

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

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

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

1. Bevezetés és célkitűzések

Egy adott régió éghajlata befolyásolhatja az ott élők hétköznapijait, az élelmiszer elérhetőségétől kezdve a szükséges ruházaton át a szabadidős tevékenységekig. Emiatt fontos, hogy az éghajlati karakterisztikáknak és várható változásaiknak információja rendelkezésre álljon mindenki számára, ez azonban igazi tudománykommunikációs kihívás az éghajlattan területén. Az éghajlat-osztályozásokkal, mint amilyen Feddema módszere (FEDDEMA, 2005) is, leegyszerűsítve írhatók le az éghajlati rendszer összetett kölcsönhatásai. Ennek következtében néhány, ezeket a hatásokat összesítő paraméter használható akár oktatási céllal, akár bemeneti adatként a további kutatásokban. Az éghajlat-osztályozások alkalmazásának előnye, hogy az éghajlat és az éghajlatváltozás folyamata könnyen, viszonylag kis adat- és számításigényű módszertannal leírható.

A Feddema-módszer a leíró jellegű éghajlat-osztályozási módszerek közé tartozik, amelyek jól használhatóak a jelenlegi éghajlat vizualizálására és számszerűsítésére (BELDA ET AL., 2015; RUBEL ET AL., 2017), és más tudományterületeken is alkalmazhatók. A Föld éghajlati heterogenitásának pontos ismerete szükséges például a vegetáció-eloszlás vizsgálatához (KARTIKA ET AL., 2022), továbbá az éghajlati modelleredmények validálásakor is alkalmazhatók ezek a módszerek (LÜ ET AL., 2020). A disszertációmban 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 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 szezonalitástípusok várható jövőbeni eloszlását,
- továbbá bemutatni, hogy a Feddema-módszer a diszkrét kategóriaváltások mellett alkalmas az éghajlati és szezonális-indexekben várható folytonos eltolódás irányának és mértékének meghatározására;
- annak megmutatása, hogy az utóbbi ún. Feddema-folytonos megközelítéssel a Feddema-diszkréthez képest többletinformáció adható egy térség éghajlatváltozásáról.

2. Adatok és módszertan

Disszertációmban vizsgáltam az éghajlatot és az éghajlatváltozás folyamatát a Feddema-módszer alapján a hő- és vízellátottság, valamint a szezonális tekintetében. Az általam vizsgált régiónak a Kárpátok térségét jelöltem ki. Referencia adatbázisnak a $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ térbeli felbontású CarpatClim-et használtam (SZALAI ET AL., 2013). A térségben várható éghajlatváltozásra vonatkozó vizsgálataimhoz az EURO-CORDEX (JACOB ET AL., 2020) adatbázisból nyertem adatokat, 10-10 globális és regionális klímamodellből összepárosított 19 klímamodellpárra vonatkozólag. A felhasznált klímaszimulációk EUR-44 és EUR-11 felbontásúak és az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyveket követik. Az adatokat azonos térbeli felbontású rácshálóra interpoláltam és a szimulációkat a delta-módszerrel (DÉQUÉ, 2007) korrigáltam. A Feddema-módszer alkalmazásához meghatároztam a Feddema-indexeket, melyek a következők: hő- és vízellátottság, a hőmérséklet (T) és csapadék (P) szezonális és a szezonális mértéke. Feddema a hőellátottságot a potenciális evapotranszpirációval (PET) fejezi ki. Feddema a PET-et a THORNTHWAITE (1948) osztályozásában is használt Thornthwaite- és Mather-féle módszerrel határozza meg. A Kárpátok térségében a vizsgált időszak során az 1. táblázatban szereplő hőellátottsági kategóriák fordulnak elő.

