

A WRF REGIONÁLIS KLÍMAMODELL DINAMIKAI ÉS FIZIKAI BEÁLLÍTÁSOKRA VALÓ ÉRZÉKENYSÉGÉNEK VIZSGÁLATA

Varga Ákos János, Breuer Hajnalka

*Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.
e-mail: v.akos94@gmail.com, bhajni@nimbus.elte.hu*

Célunk a WRF regionális éghajlati modellként történő adaptálása a Kárpát-medence térségére. Ennek érdekében érzékenységvizsgálatot végzünk a modellel, melynek keretében rövidtávú, egy múltbeli évre vonatkozó szimulációkat készítettünk 50 km-es és 10 km-es horizontális felbontás mellett. Az egyes futtatások a dinamikai beállítások és a fizikai parametrizációs sémák tekintetében térnek el egymástól. Az eredményeket validáció céljából mérési adatokkal vetettük össze.

Kulcsszavak: regionális éghajlati modell, WRF, érzékenységvizsgálat, validáció

Bevezetés

A regionális klímamodellekkel lehetőség nyílik egy adott térség múlt- és jövőbeli éghajlati viszonyainak nagy – néhány tíz km-től akár néhány km-ig terjedő – horizontális felbontással történő szimulációjára. Megfelelően kis ráctávolság alkalmazásával olyan lokális éghajlatmódosító tényezők is figyelembe vehetők, mint a topográfia, a felszínhasználat, a növényborítottság eloszlása és annak változásai, vagy a szárazföld-vízfelület határvonalak, például tengerpartok és tavak esetén (Giorgi & Mearns, 1991). A regionális modellek megfelelő eszközök a szélsőséges időjárási események statisztikai előfordulásának vizsgálatára is (Beniston et al., 2007). Következésképpen széles felhasználói körnek nyújtanak hasznos adatokat, legyen szó politikai döntéshozókról, hidrológiai, mezőgazdasági szakemberekről, energetikai vagy infrastrukturális tervezőkről (Maraun et al., 2010).

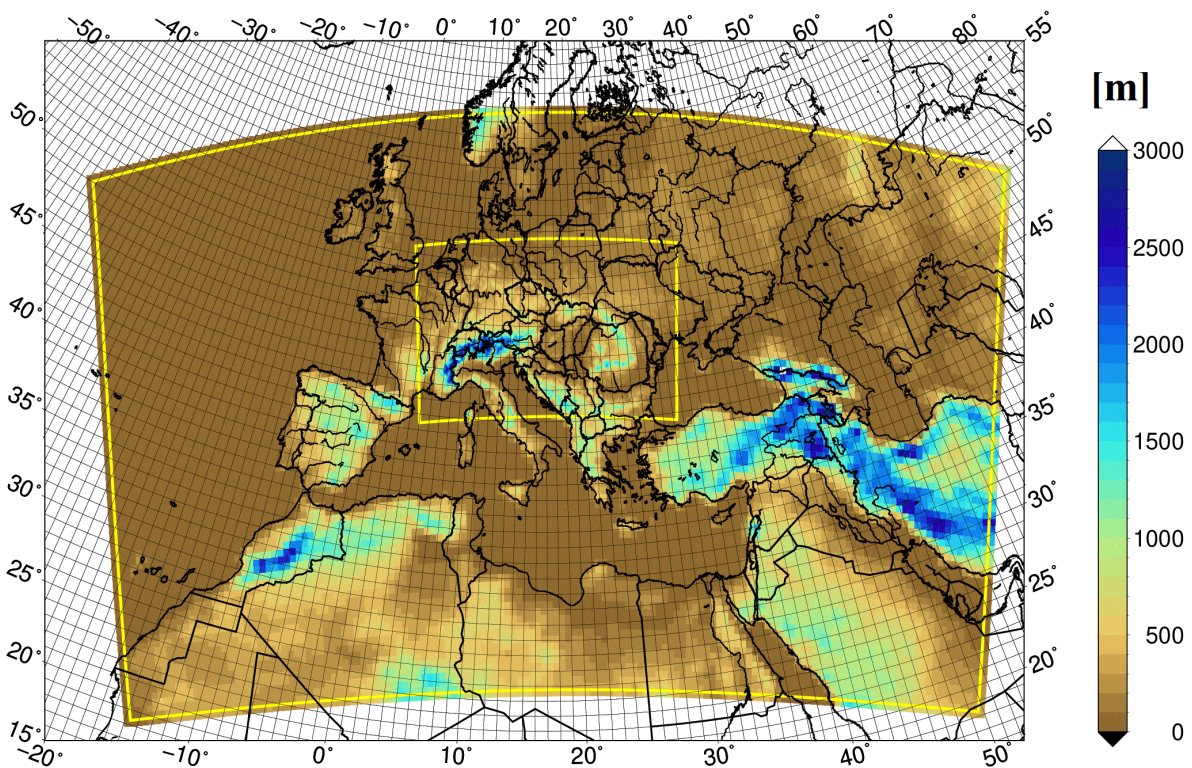
Magyarországon a nyári csapadékévkénység jövőben várható eloszlása jelentős különbségeket mutat a rendelkezésre álló regionális klímamodellek (ALADIN-Climate és RegCM) projekciói alapján (Csorvási et al., 2016). Mivel a Weather Research and Forecasting (WRF) modellt elsősorban konvektív csapadék előrejelzésére fejlesztették ki, használata hazánkban is előnyös lehet a nyárra vonatkozó szimulációk pontosítása érdekében. Ennek megfelelően megkezdtük regionális éghajlati modellként történő adaptálását a Kárpát-medence térségére. A későbbi alkalmazások szempontjából alapvető fontosságú, hogy elvégezzük a modell érzékenységvizsgálatát. Ennek során minél több konfigurációt tesztelünk, majd kiválasztjuk azt a modellbeállítást, amelyik a lehető legpontosabban reprodukálja a valódi éghajlati viszonyokat.

