



**ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLATOK
A REGCM KLÍMAMODELLEL
A KÁRPÁT-MEDENCE TÉRSÉGÉRE**

Beszámoló jelentés

Bartholy Judit, Pongrácz Rita, Pieczka Ildikó, André Karolina,
Bogárdi István

Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék



Budapest, 2015.

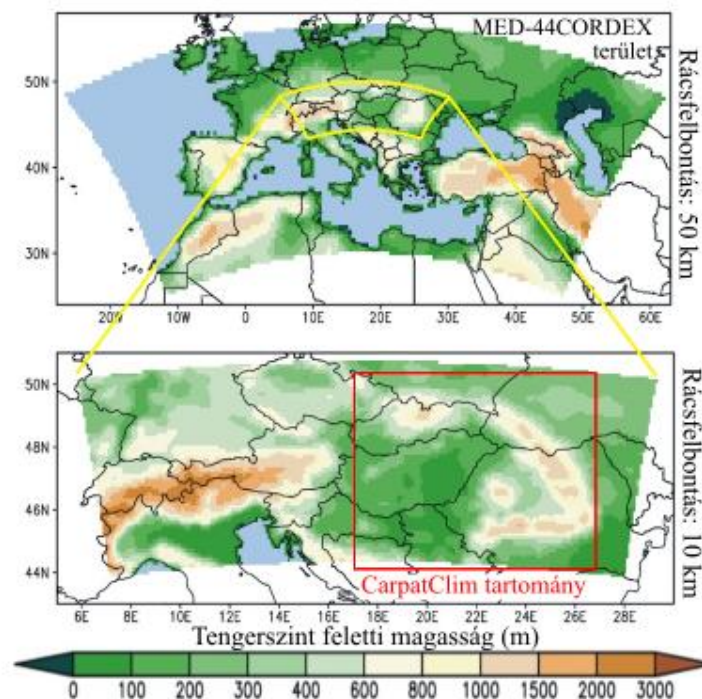
Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. A RegCM regionális éghajlati modell	4
3. Elvégzett és tervezett vizsgálatok a múltra vonatkozóan	5
3.1. BATS szubgrid séma vizsgálata	5
3.2. Csapadéksémákkal kapcsolatos érzékenységvizsgálat	6
3.3. Tervezett validációs vizsgálatok	6
4. Az érzékenység vizsgálatok eredményei	7
5. Összefoglalás	13
Irodalomjegyzék	14

Regionális éghajlati modellek felhasználásával részletesebb képet kaphatunk a jövőben várható éghajlatról, mint globális modellek alkalmazásával. A RegCM felhasználásával 50 km-es, majd további finomítással 10 km-es horizontális felbontású szimulációkat készítünk. Az éghajlati projekciókat megelőzően a modell által alkalmazott csapadéksémákra vonatkozóan érzékenységvizsgálatot is végzünk 10 km-es rácsfelbontáson, melynek eredményeit összegezzük ebben a jelentésben.

1. Bevezetés

Tanszéki kutatócsoportunk itt bemutatott vizsgálatainak végső célja a jövőben várható éghajlat – globális modellekhez képest – részletesebb leírására alkalmas regionális éghajlati modellfuttatás elvégzése. Ennek keretében a múltra és a jövőre vonatkozó modell-szimulációkat készítünk a RegCM regionális éghajlati modell felhasználásával. A Kárpát-medence térségére fókuszáló modellfuttatásainkhoz első lépésként 50 km-es horizontális felbontással végzünk modellszimulációkat. Ez a viszonylag durvább rácsfelbontás hazánk mérete miatt még nem alkalmas arra, hogy éghajlatváltozási hatástanulmányokat alapozzon meg, azonban megfelelő peremfeltételeket szolgáltat a további dinamikus alapú leskálázáshoz. Az 50 km-es felbontásban előálló eredményeinket tehát a finomabb, 10 km-es felbontású szimulációk készítéséhez használjuk fel (1. ábra), amelyekre a hazai végfelhasználók igényt tartanak a hatástanulmányok, adaptációs vizsgálatok készítéséhez. A hatásvizsgálatok, további elemzések elősegítése érdekében a kapott eredmények az RCMTÉR alrendszer egyik elemeként bekerülnek a fokozatosan kiépülő hazai NATÉR rendszerbe.



1. ábra: Az 50 km-es (fent) és a 10 km-es (lent) horizontális felbontású modellszimulációkban alkalmazott tartomány domborzata.

A jövőben várható éghajlatváltozás vizsgálata előtt érzékenységvizsgálatot és részletes validációs elemzést végzünk, melynek során a múltira vonatkozó futtatások eredményeit összevetjük a homogenizált állomási adatokon alapuló rácsponti idősorokat tartalmazó CarpatClim adatbázissal (Spinoni et al., 2015). Az érzékenységvizsgálatokhoz többféle beállítást használtunk, például a BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme – Bioszféra-Atmoszféra Transzfer Séma; Dickinson et al., 1993) közelítésben lévő ún. szubgrid sémát (Giorgi et al., 2003), mely a rácsfelbontásnál kisebb folyamatok figyelembe vételére alkalmas. Egy másik vizsgálati cél a konvektív csapadéokra vonatkozó parametrizációs beállítások közül kiválasztani azt, amelyik a leginkább alkalmazható a Kárpát-medence térségében. E jelentésben ezen vizsgálatok eredményeit mutatjuk be.

2. A RegCM regionális éghajlati modell

A RegCM korlátos tartományú hidrosztatikus éghajlati modellt eredetileg az NCAR¹-ban fejlesztették ki, s jelenleg a Triesztben működő ICTP² közvetítésével hozzáférhető kutatási célokra. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén alkalmazott modellverzió adaptációs lépéseit Torma et al. (2008; 2011) részletezi. Mivel a modell nyílt forráskódú, így akár annak módosítására is lehetőségünk van. Az adaptálás és futtatás közben felmerült kérdésekkel, problémákkal fordulhatunk a modell fejlesztőihez, valamint a RegCNET kutatói fórum tagjaihoz (Giorgi et al., 2006).

