



## SZUPERCELLÁK ÉS SEKÉLY BAROKLIN ZÓNÁK KAPCSOLATA A KÁRPÁT-MEDENCÉBEN

Komjáti Kornél <sup>(1, 2, 4)</sup>, Kurcsics Máté <sup>(2, 3)</sup>, Csirmaz Kálmán <sup>(2, 4)</sup>, Breuer Hajnalka <sup>(1)</sup> ,  
Horváth Ákos <sup>(2)</sup> , Kun Sándor <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,  
Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

<sup>(2)</sup> Országos Meteorológiai Szolgálat, 1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1.

<sup>(3)</sup> Pécsi Tudományegyetem, Földtani és Meteorológiai Tanszék, 7624 Pécs, Ifjúság útja 6.

<sup>(4)</sup> Magyarországi Viharvadászok és Viharkárfelmérők Közhasznú Egyesülete,  
1139 Budapest, Fiastyúk utca 57. 3/3

e-mail: komjati.k@met.hu

### Bevezetés

A szupercellák felelősek a legtöbb heves időjárási jelenségért Európa szerte (Púčik et al., 2015). Kialakulásukhoz speciális légköri feltételek szükségesek. A cellák életútjuk során azonban nem homogén környezetben haladnak, és a környezet változékonysága alapvetően befolyásolhatja a mozgásukat és fejlődésüket. Már az 1980-as években megfigyelték, hogy egyes szupercellák megerősödése és tornádók kialakulása olyan felszínhez közeli heterogenitásokhoz vezethetők vissza, amelyek erős horizontális tengelyű örvényességet generálnak a felszín közelében (Maddox et al., 1980). Ez a környezeti örvényesség pedig a zivatar feláramlásába kerülve fokozhatja annak rotációját. Ilyen felszín közeli hatások lehetnek például a korábbi zivatarrendszerek kifutófrontvonalai (nemzetközi szakirodalomban: *outflow boundary*), vagy éppen az eltérő besugárzás hatására kialakuló különböző hőmérsékletű térfelszínek közötti baroklinitás (Markowski et al., 1998a,b; Rasmussen et al., 2000; Gilmore & Wicker, 2002; Fierro et al., 2006; Boustead et al., 2013; stb.). Numerikus szimulációk (Atkins et al., 1999; Laflin & Houston, 2012; Gray & Frame, 2019) és mérések, megfigyelések (Bunkers et al., 2006; Magee & Davenport, 2020) is megerősítik, hogy a szupercellák – és különösképp az alacsonyszintű mezociklon – megerősödése szempontjából fontos, hogy a cellák lehetőleg minél kisebb szögben (< 45°) keresztezzék a horizontális örvényességben gazdag zónákat (továbbiakban: sekély baroklin zónák).

Hasonló folyamatok a Kárpát-medencében is előfordulhatnak (Komjáti et al., 2023), jellemzően sokkal lokálisabb formában, mint az USA-ban, a komplexebb domborzat miatt. A megfigyelések alapján, a sekély baroklin zónákat keresztező szupercellák rendszerint rövid időn belül heves időjárási jelenségeket (szélvihar, nagyméretű jégeső, tornádó) produkálhatnak, amelyek elérhetik esetenként a narancssárga-, illetve a piros riasztás kritériumait is az Országos Meteorológiai Szolgálat veszélyjelző rendszerében.

### Módszertan

A 2022. április 24-i eset vizsgálata során a sekély baroklin zónák azonosításához az Országos Meteorológiai Szolgálat (továbbiakban: OMSZ) mérőhálózatában szereplő hőmérséklet, relatív nedvesség és szélméréseit, illetve műholdas megfigyeléseket vettünk alapul. A radaros adatok szintén az OMSZ mérőhálózatához tartozó duál-polarizációs doppler radarok segítségével történtek [1 – OMSZ].