Jelen munka során célunk, hogy elemezzük a fizikai parametrizációs sémák és a dinamikai beállítások megválasztásának modelleredményekre gyakorolt hatását. Ehhez rövidtávú, egy évre vonatkozó klímaszimulációkat készítettünk a WRF-fel, 50 km-es és 10 km-es ráctávolság mellett. Az egyes futtatásokban különböző planetáris határréteg és mélykonvekciós parametrizáció-kombinációkat használtunk. Két felszín-légkör modellt próbáltunk ki. Vizsgáltuk a hidrosztatikus és a nem-hidrosztatikus dinamika, valamint kevesebb vertikális szint alkalmazásának következményeit. A WRF által szimulált hőmérsékleti- és csapadékeloszlásokat mérési adatokkal hasonlítottuk össze, validáció céljából.

Modellbeállítások és futtatások

Kísérleteinket a WRF-ARW modell 3.8-as verziójával végeztük el, melyet az Amerikai Egyesült Államokban fejlesztettek ki számos kutatóintézet és egyetem együttműködésével (Skamarock et al., 2008). A korlátos tartományú, mezoskálájú WRF modell a teljesen összenyomható légkörben érvényes Euler-egyenleteken alapul. A horizontális diszkretizáció véges differenciális módszerrel, Arakawa-C típusú rácson zajlik, míg vertikálisan felszínkövető η koordináta-rendszert használ.

A modellezési terület két egymásba ágyazott tartományból – ún. domainből – áll (1. ábra). A külső, 50 km-es horizontális felbontású domain 143×81 rácspontot tartalmaz. Magában foglalja a Med-CORDEX régiót, így az eredmények a későbbiekben más modelleszaládok eredményeivel is összehasonlíthatók lesznek. A belső, 10 km-es ráctávolságú tartomány 210×120 rácspontból áll, és Magyarországon kívül az Alpok, a Kárpátok és a Dinári-hegység vonulatait is lefedi.



1. ábra: A két egymásba ágyazott modelltartomány és azok topográfiaja a tengerszint feletti magasság értékeivel.

A modellintegrálást 2013. január 1. 00 UTC időponttól indítottuk, egy éves időtartamra, adaptív időlépcső alkalmazásával. Az eredmények feldolgozását és kiértékelését az é. sz. 42° és é. sz. 52°, valamint a k. h. 4° és k. h. 30° közé eső területre végeztük el, amely a 10 km-es felbontású tartományon belül található.

Ebben a dolgozatban hat eltérő konfigurációjú futtatás eredményeit mutatjuk be. Ezek dinamikai-fizikai beállításainak különbségeit az 1. táblázat foglalja össze. Az egyik szimulációban a hidrosztatikus közelítést alkalmaztuk, míg a többi nem-hidrosztatikus módban készült. Egy másik kísérletben a vertikális modellszintek számát 43-ról 31-re csökkentettük.

A többi esetben a mélykonvekció, a planetáris határreteg (PHR) és a hozzá tartozó felszínközeli réteg, valamint a felszín-légkör kölcsönhatások parametrizációs sémáját cseréltük le.

A mikrofizikai és a sugárzásátviteli sémákon nem változtattunk. A következőkben röviden ismertetjük a használt fizikai parametrizációkat.

A felhő- és csapadékképződéshez kapcsolódó mikrofizikai folyamatok a Thompson & Eidhammer (2014) által részletezett parametrizáció alapján kerültek reprezentálásra, amely a korábbi Thompson mikrofizikai séma aeroszolk hatásával kiegészített változata. A sémában a felhőcseppek számának kezdeti koncentrációját az alapértelmezett 100 cm^{-3} helyett 250 cm^{-3} -nek adtuk meg. A rövidhullámú sugárzásátvitel figyelembevétele Dudhia (1989) parametrizációja szerint történt, míg a hosszuhullámú sugárzási viszonyok képviselőjére az ún. RRTM gyors sugárzásátviteli modellt alkalmaztuk (Mlawer et al., 1997).