A modell első generációjának kidolgozásához az NCAR és a PSU³ 4-es verziószámú mezoskálájú modellje (MM4) szolgált alapul az 1980-as évek végén (Dickinson et al., 1989). A RegCM modell dinamikája tehát az MM4 modelltől származik, amely egy összenyomható, hidrosztatikus rácsponti modell. A RegCM Lambert-féle kúpvetületet használ, s a horizontális diszkretizációból eredő fázishibákat a B-típusú Arakawa-rács alkalmazásával csökkenti. Az időbeli diszkretizáció során egy ún. split-explicit séma alkalmazásával a modell külön kezeli az egyenletrendszer lineáris és nemlineáris tagjait. A RegCM függőleges irányú szigma koordináta-rendszere a légkör alsó rétegeiben felszínkövető, míg az alacsonyabb nyomású szintek már kisimult izobár felületek mentén futnak. A középső szintek folyamatosan egyenesednek ki, ahogyan közeledünk a modellben képviselt legalacsonyabb nyomási szintek felé. A szintek száma a kitűzött cél függvényében változtatható.

Az MM4 klímakutatásokhoz való átalakítása során több fizikai parametrizációt módosítottak, illetve lecseréltek. Ezek döntően a sugárzási energia-átviteli és a felszíni fizikai folyamatokat érintik, s így jutottak a RegCM első generációjához (Giorgi, 1990). Ebben a modellben megtalálható a felszíni folyamatokat leíró ún. BATS1E⁴ (Dickinson et al., 1993), a CCM3⁵ klímamodell sugárzási energia-átviteli sémája, egy közepes felbontású lokális planetáris határréteg séma, nem-lokális határréteg séma, valamint többféle konvektív séma

¹ National Center for Atmospheric Research (amerikai Nemzeti Léggörkutató Központ)

² Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (Nemzetközi Elméleti Fizikai Központ)

³ Pennsylvania State University (Pennsylvania Állami Egyetem)

⁴ Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (Bioszféra-Atmoszféra-Transzfer-Séma)

⁵ Climate Community Model (Közösségi Éghajlati Modell)

(Anthes, 1977; Grell, 1993; Emanuel, 1991; Emanuel és Zivkovic-Rothman, 1999). A további modellfejlesztés során a meglévő egyenleteket úgy korrigálták, hogy csökkentsék a nagy topográfiai gradiensekből fakadó túlzott mértékű horizontális diffúziót (Giorgi et al., 1993a,b). Az így létrehozott RegCM2 modellverzióban a fizikai folyamatokat leíró eljárásokhoz az alapot a CCM3 klímamodell és az MM5 hidrosztatikus mezoskálájú modell (Grell et al., 1994) szolgáltatta.

A korábbi verziókhöz képest az általunk újonnan adaptált modellverzió (Elguindi et al., 2011) új felszíni, planetáris határréteg és légkör-tengerfelszín fluxus sémákat tartalmaz, továbbá a korábbi sugárzás-átviteli és határréteg sémák is módosításra kerültek. A jelenlegi modell már párhuzamos futtatásra is alkalmas, ami lényeges tulajdonság a futtatások minél rövidebb gépidő alatt történő kivitelezéséhez.

3. Elvégzett és tervezett vizsgálatok a múlttra vonatkozóan

A múlttra elvégzett és folyamatban lévő különböző modellfuttatásaink legfontosabb jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat: A vizsgált 10 km horizontális felbontású modellszimulációk legfontosabb jellemzői.

Modellfuttatás	Meghajtó modell	Konvektív séma	Alkalmazott lezárás	BATS szubgrid aktiválása	Futtatási időszak
I. H-kevertFC-s	RegCM4.3 (50 km)/HadGEM2	kevert	FC	igen	1971–1975
H-kevertFC-ns	RegCM4.3 (50 km)/HadGEM2	kevert	FC	nem	1971–1975
E-Kuo-s	RegCM4.3 (50 km)/ERAINT	Kuo	–	igen	1981–1990
II. E-kevertFC-s	RegCM4.3 (50 km)/ERAINT	kevert	FC	igen	1981–1990
E-kevertAS-s	RegCM4.3 (50 km)/ERAINT	kevert	AS	igen	1981–1990

A táblázatban I. és II. jelöli a két elvégzett érzékenységvizsgálatot, a félkövér kiemelés ezek közül a validáció során elkészítendő (2005-ig folytatandó) futtatásokat jelzi.

3.1. BATS szubgrid séma vizsgálata (I. vizsgálat)

A BATS szubgrid sémáját aktiválva egy finomabb rácsháló definiálásával vesszük figyelembe az eredeti rácsfelbontásnál kisebb skálán zajló folyamatokat, amelyekhez a földhasználat, a domborzat és a talajtextúra megadása szükséges. A meteorológiai változók közül a hőmérséklet leskalázása a durvább és finomabb rácshálózat közötti magasságkülönbségeken alapulva és az átlagos vertikális gradienst figyelembe véve történik. A relatív nedvesség nem változik, a konvektív csapadék pedig a durvább rácscella 30%-án véletlenszerűen oszlik meg. Ezután kerül sor a BATS séma alkalmazására a finomabb rácson, végül a felskálázásra, a finomabb rácshálózatra kapott értékek összegzésével. Ennek a

sémának az eredményekre gyakorolt hatását vizsgáltuk két szimuláció segítségével, az 1971–1975 időszakra, globális klímamodellből származó kezdeti- és peremfeltételeket használva.

3.2. Csapadéksémákkal kapcsolatos érzékenységvizsgálat (II. vizsgálat)

A RegCM-szimulációk csapadék outputjainak parametrizációs beállításra való érzékenységét különböző csapadéksémák használatával vizsgáltuk az 1981–1990 időszakra. Ezekhez a futtatásokhoz az ERA-Interim reanalízis adatok biztosították a kezdeti- és oldalsó peremfeltételeket.

Elemzéseink során a RegCM-futtatáshoz beállítható sémák közül a módosított Kuo (Anthes, 1977), valamint a kevert MIT-Emanuel/Grell sémát alkalmaztuk. A kevert sémában a tengeri felszínnek esetén az MIT-Emanuel közelítés (Emanuel, 1991, Emanuel and Zivkovic-Rothman, 1999) szerepel, a szárazföldi felszínnek felett viszont a Grell (1993) sémával számolunk. Ez utóbbi esetén kétféle lezárást alkalmaztunk: AS (Arakawa and Schubert, 1974, Grell et al. 1994) és FC (Fritsch and Chappell, 1980).

