

## ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLATOK A WRF MODELLEL

Varga Ákos János <sup>(1)</sup> , Zempléni Zsuzsanna <sup>(1)</sup>, Komjáti Kornél <sup>(1)</sup>,  
Peterka András <sup>(2)</sup>, Horváth Ákos <sup>(3)</sup>, Breuer Hajnalka <sup>(1)</sup> 

<sup>(1)</sup> ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

<sup>(2)</sup> Pécsi Tudományegyetem, Földtani és Meteorológiai Tanszék, 7624 Pécs, Ifjúság útja 6.

<sup>(3)</sup> Országos Meteorológiai Szolgálat, 8600 Siófok, Vitorlás utca 17.

e-mail: vakos94@caesar.elte.hu, breuer.hajnalka@ttk.elte.hu

### Bevezetés

A WRF<sup>1</sup> egy mezoskálájú, nemhidrosztatikus meteorológiai modell, melynek fejlesztése amerikai egyetemek és kutatóintézetek koordinálásával közösségileg történik (Skamarock et al., 2019). A WRF numerikus modellt egyre szélesebb körben alkalmazzák operatív időjárás-előrejelzésre, regionális éghajlati, hidrológiai és levegőkémiai célú modellezésre, szél- és napenergia felhasználhatóságával kapcsolatos hatásvizsgálatokhoz, vagy akár finomskálájú turbulencia szimulációjára (Powers et al., 2017). A rendszer nyílt forráskódú, szabadon letölthető, könnyen telepíthető asztali számítógépekre és nagyteljesítményű számítógépklaszterekre egyaránt.

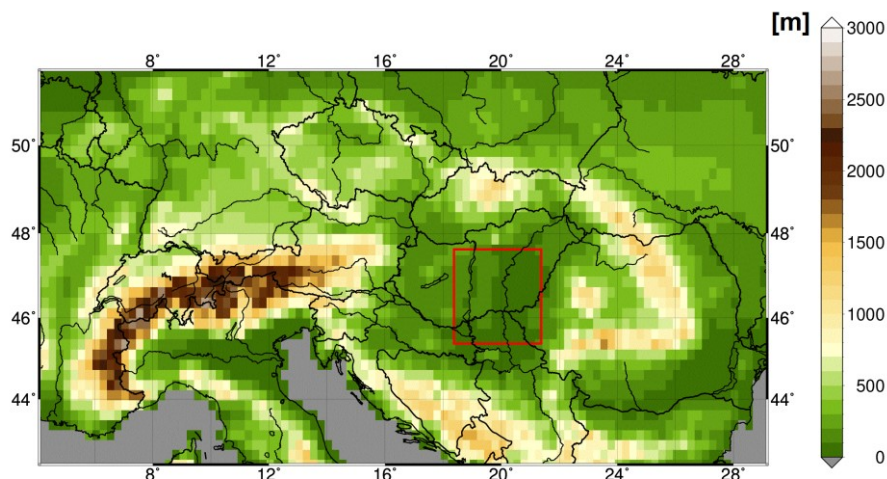
Az ELTE Meteorológiai Tanszékén számos témakörben használjuk a WRF modell kutatási célú változatát. A WRF regionális klímamodellként történő adaptációja megtörtént (Varga & Breuer, 2020), folyamatban vannak a hosszú távú futtatások. Az éghajlati szimulációkhoz kapcsolódóan különböző felszínhasználati, levélfelületi index és albedó adatbázisokkal is kísérletezünk. A WRF egy nagyfelbontású időjárás-előrejelző változattal pedig egy zivatarlánc (squall line) fejlődését, valamint téli ködös helyzetek modellezhetőségét vizsgáljuk, utóbbihoz az infrastruktúrát az OMSZ Siófoki Viharjelző Observatóriuma biztosítja.