1. táblázat: A különböző modellfuttatások során használt fizikai parametrizációs sémák és beállítások összefoglaló táblázata

Futtatás/ elnevezés	Hidrosztatikus?	Vertikális szintek száma	Mély- konvekció	PHR, felszíni réteg	Felszín- léggör
REF	nem	43	BMJ	MYJ, Eta hasonlósági	Noah–MP
VERT31	nem	31	BMJ	MYJ, Eta hasonlósági	Noah–MP
HIDROSZTAT	igen	43	BMJ	MYJ, Eta hasonlósági	Noah–MP
RUC/MYJ	nem	43	BMJ	MYJ, Eta hasonlósági	RUC
RUC/YSU	nem	43	BMJ	YSU, MM5 hasonlósági	RUC
MSKF	nem	43	MSKF	YSU, MM5 hasonlósági	RUC

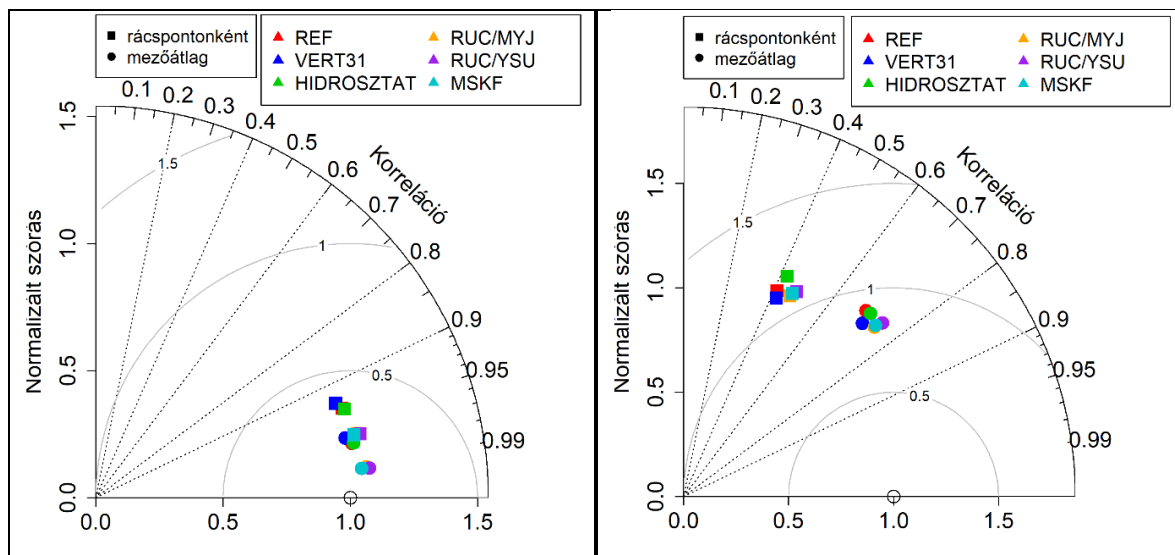
A futtatások többségében a mélykonvekció parametrizálására a konvektív stabilizációs Betts–Miller–Janjić (BMJ) cumulus sémát (Janjić, 1994) használtuk. Egy esetben a tömegfluxus elvű Kain–Fritsch (KF) séma (Kain, 2004) továbbfejlesztett, ún. multiskálájú (MSKF) változatával (Zheng et al., 2016) kísérleteztünk. Utóbbi a gomolyfelhők és a sugárzás kölcsönhatásait, valamint a feláramlási tömegfluxus vertikális sebességre gyakorolt hatását is számításba veszi, továbbá modellfelbontás-függővé teszi a léggör stabilizációjára fordítható időt és a légbeszívást. Az érzékenység vizsgálat során a planetáris határreteg és a hozzá tartozó felszíni réteg parametrizációk közül kettőt teszteltünk: a Yonsei Egyetemen kifejlesztett, K-elméleten alapuló, nemlokális YSU sémát (Hong et al., 2006) az MM5 modell sémájával (Jiménez et al., 2012) kombinálva, valamint a Mellor–Yamada–Janjić (MYJ) – prognosztizált turbulens kinetikus energiát használó, lokális – határreteg parametrizációt az Eta modellben alkalmazott felszínközeli sémával párosítva (Janjić, 1994). Az MM5 és az Eta modell felszíni réteg sémája egyaránt a hasonlósági elméleten alapszik. Végül a felszín és a léggör közötti kölcsönhatások leírására két opciót próbáltunk ki: a négy talajréteggel, háromréteggű hóborítással és dinamikus vegetációval rendelkező Noah közösségi modell ún. multiparametrizációs (MP) változatát (Niu et al., 2011), illetve az ún. gyors frissítési ciklus (Rapid Update Cycle, RUC), vertikálisan izentróp-felszínkövető modellt (Benjamin et al., 2004).