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

Hőellátottsági kategóriák	PET [mm év ⁻¹]
Meleg	$900 < \text{PET} \leq 1200$
Hűvös	$600 < \text{PET} \leq 900$
Hideg	$300 < \text{PET} \leq 600$

2. 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	$-0,66 < I_m \leq (-0,33)$

A vízellátottság a Willmott- és Feddema- féle I_m (moisture) nedvességi index alapján kerül meghatározásra (FEDDEMA, 2005). 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 a vízigény és a rendelkezésre álló vízkészlet egyensúlyát jelölik. A Kárpátok térségében a vizsgált időszak során a 2. táblázatban szereplő vízellátottsági kategóriák fordulnak elő.

A Feddema-módszerrel kétféle index alapján jellemezhető egy terület szezonalitása. Az A_s (seasonality attribution) index a szezonalitást vagy éven belüli hőingásnak, vagy a csapadékingadozásnak, vagy a kettő kombinációjának tulajdonítja (3. táblázat). A A_s értéke az éven belüli PET és P ingadozás arányától függ. A szezonális változékonyság nagyságát kifejező I_s (seasonality) index az éves I_m változás tartománya alapján határozható meg (4. táblázat).

3. 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	$0,5 < A_s$

4. táblázat A szezonális ingadozás nagyságának kategóriái (FEDDEMA, 2005)

Szezonális ingadozás nagysága	$I_s (I_{m \max} - I_{m \min})$
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	$1,5 < I_s \leq 2,0$

A Feddema-indexek kategorizálásával meghatározhatók a különböző klíma- és szezonális-típusok, melyek együttesen kiadnak egy klímapárt. Ezt nevezem a Feddema-diszkrét megközelítésnek. Egy terület éghajlata és éghajlatváltozása a diszkrét kategóriák elhagyásával is vizsgálható. Ez a Feddema-folytonos megközelítés, ekkor az éves és szezonális jellemzőket kifejező indexek értékein, és azok folytonos változásain keresztül is becslhető az éghajlatváltozás.

3. Tézisek

A módszertani alkalmazás új eredményei

1. A diplomamunkámat folytatva először alkalmaztam Feddema módszerét a CarpatClim adatbázis felhasználásával.
2. A Feddema-módszer fő erőssége, hogy egyértelműbben értelmezhető szezonális tulajdonságok rendelhetők egy terület éghajlatához a disszertációban összehasonlító elemzés során alkalmazott, széles körben elterjedt KÖPPENHEZ (1936) és a térségre a disszertációban először alkalmazott Worldwide Bioclimatic Classification Systemhez (RIVAS-MARTÍNEZ ET AL., 2011) képest.
3. Feddema módszere alkalmazható az eredeti, 2005-ös diszkrét megközelítéssel és folytonos megközelítéssel, a kategóriák elhagyásával. A disszertációban először alkalmaztam a Feddema-folytonos megközelítést a szezonális-indexekre (korábban csak ELGUINDI ET AL., 2014 használta ezt a megközelítést a hő- és vízellátottság változásának folytonos

vizsgálatára), és először alkalmaztam ezt a megközelítést a Kárpátok térségére vonatkozólag (SZABÓ ET AL., 2022).