### Regionális éghajlat

A hosszú múltbeli időszakra történő integrálás előtt érzékenységvizsgálatot végeztünk a WRF modellel a lehető legpontosabb konfiguráció kiválasztására. Ennek során több, mint 30 beállítással készítettünk futtatásokat a 2013-as évre. A konfigurációk főleg a fizikai parametrizációs sémák (mélykonvekció, planetáris határréteg, felszín-légkör almodell) tekintetében tértek el egymástól, de kísérleteztünk a hidrosztatikus dinamikai maggal, frissebb modellverziókkal és a légköri aeroszolok klimatológiai eloszlását leíró adatbázisokkal is. A modell horizontális ráctávolsága 50 km-es, vertikálisan pedig 61 felszínkövető szinttel rendelkezik. A kezdeti- és peremfeltételeket az ECMWF<sup>2</sup> ERA5 reanalízis adatbázisából származtattuk (Hersbach et al., 2020). A szimulációs eredményeket az E-OBSv20.0e mérési adatbázissal hasonlítottuk össze, melynek felbontása 0,25°-os (Haylock et al., 2008; Cornes et al., 2018). A feldolgozási terület a Kárpát-medencét és annak tágabb környezetét foglalja magában (*1. ábra*). A mérési adatbázisra való interpoláció után verifikált paraméterek a napi minimum-, maximum- és átlaghőmérséklet, valamint a napi csapadékösszeg és az átlagos globálsugárzás.

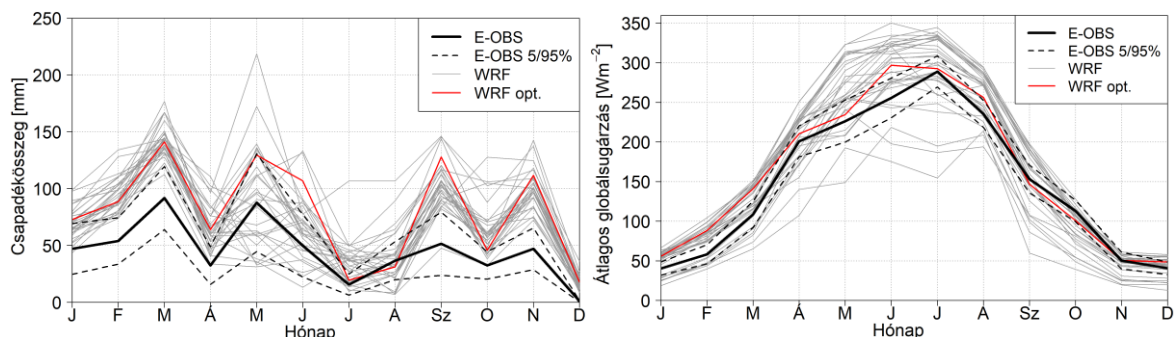
<sup>1</sup> Weather Research and Forecasting

<sup>2</sup> European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – Európai Középtávú Előrejelző Központ



1. ábra: A regionális éghajlati érzékenységvizsgálatok feldolgozási területe a 0,25°-os E-OBS rács tengerszint feletti magasság értékeivel. Piros téglalap jelöli a mezőátlagok területét.

A havi csapadékösszegeket minden konfigurációval túlbecsüli a WRF a nagytérségű időjárási folyamatok által vezérelt időszakban (2. ábra). Ezzel szemben tavasszal és nyáron, amikor inkább a helyi hatások dominálnak (pl. mélykonvekció), bizonyos futtatások jól visszaadják a megfigyelt értékeket. A havi átlagos globálisugrás szintén pozitív hibával terhelt, különösen nyáron. Ez arra utal, hogy a modell felbontásánál kisebb térskálájú (parametrizált) konvektív felhőzet nem megfelelően reprezentált a sugárzásátviteli számításokban. Ezzel párhuzamosan a havi átlaghőmérsékleteket a nyári időszakban felülbecsüli a modell.



2. ábra: Havi csapadékösszeg (bal) és havi átlagos globálisugrás (jobb) az E-OBS mérések (folytonos fekete vonal), a WRF szimulációk (szürke vonalak) és a kiválasztott WRF konfiguráció (piros vonal) alapján. Mezőátlagok az alföldi területre (ld. 1. ábra). A szaggatott fekete vonalak az E-OBS adatbázis bizonytalanságának alsó és felső határát jelölik.