Adatok

A WRF futtatásához szükséges bemeneti adatokat az ECMWF által fejlesztett ERA5 globális reanalízis adatbázisból származtattuk (Hersbach & Dee, 2016), melynek horizontális felbontása 0,3°-os. Jelenleg 1979-től kezdődően érhetőek el az adatok, közel valós időben napjainkig bővülnek, és akár óránkénti bontásban is lekérhetőek. A magaslégköri adatokat 37 nyomási szintre vonatkozóan töltöttük le. A modellben a peremfeltételek 6 óránként kerültek frissítésre. A modell által szimulált hőmérsékleti- és csapadékeloszlásokat az E-OBS mérési adatbázissal hasonlítottuk össze, amely a Holland Királyi Meteorológiai Szolgálat (KNMI) által létrehozott ECA&D időjárási megfigyeléseket tartalmazó gyűjteményén alapul. Az E-OBS rácsra interpolált napi minimum-, maximum-, és átlaghőmérsékleteket, valamint napi csapadékösszegeket foglal magában 1950-től napjainkig (Haylock et al., 2008). A modelleredmények validálásához az E-OBS (v19.0) 25 km-es változatát használtuk.

Eredmények

A 2. ábrán látható normált Taylor-diagramok a WRF modell által szimulált és az E-OBS mérési adatbázisban található napi átlaghőmérséklet (bal oldal) és napi csapadékösszeg (jobb oldal) adatsorok között számolt Pearson-féle korrelációs együtthatót, centralizált négyzetes hibát és szórásat jelenítik meg. Főként a hőmérsékletet tekintve elmondható, hogy a RUC felszín-légkör modell alkalmazása jelentősen jobb egyezést eredményez a megfigyelésekkel, mint a Noah-MP használata. A RUC sémával készült három szimulációhoz tartozó, hőmérsékletre vonatkozó korrelációs együttható 0,99 körüli a mezőátlag idősorára, és 0,97 minden rácsponti adatsorból számítva. A csapadék esetében rendre 0,75 és 0,45 adódik az együtthatóra. A RUC parametrizációval a hőmérséklet négyzetes hibája 1 °C/napon belül marad a teljes mező átlagában, és nem haladja meg a 2,5 °C/napot rácspontonként, míg a csapadékra ez a mérőszám rendre kb. 1,5 mm/nap és 5,5 mm/nap.



2. ábra: Taylor-diagram a különböző konfigurációjú WRF szimulációk és az E-OBS mérési adatbázis napi átlaghőmérséklet (bal oldal) és napi csapadékösszeg (jobb oldal) adatsoraira (2013), 50 km-es rácsfelbontás esetén.

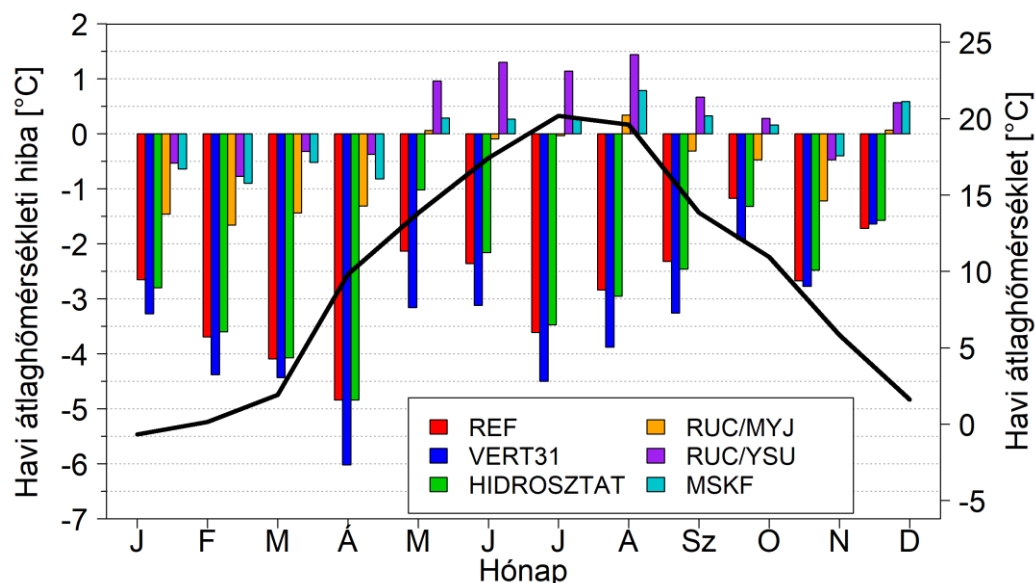
A 2013-as évre vonatkozó, teljes vizsgálódási területre (é. sz. 42°–52°, k. h. 4°–30°) számított éves átlaghőmérsékletet a Noah-MP felszín-légkör modellt alkalmazó három szimuláció jelentősen, akár 3 °C-ot is meghaladó mértékben alábecsüli (2. táblázat). Ezzel szemben a RUC séma sokkal realiztikusabb, legfeljebb néhány tized °C-os hibával terhelt értékekhez vezet.