A Kuo sémában a konvekció akkor indul meg, amikor egy instabil légoszlopban a nedvesség-konvergencia elér egy bizonyos küszöbértéket. Ez a közelítés viszonylag egyszerű és általában durvább felbontáson jobban működik, mint finomabb felbontáson (Elguindi et al., 2011).

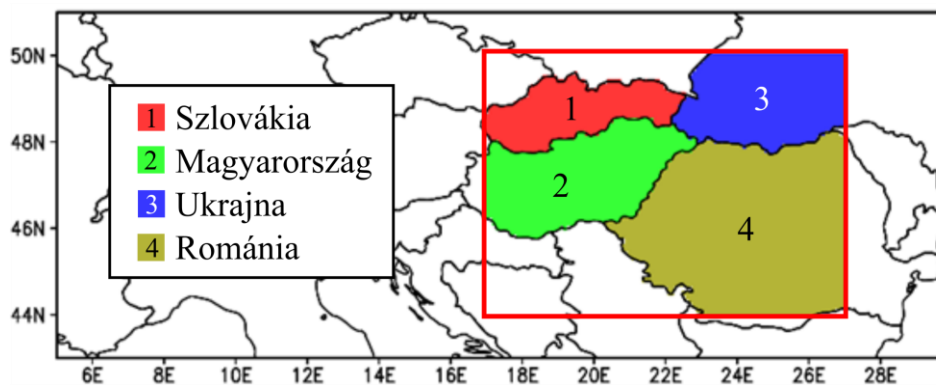
A Grell sémában a felhők leírására két stabil cirkulációt használnak: egy felszálló, illetve egy leszálló áramlást. Amikor egy telített légréteg emelkedik, akkor megtörténik a kondenzáció. Az ehhez a sémához alkalmazott két lezárás közötti fő különbség az, hogy az AS lezárás a konvektív fluxusokat és a csapadékot a légkör állapotának változásával kapcsolja össze, míg az FC lezárás a konvektív fluxusok és a légkör instabilitási foka közötti összefüggést használja fel. Az MIT-Emanuel közelítésben a konvekció akkor következik be, amikor a semleges felhajtóerő szintje a felhőalap felett található. Ez a séma a szárazföldi felszínnek felett általában felülbecsüli a csapadékot, a Grell séma pedig a trópusi óceánok felett kevésbé pontos (Davis et al., 2009). Emiatt érdemes a két séma kombinációjaként beépített kevert MIT-Emanuel/Grell sémát használni.

3.3. Tervezett validációs vizsgálatok

A validációs vizsgálatok során két hosszabb RegCM-futtatás eredményeit fogjuk elemezni. Ezekhez egyrészt a Brit Meteorológiai Szolgálat által előállított HadGEM2 (Hadley Centre Global Environment Model version 2: Hadley Központ Globális Környezeti Modell 2. verzió) outputok szolgáltatják a kezdeti- és oldalsó peremfeltételeket. Másrészt az ERA-Interim reanalízis adatok biztosítják a meghajtást. A modellfuttatásaink 1981–2000 időszakra vonatkozó eredményeit tervezzük majd összevetni a referenciaként használt CarpatClim adatbázissal (Spinoni et al., 2015).

4. Az érzékenység vizsgálatok eredményei

Elemzéseink során hosszabb időszakokra – 5 évre, illetve 10 évre – vonatkozó átlagos éves, illetve évszakos hibákat vizsgáltunk a hőmérsékletre és a csapadékösszegre. A térképes megjelenítések mellett ún. Taylor-diagramokon (Taylor, 2001) mutatjuk be az egyes modell-szimulációk pontosságát, illetve a referencia adatbázistól való eltérésüket. Ehhez a CarpatClim adatbázis által lefedett tartományba eső négy régióra – Szlovákia, Magyarország, DNy-Ukrajna és Románia – területi átlagokat tekintünk (2. ábra).