### A felszínhasználat hatása

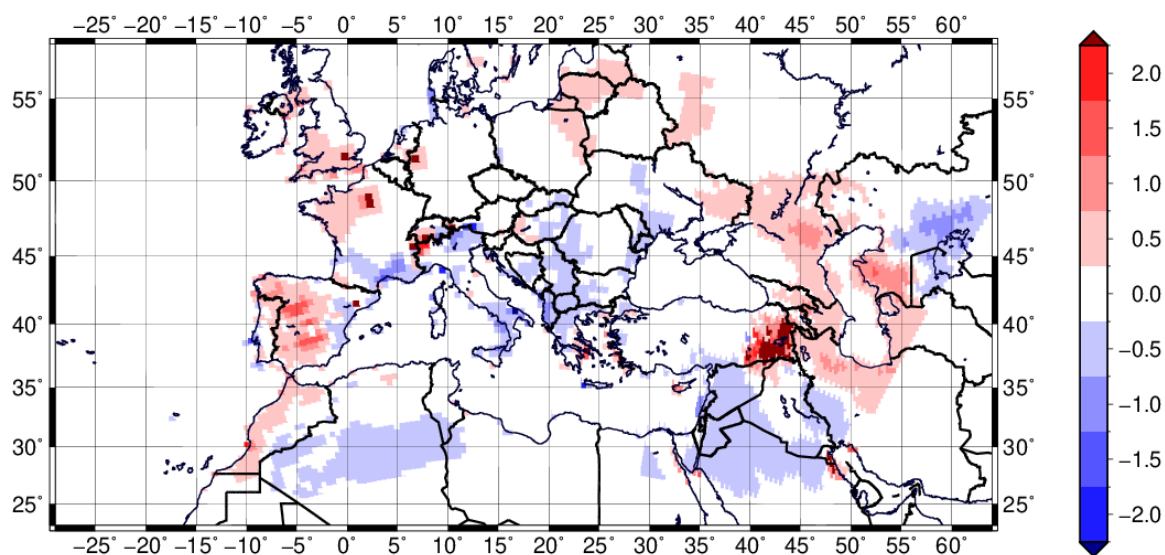
A felszíni folyamatok és azok megfelelő reprezentációja fontos része a regionális klíma-modelleknek, hiszen jelentősen befolyásolják a felszínközeli állapotokat. A rácsfelbontás alatti folyamatok figyelembevételére parametrizációs opciók érhetők el a modellekben, ilyenekkel számíthatók a felszín és a légkör közötti kölcsönhatások is. Ahhoz, hogy ennek az alkalmazása megfelelő eredményt adjon, a felszínhez kapcsolódó tulajdonságok minél pontosabb megadása szükséges.

A munkánk során WRF-fel készített szimulációban vizsgáltuk a CORINE felszínhasználati adatbázis hatását Európa térségében. A referenciaszimulációhoz a WRF-ben

megtalálható 28 kategóriát elkülönítő USGS<sup>3</sup> adatbázist használtuk, ami 1 km-es felbontásával, és összesen csak egy év műholdas méréseiből származó adatokkal nem elegendően pontos. Ezzel szemben a CORINE adatbázis 44 felszínhasználati típust különböztet meg, a szimulációhoz 250 m-es felbontásban használtuk. A 2013-as évre vonatkozó futtatások 50 km-es horizontális rácsfelbontással készültek, mely rácson belül a felszínhasználati típusok gyakoriságát a modell kezeli.

Az eredmények feldolgozása során a csapadékban, a 2 m-es hőmérsékletben, a vízgőz 2 m-es keverési arányában és a 10 m-es szélességekben okozott eltéréseket vizsgáltuk. Az új adatbázis hatására a teljes területre vett átlagban nem alakultak ki jelentős eltérések, de lokálisan nagy különbségeket okozott a referenciaszimulációhoz képest.

A CORINE adatbázis jobban reprezentálja a beépített területeket. Amíg az USGS adatbázis alapján nincs egy olyan rácspont sem, amelyben a városi kategória lenne a domináns, addig a CORINE használatával több európai nagyváros is megjelenik, például Párizs és London. Ezekben a rácspontokban a nyári hónapokban a havi átlagos hőmérséklet több mint 2 °C-kal adódott nagyobbra, mint a referenciafuttatásban (3. ábra). Ebben az időszakban a keverési arány 1–1,5 g/kg-mal kisebb volt, a szélességek értéke pedig egész évben 1–1,5 m/s-mal nagyobb.



3. ábra: A 2 m-es júliusi átlaghőmérsékletek különbsége [°C] (CORINE-referencia).

