarpatClim adatok alapján, a további oszlopok a 2069–2098 időszakra az RCP4.5 scenárió esetén, az EUR-44 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján.



19. ábra Klímatispusok területi lefedettségének százalékos aránya a teljes vizsgált területhez képest. Az első oszlop az 1971–2000 időszakra vonatkozik a CarpatClim adatok alapján, a további oszlopok a 2069–2098 időszakra az RCP8.5 scenárió esetén, az EUR-11 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján.



20. ábra Klímatispusok területi lefedettségének százalékos aránya a teljes vizsgált területhez képest. Az első oszlop az 1971–2000 időszakra vonatkozik a CarpatClim adatok alapján, a további oszlopok a 2069–2098 időszakra az RCP8.5 scenárió esetén, az EUR-44 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján.

5.2.2. EURO-CORDEX modellegyüttessel becsült szezonális-típusok eloszlása és azok anomáliái

A 19 modellpár alapján az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek esetén meghatároztam az EUR-11 és EUR-44 felbontás alkalmazásával kapott szezonális-típusok esetén a területi eloszlás teljes területhez képest vett várható változásainak mediánját, alsó és felső szélsőértékét, a szélső értékek által lefedett tartományt (11. táblázat és 12. táblázat). Meghatároztam továbbá az egyes szimulációk esetén várható szezonális-típusok területi lefedettségének százalékos eloszlását (21., 22., 23. és 24. ábra). A legnagyobb medián változás az RCP4.5 forgatókönyv esetén a „T magas” szezonális-típusával jellemezhető területek növekedése 7,3%-kal az EUR-11 felbontás esetén (11. táblázat) és a „T és P magas” szezonális-típusának 6,9%-os csökkenése az EUR-44 felbontás esetén (12. táblázat). Az RCP8.5 forgatókönyvet követő szimulációk legnagyobb medián változása a „T és P magas” szezonális-típusú területek csökkenésében várható 10,4%-kal az EUR-11 és 22,4%-kal az EUR-44 felbontás esetén (11. táblázat, 12. táblázat). A szezonális-típusok területi lefedettségének

különböző modellekre százalékban megadott változásainak szélsőértékei jelentős bizonytalanságot mutatnak a változás irányára vonatkozóan. A „T és P közepes” szezonalitása esetén mind a szélsőértékek mind a medián változás csökkenést mutat az RCP8.5 szimulációk szerint EUR-11 felbontásnál (11. táblázat). Ugyanez igaz a „T és P magas” szezonalitásra az EUR-44 felbontásnál (12. táblázat). Továbbá a medián és a legkisebb és legnagyobb változást adó modellek esetén is növekedés várható a „T és P extrém” szezonalitásában az RCP8.4 EUR-44 szimulációk esetén (12. táblázat).

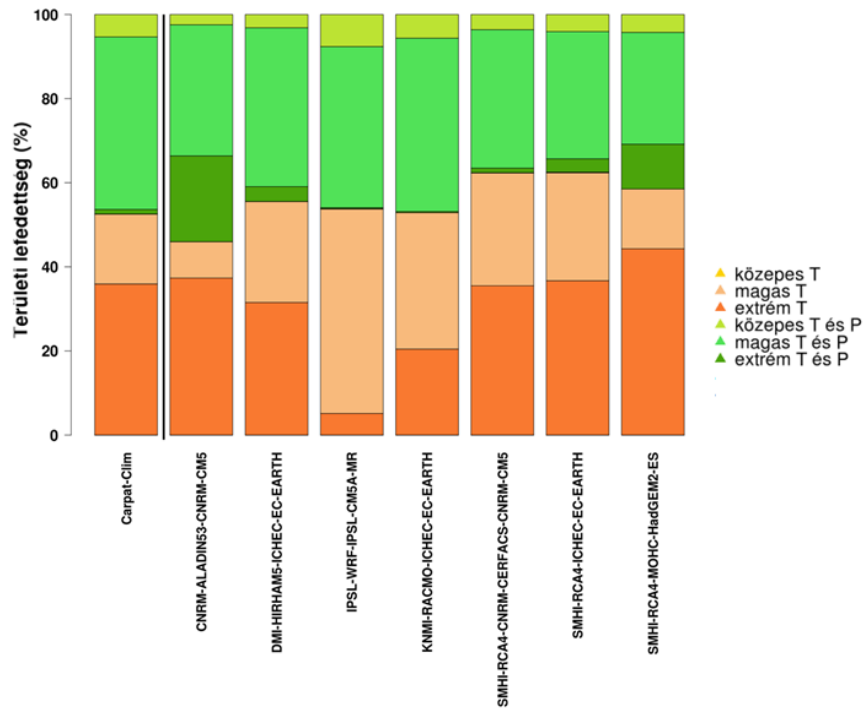
11. táblázat Szezonális-típusok területi lefedettségének százalékos változásai a teljes területhez képest a 2069–2098 időszakra az 1971–2000 referencia időszakhoz képest (CarpatClim adatok) az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriók szerint, az EUR-11 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján. A táblázatban látható az adott szimulációkkal kapott értékek mediánja, alsó és felső szélsőértéke és a szélsőértékek közötti tartomány.

Szezonális-típus	RCP4.5				RCP8.5			
	medián	alsó érték	felső érték	tartomány	medián	alsó érték	felső érték	tartomány
hőmérséklet-közepes	0,03	-0,03	0,08	0,10	$-2,6 \cdot 10^{-2}$	$-2,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$
hőmérséklet-magas	7,3	-9,8	30,2	40,0	-2,7	-9,4	20,4	29,8
hőmérséklet-extrém	-0,1	-30,5	8,7	39,2	7,7	-9,5	38,2	47,7
T&P-közepes	-2,0	-3,6	1,6	5,2	-4,3	-5,7	-2,1	3,6
T&P-magas	-5,6	-12,0	2,7	14,6	-10,4	-30,5	12,7	43,2
T&P-extrém	1,9	-1,1	19,1	20,2	0,5	-0,7	13,7	14,3

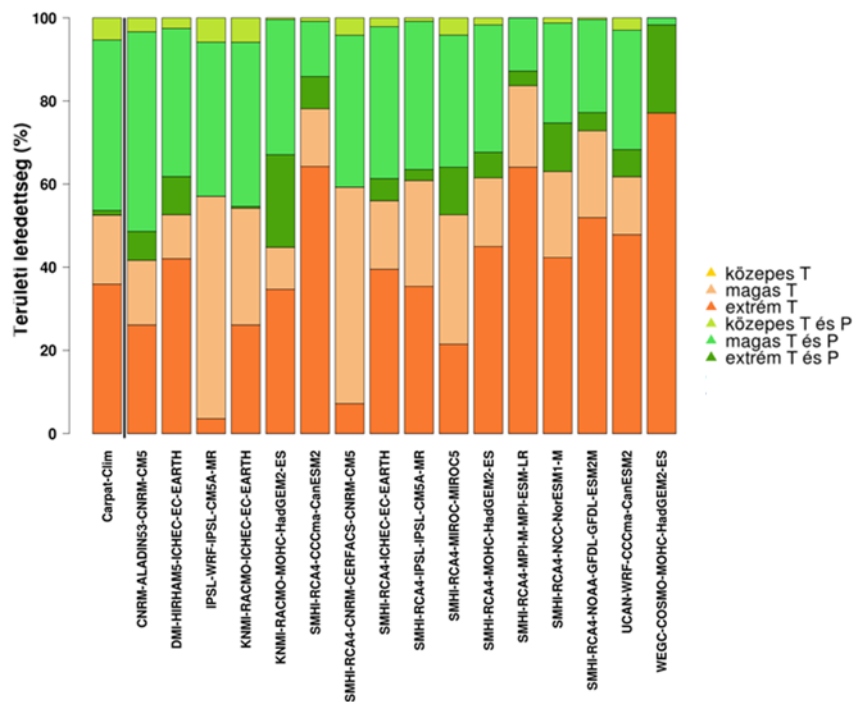
12. táblázat Szezonális-típusok területi lefedettségének százalékos változásai a teljes területhez képest a 2069–2098 időszakra az 1971–2000 referencia időszakhoz képest (CarpatClim adatok) az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriók szerint, az EUR-44 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján. A táblázatban látható az adott szimulációkkal kapott értékek mediánja, alsó és felső szélsőértéke és a szélsőértékek közötti tartomány.

Szezonális-típus	RCP4.5				RCP8.5			
	medián	alsó érték	felső érték	tartomány	medián	alsó érték	felső érték	tartomány
hőmérséklet-közepes	-	-	-	-	-	-	-	-
hőmérséklet-magas	4,7	-4,3	38,7	42,9	10,3	-6,5	34,5	40,9
hőmérséklet-extrém	-0,8	-32,6	27,9	60,5	13,3	-31,4	32,8	64,2
T&P-közepes	-1,7	-3,8	1,3	5,0	-3,4	-4,2	3,4	7,6
T&P-magas	-6,9	-30,6	4,6	35,2	-22,4	-38,3	-0,3	38,0
T&P-extrém	4,5	-0,4	8,3	8,7	2,9	2,5	8,5	5,9

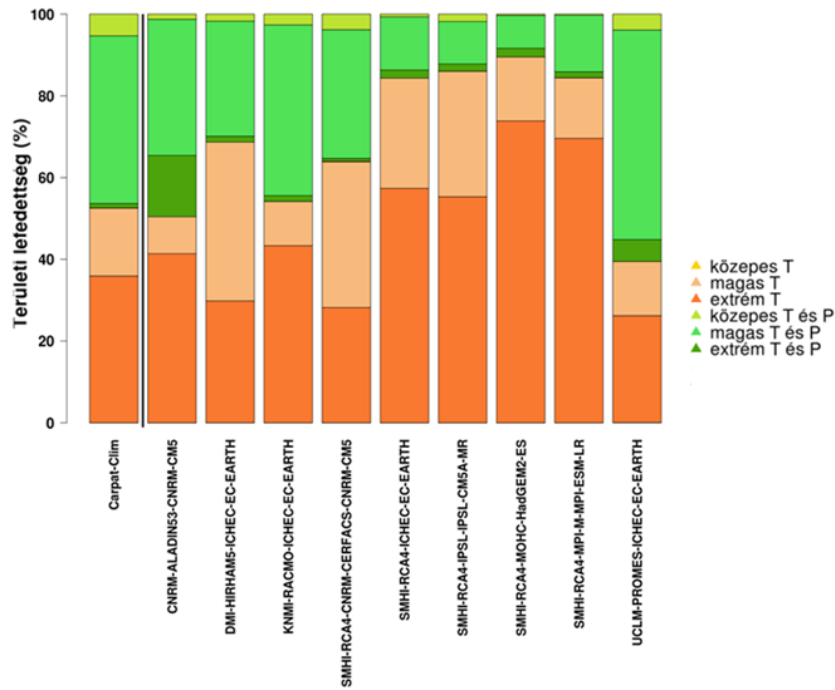
Az RCP4.5 forgatókönyv szerint „extrém” szezonális területi lefedettségének legnagyobb növekedését becsüli az ALADIN-CM5 és az RCA-4-HadGEM2-ES az EUR-11 felbontás esetén, valamint a RACMO-HadGEM2-ESm és a COSMO-HadGEM2-ES az EUR-44 esetén (21. és 22. ábra). Ugyanezen forgatókönyv szerint az „extrém T” szezonális területi lefedettségének növekedése legnagyobb mértékben az RCA4-HadGEM2-ES (EUR-11) és a COSMO-HadGEM2-es (EUR-44) esetén várható. A térségre a legnagyobb arányban magas szezonalitást becsülő modellpár a WRF-CM5A-MR mindkét felbontás esetén az RCP4.5 forgatókönyv alapján (21. és 22. ábra). Ezen modell esetén figyelhető meg egyedül növekedés a „közepes T és P” szezonális területi lefedettségében a RCP4.5-öt követő EUR-11 felbontású szimulációk esetén. Az „extrém T” szezonális legjelentősebb mértékű növekedését mutatják a RCA4-HadGEM2-ES és RCA4-MPI-ESM-LR modellpárok EUR-11 felbontásnál és az RCA4-CanESM2 szimuláció pedig EUR-44 felbontásnál az RCP8.5 forgatókönyv szerint (23. és 24. ábra). Az RCP8.5 esetén az „extrém T” szezonális mértékének csökkenését mutatják PROMES-EC-EARTH, az RCA4-CNRM-CM5 és a HIRHAM5-EC-EARHT szimulációk az EUR-11 felbontás esetén, és a 16-ból 6 modellpár, legnagyobb mértékben WRF-CM5A-MR, RCA4-CNRM-CM5, valamint RCA4-MIROC5 szimulációk az EUR-44 felbontás esetén (23. és 24. ábra). Továbbá az RCP8.5 esetén „közepes T és P” szezonális területi lefedettsége a PROMES-EC-EARTH (EUR-11) és az ALADIN52-CM5 és a WRF-CM5A-MR (EUR-44) kivételével minden szimuláció szerint várhatóan csökken a század végére. A „T és P extrém” szezonális a térség 15%-án várható az ALADIN53-CM5 esetén EUR-11 felbontásnál.



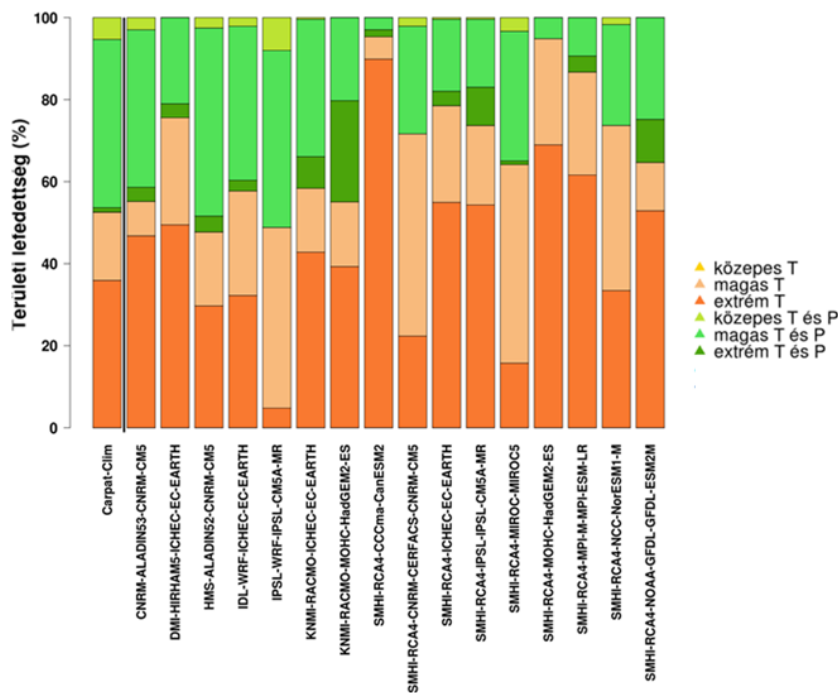
21. ábra Szezonális-típusok területi lefedettségének százalékos aránya a teljes vizsgált területhez képest. Az első oszlop az 1971–2000 időszakra vonatkozik a CarpatClim adatok alapján, a további oszlopok a 2069–2098 időszakra az RCP4.5 scenárió esetén, az EUR-11 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX modelladatok alapján az EUR-11 felbontás alkalmazásával.



22. ábra Szezonális-típusok területi lefedettségének százalékos aránya a teljes vizsgált területhez képest. Az első oszlop az 1971–2000 időszakra vonatkozik a CarpatClim adatok alapján, a további oszlopok a 2069–2098 időszakra az RCP4.5 scenárió esetén, az EUR-44 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján.



23. ábra Szezonális-típusok területi lefedettségének százalékos aránya a teljes vizsgált területhez képest. Az első oszlop az 1971–2000 időszakra vonatkozik a CarpatClim adatok alapján, a további oszlopok a 2069–2098 időszakra az RCP8.5 scenárió esetén, az EUR-11 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján.

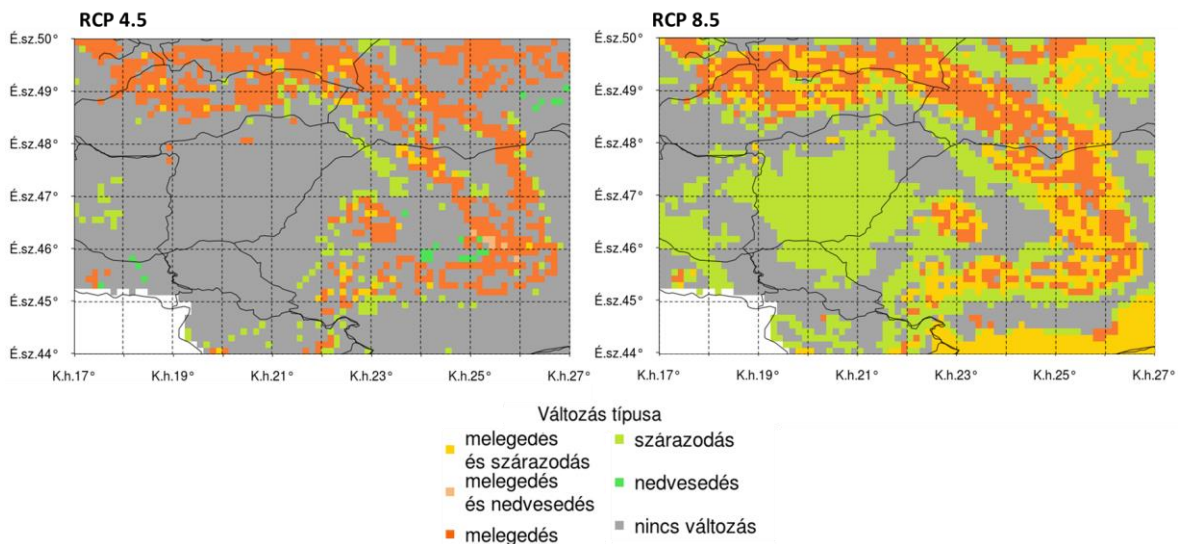


24. ábra Szezonális-típusok területi lefedettségének százalékos aránya a teljes vizsgált területhez képest. Az első oszlop az 1971–2000 időszakra vonatkozik a CarpatClim adatok alapján, a további oszlopok a 2069–2098 időszakra az RCP8.5 scenárió esetén, az EUR-44 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján.

5.2.3. RCA4-EC-EARTH modellpárral becsült klímátípusok eloszlása és azok anomáliái

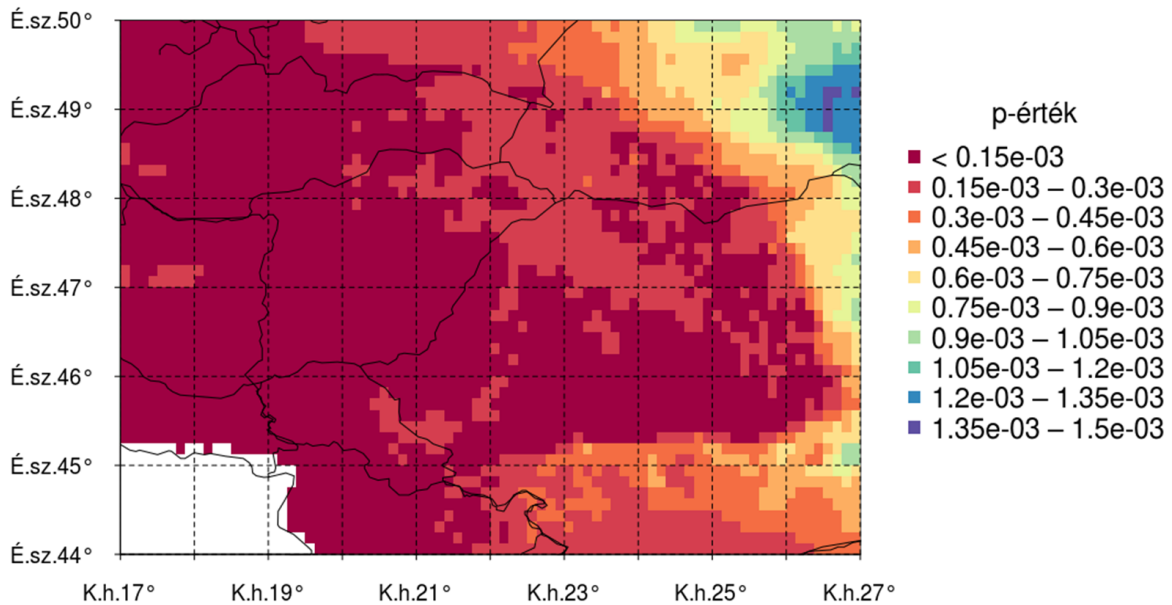
A klímátípus-változások század végére várható térbeli eloszlása a 25. ábrán látható. Mindkét RCP forgatókönyv a hő- és vízellátottság változásait vetíti előre minden, a régióba eső ország területeinek esetében. Az RCP4.5 forgatókönyv szerint a változás fő mozgatórugója a melegedés, amely leginkább a hegyvidéki területeken, így a Papuk-hegységben, a Szerbiai-érchegységben, az Erdélyi-középhegységben, a Déli-, Keleti- és Északnyugati-Kárpátok mentén, valamint Podóliai-hátság, és a Dunántúli-középhegység keleti részén várható. Egyes területeken csak a vízellátottság tekintetében várható kategória váltás. Szárazodás lesz jellemző a Dunántúli-középhegységben, a Szerbiai-érchegységben, a Géta-hátságon, Kárpátalján, az Északnyugati-Kárpátok délkeleti részén és az Északnyugati-Kárpátok lengyelországi részén. A melegedés és a szárazodás folyamata együttesen a Déli-Kárpátok keleti és a Kárpátalja keleti részén, valamint néhány rácspontra esetén a Keleti- és Északnyugati-Kárpátok mentén várható. A Podóliai-hátságtól délre és Erdély déli részén nedvesebb vízellátottsági kategória lesz jellemző, utóbbi esetén a hőellátottság növekedése is várható. Az RCP8.5 forgatókönyv esetén melegedés várható a hegyvidéki területek jelentős részén, míg szárazodás lesz a legjellemzőbb folyamat az alföldeken, dombokon és alacsonyszintű hegységekben.

Az RCP8.5 szerint szárazodás lesz a fő folyamat a Dunántúli-középhegységben, a Dinári-Alpokban, a Szerbiai-érchegységben, a Vajdaságban, az Alföldön, az Erdélyi-középhegység déli részén, a Géta-hátságon, az Erdélyi-medence keleti részén, a Kárpátalja déli részén, a Podóliai-hátságon, valamint a Kárpátok szlovákiai részének déli részén. Melegedés és szárazodás együttesen főként a Havasalföldön, a Podóliai-hátságon, az Erdélyi-középhegységben és a Kárpátok mentén fordul elő. Melegedés és nedvesedés, vagy csak nedvesebb vízellátottságú kategóriába váltás az RCP8.5 forgatókönyv esetén nem várható.

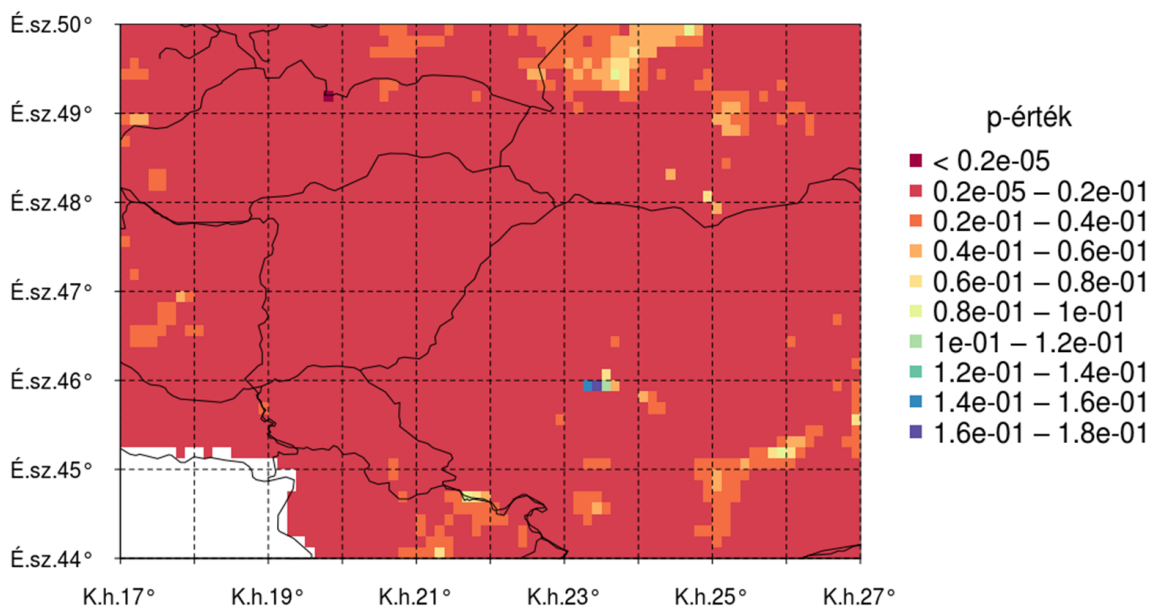


25. ábra Klímátípus-változások területi eloszlása a Kárpátok térségében az 1971–2000 és a 2069–2098 időszakok között a CarpatClim adatok (referencia időszak) és az RCP4.5 és RCP8.5 szcenáriók esetén, az EUR-11 térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján.

A Feddema-diszkrét megközelítés során azt tudtam vizsgálni, hogy milyen kategória váltások okozta változás várható a klímátípus-eloszlásban. Kategória váltást tapasztalhatunk abban az esetben is, ha az egyes Feddema-indexek esetén kismértékű változás történik. Emellett nagy eltolódás esetén is lehetséges, hogy a kiindulási kategórián belül marad az adott index értéke. A változás kategóriától független mértékének számszerűsítésére szignifikancia vizsgálatot végeztem a Feddema-osztályozás alapját képező hő- és vízellátottságot jellemző PET és I_m indexekre (26. és 27. ábra). A 26. ábrán látható, hogy 95 %-os szignifikancia szint esetén a referencia időszakhoz képest a vizsgált jövőbeni időablakok során várható PET változás mindenhol statisztikailag szignifikáns. A 26. és 27. ábrákon feltüntettem minden rácspont esetén a t-próbával kapott p-értéket. A 27. ábrán látható, hogy az I_m esetén nem mindenhol szignifikáns a változás ($\alpha=0,05$ esetén).



26. ábra Az 1971–2000 referencia időszakra vonatkozó CarpatClim és az RCP8.5 scenáriót követő EUR-11-es térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján az 1971–2000, 2019–2048, 2029–2058, 2039–2068, 2049–2078, 2059–2088 és 2069–2098 időablakokra meghatározott PET értékek változására vonatkozó szignifikancia vizsgálattal kapott p-értékek területi eloszlása a Kárpátok térségében.

