

# AROME MODELL AZ ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI SZOLGÁLATNÁL: OPERATÍV ALKALMAZÁS ÉS AKTUÁLIS FEJLESZTÉSEK

Szintai Balázs, Mile Máté, Bölöni Gergely, Szűcs Mihály, Lancz Dávid

Országos Meteorológiai Szolgálat, 1024 Budapest, Kitaibel Pál u. 1.  
e-mail: szintai.b@met.hu

## Bevezetés

Magyarország, több más európai országgal együtt, 1991 óta részt vesz az ALADIN<sup>1</sup> konzorcium munkájában. Ezen konzorcium célja egy rövidtávú, korlátos tartományú numerikus időjárás előrejelző (numerical weather prediction, NWP) modell fejlesztése. Az együttműködés eredményeképpen létrejött az ALADIN/AROME modellcsalád, amelyet a résztvevő országok folyamatosan fejlesztenek tovább.

Az ALADIN együttműködés kezdetén az ALADIN modell egy hidrosztatikus NWP modell volt, amelyet arra terveztek, hogy viszonylag durva horizontális felbontáson futtasák (tehát nem jobb felbontáson, mint 8 km), ahol a hidrosztatikus közelítés (a vertikális gyorsulások elhanyagolhatók) érvényes. A szuperszámítógép-kapacitás rohamos fejlődésének következtében az új évezred elejére lehetővé vált, hogy a nemzeti meteorológiai szolgálatok operatívan futtassanak nem-hidrosztatikus modelleket 2–3 km-es horizontális felbontással. A Météo-France-nál az AROME<sup>2</sup> projektet 2002-ben indították, amelynek egy 2,5 km-es felbontáson futtatott nem-hidrosztatikus modell kifejlesztése volt a célja (Seity et al., 2011). Az AROME modell három fő részből áll: a nem-hidrosztatikus ALADIN dinamikából, a légköri fizikai parametrizációkból, amelyek a francia fejlesztésű Meso-NH modelltől származnak (Lafore et al., 1998) és a SURFEX felszín-modelltől (Le Moigne, 2012).

Mára az AROME modellt az ALADIN és aHIRLAM konzorciumok számos országa használja. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) az AROME modellel kapcsolatos munka 2006-ban kezdődött. Öt évnyi tudományos és technikai fejlesztést követően az AROME modell 2010 decemberében vált operatívvá az OMSZ-ban. A modellt 2,5 km-es horizontális felbontáson futtatjuk egy Kárpát-medencét lefedő tartományon naponta négyszer (00, 06, 12 és 18 UTC-kor), 48 órás időtávra az OMSZ IBM szuperszámítógépén. A határfeltételeket az ECMWF<sup>3</sup> globális modellje szolgáltatja, a kezdeti feltételeket pedig az AROME lokális adatasszimilációs rendszerével hozzuk létre (ld. később).

A következőkben bemutatjuk az AROME modell egyes komponenseit, valamint az ezekhez kapcsolódó aktuális fejlesztéseket.