Törökország keleti részén a szántóföld és erdős terület aránya az USGS adatbázisban jóval nagyobb, míg a kopár vagy kevés növényzettel fedett felszínhasználati kategória aránya kisebb a CORINE-hoz képest. Ennek eredményeként egy kiterjedt területen a nyári hónapok hőmérséklete több mint 2 °C-kal nagyobbra adódott a pontosabb felszínhasználati adatbázis alkalmazásával. A hatás a szélességekben is érzékelhető volt, hiszen egész évben nagyobb értékeket kaptunk, de a legnagyobb különbségek a téli hónapokban alakultak ki, ekkor a 2 m/s-ot is meghaladta a havi átlagokban.

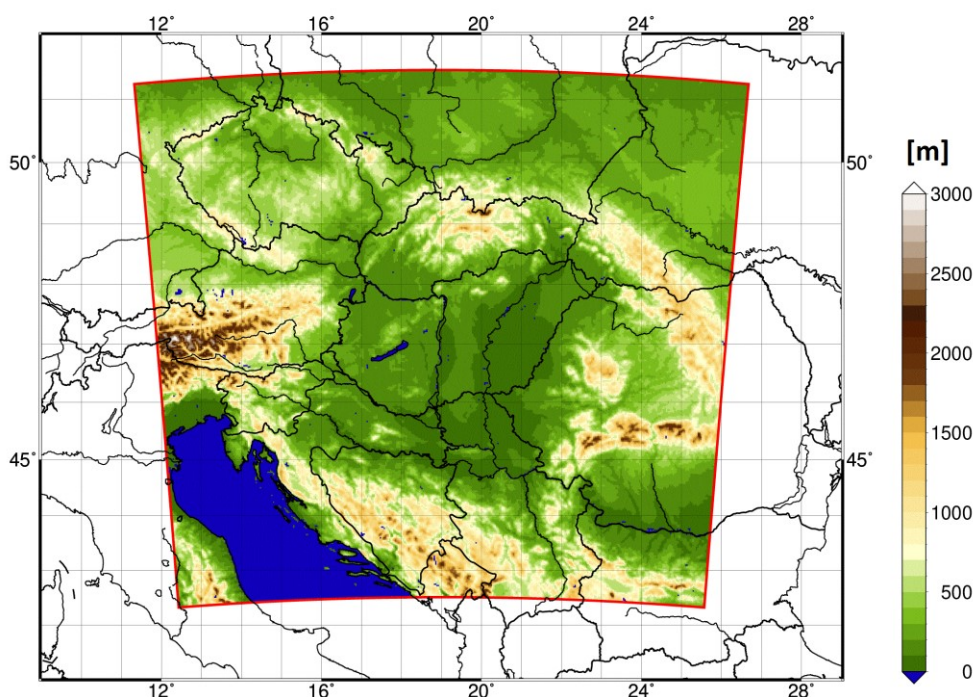
Az Alpok területén az új adatbázis használatának következtében az erdős tundrával borított felszín aránya 0%-ra csökkent, míg a kopár vagy kevés növényzettel fedett terület aránya növekedett. Ez itt is a nyári havi átlagos hőmérsékletek növekedését okozta, valamint egész évben nagyobb szélességek alakultak ki, melyek közül a téli hónapok eltérései voltak a legjelentősebbek. A kialakult különbségek nagysága az előzőekhez hasonlóan alakult.

<sup>3</sup> United States Geological Survey – Amerikai Egyesült Államok Geológiai Intézet

Tehát látható, hogy az 50 km-es felbontás mellett is jelentős hatása lehet egy részletesebb felszínhasználati adatbázis használatának.