Az éghajlatváltozás leírásának új eredményei

4. A kutatásban először vizsgáltam a Kárpátok térségének éghajlatváltozását Feddema módszerével az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyveket követő EURO-CORDEX szimulációk alapján.
5. A kutatás során Feddema módszerével megmutattam a térségben a 21. század végére (2069–2098) hő- és vízellátottságban és klímátípus-eloszlásban várható változást az egyes EURO-CORDEX szimulációk alapján a referencia időszakhoz (1971–2000) képest. Az RCP4.5 forgatókönyvet követő szimulációk közül (mindkét térbeli felbontást figyelembe véve) a legnagyobb mértékű növekedés a hőellátottságban az RCA4-HadGEM2-ES (regionális és globális) modellpár (EUR-11) és a RACMO-HadGEM2-ES modellpár (EUR-44) esetén várható. Mindkét esetben az időszakban előforduló legnagyobb hőellátottságú kategória a „hűvös” a térség több mint 90%-án, a referencia időszak esetén jellemző 70%-hoz képest. A legkisebb mértékű hőellátottság növekedést a HIRHAM5-EC-EARTH és az RCA4-MPI-ESM-LRA becsüli. Az RCP8.5 esetén a legnagyobb mértékű hőellátottság növekedés az RCA4-CM5A-MR és a RCA4-HadGEM2-ES szerint (EUR-11) és a RACMO-HadGEM2-ES és RCA4-CanESM2 szerint (EUR-44) várható. Az RCP8.5 esetén az RCA4-HadGEM2-ES (EUR-11) és az RCA4-CanESM2 (EUR-44) valószínűsíti a legnagyobb növekedést a vízellátottságban.
6. A kutatás során Feddema módszerével megmutattam a térségben a 21. század végére a szezonális karakterisztikákban és szezonális-típus-eloszlásban várható változást. 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) több mint 55%-os várható területi lefedettséggel és a COSMO-HadGEM2-ES (EUR-44) közel 90%-os lefedettséggel. Az „extrém T” szezonális legnagyobb területen az RCA4-HadGEM2-ES és a COSMO-HadGEM2-es esetén várható (a referencia időszakban jellemző 35%-ról 40%, és több mint 70%-ra növekedve). A térségre a legnagyobb arányban magas „T” szezonálisást becsülő modellpár az RCP4.5-ös forgatókönyvet követő WRF-CM5A-MR mindkét felbontás esetén (közel 40%-kal). Ezen modellpár esetén figyelhető meg egyedül növekedés a „T és P”-hez köthető „közepes” mértékű szezonálisban.

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 körülbelül 30%, 40% és 60%-os növekedéssel a referencia időszakhoz képest.

7. Feddema módszerével megmutattam, hogy olyan új klímátípusok megjelenése várható a térségben a 21. század végére, amik a referencia időszak során nem fordultak elő. Az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek szerint a „szemiarid” vízellátottsági, és az RCP8.5 forgatókönyv szerint a meleg hőellátottsági kategóriába sorolható területek megjelenése várható. A „meleg-nyirkos” és „meleg-száraz” klímátípusok esetén is 0,3%-os együttes medián területi lefedettség várható az RCP4.5-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 bizonytalansági tartománya, azaz az alsó és felső szélsőértékek különbsége 14%. Az RCP8.5 forgatókönyv esetén kapott becslések szerint a RCA4-CanESM2 adja a „meleg-szemiarid” és a RACMO-HadGEM2-ES a „meleg-száraz” klímátípusok legnagyobb várható területi kiterjedését (EUR-44). A projekciók bizonytalanságának tartományának értéke a lefedettség várható mértékében az említett klímátípusokra 17,8% (előbbi), illetve 17% (utóbbi). A „hűvös-szemiarid” klímátípus esetén az RCP4.5-öt követő különböző modellpárok alapján becsült várható területi lefedettség százalékos aránya 1,4%-os (EUR-11) és 15%-os (EUR-44) bizonytalansági tartományt fed le, míg az RCP8.5 esetén már jóval nagyobb a különböző modellpárok alapján várható a területi lefedettség tartománya (12,6% és 15,3%). Az RCP4.5 esetén a COSMO-HadGEM2-ES, az RCP8.5 esetén az RCA4-EC-EARTH becsüli a hűvös-száraz kategória legnagyobb területi lefedettségét.
8. Feddema módszerével megmutathatóak a térségben várható klíma- és szezonális-típus változások, valamint ezen folyamatok területi eloszlása. Ebben és a következő tézispontokban bemutatott eredményeket az RCA4-EC-EARTH modellpár alapján kaptam. Az RCP4.5 forgatókönyv szerint a változás fő mozgatórugója a felmelegedés, amely leginkább a hegyvidéki területeken vezet kategóriaváltáshoz. Az RCP8.5 forgatókönyv esetén melegedés várható a hegyvidéki területek jelentős részén, míg főként szárazodás az alföldeken, dombokon és alacsonyszintű hegységekben. A szezonális esetben a legjellemzőbb kategóriaváltás a „T és P” szezonális-típustól „T” szezonális-típussá való átmenet, miközben a szezonális mértéke változatlan marad, vagy erősödik mindkét forgatókönyv esetén, az RCP8.5 esetében a hegyvidéki területek jelentős részén.