Ha a RUC parametrizációt az YSU határréteg, valamint a BMJ helyett az MSKF mélykonvekciós sémával kombináljuk, az éves átlaghőmérséklet hibája elhanyagolhatóan kicsivé válik. A területre átlagolt éves csapadékösszeget mind a hat futtatás 180–420 mm-rel felülbecsli. A hidrosztatikus dinamikával nagyobb pozitív eltérést tapasztalunk, mint a nem-hidrosztatikussal. A vertikális szintek számának 43-ról 31-re történő csökkentése kevesebb csapadékot eredményez a modellben. A RUC séma több csapadékot generál, mint a Noah-MP, de ez a többlet mérsékelhető, ha az MYJ helyett az YSU határréteg parametrizációt használjuk, illetve megszüntethető, ha a BMJ cumulus sémát az MSKF-re cseréljük

2. táblázat: A különböző konfigurációjú WRF szimulációk és az E-OBS mérési adatbázis területre átlagolt éves átlaghőmérséklet és csapadékösszeg értékei (2013), 50 km-es rácsfelbontás esetén.

	E-OBS	REF	VERT31	HIDRO-SZTAT	RUC/MYJ	RUC/YSU	MSKF
ÁTLAGHŐM.	9,64 °C	6,8 °C	6,11 °C	6,91 °C	9,02 °C	9,97 °C	9,6 °C
CSAP. ÖSSZ.	788 mm	1063 mm	967 mm	1127 mm	1211 mm	1109 mm	1036 mm

A teljes mezőre számított havi átlaghőmérsékleti hibák alakulását is alapvetően a felszín-légkör parametrizáció határozza meg (3. ábra). A RUC sémával az eltérések 1,5 °C-on belül maradnak, év elején alulbecsléssel, a konvektív időszakban inkább túlbecsléssel. Ezzel szemben a Noah-MP felszíni modellt használó futtatások az összes hónapban jelentős, szisztematikus alulbecslést produkálnak, különösen áprilisban, amikor 6 °C-os hideg torzítás is előfordul. A hidrosztatikus dinamika alkalmazása a havi átlaghőmérsékleteket alig befolyásolja, míg a kevesebb vertikális modellszint hidegebb klímához vezet. A RUC felszín-légkör modellel együtt az YSU planetáris határréteg parametrizáció magasabb hőmérsékleteket eredményez, mint az MYJ. Előbbi konfiguráció nyári felülbecslése csökkenthető, ha az MSKF mélykonvekciós sémát használjuk a BMJ helyett.