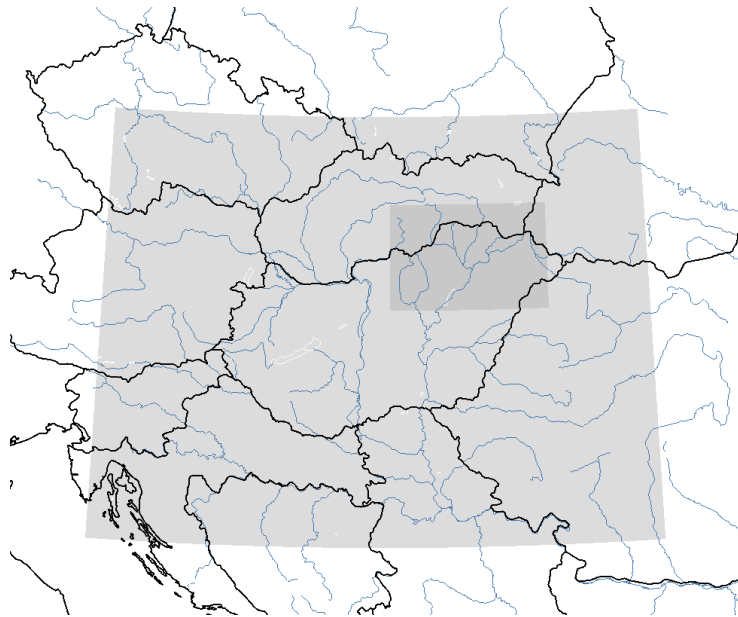
A vizsgálathoz a WRF<sup>1</sup> korlátos tartományú, nem-hidrosztatikus modellt választottuk, amelyhez a szükséges kezdeti- és peremfeltételeket az ECMWF<sup>2</sup> IFS<sup>3</sup> modelltől nyertük. A peremfeltételek csatolása a szimuláció során egységesen órás időlépcsőkben történt. A feldolgozási terület a Kárpát-medence és annak tágabb környezete volt, 1600 m-es horizontális felbontással, amelybe egy 600 m-es horizontális ráctávolságú belső domaint illesztettünk (1. ábra). A modell 61 vertikális, felszínkövető szintet foglalt magába, s a szimulációhoz a kétmomentumos Thompson sémát alkalmaztuk (Thompson et al., 2008). A sekély baroklin zóna azonosításához szükséges számításokat utófeldolgozás során végeztük el, s a horizontális örvényességi tendencia egyenlet tagjait elemeztük (Klemp, 1987):

$$\mathbf{i} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} = \frac{\partial \xi}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla \xi + \boldsymbol{\omega} \cdot \nabla \mathbf{u} + f \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho^2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \mathbf{i} \cdot \nabla \times \mathbf{F} \quad (1.)$$

$$\mathbf{j} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} = \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla \eta + \boldsymbol{\omega} \cdot \nabla \mathbf{v} + f \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho^2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \mathbf{j} \cdot \nabla \times \mathbf{F} \quad (2.)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\omega}_h}{dt} = \boldsymbol{\omega} \cdot \nabla \mathbf{v}_h + \nabla \times \mathbf{Bk} \quad (3.)$$

ahol  $\xi$  és  $\eta$  a rotáció vektor ( $\boldsymbol{\omega}$ ) horizontális komponensei,  $u$  és  $v$  a ( $\mathbf{v}$ ) háromdimenziós sebességvektor horizontális komponensei,  $\rho$  a sűrűség. Az (1.) és (2.) egyenlet összevonásával, a Coriolis ( $f$ ) és viszkózitási ( $\mathbf{F}$ ) tagok elhanyagolásával jutunk el a (3.) egyenlethez, ahol a jobb oldalon szereplő kifejezések az örvénydőlés (tilting) és szolenoidális tagokat reprezentálják.



1. ábra: A vizsgálathoz használt WRF domain (világos szürke terület), illetve a beágyazott, belső domain (sötét szürke terület) elhelyezkedése.