## AROME adatasszimiláció, operatív rendszer, fejlesztések

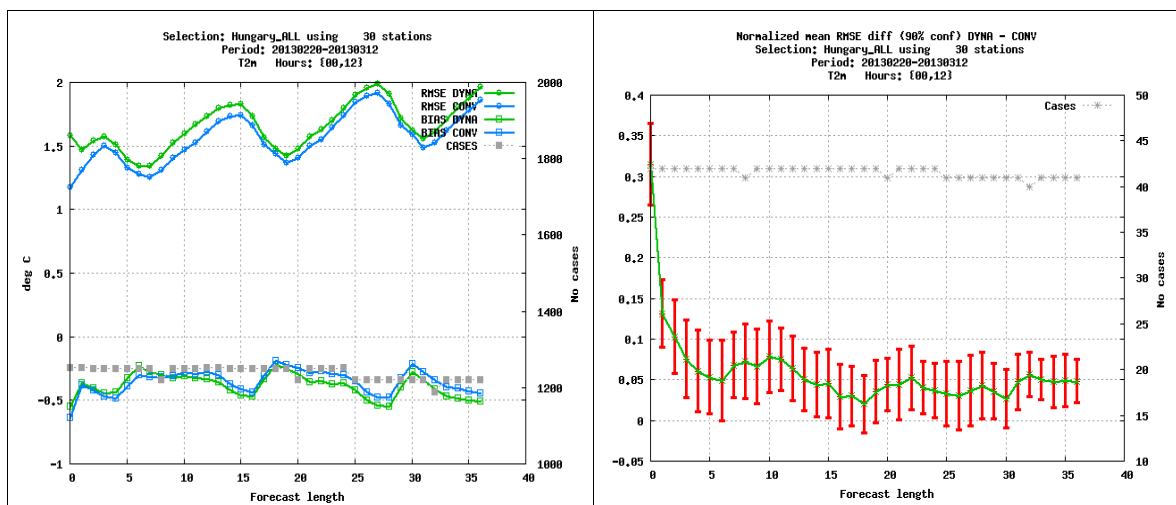
A nem-hidrosztatikus, nagy felbontású numerikus modellek – mint pl. az OMSZ-nál is futtatott AROME modell – a mezo-, illetve konvektív skálájú, rövid időskálán lezajló folyamatok leírásárát célozzák. A kis skálájú folyamatok sikeres előrejelzése érdekében szükséges a kezdeti-feltételek minél pontosabb előállítása is, mégpedig szintén nagy térbeli részletességgel (a kis skálák figyelembevételével). E célból a már évek óta az ALADIN hidrosztatikus modellnél is alkalmazott (Bölöni, 2006) 3 dimenziós variációs (3DVAR)

<sup>1</sup> Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International

<sup>2</sup> Application of Research to Operations at Mesoscale

<sup>3</sup> European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Európai Középtávú Időjárás-előrejelző Központ)

módszert egy speciális „gyakran frissített” adatasszimilációs ciklusba (ún. Rapid Update Cycle, RUC) (Benjamin et al., 2004) ágyaztuk, hogy ezzel megnöveljük a figyelembe vett megfigyelések számát, és ezáltal pontosítsunk az AROME előrejelzések kezdeti-feltételein. Az operatív AROME adatasszimilációs rendszere jelenleg konvencionális, azaz földfelszíni (SYNOP), repülőgépes (AMDAR) és rádiószondás (TEMP) megfigyeléseket vesz figyelembe a RUC rendszerben készülő napi 8 analízishez. A talaj és felszíni paramétereiket az ALADIN felszíni analíziséből interpoláljuk az AROME tartományra, és csak a légköri szintekre készítünk 3DVAR analízist. A variációs technikához elengedhetetlen háttérhiba kovariancia mátrixot leskálázott ALADIN EDA<sup>4</sup> (Bölöni et al., 2014; Brousseau et al., 2011) rendszerrel modelleztük. A peremfeltételeket az adatasszimilációs rendszerben is az ECMWF globális determinisztikus modelljéből nyerjük, és óránként csatoljuk az AROME modell integrálásakor. Fontos megjegyezni, hogy az AROME modell esetében a közelítések nélküli, nem-hidrosztatikus dinamikai leírás miatt nem alkalmazunk inicializációs eljárást, mivel ezek (pl. a Digital Filter Initialization) kiszűrhetik a modell számára hasznos kis skálájú, konvektív információkat a kezdeti feltételből. 2013-ban az AROME adatasszimiláció operatív bevezetésével sikerült szignifikáns javulást elérni a modell rövid távú előrejelzéseiben a korábbi AROME verzióhoz képest, amelyben az ALADIN modell interpolált kezdeti feltételét használtuk. Ez látható az 1. ábrán összehasonlítva az ALADIN analízisből leskálázott AROME (DYNA) és az adatasszimilációval futtatott AROME (CONV) előrejelzések 2 m-es hőmérséklet RMSE<sup>5</sup>, BIAS verifikációs eredményeit egy 2013. február 20. és március 12. közötti időszakon. Ezt kiegészítve az 1. ábrán a két kísérlet RMSE különbségei láthatók, ahol a függőleges oszlopok a különbségek nullától való eltéréseinek szignifikanciáját jelölik T-próba alapján (a két kísérlet hibája akkor különbözik szignifikánsan, ha a függőleges oszlopok nem metszik az y=0 egyenest).