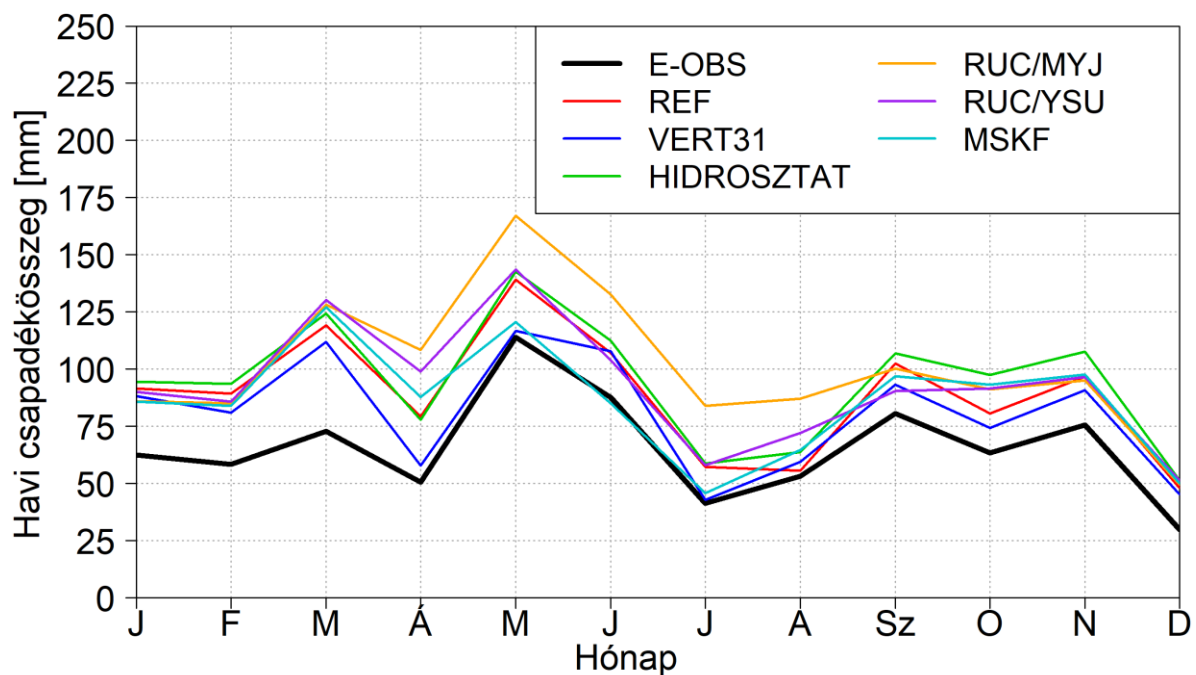


3. ábra: A különböző konfigurációjú WRF szimulációk E-OBS mérési adatbázishoz képest vett havi átlaghőmérsékleti hibájának területre átlagolt értékei (2013), 50 km-es rácsfelbontás esetén.

Az év eleji jelentős negatív hőmérsékleti hibák a hóborítottsághoz és az ahhoz kapcsolódó visszacsatolási mechanizmusokhoz köthetők. A modellek felszín-légkör alegysége kezeli a felszínre érkező csapadék halmazállapotának meghatározását, a csapadék felhalmozódását,

illetve annak sugárzásmódosító hatásával (pl. albedó növelése) kapcsolatos folyamatokat. A RUC sémát használó szimulációkban az év első négy hónapjában átlagosan 20 %-kal kevesebb hó hullik a teljes külső modelltartományon, mint a Noah-MP parametrizáció esetében. Területi eloszlásban a legnagyobb negatív hőmérsékleti eltérések a domain északkeleti részein jelentkeznek, ahol télen a hó meghatározó tényező. Továbbá Északkelet-Európa térségére átlagolva áprilisban több, mint 70 %-kal kisebb a lehulló hó mennyisége a RUC sémával a Noah-MP-hez viszonyítva, ami arra utal, hogy előbbi parametrizáció esetében hamarabb, időben „kitavasodik”. Ez magyarázza a Noah-MP jelentős áprilisi hideg torzítását is.

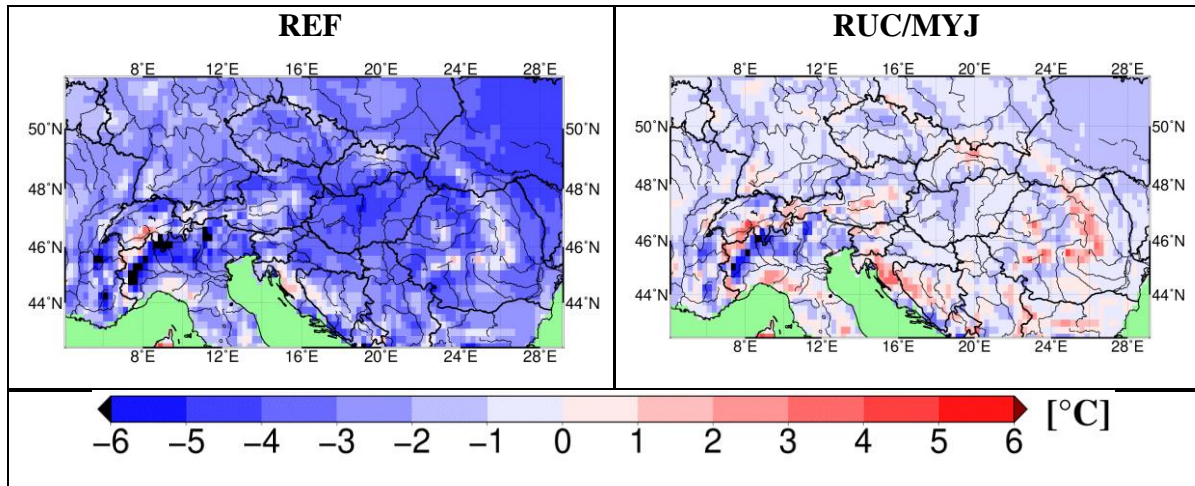
A területre átlagolt havi csapadékösszegeket a WRF a nyarat kivéve szisztematikusan túlbecsüli (4. ábra). A futtatások közötti különbségek leginkább tavasszal és nyáron, a konvektív időszakban mutatkoznak. Az év első és utolsó hónapjaiban megfigyelhető rendszeres felülbecslés szinte független a szimulációk dinamikai és fizikai beállításaitól. Ez arra utal, hogy a WRF-ben a konvektív csapadék reprezentálása – megfelelő konfiguráció mellett – kielégítőbb, mint a nagy térségűé. A májusi csapadékmaximumot és az éven belüli menetet jól visszaadják a szimulációk. Kiemelendő, hogy a kevesebb vertikális szint alkalmazása szignifikáns csökkentő hatással bír a modellezett csapadéokra, és a legtöbb hónapban az ilyen módon készült futtatás esik legközelebb az E-OBS mérésekhez. Kivételt jelent a nyári évszak, amikor az MSKF futtatás hasonlóan jól, sőt, júniusban jobban teljesít. Ennek feltételezhető oka a mélykonvekciós séma fejlesztéseiben és skálatudatosságában keresendő. A hidrosztatikus dinamika alkalmazása havi bontásban is némileg gyengébben szerepel a nem-hidrosztatikusnál.



