

FELSZÍNI FOLYAMATOK ÉS ADATASSZIMILÁCIÓS ELJÁRÁSOK FEJLESZTÉSE MEZOSKÁLÁJÚ NUMERIKUS ELŐREJELZŐI MODELLBEN

Tóth Helga ^(1,2) , Szintai Balázs ⁽²⁾ , Breuer Hajnalka ⁽¹⁾ 

- ⁽¹⁾ ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,
Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A
⁽²⁾ Országos Meteorológiai Szolgálat, 1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1.
e-mail: toth.h@met.hu, szintai.b@met.hu, breuer.hajnalka@ttk.elte.hu

Bevezetés

A légkör alsó részének állapotára hatással vannak a földfelszíni folyamatok, ezért a talajváltozók kezdeti értékeinek meghatározása kritikus pontja a pontos numerikus előrejelzés készítésének. A pontatlan talajnedvesség-tartalom és talajhőmérséklet a 2 m-es léghőmérséklet (T2M) és a relatív páratartalom (HU2M) előrejelzési hibáihoz vezethet (Hess, 2001). Számos módszert fejlesztettek ki a talajváltozók kezdeti hibáinak minimalizálására. A talajfelszín asszimilációját leggyakrabban optimális interpolációval (OI) végzik (Mahfouf, 1991; Mahfouf et al., 2000), de egyre népszerűbb a Kalman-filter egyszerűsített kiterjesztett (SEKF) verziója is (de Rosnay et al., 2013; Mahfouf et al., 2009). Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) 2016 és 2022 között az operatív AROME (*Application of Research to Operations at Mesoscale*) numerikus előrejelző modellben (Seity et al., 2011) az OI módszert alkalmaztuk (Tóth et al., 2021).

Az AROME nem-hidrosztatikus előrejelző modellt napi nyolcszor futtatjuk az OMSZ-ban (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 és 21 UTC-kor), 48 órára előre, 2,5 km-es horizontális felbontással, 60 vertikális szinttel. A magaslégkörben 3D-Var-t használunk, 3 órás ciklussal, 3 órás asszimilációs ablakkal (Mile et al., 2015; Tóth et al., 2021). Asszimiláljuk a szinoptikus mérőállomások (2 m-es hőmérséklet és relatív nedvesség, 10 m-es szél, nyomás), rádiószondás felszállások (hőmérséklet, nedvesség, szél és geopotenciál) méréseit, AMDAR repülőgépes megfigyeléseket (szél, hőmérséklet és nedvesség), a GNSS-ZTD adatokat és az Atmospheric Motion Vector műholdas szélvektor méréseket. Az AROME modell talajmodellje a SURFEX (*SURface EXternalized*) (Le Moigne, 2012) modell, mely használható a légköri modellhez kapcsoltn és attól függetlenül is. A SURFEX leírja a légkör és a talaj, illetve a talaj különböző rétegei közötti hő- és nedvességtranszportot.

Az OI-n alapuló felszínasszimiláció a megfigyelések minőségellenőrzéséből, a 2 m-es hőmérséklet és relatív nedvesség rácsra történő interpolációjából és analíziséből, valamint a felszíni- és talajváltozók (hőmérséklet és víztartalom) ennek megfelelő korrekciójából áll (Giard & Bazile, 2000). Az SEKF az időjárástól függő, dinamikusabb leírást tesz lehetővé, valamint alkalmas mind a konvencionális, mind a nem-konvencionális (pl. műholdas) mérések asszimilációjára. A beszámolóban elsőként a 2 m-es hőmérséklet és relatív nedvesség asszimilációjára koncentrálnak, majd kitérünk a MetOp-B és C műhold ASCAT talajnedvesség méréseinek beépítésére is.