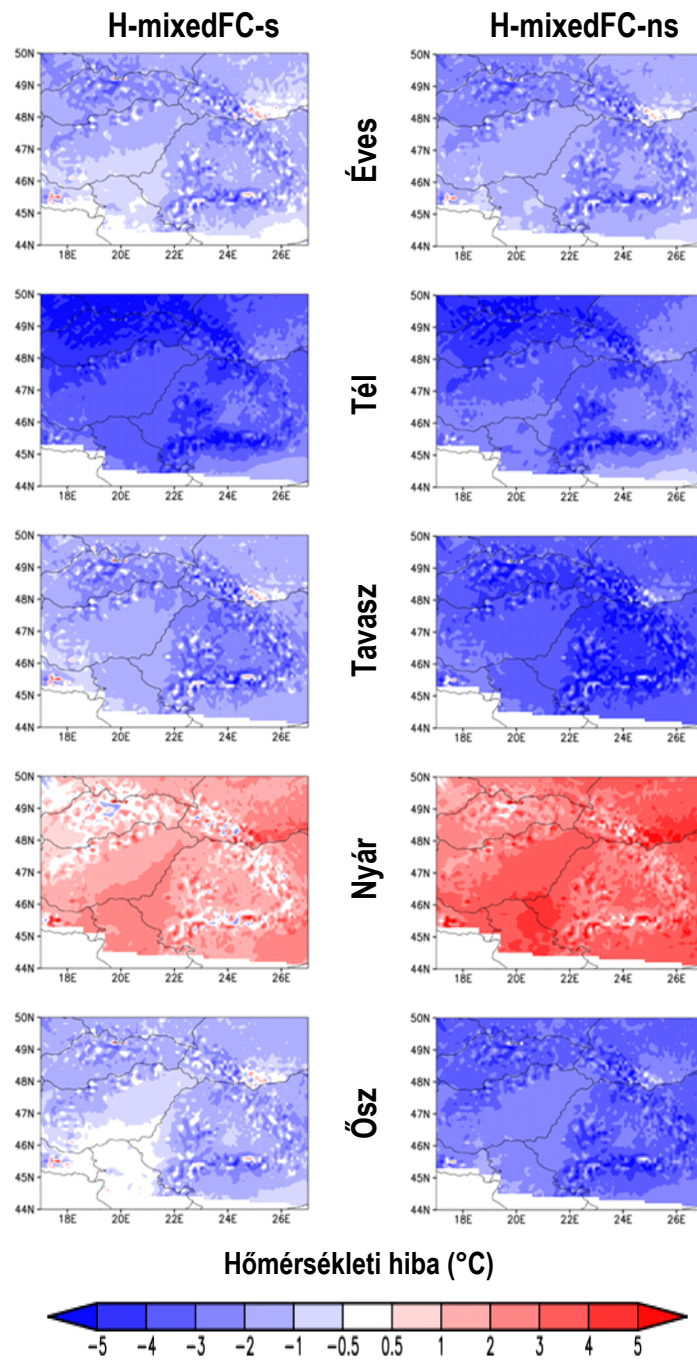


2. ábra: A 10 km horizontális felbontású szimulációk esetén a vizsgált régiók megjelenése a teljes integrálási tartományon belül.

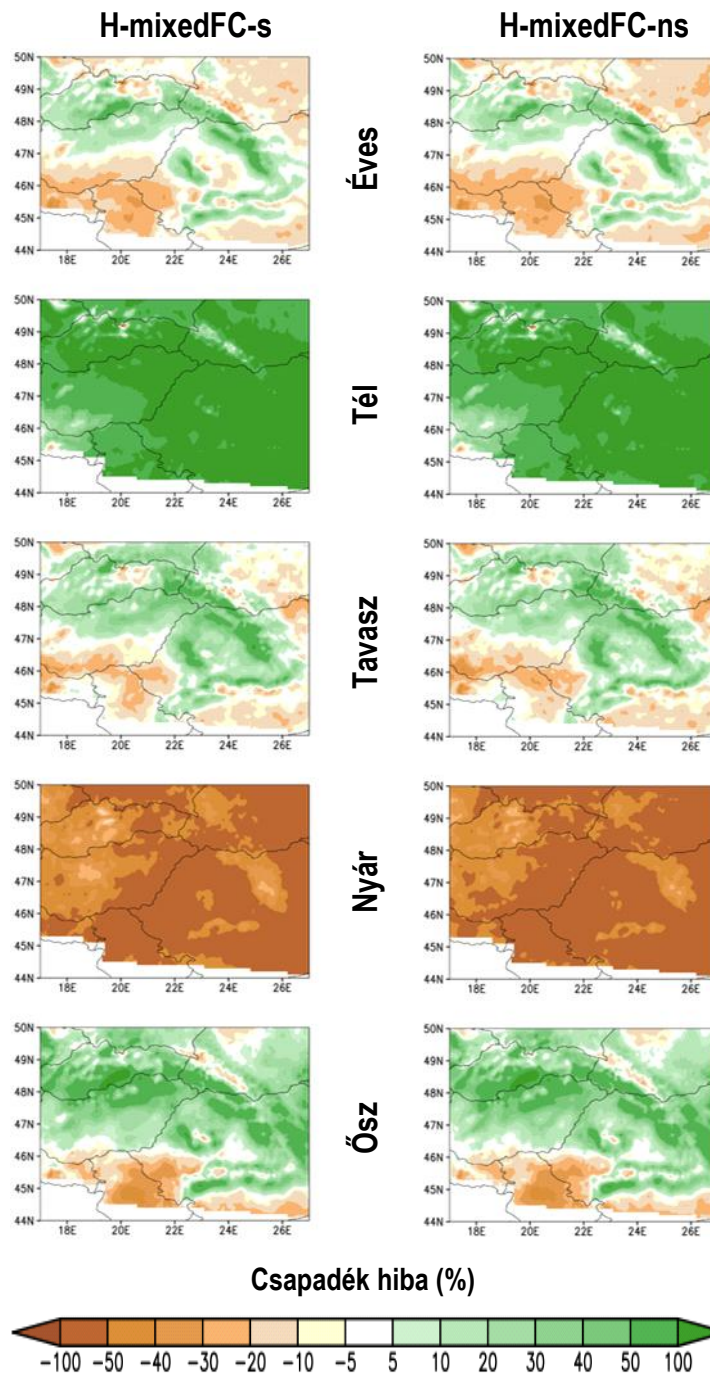
A 3. ábra összegezi az éves átlaghőmérséklet és az évszakos átlaghőmérsékletek átlagos hibáinak – azaz a szimulációk és a CarpatClim referencia adatok közötti különbségek – térbeli eloszlását. A 4. ábra térképei ugyanezt a csapadékra vonatkozóan adják meg.

A térképsorozaton egyértelműen megfigyelhető, hogy általánosságban véve a RegCM-szimulációk alulbecslik az átlagos hőmérsékletet, mely alól csak a nyári időszak a kivétel, amikor viszont a vizsgált kivágat területén alapvetően a felülbecslés dominál (3. ábra). A két beállítást összehasonlítva a hőmérsékleti hibamezők abszolút értékben jelentősen kisebb értékeket mutatnak a BATS szubgrid séma aktiválásakor, mint anélkül.

A csapadékot tekintve (4. ábra) – a hőmérsékletéhez hasonlóan – ugyancsak egymással ellentétes előjelű hibákat kaptunk a téli és nyári időszakra: télen a referencia adatbázishoz képest átlagosan több a szimulált csapadék, míg nyáron jelentősen kevesebb. A nagyobb mértékű téli és nyári hibákhoz viszonyítva tavasszal és ősszel kisebbek a kapott átlagos hibaértékek. A tavaszi és őszi időszakban a vizsgált terület déli részein (tavasszal északkeleten is) látható a referencia adatokhoz viszonyítva valamelyest szárazabb szimulált éghajlat, a kivágat nagyobb hányadán viszont a csapadék kisebb-nagyobb felülbecslése jellemző. A kétféle modellfuttatásból származó átlagos csapadékhiba-mezők között nem látható jelentősebb eltérés.