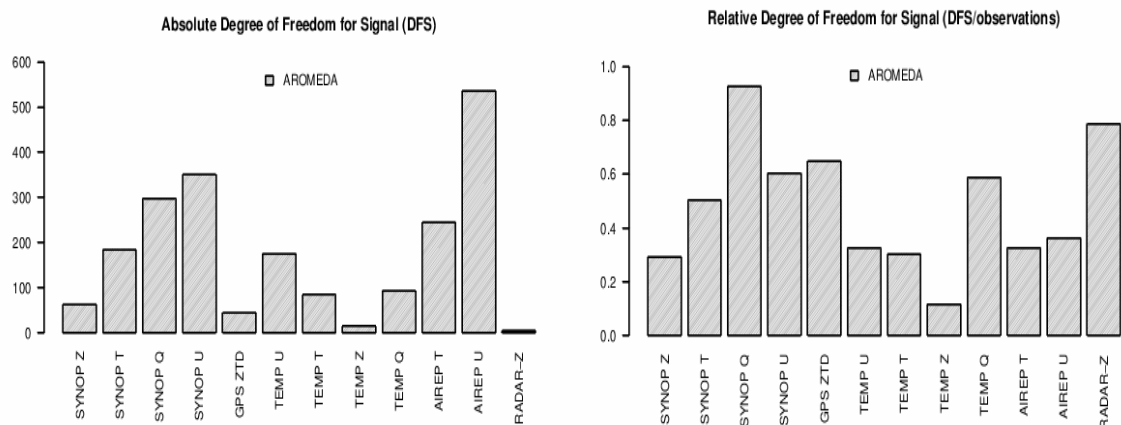
1. ábra: Az adatasszimiláció hatása 2013. február 20. és március 12. közötti időszakban. Bal oldalon: RMSE és BIAS AROME 2 m-es hőmérséklet előrejelzésekre. DYNA jelöli a korábbi AROME verziót és CONV jelöli az adatasszimilációs AROME verziót. Jobb oldalon: RMSE különbség 2m-es hőmérséklet előrejelzésekre, 90%-os konfidencia intervallumokkal.

Az AROME adatasszimilációs rendszer fejlesztése érdekében a felhasznált megfigyelési halmaz kiterjesztését és a háttérhiba kovariancia mátrix jobb leírását tűztük ki célul. A 3DVAR-nál használt ún. háttérhiba kovariancia mátrix előállítását a leskálázott ALADIN

<sup>4</sup> Ensemble Data Assimilation

<sup>5</sup> Root-Mean-Squared Error (négyzetes középhiba)

EDA rendszer helyett az AROME rácán futtatott adatasszimilációs együttesből (EDA-ból) számítjuk, amely már pontosabb és lokalizáltabb kovarianciákat biztosít az AROME adatasszimilációs rendszer inkrementumai számára (Brousseau et al., 2011). Az operatív asszimilált konvencionális megfigyeléseket szeretnénk kiterjeszteni nagy időbeli és térbeli felbontású nem-konvencionális megfigyelésekkel. Abból a célból, hogy meggyőződjünk, mely megfigyelési típusok a potenciálisan hasznosak, adatasszimilációs diagnosztikát, az ún. DFS<sup>6</sup>-t készítettünk. A DFS információt nyújt arról, hogy az egyes megfigyelési típusok mekkora hatással vannak az analízisre (Cardinali et al., 2004). A 2. ábrán látható a kísérleti AROME adatasszimilációs rendszer egyetlen analízisén számolt abszolút és relatív (megfigyelések számával normált) DFS, ahol RADAR reflektivitás és GNSS ZTD<sup>7</sup> megfigyelések is asszimilációra kerültek. Az ábráról azt láthatjuk, hogy a legtöbb információt – az abszolút DFS alapján – a szélre vonatkozó megfigyelések nyújtják. A relatív DFS alapján – a nedvességre vonatkozó megfigyelések ugyan kis számban, de nagyon fontos hozzájárulást biztosítanak az analízishez. Ezért kitűzött célunk, hogy a RADAR reflektivitás és radiális szél, valamint ZTD megfigyeléseket felhasználjuk a jövőben az AROME adatasszimilációs rendszerében. Az AROME modell adatasszimilációs rendszeréről részletesebben várhatóan Mile et al. (2014) cikkében olvashatnak majd az érdeklődők.