## Esettanulmány - 2022. április 24.

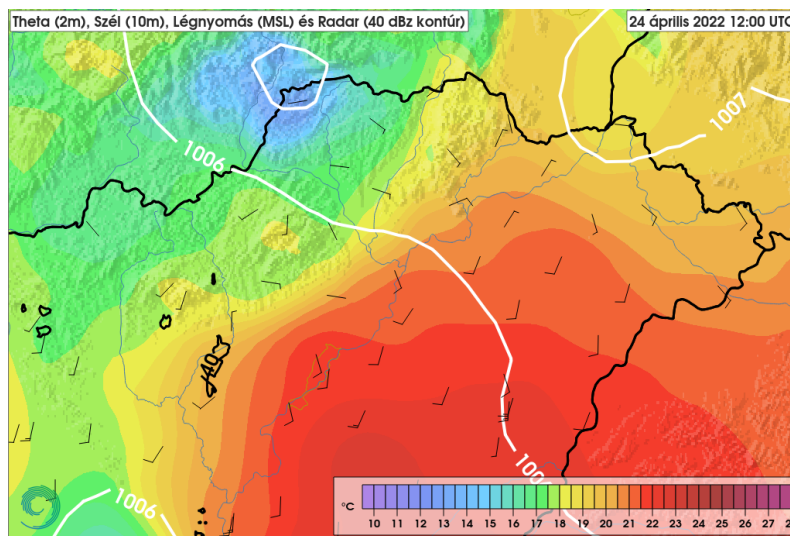
2022. április 24-én a hajnali, reggeli időszakban egy melegfronti csapadékszóna vonult át az ország északkeleti harmadán. Az elvonuló csapadékszóna és a maradványfelhőzet hatására az Északi-középhegység tágabb térségében egy hűvös, ám nedves, jól átkevert légtömeg alakult

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

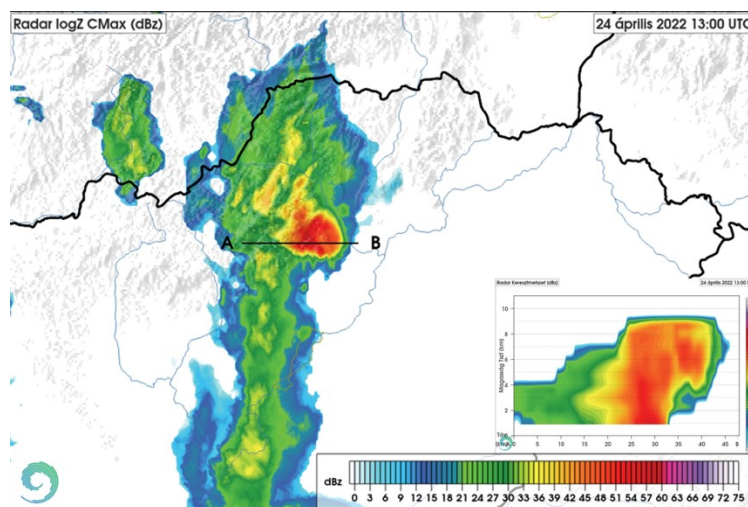
<sup>2</sup> European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

<sup>3</sup> Integrated Forecasting System

ki. Mindeközben a Magyarország felett elhelyezkedő sekély ciklonális mező melegszekektorában meleg, száraz légtömeg advektálódott a fent említett térség irányába, így az Északi-középhegység vonulatának délkeleti peremén egy eltérő hőmérsékletű (a hideg oldalon 12–17 °C, a meleg oldalon 20–22 °C-os kétméteres hőmérséklet) és nedvességtartalmú (a hideg oldalon 70–85%, míg a meleg oldalon 40–55% kétméteres relatív nedvesség) légtömeghatár alakult ki. A délelőtt folyamán egy sztratiform jellegű csapadékzóna alakult ki a Dél-Dunántúl és a Duna-Tisza köze térségében, amely fokozatosan északkelet felé helyeződött. A réteges csapadékba ágyazva 11:30 UTC-kor alakult ki az első zivatarcella, amely 12 UTC-re megközelítette a korábban kialakult sekély baroklin zónát (2. ábra). A zóna határvonalával párhuzamosan haladva a zivatarcella hirtelen megerősödött, s a radaron szupercellákra jellemző jegyeket kezdett mutatni (3. ábra). A szupercella a nap legnagyobb, legerősebb zivatara volt, amely nagy méretű (> 2,5 cm) jégesőt és heves szélvihart (> 90 km/h) produkált, mindezen felül tornádó-gyanús károkat okozott Ónod településen.