Módszer

A talajváltozók analízisekor fontos, hogy a lehető legpontosabb kezdeti feltétel készüljön, ezért az SEKF során dinamikusan változó együtthatókat használunk és az analízis egyenletét a következőképpen írhatjuk fel:

$$x_a = x_b + \mathbf{K} (y - \mathcal{H} x_b) \quad (1)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{B} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{B} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}) \quad (2)$$

ahol x_a az analízis (pl. talajhőmérséklet és talajnedvesség, az ún. kontrollváltozók), x_b egy korábbi modellfutás eredménye, y a megfigyeléseket jelöli (pl. 2 m-es hőmérséklet és relatív nedvesség), $\mathcal{H}$ a nemlineáris megfigyelési operátor, amely a kontrollváltozókat modelltérből megfigyelési térbe transzformálja. $\mathcal{H}$ -t linearizálva kapjuk a $\mathbf{H}$ linearizált megfigyelési operátort, $\mathbf{K}$ az ún. nyereség-mátrix, amely a megfigyelés hibájának relatív fontosságát reprezentálja az előzetes becslésre vonatkozóan. $\mathbf{B}$ és $\mathbf{R}$ a háttérhibák, illetve a megfigyelési hibák kovarianciamátrixai. Ebben a tanulmányban az EKF egyszerűsített változatát, a SEKF-et használjuk, ami azt jelenti, hogy a $\mathbf{B}$ háttérhiba-kovarianciamátrix nem változik az idő múlásával. A $\mathbf{H}$ elemeit (ún. Jacobi-mátrix) véges különbséges módszerrel számítjuk ki. Az $\mathbf{x}$ kontrollvektor minden egyes x_j komponensét perturbálva a $\mathbf{H}$ mátrix elemei adott i időpontban a következő módon írhatók fel:

$$\mathbf{H}_{ij} = \frac{\partial y_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

Az általunk használt kontrollváltozók a talajhőmérséklet és talajnedvesség értékek két szinten, a felszínközeli 0-1 cm vastagságú rétegben és a gyökérszónában, azaz a 0-2 m rétegben, míg a megfigyelések a 2 m-es szinten mért léghőmérséklet és relatív nedvesség értékek. A Jacobi-mátrix tehát a következő módon írható fel:

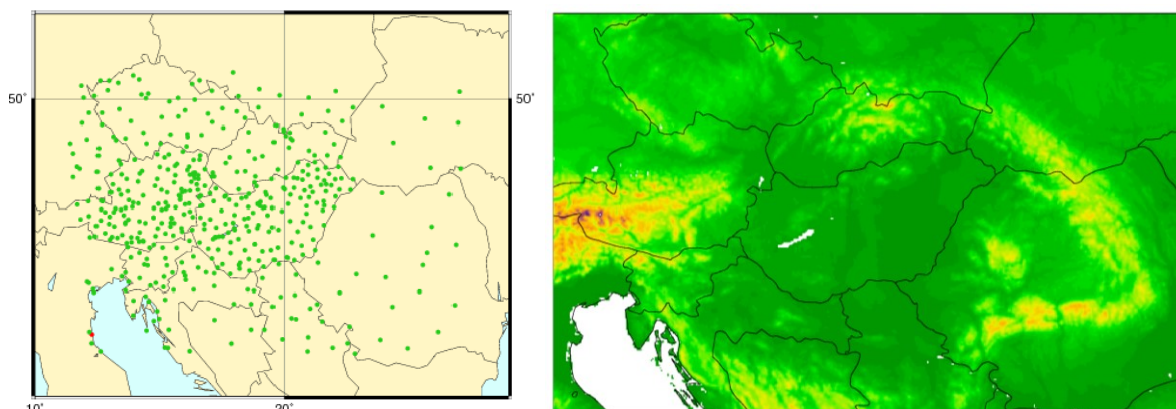
$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_{2M}}{\partial TG1} & \frac{\partial T_{2M}}{\partial TG2} & \frac{\partial T_{2M}}{\partial WG1} & \frac{\partial T_{2M}}{\partial WG2} \\ \frac{\partial HU_{2M}}{\partial TG1} & \frac{\partial HU_{2M}}{\partial TG2} & \frac{\partial HU_{2M}}{\partial WG1} & \frac{\partial HU_{2M}}{\partial WG2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

A Jacobi tagok előállítására a gyakorlatban: a SURFEX modellt lefuttatjuk $t-3h$ -tól t -ig $n+1$ -szer, ahol n a kontroll változók száma. Azaz jelen esetben 5-ször (4 kontroll + referencia). Minden egyes futtatást úgy indítunk, hogy az adott kontroll változót perturbáljuk. A kis perturbációk (10^{-3} vagy kisebb) garantálják a $\mathbf{H}$ operátor linearitását.