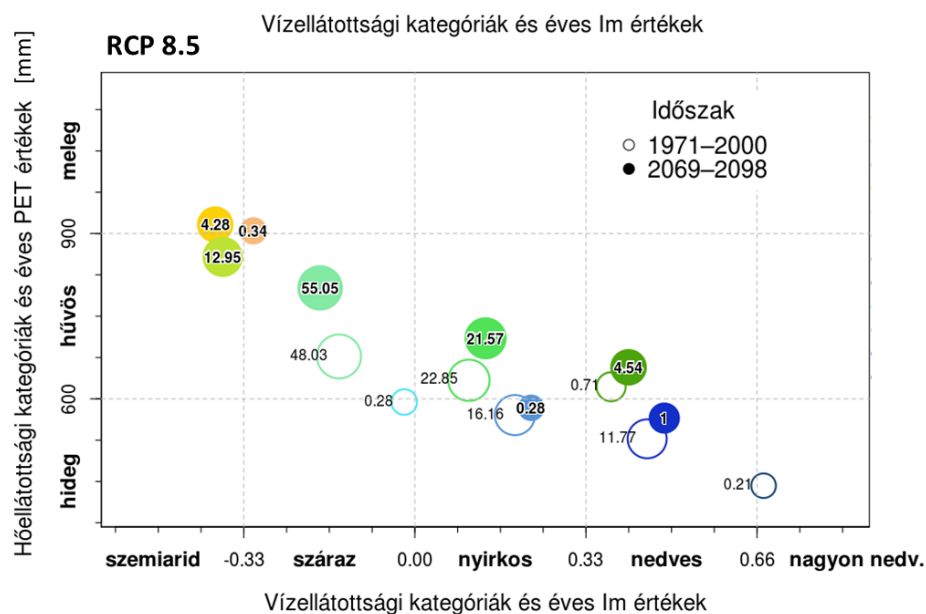
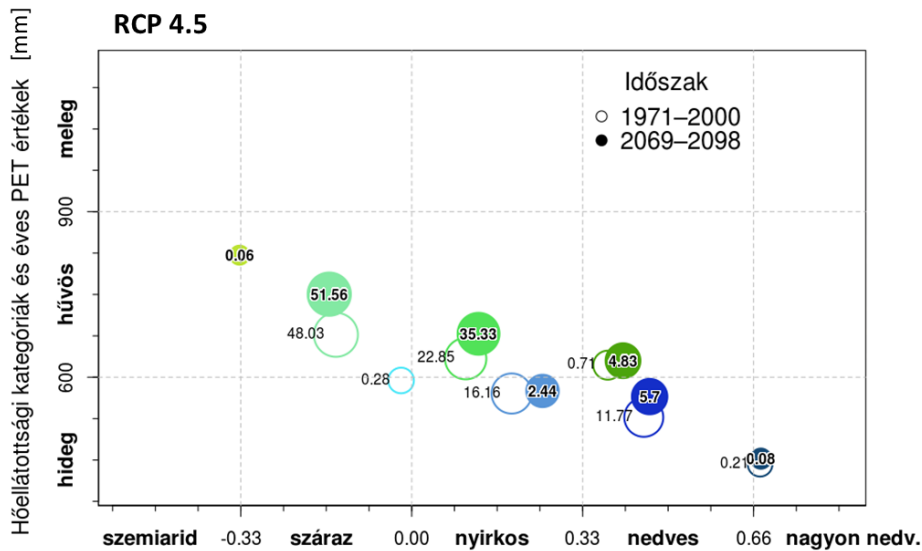


27. ábra Az 1971–2000 referencia időszakra vonatkozó CarpatClim és az RCP8.5 scenáriót követő EUR-11-es térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján az 1971–2000, 2019–2048, 2029–2058, 2039–2068, 2049–2078, 2059–2088 és 2069–2098 időablakokra meghatározott I_m értékek változására vonatkozó szignifikancia vizsgálattal kapott p-értékek területi eloszlása a Kárpátok térségében.

A várható változás statisztikai számszerűsítése mellett a Feddema-folytonos megközelítéssel az (éves és szezonális) termikus- és nedvességi-karakterisztikák eltolódásai együttesen is megjeleníthetők a kategóriákon belül. Vizsgálható továbbá, hogy mely Feddema-index értékének milyen mértékű és irányú változása várható. A 28. ábrán láthatóak

a hő- és vízellátottság karakterisztikák eltolódásai, valamint a különböző klímátípusok területi lefedettségének változásai a teljes vizsgált területre vonatkozólag (az EUR-11 felbontású RCP8.5 forgatókönyvet követő szimulációkra vonatkozó további eredmények a teljes területre vonatkozólag az F.4 fejezet F.3 és F.4-es ábráin láthatók). Fontos kiemelni, hogy még ha nincs is váltás egyik kategóriából a másikba, a magasabb vagy alacsonyabb éves PET vagy I_m értékek felé tolódás növekvő vagy csökkenő hő-, illetve vízellátottságot jelent. A klímátípusokhoz kapcsolódó átlagos éves PET és I_m értékek a század végére várhatóan minden klímátípus esetén eltolódnak mind az RCP4.5, mind az RCP8.5 forgatókönyv szerint, kivéve a „hideg-nagyon nedves” klímátípust, mely várhatóan eltűnik a Kárpátok térségéből. A legerősebb növekedés a hőellátottságban várhatóan a „hűvös-száraz” és a „hűvös-nyirkos” területeken következik be. A legnagyobb eltolódás a hő- és vízellátottságot meghatározó Feddema-indexek értékében a „hűvös-száraz” klímátípusba eső területek esetén figyelhető meg. A hőellátottságot meghatározó PET esetén az RCP8.5 forgatókönyvet követve ez átlagosan több mint 100 mm növekedést jelent, azonban kategóriaváltáshoz nem vezet. Az RCP8.5 esetén a referencia-időszakhoz képest a következő új klímátípusok megjelenése várható: „meleg-szemiarid”, „meleg-száraz” és „hideg-szemiarid”. Az újonnan megjelenő klímátípusok esetén megmutatható, hogy a PET I_m értékek a kategóriahatárokhoz közel helyezkednek el. A nyirkos vagy annál nedvesebb klímátípusok, amelyek éves átlagos I_m értéke nulla feletti a referencia-időszakban, várhatóan nedvesebbé válnak, míg a negatív I_m értékek esetén további szárazodás várható.

A klímátípusok területi lefedettségének várható változásait is becsültem mindkét forgatókönyv esetén (28. ábra). A „hideg” területek kiterjedése várhatóan 21,2%-kal csökken az RCP4.5 és 27,1%-kal az RCP8.5 esetében a század végére és ezekben a régiókban a „hűvös” klímátípus lesz jellemző. Az új „meleg” hőellátottságú területek várhatóan a régió 4,6%-át fedik le, míg a „hideg-száraz” klímátípus mindkét forgatókönyv esetén eltűnik. A „nagyon nedves” vízellátottsági kategóriába eső területek eltűnnek, és az RCP8.5 esetében a „nedves” és „nyirkos” típusok területi lefedettsége a becslések szerint nagyjából 7%-kal, illetve 17%-kal csökkennek. A „száraz” területek kiterjedése várhatóan 3%-kal nő és az RCP 8.5 forgatókönyv szerint szemiarid területek, amelyek nincsenek jelen a referencia-időszakban, a század végére a régió 17,2%-án fordulnak majd elő.



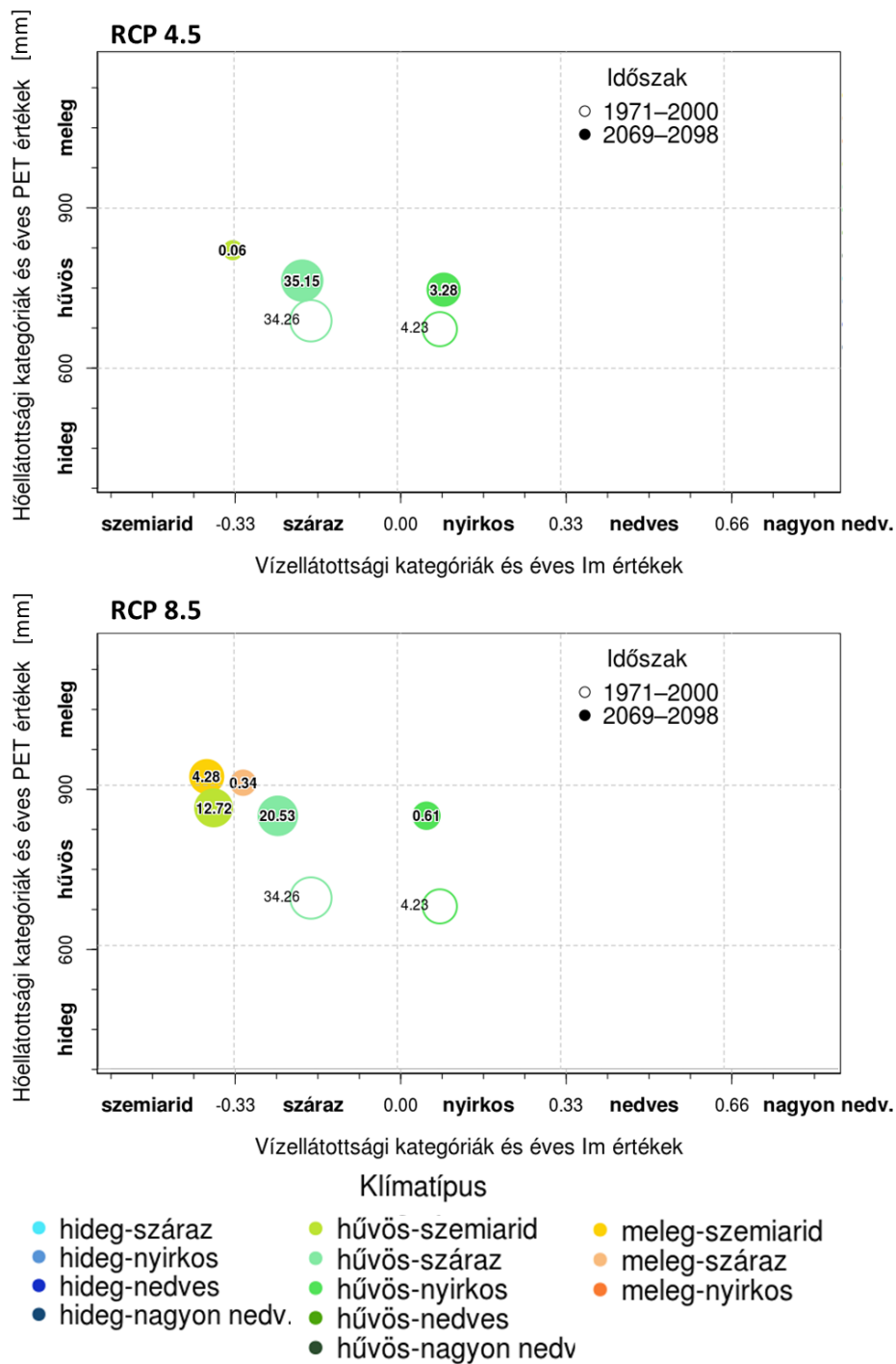
- Klímatípus**
- hideg-száraz
 - hűvös-szemiariid
 - meleg-szemiariid
 - hideg-nyirkos
 - hűvös-száraz
 - meleg-száraz
 - hideg-nedves
 - hűvös-nyirkos
 - meleg-nyirkos
 - hideg-nagyon nedv.
 - hűvös-nedves
 - hűvös-nagyon nedv.

28. ábra Eltolódás a termikus és nedvességi karakterisztikákban és klímátípus változások a teljes vizsgált területen. A körök sugara arányos a klímátípus által lefedett terület (km^2) tízes logaritmusával. A körökben lévő értékek a klímátípus által lefedett terület arányát mutatják a teljes vizsgált területhez képest, a körök középpontja pedig a klímátípus által lefedett terület átlagos éves PET és I_m értékeit mutatja. Az üres körök az 1971–2000 időszakra vonatkoznak a CarpatClim adatok alapján, a teli körök a 2069–2098 időszakra az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriók esetén az EUR-11 térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH modelladatok alapján.

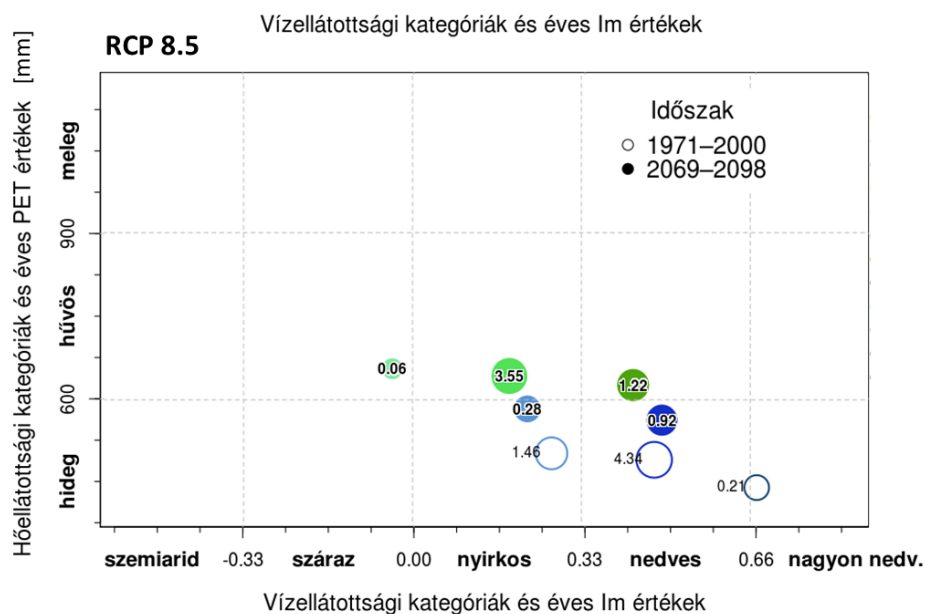
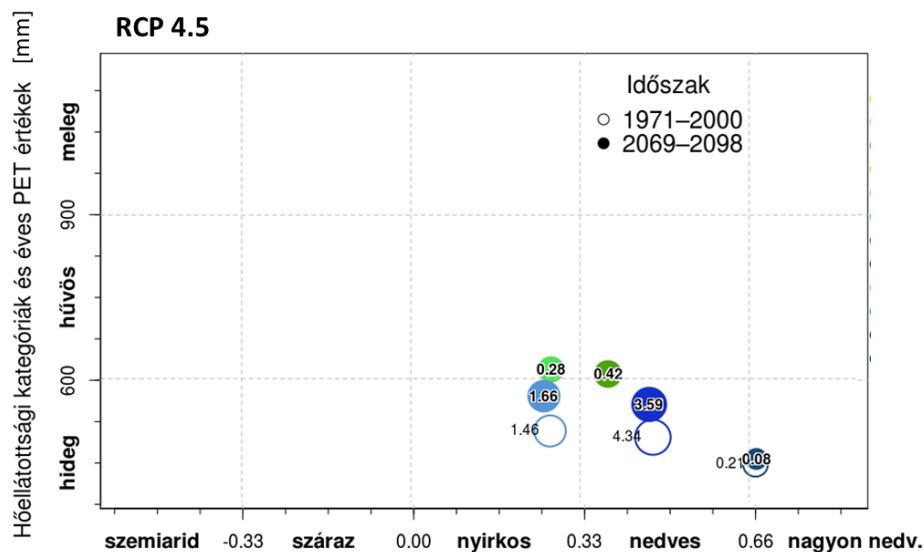
Az alrégióként eltérő hatások megjelenítése érdekében a vizsgálatokat különböző magassági régiókra vonatkozóan is elvégeztem (29. és 30. ábra). A fejezetben nem szereplő magassági régiókra vonatkozó ábrák az EUR-11 felbontású RCP8.5 forgatókönyvet követő RCA4-EC-EARTH szimulációk esetén az F.4 fejezet F.5-ös ábráján láthatók. A legnagyobb különbség az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek alapján kapott eredmények között a PET és I_m értékek eltolódása tekintetében az alföldeken várható (tszf. magasság < 200 m), mely magassági kategória a teljes vizsgált terület 38,5%-át foglalja magában (29. ábra). A hőellátottság növekedése a referencia időszak során „hűvös-száraz” és „hűvös-nyirkos” területek esetében a legerősebb. Az RCP8.5-ön alapuló szimuláció szerint az alföldek 88%-a „hűvös” és „meleg” kategóriák határa felé tolódik el és a másik 12% „hűvösről” „meleg” klímátípusra vált át. Az alföldek 17%-a várhatóan eltolódik a „szemiarid” kategóriába, mely a referencia időszakban nem fordult elő.

Az RCP4.5 esetén a közép- és magasszintű hegységek (tszf. magasság > 1000 m) (30. ábra) és az alföldek (29. ábra) között az egyetlen közös típus a „hűvös-nyirkos”. A közép- és magasszintű hegységekben a „hideg-hűvös” klímátípus kategória határhoz közel jelenik meg és ez a legmelegebb a klímátípusok között (a referencia időszakban nem fordul elő), míg az alföldeken már az RCP4.5 esetén is a „hűvös” kategória közepére kúszik. Az RCP8.5 forgatókönyv esetén a „hűvös-száraz” kategória is megjelenik a közép- és magasszintű hegységekben, de csak a teljes terület 6%-át magába foglaló alrégió 10%-án (a teljes terület 0,06%-án), míg a „hideg-nagyon nedves” teljesen eltűnik. Mindkét magassági kategória esetén magas hőellátottságbeli változás és az alföldeken jelentős vízellátottságbeli változás várható. Míg az RCP4.5 esetén mindkét esetben kevesebb, mint 100 mm a PET-ben várható csökkenés, addig az RCP8.5 forgatókönyvet követve az alföldeken több mint 150 mm-t, a közép és magashegységi régiókban több mint 50 mm-t változhat a hőellátottság.

Míg a hőellátottság esetén csak az alföldeken várható eltolódás egy új kategóriába, addig a dombságok (200 és 500 m közötti tszf. magasság) esetén megjelenik az új „szemiarid” vízellátottsági kategória (29. ábra, F.5. ábra). Az alacsonyszintű hegységek (500 és 1000 m közötti tszf. magasság) esetén mind a hő- mind a vízellátottság karakterisztikáiban várható a kategória határon belül eltolódás. Az RCP4.5-öt követő szimulációnál jellemzően szárazodás várható (F.5. ábra).



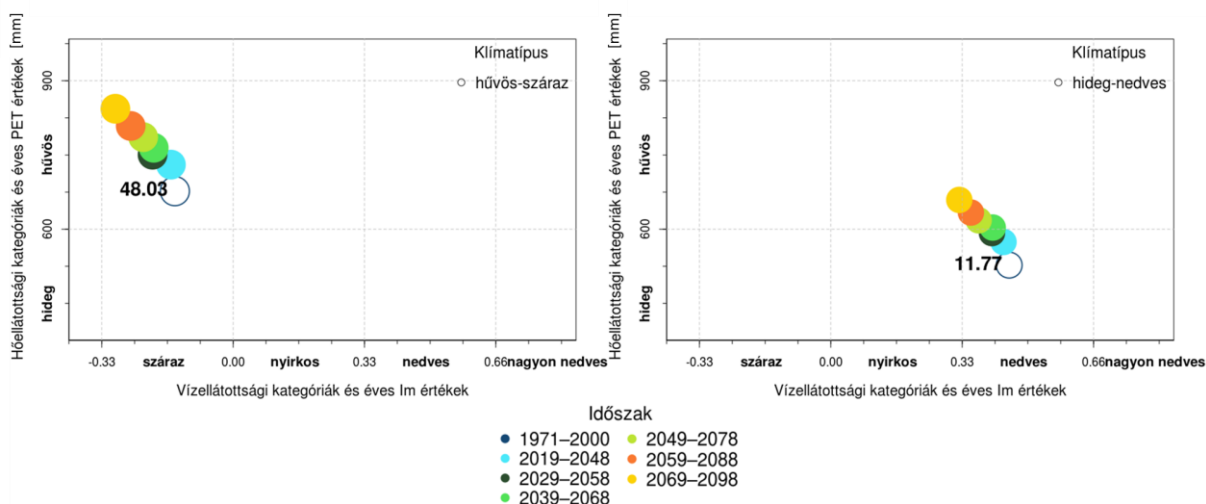
29. ábra Eltolódás a termikus és nedvességi karakterisztikákban és klímátípus változások az alföldeken (tengerszint feletti magasság < 200 m). A körök sugara arányos a klímátípus által lefedett terület (km^2) tízes logaritmusával. A körökben lévő értékek a klímátípus által lefedett terület arányát mutatják a teljes vizsgált területhez képest, a körök középpontja pedig a klímátípus által lefedett terület átlagos éves PET és I_m értékeit mutatja. Az üres körök az 1971–2000 időszakra vonatkoznak a CarpatClim adatok alapján, a teli körök a 2069–2098 időszakra az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriók esetén, az EUR-11 térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján.



- Klímatípus**
- hideg-száraz
 - hűvös-szemiárid
 - meleg-szemiárid
 - hideg-nyirkos
 - hűvös-száraz
 - meleg-száraz
 - hideg-nedves
 - hűvös-nyirkos
 - meleg-nyirkos
 - hideg-nagyon nedv.
 - hűvös-nedves
 - hűvös-nagyon nedv.

30. ábra Eltolódás a termikus és nedvességi karakterisztikákban és klímátípus változások a közép- és magashegységekben (tengerszint feletti magasság > 1000 m). A körök sugara arányos a klímátípus által lefedett terület (km^2) tízes logaritmusával. A körökben lévő értékek a klímátípus által lefedett terület arányát mutatják a teljes vizsgált területhez képest, a körök középpontja pedig a klímátípus által lefedett terület átlagos éves PET és I_m értékeit mutatja. Az üres körök az 1971–2000 időszakra vonatkoznak a CarpatClim adatok alapján, a teli körök a 2069–2098 időszakra az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriók esetén, az EUR-11 térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján.

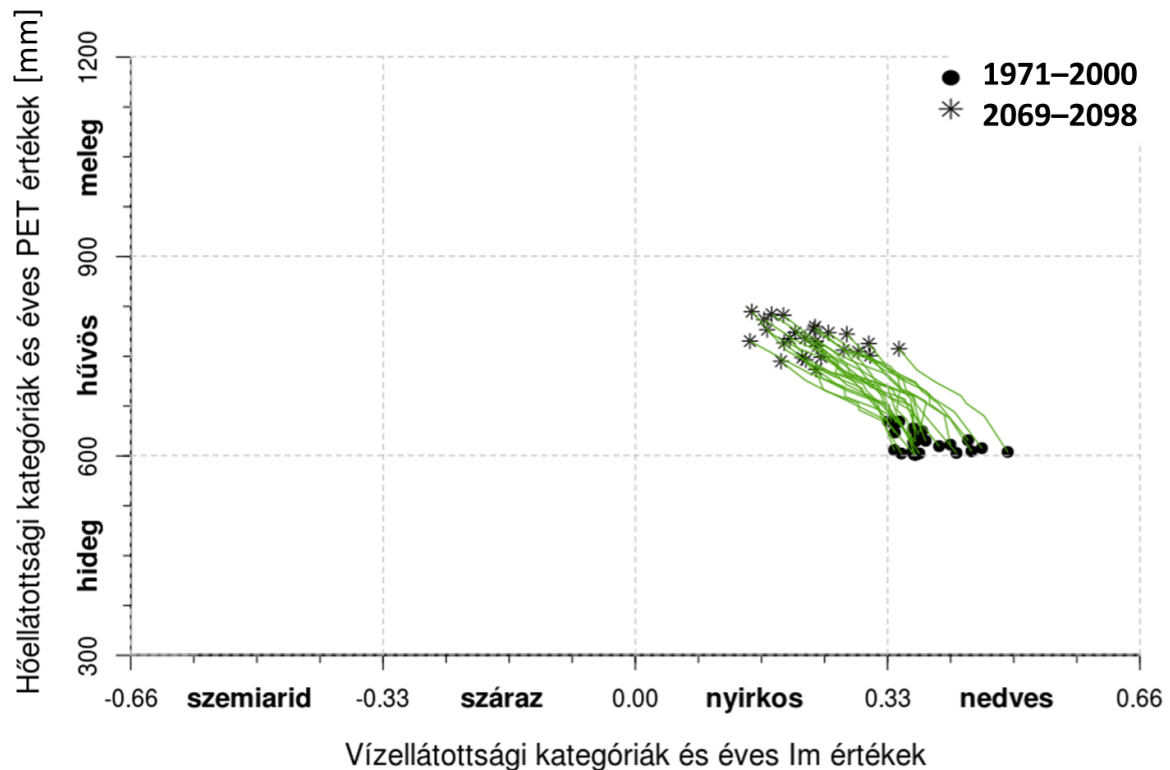
A Feddema-folytonos megközelítés alkalmazásával klímátípus eloszlások és azok változásának vizsgálata során azt is meghatároztam, hogy a referencia időszak során egy adott klímátípusba sorolt terület milyen mértékű és irányú változáson megy keresztül a rácspontonként meghatározott PET és I_m értékek alapján (31. ábra). A 31. ábrán látható, hogy a referencia időszak során „hűvös-száraz” területek a Feddema-diszkrét megközelítése esetén, a több mint 170 mm PET-növekedés ellenére nem váltanak klímátípust. Látható azonban, hogy a Feddema-karakterisztikák változása alapján ezek a területek jelentős növekedést mutatnak a hőellátottságban és csökkenést a vízellátottságban. A „hideg-nedves” klímátípus esetén látható, hogy a század végére várhatóan a terület átlagos hő- és vízellátottsági karakterisztikái alapján már a melegebb „hideg” és szárazabb „nyirkos” típusba kerül át a „hűvös-száraz” területeken tapasztalt értéknél kisebb, ≈ 150 mm PET növekedés esetén is.



31. ábra Az 1971–2000 referencia időszak során „hűvös-száraz” (bal) és „hideg-nedves” (jobb) klímátípusokba sorolt területekre jellemző termikus és nedvességi karakterisztikák a CarpatClim adatok alapján és azok változása az RCP8.5 szcenáriót követő EUR-11-es térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján a 21. század során. A körök sugara arányos a klímátípus által lefedett terület (km^2) tízes logaritmusával. Az üres körökben lévő értékek a klímátípus által lefedett terület arányát mutatják a teljes vizsgált területhez képest, a körök középpontja a klímátípus által lefedett terület átlagos éves PET és I_m értékeit mutatja.

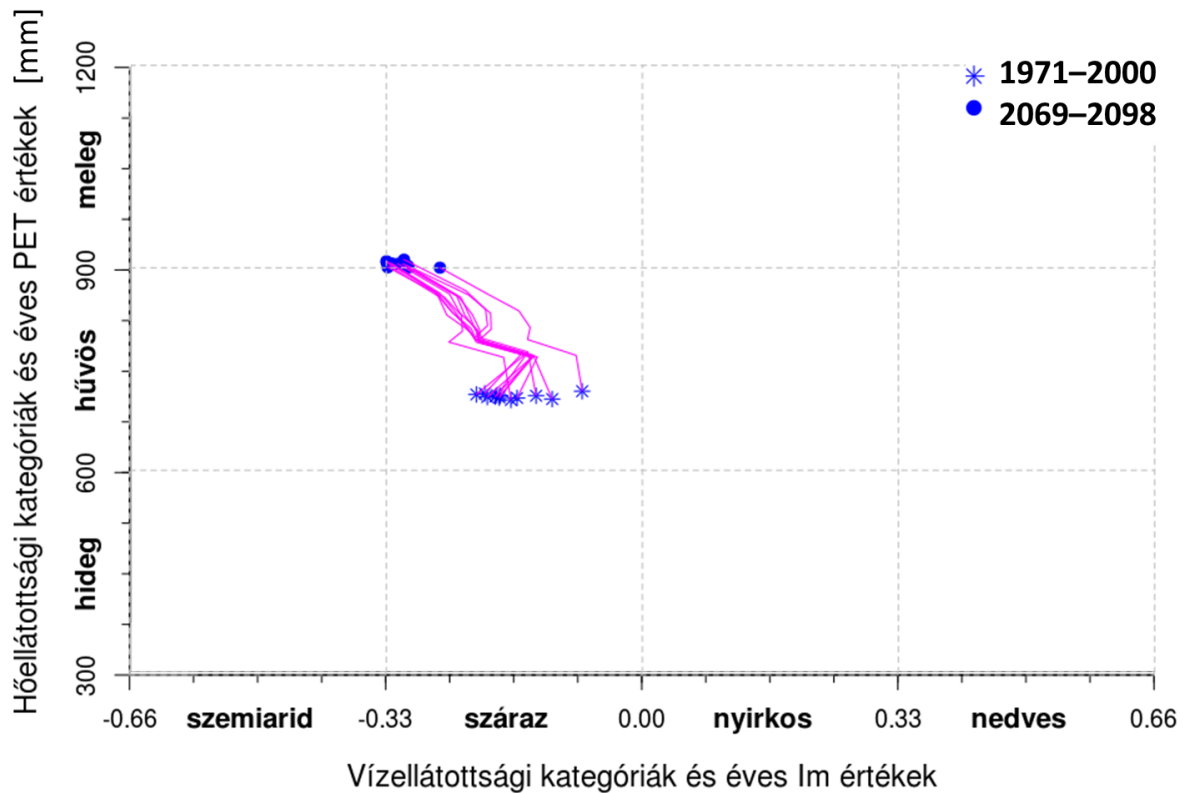
A Feddema-folytonos megközelítéssel azt is megjelenítettem, hogy az egyes klímátípusokba besorolt területek adott rácspontjai esetén milyen irányú és mértékű változás várható a 21. század során. A dolgozatomban a „hűvös-nedves” klímátípusra vonatkozó eredményem mutatom be, mert ez a típus kis területen (0,71%-a a teljes térségnek) fordul elő a referencia időszak során, így a kevés ide tartozó rácspont miatt jól kivehető a változás

iránya. (32. ábra). Az egyes rácspontok hóellátottsága a referencia időszakban hasonló, a fő különbség a vízellátottság mértékében jelenik meg. Az egyes rácspontokhoz tartozó PET és I_m értékek szórásának növekedése várható a jövőben, a referencia időszakhoz képest.



32. ábra A referencia időszak során „hűvös-nedves” klímátípusba sorolt rácspontok termikus és nedvességi karakterisztikái az 1971–2000 időszakban (fekete pontok) a CarpatClim adatok alapján és azok változásának iránya a 21. század során (zöld vonalak), és értékei a 2069–2098 időszakban (fekete csillagok) az RCP8.5 scenáriót követő EUR-11-es térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján.