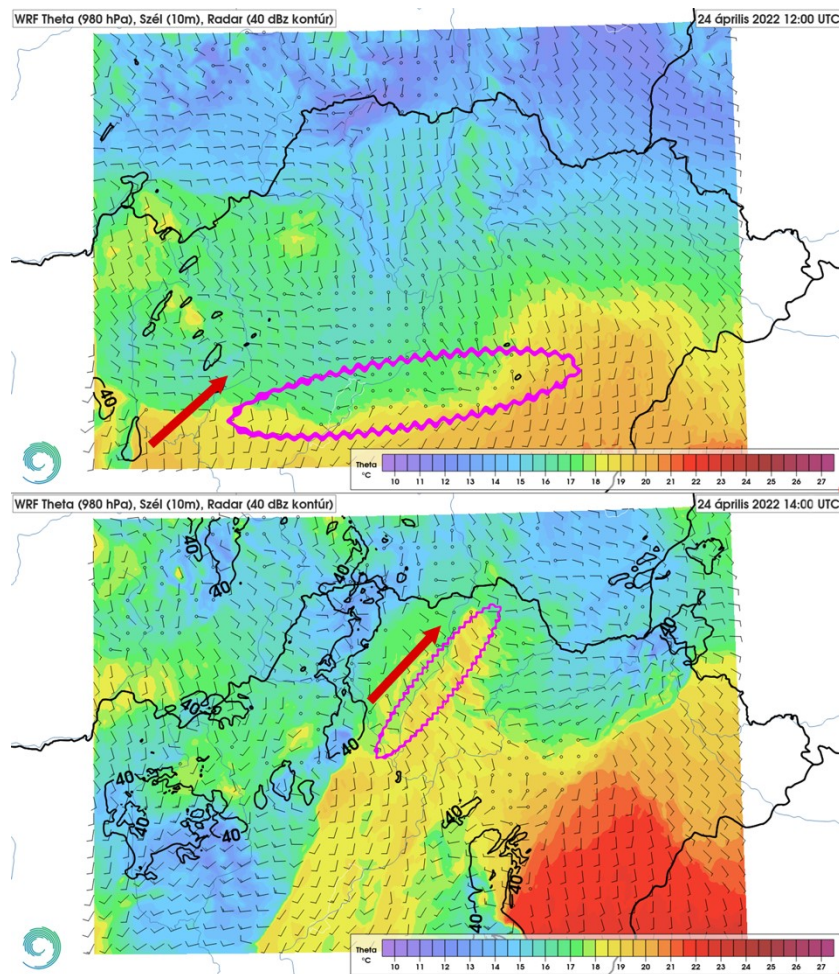
2. ábra: 2022. április 24-én, 12:00 UTC-kor egy zivatarcella (fekete kontúrvonal, 40 dBz radarjel) közelíti meg az északkeleti országrészben kialakult sekély baroklin zónát, amelyet a két méterre kiszámolt potenciális hőmérsékleti mező jelenít meg (színezés). A fehér izovonalak az izobárokat, míg a szélzászlók a 10 m-es szélviszonyokat mutatják.



3. ábra: Hirtelen megerősödő zivatarcella a maximális radar reflektivitás térképen (színezés), 2022. április 24-én, 13:00 UTC-kor. Továbbá, az A–B vonal által kijelölt radarmetszeten megjelenik a szupercellákra jellemző kampós radarminta.