Eredmények

2 m-es megfigyelések asszimilációja

Az asszimiláció során felhasznált szinoptikus állomások elhelyezkedése az 1. ábra bal oldalán látható. A tartomány középső és nyugati része kellően sűrűn lefedett, de keleten és délen jóval kevesebb adatot használunk. Ezt a hiányosságot későbbiekben orvosolhatjuk további nemzeti szinoptikus állomások bevonásával, melyhez az országok közötti megállapodások révén hozzájuthatunk. Az 1. ábra jobb oldalán az AROME modell tartománya látható, melyre az analíziseket és előrejelzéseket készítjük.



1. ábra: Az asszimilált szinoptikus állomások elhelyezkedése és az AROME modell tartománya.

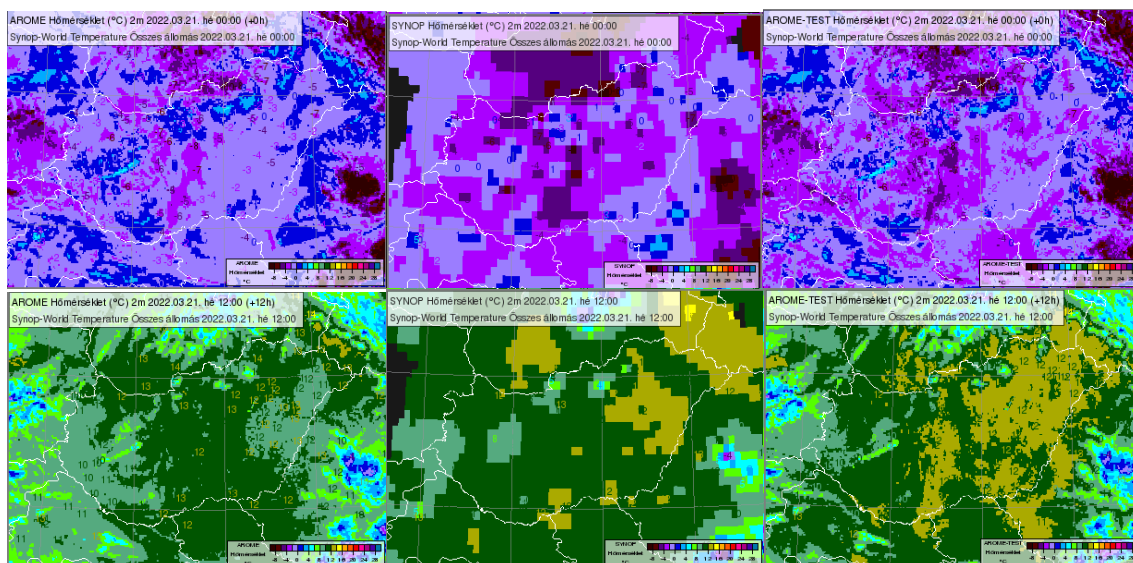
Több tesztelési kísérletet futtattunk, hogy megállapítsuk, mely megfigyelési- és háttérhiba, valamint perturbáció értékekkel kapjuk a lehető legjobb előrejelzést (1. táblázat).

1. táblázat: Érzékenység vizsgálatok az SEKF különböző beállításaira.