4. ábra: A különböző konfigurációjú WRF szimulációk és az E-OBS mérési adatbázis területre átlagolt havi csapadékösszeg értékei (2013), 50 km-es rácsfelbontás esetén.

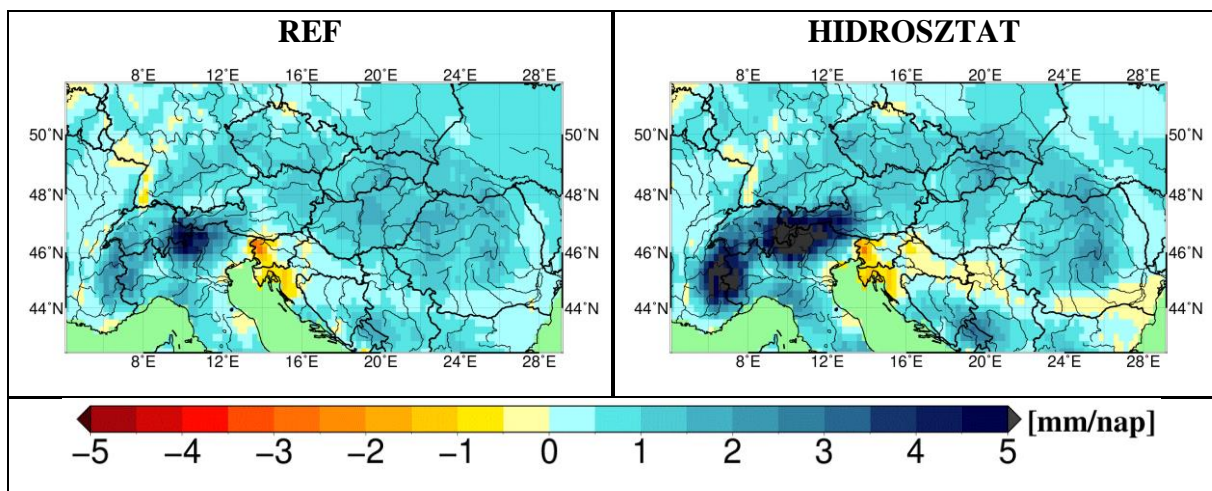
Az 5. ábra a felszín-légkör modell megválasztásának fontosságát hangsúlyozza két szimuláció példáján, melyek csak ebben a tekintetben térnek el egymástól. A bal oldali, Noah-MP sémával készült futtatás éves átlaghőmérsékleti hibájának területi eloszlása a hegyvidékeket kivéve jelentős negatív eltéréseket mutat.

Ezzel szemben a jobb oldalon lévő, RUC parametrizációt alkalmazó szimuláció éves szinten jóval kisebb, síkvidéken többnyire legfeljebb 1–2 °C-os hideg torzításokkal terhelt, a magasabban fekvő részeken (pl. Kárpátok, Dinári-hegység) pedig felülbecsül. Ezekben az esetekben is észrevehető a korábban említett, hóborítottsághoz kötődő, kiterjedtebb negatív hiba a vizsgálandó tartomány északkeleti részsein.



5. ábra: A különböző konfigurációjú WRF szimulációkból számított éves átlaghőmérséklet (2013) E-OBS mérési adatbázistól vett eltéréseinek területi eloszlása, 50 km-es rácsfelbontás esetén.

Végezetül a 6. ábra a hidrosztatikus közelítés hatását mutatja be a szimulált éves csapadékösszeg hibamezőjére. A jobb oldali, hidrosztatikus dinamikával készített szimuláció a hegyvidékeken, különösen az Alpok térségében nagyobb mértékben becsül felül, mint a nem-hidrosztatikus beállítással (bal oldal). Síkvidéken valamivel szárazabb a hidrosztatikus futtatás, de ahogy az előbbieken láttuk, az éves és a havi területi átlagok tekintetében összességében megnövekedett túlbecslést produkál. A havi csapadékhibák területi eloszlását elemezve elmondható, hogy a hidrosztatikus közelítés alkalmazása különösen a konvektív időszakban okoz jelentős többletet az orografikus vidékek csapadékmennyiségében a nem-hidrosztatikus konfigurációhoz képest, míg a nyártól különböző hónapokban csekély különbségek adódnak (nem kerül bemutatásra).