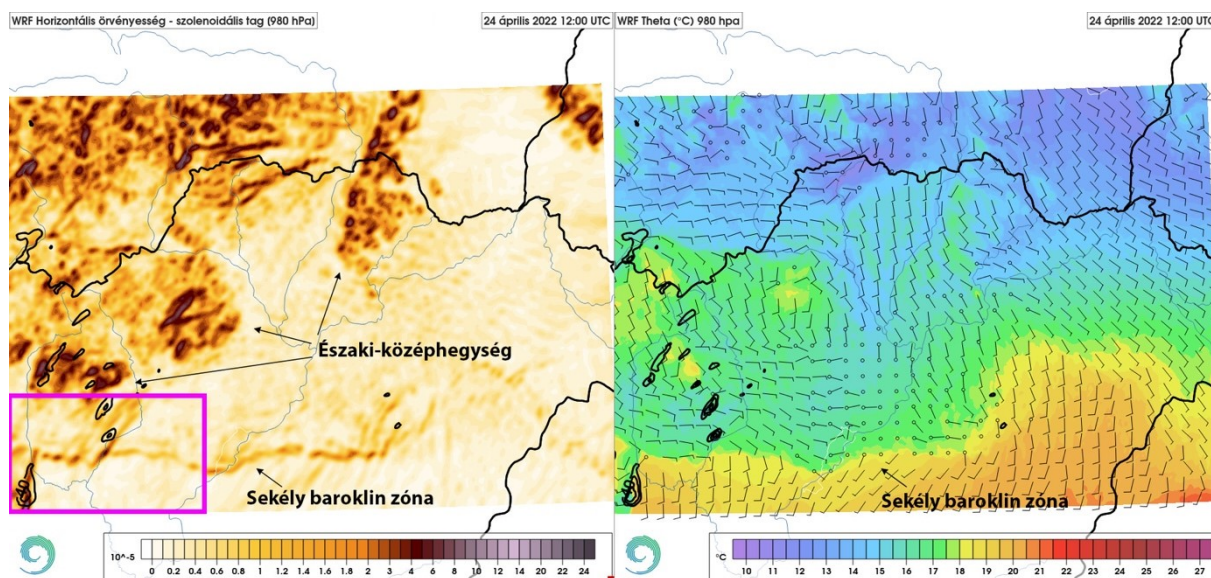
## Eredmények

A WRF modell megfelelően szimulálta a 2022. április 24-i mezoskálájú környezetet. A reggeli órákban átvonuló sztratiform jellegű csapadéktömb átvonulását követően létrejött egy éles légtömeghatár az északkeleti országrészben, ahogy az Alföld felől meleg, száraz levegő advektálódott dél felől. 12:00 UTC-kor a belső domain délnyugati sarkában egy zivatarcella tűnt fel, a termikus határ meleg oldalán (4. ábra, *fent*). A cella a nagyteréségi áramlás hatására északkeleti irányba helyeződött, s fokozatosan a sekély baroklin zóna meleg oldaláról a hűvösebb oldalára került (4. ábra, *lent*). A zónát keresztező zivatarcella mindeközben megerősödött, szupercellává fejlődött, s szignifikáns közeli jégesőt (4,5 cm maximális jégátmérő) és viharos (80 km/h körüli) széllelkést produkált.

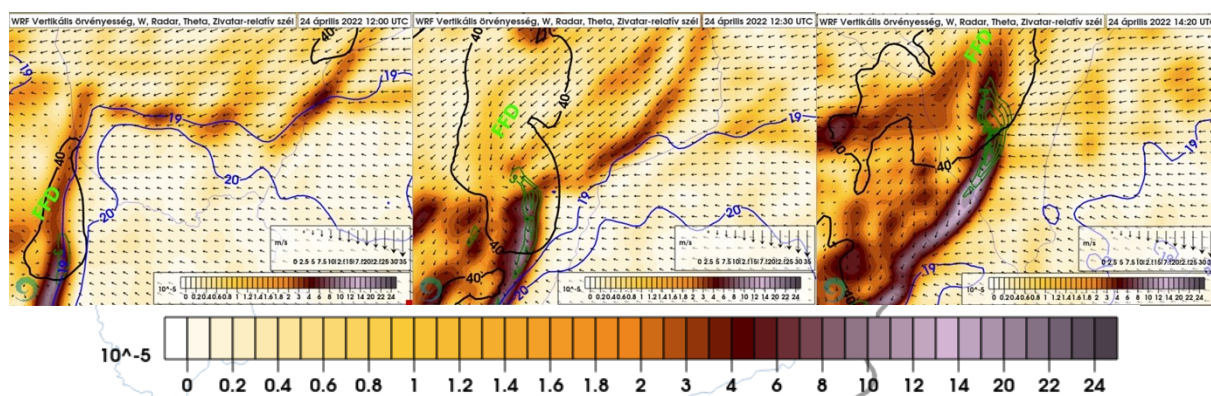


4. ábra: A szimulált szupercella közel párhuzamosan halad (piros nyilak) a potenciális hőmérsékleti mezőben (színezés) megjelenő gradiens zónával (rózsaszín hullámvonallal körülhatárolt terület) a WRF modellmezőben, 12:00 UTC-kor (fent) és 14:00 UTC-kor (lent). A fekete kontúrvonalak a 40 dBz-s radar reflektivitást, míg a szélzászlók a 10 m-es szélviszonyokat mutatják.