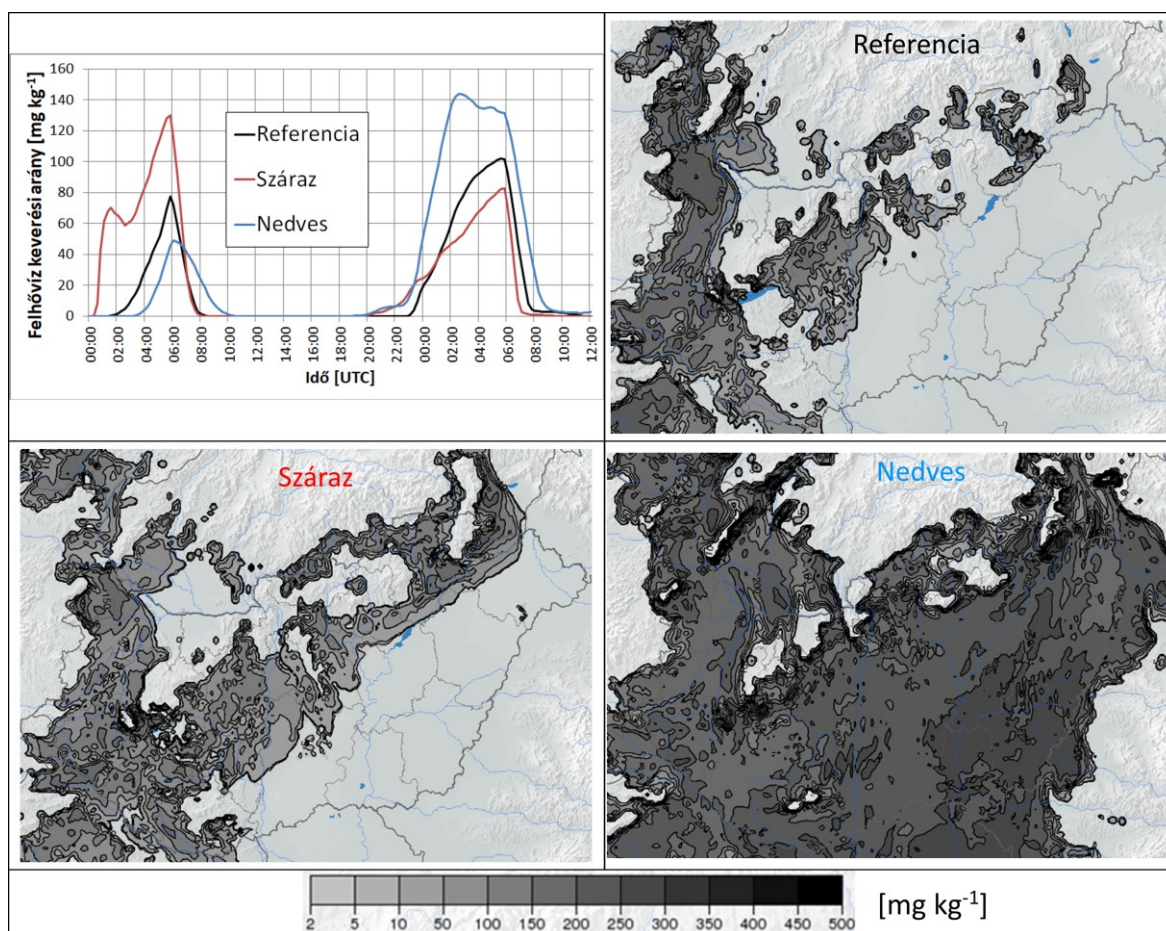
### Ködös helyzetek

Az OMSZ Siófoki Viharjelző Observatóriumában ködös helyzetekre készítünk szimulációkat a WRF időjárás-előrejelző modellel, 2,7 km-es horizontális ráctávolság és 61 modellszint mellett. Ezen a felbontáson a domborzat és a vízfelületek, partvonalak hatása viszonylag pontosan leírható (4. ábra). Vizsgáljuk, hogy a köd kialakulásának, életciklusának meghatározásában fontos szerepet játszó fizikai sémák (pl. sugárzásátvitel, planetáris határreteg) megváltoztatása milyen hatást gyakorol a modellezett ködréteg tulajdonságaira, térbeli kiterjedésére. Kísérletet végzünk továbbá a talajnedvesség ködfejlődésben betöltött szerepének jellemzésére.



4. ábra: A ködös helyzetek és a zivatarlánc szimulációjához használt modellezési terület a tengerszint feletti magasság értékeivel.