9. Feddema módszerével bemutattam, hogy az éghajlati heterogenitásban változás várható a különböző magassági szinteken. A klímátípusok esetén a heterogenitás növekedése várhatóan az alföldeken lesz a legerősebb, ahol az RCP8.5 forgatókönyv alapján több mint megkétszereződik a klímátípusok száma a század végére. A homogenitás növekedése valószínűsíthető a dombvidékeken és az alacsonyszintű 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 alacsonyszintű hegységekben, valamint a közepes- és magashegységi régiókban, a többi kategóriában csökkenés várható.
10. A Feddema-folytonos megközelítéssel a Feddema-diszkrétéhez képest többetinformáció adható egy térség éghajlatváltozásáról. A Feddema-folytonossal megmutatható, hogy melyek azok a régiók, ahol kis változás is kategóriaváltáshoz vezet, valamint ahol nagy változás játszódik le ugyanazon kategórián belül. 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 várhatóan több mint 100 mm növekedést jelent, azonban kategóriaváltáshoz nem vezet. Az újonnan megjelenő klímátípusok esetén megmutatható, hogy a „meleg-szemiarid”, „meleg-száraz” és „hűvös-szemiarid” típusokhoz tartozó PET, és a vízellátottságot jellemző nedvességi index (I_m) értékei a kategória határokhoz közel helyezkednek el. A Feddema-folytonossal megmutatható továbbá, hogy azok a klímátípusok, amelyek éves átlagos I_m értéke pozitív a referencia-időszakban, várhatóan nedvesebbé válnak, míg a negatív I_m értékek esetén további csökkenés várható a vízellátottságban.
11. A Feddema-folytonossal a szezonális-típust meghatározó index (A_s) és a szezonális mértékét megadó index (I_s) változásai is vizsgálhatók. A teljes területre végzett vizsgálatok alapján a szezonális-típust meghatározó jellemzőkben nem várható olyan jelentős mértékű eltolódás a kategória határokon belül, a hő- és vízellátottság esetén. A Feddema-indexek eltolódásának vizsgálata magassági régiókra is elvégezhető. 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 (tengerszint feletti magasság > 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 értéket mutat, vagyis a szezonálisban

egyre inkább a hőmérséklet változékonysága a meghatározó, és növekvő I_s értékekkel, ami erősödő szezonális változékonyságot jelent.

12. A Feddema-folytonos megközelítéssel az is megmutatható, hogy a referencia időszak során egy adott klímátípusba sorolt terület milyen mértékű és irányú változáson megy keresztül az egyes Feddema-indexek alapján. A referencia időszakban „hűvös-száraz” területek esetén megmutatható, hogy a több mint 170 mm PET-növekedés ellenére ezek a területek várhatóan nem kerülnek új hőellátottsági kategóriába. A referencia időszakban „hideg-nedves” klímátípusú területek a század végére várhatóan már a melegebb „hűvös” és szárazabb „nyirkos” típusba kerül át, a „hűvös-száraz” területeken tapasztalt értéknél kisebb, ≈ 150 mm PET növekedés esetén is.
13. A Feddema-folytonos megközelítéssel az is megmutatható, hogy a referencia időszak során egy adott szezonális-típusba sorolt terület milyen mértékű és irányú változáson megy keresztül az egyes Feddema-indexek alapján. A referencia időszak során „T és P közepes szezonálisával” jellemezhető területek az RCP8.5 forgatókönyv estén a század közepéig nagyobb mértékben csak a szezonálisan változó elem tekintetében mutatnak változást. Míg a 21. század első felében egyre inkább a „T” szezonális típus lesz jellemző, addig a század második felére a szezonális intenzitásában várható változás. A növekvő szezonális várhatóan a közepesről a magas kategóriába való váltáshoz vezet. A „T és P magas szezonálisával” jellemezhető területeken hasonló tendencia figyelhető meg.
14. A Feddema-folytonos megközelítéssel megadható, hogy a referencia időszakban az egyes klíma- és szezonális-típusokba besorolt területek adott rácspontjai esetén milyen irányú és mértékű változás várható a 21. század során. Például a teljes térség 0,71%-án előforduló „hűvös-nedves” klímátípus egyes rácspontjainak hőellátottsága 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.
15. A Feddema-folytonos megközelítéssel megadható, hogy a térségben várhatóan a referencia időszakhoz képest a század végére „újonnan” klímátípusba kerülő rácspontok esetén az egyes Feddema-indexek milyen irányú és mértékű változása vezetett az új kategória megjelenéséhez. Például a teljes térség 0,34%-án a 21. század végén előforduló „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 hőellátottságúak, vízellátottság szempontjából a referencia időszakhoz képest szélesebb tartományt fednek le a „száraz” kategóriában.