2. ábra: Abszolút (bal) és relatív (jobb) DFS egy kísérleti AROME adatasszimilációs futásban 12 UTC-re vonatkozóan, 2014. január 3.

## Fizikai parametrizációk

Az AROME modell korszerű fizikai parametrizációs csomaggal rendelkezik a rácstávolság alatti folyamatok leírására. A sugárzási folyamatokat az ECMWF sugárzási sémájával írják le. A felhőkben zajló folyamatok mikrofizikáját az ICE3 kevert-fázisú parametrizációs sémával modellezik, amelyben öt prognosztikus víz-kondenzátum található. A turbulenciát egy 1,5-es rendű lezárással parametrizálják, amely prognosztikusan számolja a turbulens kinetikus energiát (TKE) és diagnosztizálja a keveredési úthosszt. A 2,5 km-es skálán feltételezzük, hogy a modell explicit módon írja le a mélykonvekciót, ezért csak a sekélykonvekció parametrizálására van szükség. Ezt az ún. EDMF<sup>8</sup> séma segítségével írják le. A felszíni folyamatokat a SURFEX externalizált felszíni séma segítségével parametrizálják, amely négy felszínípust különböztet meg (természetes földfelszín, város, tenger és tó).

Jelenleg az OMSZ-nál folyó, fizikai parametrizációval kapcsolatos fejlesztések két téma köré csoportosulnak. Az első ilyen téma stratus fedte határreteg (hidegpárnának is neve-

<sup>6</sup> Degree of Freedom for Signal

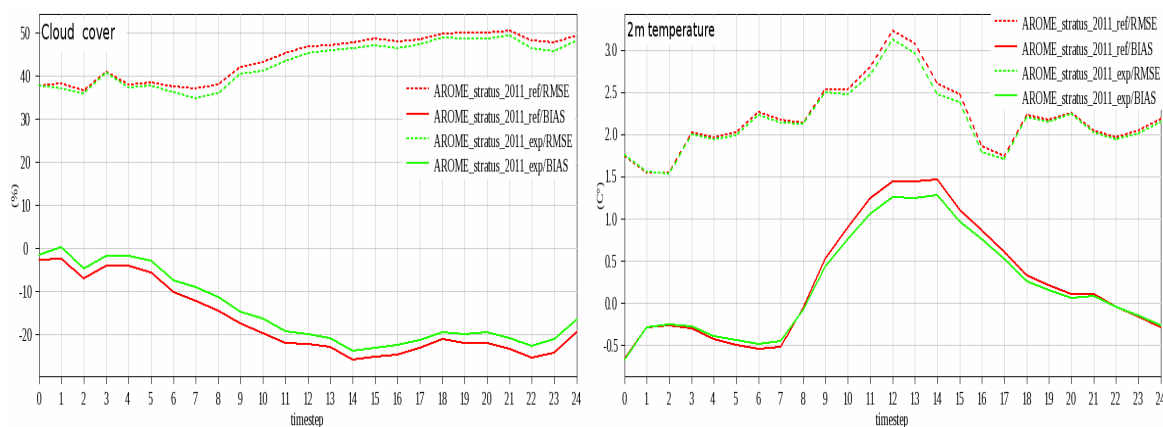
<sup>7</sup> Global Navigation Satellite System Zenith Total Delay

<sup>8</sup> Eddy Diffuzivity Mass Flux (diffuzivitás tömegfluxus)

zik), amely gyakori jelenség télen Közép-Európában. Általánosságban elmondható, hogy az AROME modell – az OMSZ-nál használt többi NWP modellhez hasonlóan – problémákkal küzd ezen időjárási helyzetek előrejelzésekor. A modellben a stratus réteg – a valósággal ellentétben – kora délutánra feloszlik és ennek következtében a délutáni hőmérsékleteket felülbecsli, míg az éjszakai hőmérsékleteket alulbecsli a modell. Ezen időjárási szituáció nehézsége a modellezés szempontjából az, hogy több folyamat (sugárzás, turbulencia, mikrofizika) kölcsönhatásának eredményeképpen alakul ki, és marad fenn a stratus réteg. Az AROME modell hidegpárnás helyzetekben nyújtott teljesítményét egy Magyar-Francia Tét projekt keretében vizsgáljuk. A munka érzékenységvizsgálatokkal kezdődött melynek eredményét a következőképpen összegezhetjük:

- Az AROME szimuláció nem mutat jelentős érzékenységet a határfeltételekre (ARPEGE és ECMWF/IFS határfeltételeket teszteltünk).
- A turbulenciaséma hangolása (a turbulens kinetikus energiának a disszipációs koefficiens csökkentésével való növelése) csak kis mértékű javulást eredményez.
- A telítési hiány varianciájának számítására diagnosztikus és prognosztikus sémákat teszteltünk, amelyek közül az előbbi adja a jobb eredményt.
- A felhőzet optikai vastagságának növelésével az előrejelzés javulása érhető el.

A fenti kísérletekkel azonban nem sikerült jelentősen növelni az előrejelzés bevalását, így vizsgálatainkat a mikrofizikai parametrizációra fókuszáltuk. Megfigyeltük, hogy a vizsgált hidegpárnás esetekben a szimuláció elején nagyon gyenge, szilárd halmazállapotú csapadék figyelhető meg a modellben, ami a mérésekben nem mutatható ki. Ez a modellbeli csapadék nagyon kis mennyiségű (kb. 0,1 mm 12 óra alatt), azonban elegendő ahhoz, hogy a viszonylag vékony stratus felhőzet kihulljon. Kísérletünkben módosítottuk a szilárd csapadékhöz tartozó autokonverziós folyamat parametrizációjának konstansain, így lecsökkentettük a felhőelemekből képződő csapadékot. Ennek következtében a hidegpárnás felhőzet nagy része megmarad a modellben, az előrejelzés javul. A 3. ábrán egy két hetes, túlnyomórészt hidegpárnás napokat magába foglaló időszakon teszteltük a módosított mikrofizikát. Földfelszíni megfigyelésekkel való verifikáció alapján elmondható, hogy a felhőzet alábecslése és ennek következtében a hőmérséklet előrejelzése is javult.



3. ábra. A hidegpárnás helyzetek előrejelzésének javítása a felhőzet (bal) és a 2 méteres hőmérséklet (jobb) esetében a 2011. november 18. és 2011. december 2. közötti időszakra.

Synop megfigyelések alapján készített verifikációs mérőszámok az előrejelzési időtáv függvényében. Szaggatott vonal: RMSE; folytonos vonal: BIAS.

Piros vonal: eredeti modellkonfiguráció; zöld vonal: módosított autokonverzió.

A fizikai parametrizációkhoz köthető második fejlesztési irány az AROME modell felbontásának növeléséhez kapcsolódik. Az AROME-hoz hasonló nagy-felbontású nem-hidrosztatikus meteorológiai modellek a veszélyes időjárási helyzetek előrejelzésében

nyújtanak nagy segítséget. A heves zivatarok kialakulása ugyanis erősen kötött a konvekciók által gerjesztett feláramlásokhoz, amikhez rendszerint egy leáramlás társul és így egy örvény jön létre. Az, hogy ezeket az örvényeket mennyire tudja szimulálni egy numerikus modell, nagyban függ a rácsálózatának horizontális felbontásától. Az AROME modell felbontásának növelésétől így a veszélyes időjárási jelenségek jobb előrejelzését várjuk.

Megkülönböztetünk mély és sekély konvekciót. A mély konvekció esetében a feláramlás egészen a troposzféra tetejéig elér, és a hozzá tartozó örvényeket az AROME dinamikája az operatív 2,5 km-es horizontális felbontásának köszönhetően már jó közelítéssel le tudja írni. A sekély konvekciónál a feláramlás csak a planetáris határréteg tetejéig terjed és a horizontális mérete is kisebb a mély konvekciónál. A hozzá tartozó örvényeket az AROME dinamikája az operatív horizontális felbontáson már nem képes explicite leírni, ezért azokat parametrizálni kell. A felbontás növelésével azonban egy bizonyos ponton már a modell dinamikája is képes lesz a sekély konvekció legnagyobb örvényeit kezelni, egy további ponton túl pedig már nincs is szükség a sekély konvekció parametrizálására. A két pont közti területet a sekély konvekció „szürke zónájának” nevezzük.