Esettanulmányt végeztünk egy 2019. októberi kisugárzási ködeseményre vonatkozóan, mely anticiklonális időjárási helyzetben, pozitív hőmérsékletek mellett következett be. Az ECMWF – meghajtóként használt – operatív modelljéből származó kezdeti relatív talajnedvesség értékeket 0%-ra, illetve 100%-ra változtattuk, ami rendre egy nagyon száraz és nagyon nedves esethez felel meg, majd egy 36 órás előrejelzés során vizsgáltuk a kialakult köd tulajdonságait a felhővíz keverési aránya alapján, mely a WRF prognosztikus változója. Száraz talaj felett jobban le tud hűlni a levegő, így az első éjszaka sűrűbb, míg a második éjszaka a csökkenő légnedvesség miatt kevésbé sűrű köd alakul ki (5. ábra). Ezzel szemben nedves esetben a gyengébb lehűlés következtében az első nap kisebb, míg a második nap a növekvő nedvesség miatt nagyobb felhővíztartalmú ködréteget kapunk. A kísérlet felhívja a figyelmet a talajnedvesség ködképződésben betöltött szerepére és a pontos kezdeti feltételek fontosságára a ködelőrejelzés során.



5. ábra: A felhővíztartalom időbeli menete a Kisalföld térségében az alsó modellszinteken a referencia (fekete vonal), száraz (piros vonal) és nedves (kék vonal) esetben 2019. okt. 26. 00 UTC és okt. 27. 12 UTC között (bal felső grafikon). A kialakult köd térbeli kiterjedése az 1000 hPa-os nyomási szinten 2019. okt. 27. 05 UTC-kor a három esetben (térképek).

## Zivatarlánc

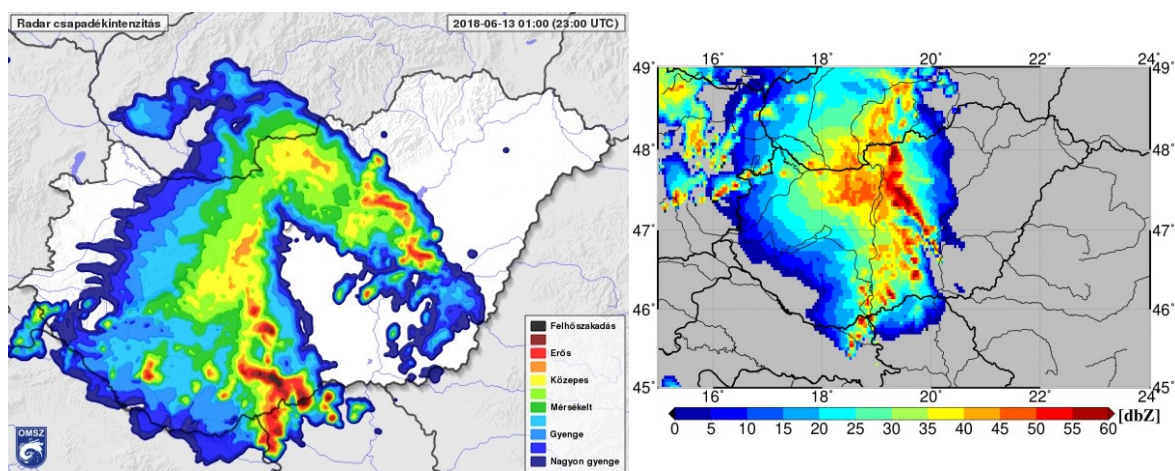
A tavaszi és nyári időszak gyakori velejárói a zivatarok. Ez alól a Kárpát-medence sem jelent kivételt. A konvektív cellák azonban gyakorta nem izoláltan jelennek meg, hanem valamiféle – általában nagyobb skálájú – kényszer hatására rendszerbe szerveződnek.

Ismeretes, hogy a zivatarláncokat csoportosíthatjuk aszerint, hogy a réteges csapadék területe a konvektív csapadékú régióhoz viszonyítva hol helyezkedik el. Ennek alapján megkülönböztetünk hátoldali (*TS*)-, előoldali (*LS*)- és párhuzamos (*PS*) sztratiform rendszereket (Parker & Johnson, 2000). Az egyes típusokat más-más meteorológiai folyamatok hozzák létre és eltérő veszélyes időjárási események kapcsolódhatnak hozzájuk.