4. Következtetések

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-diszkrétéhez 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.

5. Irodalomjegyzék

- 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>
- 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>
- Elguindi, N., Grundstein, A., Bernardier, 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.
- 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>
- 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>
- 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/10.1088/1755-1315/1109/1/010260>
- 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.
- 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>

- 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
- Rubel, F., Brügger, 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>
- 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/>
- Thornthwaite, C.W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 5–94. <https://doi.org/10.2307/210739>

6. Az értekezés témakörében készült publikációk

Lektorált folyóiratban megjelent cikkek

- 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., Ács, F., Breuer, H., 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>

Teljes közlemények

- Szabó, A. I., Ács, F., Breuer, H., 2018: Éghajlat-osztályozási módszerek összehasonlító elemzése a Kárpát-medence térségében CarpatClim adatok alapján. XIV. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, Gödöllő, Magyarország, 2018. április 5–7.

Hazai és nemzetközi konferencián bemutatott előadások és poszter

- Szabó, A. I., Ács, F., Breuer, H., 2017: Climate Analysis of the Carpathian Basin on the Basis of Using Climate Classification Schemes. 7. Österreichischer MeteorologInnentag, Graz, Ausztria, 2017. november 9–10. <https://wegcwww.uni-graz.at/meteotag2017/>
- Szabó, A. I., Belda, M., Breuer, H., Ács, F., 2019: On the role of model output statistical postprocessing methods in investigating projected changes of climate zones, European Geosciences Union General Assembly 2019, Bécs, Ausztria, 2019. április 7–12. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-954.pdf>, poszter prezentáció
- Szabó, A. I., Breuer, H., Ács, F., 2021: Ács, F., Első Országos Interdiszciplináris Éghajlatváltozási Tudományos Konferencia, Budapest, Magyarország, 2021. április 12–15. <https://hupcc.hu/konferencia/program/>
- Szabó, A. I., Breuer, H., Belda, M., Ács, F., 2021: Az évi és szezonális hő- és vízellátottság várható változásai a Kárpát-régióban a 21. század végére Feddema alapján. In: A Magyar Tudomány Ünnepe MTA programsorozat keretében megvalósult III. Interdiszciplináris konferencia a kárpát-medencei magyarság társadalmi és gazdasági helyzetéről. Szervező intézmény: Nemzetstratégiai Kutatóintézet. Budapest, 2021. november 25–26. https://tti.abtk.hu/images/Maps/III_Interdiszciplinris_Konferencia_Programfzet_NSKI.pdf
- Szabó, A. I., Breuer, H., Belda, M., Ács, F., 2023: Studying the process of climate change using the continuous form of the Feddema climate classification, European Geosciences Union General Assembly 2023, Bécs, Ausztria, 2023. április 23–28.