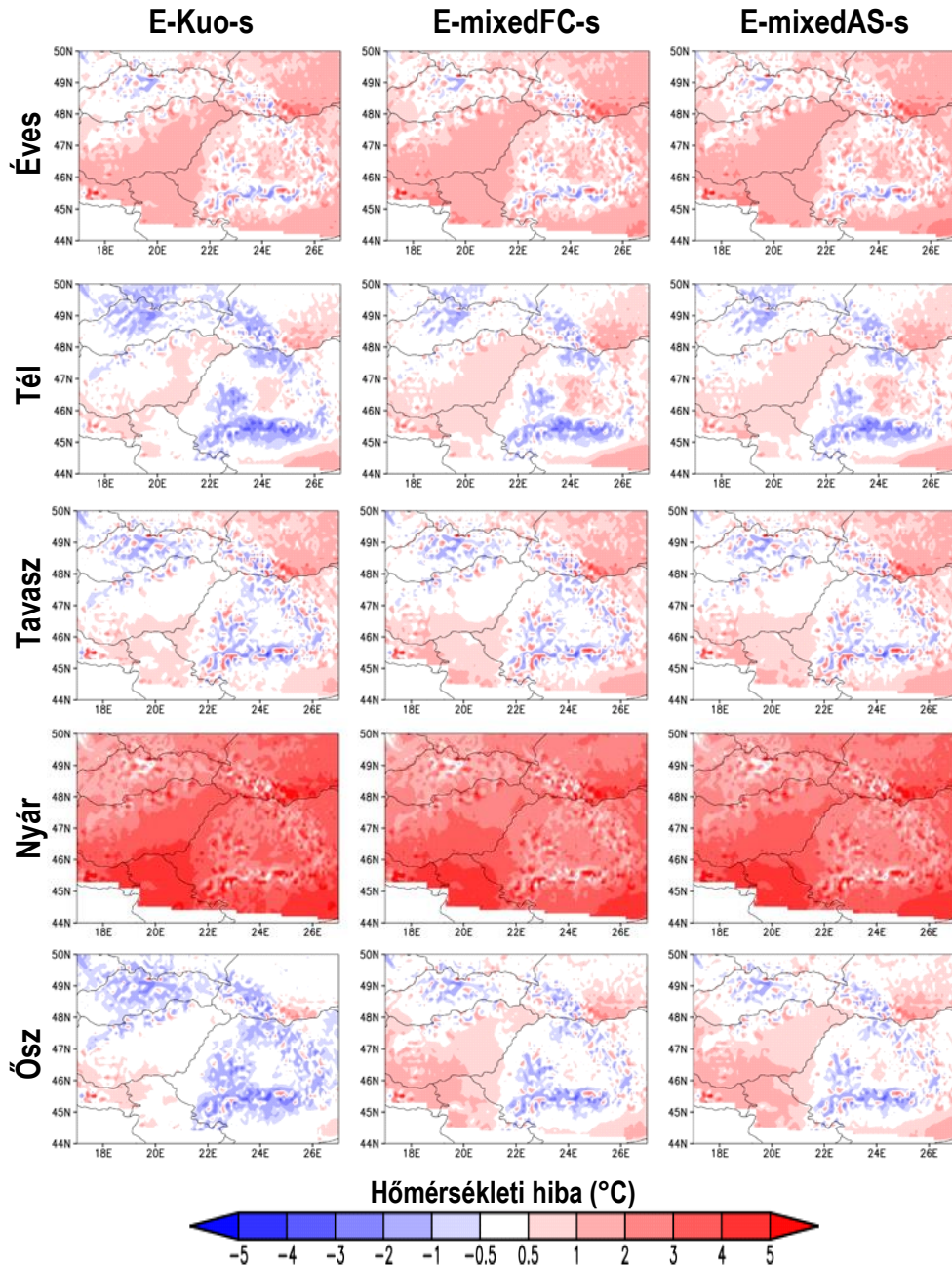
3. ábra: A BATS-szubgrid sémával kapcsolatos érzékenységvizsgálat: az átlaghőmérséklet éves, illetve évszakos átlagos hibájának térbeli eloszlása az 1971–1975 időszakra, kétféle RegCM modellfuttatás esetében.



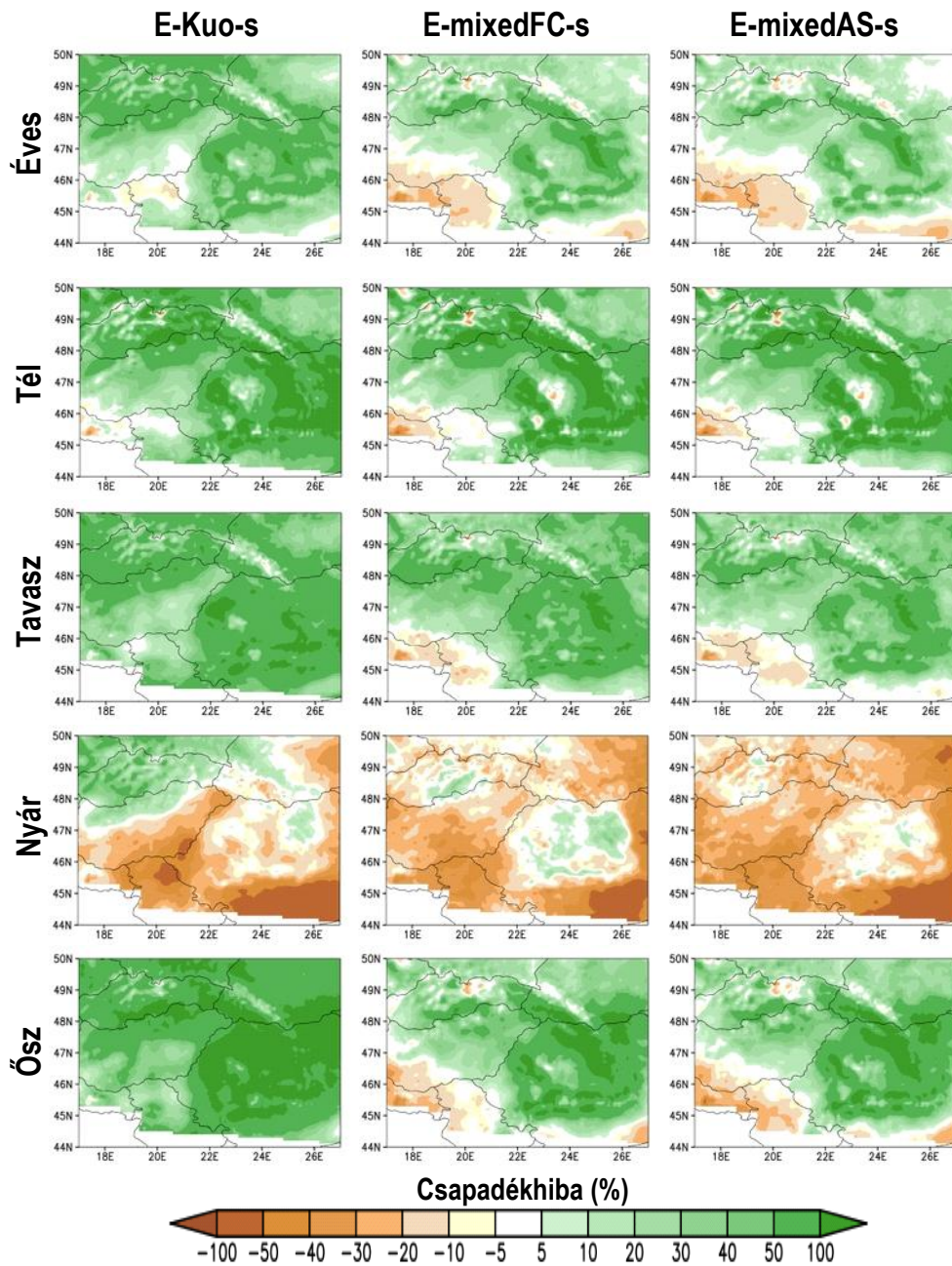
4. ábra: A BATS-szubgrid sémával kapcsolatos érzékenységvizsgálat: az átlagos csapadékösszegek éves, illetve évszakos átlagos hibájának térbeli eloszlása az 1971–1975 időszakra, kétféle RegCM modellfuttatás esetében.