6. ábra: A különböző konfigurációjú WRF szimulációkból számított éves csapadékösszeg (2013) E-OBS mérési adatbázistól vett eltéréseinek területi eloszlása, 50 km-es rácsfelbontás esetén.

Összefoglalás

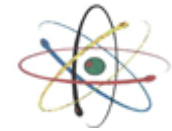
Munkánk során a WRF mezoskálájú modellel készítettünk rövidtávú regionális éghajlati szimulációkat. A 2013-as évre vonatkozó futtatások 50 km-es és 10 km-es horizontális felbontással készültek Európa és a Kárpát-medence térségére. A modell számára a bemeneti adatokat az ERA5 globális reanalízis adatbázis szolgáltatta. Érzékenységvizsgálat keretében hat különböző konfigurációt teszteltünk, melyek a hidrosztatikus közelítés alkalmazásában, a vertikális modellszintek számában, továbbá a felszín-légkör, a planetáris határreteg és a felszíni réteg, valamint a mélykonvekció parametrizációs sémájában tértek el egymástól. A validáció során a szimulált hőmérsékleti- és csapadékeloszlásokat az E-OBS mérési adatbázissal hasonlítottuk össze.

Megállapítottuk, hogy a WRF regionális klímamodell különösen nyáron mutat nagy érzékenységet a dinamikai és fizikai beállításokra. A hőmérséklet modellezésében meghatározó a felszín-légkör modell szerepe: a RUC sémával készült szimulációk éves szinten alig térnek el a megfigyeléstől, szemben a Noah-LSM 3 °C körüli éves alulbecslésével. A két parametrizáció közti különbségek a szilárd halmazállapotú csapadék mennyiségével és felhalmozódásával állnak kapcsolatban. A csapadékösszegeket a nyarat kivéve rendszeres felülbecslés jellemzi. A szimulált csapadéokra a legnagyobb hatást a vertikális modellszintek számának csökkentése gyakorolja, ami szárazabb klímát eredményez. A hidrosztatikus közelítést a főként nyáron, hegyvidékeken jelentkező többlet-túlbecslés miatt érdemes kerülni. Eredményeink alapján a mélykonvekciós folyamatok parametrizációjára ajánlott a fejlesztéseken átesett multiskálájú Kain-Fritsch sémát használni, melynek köszönhetően nyáron minimálisra csökkennek a csapadékhibák.

A továbbiakban feltétlenül szükséges hosszabb időtávú éghajlati modellfuttatások elvégzése, valamint a mérési adatok pontosságában rejlő bizonytalanság kiküszöbölése céljából további (pl. műholdas) megfigyelési adatbázisok használata.

Felhasznált irodalom

1. Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B. et al., 2007: Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81, 71-95.
2. Benjamin, S.G., Grell, G.A., Brown, J.M., Smirnova, T.G., Bleck, R., 2004: Mesoscale weather prediction with the RUC hybrid isentropic-terrain-following coordinate model. *Monthly Weather Review*, 132(2), pp.473-494.
3. Csorvási, A., Illy, T., Sábitz, J., Szabó, P., Szépszó, G., Zsebeházi, G., 2016: A jövőre vonatkozó projekciók eredményeinek együttes kiértékelése, bizonytalanságok számszerűsítése, RCMTÉR EEA-C13-10 projekt beszámoló, 2016. május, 51 p.
4. Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46, 3077-3107.
5. Giorgi, F., Mearns, L. O., 1991: Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Reviews of Geophysics*, 29(2), 191-216.
6. Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D., New, M., 2008: A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D20).
7. Hersbach, H., Dee, D., 2016: ERA5 reanalysis is in production, ECMWF Newsletter, No. 147, ECMWF, Reading, United Kingdom, 7.
8. Hong, S. Y., Noh, Y., Dudhia, J., 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134, 2318-2341.
9. Janjić, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122, 927-945.
10. Jiménez, P. A., Dudhia, J., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Montávez, J. P., García-Bustamante, E., 2012: A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Monthly Weather Review*, 140(3), 898-918.
11. Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 170-181.



12. Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A.M., Chandler, R.E., Kendon, E.J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H.W., Sauter, T., Themeßl, M., Venema, V.K.C., 2010: Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3).
13. Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., Clough, S. A., 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682.
14. Niu, G.Y., Yang, Z.L., Mitchell, K.E., Chen, F., Ek, M.B., Barlage, M., Kumar, A., Manning, K., Niyogi, D., Rosero, E. and Tewari, M., 2011: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12).
15. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J. G., 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN-475+STR, NCAR Technical Note, 125 p.
16. Thompson, G., Eidhammer, T., 2014: A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone. *Journal of the atmospheric sciences*, 71(10), 3636-3658.
17. Zheng, Y., Alapaty, K., Herwehe, J.A., Del Genio, A.D., Niyogi, D., 2016: Improving high-resolution weather forecasts using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model with an updated Kain–Fritsch scheme. *Monthly Weather Review*, 144(3), pp.833-860.