Az emberi- és vagyonbiztonságot veszélyeztető jelenségek miatt fontos az egyes rendszereket kialakító környezeti feltételek minél pontosabb megismerése. A különböző konvektív paraméterek (a légköri instabilitást számszerűsítő CAPE, Lifted Index és Thompson Index) mellett a zivatarláncok hevedését és élettartamát döntően befolyásolhatja a szélnyírási vektor rendszerhez viszonyított irányultsága és nagysága. Emellett, a zivatarokból kiáramló és a csapadékhullás által hűtött hideg légtest örvényessége és a vertikális szélnyírás keltette környezeti örvényesség egymáshoz viszonyított nagysága is meghatározó a rendszerek élettartamát és hevedését illetően (Weisman & Rotunno, 2004). A szélnyírási profil emellett a sztratiform felhőzet kialakulásában és elhelyezkedésében is szerepet játszik (Parker & Johnson, 2000).

A WRF modell szimulációink célja, hogy minél pontosabb képet kaphassunk a különböző típusú rendszerek környezetéről, beleértve a konvektív paramétereket, a szélnyírási profilt és a fentiekben már taglalt örvényességi folyamatokat. Feltételezzük, hogy a légkör alacsony szintű (0–2,5 km-es) örvényességi viszonyai és a zivatarok vertikumára kiterjedő szélnyírási profil a rendszerek kialakulásának kezdeti fázisában is meghatározhatják már, hogy mely típusú zivatarlánc alakul ki. Kutatásaink eredményeivel nem csak tudományos ismereteinket szeretnénk bővíteni, hanem az operatív előrejelzési munkákat is segíteni kívánjuk.

Az előzetes tesztfuttatás alapján a WRF 2,7 km-es rácsávolságú – a konvekciót parametrizáció nélkül leíró – változata (a modelltartományt ld. a 4. ábrán) megfelelően szimulálja egy 2018. júniusi zivatarvonal áthaladását az országon. Bár a Duna-Tisza köze feletti száraz régió túl keskeny a modellben, a rendszer kiterjedése és struktúrája hasonlít a megfigyelthez (6. ábra).



6. ábra: Radar csapadékintenzitás [1 – metnet radarkép archívum] (bal) és a WRF által szimulált kompozit radar reflektivitás (jobb) 2018. jún. 12. 23 UTC-kor.

## Összefoglalás

A tanulmányban példákon keresztül mutattuk be a WRF széleskörű alkalmazhatóságát különböző tér- és időskálájú légköri folyamatok modellezésére. A WRF mint regionális klímamodell – a bizonyos évszakokban jelentkező szisztematikus hibák ellenére – megfelelően visszaadja a meteorológiai változók éves menetét. Láttuk, hogy a felszínhasználati adatbázis lokálisan jelentősen befolyásolja az éghajlati szimulációkat. A WRF nagyfelbontású időjárás-előrejelző változata jól használható ködesemények és zivatarláncok vizsgálatára.

## Köszönetnyilvánítás

A tanulmány az OTKA FK132014 pályázat támogatásával készült. Breuer Hajnalka munkáját a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatta.

## Hivatkozások



- Cornes, R.C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E.J., Jones, P.D., 2018: An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(17): 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- 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). <https://doi.org/10.1029/2008JD010201>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J. et al., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730): 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Parker, M.D., Johnson, R.H., 2000: Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Monthly Weather Review*, 128(10): 3413–3436. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<3413:OMOMMC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<3413:OMOMMC>2.0.CO;2)
- Powers, J.G., Klemp, J.B., Skamarock, W.C., Davis, C.A., Dudhia, J., Gill, D.O. et al., 2017: The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8): 1717–1737. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J.G., Duda, M.G., Barker, D.M., Huang, X.-Y., 2019: A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. NCAR Tech Note NCAR/TN-556+STR, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, Boulder CO, USA, 162 p. <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
- Varga, Á.J., Breuer, H., 2020: Sensitivity of simulated temperature, precipitation, and global radiation to different WRF configurations over the Carpathian Basin for regional climate applications. *Climate Dynamics*, 55: 2849–2866. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05416-x>
- Weisman, M.L., Rotunno, R., 2004: “A theory for strong long-lived squall lines” revisited. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61(4): 361–382. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2004\)061<0361:ATFSLS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<0361:ATFSLS>2.0.CO;2)

## Internetes hivatkozások

[1 – metnet radarkép archívum] <https://www.metnet.hu/radarkep>

---

## ORCID

Varga Á. J.  <https://orcid.org/0000-0003-2033-2689>  
Breuer H.  <https://orcid.org/0000-0002-0271-095X>