Az OMSZ-nál folyó egyik kutatás az AROME felbontás-növelésének lehetőségeivel és következményeivel foglalkozik, és különösképpen a sekély konvekció turbulencia-parametrizációjára összpontosít, ami nagyban függ attól, hogy a horizontális felbontás hol helyezkedik el a szürke zónához képest. Jelenleg Honnert et al. (2011) munkáját alapul véve – amelyben az IHOP\_2002<sup>9</sup> mérési kampányának adatait felhasználva végzett LES<sup>10</sup> kísérleteket és a sekély konvekció szürke zónáját vizsgálta – idealizált esetek futtatásával próbáljuk megismerni az AROME viselkedését az operatívnál jóval nagyobb (akár 500 méteres) rácsfelbontás mellett. A kutatás végső célja az, hogy úgy módosítsuk az AROME sekély konvekció parametrizációját, hogy az a szürke zónában is jól működjön.

## Nem-hidrosztatikus ensemble rendszer

A sokasági (idegen szóval ensemble) előrejelzések régóta bevált eszközei a numerikus időjárás előrejelzések készítése során felmerülő bizonytalanságok számszerűsítésének. Az ensemble rendszerek lehetővé teszik, hogy több modell-integrálás elvégzése által valószínűségi információhoz jussunk a légkörben várható eseményekkel kapcsolatban. Ezek a rendszerek először a globális előrejelzéseket készítő központoknál terjedtek el (Buizza et al., 1993), majd a nemzeti meteorológiai szolgálatok is elkezdték alkalmazni őket; így vált operatívvá 2008-ban az OMSZ-nál az ALADIN korlátos tartományú modellre épülő ensemble rendszer, az ún. LAMEPS (Horanyi et al., 2011).

Ahogy az előzőekben láthattuk, a felbontás folyamatos növelése lehetővé tette, hogy korlátos tartományú modelljeink 2-3 km felbontáson fussanak, ahol a hidrosztatikus közelítés többé nem érvényes, és ahol a modell képes a konvektív események leírására is. A modellek ilyen irányú fejlődése lehetővé tette a légkörben zajló kis skálájú folyamatok valóságosabb leírását, ám nem feltétlenül javította azok bevállási mutatóit. Elég arra gondolnunk, hogy a nehezen meghatározható helyű és intenzitású zivatarok modellben történő megjelenése mennyi új bizonytalanságot jelent a hidrosztatikus modellek elkenet, ám kevésbé realisztikus csapadékmezőikhez képest. Ezen új bizonytalanságok megjelenése miatt különösen fontos lehet nem-hidrosztatikus rendszerekben az ensemble módszer használata, már rövid időtávon is (Gebhardt et al., 2008; Migliorini et al., 2011; Vié et al., 2011).