A szimulációt követő utófeldolgozás során kiszámítottuk a (3) egyenlet jobboldali tagjait, nevezetesen az örvénydőlés, illetve a szolenoidális hatás által generált horizontális tengelyű örvényességet. A szupercella a szolenoidális mező maximuma mentén (ami egybeesik a baroklin zónával) haladt végig, ami arra utal, hogy a baroklin zóna az említett tagon keresztül hatással volt a szupercella dinamikájára (5. ábra). Ennek eredményeképpen, a cella alacsony szintű feláramlása megerősödött (3 m/s-ról 10 m/s-ra), illetve horizontális kiterjedése is közel duplájára növekedett. A zivatarhoz viszonyított szélvektorok alapján a szolenoidális hatás generálta örvényesség a szupercella FFD (Forward Flank Downdraft – előoldali leáramlás) régióján keresztül szállítódott, amely a feláramlás által felállítódva tovább fokozhatta a mezociklon erősségét (6. ábra). A szimuláció során a sekély baroklin zóna mentén haladó szupercella volt a legnagyobb kiterjedésű és leghevesebb kísérőjelenségeket produkáló zivatarcella.



5. ábra: Szimulált sekély baroklin zóna a WRF modellben a horizontális örvényességi egyenlet szolenoidális tagjával (balra) és a potenciális hőmérséklettel (jobbra) ábrázolva 980 hPa-os nyomási szinten. A fekete kontúrvonalak a 40 dBz-s radar reflektivitást mutatják.



6. ábra: A szupercella megközelíti a sekély baroklin zónát (balra), fokozatosan, sekély szögben keresztezi (középen), majd a hideg oldalra kerül (jobbra) a WRF szimulációban, az 5. ábrán rózsaszín bekeretezett területen. A színezett terület a horizontális örvényességi mezőt, a fekete kontúrok a 40 dBz-s radar reflektivitást, a kék izovonalak a 19 és 20 °C fokos izentrópot, míg a zöld izovonalak az alacsony szintű feláramlást ábrázolják.

## Összefoglalás

A mérési adatokon és WRF szimuláción keresztül láthatóvá vált, hogy a korábbi kutatások eredményeihez hasonlóan (pl. Maddox et al., 1980; Markowski et al., 1998a,b; Magee & Davenport, 2020) a Kárpát-medencében is potenciálisan segítheti a szupercellák fejlődését, hevessé válását az eltérő hőmérsékletű térfelszínek között kialakuló baroklin örvényesség. Az USA-ban tapasztaltakhoz képest azonban jellemzően sokkal lokálisabb skálán jelentkezik a sekély baroklin zónák hatása hazánkban, miközben a domborzat is erősen befolyásolja elhelyezkedésüket, kialakulásukat. Mindezeket figyelembe véve, nehéz megállapítani, hogy a bemutatott eset során pontosan milyen mértékben játszott szerepet az orografikus hatás (felszín közeli szélfordulásból eredő horizontális szélnyírás, orografikus emelőhatás, stb.) a szupercella megerősödésében. Ennek következtében kutatásunk jövőbeli célja, hogy a WRF modell segítségével trajektória elemzést végezzünk el az alacsonyszintű mezciklonba jutó légelemekeken, megvizsgálva az általuk szállított örvényesség eredetét. Emellett, terveink között szerepel idealizált, domborzat nélküli környezetben is megvizsgálni a szupercellák és sekély baroklin zónák közötti interakciókat. További nyitott kérdés, hogy a sekély baroklin zónák segíthetik-e a zivatarok szupercellává fejlődését olyan helyzetekben is, amikor a makroszinoptikai környezet ezt alapvetően nem tenné lehetővé.