A Feddema-folytonos megközelítéssel azt is megjelenítettem, hogy a térségben várhatóan a referencia időszakhoz képest a század végére „újonnan” megjelenő „meleg” klímátípusba kerülő rácspontok esetén az egyes Feddema-indexek milyen irányú és mértékű változása vezetett az új kategória megjelenéséhez. A dolgozatomban a „meleg-száraz” klímátípusra vonatkozó eredményem mutatom be, mert ez a típus kis területen (0,34%-a a teljes térségnek) fordul elő várhatóan, így a kevés ide tartozó rácspont miatt jól kivehető a változás iránya (33. ábra). Látható, hogy míg a 21. század végén megjelenő „meleg-száraz” klímátípus esetén a rácspontok egy kivételével hasonló PET és I_m értékekkel rendelkeznek, addig a referencia időszakban ezek a rácspontok bár közel azonos hóellátottságúak, vízellátottság szempontjából széles tartományt fednek le a „száraz” kategóriában.

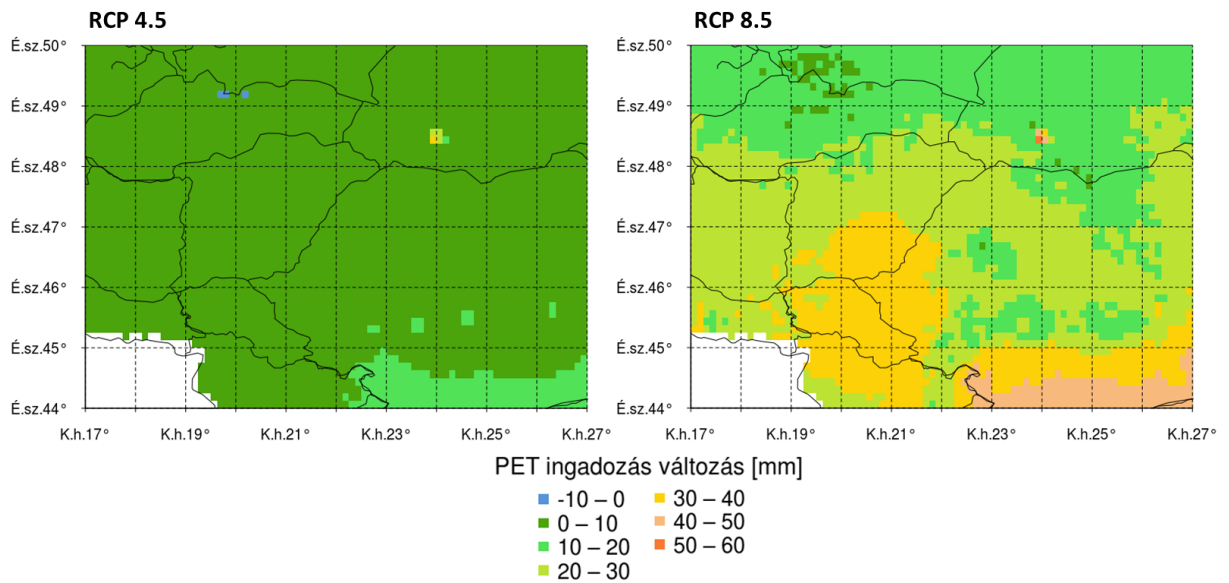


33. ábra A 2069–2098 időszak során „meleg-száraz” klímátípusba sorolt rácspontok termikus és nedvességi karakterisztikái (kék pontok) és azok változásának iránya (magenta vonalak) az 1971–2000 referencia időszaktól kezdve (kék csillagok) a CarpatClim adatok alapján az RCP8.5 scenáriót követő EUR-11-es térségi felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján a 21. század során.

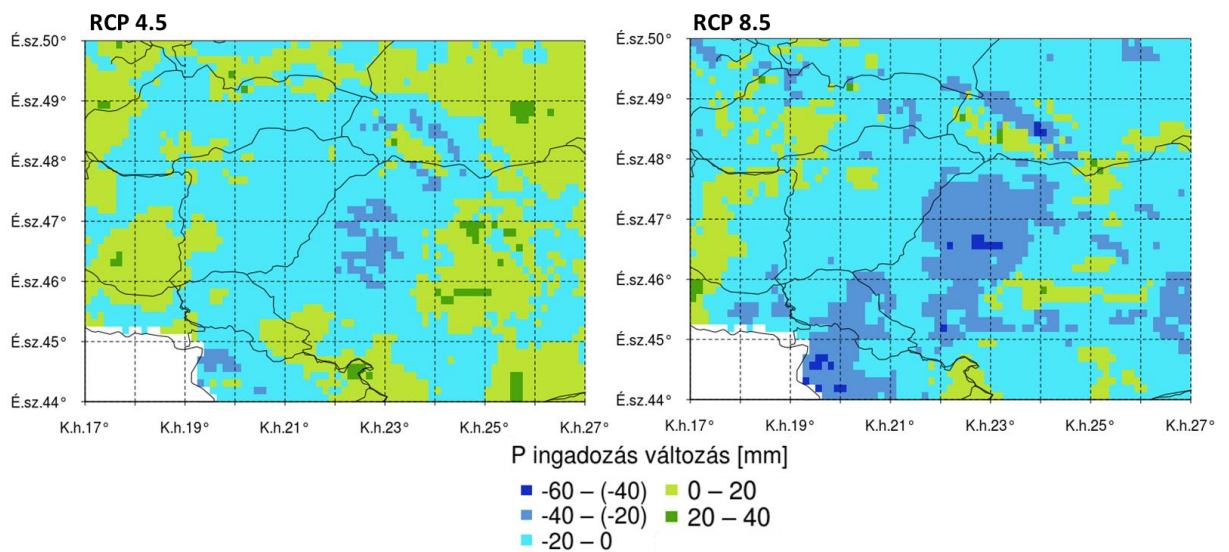
5.2.4. RCA4-EC-EARTH modellpárral becsült szezonális-típusok eloszlása és azok anomáliái

Ahogy azt a **4. fejezetben** bemutattam, a szezonálisan változó elem (A_s), azaz az, hogy a hőmérséklet vagy a csapadék ingadozáshoz köthető-e a területen jellemző, I_s -el kifejezett mértékű szezonális, az átlagos éven belüli PET és P ingadozás változása alapján kerül meghatározásra. Bár az A_s -változás alapján látható, hogy milyen irányú változás várható, ennek az arányszám alapján kategorizált értéknek az értelmezéséhez elkészítettem az éven belüli PET és P ingadozásában várható változás területi eloszlását ábrázoló térképeket (34. és 35. ábra). Az éven belüli PET ingadozás változása esetén a kék szín jelöli az éghajlati szimulációk szerinti csökkenést, a többi szín az ingadozás várható növekedését, mely növekvő „T” szezonálisitást jelent. Az éven belüli „P” ingadozás esetén a kékes árnyalatok a várhatóan csökkenő „P” szezonálisitást jelez előre. Azokon a területeken, ahol a szezonálisitás várhatóan egyre nagyobb arányban a T ingadozáshoz köthető, a változást egyes

esetekben az okozza, hogy az éven belüli PET ingadozás nagyobb arányban nő, mint az éven belüli P ingadozás (esetleg csökkent). A másik eset, amikor a PET várhatóan kisebb mértékben csökken, mint a P ingadozás.



34. ábra Az átlagos éven belüli PET ingadozás területi eloszlásának várható változása a Kárpátok térségében az 1971–2000 és a 2069–2098 időszakok között a CarpatClim adatok (referencia időszak) és az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriók esetén az EUR-11 térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján.

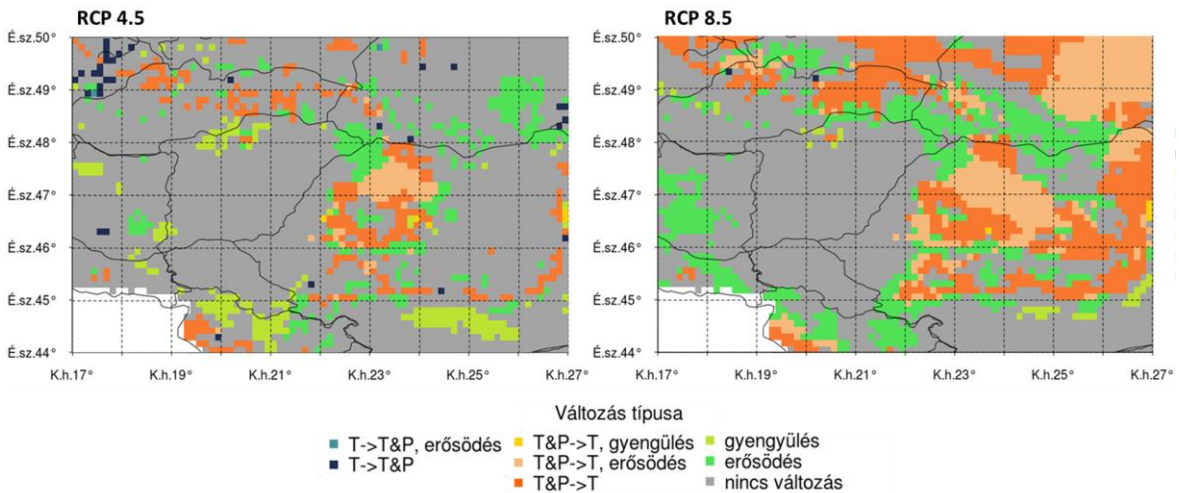


35. ábra Az átlagos éven belüli P ingadozás területi eloszlásának várható változása a Kárpátok térségében az 1971–2000 és a 2069–2098 időszakok között a CarpatClim adatok (referencia időszak) és az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriók esetén az EUR-11 térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján.

A század végére várható szezonális-típus változások térbeli eloszlása a 36. ábrán látható. Az elsősorban a „T”-nek tulajdonított szezonális változékonyságról a „T és P” együttes szezonálisával jellemezhető kategóriába való átmenetet a továbbiakban T→T&P-

nek, a „T és P” változásról a „T”-re való átmenetet pedig $T\&P \rightarrow T$ átmenetnek nevezem. Az RCP4.5 forgatókönyv esetén a szezonális erősödésével együttesen $T\&P \rightarrow T$ átmenet várható az Erdélyi-medencében és néhány kisebb régióban, például az Erdélyi-középhegység egyes részein. A csökkenő szezonális $T\&P \rightarrow T$ átmenet várható az Erdélyi-középhegység néhány részén és a Keleti-Kárpátoktól keletre. A szezonális mértékének változása nélküli $T\&P \rightarrow T$ átmenetek várhatók a Papukban, a Dinári-Alpokban, az Erdélyi-középhegységtől délre és nyugatra, valamint a Kárpátok vonulata mentén. Változatlan szezonális $T \rightarrow T\&P$ átmenetek csak néhány rácspontnyi területen várhatóak a Dunántúli-dombság területén, valamint a Kárpátokban és az Odera-hegységben. Várhatóan csökken a szezonális mértéke a Dráva horvátországi szakasza mentén, a Havasalföldön és az Északi-középhegységben, míg a szezonális mértékének növekedése várható a Dunántúli-dombság keleti felén, a Duna szerb-román határhoz közeli térségében, a Dnyeszter folyó térségében és az Északnyugati-, Északkeleti- és Déli-Kárpátokban.

Az RCP8.5 esetében a hegyvidéki területek jelentős részein várható változás a szezonális-típusában. Fokozódó szezonális és $T\&P \rightarrow T$ átmenet várható a Dinári-Alpokban, az Erdélyi-középhegység déli részén, az Erdélyi-medencében, a Moldova északi részén, a Podóliai-hátság, az Északkeleti Kárpátok északi részén és az Északnyugati-Kárpátok cseh és szlovák részén. A $T\&P \rightarrow T$ átmenetet a térségben legtöbb esetben várhatóan az éves PET ingadozás növekedése és a P ingadozás csökkenése okozza (34. és 35. ábra). Változatlan szezonális $T\&P \rightarrow T$ átmenet várható a Papukban, a Dinári-Alpokban, az Erdélyi-középhegységben, a Déli-Kárpátokban, a Keleti-Kárpátoktól keletre, a Podóliai-hátság nyugati részén és az Északnyugati-Kárpátok északi részén. Fokozódó szezonális várható a Dunántúli-középhegységben, a Papukban, a Dinári-Alpokban, a Szerb-érchegeység északi részén, a Déli- és Északkeleti-Kárpátokban, a Kárpátalján, az Északi-Kárpátok keleti részén, és a Kis-Kárpátokban. A szezonális mértékének csökkenése csak néhány területen várható: a Havasalföldön és az Északi-középhegység középső és keleti részén. A szezonális mértékének változása nélkül $T \rightarrow T\&P$ átmenet az RCP8.5 forgatókönyv alapján csak két rácsponton várható az Északnyugati Kárpátokban. A $T \rightarrow T\&P$ átmenetet ezeken a területeken az okozza, hogy az éves PET ingadozás kisebb mértékben növekszik, mint az éves P ingadozás (34. és 35. ábra). Összességében a legjellemzőbb kategória váltás a szezonálisban $T\&P \rightarrow T$ átmenet miközben a szezonális mértéke változatlan marad vagy erősödik.



36. ábra Szezonális-típus változások területi eloszlása a Kárpátok térségében az 1971–2000 és a 2069–2098 időszakok között a CarpatClim adatok (referencia időszak) és az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriók esetén az EUR-11 térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján

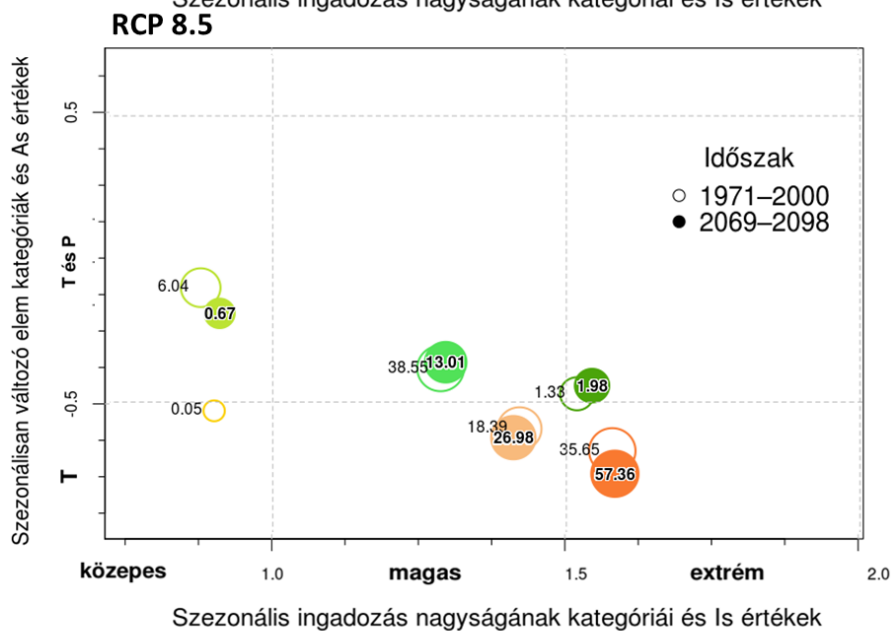
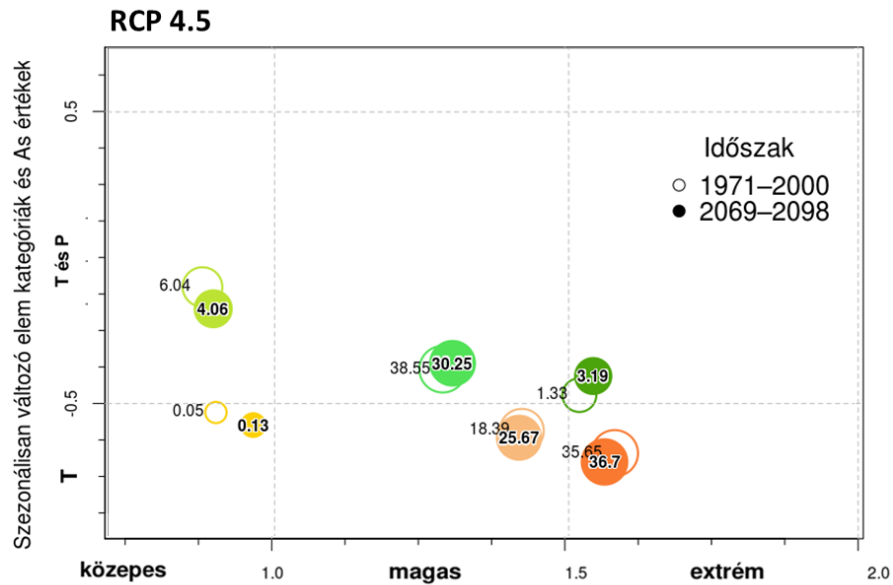
A 37. ábrán látható a Kárpátok térségében eltolódás várható a szezonálisan változó elemekben és szezonális ingadozás mértékében, valamint szezonális-típus változások a teljes vizsgált területre vonatkozólag. Az EUR-11 felbontású RCP8.5 forgatókönyvet követő szimulációkra vonatkozó további eredmények a teljes területre vonatkozólag az F.4 fejezet F.6 és F.7-es ábráin láthatók. Bár a klímatispus váltásokhoz képest kisebb területen várható változás, de jelentős eltolódások figyelhetők meg a szezonális karakterisztikákban az átlagos I_s és A_s értékek változása alapján. A referencia-időszakban a „magas” kategóriába eső I_s értékek jellemezték a térség 56,9%-át (37. ábra). Az RCP4.5 esetén összességében csak kismértékű I_s -beli növekedés várható. Az RCP8.5 esetén azonban már nagyobb mértékű növekedés várható a szezonális ingadozás mértékében, az „extrém” kategóriájú területek 37%-ról 59,3%-ra nőnek, míg a „közepes” szezonális területek 6,09%-os értékéről 0,67%-ra csökkennek. Összességében, a becslések alapján azon területek kiterjedése, ahol a szezonális mind a „T”, mind a „P” változásának tulajdonítható (-0,5 és 0,5 közötti A_s -értékek), a projekciók szerint 45,9%-ról 37,5%-ra csökken az RCP4.5, 15,7%-ra az RCP8.5 forgatókönyv esetén. Megfigyelhető, hogy az átlagos eltolódás a szezonálisan a legtöbb esetben kategória határokhoz közel esik, kivéve a „közepes T és P szezonális” esetén. Tehát elmondható, hogy a szezonálisan változó elem egyre nagyobb arányban a „T” lesz, melynek oka az éven belüli P ingadozás csökkenése és az éven belüli PET ingadozás növekedése (34. és 35. ábra). A „P” szezonális a kutatásom során használt szimulációk

közül egyedül az EUR-11 felbontású, RCP8.5 forgatókönyvet követő PROMES-EC-EARTH szimuláció esetén jelenik meg a terület 0,06 %-án (F.7. ábra).

Az I_s és A_s értékek eltolódására vonatkozó legnagyobb eltérés az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel kapott eredmények között a közép- és magashegységekben (tszf. magasság > 1000 m) várható, amely a vizsgált térség 6,03%-át foglalja magába. A szezonális jellemzők változása ezekben a régiókban a 38. ábrán látható. Az I_s és A_s indexek eltolódása a „T és P” együttes, „magas” szezonálisával jellemző területeken a legnagyobb. Ezeken a területeken az A_s csökkenő értéke azt jelzi, hogy a szezonálisban egyre inkább a hőmérséklet változékonysága a meghatározó, a növekvő I_s értékek pedig az erősödő szezonális változékonyságot.

A közép- és magashegységekhez képest, ahol közepes, magas és extrém szezonális is jellemző (38. ábra), az alföldeken (tszf. magasság < 200 m) a szezonális ingadozás átlagos nagysága a „magas” kategória felső határán vagy az „extrém” szezonális alsó határához közeli értéket vesz fel, mind a referencia időszakban, mind a század végére vonatkozó szimulációk szerint (39. ábra). Az alföldek esetén a legjellemzőbb a „T szezonális”, míg a „T és P szezonális” területeken az átlagos A_s érték a „T” és „T és P” kategória határon helyezkedik el. A „magas és extrém T” szezonális esetén a szezonális ingadozása várhatóan kismértékben csökken az RCP4.5 és kismértékben növekszik az RCP8.5 forgatókönyv szerint (39. ábra).

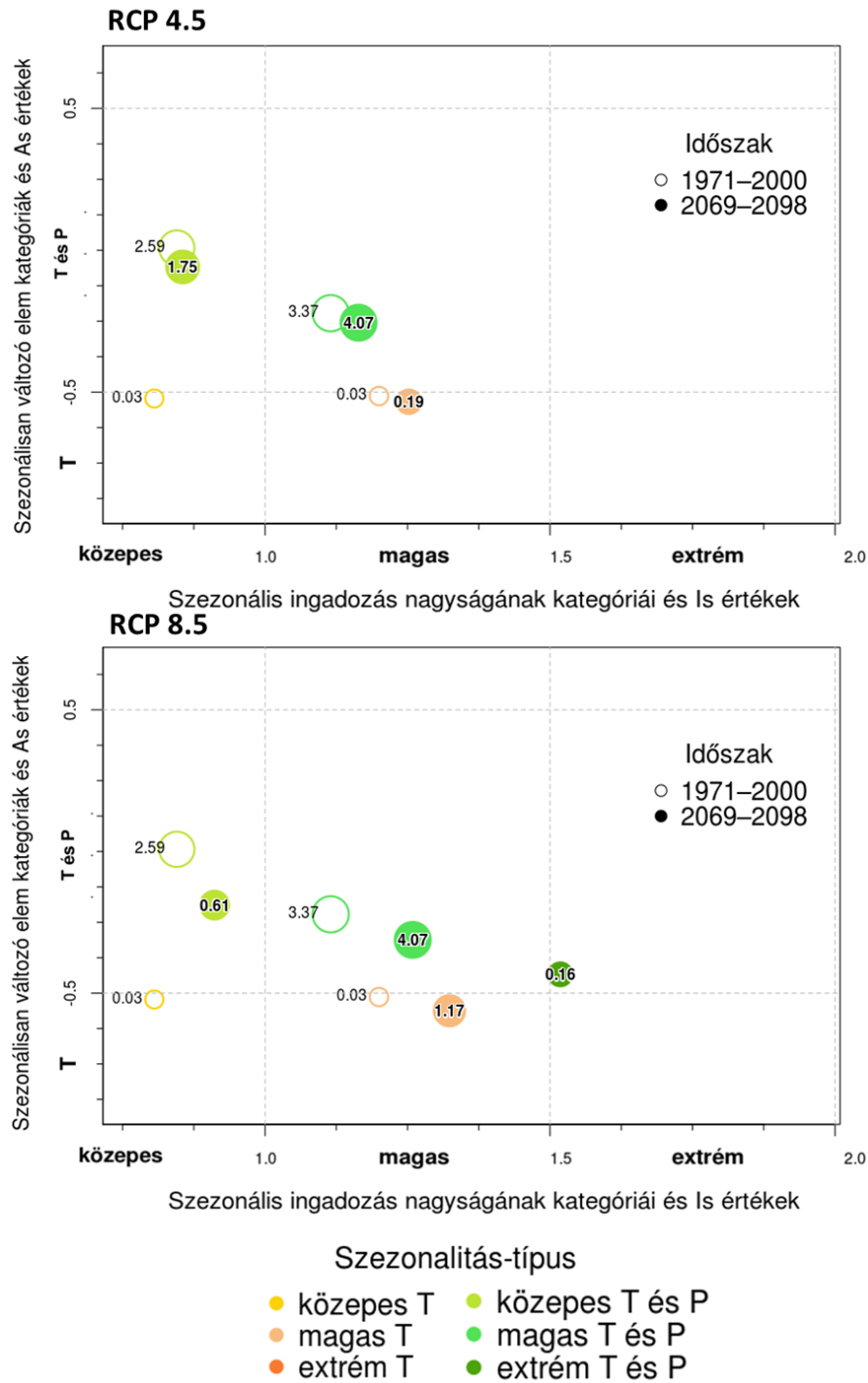
Az alföldekhez hasonlóan a dombság (200 és 500 m közötti tszf. magasság) esetén is kismértékű eltolódás várható mind a szezonális ingadozás nagyságában mind az A_s értékében (F.8. ábra). A szezonális mértéke minden esetben a „magas” és „extrém” kategóriákhoz közeli, a referencia időszakban előforduló „közepes” szezonális esetén pedig növekszik az I_s értéke az RCP4.5 forgatókönyvet követő szimuláció esetén (az RCP8.5 esetén várhatóan nem fordul majd elő ebben a régióban „közepes” szezonális). Az alacsony szintű hegységek (500 és 1000 m közötti tszf. magasság) esetén a közép- és magashegységekhez hasonlóan növekvő szezonális jellemző mindkét forgatókönyvre vonatkozóan (F.8. ábra).



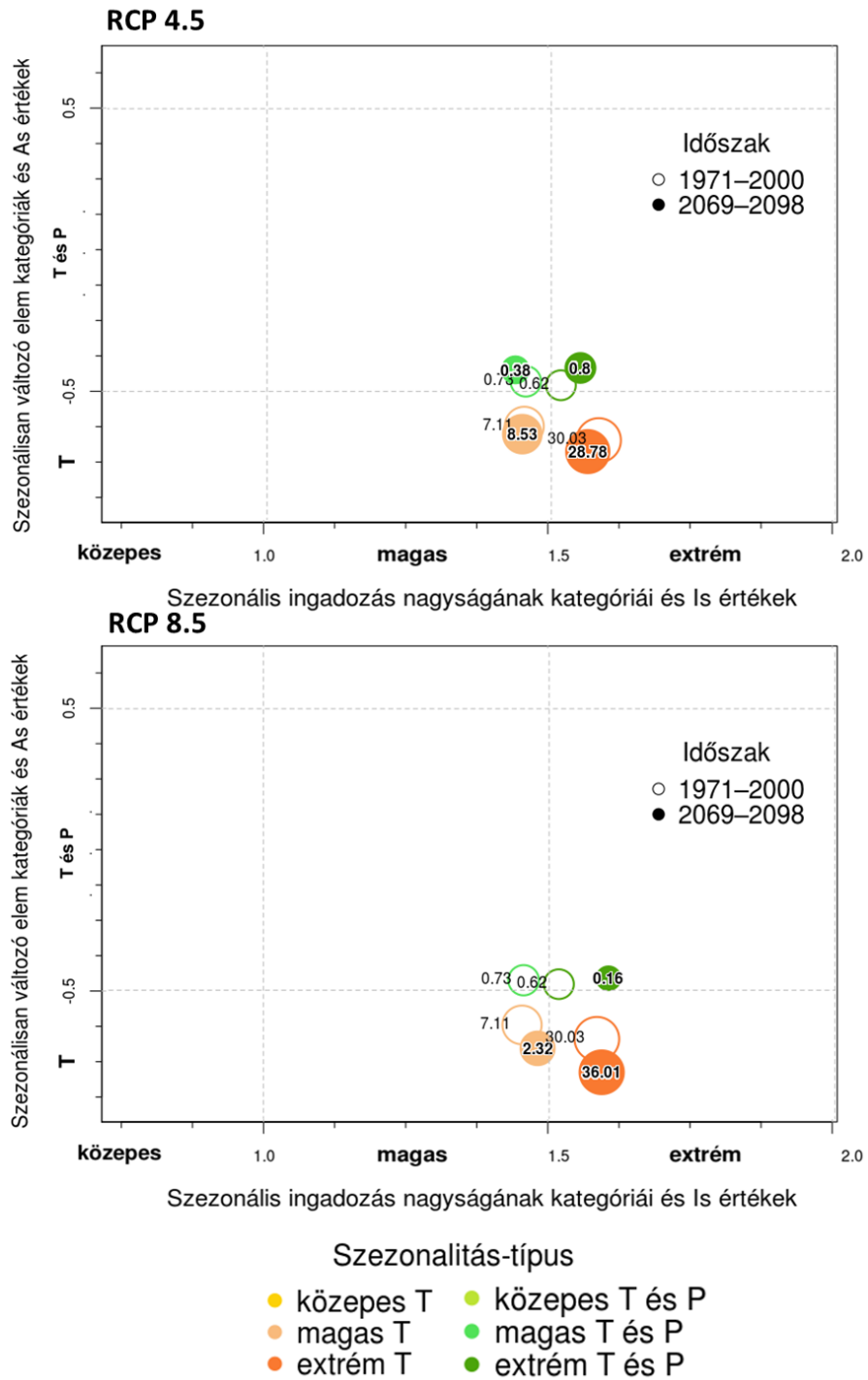
Szezonális-típus

- közepes T
- közepes T és P
- magas T
- magas T és P
- extrém T
- extrém T és P

37. ábra Eltolódás a szezonálisan változó elemekben és szezonális ingadozás nagyságában és szezonális-típus változások a teljes vizsgált területen. A körök sugara arányos a szezonális-típus által lefedett terület tízes logaritmusával. A körökben lévő értékek a szezonális-típus által lefedett terület arányát mutatják a teljes területhez képest, a körök középpontja pedig a szezonális-típus által lefedett terület átlagos éves A_s és I_s értékeit mutatja. Az üres körök az 1971–2000 időszakra vonatkoznak a CarpatClim adatok alapján, a teli körök a 2069–2098 időszakra az RCP4.5 és RCP8.5 szcenáriók esetén az EUR-11 térségi felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján.