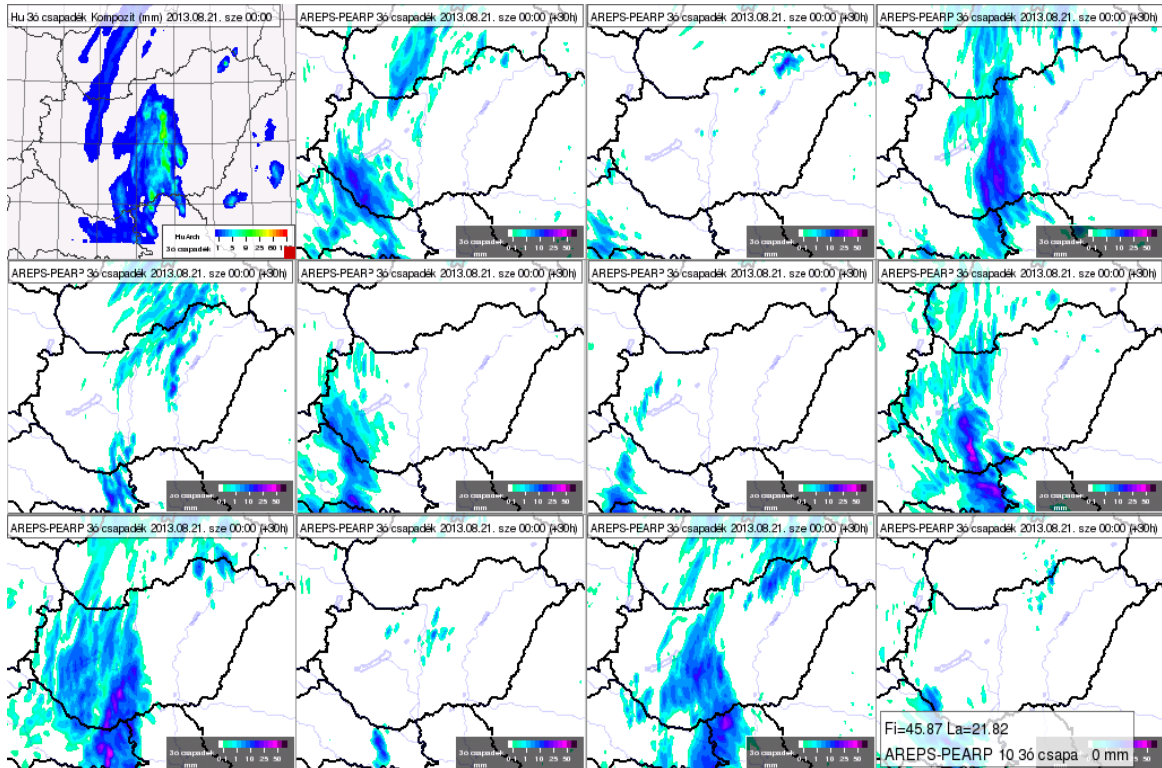
Ez jelentette a motivációt az OMSZ számára az AROME modellre épülő, konvektív folyamatokat is leíró ensemble rendszer tesztelésének megkezdésére. A tesztek során az AROME modellt ugyanazokkal a beállításokkal, ugyanazon a tartományon és ugyanolyan

---

<sup>9</sup> International H<sub>2</sub>O Project

<sup>10</sup> Large-eddy Simulation

felbontáson futtattuk, mint az operatív gyakorlatban, ám 11 tag integrálását végeztük el párhuzamosan. A 11 eltérő modell kimenet felhívhatja a figyelmet az időjárási helyzet nehéz előrejelezhetőségére, és riaszthat bizonyos veszélyes eseményekre, már alacsony bekövetkezési kockázat mellett is (ld. 4. ábra).



4. ábra: 2013. aug. 20-án este 9 és éjfél között lehulló csapadék mennyisége. A bal felső ábra a radar reflektivitásból számolt mérést, a többi 11 tag pedig az AROME-EPS 11 előrejelzését mutatja. Látható, hogy néhány tag már jó előre felhívta a figyelmet a kockázatos helyzetre.

Hasonlóan általában az ensemble rendszerekhez, az AROME-EPS-sel kapcsolatban is a fő kérdés a tagok közti eltérés meghatározásának, vagyis a tagok perturbálásának a módja. Korlátos tartományú ensemble rendszereknél természetesen érkezik perturbáció a globális meghajtó modelltől is, ami esetünkben a Météo France globális ensemble rendszerének tagjait jelenti. Emellett kísérleteket végeztünk lokális perturbációs módszerekkel is. A kezdeti feltétel bizonytalanságának számszerűsítése érdekében teszteltük az ún. ensemble adatasszimilációs rendszert, melynek lényege, hogy több analízist készítünk párhuzamosan, melyek előállításánál a felhasznált megfigyeléseket módosítjuk véletlenszerűen, de hibahatáron belül, majd az eltérő analízisekből futtatjuk a sokasági előrejelzés egyes tagjait (Bonavita et al., 2011). A modellalkotás során felmerülő bizonytalanságok számszerűsítése érdekében pedig a modellfizikából jövő tendenciák véletlenszerűen történő perturbálásával kísérleteztünk (Buizza et al., 1999; Bouttier et al., 2012).