## Hivatkozások

- Atkins, N.T., Weisman, M.L., Wicker, L.J., 1999: The influence of preexisting boundaries on supercell evolution. *Monthly Weather Review*, 127(12): 2910–2927. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127%3C2910:TIOPBO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127%3C2910:TIOPBO%3E2.0.CO;2)
- Boustead, J., Mayes, B., Gagan, W., Leighton, J., Phillips, G., Schumacher, P., 2013: Discriminating environmental conditions for significant warm sector and boundary tornadoes in parts of the Great Plains. *Weather and Forecasting*, 28: 1498–1523. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-12-00102.1>
- Bunkers, J.S., Johnson, L.J., Czepeyha, J.M., Grzywacz, B.A., Klimowski, M.R., Hjelmfelt, 2006: An observational examination of long-lived supercells. Part II: environmental conditions and forecasting. *Weather and Forecasting*, 21: 689–714. <https://doi.org/10.1175/WAF952.1>
- Fierro, A.O., Gilmore, M.S., Mansell, E.R., Wicker, L.J., Straka, J.M., Fierro, A.O., Mansell, E.R., 2006: Electrification and Lightning in an Idealized Boundary-Crossing Supercell Simulation of 2 June 1995. *Monthly Weather Review*, 134(11): 3149–3172. <https://doi.org/10.1175/MWR3231.1>
- Gilmore, M.S., Wicker, L.J., 2002: Influences of the Local Environment on Supercell Cloud-to-Ground Lightning, Radar Characteristics, and Severe Weather on 2 June 1995. *Monthly Weather Review*, 130(10): 2349–2372. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130%3C2349:IOTLEO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130%3C2349:IOTLEO%3E2.0.CO;2)
- Gray, K., Frame, J., 2019: Investigating the transition from elevated multicellular convection to surface-based supercells during the tornado outbreak of 24 August 2016 using a WRF Model simulation. *Weather and Forecasting*, 34: 1051–1079. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0209.1>
- Klemp, J.B., 1987: Dynamics of Tornadoic Thunderstorms. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 19(1): 369–402. <http://doi.org/10.1146/annurev.fl.19.010187.002101>
- Komjáti, K., Csirmaz, K., Breuer, H., Kurcsics, M., Horváth, Á., 2023: Supercell interactions with surface baroclinic zones in the Carpathian Basin. *11th European Conference on Severe Storms*, Bucharest, Romania, 8–12. May 2023, ECSS2023-39, <https://doi.org/10.5194/ecss2023-39>

- Laflin, J.M., Houston, A.L., 2012: A modeling study of supercell development in the presence of a preexisting airmass boundary. *Electronic Journal of Severe Storms Meteorology*, 7(1): 1–29.
- Maddox, R.A., Hoxit, L.R., Chappell, C.F., 1980: A study of tornadic thunderstorm interactions with thermal boundaries. *Monthly Weather Review*, 108(3): 322–336. [https://dx.doi.org/doi:10.1175/1520-0493\(1980\)108%3C0322:ASOTTI%3E2.0.CO;2](https://dx.doi.org/doi:10.1175/1520-0493(1980)108%3C0322:ASOTTI%3E2.0.CO;2)
- Magee, K.M., Davenport, C.E., 2020: An observational analysis quantifying the distance of supercell-boundary interactions in the great plains. *Journal of Operational Meteorology*, 8(2): 15–38. <https://doi.org/10.15191/nwajom.2020.0802>.
- Markowski, P.M., Rasmussen, E.N., Straka, J.M., 1998a: The occurrence of tornadoes in supercells interacting with boundaries during VORTEX-95. *Weather and Forecasting*, 13: 852–859. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013%3C0852:TOOTIS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013%3C0852:TOOTIS%3E2.0.CO;2)
- Markowski, P.M., Rasmussen, E.N., Straka, J.M., Dowell, D.C., 1998b: Observations of low-level baroclinity generated by anvil shadows. *Monthly Weather Review*, 126(11): 2942–2958. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126%3C2942:OOLLBG%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126%3C2942:OOLLBG%3E2.0.CO;2)
- Púčik, T.P., Groenemeijer, P., Ryva, D., Kolar, M., 2015: Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorms in Central Europe. *Monthly Weather Review*, 143(12): 4805–4821. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0104.1>
- Rasmussen, E.N., Richardson, S., Straka, J.M., Markowski, P.M., Blanchard, D.O., 2000: The association of significant tornadoes with a baroclinic boundary on 2 June 1995. *Monthly Weather Review*, 128(1): 174–191. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128%3C0174:TAOSTW%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128%3C0174:TAOSTW%3E2.0.CO;2)
- Thompson, G., Field, P.R., Rasmussen, R.M., Hall, W.D., 2008: Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Monthly Weather Review*, 136(12): 5095–5115. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2387.1>

### Internetes hivatkozások

[1 – OMSZ] [https://www.met.hu/ismertetek/radar\\_ismerteto.pdf](https://www.met.hu/ismertetek/radar_ismerteto.pdf)

---

### ORCID

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

Horváth Á.  <https://orcid.org/0000-0002-5724-3869>