	EXP1	EXP2	EXP3	DEF	ECM	ECM_B	EXP4
Megfigyelési hiba: XERROBS (T2M, HU2M)	0,5; 0,2	0,5; 0,2	1,0; 0,4	1,0; 0,1	1,0; 0,04	1,0; 0,04	1,0; 0,07
Modellhiba: XSIGMA (WG2, WG1, TG2, TG1)	0,15; 0,1; 2; 2	0,15; 0,1; 2; 2	0,15; 0,1; 2; 2	0,15; 0,1; 2; 2	0,15; 0,1; 2; 2	0,01; 0,01; 1; 1	0,15; 0,1; 2; 2
Perturbáció nagysága: XTPRT (WG2, WG1, TG2, TG1)	10^{-4} ; 10^{-4} ; 10^{-5} ; 10^{-5}	10^{-3} ; 10^{-3} ; 10^{-4} ; 10^{-4}	10^{-4} ; 10^{-4} ; 10^{-5} ; 10^{-5}	10^{-4} ; 10^{-4} ; 10^{-5} ; 10^{-5}	10^{-4} ; 10^{-4} ; 10^{-5} ; 10^{-5}	10^{-4} ; 10^{-4} ; 10^{-5} ; 10^{-5}	10^{-4} ; 10^{-4} ; 10^{-5} ; 10^{-5}
T2M, BIAS_00, RMSE_00 TD2M BIAS_00, RMSE_00	-	-	0,95; 1,51 -0,5; 1,5	0,81; 1,49 -0,5; 1,5	-	1,1; 1,7 -0,4; 1,6	0,78; 1,48 -0,6; 1,51
T2M BIAS_12, RMSE_12 TD2M BIAS_12, RMSE_12	-	-	0,3; 1,9 -0,2; 2,25	0,05; 1,9 0,25; 2,25	-	0,0; 1,9 0,4; 2,45	0,1; 1,9 0,2; 2,2
T2M BIAS_24 RMSE_24 TD2M BIAS_24, RMSE_24	-	-	1,35; 2,3 -0,8; 2,0	1,3; 2,2 -0,75; 2,0	-	1,3; 2,3 -0,5; 2,0	1,3; 2,2 -0,8; 2,1

A legnagyobb érzékenységet a megfigyelési hiba változtatásával összefüggően kaptunk. Néhány kísérlet esetében az Alpok térségében gyanúsán alacsony talajhőmérséklet értékek (< 150 K) is megjelentek (*EXP1*, *EXP2*, *ECM*), ezekre egzakt magyarázatot nem sikerült találni, valószínűleg a megfigyelési és a háttérhibák kiegyensúlyozatlansága, valamint a Jacobi elemek nem-linearitása okozhatta ezt a hibát. Ezekre az esetekre már hosszabb időszakra vonatkozó kiértékelést sem végeztünk. *EXP3*, *DEF*, *ECM_B* és *EXP4*-re nyári időszakra, 2020. július 9-31 között előrejelzéseket futtattunk és megvizsgáltuk a 2 m-es hőmérsékletre és harmatpontra (TD2M) vonatkozó bias és RMSE statisztikákat. A táblázat alapján a legpontosabb előrejelzést az *EXP4* beállításokkal kaptuk.

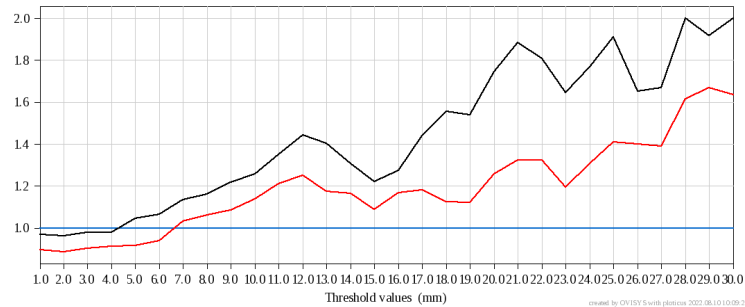
Száraz, anticiklonális esetben az SEKF pontosabb analízist és előrejelzést képes adni, mint a 2022-ig operatíván működő OI (2. ábra). 2022. 03. 21-én 0 UTC-kor, az analízis időpontjában az SEKF alacsonyabb T2M-t adott az ország középső részére, ugyanakkor nappalra magasabb hőmérsékletet prognosztizált a keleti országrészre. Ezáltal a napi hőingás előrejelzése is pontosabbá vált.



2. ábra: Felső sor, bal: T2M analízis OI-val, közép: szinoptikus állomások, jobb: T2M analízis SEKF-fel 2022. 03. 21 00 UTC-re, alsó sor sorrend ugyanez, előrejelzések 2022. 03. 21 +12 UTC-re.