A BATS szubgrid séma részletes vizsgálata során (Bartholy et al., 2015) arra a következtetésre jutottunk, hogy a séma bekapcsolásával összességében véve pontosabb eredményeket kaphatunk, mintha nem lenne bekapcsolva, ezért a csapadéksémák elemzésekor már alkalmaztuk a BATS szubgrid sémát.

A továbbiakban a csapadéksémákra vonatkozó érzékenységvizsgálat eredményeit részletezzük. Az 5. ábra a hőmérsékletre, a 6. ábra pedig a csapadékra számított átlagos éves és évszakos hibamezőket mutatja a CarpatClim adatbázishoz viszonyítva. A térképsorozatról leolvasható, hogy a RegCM szimulációk általánosságban véve melegebb és szárazabb nyarakat, valamint az év többi részében összességében több csapadékot becsülnek a referencia adatokhoz képest.



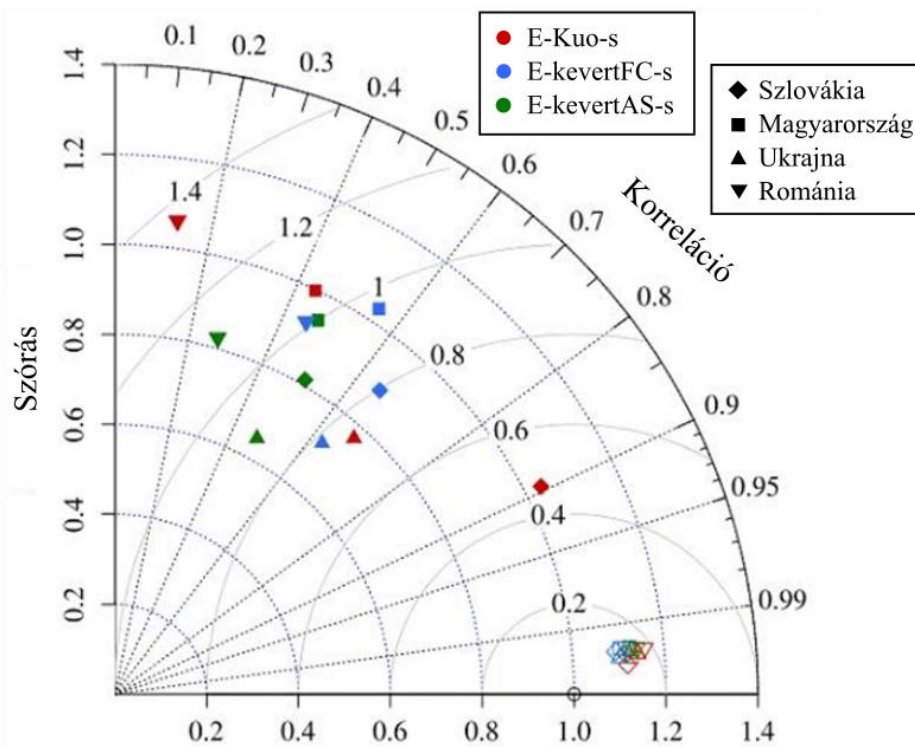
5. ábra: A csapadéksémákkal kapcsolatos érzékenységvizsgálat: az átlaghőmérséklet éves, illetve évszakos átlagos hibájának térbeli eloszlása az 1981–1990 időszakra, háromféle RegCM modellfuttatás esetében.



6. ábra: A csapadéksémákkal kapcsolatos érzékenységvizsgálat: az átlagos csapadékösszegek éves, illetve évszakos átlagos hibájának térbeli eloszlása az 1981–1990 időszakra, háromféle RegCM modellfuttatás esetében.