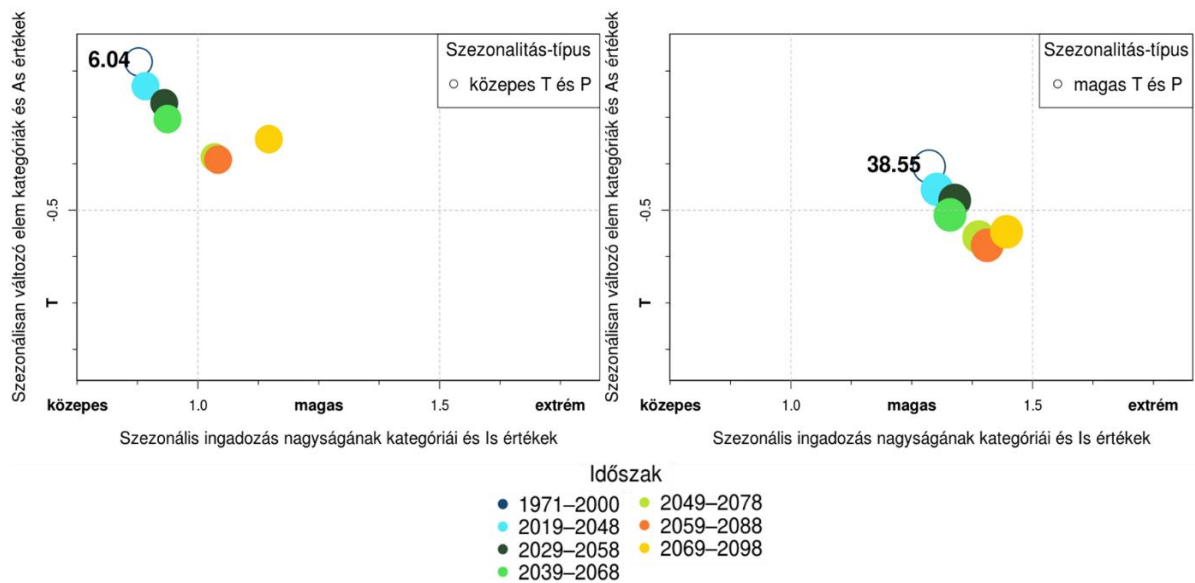


38. ábra Eltolódás a szezonálisan változó elemekben és szezonális ingadozás nagyságában és szezonális-típus változások a közép- és magashegységekben (tengerszint feletti magasság > 1000 m). A körök sugara arányos a szezonális-típus által lefedett terület tízes logaritmusával. A körökben lévő értékek a klimatípus által lefedett terület arányát mutatják a teljes területhez képest, a körök középpontja pedig a szezonális-típus által lefedett terület átlagos éves A_s és I_s értékeit mutatja. Az üres körök az 1971–2000 időszakra vonatkoznak a CarpatClim adatok alapján, a teli körök a 2069–2098 időszakra az RCP4.5 és RCP8.5 szcenáriók esetén az EUR-11 térségi felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján.



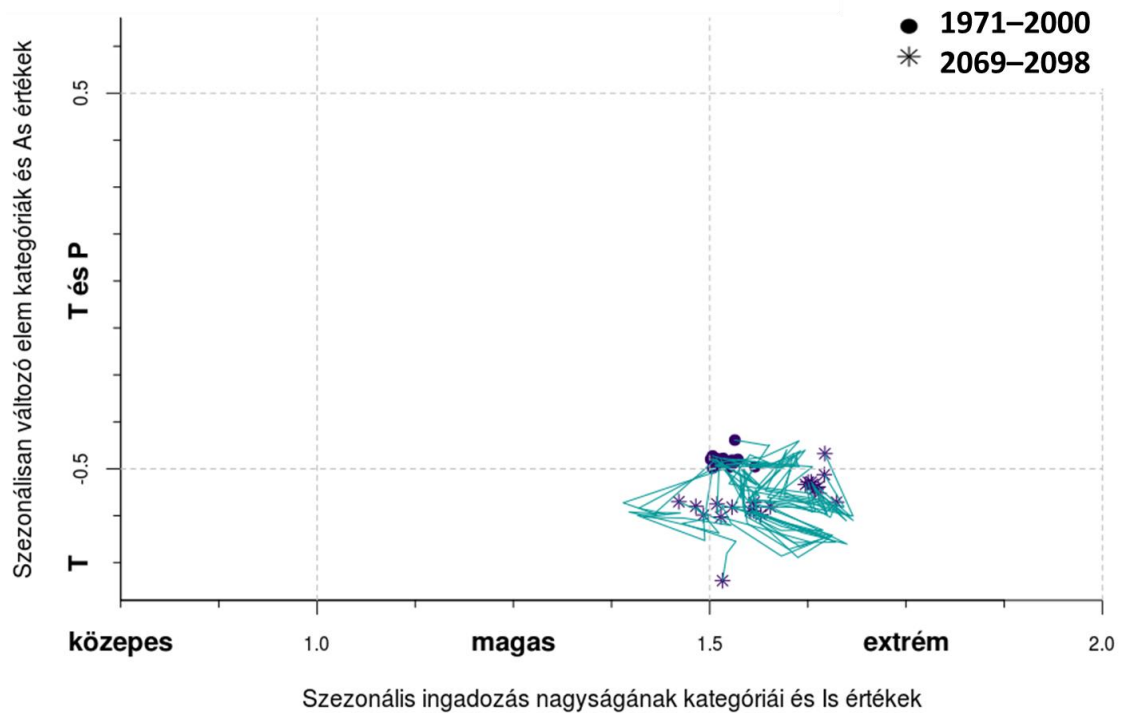
39. ábra Eltolódás a szezonálisan változó elemekben és szezonális ingadozás nagyságában és szezonális-típus változások az alföldeken (tengerszint feletti magasság < 200 m). A körök sugara arányos a szezonális-típus által lefedett terület tízes logaritmusával. A körökben lévő értékek a klimatípus által lefedett terület arányát mutatják a teljes területhez képest, a körök középpontja pedig a szezonális-típus által lefedett terület átlagos éves A_s és I_s értékeit mutatja. Az üres körök az 1971–2000 időszakra vonatkoznak a CarpatClim adatok alapján, a teli körök a 2069–2098 időszakra az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriók esetén az EUR-11 térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján.

A Feddema-folytonos megközelítés alkalmazásával szezonális-típus eloszlások, és azok változásának vizsgálata során azt is meghatároztam továbbá, hogy a referencia időszak során egy adott szezonális-típusba sorolt terület milyen mértékű és irányú változáson megy keresztül a rácspontonként meghatározott A_s és I_s értékek alapján (40. ábra). A 40. ábrán látható, hogy a referencia időszak során „T és P közepes” szezonális-típusával jellemezhető területek az RCP8.5 forgatókönyv követése esetén a század közepéig nagyobb mértékben csak a szezonálisan változó elem tekintetében mutatnak változást. Míg a 21. század első felében egyre inkább a „T” szezonális-típusa lesz jellemző, addig a század második felére a szezonális intenzitásában várható változás. A növekvő szezonális várhatóan a közepesről a magas kategóriába váltsához vezet. A „T és P magas” szezonális-típusával jellemezhető területeken hasonló tendencia figyelhető meg mindkét szezonális-index esetén, de kisebb mértékű változással. A 21. század első és második felét jellemezhető váltás a szezonális-típust jellemző Feddema-indexek változásának tendenciájában nem jelenik meg a klímatispusok esetén.



40. ábra Az 1971–2000 referencia időszak során „T és P közepes” szezonális-típusával (bal) és T és P magas szezonális-típusával (jobb) jellemezhető szezonális-típusokba sorolt területek szezonális-karakterisztikái a CarpatClim adatok alapján és azok változása az RCP8.5 scenáriót követő EUR-11-es térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján a 21. század során. A körök sugara arányos a szezonális-típus által lefedett terület (km^2) tízes logaritmusával. Az üres körökben lévő értékek a klímatispus által lefedett terület arányát mutatják a teljes vizsgált területhez képest, a körök középpontja a klímatispus által lefedett terület átlagos éves I_s és A_s értékeit mutatja.

A Feddema-folytonos megközelítéssel azt is megjelenítettem, hogy az egyes szezonális-típusba besorolt területek adott rácspontjai esetén milyen irányú és mértékű változás várható a 21. század során. A dolgozatomban az „extrém T és P” szezonális-típusra vonatkozó eredményeket alföldek (tszf. magasság < 200 m) esetén mutatom be, mert ebben a régióban ez a típus kis területen (0,62%-a a teljes térségnek) fordul elő a referencia időszak során, így a kevés ide tartozó rácspont miatt jobban kivehető a változás iránya (41. ábra). Látható, hogy a bemutatott klímatisípusokhoz képest a szezonális esetén több váltás is várható a változás irányában. Az egyes rácspontokhoz tartozó A_s és I_s értékek szórása nagyobb a jövőben, mint a referencia időszakban. Egy rácspont kivételével minden esetben váltás várható a „T és P” szezonálisból „T” szezonálisára, három rácspont pedig „extrém”-ből „magas” szezonálisúvá válik.



41. ábra A referencia időszak során „T és P extrém” szezonálisával jellemezhető szezonális-típusokba sorolt rácspontok szezonális-karakterisztikái az 1971–2000 referencia időszakban (lila pontok) a CarpatClim adatok alapján és azok változásának iránya a 21. század során (türkizkék vonalak), és értékei a 2069–2098 időszakban (lila csillagok) az RCP8.5 scenáriót követő EUR-11-es térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján.

5.2.5. Domborzat hatása az RCA-4-EC-EARTH modellpárral becsült klíma- és szezonális-típusok eloszlására

A Kárpátok térségére vonatkozó vizsgálataim során klímátípusok (13. táblázat) és szezonális-típusok (14. táblázat) számában történő változások elemzését is elvégeztem különböző magassági régiókra a térségben század végére (2069–2098) várható éghajlati heterogenitás becsülésére az EUR-11 felbontású RCA4-EC-EARTH szimulációk alapján. Az RCP8.5 forgatókönyv esetén a 21. század végére a Kárpátok térségében előforduló klímátípusok száma várhatóan nő a referencia időszakhoz képest (1971–2000). A növekvő heterogenitás várhatóan az alföldeken lesz a legerősebb, ahol az RCP8.5 forgatókönyv alapján megkétszereződik a klímátípusok száma a század végére. Ezzel szemben a homogenitás növekedése valószínűsíthető a dombvidékeken és alacsony szintű hegységek esetén. Az alacsony szintű hegységek éghajlata várhatóan öt (RCP4.5) vagy négy (RCP8.5) klímátípussal lesz jellemezhető a referencia időszakban jellemző hat helyett. Mindkét forgatókönyv a klímátípusok számának azonos mértékű növekedését jelzi előre a közép- és magashegységi régiókban. Nagyobb mértékű változás várható az RCP8.5 forgatókönyv esetén, mely alapján átlagosan a területek 72%-án módosul a klímátípus, szemben az RCP4.5 alapján kapott eredményekkel amikor a területek 30%-án várható változás. Az RCP8.5 szerint minden magassági régió esetén elmondható, hogy a terület több mint 50%-án várható klímátípus váltás. A legjelentősebb változás az alacsony szintű hegységek esetén valószínűsíthető, ahol a szimulációk szerint a klímátípusok a terület 68,3%-án, illetve 93,8%-án változnak az RCP4.5 és az RCP8.5 esetében. Az eredmények alapján az alföldek esetén várható a legkisebb mértékű változás, a legkevesebb az RCP4.5 esetén, a terület 3,2%-án, míg az RCP8.5 esetén az alföldek 54,3%-án (13. táblázat).

13. táblázat A klímátípusok száma és azon területek százalékos aránya, ahol klímátípus változás várható teljes területre, külön-külön pedig az alföldekre, dombszágokra, alacsonyszintű-, közép- és magashegységekre vonatkozóan (tengerszint feletti magasság – tszfm.). A referencia időszak (1971–2000) eredményei a CarpatClim adatok alapján, a század végére (2069–2098) vonatkozó becslések pedig az EUR-11 térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatokon alapulnak, RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek figyelembevételével.

	1971 – 2000	2069 – 2098			
		RCP4.5		RCP8.5	
	klíma-típusok száma	változó területek aránya	klíma-típusok száma	változó területek aránya	klíma-típusok száma
Teljes terület	7	26,2	7	64,4	8
Alföld (tszfm. < 200 m)	2	3,2	3	54,3	5
Dombtság (200 m < tszfm. < 500 m)	5	29,4	3	56,3	4
Alacsony-szintű hegység (500 m < tszfm. < 1000 m)	6	68,3	5	93,8	4
Közép- és magas-hegység (1000 m < tszfm.)	3	19,2	5	84,9	5

A szezonális-típusok esetén az RCP4.5 forgatókönyv a legtöbb magassági kategóriában nem eredményez változást a szezonális-típusok számában, csak a közép- és magashegység régiókban várható csökkenés (14. táblázat). Az RCP8.5 nem eredményez változást a szezonális-típusok számában az alacsonyszintű-hegységekben, valamint a közepes- és magashegységi régiókban, de megállapítható, hogy a többi kategóriában csökkenés várható. Minden egyes magassági régióban várható azonban változás a szezonális-típusában, az RCP4.5 szerinte átlagosan a területek 23%-án míg az RCP8.5 szerint átlagosan a területek 53%-án. Az RCP8.5 szezonális-típus-változást eredményez a dombszágok és hegyvidéki területek több mint 50%-án. Az RCP4.5 a legjelentősebb szezonális-típusváltozást a dombszágokon becsüli, 31,4%-kal, míg az RCP8.5 az alacsonyszintű-hegységekben 71%-kal (14. táblázat).

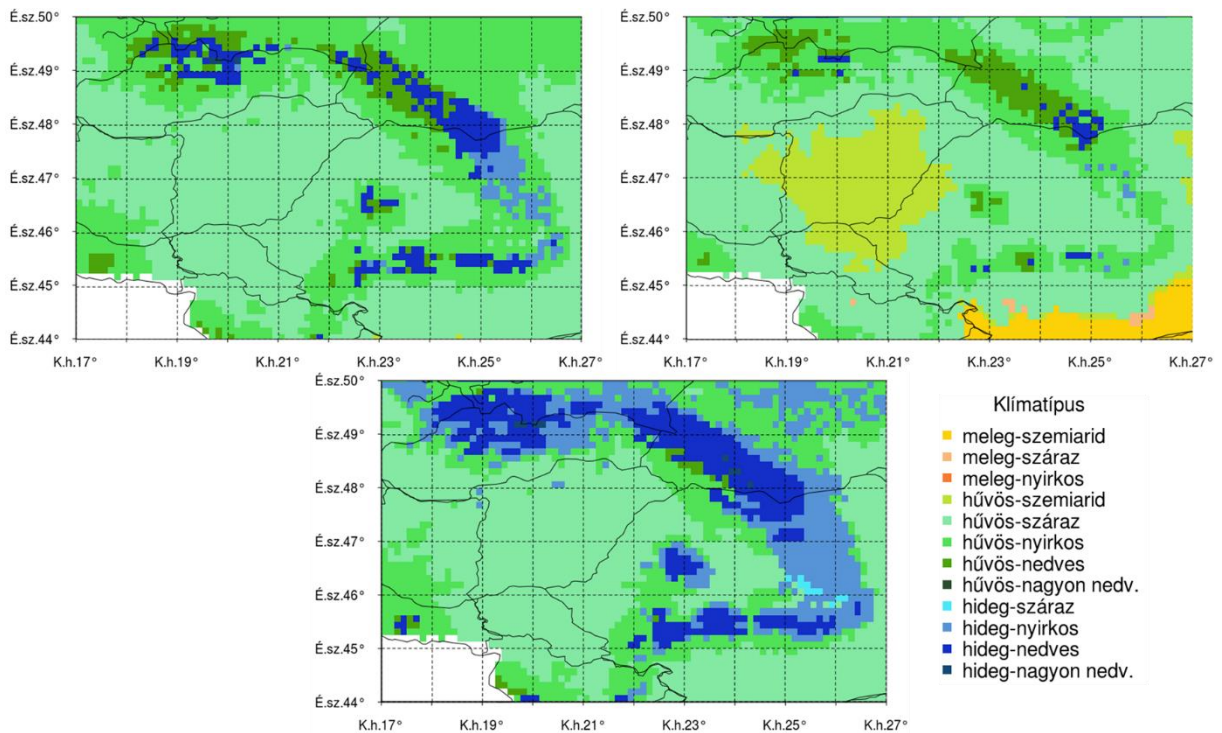
14. táblázat A szezonális-típusok száma és azon területek százalékos aránya, ahol szezonális-típus változás várható teljes területre, külön-külön pedig az alföldekre, dombokra, alacsony-szintű-, közép- és magashegységekre vonatkozóan (tengerszint feletti magasság – tszfm.). A referencia időszak (1971–2000) eredményei a CarpatClim adatok alapján, a század végére (2069–2098) vonatkozó becslések pedig az EUR-11 térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatokon alapulnak, RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek figyelembevételével.

	1971 – 2000	2069 – 2098			
		RCP 4.5		RCP 8.5	
	szezonális-típusok száma	változó területek aránya	szezonális-típusok száma	változó területek aránya	szezonális-típusok száma
Teljes terület	6	23,2	6	48,5	5
Alföld (tszfm. < 200 m)	4	14,5	4	18,6	3
Domboság (200 m < tszfm. < 500 m)	5	31,4	5	67	4
Alacsony-szintű hegység (500 m < tszfm. < 1000 m)	5	26,2	5	71	5
Közép- és magas-hegység (1000 m < tszfm.)	4	18,7	3	53,9	4

A különböző magassági szinteken tehát eltérő mértékű változás várható a klíma- és szezonális-típus változások esetén egyaránt. A heterogenitásban várható változások területi eloszlását megjelenítettem térképes formában is. A 42. és 43. ábrán látható, hogy mely klíma- és szezonális-típusok fordultak elő a Kárpátok térségében a referencia időszakban és milyen típusok valószínűsíthetőek a kategória váltások esetén az egyes forgatókönyvek szerint. Ez az ábratípus fontos kiegészítője az éghajlatváltozás vizsgálatának a klíma- és szezonális-típus változás irányát megjelenítő térképek mellett (**5.2.3, 5.2.4 fejezet**), mert többletinformációt hordoz, hiszen alkalmazási területtől függően nemcsak a változás mértéke fontos, hanem hogy ténylegesen milyen éghajlat várható egy adott területen.

A 42. ábrán látható, hogy bár az alacsony hegyvidéki régiók heterogenitása csökken, de az RCP4.5 szerint még az alföldektől és domboktól eltérő klímátípus jellemzi ezeket a területeket, ellenben az RCP8.5 esetén már hő- és vízellátottság szempontjából egy kategóriába eső karakterisztikák várhatóak, például az Északi-középhegység és a Dunántúli-domboság területein. A közép- és magashegyi területeken annak hatására nő a heterogenitás,

hogy olyan klímátípusok is megjelenjenek melyek korábban csak alacsonyabb tengerszint-feletti magassági régiókban fordultak elő



42. ábra Klímátípusok területi eloszlása a Kárpátok térségben a CarpatClim adatok alapján meghatározott 1971–2000 időszakra (lent) és az RCP4.5 (bal) és RCP8.5 (jobb) scenáriók esetén az EUR-11 térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján a 2069–2098 időszakra vonatkozóan

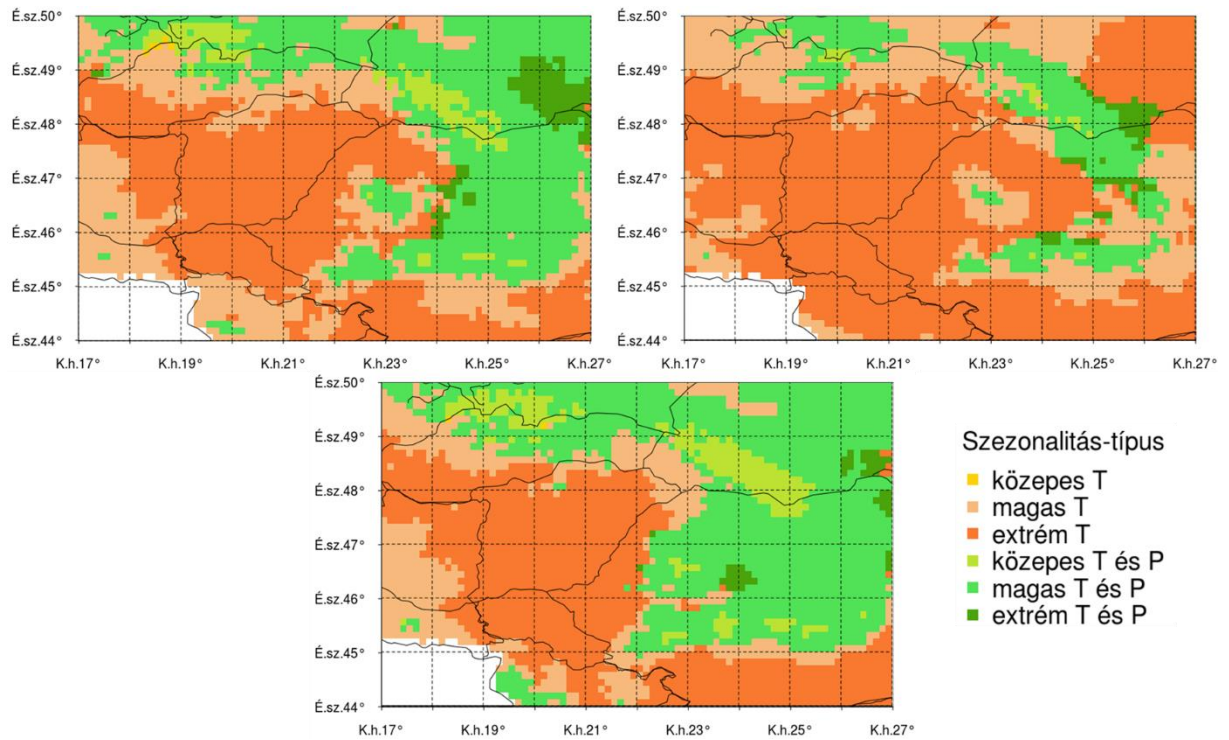
A hő- és vízellátottság változása hatással lehet a térség vegetáció eloszlására is. A Kárpátok térségére vonatkozóan SZELEPCSÉNYI ET AL. (2018) tanulmányában a Holdridge-féle osztályozással vizsgálta az éghajlatváltozást növényföldrajzi szempontból (éghajlatot (referencia időszak: 1961–1990, jövőbeni időszak: 2061–2090). HOLDRIDGE (1967) munkájában Feddemához hasonlóan P és PET alapján jellemzi a vízellátottságot, míg a hőellátottságot úgynevezett biohőmérséklet (a növényzet primér produktivitásának mérőszáma, a havi legkisebb pozitív hőmérsékletek átlaga) alapján (ÁCS ÉS BREUER, 2013). A Feddema-féle hő- és vízellátottsághoz kapcsolódó, Holdridge módszere alapján a térségre meghatározott potenciális vegetáció típusokat és azok várható változását SZELEPCSÉNYI ET AL. (2018) regionális klímamodellek együttes átlagának felhasználásával kapott eredményei segítségével mutatom be a Feddema-féle klímátípusokra vonatkozólag. HOLDRIDGE (1967) módszerével szezonális-típus nem határozható meg. SZELEPCSÉNYI ET AL. (2018) az RCP-eket megelőző forgatókönyv család (SRES) A1B tagját követő éghajlati projekciókat alkalmaz, mely az RCP-k közül az RCP6.0-hoz áll legközelebb (de nem egyeznek meg,

[METOFFICE.GOV.UK]). A következőkben említett RCP8.5-öt követő eredményeim erősebb várható változáshoz vezethetnek a vegetációeloszlásban. A térségre meghatározott Holdridge-féle életzónák magyar elnevezéseit ÁCS ÉS BREUER (2013) munkájának megfelelően használom.

Feddema alapján a referencia időszakban „hűvös-száraz” Alföld területe Holdridge osztályozása szerint „hűvös-mérsékelt”, ahol a jellemző növényzet a füves puszta. A század végére az eredményeim alapján ezen a területen várhatóan hőellátottságban nem történik típusváltás, de megjelenik a térségben új, „szemiárid” vízellátottság. A változás hatására a Holdridge-osztályozás alapján a füves pusztát várhatóan felváltják a korábbinál szárazabb tövises puszták. Az eredményeim alapján várhatóan az újonnan megjelenő „meleg” hőellátottsági kategóriába sorolható a Havasalföld, Feddema esetén a referencia időszakban „hűvös-száraz” klímátípusba sorolható. A hőellátottság növekedésének hatására a „hűvös” pusztákat és „meleg-mérsékelt” száraz erdők helyett Holdridge ezekhez a területekhez a melegebb, szárazabb meleg mérsékelt éghajlaton megélő tövises pusztákat rendeli hozzá. Az Északkeleti-Kárpátok Feddema alapján a referencia időszakban jórészt a „hideg-nedves” klímátípussal jellemezhetők. Holdridge esetén a térség északnyugati része „hűvös-mérsékelt”, nedves erdő számára ideális, míg a hegyvonulat délkeleti felét már a hidegebb „boreális” kategóriába sorolja. A század végére Feddema és Holdridge esetén is várhatóan melegebb kategóriára való váltás történik a hőellátottságban a terület jó részén. Bár Feddema diszkrét módszerével vízellátottságban nem várható változás, a térségben a nedves erdőket várhatóan egyre inkább felváltják a szárazabb, üde erdők. A leghidegebb, legnedvesebb hő- és vízellátottság mindkét módszer alapján az Északnyugati-Kárpátok legmagasabb területein, a Magas-Tátrában jellemző. Míg ebben az alrégióban hőellátottságban változás egyik módszer szerint sem várható, addig Feddema alapján „hideg-nedves” és „nagyon-nedves” területek várhatóan kategória váltással a „hideg-nedvesbe” kerülnek. Ennek a változásnak a hatására a vegetáció a boreális esőerdők helyett várhatóan szárazabb, boreális nedves erdők felé tolódik el. Összességében a Kárpátok térségének hő- és vízellátottságában várható változás szárazabb vegetáció típusok megjelenéséhez vezethet.

A 43. ábrán látható, hogy egyes területek, mint például a Keleti-Kárpátok vonulata a referencia időszak során, valamint az RCP4.5 forgatókönyv alapján történő becslések szerint szezonális-típus szempontból közel homogén, addig az RCP8.5 szerint jelentősen nő a heterogenitás a század végére. Megfigyelhető továbbá, hogy a T-hez köthető szezonális

nyugat-keleti irányban váltja fel a P-hez köthető szezonalitást a referencia időszakból és az egyre pesszimistább éghajlati forgatókönyvek felé haladva.



43. ábra Szezonáltság-típusok területi eloszlása a Kárpátok térségében a CarpatClim adatok alapján meghatározott 1971–2000 időszakra (lent) és az RCP4.5 (bal) és RCP8.5 (jobb) scenáriók esetén az EUR-11 térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján a 2069–2098 időszakra vonatkozóan

6. Összefoglalás és kitekintés

Disszertációmban vizsgáltam a Kárpátok-térségének éghajlatát és az éghajlatváltozás folyamatát a Feddema-módszer (FEDDEMA, 2005) alapján, mely egy Thornthwaite-féle hő- és vízellátottságon alapuló éghajlat-osztályozási módszer. Az általam vizsgált régió megfelel a kutatásom során referencia adatbázisnak választott CarpatClim (SZALAI ET AL., 2013) által lefedett területnek. A Feddema-módszerrel kapott eredményeket összehasonlítottam a jóval elterjedtebb, szintén globális skálára megszerkesztett KÖPPEN (1936) és a Worldwide Bioclimatic Classification System (RIVAS-MARTÍNEZ ET AL., 2011) leíró jellegű biofizikai éghajlat-osztályozási módszerekkel. A térségben várható éghajlatváltozásra vonatkozó vizsgálataimhoz az EURO-CORDEX (JACOB ET AL., 2014; JACOB ET AL., 2020) adatbázisból használtam fel adatokat 10-10 globális és regionális klímamodellből összepárosított 19 klímamodellpárra vonatkozólag EUR-44 és EUR-11 felbontással, RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekre. Az éghajlatváltozást először Feddema eredeti, globális skálára megszerkesztett, diszkrét kategóriákon alapuló módszerével vizsgáltam. Ezt követően először alkalmaztam a Kárpátok térségére a Feddema-módszer kategóriákat elhagyó megközelítést, melyet Feddema-folytonosnak neveztem el. Vizsgálataimat különböző magassági régiókra bontva is elvégeztem.