A csapadékelőrejelzésben is némi javulást tapasztaltunk (3. ábra). A 6–7 mm-nél kisebb csapadékmennyiségű eseményeket a modellek alul, az ezt a küszöböt meghaladó eseményeket pedig felülbecsülték. Nagy mennyiségű csapadék esetén (> 10 mm) az SEKF jobban teljesített, és a két modell közötti különbség a küszöbérték növekedésével arányosan nőtt.

A pozitív eredményeknek köszönhetően az SEKF 2022. június 29-én operatív bevezetésre került az AROME modell adatasszimilációs rendszerében.

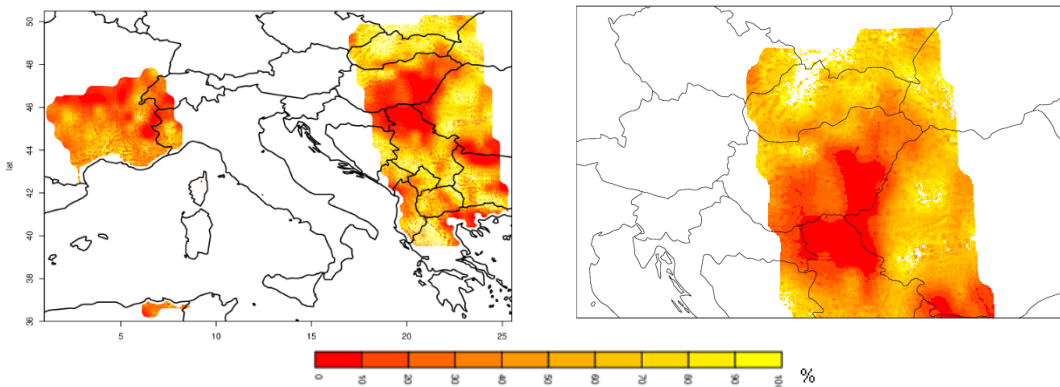


3. ábra: A +24 órás csapadék előrejelzések Frequency Bias statisztikája (FBI) különböző csapadékküszöbektől függően, a 2022. május 4. és június 1. közötti időszakra.
A görbék: OI fekete, SEKF piros. Az FBI ideális értéke 1,1-nél nagyobb/alcsonyabb értékek esetén túl gyakori/ritka az adott küszöbértéknek megfelelően előrejelzett esemény.

Műholdas talajnedvesség asszimilációjának előkészítése

A MetOp B kvázipoláris műhold, kb. 800 km magasságban, kering és 2012-től végez méréseket [1 – ESA, MetOp-B]. A műholdon található az Advance SCATterometer (ASCAT) műszer, amely visszaszórást mér, 5.255 GHz frekvencián. Európa felett napi kétszer halad át, 7 és 19 UTC körül. Az EUMETSAT készít belőle valós idejű talajnedvesség adatokat a H-SAF (Satellite Application Facility on Support to Operational Hydrology and Water Management) együttműködés keretében [2 – HSAF]. Ebben a tanulmányban a H08-as nevű produktumot használtuk, felszíni talajnedvesség értékeket százalékban kifejezve, európai tartományon, 1 km-es horizontális felbontáson. Az ASCAT talajnedvesség értékek asszimilációjával számos tanulmány foglalkozik (Mahfouf, 2010; de Rosnay et al., 2013), bizonyítva az analízisre és az előrejelzésre vonatkozó pozitív hatását.

Az adatok előkészítése a munka fontos része. Első lépésként a nyers adatokat kell átkonvertálni az AROME modell által használt Lambert-rácsra (4. ábra).



4. ábra: Nyers H-SAF talajnedvesség produktum (bal oldal),
AROME rácsra interpolált talajnedvesség (jobb oldal).

Az AROME számára nem százalékos talajnedvesség érték (SM), hanem volumetrikus talajnedvesség szükséges (SSM).

$$SSM = SM \cdot (w_{max} - w_{min}) + w_{min} \quad (5)$$

ahol w_{max} és w_{min} modellből számolt, több évre vonatkozó volumetrikus talajnedvesség értékek.