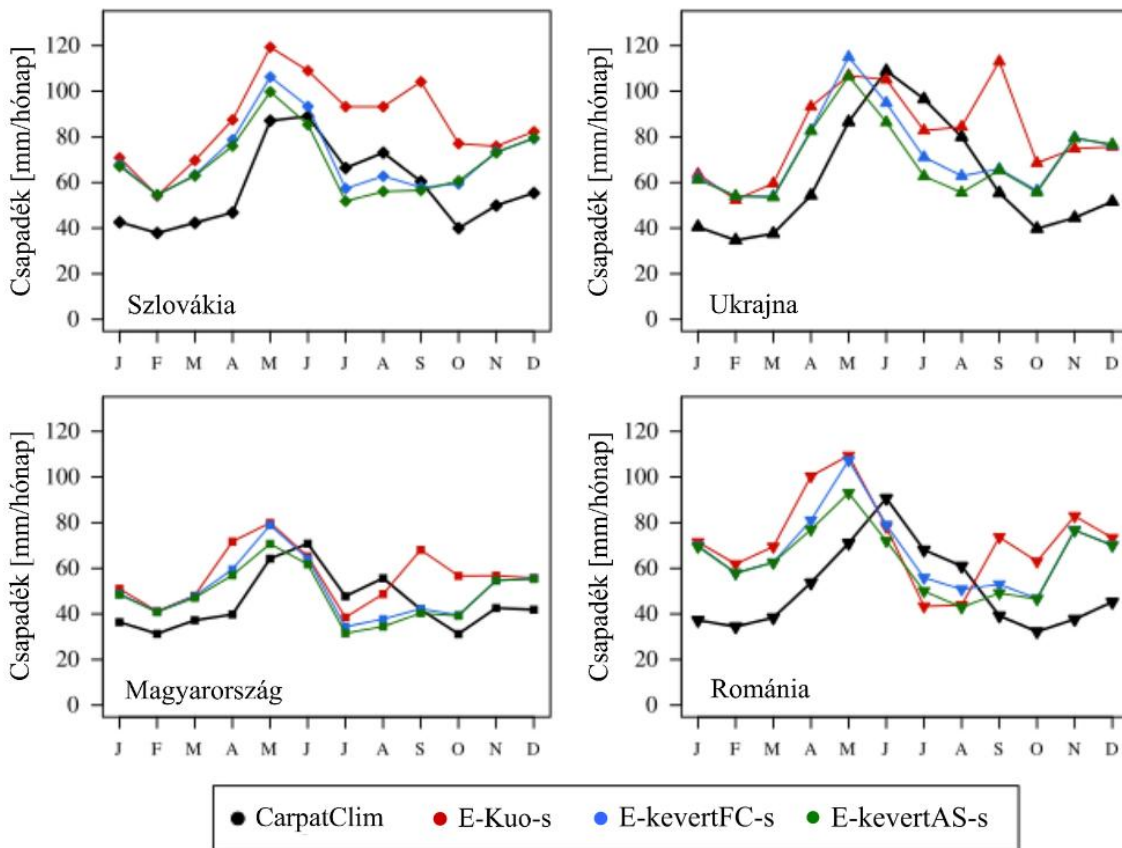
Az egyes beállítások közötti különbségek az itt látható átlagos hibamezők áttekintésével nehezen meghatározhatók, ezért a komplexebb elemzést lehetővé tevő Taylor-diagramok felhasználásával végeztünk további elemzéseket. A havi átlaghőmérsékletek és átlagos csapadékösszegek időbeli menetét elemző Taylor-diagram a 7. ábrán látható. Erről egyértelműen leolvasható, hogy a hőmérséklet (üres szimbólumok) esetében mindhárom beállítással hozzávetőlegesen egyforma a modellszimuláció hibája, továbbá az is jól látszik, hogy ez a hiba összességében nem számottevő. A csapadék esetében a Kuo parametrizáció alkalmazásával (piros teli szimbólumok) jól elkülönül a négy régió, ami a hiba területi

változékonyságára utal. A modellszimuláció Szlovákia területére eredményezte a legpontosabb csapadékbecsléseket ezzel a parametrizációval. A másik parametrizációt vizsgálva azt mondhatjuk, hogy mind a négy régió esetében az FC lezárás alkalmazásával kaptunk pontosabb becslést a Taylor-diagramon megjelenített mindhárom mérőszám (korrelációs együttható, szórás, négyzetes hiba) tekintetében.



7. ábra: A csapadéksémákkal kapcsolatos érzékenységvizsgálat: a havi átlaghőmérséklet (üres szimbólumok) és csapadékösszeg (teli szimbólumok) időbeli menetének Taylor-diagramja (1981–1990).

A fenti komplex jellemzés mellett megvizsgáltuk a havi csapadékösszegek éven belüli átlagos menetét (8. ábra). A CarpatClim adatai alapján mind a négy vizsgált régióban általában a nyári félévben nagyobbak, a téli félévben kisebbek a havi csapadékok. A maximális havi csapadékmennyiség júniusra tehető. A modell-szimulációk összességében alulbecsülik a nyári csapadékösszeget, a többi időszakban pedig felülbecsülnek. Szlovákiában a Kuo parametrizáció alkalmazásával egész évben felülbecslést tapasztalunk. Ugyancsak a Kuo-féle parametrizáció esetén Ukrajnában a szeptemberi csapadékösszegekre a többi becsléshez képest szokatlanul nagy felülbecslést kapunk. Ennél a szimulációnál a másik három régióban is megfigyelhető a relatíve magasabb becslt szeptemberi csapadékösszeg, de nem annyira feltűnő az eltérés, mint Ukrajnában. A Kuo-féle parametrizációval ellentétben a kevert MIT Emanuel/Grell séma mindkét lezárással alkalmazva elfogadhatóan reprodukálta a csapadék évi menetét, a referencia adatokhoz képest egy hónapos előbbre tolódás figyelhető meg mind a négy vizsgált régióban: a júniusi helyett májusi csapadékmaximummal. Habár a tavaszi felülbecslés magasabb, a nyári alulbecslés egyértelműen kisebb mértékű az egész Kárpát-régióban az FC lezárás esetén, mint az AS lezárással.



8. ábra: A csapadéksémákkal kapcsolatos érzékenységvizsgálat: az átlagos havi csapadékösszegek éven belüli eloszlása (1981–1990).

A csapadék évi menetére kapott eredmények megerősítik a Taylor-diagram (7. ábra) alapján levonható következtetést, amely szerint összességében a regionális éghajlati viszonyok legpontosabb leírása a kevert MIT-Emanuel/Grell konvektív csapadék parametrizációs séma, FC lezárással történő alkalmazásával érhető el. Éppen ezért a további munkánk során ezt a modellfuttatást fogjuk vizsgálni hosszabb időszakra integrálva.

5. Összefoglalás

E jelentésben bemutatott vizsgálatunk során a RegCM regionális klímamoddellel készített 10 km-es horizontális felbontású szimulációkkal végeztünk érzékenységvizsgálatokat.