Kutatásom során célom volt annak bemutatása, hogy a Feddema-módszerrel több információ adható egy térség éghajlati képének vizsgálata során, mint más, széles körben alkalmazott leíró osztályozások alkalmazásával. Bemutattam, hogy Feddema egyértelműbben értelmezhető szezonális tulajdonságokat rendel egy terület éghajlatához és azt, hogy összességében alkalmas a Kárpátok térségének változatos éghajlatának leírására. A Feddema-féle hő- és vízellátottság alapján meghatározható klímátípusok, a T és/vagy a P éven belüli szezonális ingadozása és a szezonális ingadozás mértéke alapján meghatározható szezonálitás-típusok együttesen kiadnak egy klímapárt. A Feddema-módszerrel összesen 23 klímapár különíthető el a Kárpátok térségére, mely visszaadja a térség változatos éghajlati képét. A módszerrel megkülönböztethető az alföldek éghajlata a Kárpátok éghajlatától, míg az Alföld éghajlata csak részben különböztető meg a Dunántúli-középhegység éghajlatától. Az összehasonlítás alapján a térség klímaszerkezete a Feddema- és a WBCS-módszer esetén heterogénebb, mint Köppen-módszerének alkalmazásakor, mely szerint a vizsgált terület 63%-át azonos klímátípus, a *Cfb* borítja. A Feddema- és a WBCS-módszerek körülbelül

négyszer több klímátípust eredményeznek, mint a Köppen-módszer. A vizsgált módszerek közül a Feddema- és a WBCS-módszer képes reprodukálni a térség éghajlati heterogenitását. Köppen módszere nem adja vissza térség változatos domborzatát követő éghajlati képet. Mind Feddema módszere, mind a WBCS kifejezi az éves és szezonális hő- és vízellátottságot, de nem azonos mértékben. A Feddema-módszer kezeli a szezonalitást a legátfogóbban, mert egyértelműbben értelmezhető információt ad a szezonális típusáról és a szezonális ingadozás nagyságáról is. A klíma- és szezonális-típusok elnevezése és szerkezete szerint a módszerek eltérő klímát eredményeznek a Kárpátok térségében. A leghidegebb éghajlati képet a Feddema-módszer, a legmelegebbet a WBCS eredményezi, amely emellett szárazabb is, mint a Feddema alapján kapott éghajlat a Kárpátok térségében. Összességében ESSENWANGER (2001) kritériumait követve eredményeim alapján Feddema módszere a legalkalmasabb a Kárpátok térségében jellemző éghajlat elemzésére.

Az éghajlatváltozás folyamatának vizsgálata során célt volt bemutatni a Feddema eredeti, diszkrét megközelítés alkalmazása alapján várható jövőbeni klíma- és szezonális-típus eloszlást. A diszkrét megközelítés esetén a Feddema-indexek alapján kategorizáltam az éghajlatot a FEDDEMA (2005)-ben bemutatott módszer szerint. Az RCP4.5 forgatókönyv esetén a legnagyobb együttes medián érték a területi lefedettség változásában a „hűvös-nyirkos” klímátípusok területi kiterjedésének növekedése esetén figyelhető meg 14% (EUR-11) és 12,9%-kal (EUR-44) és a „hideg-nyirkos” típusú terület csökkenése esetén 13,8% (EUR-11) és 15,1%-kal (EUR-44). Az RCP8.5 forgatókönyv esetén a legnagyobb medián növekedés a területi lefedettségben az EUR-11 felbontás esetén a „hűvös-nyirkos” területen várható 10,2% (EUR-11) és 8,9%-kal (EUR-44) míg a legnagyobb medián csökkenés a „hideg-nyirkos” területen várható 15,5% (EUR-11) és 17,6%-kal (EUR-44). Az RCP4.5 esetén a legnagyobb mértékű növekedés a hőellátottságban az RCA4-HadGEM2-ES (EUR-11) és az RACMO-HadGEM2-ES (EUR-44) modellpár, míg a legkisebb mértékű növekedést a hőellátottságban a HIRHAM5-EC-EARTH (EUR-11) és RCA4-MPI-ESM-LR (EUR-44) modellpár becsüli. A legnagyobb csökkenést a vízellátottságban a térségre a COSMO-HadGEM2-ES (EUR-44) szimuláció becsüli. Az RCP8.5 esetén a legnagyobb növekedést a hőellátottságban az RCA4- CM5A-MR (EUR-11) míg az EUR-44 esetén az RACMO-HadGEM2-ES (EUR-44) adja, a legnagyobb csökkenést a vízellátottságban pedig az RCA4-HadGEM2-ES (EUR-11) és az RCA4-CanESM2 (EUR-44). Az RCP4.5 forgatókönyvet követő szimulációkkal kapott szezonális-típusok esetén a legnagyobb

medián változás a „T magas” szezonálisával jellemezhető területek növekedése 7,3%-kal (EUR-11) és a „T és P magas” szezonálisú területek 6,9%-os csökkenése (EUR-44). Az RCP8.5 forgatókönyvet követő szimulációk esetén a legnagyobb medián változás a „T és P magas” szezonálisú területek csökkenésében várható 10,4%-kal (EUR-11) és 22,4%-kal (EUR-44). Az RCP8.5 forgatókönyv szerint továbbá a „T és P közepes” és „T és P magas” szezonálisága esetén mind a szélsőértékekben mind az együttes medián változásban csökkenés várható az EUR-11 (előbbi) és EUR-44 (utóbbi) felbontások esetén. Továbbá az RCP8.5-öt követő EUR-44 felbontású szimulációk esetén becsült „T és P extrém” szezonális-típus területi lefedettségében mind a mediánban mind a szélsőértékekben növekedés látszik. A szezonális-típusok jövőben várható eloszlásának becslése során az RCP4.5 esetén az „extrém” szezonálisú területek legnagyobb mértékű területi lefedettség növekedését becsülő modellek közé tartozik az ALADIN-CM5, RCA-4-HadGEM2-ES (EUR-11) és a COSMO-HadGEM2-ES (EUR-44). Az „extrém T” szezonális legnagyobb területen az RCA4-HadGEM2-ES és a COSMO-HadGEM2-es esetén várható míg a térségre a legnagyobb arányban magas „T” szezonálisát becsülő modellpár az RCP4.5-ös forgatókönyvet követő WRF-CM5A-MR mindkét felbontás esetén. RCP8.5 esetén az „extrém T” szezonális-típus területi lefedettségének legjelentősebb mértékű növekedését mutatják a RCA4-HadGEM2-ES, RCA4-MPI-ESM-LR (EUR-11) és RCA4-CanESM2 (EUR-44) modellpárok.

Az eredményeim alapján új hő- és vízellátottsági kategóriák megjelenése várható a térségben, melyek a referencia időszakban nem fordultak elő. Az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek szerint a „szemiárid” vízellátottsági és az RCP8.5 forgatókönyv szerint a „meleg” hőellátottsági kategóriába sorolható területek megjelenése várható a Kárpátok térségében a század végére. A „meleg-nyirkos” és „meleg-száraz” klímátípusok esetén is 0,3%-os együttes medián területi lefedettség várható az RCP8.5-öt követő EUR-11 felbontású szimulációk alapján. A „meleg-száraz” klímátípus esetén a különböző RCP8.5-öt követő modellpárok alapján várható lehetséges területnövekedésre kapott értékek tartománya 14%. Az RCP8.5 forgatókönyv alapján EUR-44 felbontás esetén kapott becslések szerint a RCA-4-CanESM2 adja a „meleg-szemiárid” és a RACMO-HadGEM2-ES a „meleg-szemiárid” és „meleg-száraz” klímátípusok legnagyobb várható területi kiterjedését. A projekciók bizonytalanságának tartománya a lefedettség várható változásának mértékében az említett klímátípusokra 17,8%, illetve 17%. A „hűvös-

szemiariid” klímátípus esetén az RCP4.5-öt követő különböző modellpárok alapján becsült várható területnövekedés százalékos aránya EUR-11 felbontásnál 1,4%-os tartományt fed le míg az RCP8.5 esetén már bizonytalanabb a várható területi lefedettség lehetséges tartományának bizonytalansága, 12,6%. Az EUR-44 esetén ezek rendre 15% és 15,3%. Az RCP4.5 esetén a COSMO-HadGEM2-ES az RCP8.5 esetén az RCA4-EC-EARTH adja a „hűvös-száraz” kategória legnagyobb területi lefedettségét. Új szezonális-típus megjelenése nem várható.

Az éghajlatváltozásra vonatkozó vizsgálataim magassági szintekre bontva is elvégeztem. A klímátípusok esetén növekvő heterogenitás várhatóan az alföldeken lesz a legerősebb, ahol az RCP8.5 forgatókönyv alapján megkétszereződik a klímátípusok száma a század végére. Ezzel szemben a homogenitásának növekedése valószínűsíthető a dombvidékeken és alacsony szintű hegységek esetén. A szezonális-típusok esetén az RCP4.5 forgatókönyv a legtöbb magassági kategóriában nem eredményez változást a szezonális-típusok számában, csak a közép- és magashegység régiókban várható csökkenés. Az RCP8.5 nem eredményez változást a szezonális-típusok számában az alacsony szintű-hegységekben, valamint a közepes- és magashegységi régiókban, a többi kategóriában csökkenés várható.

Céлом volt bemutatni továbbá, hogy a Feddema-folytonos megközelítéssel a Feddema-diszkrétthez képest többletinformáció adható egy térség éghajlatváltozásáról. Feddema-folytonos megközelítése esetén a kategória határok elhagyásával vizsgáltam a Feddema-indexekben várható eltolódás irányát és mértékét. A Feddema-folytonossal végzett vizsgálataimat az EUR-11 felbontású, RCA4-EC-EARTH szimulációk alapján mutattam be. A legnagyobb eltolódás a hő- és vízellátottságot meghatározó Feddema-indexek értékében a „hűvös-száraz” klímátípusba eső területek esetén figyelhető meg. A hőellátottságot meghatározó PET esetén az RCP8.5 forgatókönyvet követve ez több mint 50 mm növekedést jelent, azonban kategória váltáshoz nem vezet. Az újonnan megjelenő klímátípusokba esetén megmutatható, hogy a „meleg-szemiariid”, „meleg-száraz” és „hűvös-szemiariid”-hoz tartozó PET és a vízellátottságot jellemző I_m értékek a kategória határokhoz közel helyezkednek el. A Feddema-folytonossal megmutatható továbbá, hogy a „nedves” klímátípusok, amelyek éves átlagos I_m értéke nulla feletti a referencia-időszakban, várhatóan nedvesebbé válnak, míg a negatív I_m értékek esetén csökkenés várható a vízellátottságban. Megmutattam, hogy a teljes területre végzett vizsgálatok alapján a szezonálitáshoz köthető karakterisztikákban

nincs olyan jelentős mértékű eltolódás a kategória határokon belül, mint a hó- és vízellátottság esetén. Az I_s és A_s értékek eltolódására vonatkozó legnagyobb eltérés az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel kapott eredmények között a közép- és magashegységekben (tszf. > 1000 m) várható. Az I_s és A_s indexek eltolódása a „T és P” együttes, „magas” szezonálisával jellemezhető területeken a legnagyobb, ahol az A_s csökkenő értéke azt jelzi, hogy a szezonálisban egyre inkább a hőmérséklet változékonysága a meghatározó míg a növekvő I_s értékek erősödő szezonális változékonyságot jelentenek.

Megmutattam továbbá, hogy a referencia időszakban „hűvös-száraz” területek esetén a mintegy 200 mm PET növekedés ellenére várhatóan ezek a területek nem kerülnek új hőellátottsági kategóriába. A referencia időszakban „hideg-nedves” klímátípusba eső területek esetén megmutatható, hogy a század végére várhatóan a terület átlagos vízellátottsági karakterisztikái alapján már a melegebb „hűvös” és szárazabb „nyirkos” típusba kerül át a „hűvös-száraz” területeken tapasztalt értéknél kisebb, ≈ 150 mm PET növekedés esetén is. Megmutattam azt is, hogy a referencia időszak során „T és P közepes” szezonálisával jellemezhető területek az RCP8.5 forgatókönyv követése esetén a század közepéig nagyobb mértékben csak az A_s tekintetében mutatnak változást. Míg a 21. század első felében egyre inkább a „T” szezonálisája lesz jellemző, addig a század második felére a szezonális intenzitásában várható változás. A növekvő szezonális várhatóan a közepesről a magas kategóriába váltáshoz vezet, ekkor a Feddema-féle nedvességi index éven belüli ingadozása növekszik. A „T és P magas” szezonálisával jellemezhető területeken hasonló tendencia figyelhető meg.

Megmutattam továbbá, hogy a „hűvös-nedves” klímátípus esetén az egyes rácspontok hőellátottsága a referencia időszakban hasonló, a fő különbség a vízellátottság mértékében jelenik meg. Az egyes rácspontokhoz tartozó PET és I_m értékek jobban szórnak a jövőben, mint a referencia időszakban. A Feddema-folytonos megközelítéssel azt is megmutattam, hogy a „meleg-száraz” klímátípus esetén a rácspontok, egy kivétellel hasonló PET és I_m értékekkel rendelkeznek, addig a referencia időszakban ezek a rácspontok bár közel azonos hőellátottságúak, vízellátottság szempontjából széles tartományt fednek le a száraz kategóriában. Megmutattam továbbá, hogy az alföldeken a referencia időszakban „extrém T és P” szezonálisú területek esetén az egyes rácspontokhoz tartozó A_s és I_s értékek szélesebb tartományt fednek le a jövőben, főként az extrém szezonálisú kategóriában.

Ahogy a bevezetőmben említettem, a doktori tanulmányaimhoz köthető kutatás során lehetőségem nyílt Johannes Feddemával közös kutatómunkát végezni, melynek egyik eredménye a disszertációm tárgyában íródott SZABÓ ET AL. (2022) cikk, melyben Feddema is társszerző volt. A kutatás során több lehetséges fejlesztési és alkalmazási irányt is kijelöltünk a további közös munka reményében, azonban Feddema professzort több mint egy éve elvesztettük egy gyors lefolyású, halálos betegség következtében. Azonban a tervezett kutatási lehetőségekre röviden kitekintek. A közös munka során foglalkoztunk azzal, hogy a 20. századi adatok alapján validált éghajlat-osztályozási módszerek az éghajlatváltozás hatására már nem szükségképpen alkalmasak a teljes éghajlati spektrum leírására. Erre jutottak például FÁBIÁN ÉS MATYASOVSKY (2010) a Köppen-osztályozás alkalmazása során is, ahol az eredeti módszertant két további osztállyal bővítették, hogy a felmelegedés okozta trendet a módszertan azonosítani tudja. A Feddema-folytonos megközelítéssel a jelenlegi osztályozásban alkalmazott felső PET értékhatár elhanyagolható vagy új osztály határozható meg. Azonban ELGUDINI ET AL. (2014) arra jutottak, hogy a Feddema által használt THORNTHWAITE (1948) PET számítás nem lesz alkalmas globálisan a megváltozó éghajlat leírására. Ennek oka, hogy a Thornthwaite-féle PET a hőmérsékleten és a nappalok hosszán alapul. Fagypontra alatta a PET értéke 0, 26,5 °C-ig Thornthwaite saját egyenlete alapján határozta meg a PET-et és a 26,5 °C fölötti értékek esetén egy fix függvényhez van kötve a PET értéke, ekkor 37 °C felett a PET értékek csökkenésnek indulnak. A felmelegedés miatt ezért a Feddema-módszer alapját képező PET becslés egyes területeken hibás lehet. Feddemával ezért globális skálára vonatkozóan több becslést alkalmazva meghatároztuk a PET-et, és ez alapján a Feddema-indexek értékeit, majd célunk volt egy új, PET parametrizáció megalkotása. A Feddema-módszer másik fejlesztési lehetősége abban rejlik, hogy a négy Feddema-indexben várható változás irányát jelölve egyfajta klímairánytűvel minden pontban megadható legyen a klíma- és szezonálisban várható változás együttesen. Ennek egyik akadálya, hogy a szezonálisan változó elem nem folytonos index olyan szempontból, hogy az osztályozás ismerete nélkül az A_s értékek alapján nem egyértelmű, milyen értéktartományban jellemző a csapadék szezonálisitása és melyben a hőmérsékleté, ezért ennek módosítása lenne szükséges. Nehézség lehet továbbá, hogy a Feddema-folytonos megközelítés esetén, ha minden egyes rácsponton várható változás megjelenítése a cél, akkor az adatok felbontásától függően nehezen átlátható térképet kapunk. Nagyobb tájegységek, vagy valamilyen konkrét kutatási céllal kijelölt területek (pl. egy vegetáció típus jellemző

élőhelyének éghajlati vizsgálata) esetén több rácspont átlagértékei alapján kapott eredmények már megjeleníthetők lehetnek ezzel a módszerrel. További fejlesztési lehetőség a Feddema-diszkrét megközelítéshez kapcsolódik. Ács Ferenc témavezetőm tanácsára Feddemával arra jutottunk, hogy a jelenleg használt nevezéktan szubjektíven meghatározott kategóriákat jelöl. Például a „hűvös” hőellátottsági kategória egy szubjektív hőérzet, mely egyénenként eltérő lehet. Emiatt jövőbeni lehetőség, hogy a nevezéktan újragondolásával például a hőérzet esetén a rendelkezésre álló energiát kifejező elnevezések legyenek használva.

A kitekintés részeként röviden összefoglalom a doktori kutatásom eredményeinek lehetséges alkalmazási területeit, melyek véleményem szerint mind oktatási céllal, mind további kutatás kiindulási alapjaként felhasználhatók. A Feddema-osztályozás megkönnyíti az éghajlat és az éghajlatváltozás leírását azáltal, hogy a vizsgálatuk során szükséges nagyszámú változót foglalja rendszerbe. A Feddema-módszerrel külön leírható az éves- és szezonális hő- és vízellátottság és annak várható változása és összesített információ is adható a klímaváltozás jeléről. A disszertációmban először bemutatott, Feddema-indexek folytonos változására vonatkozó megjelenítésekkel több információ adható egy terület éghajlatáról, mint a diszkrét osztályok alkalmazásával. Ennek segítségével például vizsgálható mely területek számítanak „analógnak” valamely Feddema-indexhez köthető változás alapján. Például valamely mezőgazdasági szempontból fontos terület, vagy valamely élőlény élőhelyének változása, összeszűkülése esetén megmutatható lehet, hogy mely korábban nem alkalmas területek válnak az adott faj számára potenciálisan megfelelővé. Továbbá a Feddema-diszkrét és folytonos megközelítéssel a CMIP6 EURO-CORDEX domainre történő leskálázása után vizsgálhatóak lesznek az RCP és SSP forgatókönyv alapú szimulációk közötti hasonlóságok és különbségek. Az SSP forgatókönyveket követő adatokra Feddema-módszere még csak egyszer került alkalmazásra NAVARRO ET AL. (2022) tanulmányában. Oktatási szempontból a Feddema-diszkréttel kapott klímáparok segítségével jól megmutathatók és magyarázhatóak a Kárpátok térségének változatos domborzatából eredő éghajlati különbségek. A klíma- és szezonális-típusok egyszerű elnevezésének köszönhetően akár a módszertan mélyebb megismertetése nélkül is értelmezhetőek az eredmények. A Feddema-féle éghajlati-osztályozási módszerrel megmutatható, hogy mely területen milyen típusú éghajlatváltozási folyamat várható (pl. szárazodás, melegedés) valamint a jövőben várható klíma- és szezonális-típusok területi

eloszlása is. Megmutatható a hatásokban várható különbség az egyes éghajlati forgatókönyvek szerint, ezzel elmagyarázva a különböző scenáriók használatának fontosságát. Ezzel rá lehet világítani például a kibocsátáscsökkentés fontosságára, továbbá, hogy mely területeken milyen típusú változáshoz kell majd alkalmazkodni. A Feddema-folytonos megközelítéssel a fentiek mellett az is könnyen elmagyarázhatóvá válik, hogy mely index változásai dominálnak majd, ezek esetén milyen különbségek várhatóak a forgatókönyvekben.

7. Köszönetnyilvánítás

Ez a záró fejezet a disszertációm utoljára és bizonyos szempontból legnehezebben megírt része. Nem azért, mert nincs kinek hálás legyek, épp ellenkezőleg. Annyi ember támogatott az elmúlt években, hogy végtelenül nehéz visszafogni magam és nem oldalakon át elnyúló köszönetnyilvánítást írni. Mindenekelőtt szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Ács tanár úrnak és Hajninak, amiért szaktudásukkal segítették munkámat és tanácsokkal láttak el a kutatás során. Hálás vagyok, hogy két ilyen elhivatott és nagy tudású kutató szárnyai alatt fejlődhettem és köszönöm nekik, hogy kitartottak mellettem. Szeretnék köszönetet mondani továbbá Michal Beldának, akihez még évekkal a prágai Campus Mundi szakmai gyakorlatom után is tanácsért fordulhatok. Köszönöm továbbá a szívszorítóan rövid, de tartalmas, közös kutatási időszakot Johannes Feddemának, akinek hozzáállása a kutatás világához a legnehezebb pillanatokban is emlékeztetett arra, hogy miért vágtam bele én is ebbe a pályába. És persze köszönöm David Atkinsonnak, aki támogatott, amikor Feddemának már nem volt lehetősége. Folytatjuk a munkát.

Köszönöm családomnak a folyamatos támogatást és szeretetet. Nehéz volt számtalan közös élményről lemondani „a tudomány oltárán” és csodás volt minden pillanat, amit együtt tudtunk tölteni a sok feladat ellenére. Köszönöm nagyszüleimnek a Rex nézéseket, az elmúlt években a náluk töltött esték során pihentem talán igazán. Köszönöm bátyámnak, hogy mindig hívott, biztatott és különböző programokat talált ki, hogy legyen együtt töltött idő. Köszönöm másik nagyszüleimnek, hogy bekapcsolódtak az életembe és amiben csak tudták, támogatták a tanulmányaimat.

Köszönöm a másik családomnak, azaz a barátaimnak, vagy ahogy imádott anyukám mondaná, „Amanda barátainak és üzletfeleinek”, hogy több mint egy évtizede (tehát az egyetemi tanulmányaim kezdete óta) elfogadják, hogy nálam első az iskola. Köszönöm, hogy mindannyian, vagy közös tanulások vagy pont, hogy a pihenés óráiban eltöltött szép pillanatokkal támogattátok, hogy a doktoris évek is, minden nehézség ellenére jó élményként maradjanak meg. Ha mindenkinek szólnék pár szót, ez hosszabb fejezet lenne, mint az eredményeim, így csak röviden, de név szerint köszönök mindent Verának, akire általános iskolás korom óta mindig számíthatok. Köszönöm Horváth Annámnak, Szabóinnahotnak, Lucámnak, Popikámnak Bencének, Dávidnak, Ivánnak, Márknak és persze drága Colikámnak. Köszönöm Timikémnek, aki mindig olyan büszke rám, mintha lenne egy

második anyukám. Köszönöm Zsófinak, Eszternek és persze Katykémnek, akivel a mai napig élmény a közös tanulás. Köszönöm drága Imolkámnak, Kormos Annámnak, Robertámnak és Ricsinek. Köszönök mindent a „főnök” Péternek és persze köszönöm Ildinek, Kis Annának, Annamarinak. Köszönöm Tamásnak és Liliannak és persze Dórimnak. Köszönök mindent drága Eszteremnek, „tündérkeresztanya” Dorkámnak, Rebimnek, Rékámnak, Barbarámnak, Daninak, Lukács Dávidnak, Lukács Péternek és persze Adorjánnak. Köszönöm Iwetának, Isabelnek, Damiannek, Petrnek és külön köszönöm Janámnak. Köszönöm a két „nagynénimnek”, Fanninak és Györgyinek. Köszönöm, hogy segített elérni a magabiztos angol nyelvtudást Adélnak és Tomnak. Köszönöm Rebekámnak a kondér spenótokat, köszönöm előkelő Bencémnek és nem lehetek elég hálás Pannikámnak. Köszönöm Timinek és Erzsinek. Köszönöm Johnnak, aki a doktori véghajrá során az egyik legnagyobb támaszom volt. Végezetül köszönöm neked Csenge. Nem tudom mi lenne velem nélküled, de szerencsére ezt sose fogom megtudni. Mert te mindig ott vagy. Sosem felejttem el, hogy ott álltunk a hatodikonm a folyosó végén és megfogadtuk, hogy együtt végig csináljuk. És most itt vagyunk, drága doktorom.

Végezetül pedig szeretném külön megköszönni anyukámnak, akinek mindent köszönhetek, ami én vagyok. Csak remélni merem, hogy tudja, hogy mikor engem dicsér, akkor saját magára is büszke lehet, hiszen olyan mintha róla copy paste-eltek volna. Én pedig büszke vagyok, hogy rá hasonlíthatok. Köszönöm neki, hogy sosem erőltette, de minden erejével támogatta az egyetemi tanulmányaimat. Köszönöm, hogy bármikor bármilyen aprósággal hívhattam tanácsért, amikor már kimerült voltam, hogy nem tudtam merre vagyok arccal előre és a legkisebb önálló döntést sem tudtam meghozni. Köszönöm, hogy biztatott, hogy utazzak, próbáljam ki külföldön, bátran álljak ki magamért és köszönöm, hogy mindig emlékeztetett rá, hogy élményekre nem szabad sajnálni. Köszönöm, hogy elviselte, hogy sosem értem rá igazán az elmúlt években és a laptop még karácsonykor is zúgott. És köszönöm, hogy mindig emlékeztet rá, hogy büszke rám és szerinte fontos, amit csinálok. Nekem ennél nincs jobb biztatás. Rá mindig számíthatok. És mindez számára teljesen természetes, hiszen, ahogy ő szokta mondani, ő az én anyukám.

Köszönöm a Tempus Közalapítványnak, hogy Campus Mundi ösztöndíjprogram keretében szakmai gyakorlaton vehettem részt a Charles University Légekőrfizikai Tanszékén és a University of Victoria Földrajz Tanszékén. A szakmai gyakorlatok során szerzett ismeretek nagyban hozzájárultak a doktori képzés során kitűzött céljaim megvalósításához.

A kutatás során használt referencia adatok és éghajlati szimulációk ingyenesen elérhetőek és letölthetőek a CarpatClim és az EURO-CORDEX projektek jóvoltából.

CARPATCLIM Database © European Commission - JRC, 2013.