### Köszönetnyilvánítás

Az AROME modell hidegpárnás helyzetekben való javítását célzó kutatásokat a Magyar-Francia bilaterális TÉT projekt keretében végeztük, melynek címe: „Az atmoszférikus határreteg szimulációja az AROME numerikus időjárás előrejelző modellel” (projektszám: TÉT\_11-2-2012-0003).

## Hivatkozások

- Benjamin, S.G., Dévényi, D., Weygandt, S.S., Brundage, K.J., Brown, J.M., Grell, G.A., Kim, D., Schwartz, B.E., Smirnova, T.G., Smith, T.L., Manikin, G.S., 2004: An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC. *Monthly Weather Review*, 132, 495–518.
- Bonavita, M., Raynaud, L., Isaksen, L., 2011: Estimating background-error variances with the ECMWF Ensemble of Data Assimilations system: some effects of ensemble size and day-to-day variability. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 423–434, DOI: 10.1002/qj.756.
- Bouttier, F., Benoît, V., Olivier, N., Raynaud, L., 2012: Impact of stochastic physics in a convection-permitting ensemble. *Monthly Weather Review*, 140, 3706–3721.
- Bölöni, G., 2006: Development of a variational data assimilation system for a limited area model at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, 110, 309–327.
- Bölöni, G., Berre, L., Adamcsek, E., 2014: Comparison of static mesoscale background error covariances estimated by three different ensemble data assimilation techniques. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, in press. DOI: 10.1002/qj.2361
- Brousseau, P., Berre, L., Bouttier, F., Desroziers, G., 2011: Background-error covariances for a convective-scale data-assimilation system: AROME–France 3D-Var. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 409–422.
- Buizza, R., Miller, M., Palmer, T. N., 1999: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125, 2887–2908.
- Buizza, R., Tribbia, J., Molteni, F., Palmer, T., 1993: Computation of optimal unstable structures for a numerical weather prediction model. *Tellus*, 45A, 388–407.
- Cardinali, C., Pezzuli, S., Andersson, E. 2004: Influence matrix diagnostic of data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130, 2767–2786.
- Gebhardt, C., Theis, S., Krahe, P., Renner, V., 2008: Experimental ensemble forecasts of precipitation based on a convection-resolving model. *Atmospheric Science Letters*, 9, 67–72.
- Honnert, R., Masson, V., Couvreur, F., 2011: A diagnostic for evaluating the representation of turbulence in atmospheric models at the kilometeric scale. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68, 3112–3131.
- Horányi, A., Mile, M., Szűcs, M., 2011: Latest developments around the ALADIN operational short-range ensemble prediction system in Hungary. *Tellus*, 63A, 642–651.
- Lafore, J.P., Stein, J., Asencio, N., Bougeault, P., Ducrocq, V., Duron, J., Fischer, C., Hérelil, P., Mascart, P., Masson, V., Pinty, J.P., Redelsperger, J.L., Richard, E., Vilà-Guerau de Arellano, J., 1998: The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I: Adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae*, 16, 90–109.
- Le Moigne, P., ed. 2012: SURFEX Scientific Documentation. CNRM, Toulouse. 211p. Available from <http://www.cnrm.meteo.fr/surfex/>
- Mile, M., Bölöni, G., Randriamampianina, R., Steib, R., Kucukkaraca, E., 2014: Overview of mesoscale data assimilation developments at the Hungarian Meteorological Service. *Submitted to Időjárás*
- Migliorini, S., Dixon, M., Bannister, R., Ballard, S., 2011: Ensemble prediction for nowcasting with a convection-permitting model. I: Description of the system and the impact of radar-derived surface precipitation rates. *Tellus*, 63A, 468–496.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., Masson, V., 2011: The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Monthly Weather Review*, 139, 976–991.
- Vié, B., Nuissier, O., Ducrocq, V., 2011: Cloud-resolving ensemble simulations of Mediterranean heavy precipitating events: Uncertainty on initial conditions and lateral boundary conditions. *Monthly Weather Review*, 139, 403–423.