A BATS szubgrid séma vizsgálata során arra a következtetésre jutottunk, hogy a séma bekapcsolásával összességében véve pontosabb eredményeket kaphatunk, mintha nem lenne bekapcsolva. A csapadéksémák vizsgálata alapján pedig levonható az a következtetés, hogy a kevert MIT-Emanuel/Grell parametrizáció, az FC lezárással alkalmazva összességében a

hőmérséklet és a csapadék pontosabb szimulációját eredményezi a másik két vizsgált beállításhoz képest.

Kapott eredményeink alapján tehát a további futtatások a BATS szubgrid séma aktiválásával és a kevert MIT-Emanuel/Grell parametrizáció FC lezárású verziójával beállítva folytatódnak.

Köszönetnyilvánítás. Kutatásaink az Európai Gazdasági Térség (EGT) Támogatási Alap „Alkalmazkodás az Éghajlatváltozáshoz” Program (EEA-C13-10) támogatta. A validációs adatokat a CARPATCLIM Adatbázis szolgáltatta, amelynek előállítását az Európai Közösség támogatta a JRC intézeten keresztül kiírt kutatási program keretében.

Irodalomjegyzék

- Anthes, R.A., 1977: A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon. Wea. Rev.*, 105: 270-286.
- Arakawa, A., Schubert, W.H., 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large scale environment. Part I. *J. Atmos. Sci.*, 31: 674-701.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Pieczka, I., Kelemen, F.D., Kis, A., André, K., 2015: Regional climate model experiment using RegCM subgridding options in the framework of Med-CORDEX. 95th Annual Meeting of the American Meteorological Society. Phoenix, AZ. Paper 591, 6p. <https://ams.confex.com/ams/95Annual/webprogram/Manuscript/Paper262821/BJ-et-al-AMS2015.pdf>
- Davis, N., Bowden, J., Semazzi, F., Xie, L., Öno, B., 2009: Customization of RegCM3 regional climate model for eastern Africa and a tropical Indian Ocean domain. *J. Climate*, 22: 3595-3616.
- Dickinson, R.E., Errico, R.M., Giorgi, F., Bates, G.T., 1989: A regional climate model for the western United States. *Climatic Change*, 15: 383-422.
- Dickinson, R., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P.J., 1993: Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model. *NCAR Technical Note NCAR/TN-387+STR*, National Center for Atmospheric Research, 72p. DOI: 10.5065/D67W6959
- Elguindi, N., Bi, X., Giorgi, F., Nagarajan, B., Pal, J., Solmon, F., Rauscher, S., Zaakey, A., Giuliani, G., 2011: Regional climatic model RegCM user manual version 4.3. 32p. ITCF, Trieste, Italy.
- Emanuel, K.A., 1991: A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, 48: 2313-2335.
- Emanuel, K.A., Zivkovic-Rothman, M., 1999: Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *J. Atmos. Sci.*, 56: 1766-1782.

- Fritsch, J.M., Chappell, C.F., 1980: Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 37: 722–1733.
- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate*, 3: 941–963.
- Giorgi, F., Marinucci, M.R., Bates, G.T., 1993a: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 2794–2813.
- Giorgi, F., Marinucci, M.R., Bates, G.T., DeCanio, G., 1993b: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 2814–2832.
- Giorgi, F., Francisco, R., Pal, J., 2003: Effects of a subgrid-scale topography and land use scheme on the simulation of surface climate and hydrology. Part I: Effects of temperature and water vapor disaggregation. *J. Hydrometeorol.*, 4: 317–333.
- Giorgi, F., Pal, J.S., Bi, X., Sloan, L., Elguindi, N., Solmon, F., 2006: Introduction to the TAC special issue: The RegCNET network. *Theor. Appl. Climatol.*, 86: 1–4.
- Giorgi, F., Jones, C., Asrar, G.R., 2009: Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin*, 58: 175–183.
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M.B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G.T., Nair, V., Giuliani, G., Turuncoglu, U.U., Cozzini, S., Güttler, I., O'Brien, T.A., Tawfik, A.B., Shalaby, A., Zakey, A.S., Steiner, A.L., Stordal, F., Sloan, L.C., Brankovic, C., 2012: RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52: 7–29.
- Grell, G.A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 764–787.
- Grell, G.A., Dudhia, J., Stauffer, D.R., 1994: Description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), Tech. Rep. TN-398+STR, NCAR, Boulder, Colorado, USA. 121p.
- Somot, S., Ruti, P., and the Med-CORDEX modelling Team, 2012: The Med-CORDEX initiative: towards fully coupled Regional Climate System Models to study the Mediterranean climate variability, change and impact. *Geophys. Res. Abstr.*, 14: EGU2012-6080.
- Spinoni, J., Szalai, S., Szentimrey, T., Lakatos, M., Bihari, Z., Nagy, A., Németh, Á., Kovács, T., Mihic, D., Dacic, M., Petrovic, P., Kržič, A., Hiebl, J., Auer, I., Milkovic, J., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Kilar, P., Limanowka, D., Pyrc, R., Cheval, S., Birsan, M.-V., Dumitrescu, A., Deak, G., Matei, M., Antolovic, I., Nejedlík, P., Štastný, P., Kajaba, P., Bochníček, O., Galo, D., Mikulová, K., Nabyvanets, Y., Skrynyk, O., Krakovska, S., Gnatiuk, N., Tolasz, R., Antofie, T., Vogt, J., 2015: Climate of the Carpathian Region in the period 1961–2010: climatologies and trends of 10 variables. *Int. J. Climatol.*, 35: 1322–1341. doi: 10.1002/joc.4059
- Taylor, K.E., 2001: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.: Atmospheres* (1984–2012), 106(D7): 7183–7192.

- Torma, Cs., Bartholy, J., Pongrácz, R., Barcza, Z., Coppola, E., Giorgi, F., 2008: Adaptation and validation of the RegCM3 climate model for the Carpathian Basin. *Időjárás*, 112: 233–247.
- Torma, Cs., Coppola, E., Giorgi, F., Bartholy, J., Pongrácz, R., 2011: Validation of a high resolution version of the regional climate model RegCM3 over the Carpathian Basin. *J. Hydrometeorol.*, 12: 84–100.