8. Irodalomjegyzék

- Ács F. és Breuer, H. (2013): Biofizikai éghajlat-osztályozási módszerek. EGYETEMI JEGYZET, Budapest: ELTE TTK. 131 p.
- Ács, F., Breuer, H., Skarbit, N., Krakker, D. (2013): Magyarország éghajlata a XX. században különböző éghajlat-osztályozási módszerek alapján. *Léggör*, 58
- Ács, F., Breuer, H., Skarbit, N. (2015): Climate of Hungary in the twentieth century according to Feddema. *Theoretical and Applied Climatology*, 119, 161–169. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1103-5>
- Ács, F., Takács, D., Breuer, H., Skarbit, N. (2017): Climate and climate change in the Austrian-Swiss region of the European Alps during the twentieth century according to Feddema. *Theoretical and Applied Climatology*. 133, 593–611. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2230-6>
- Ács, F. (2017): On Twenty-First Century Climate Classification: European Multiregional Analyses. Beau Bassin, Mauritius: Lambert Academic Publishing, 92 pp. ISBN: 978-620-2-00302-5
- Ács, F., Takács, D., Breuer, H., Skarbit, N. (2018): Climate and climate change in the Austrian–Swiss region of the European Alps during the twentieth century according to Feddema. *Theoretical and Applied Climatology*, 133, 899–910. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2230-6>
- Ács, F., Zsákai, A., Kristóf, E., Szabó, A. I., Breuer, H. (2020): Carpathian Basin climate according to Köppen and a clothing resistance scheme, *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 299–307. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03199-z>
- Ács, F., Zsákai, A., Kristóf, E., Szabó, A. I., Breuer, H. (2021a): Human thermal climate of the Carpathian Basin. *International Journal of Climatology*. 2021;41 (Suppl. 1): E1846–E1859. <https://doi.org/10.1002/joc.6816>
- Ács F, Zsákai, A., Kristóf, E., Szabó, A. I., Feddema, J, Breuer, H. (2021b): Clothing resistance and potential evapotranspiration as thermal climate indicators—The example of the Carpathian region *International Journal of Climatology* ,41, 3107–3120. <https://doi.org/10.1002/joc.7008>
- Ács, F.; Kristóf, E.; Szabó, A.I.; Breuer, H.; Szalkai, Z.; Zsákai, A. (2022a): New Air Temperature- and Wind Speed-Based Clothing Thermal Resistance Scheme—Estimations for the Carpathian Region. *Climate*, 10, 131. <https://doi.org/10.3390/cli10090131>
- Ács, F., Kristóf, E., Zsákai, A. (2022b): Individual local human thermal climates in the Hungarian lowland: Estimations by a simple clothing resistance-operative temperature model. *International Journal of Climatology*, 1–20. <https://doi.org/10.1002/joc.7910>
- Ács, F., Kristóf, E., Szabó, A.I, Zsákai, A. (2022c): New statistical deterministic method for estimating human thermal load and sensation — application in the Carpathian region. *Theoretical and Applied Climatology* 151, 691–705. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04297-w>
- Antofie, T., Naumann, G., Spinoni, J., Vogt, J. (2015): Estimating the water needed to end the drought or reduce the drought severity in the Carpathian region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 177–193. <https://doi.org/10.5194/hess-19-177-2015>

- Bartholy, J., Pongrácz, R., Pattantyús-Ábrahám, M. (2009): Analyzing the genesis, intensity, and tracks of western Mediterranean cyclones. *Theoretical and Applied Climatology*, 96, 133–144. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-008>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., Wood, E. F. (2018): Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data* 5, 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Belda, M., Holtanová, E., Halenka, T. and Kalvová, J. (2014): Climate classification revisited: from Köppen to Trewartha. *Climate Research*, 59, 1–13. <https://doi.org/10.3354/cr01204>
- Belda, M., Holtanová, E., Halenka, T., Kalvová, J., Hlávka, Z. (2015): Evaluation of CMIP5 present climate simulations using the Köppen-Trewartha climate classification. *Climate Research* 64, 201–212. <https://doi.org/10.3354/cr01316>
- Belda, M., Holtanová, E., Kalvová, J., Halenka, T. (2016): Global warming-induced changes in climate zones based on CMIP5 projections. *Climate Research* 71, 17–31. <https://doi.org/doi:10.3354/cr01418>
- Benestad, R. co-authors (2021): Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use. EURO-CORDEX Guidelines, Version 1.1
- Bindhu, V.M., Smitha, P.S., Narasimhan, B., Annamalai, H. and Srinivasan, G. (2021): Köppen–Trewartha climate classification as a diagnostic tool to identify pronounced changes in the projected climate by the general circulation models over India. *International Journal of Climatology*, 41, 6616–6639. <https://doi.org/10.1002/joc.7216>
- Bouma, E. (2005): Development of comparable agro-climatic zones for the international exchange of data on the efficacy and crop safety of plant protection products. *OEPP/EPPO Bulletin* 35, 233–238.
- Breuer, H., Ács, F., Skarbit, N. (2017): Climate change in Hungary during the twentieth century according to Feddema. *Theoretical and Applied Climatology*, 127(3–4), 853–863. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1670-0>
- Breuer, H., Ács, F., Skarbit, N. (2018): Observed and projected climate change in the European region during the twentieth and twenty-first centuries according to Feddema. *Climatic Change* 150, 377–390. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2271-6>
- Buksha, I. F., Pyvovar, T. S., Buksha, M. I., Pasternak, V. P., Buksha, T. I. (2021): Modelling and forecasting the impact of climate change on forests of Ukraine for 21st century time horizon. *Forestry Ideas*, 27, 2(52), 470–482.
- Calatayud, J., Neuman, M., Rojas, A., Eriksson, A. Rosvall, M. (2021): Regularities in species' niches reveal the world's climate regions. *eLife*, 10, e58397. <https://doi.org/10.7554/eLife.58397>
- Cannon, A. J. (2012): Köppen versus the computer: comparing Köppen-Geiger and multivariate regression tree climate classifications in terms of climate homogeneity, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 217–229. <https://doi.org/10.5194/hess-16-217-2012>
- Caracciolo, D., Pumo, D., Viola, F. (2018): Budyko's based method for annual runoff characterization across different climatic areas: an application to United States. *Water Resources Management*, 32, 3189–3202. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1984-7>

- Carter, D. B. és Mather, J. R. (1966): Climatic classification for environmental biology. *Publications in Climatology*, 19(1), 305–395.
- Castro M, Gallardo C, Jylha K, Tuomenvirta H (2007): The use of climate-type classification for assessing climate change effects in Europe from an ensemble of nine regional climate models. *Climatic Change* 81, 329–341. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9224-1>
- Chen, D., Chen, H. W. (2013): Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010. *Environmental Development* 6, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2013.03.007>
- Cheval, S., Birsan, M-V., Dumitrescu, A. (2014): Climate variability in the Carpathian Mountains Region over 1961-2010. *Global and Planetary Change*, 118, 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.04.005>
- Christensen, J. H., Christensen, O. B. (2007): A summary of the PRUDENCE model projection of changes in European climate by the end of this century. *Climate Change*, 81, 1–6. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9211-6>
- Colin, J., Déqué, M., Radu, R., Somot, S. (2010): Sensitivity study of heavy precipitation in Limited Area Model climate simulations: influence of the size of the domain and the use of the spectral nudging technique, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 62(5), 591-604. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00467.x>
- Coppola, E., co-authors (2021): Assessment of the European Climate Projections as Simulated by the Large EURO-CORDEX Regional and Global Climate Model Ensemble. *JGR Atmospheres*, 126(4). <https://doi.org/10.1029/2019JD032356>
- Cuculeanu, V., Tuinea, P., Bălteanu, D. (2002): Climate change impacts in Romania: Vulnerability and adaptation options. *GeoJournal*, 57, 203–209. <https://doi.org/10.1023/B:GEJO.0000003613.15101.d9>
- Daru, B.H. (2021): Exploring a new way to think about climate regions. *eLife*, 10, e67422. <https://doi.org/10.7554/eLife.67422>
- Deniz, A., Toros, H., Incecik, S. (2011): Spatial variations of climate indices in Turkey. *International Journal of Climatology*, 3:394–403. <https://doi.org/10.1002/joc.2081>
- de Candolle, A. (1974): Constitution dans le regne vegetal des groupes physiologiques applicables a la géographie botanique ancienne et moderne. *Arch. Sci. Phys. Nat.* 50. 5-42.
- Déqué, M. (2007): Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57(1–2), 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.030>
- Diaz, H. F., Brown, T. J. (1993): An Objective Classification of Climatic Regions in the Pacific and Indian Oceans. In: K. T. Redmond és V. L. Tharp, Editors. 1993. Proceeding of the Ninth Annual Pacific Climate (PACLIM) Workshop, April 21–24. 1992. California Department of Water Resources, Interagency Ecological Studies Program, Technical Report 34.

- Domonkos, P. (2003): Recent precipitation trends in Hungary in the context of larger scale climatic changes. *Natural Hazards*, 29, 255–271. <https://doi.org/10.1023/A:1023690014955>
- Dove, H. W. (1853): *The Distribution of Heat Over the Surface of the Globe*. Translated from German for the British Association for the Advancement of Science, Taylor and Francis, 27 pp. plus maps.
- Elguindi, N., Grundstein, A. (2013): An integrated approach to assessing 21st century climate change over the contiguous U.S. using the NARCCAP RCM output. *Climatic Change* 117, 809–827. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0552-z>
- Elguindi, N., Grundstein, A., Bernander, S., Turuncoglu, U., Feddema, J. (2014): Assessment of CMIP5 global model simulations and climate change projections for the 21st century using a modified Thornthwaite climate classification. *Climatic Change*, 122, 523–538. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1020-0>
- Essenwanger, O. M. (2001): *Classification of climates, world survey of climatology 1C*. General climatology. Elsevier, Amsterdam, 126.
- Fábián, Á.P. és Matyasovszky, I. (2010): Analysis of climate change in Hungary according to an extended Köppen classification system, 1971–2060. *Időjárás*, 114(4), 251–261.
- Feddema, J. J. (2005): A revised Thornthwaite-type global climate classification. *Physical Geography*, 26, 442–466. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.26.6.442>
- Feng, S., Hu, Q., Huang, W., Ho, C., Li, R., Tang, Z. (2014): Projected climate regime shift under future global warming from multi-model, multi-scenario CMIP5 simulations. *Global and Planetary Change*, 112, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.11.002>
- Fernández, J., Frías, M.D., Cabos, W.D., Cofiño, A. S., Domínguez, M., Fita, L., Gaertner, M. A., García-Díez, M., Gutiérrez, J. M., Jiménez-Guerrero, P., Liguori, G., Montávez, J. P., Romera, R., Sánchez, E. (2019): Consistency of climate change projections from multiple global and regional model intercomparison projects. *Climate Dynamics*, 52, 1139–1156. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4181-8>
- Gadgil, F. és Joshi, N. V. (1983): Climatic clusters of the Indian region. *Journal of Climatology* 3, 47–63. <https://doi.org/10.1002/joc.3370030105>
- Gallardo, C., Gil, V., Hagel, E., Tejada, C., Castro, M. (2013): Assessment of climate change in Europe from an ensemble of regional climate models by the use of Köppen-Trewartha classification. *International Journal of Climatology*, 33(9), 2157–2166. <https://doi.org/10.1002/joc.3580>
- García, R. A., Cabeza, M., Rahbek, C., Araújo, M. B. (2014): Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science*, 344, 1247579. <https://doi.org/10.1126/science.1247579>
- Gardner, A. S., Maclean, I. M. D., Gastor, K. J. (2020): A new system to classify global climate zones based on plant physiology and using high temporal resolution climate data. *Journal of Biogeography* 47(10), 2091–2101. <https://doi.org/10.1111/jbi.13927>
- Ganem, K. A., Xue, Y., Rodrigues, A.d.A., Franca-Rocha, W., Oliveira, M. T. d., Carvalho, N. S. d., Cayo, E. Y. T., Rosa, M.R., Dutra, A.C., Shimabukuro, Y.E. (2022): Mapping South America's Drylands through Remote Sensing—A Review of the Methodological Trends and Current Challenges. *Remote Sensing*, 14, 736. <https://doi.org/10.3390/rs14030736>

- Gao és Giorgi (2008): Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model. *Global and Planetary Change*, 62, 195–29. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.02.002>
- Geiger, R. (1954): Klimaklassifikation der Klimate nach W. Köppen [in Landolt Börnstein (eds.) Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, alte Serie Vol. 3. Springer, Berlin. 603-607.
- Geiger, R. (1961): Überarbeitete Neuausgabe von Geiger, R.: Köppen-Geiger / Klima der Erde. (Wandkarte 1:16 Mill.) – Klett-Perthes, Gotha.
- Giorgi, F., Elguindi, N., Cozzini, S., Giuliani, G. (2011): Regional climatic model RegCM user manual version 4.2. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics Strada Costiera, Trieste
- Giorgi, F. és Gutowski, W. L. (2015): Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, 40. 467–490. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217>
- Gnanadesikan, A. és Stouffer, R. J. (2006): Diagnosing atmosphere-ocean general circulation model errors relevant to the terrestrial biosphere using the Köppen climate classification. *Geophysical Research Letters*, 33, L22701. <https://doi.org/10.1029/2006GL028098>
- Grisebach, A. R. H. (1866): Die Vegetationsgebiete der Erde, übersichtlich zusammengestellt. Petermanns Mitteilungen 12:45–53
- Grundstein, A. (2008): Assessing climate change in the contiguous United States using a modified Thornthwaite climate classification scheme. *The Professional Geographer*, 60(3), 398–412. <https://doi.org/10.1080/00330120802046695>
- Guan, Y., Lu, H., He, L., Adhikari, H., Pellikka, P., Maeda, E. and Heiskanen, J. (2020): Intensification of the dispersion of the global climatic landscape and its potential as a new climate change indicator. *Environmental Research Letters*, 15, 114032. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba2a7>
- Guan, Y., Lu, H., He, L., Kang, Y., Adhikari, H., Zhang, J. and Pellikka, P. (2021): Intensified fragmentation and shrinkage of the polar climate zone in the Arctic. *International Journal of Climatology*, 41, E3021–E3033. <https://doi.org/10.1002/joc.6899>
- Hanf, F., Körper, J., Spangehl, T., Cubasch, U. (2012): Shifts of climate zones in multi-model climate change experiments using the Köppen climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 21(2), 111– 123. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0344>
- Hettner, A. (1930) Die Klimate der Erde. Leipzig: B.G. Teubner.
- Holdridge, L.R. (1947): Determination of world plant formations from Simple climatic data. *Science*, 105, 367–368. <https://doi.org/10.1126/science.105.2727.367>
- Holdridge, L.R. (1967): Life Zone Ecology. San Jose: Tropical Science Center.
- Hrnjak, I. Lukic, T., Gavrilov, M. B., Markovic, S. B., Unkasevic, M, Tosic (2014): Aridity in Vojvodina, Serbia, *Theoretical and Applied Climatology*, 115:323–332. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0893-1>

- Humboldt, A. és Bonpland, A. (1807.): Ideen zu einer Geographie der Pflanzen nebst einem Naturgemalde der Tropenländer. J.G. Cotta, Tübingen, Paris. 182 pp
- Humboldt, A. (1817): "Lines of the geography of plants," from *De distributione plantarum (On the Distribution of Plants)* by Alexander von Humboldt
- 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.
- IPCC, 2021: Climate Change (2021): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896
- Jacob, D., co-authors (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 14, 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Jacob, D., co-authors. (2020): Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Regional Environmental Change* 20, 51. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01606-9>
- Jylhä, K., Tuomenvirta, H., Ruosteenoja, K., Niemi-Hugaerts, H., Keisu, K. and Karhu, J.A. (2010): Observed and projected future shifts of climatic zones in Europe and their use to visualize climate change information. *Weather, Climate and Society*, 2, 148–167. <https://doi.org/10.1175/2010WCAS1010.1>
- Kartika, T. Kushardono, D., Setiawan, Y., Ibrahim, A., Kustiyo, Sutanto, A. Noviar, H., Khomarudin, M. R., Carolita, I., Tosiani, A., Ubay, M. S. N., Taufik, M., Al-Khudri, A. (2022): Identification method of vegetation cover changes derived from mosaic Landsat-8 Data: Case Study Sumatera, Kalimantan, and Java Island. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1109, 010260. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1109/1/012060>
- Kelly, A.E. és Goulden, M.L. (2008): Rapid shifts in plant distribution with recent climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 11823–11826. <https://doi.org/10.1073/pnas.0802891105>
- Keim, B. D., Meeker, L. D., Slater, J. F. (2005): Manual synoptic climate classification for the East Coast of New England (USA) with an application to PM_{2.5} concentration. *Climate Research*, 28 (2), 143–153. <https://doi.org/10.3354/cr028143>
- Knoben, W. J. M., Woods, R. A., Freer, J. E. (2018): A quantitative hydrological climate classification evaluated with independent streamflow data. *Water Resources Research*, 54, 5088–5109. <https://doi.org/10.1029/2018WR022913>

- Köppen, W. (1900): Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt (Attempted climate classification in relation to plant distributions). *Geographische Zeitschrift*, 6(593–611), 657–679.
- Köppen, W. (1918): Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf (Classification of climates according to temperature, precipitation and seasonal cycle). *Petermanns Geogr. Mitt.*, 64, 193–203, 243–248.
- Köppen, W. (1936): Das geographische system der klimata. In: W. Köppen, R. Geiger and C. Teil (Eds.) *Handbuch der Klimatologie*. Berlin: Gebrüder Borntraeger. 44 p.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006): World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Krstic, M., Cvjeticanin, R., Smailagic, J., Govedar, Z. (2014): Climate-vegetation characteristics of Kopaonik mountain in Serbia, *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 9(3):135-145
- Krstic, M., Babic, V., Kanjevac, B. (2019): Climate characteristics of a hilly-mountainous area in Eastern Serbia. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(8), 5061-5069.
- Lakatos, M., Szentimrey, T., Bihari, Z., Kovács, T., Szalai, S. (2013): Investigation of climate extremes in the Carpathian region on harmonized data. In: Šiška B. et al.: *Environmental changes and adaptation strategies*. Slovakia, Skalica, 9th – 11th September 2013
- Lakatos, M., Weidinger, T., Hoffmann, L., Bihari, Z., Horváth, Á. (2020): Computation of daily Penman-Monteith reference evapotranspiration in the Carpathian Region and comparison with Thornthwaite estimates. *Advances in Science and Research*, 16, 251–259. <https://doi.org/10.5194/asr-16-251-2020>
- Lang, D., Zheng, J., Shi, J., Liao, F., Ma, X., Wang, W., Chen, X., and Zhang, M. (2017): A Comparative Study of Potential Evapotranspiration Estimation by Eight Methods with FAO Penman–Monteith Method in Southwestern China, *Water*, 9, 734. <https://doi.org/10.3390/w9100734>
- Lenoir, J., Bertrand, R., Comte, L., Bourgeaud, L., Hattab, T., Murienne, J., Grenouillet, G. (2020): Species better track climate warming in the oceans than on land. *Nature Ecology and Evolution*, 4, 1044–1059. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1198-2>
- Linsser, K. (1867): Untersuchungen über die periodischen Lebenserscheinungen der Pflanzen. *Mem Acad Imper Sci St. Petersburg*, ser. 7, 11(7):1–87
- Linsser, K. (1869): Untersuchungen über die periodischen Lebenserscheinungen der Pflanzen. *Mem Acad Imper Sci St. Petersburg*, ser. 7, 13(8):1–87
- Lohmann, U., Sausen, R., Bengtsson, L., Cubasch, U., Perlwitz, J., Roeckner, E. (1993): The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models. *Climate Research* 3(3), 177–193. <https://www.jstor.org/stable/24863394>
- Lopez Fernandez, M. L. és Lopez Fernandez, M. S. (2018): Worldwide Bioclimatology Manual and Guide. *Naturaleza en Hispania*, 5 (8)

- Lü, Y., Jiang, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., Tao, H. (2020): Simulation and projection of climate change using CMIP6 Multi-models in the Belt and Road region. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 12, 389–403. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1226.2020.00389>
- Maraun, D. és Widmann, M. (2018): Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781107588783>
- Melo, M., Lapin, M., Pecho, J. and Kuržicová, A. (2013): Climate trends in the slovak part of the carpathians. In: J. Kozak, K. Ostapowicz, A. Bytnerowicz and B. Wyzga (Eds.) *The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability*, *Environmental Science and Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 131– 150. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12725-0_10
- Meybeck, M., Green, P., Vörösmarty, C. (2001): A New Typology for Mountains and Other Relief Classes: An Application to Global Continental Water Resources and Population Distribution. *Mountain Research and Development*, 21, 34-45. <http://www.jstor.org/stable/3674130>.
- Mihailović, D.T., Lalić, B., Drešković, N., Mimić, G., Djurdjević, V. and Jančić, M. (2015): Climate change effects on crop yields in Serbia and related shifts of Köppen climate zones under the SRES-A1Band SRES-A2. *International Journal of Climatology*, 35, 3320– 3334. <https://doi.org/10.1002/joc.4209>
- Moss, R., Edmonds, J., Hibbard, K., Manning, M. R., Rose, S. K, Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., Wilbanks, T. J. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P., Jarvis, A., Ramirez-Villegas, J. (2020): High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assesments. *Scientific Data*, 7. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0343-8>
- Navarro, A., Merino, A., Sánchez, J. L., García-Ortega, E., Martín, R., Tapiador, F. J. (2022): Towards better characterization of global warming impacts in the environment through climate classifications with improved global models. *International Journal of Climatology*, 1–21. <https://doi.org/10.1002/joc.7527>
- Nimac, I., Tradić, M. P. (2016): New 1981-2010 climatological normal for Croatia and comparison to previous 1961-1990 and 1971-2000 normals. Proceedings of the GeoMLA Conference, Belgrade, Serbia, June 2016
- Nistor, M., Gualtieri, A. F., Cheval, S., Dezsi, S., Botan, V. E. (2016): Climate change effects on crop evapotranspiration in the Carpathian Region from 1961–2010. *Meteorological Applications*, 23, 462–469. <https://doi.org/10.1002/met.1570>
- Oliver, J. E. (1991): The history, status and future of climatic classification. *Physical Geography*, 12, 231–251. <https://doi.org/10.1080/02723646.1991.10642430>
- PannEx White Book (2019): A GEWEX Regional Hydroclimate Project (RHP) over the Pannonian Basin, WCRP Report 3/2019. World Climate Research Programme (WCRP): Geneva, Switzerland. pp. 108.

- <https://www.wcrp-climate.org/WCRP-publications/2019/WCRP-Report-No3-2019-PannEx-WB.pdf>.
- Paltineanu, C., Mihailescu, I. F., Seceleanu, I., Dragota, C., Vasenciuc, F. (2007): Using aridity indices to describe some climate and soil features in Eastern Europe: a Romanian case study. *Theoretical and Applied Climatology*, 90, 263–274. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0295-3>
- Papagiannopoulou, C., Miralles, D. G., Demuzere, M., Verhoest, N. E. C., Waegeman, W. (2018): Global hydro-climatic biomes identified via multitask learning. *Geoscientific Model Development*, 11, 4139–4153. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-4139-2018>
- Park, B-J., Kim, Y-H., Min, S-K. (2018): Antropogenic and Natural Contributions tot he Lengthening of the Summer Season in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate*, 1, 6803–6819. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0643.1>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon T. A. (2007): Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrological Earth System Science*, 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Péczely, Gy., 1979: Éghajlattan. Tankönyvkiadó Vállalat, Budapest, 336 p.
- Phillips, T. J. és Bonfils, C. J. W. (2015): Köppen bioclimatic evaluation of CMIP historical climate simulations. *Environmental Research Letters*, 10, 064005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/6/064005>
- Puga, G., Anderson, K., Jones, G., Tchatoka, F. D., Umberger, W. (2022): A climatic classification of the world's wine regions. *Oeno One*, 56(2). <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.4627>
- Qaderi, M. M., Martel, A. B., Dixon, S. L. (2019): Environmental Factors Influence Plant Vascular System and Water Regulation. *Plants*, 8(3),65. <https://doi.org/10.3390/plants8030065>
- R Core Team (2019): R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing, Vienna. URL: <http://www.R-project.org/>
- Radaković, M. G., Tošić, I., Bačević, N., Mladjan, D, Gavrilov, M. B., Marković, S. B. (2018): *Theoretical and Applied Climatology*, 133:887–898. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2220-8>
- Rahimi, J., Khaili, A. and Butterbach-Bahl, K. (2019): Projected changes in modified Thornthwaite climate zones over Southwest Asia using a CMIP5 multi-model ensemble. *International Journal of Climatology*, 39, 4575– 4594. <https://doi.org/10.1002/joc.6088>
- Rajczak, J., és Schär, C. (2017): Projections of future precipitation extremes over Europe: A multimodel assessment of climate simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 10773–10800. <https://doi.org/10.1002/2017JD027176>
- Raziei, T. (2022): Climate of Iran according to Köppen-Geiger, Feddema, and UNEP climate classifications. *Theoretical and Applied Climatology*, <https://doi.org/10.1007/s00704-022-03992-y>
- Rivas-Martínez, S., Rivas-Saenz, S., Penas, A. (2011): Worldwide Bioclimatic Classification System. *Global Geobotany*, 1, 1–634. http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics_0.htm
- Rockel, B., Will, A., and Hense, A. (2008): The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM), *Meteorologische Zeitschrift*, 17, 347–348. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0309>

- Rogelj, J., Meinshausen, M., Knutti, R. (2012): Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change*, 2, 248–253. <https://doi.org/10.1038/nclimate1385>
- Rohli, R. V., Joyner, T.A., Reynolds, S.J. and Ballinger, T.J. (2015): Overlap of global Köppen–Geiger climates, biomes, and soil orders. *Physical Geography*, 36, 158–175. <https://doi.org/10.1080/02723646.2015.1016384>
- Rohli, R. V. és Vega, A. J. (2018): *Climatology*. Jones & Bartlett Learning, Burlington, MA.
- Rubel, F. és Kottek, M. (2010): Observed and projected climate shifts 1901–2100 depicted by world maps of the Köppen–Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 19, pp.135–141. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0430>
- Rubel, F., Brugger, K., Haslinger, K., Auer, I. (2017): The climate of the European Alps: shift of very high Köppen–Geiger climate zones 1800–2100. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(2), 115– 125. <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0816>
- Ruman, A. (2020): Modelling climate types in South Pannonian Basin, Serbia by applying the Köppen–Geiger climate classification. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6:1303–1313. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00773-2>
- Sanderson, M., (1999): The classification of climates from Pythagoras to Köppen. *American Meteorological Society*, 80, 667–673.
- Sapta, S., Sulistyantara, B., Fatimah, I. S., Faqih, A. (2015): Geospatial approach for ecosystem change study of Lombok Island under the influence of climate change. *Procedia Environmental Sciences*, 24, 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.03.022>
- Schulzweida, U. (2019): CDO User Guide (Version 1.9.8). <http://doi.org/10.5281/zenodo.3539275>
- Schwalm, C. R., Glendon, S., Duffy, P. B. (2020): RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 18; 117(33):19656–19657. <https://doi.org/10.1073/pnas.2007117117>
- Shvidenko, A., Buksha, I., Krakovska, S., Lakyda, P. (2017): Vulnerability of Ukrainian Forests to Climate Change. *Sustainability*, 9, 1152. <https://doi.org/10.3390/su9071152>
- Skalák, P., Farda, A., Zahradníček, P., Trnka, M, Hlásny, T., Štěpánek, P. (2018): Projected shift of Köppen–Geiger zones in the central Europe: A first insight into the implications for ecosystems and the society. *International Journal of Climatology*, 38(9), 3595–3606. <https://doi.org/10.1002/joc.5520>
- Skarbit, N., Ács, F., Breuer, H., Krakker, D. (2014): Magyarország éghajlatának változásai a 20. században (Péczy György osztályozási módszere alapján). *Földrajzi Közlemények* 138 (4), 261–27
- Skarbit, N., Ács, F. and Breuer, H. (2017): The climate of the European region during the 20th and 21st centuries according to Feddema. *International Journal of Climatology*, 38(1), 2435–2448. <https://doi.org/10.1002/joc.5346>
- Song, X., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Potapov, P. V., Tyukavina, A., Vermote, E. F., Townshend, J. R. (2018): Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 560, 639–643. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0411-9>

- Spinoni, J., co-authors. (2015): Climate of the Carpathian Region in the period 1961–2010: climatologies and trends of 10 variables. *International Journal of Climatology*, 35, 1322–1341. <https://doi.org/10.1002/joc.4059>
- Strandberg, G., Barring, L., Hansson, U., Jansson, C., Jones, C., Kjellström, E., Kolax, M., Kupiainen, M., Nikulin, G., Samuelsson, P., Ullerstig, A., Wang, S. (2014): CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4. *Report meteorology and climatology*, 116.
- Sunday, J.M., Bates, A.E., Dulvy, N.K. (2012): Thermal tolerance and the global redistribution of animals. *Nature Climate Change*, 2, 686–690. <https://doi.org/10.1038/nclimate1539>
- Supan, A. (1879): Die Temperaturzonen der Erde (The temperature zones of the Earth), Petermanns Geogr.Mitt. 25, 349–358.
- Sylla, M. B., Elguindi, N., Giorgi, F., Wissler, D. (2016): Projected robust shift of climate zones over West Africa in response to anthropogenic climate change for the late 21st century. *Climatic Change*, 134:241–253. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1522-z>
- Szabó, A. I. (2017): A Kárpát-medence éghajlatának vizsgálata különböző éghajlat-osztályozási módszerekkel a CarpatClim adatbázis alapján. MSc Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, 42 p.
- Szabó, A. I., Ács, F., Breuer, H. (2021): Larger Carpathian region climate according to Köppen, Feddema and the Worldwide Bioclimatic Classification System methods. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E2482–E2496. <https://doi.org/10.1002/joc.6859>
- Szabó, A. I., Breuer, H., Ács, F., Belda M., Feddema, J. (2022): Projected changes in Feddema climate characteristics in the Larger Carpathian Region by the end of the 21st century. *International Journal of Climatology*, 42, 11, p. 5732–5747. <https://doi.org/10.1002/joc.7558>
- Szalai, S., Auer, I., Hiebl, J., Milkovich, J., Radim, T. Stepanek, P., Zahradnicek, P., Bihari, Z., Lakatos, M., Szentimrey, T., Limanowka, D., Kilar, P., Cheval, S., Deak, Gy., Mihic, D., Antolovic, I., Mihajlovic, V., Nejedlik, P., Stastny, P., Mikulova, K., Nabyvanets, I., Skyryk, O., Krakovskaya, S., Vogt, J., Antofie, T., Spinoni, J. (2013): Climate of the Greater Carpathian Region. Final Technical –Report. <http://www.carpatclim-eu.org/pages/download/>
- Szelepcsényi, Z., Breuer, H., Sümegi, P. (2014): The climate of Carpathian Region in the 20th century based on the original and modified Holdridge life zone system. *Central European Journal of Geosciences*, 6(3), 293–307. <https://doi.org/10.2478/s13533-012-0189-5>
- Szelepcsényi, Z., Breuer, H., Kis, A., Pongrácz, R. and Sümegi, P. (2018): Assessment of projected climate change in the Carpathian region using the Holdridge life zone system. *Theoretical and Applied Climatology*, 131, 593– 610. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1987-3>
- Talchabhadel, R. és Karki, R. (2022): Anticipated Shifting of Thermal and Moisture Boundary Under Changing Climate Across Nepal. In book: Mountain Landscapes in Transition. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70238-0_6
- Tall, M., Sylla, M. B., Diallo, I., Pal, J. S., Faye, A., Mbaye, M. L., Gaye, A. T. (2017): Projected impact of climate change in the hydroclimatology of Senegal with a focus over the Lake of Guiers for the