Az ASCAT mért talajnedvesség és az AROME modell talajnedvességének szisztematikus hibája (bias) eltér, ezért a műholdas megfigyelési adatokat kalibrálni kell az adatasszimiláció végrehajtása előtt. Erre a célra CDF matching technikát alkalmazunk azzal a céllal, hogy eltüntessük a két adatsor közötti inkonzisztenciát (Scipal et al., 2008). A CDF matching-hez az átlagot és a szórást mind a megfigyelésekre, mind a modell adatokra meg kell határozni, lehetőleg minél hosszabb időszakra, legalább 2–3 évre.

A szisztematikus hiba korrekcióját követően megkezdődhetnek az adatasszimilációs kutatások. Tervezzük, hogy a magaslégkörben 3D-Var 3 óránként, míg a felszínen csak kétszer 9 és 21 UTC-kor végzünk asszimilációt. A munka szerves része a műholdas adatok hozzáadott értékének vizsgálata, az előrejelzések összehasonlítása.

Hivatkozások

- Giard, D., Bazile, E., 2000: Implementation of a New Assimilation Scheme for Soil and Surface Variables in a Global NWP Model. *Monthly Weather Review*, 128(4): 997–1015.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<0997:IOANAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<0997:IOANAS>2.0.CO;2)
- Hess, R., 2001: Assimilation of screen-level observations by variational soil moisture analysis. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 77: 145–154. <https://doi.org/10.1007/s007030170023>
- Le Moigne, P., 2012: SURFEX scientific documentation. Note de centre du Groupe de Météorologie a Moyenne Echelle, 87, Météo-France, CNRM, Toulouse, France, on-line available at: <http://www.cnrm.meteo.fr/surfex/>
- Mahfouf, J.-F., 1991: Analysis of Soil Moisture from Near-Surface Parameters: A Feasibility Study. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 30(11): 1534–1547.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1991\)030<1534:AOSMFN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1991)030<1534:AOSMFN>2.0.CO;2)
- Mahfouf, J.-F., 2010: Assimilation of satellite-derived soil moisture from ASCAT in limited-area NWP model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(648): 784–798.
<https://doi.org/10.1002/qj.602>
- Mahfouf, J.-F., Viterbo P., Douville H., Beljaars A., Saarinen S., 2000: A Revised land-surface analysis scheme in the Integrated Forecasting System. ECMWF Newsletter, 88.
- Mahfouf, J.-F., Bergaoui, K., Draper, C., Bouyssel, F., Taillefer, F., Taseva, L., 2009: A comparison of two off-line soil analysis schemes for assimilation of screen level observations, *Journal of Geophysical Research*, 114(D8): D08105, <http://dx.doi.org/10.1029/2008JD011077>
- Mile, M., Bölöni, G., Randriamampianina, R., Steib, R., Kucukkaraca, E., 2015: Overview of mesoscale data assimilation developments at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, 119(2): 215–239.
- de Rosnay, P., Drusch, M., Vasiljevic, D., Balsamo, G., Albergel, C., Isaksen, L., 2013: A simplified Extended Kalman Filter for the global operational soil moisture analysis at ECMWF. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(674): 1199–1213.
<https://doi.org/10.1002/qj.2023>
- Scipal, K., Drusch, M., Wagner, W., 2008: Assimilation of a ERS scatterometer derived soil moisture index in the ECMWF numerical weather prediction system, *Advances in Water Resources*, 31(8): 1101–1112. <https://doi:10.1016/j.advwatres.2008.04.013>
- 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(3): 976–991. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3425.1>

Tóth, H., Homonnai, V., Mile, M., Várkonyi, A., Kocsis, Zs., Szanyi, K., Tóth, G., Szintai, B., Szépszó, G., 2021: Recent developments in the data assimilation of AROME/HU numerical weather prediction model. Időjárás, 125(4): 521–553.
<https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.4.1>

Internetes hivatkozások

[1 – ESA, MetOp-B]

https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/New_launch_date_confirmed_for_Metop-B

[2 – HSAF] https://hsaf.meteoam.it/Products/ProductsList?type=soil_moisture

ORCID

Tóth H.  <https://orcid.org/0000-0001-6610-9621>

Szintai B.  <https://orcid.org/0000-0002-4111-9396>

Breuer H.  <https://orcid.org/0000-0002-0271-095X>