- twenty-first century *Theoretical and Applied Climatology*, 129:655–665.
<https://doi.org/10.1007/s00704-016-1805-y>
- Tapiador, F.J., Moreno, R., Navarro, A. (2019a): Consensus in climate classifications for present climate and global warming scenarios. *Atmospheric Research*, 216, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.09.017>
- Tapiador, F.J., Moreno, R., Navarro, A., Sanchez, J.L. and García- Ortega, E. (2019b): Climate classifications from regional and global climate models: performances for present climate estimates and expected changes in the future at high spatial resolution. *Atmospheric Research*, 228, 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.022>
- Thornthwaite, C. W. (1933): Climates of the Earth. *Geographical Review* 23(3), 433–440.
- Thornthwaite, C.W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 5– 94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Trewartha, G. T. (1954): An introduction to climate. University of Wisconsin Press, Madison, WI (with L. H. Horn, 1968, 5th edition, 416 pp)
- van Meijgaard, E., L. H. van Ulft, W. J., van de Berg, F. C., Bosveld, B. J. J. M., van den Hurk, G., Lenderink, A. P. Siebesma (2008): The KNMI regional atmospheric climate model, version 2.1, KNMI Tech. Rep. 302, R. Neth. Meteorol. Inst., De Bilt, Netherlands
- Vautard, R, Gobiet A, Jacob D, Belda M, Colette A, Déqué M, Fernández J, García-Díez M, Goergen K, Güttler I, Halenka T, Karacostas T, Katragkou E, Keuler K, Kotlarski S, Mayer S, van Meijgaard E, Nikulin G, Patarčić M, Scinocca J, Sobolowski S, Suklitsch M, Teichmann C, Warrach-Sagi K, Wulfmeyer V, Yiou P. (2013): The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Climate Dynamics*. 41: 2555–2575. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1714-z>
- Vlăduț, A., S., Licurici, M. (2020): Aridity conditions within the region of Oltenia (Romania) from 1961 to 2015. *Theoretical and Applied Climatology*, 140:589–602, <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03107-5>
- Walter, H. és Lieth, H. (1967): Klimadiagramm-Weltatlas. Gustav Fischer Verlag, Jena 1967.
- Wang, L, Ranasinghe, R., Maskey, S., Van Gelder, P. H. A. J. M., Vrijling, J. K. (2016): Comparison of empirical statistical methods for downsclaing daily climate projections from CMIP5 GCMs: a case study of the Huai River Basin, China. *International Journal of Climatology*, 36, 145–164. <https://doi.org/10.1002/joc.4334>
- Wang, J., Guan, Y., Wu, L., Guan, X., Cai, W., Huang, J., et al. (2021): Changing lengths of the four seasons by global warming. *Geophysical Research Letters*, 48, 1–9. <https://doi.org/10.1029/2020GL091753>
- Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. F. Luis, F. Wobbe, (2013): Generic Mapping Tools: Improved version released, *EOS Trans. AGU*, 94, 409-410. <https://doi.org/10.1002/2013EO450001>
- Willmott, C.J. és Feddema, J.J. (1992): A more rational climatic moisture index. *The Professional Geographer*, 44, 84– 88.

- Yan, Y. Y. (1996): The clo: An utilitarian unit to measure weather/climate comfort. *International Journal of Climatology*, 16, 1045-1056.
- Yang, S. és Matzarakis, A. (2015): Linking human-biometeorological thermal conditions with the Köppen-Geiger climate classification updated – The Example of China. *ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment Linking*
- Zhang, X., Wu, S., Yan, X., Chen, Z. (2017a): A global classification of vegetation based on NDVI, rainfall and temperature. *International Journal of Climatology*, 37, 2318–2324. <https://doi.org/10.1002/joc.4847>
- Zhang, X., Yan, X., Chen, Z. (2017b): Geographic distribution of global climate zones under future scenarios. *International Journal of Climatology*, 37, 4327–4334. <https://doi.org/10.1002/joc.5089>

Internetes hivatkozások:

- carpatclim-eu.org. Elérhető: <http://www.carpatclim-eu.org/pages/home/> (Utoljára megtekintve: 2022.09.22)
- cds.climate.copernicus.eu. Elérhető: <https://cds.climate.copernicus.eu/> (Utoljára megtekintve: 2023.05.22)
- climate.copernicus.eu. Elérhető: <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis> (Utoljára megtekintve: 2023.05.23)
- climatedataguide.ucar.edu. Elérhető: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-tools/regridding-overview> (Utoljára megtekintve: 2022.12.20)
- globalbioclimatics.org. Elérhető: <http://www.globalbioclimatics.org> (Utoljára megtekintve: 2020.09.20)
- metoffice.gov.uk. Elérhető: <https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/research/ukcp/ukcp18-guidance---representative-concentration-pathways.pdf> (Utoljára megtekintve: 2023.05.25)
- rcmes.jpl.nasa.gov. Elérhető: <https://rcmes.jpl.nasa.gov/content/statistical-downscaling> (Utoljára megtekintve: 2023.01.20)

Függelék

F.1 A Köppen-féle éghajlatosztályozás

A vegetáció típusokhoz rendelt izoterma vonalak alapján Köppen öt fő éghajlattípust különített el, melyekből a következő három fordul elő a Kárpátok térségében: „mérsékelt”, „boreális” és „alpesi”, amelyeket a „C”, „D” és „E” betűk képviselnek (SZABÓ ET AL., 2021). A „C” és „D” éghajlat kedvező a fás szárú növények, az „E” éghajlat pedig a tundra számára (ROHLI ÉS VEGA, 2018). A „C” és „D” esetén a második betű („s”, „w”, „f”) a csapadék szezonálisáról adnak információt. Az „s” alkategória a száraz nyarakkal jellemezhető éghajlatokat, a „w” a száraz telekkel jellemezhető klímákat, az „f” pedig nedves éghajlatot jelöl, jelentős szezonális ingadozás nélkül. Az „E” esetében a második „T” betű nem szezonális, hanem egy, az éves hőellátottsághoz köthető másodlagos kritériumot fejez ki. A harmadik betűk („a”, „b”, „c”, „d”) a nyári hőellátottságot jellemzik a melegtől (a) a hűvös (d) kategóriáig.

F.1. táblázat KÖPPEN (1936) klímátípusok KOTTEK ET AL. (2006) alapján. Magyarázat: A nyári és téli hónapok a rendszer definíciója szerint attól függenek, hogy melyik félév a melegebb/hidegebb. T_{meleg} - legmelegebb hónap átlaghőmérséklete. T_{hideg} - leghidegebb hónap átlaghőmérséklete. T_{h10} - azon hónapok száma, amelyek átlaghőmérséklete $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ feletti. $P_{száraz}$ - a legszárazabb hónap csapadékösszege. $P_{nyszáraz}$ - a legszárazabb nyári hónap csapadékösszege. $P_{tszáraz}$ - legszárazabb téli hónap csapadékösszege. $P_{nyedves}$ - legnedvesebb nyári hónap csapadékösszege. P_{medves} - legnedvesebb téli hónap csapadékösszege. A hőmérséklet $^{\circ}\text{C}$ -ban, a csapadék mm-ben értendő

Betűk			Kritériumok		
1.	2.	3.	1.	2.	3.
C	s	a	$-3 < T_{hideg} < 18$ és $T_{meleg} > 10$	$P_{nyszáraz} < 40$, $P_{nyszáraz} < P_{medves} / 3$	$T_{meleg} \geq 22$
	w	b		$P_{tszáraz} < P_{nyedves} / 10$	$T_{meleg} < 22$, $T_{h10} \geq 4$
	f	c		se nem (s), se nem (w)	$T_{meleg} < 22$, $1 \leq T_{h10} < 4$
D	s	a	$T_{hideg} \leq -3$ és $T_{meleg} > 10$	$P_{nyszáraz} < 40$ és $P_{nyszáraz} < P_{medves} / 3$	$T_{meleg} \geq 22$
		b			$T_{meleg} < 22$, $T_{h10} \geq 4$
	w	c		$P_{tszáraz} < P_{nyedves} / 10$	se nem (a), se nem (b), $T_{hideg} \geq -38$
f	d	se nem (s), se nem (w)	se nem (a), se nem (b), $T_{hideg} < -38$		
ET			$T_{meleg} < 10$	$T_{meleg} > 0$	

F.2 A Worldwide Bioclimatic Classification System módszer

A WBCS osztályozáshoz szükséges indexek meghatározása során a 200 m-nél magasabb tengerszint feletti magasságú rácspontokhoz tartozó termikus indexek korrekciója szükséges azért, hogy a földrajzi szélesség hatása domináljon, ne a vertikális hőmérsékleti gradiens. A korrekció után a termikus viszonyokat meghatározó indexek olyan értéket vesznek fel, mintha az adott rácspont 200 m vagy annál alacsonyabb magasságban lenne, hogy az eltérő tengerszint feletti magasságból eredő klimatikus hatásokat ne vegye figyelembe. A magassági kompenzációs érték számításának módját a F. 4. táblázatban tüntettem fel.

Doktori kutatásom során minden rácspontra meghatároztam ezeket a szinteket, melyek együttesen kiadnak egy klímátípust. Az első hierarchikus szintet az adott földrajzi szélességen beérkező sugárzás mennyisége határozza meg. A Kárpátok térségében a „mérsékelt” és „boreális” makrobioklimák fordulnak elő (F.4. táblázat), melyek esetén nincs nyári szárazság. A második hierarchikus szint a bioklíma és a bioklíma változatok szintje. A kategória meghatározásához szükséges a növényzet területi eloszlásának szempontjából jelentős éves hőmérséklet ingadozást kifejező kontinentalitás index (I_c) és a különböző szélességi körökön jellemző, az élő szervezetek komfortterzetéhez szükséges nedvesség mennyiségét számszerűsítő nedvességi index (I_o) kiszámítása. Az I_c és az I_o az egyes területek növényközösség-eloszlásának megfelelő az „óceáni”, „kontinentális” és „xerikus” vagy más szóval „száraz” bioklimák meghatározására szolgál melyek a makrobioklimák altípusai. A „száraz” típus szárazabb, mint a „kontinentális” és „óceáni” bioklíma. A bioklíma változatok ezen belül nem egy új szintet jelölnek, hanem egyes bioklíma típusokba sorolt területek esetén kiegészítő információt adnak a hőmérséklet és/vagy a csapadék éven belüli szezonálisáról. A bioklíma változatok tehát a széles hő- és vízellátottsági intervallumot lefedő bioklimák altípusai a T és a P változékonyság kifejezésére, mely eltéréseket a növényzet mintázata is tükrözi. A „szubmediterrán” változat „mérsékelt” és „boreális” makrobioklimában fordul elő, ahol az evapotranszspiráció mennyisége magasabb, mint a csapadék mennyisége, de nincs nyári aszály. A „sztyepp” változat valamivel nagyobb kontinentalitással jellemezhető, ahol nyáron több a csapadék, mint télen, ráadásul télen enyhe szárazság jellemzi továbbá az év során van két olyan időszak amikor a növényzet létfenntartó folyamatai leállnak a nem megfelelő környezeti feltételek miatt. Ennek oka lehet a szárazság vagy a hideg okozta stressz. A „normál” bioklíma változat azt jelenti, hogy az

eredeti bioklimához tartozó tulajdonságok (bioklíma index értékek) alapján nem sorolhatók be egyik változathoz meghatározott intervallumokba sem.

A harmadik hierarchikus szint a hő- és vízellátottsági kategóriákat tartalmazza. Egy területet a hő- és vízellátottsági indexek értékei alapján a földrajzi szélesség, hosszúság vagy tengerszint feletti magasság szerint egymást követő övezetek valamelyikébe sorolhatunk. Minden bioklimatikus övezet egy vegetáció típus hő- és vízigénye alapján lett meghatározva. A hőellátottság három hőmérséklet-alapú indexen alapul: a termikus indexen (I_t), a kompenzált termikus indexen (I_{tc}) és a pozitív hőmérsékleti indexen (T_p) melyek együttesen egy adott területen a növényzet számára elérhető hőellátottságot fejezik ki a Kárpátok térsége esetén legmelegebb „mezomérsékelt”-től a legkisebb hőellátottságú „boreális”-ig. Az I_t az erősen „kontinentális” vagy „óceáni” területek esetén a téli szélsőséges hideg/meleg kompenzálására (az I_c értékétől függően) egy kompenzációs érték (C) hozzáadásával vagy kivonásával módosul (I_{tc}), hogy kiegyenlítődjenek a globális különbségek. A hideg intenzitásáról az átlagos T-hez képest többlet információt adó T_p -t a hideg éghajlaton (ahol $I_c > 21$ vagy $I_{tc} < 120$, *F. 4. táblázat*) kell figyelembe venni. Ez a növényzet szempontjából fontos, hiszen az alacsony hőmérsékletek korlátozzák a növekedést. A vízellátottság „száraz”-tól a „nagyon nedves”-ig sorolható kategóriákba az I_o nedvességi index (pluviometrikus index) alapján (LOPEZ FERNANDEZ ÉS LOPEZ FERNANDEZ, 2018).

F.2. táblázat: Éghajlati elemek és bioklimatikus indexek a WBCS alapján (*Worldwide Bioclimatic Classification System, RIVAZ-MARTÍNEZ ET AL., 2011*).

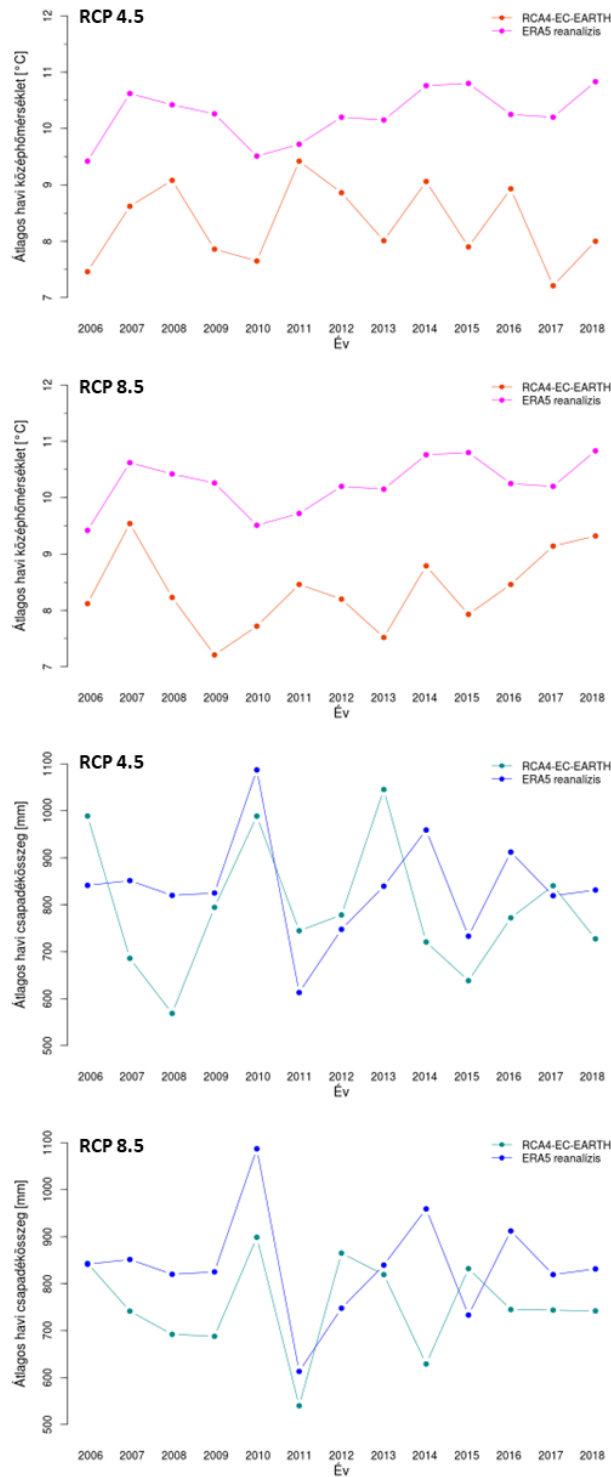
Klimatikus paraméterek és bioklimatikus indexek

T	Átlagos éves hőmérséklet (°C)
P	Átlagos éves csapadékösszeg (mm)
T_p	Pozitív átlagos éves hőmérséklet (°C): azon hónapok havi átlaghőmérsékleteinek összege, ahol pozitív a havi átlag pozitív volt
T_{ps}	Pozitív átlagos nyári hőmérséklet (°C): azon nyári hónapok havi átlaghőmérsékleteinek összege, ahol pozitív a havi átlag pozitív volt
T_{min}	A leghidegebb hónap átlaghőmérséklete (°C)
T_{max}	A legmelegebb hónap átlaghőmérséklete (°C)
m	A leghidegebb hónap átlagos minimum-hőmérséklete (°C)
M	A legmelegebb hónap átlagos maximum-hőmérséklete (°C)
P_s	Nyári átlagos csapadékösszeg (mm): a három nyári hónap átlagos csapadékösszege
I_c	Kontinentalitás index: $I_c = T_{max} - T_{min}$
I_t	Termikus index: $I_t = (T + m + M) \cdot 100$
C	Kompenzációs érték (<i>elméleti háttér elérhető a globalbioclimatics.org-n</i>)
I_{tc}	Kompenzált termikus index: $I_{tc} = I_t + /- C$
P_p	Éves pozitív csapadék (mm): azon hónapok átlagos csapadékösszege, ahol a havi átlag pozitív volt
P_{pw}	Téli pozitív csapadék (mm): azon téli hónapok átlagos csapadékösszege, ahol a havi átlag pozitív volt
P_{ps}	Nyári pozitív csapadék (mm): azon nyári hónapok átlagos csapadékösszege, ahol a havi átlag pozitív volt
I_o	Éves nedvességi index: $I_o = (P_p / T_p) \cdot 10$
I_{osi}	Adott hónapra vonatkozó nedvességi index a nyári negyedévben
I_{os2}	A két legmelegebb hónapra vonatkozó nedvességi index a nyári negyedévben
I_{os4}	A négy legmelegebb hónapra vonatkozó nedvességi index a nyári negyedévben (májussal együtt)

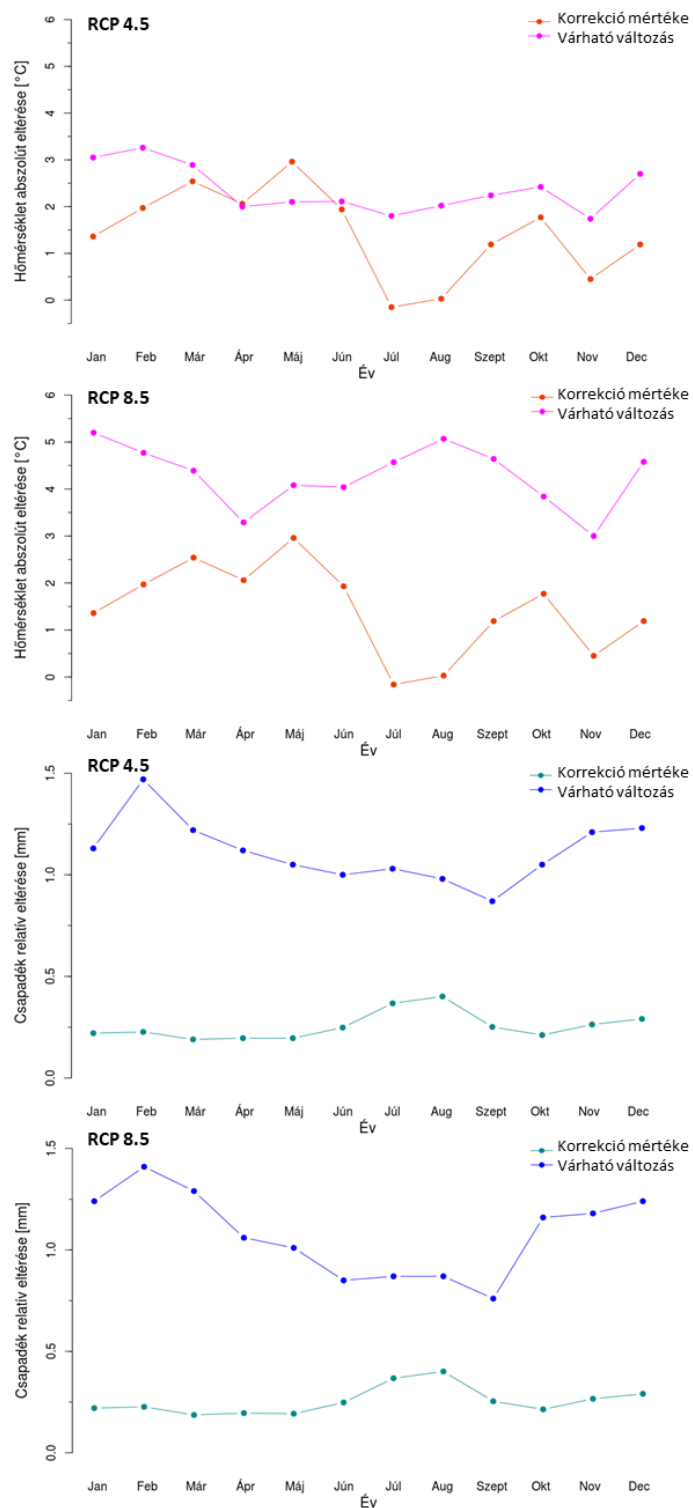
F.3. táblázat: A WBCS klimatípusai a Kárpátok térségében (RIVAS-MARTÍNEZ ET AL., 2011, LOPEZ-FERNANDEZ ÉS LOPEZ-FERNANDEZ 2018). Az osztályozás három hierarchiaszintet foglal magába: makrobioklíma típusok, bioklíma és bioklimatikus változatok, termo- és ombrotípusok: *A kompenzációs értékeket a makrobioklíma meghatározására szolgálják. A WBCS magassági kompenzációja szerint a kompenzációs értékek a következők: T növelése $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal, M és m növelése $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal, I_c pedig 13 egységgel 100 m -enként 200 m tengerszint feletti magasság felett. Az é.sz. 48° -tól északra T $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal, M pedig $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal és T_p 12 egységgel növelendő. **Ha $I_c \geq 21$ vagy $I_c < 120$, akkor a kompenzáció utáni elméleti T_p kiszámítása úgy történik, hogy T_p -t 55 egységgel növeljük 200 m tengerszint feletti magasság felett minden 100 méterenként, és a termotípust a T_p alapján számítjuk ki. Rövidítések: *Te*xe, temperate xeric; *Teco*, temperate continental; *Teoc*, temperate oceanic; *Booc*, boreal oceanic; *Stp*, steppic; *Sbm*, submediterranean; *nor*, normal; *Mte*, mesotemperate; *Ste*, supratemperate; *Ote*, orotemperate; *Cte*, criotemperate; *Hbo*, hemiborealis; *Tbo*, thermoborealis; *Mbo*, mesoborealis; *obo*, oroborealis; *Shu*, subhumid; *hum*, humid; *Hhu*, hiperhumid.

MAKROBIOKLÍMAK*	BIOKLÍMÁK		BIOKLÍMA VÁLTOZATOK		HÖELLÁTOTSÁG KATEGÓRIÁK		VÍZELLÁTOTSÁG KATEGÓRIÁK			
		I_o	I_c			I_c	T_p **		I_o	
MÉRSÉKELT é.sz. 35° és 66° között amikor $I_{oc2} > 2$ és $I_{oc1} > 2$. A klimatikus elemek kompenzációja a következő képp: tengerszint feletti magasság $< 200\text{ m}$: $T_p > 380$; ha $I_c \leq 1$ akkor $T > 6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{max} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{pw} > 320$; ha $11 < I_c \leq 21$ akkor $T_p > 720$, $T > 5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$; ha $21 < I_c \leq 28$ akkor $T_p > 740$, $T > 4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, ha $28 < I_c \leq 46$ akkor $T_p > 800$, $T > 3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, ha $46 < I_c$ akkor $T_p > 800$, $T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.	Óceáni (Teoc)	$I_o > 3,6$	$11 < I_c \leq 21$	Szubmediterrán (Sbm)	$P_{oi} < 2,8 T_{oi}$ or $I_{oc1} < 2,8$	Mezőmérsékelt (Mte)	$190 < I_c \leq 290$	$1400 < T_p \leq 2000$ $1400 < T_p \leq 2000$	Száraz (Sec)	$2,0 \leq I_o < 3,6$
	Kontinentális (Teco)	$I_o > 3,6$	$21 < I_c$	Sztyepp (Stp)	$I_c > 17$, $0,2 < I_c \leq 6$, $P_{oi} < 3 T_{oi}$, $P_{pw} > P_{pw}$	Szupramérsékelt (Ste)	$120 < I_c \leq 190$	$800 < T_p \leq 1400$	Mérsékelt nedves (Shu)	$3,6 \leq I_o < 6,0$
	Száraz (Tece)	$I_o \leq 3,6$	$4 \leq I_c$	Normál (Nor)	Se nem <i>Sbm</i> se nem <i>Stp</i>	Mérsékelt hegyi (Ote)	-	$380 < T_p \leq 800$	Nedves (Hum)	$6,0 \leq I_o < 12,0$
						Mérsékelt fagyos (Cte)	-	$0 < T_p \leq 380$		
						Hemiboreális (Hbo)	Az é.sz. 45° -tól északra ha $I_c \leq 21$ és a tengerszint feletti magasság $< 400\text{ m}$ és $720 < T_p \leq 900$; ha $21 < I_c \leq 28$ és a tengerszint feletti magasság $< 600\text{ m}$ és $740 < T_p \leq 900$; ha $28 < I_c$ és a tengerszint feletti magasság $< 1000\text{ m}$ és $800 < T_p \leq 900$		Nagyon nedves (Hhu)	$12,0 \leq I_o < 24,0$
BOREÁLIS é.sz. 42°N és 72° között amikor $I_{oc2} > 2$ és $I_{oc1} > 2$. A klimatikus elemek kompenzációja a következő képp: tengerszint feletti magasság $< 200\text{ m}$: $T_p \geq 380$; ha $I_c \leq 11$ akkor $T < 6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{max} < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $380 \leq T_p \leq 720$, $T_{pw} \leq 320$; ha $11 < I_c \leq 21$ akkor $380 \leq T_p \leq 720$, $T \leq 5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$; ha $21 < I_c \leq 28$ akkor $380 \leq T_p \leq 740$, $T \leq 4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, ha $28 < I_c \leq 46$ akkor $380 \leq T_p \leq 800$, $T \leq 3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, ha $46 < I_c$ akkor $380 \leq T_p \leq 720$, $T \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.	Óceáni (Booc)	$I_o > 3,6$	$11 < I_c \leq 21$	Szubmediterrán (Sbm)	$P_{oi} < 2,8 T_{oi}$ vagy $I_{oc1} < 2,8$	Meleg-boreális (Tbo)		$680 < T_p$	Nedves (Hum)	$6,0 \leq I_o < 12,0$
				Sztyepp (Stp)	$I_c > 17$, $0,2 < I_c \leq 0,6$, $P_{oi} < 3 T_{oi}$, $P_{pw} > P_{pw}$	Mezo-boreális (Mbo)	-	$580 < T_p \leq 680$		
				Normál (Nor)	Se nem <i>Sbm</i> se nem <i>Stp</i>	Szupraboreális (Sbo)		$480 < T_p \leq 580$		
						Boreális hegyi (Obo)	-	$380 < T_p \leq 480$	Nagyon nedves (Hhu)	$12,0 \leq I_o < 24,0$

F.3 ERA-5 reanalízis és a korrigálatlan, valamint a korrigált és korrigálatlan szimulációk összehasonlítása

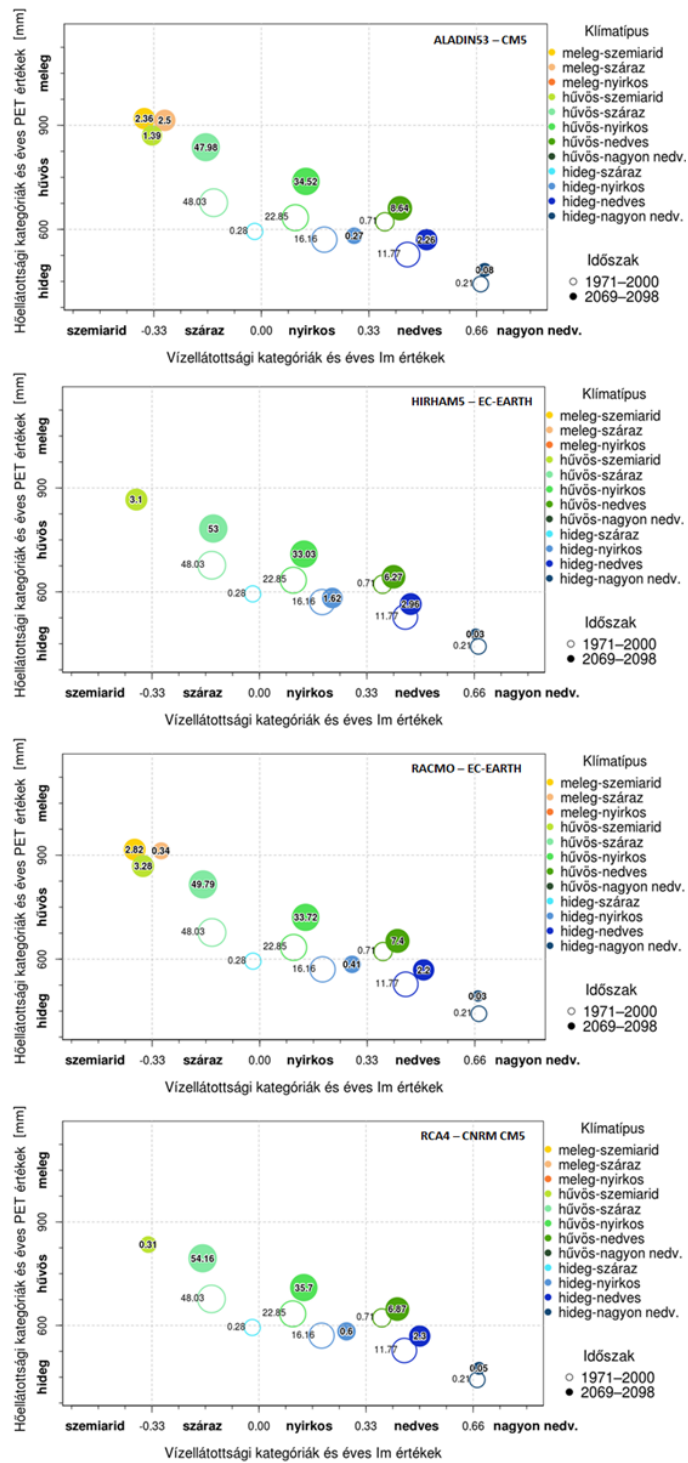


F.1. ábra Évi átlagos középhőmérséklet és csapadékösszeg értékek a Kárpátok térségében az 2006–2018 időszakra vonatkozóan az ERA5 reanalízis és az EUR-11 felbontású, RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvet követő korrigálatlan RCA4-EC-EARTH adatok alapján

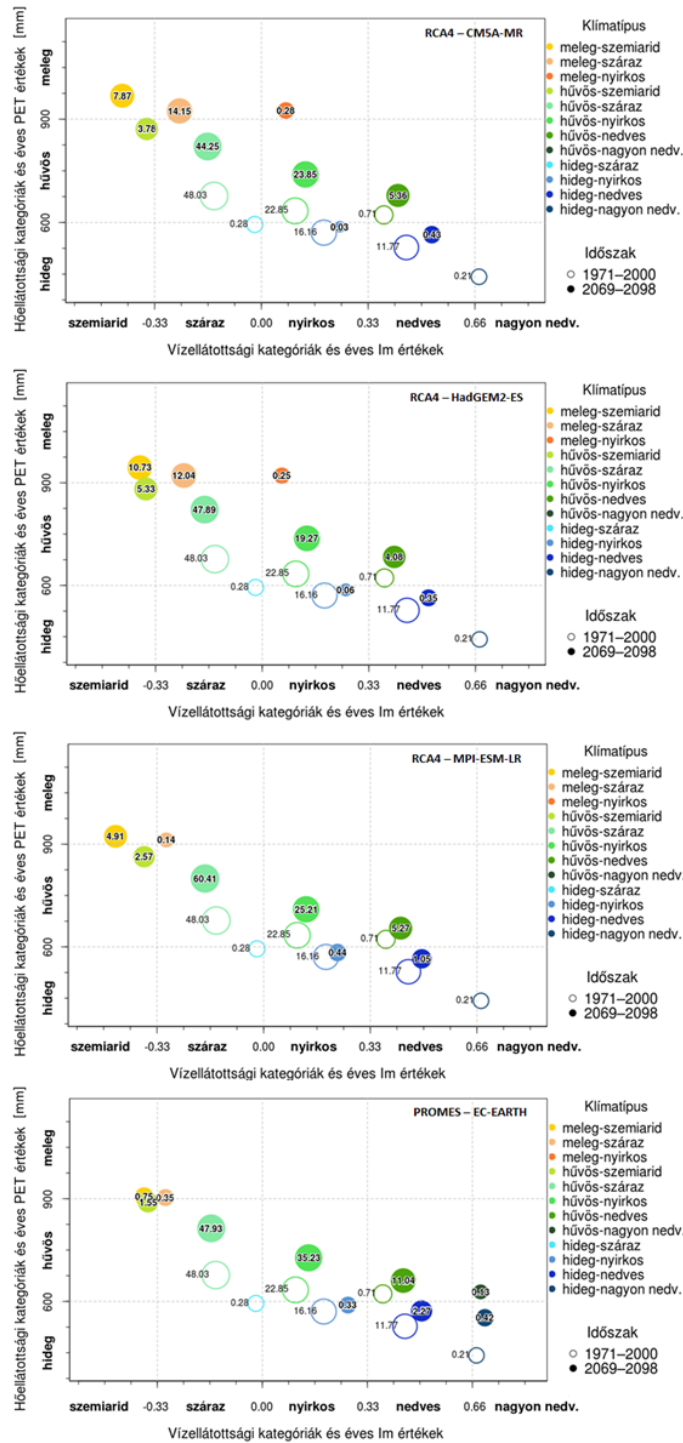


F.2. ábra A 2069–2098 időszakhoz tartozó korrigált és korrigálatlan szimulációk abszolút (hőmérséklet) és relatív (csapadék) eltérése (korrekció mértéke) továbbá a referencia időszak (1971–2000) és a 2069–2098 időszak közötti eltérés (várható változás) a Kárpátok térségében az 2006–2018 időszakra vonatkozóan a CarpatClim és az EUR-11 felbontású, RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvet követő RCA4-EC-EARTH adatok alapján

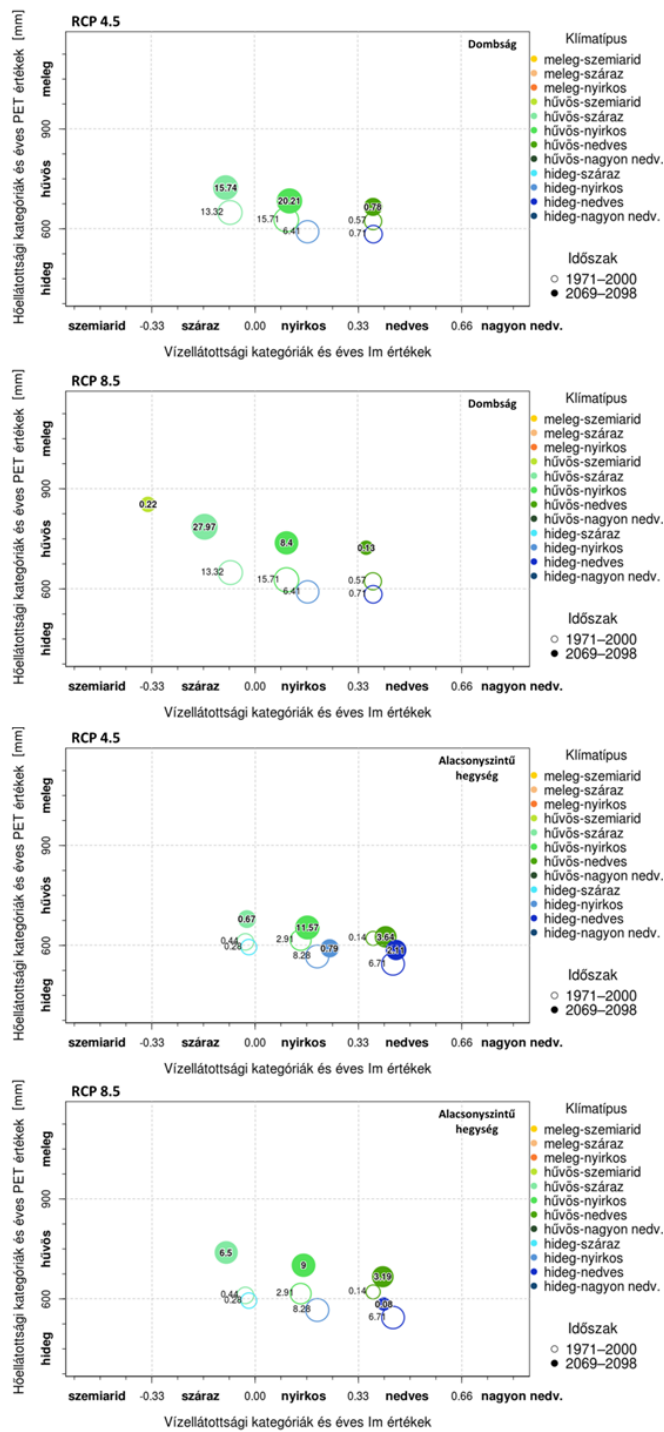
F.4 Feddema-féle klíma- és szezonáltság típusok várható változása



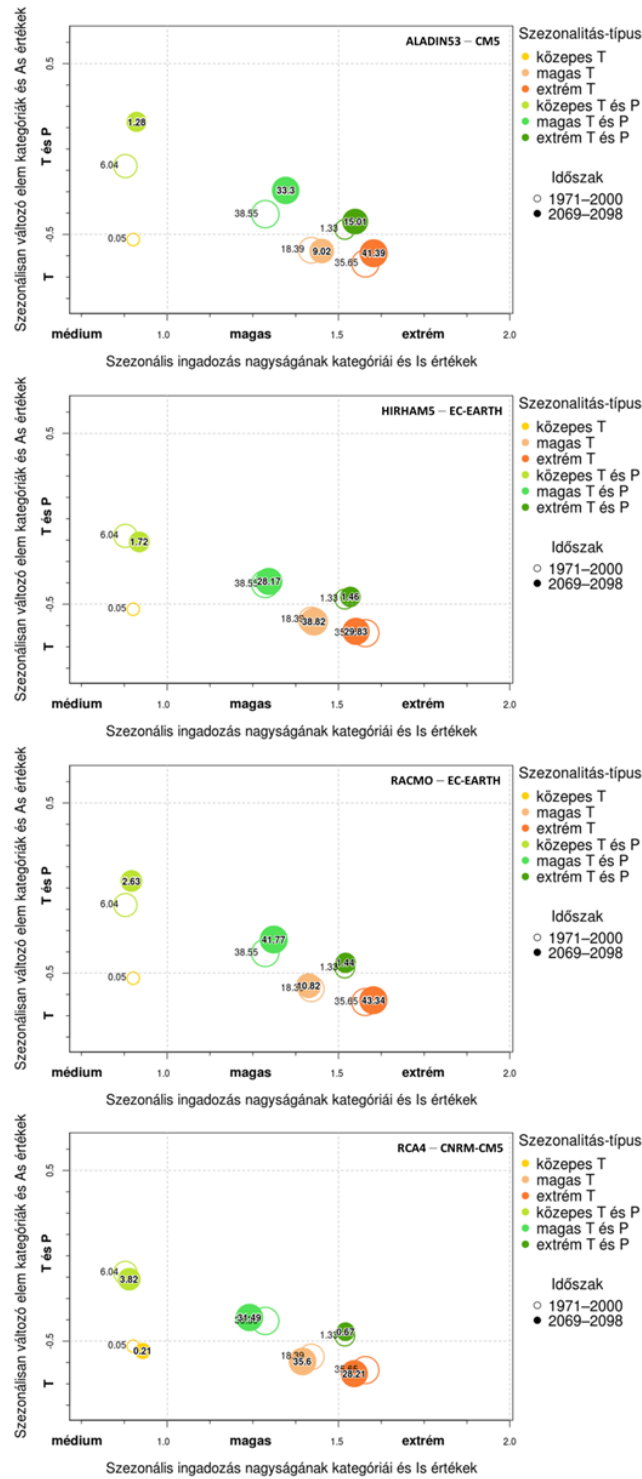
F.3. ábra Eltolódás a termikus és nedvességi karakterisztikákban és klímatisíp változások a teljes vizsgált területen. A körök sugara arányos a klímatisíp által lefedett terület (km^2) tízes logaritmusával. A körökben lévő értékek a klímatisíp által lefedett terület arányát mutatják a teljes vizsgált területhez képest, a körök középpontja pedig a klímatisíp által lefedett terület átlagos éves PET és I_m értékeit mutatja. Az üres körök az 1971–2000 időszakra vonatkoznak a CarpatClim adatok alapján, a teli körök a 2069–2098 időszakra az RCP8.5 szcenárió esetén, a különböző EUR-11 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján.



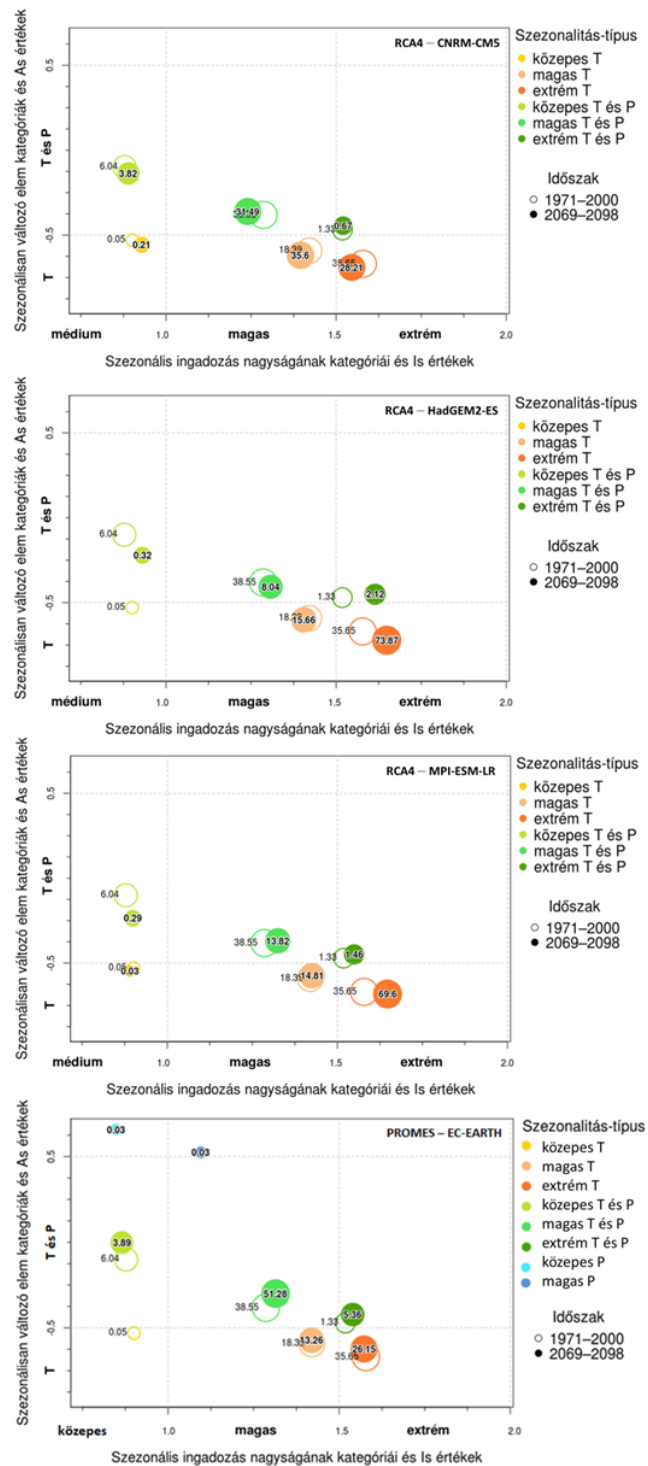
F.4. ábra Eltolódás a termikus és nedvességi karakterisztikákban és klímatispus változások a teljes vizsgált területen. A körök sugara arányos a klímatispus által lefedett terület (km^2) tízes logaritmusával. A körökben lévő értékek a klímatispus által lefedett terület arányát mutatják a teljes vizsgált területhez képest, a körök középpontja pedig a klímatispus által lefedett terület átlagos éves PET és I_m értékeit mutatja. Az üres körök az 1971–2000 időszakra vonatkoznak a CarpatClim adatok alapján, a teli körök a 2069–2098 időszakra az RCP8.5 scenárió esetén, a különböző EUR-11 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján.



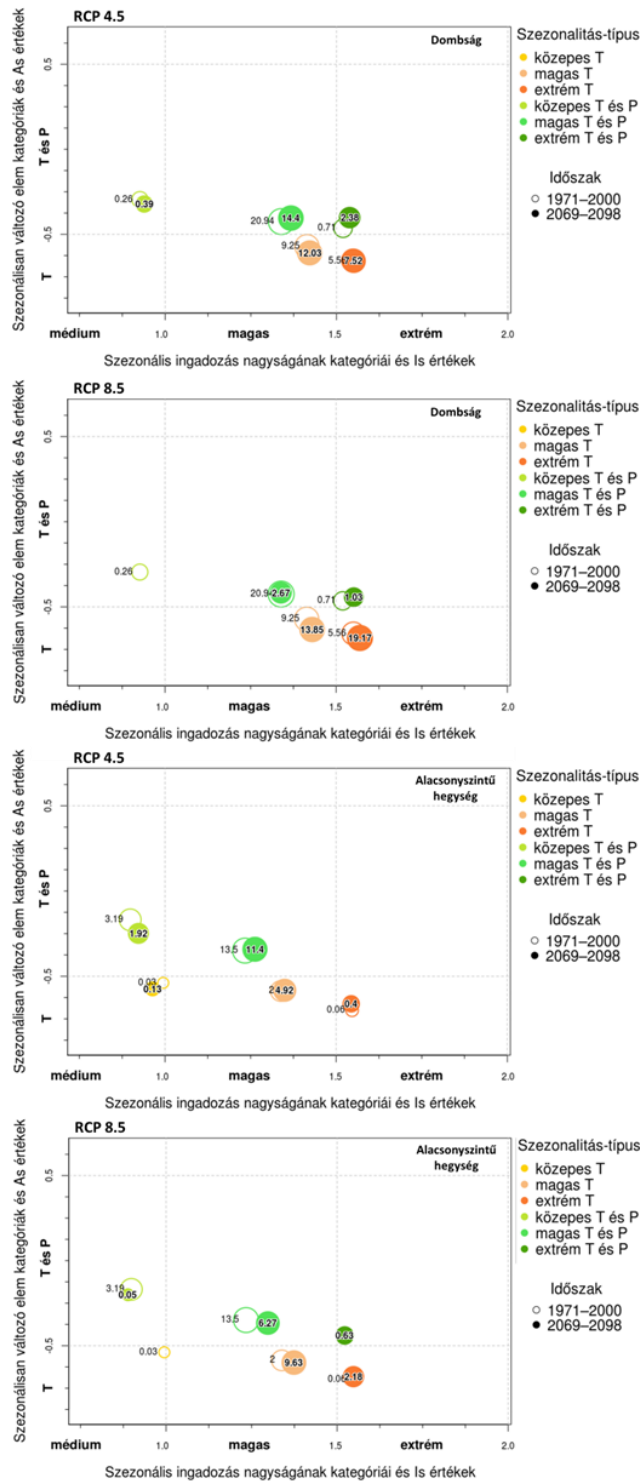
F.5. ábra Eltolódás a termikus és nedvességi karakterisztikákban és klímátípus változások a dombságokon (200 és 500 m közötti tengerszint feletti magasság) és alacsony szintű hegységekből (500 és 1000 m közötti tengerszint feletti magasság). A körök sugara arányos a klímátípus által lefedett terület (km^2) tízes logaritmusával. A körökben lévő értékek a klímátípus által lefedett terület arányát mutatják a teljes vizsgált területhez képest, a körök középpontja pedig a klímátípus által lefedett terület átlagos éves PET és I_m értékeit mutatja. Az üres körök az 1971–2000 időszakra vonatkoznak a CarpatClim adatok alapján, a teli körök a 2069–2098 időszakra az RCP4.5 és RCP8.5 szcenáriók esetén, az EUR-11 térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján.



F.6. ábra Eltolódás a szezonálisan változó elemekben és szezonális ingadozás nagyságában és szezonálítástípus változások a teljes vizsgált területen. A körök sugara arányos a szezonálítástípus által lefedett terület tizes logaritmusával. A körökben lévő értékek a klimatípus által lefedett terület arányát mutatják a teljes területhez képest, a körök középpontja pedig a szezonálítástípus által lefedett terület átlagos éves A_s és I_s értékeit mutatja. Az üres körök az 1971–2000 időszakra vonatkoznak a CarpatClim adatok alapján, a teli körök a 2069–2098 időszakra az RCP8.5 scenárió esetén, a különböző EUR-11 térbeli felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján



F.7. ábra Eltolódás a szezonálisan változó elemekben és szezonális ingadozás nagyságában és szezonálisan változó elem kategóriák a teljes vizsgált területen. A körök sugara arányos a szezonálisan változó elem által lefedett terület tízes logaritmusával. A körökben lévő értékek a klimatikus terület által lefedett terület arányát mutatják a teljes területhez képest, a körök középpontja pedig a szezonálisan változó elem által lefedett terület átlagos éves A_s és I_s értékeit mutatja. Az üres körök az 1971–2000 időszakra vonatkoznak a CarpatClim adatok alapján, a teli körök a 2069–2098 időszakra az RCP8.5 scenárió esetén, a különböző EUR-11 térségi felbontású korrigált EURO-CORDEX adatok alapján.



F.8. ábra Eltolódás a szezonálisan változó elemekben és szezonális ingadozás nagyságában és szezonálítástípus változások a dombcsőkon (200 és 500 m közötti tengerszint feletti magasság) és alacsony szintű hegységeken (500 és 1000 m közötti tengerszint feletti magasság). A körök sugara arányos a szezonálítástípus által lefedett terület tízes logaritmusával. A körökben lévő értékek a klímatiszpus által lefedett terület arányát mutatják a teljes területhez képest, a körök középpontja pedig a szezonálítástípus által lefedett terület átlagos éves A_s és I_s értékeit mutatja. Az üres körök az 1971–2000 időszakra vonatkoznak a CarpatClim adatok alapján, a teli körök a 2069–2098 időszakra az RCP4.5 és RCP8.5 szcenáriók esetén az EUR-11 térbeli felbontású korrigált RCA4-EC-EARTH adatok alapján.

Éghajlat és az éghajlatváltozás folyamata a Kárpátok térségében a 20. és 21. században Feddema alapján

Szabó Amanda Imola

Környezettudományi Doktori Iskola, vezetője: Dr. habil. Turányi Tamás
Környezeti Földtudomány Doktori Program, vezetője: dr. habil. Szalai Zoltán
Témavezetők: dr. habil. Ács Ferenc, dr. Breuer Hajnalka
Kutatóhely: Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék
Budapest, 2023

Egy adott régió éghajlata befolyásolhatja az ott élők hétköznapjait, emiatt fontos, hogy az éghajlati karakterisztikáknak és várható változásaiknak egyszerű, közérthető információja rendelkezésre álljon mindenki számára. Az éghajlat-osztályozásokkal, mint amilyen Feddema módszere is, leegyszerűsítve írhatók le az éghajlati rendszer összetett kölcsönhatásai.

Disszertációmban vizsgáltam az éghajlatot és az éghajlatváltozás folyamatát a Feddema-módszer alapján, mely egy vízháztartáson alapuló Thornthwaite-féle módszer. Vizsgált régióknak a Kárpátok térségét jelöltem ki és a teljes területre, valamint különböző magassági régiókra is végeztem számításokat. Referencia adatbázisnak a térség éghajlati vizsgálatára megszerkesztett CarpatClim-et, míg a térségben várható éghajlatváltozás vizsgálatához az optimistább RCP4.5 és a pesszimistább RCP8.5 éghajlati forgatókönyveket követő EURO-CORDEX klímaszimulációkat használtam fel. Feddema az éghajlatot jellemző folytonos változókat diszkretizált. Ezzel az úgynevezett Feddema-diszkrét megközelítéssel meghatároztam a térség klíma- és szezonális-típusait. A Feddema-módszer alkalmas továbbá a diszkrét kategóriaváltások és az éghajlati és szezonális indexekben várható folytonos eltolódás irányának és mértékének meghatározására. Ez utóbbi, úgynevezett Feddema-folytonos megközelítést először alkalmaztam a térségben várható éghajlatváltozás vizsgálatára

Feddema módszerével több információ adható a Kárpátok térségének éghajlatáról, mint a kutatás során alkalmazott más leíró módszerekkel. Továbbá a Feddema-folytonos megközelítéssel többletinformáció adható a Feddema-diszkréthez képest. Eredményeim alapján új, szárazabb és melegebb klímátípusok megjelenése várható a Kárpátok térségében, melyek a referencia időszakban nem fordultak elő. Fő folyamatként a hőellátottság növekedése várható a közép- és magashegységek és alacsonyszintű hegységek, a hőellátottság növekedése és a vízellátottság csökkenése a dombságok és az alföldek esetén. A szezonális egyre inkább a hőmérséklet éven belüli ingadozásához lesz hozzárendelhető és a legnagyobb erősödés a szezonális mértékében a közép- és magashegységekben várható.

Climate and Climate Change in the Larger Carpathian Region in the 20th and 21st centuries based on Feddema

Amanda Imola Szabó

Doctoral School of Environmental Sciences, head of school: Dr. habil. Tamás Turányi
Environmental Geosciences Program, head of program: dr. habil. Zoltán Szalai
Supervisors: dr. habil. Ferenc Ács, dr. Hajnalka Breuer
Research institute: Eötvös Loránd University, Department of Meteorology
Budapest, 2023

The climate of a region may affect the daily lives of its inhabitants, making it important that simple, easily comprehensible information on climate characteristics and their expected changes is available to all. Climate classifications, such as Feddema's method, provide a simplified way to describe the complex interactions of the climate system.

In my dissertation, I studied the climate and climate change processes using the Feddema method, which is a water balance-based Thornthwaite-type method. I studied the Larger Carpathian Region and made calculations for the whole area as well as for different altitudinal regions. I used CarpatClim as a reference database, which was developed to support regional climate studies. I drew on EURO-CORDEX climate simulations, basing my work on the more optimistic RCP4.5 and the more pessimistic RCP8.5 climate scenarios. Feddema discretised the continuous variables characterising the climate. I used this so-called Feddema-discrete approach to calculate the climate and seasonality types of the region. The Feddema method is also suitable for determining the discrete category changes and to specify the direction and magnitude of the expected continuous shifts of climate and seasonality indices. The latter – the so-called Feddema-continuous approach – was first applied in my doctoral research to study the projected climate change in the region.

Feddema's method provides more information on the climate of the Larger Carpathian Region than other descriptive methods used in my research. Moreover, the Feddema-continuous approach provides additional information to the Feddema-discrete approach. My results suggest the emergence of new, drier and warmer climate types in the Larger Carpathian Region, which did not occur in the reference period. The main processes are expected to be an increase in heat availability in mid- and high- and low-altitude mountain regions and an increase in heat availability and a decrease in water availability in hills and lowlands. Seasonality is projected to be increasingly attributed to intra-annual temperature variability and the greatest increase in the magnitude of seasonality is expected in the mid- and high mountain regions.