

MESTERSÉGES LÉGTÖMEGHATÁROK HATÁSA IDEALIZÁLT SZUPERCELLÁK VISELKEDÉSÉRE NAGYFELBONTÁSÚ CMI SZIMULÁCIÓKBAN

Komjáti Kornél ^(1,2) , Csirmaz Kálmán ⁽²⁾, Breuer Hajnalka ⁽¹⁾ 

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

⁽²⁾ HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt.,
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1.
e-mail: komjati.k@met.hu

Bevezetés

A szupercellák olyan zivatarok, amelyeknek tartós, mély forgó feláramlással (mezociklonnal) rendelkeznek, életútjuk meghaladja az egy órát (Davies-Jones, 2015). A szupercellák gyakran nagyméretű jégesőt, szélvihart, tornádót produkálnak (Blair et al., 2011, 2017; Púčik et al., 2015). Mind az Amerikai Egyesült Államokban, mind pedig Európában a viharkárok komoly terhet rónak a gazdaságra, gyakran sűrűn lakott területeket érintve (Taszarek et al., 2020; Feldmann et al., 2025), pontos előrejelzésük pedig komoly kihívások elé állítják a nemzeti meteorológiai szolgálatokat.

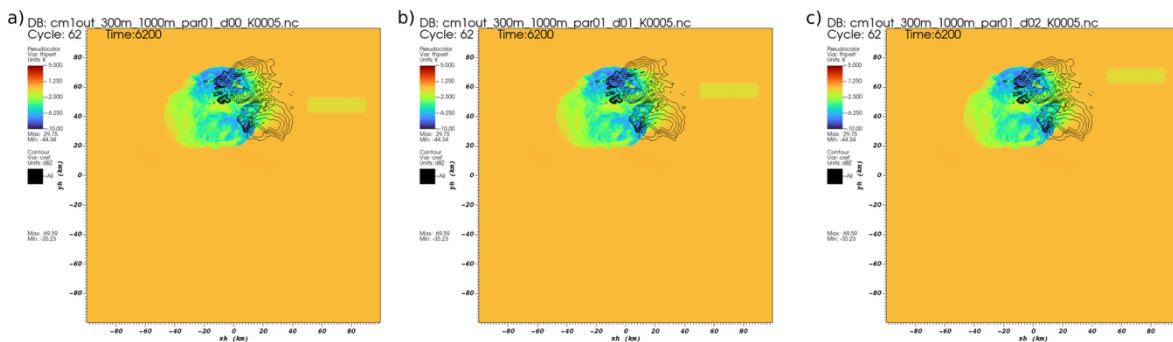
A szupercellák intenzitását alapvetően meghatározza a környezet, amelyben kialakulnak, fejlődnek (Flournoy et al., 2020; Nixon & Allen, 2022). Azonban a természetben gyakran előfordul, hogy a szupercellák nem individuálisan haladnak, hanem más zivatarokkal, vagy egyéb környezeti heterogenitásokkal kapcsolatba lépnek, amelyek segíthetik a szupercellák intenzívebbé válását (Nixon et al., 2024). Jelen tanulmányban azokat a környezeti heterogenitásokat vizsgáljuk, amikor a szupercella eltérő hőmérsékletű és légnedvességtartalmú határvonalak környezetében halad. Ezen határvonalak mentén nagy mennyiségű horizontális (szolenoidális) örvényesség állhat rendelkezésre, amelyek bekerülve a szupercellák feláramlásába, fokozhatják a mezociklon intenzitását (Maddox et al., 1980; Markowski et al., 1998; Boustead et al., 2013; stb). Jelen tanulmányban ezeket a határvonalakat egységesen sekély baroklin zónának (továbbiakban: SBZ) nevezzük. Numerikus szimulációk (Atkins et al., 1999; Laflin & Houston, 2012) és megfigyelések (Bunkers et al., 2006; Magee & Davenport, 2020) megerősítik, hogy a szupercellák számára az a legkedvezőbb, ha a cella lehetőleg minél kisebb szögben ($< 45^\circ$), fokozatosan tér át az SBZ meleg oldaláról a hűvösebb oldalra. Ez a konfiguráció lehetővé teszi a szupercella számára, hogy a gazdag, környezeti örvényesség forrás tartósan a feláramlási régió közelében maradjon és fokozódjon a tornádóhajlam (Skinner et al., 2014; Fischer & Dahl, 2023). Az SBZ azonban kártékony is lehet a tornádógenezis szempontjából, amennyiben a szupercella túl hamar, a hideg, stabil oldalra kerül (Doswell et al., 2002; Blanchard, 2008). Ugyan a tornádógenezis szempontjából kártékony lehet az SBZ hűvös oldala, azonban számos eset azt mutatja, hogy a szupercellák még ebben a régióban is heves kísérőjelenségeket produkálhatnak, főként nagyméretű jégeső formájában (Magee & Davenport, 2020; Nixon et al., 2024).

Jelen tanulmányban idealizált szimulációkat futtatunk a Bryan Cloud Model (CM1) segítségével, ahol a szupercellák előterébe mesterséges hideg légtömeget helyeztünk el, megvizsgálva, hogy mennyire érzékenyen reagál a cella a különböző távolságokba elhelyezett, eltérő vastagságú és intenzitású SBZ-kre.

Módszertan

A vizsgálathoz szükséges szimulációk elvégzéséhez a CM1 modellt használtuk (Bryan & Fritsch, 2002). A CM1 egy háromdimenziós, nemhidrosztatikus, idealizált modell, amelyet kifejezetten mélykonvekciós rendszerek, például szupercellák kontrollált környezetben történő vizsgálatára terveztek. A modell inicializálása meleg légbuborékokkal történt, a környezeti profilt pedig a Weisman–Klemp-féle analitikus felszállás szolgáltatatta (Weisman & Klemp, 1982). A modell domain mérete $666 \times 666 \times 20$ km volt, míg a horizontális rácsfelbontás egységesen 300 m. A szimulációk 60 vertikális szintet tartalmaztak, a legalsó modellszint magassága 50 m volt. A modellmezőbe vertikális nyújtást helyeztünk el, amelynek eredményeként az alsó 1500 m-es rétegben egységesen 100 m-es lett a vertikális felbontás, míg az 1500 és 5000 m közötti tartományban a rácsávolság logaritmikusan nőtt 500 m-re. Az 5000 m feletti rétegben a vertikális rácsköz már egységesen 500 m volt. Ez a felépítés lehetővé tette, hogy a légkör alsó 1500 m-es rétegét sokkal finomabb felbontással vizsgáljuk, a számítási igény jelentős megnövekedése nélkül. A szimuláció során kétmomentumos Morrison-mikrofizikai sémát alkalmaztunk (Morrison & Milbrandt, 2015). A szimuláció beállításai szerint a modell a graupel kategóriát jégszemként (hail) kezeli, így az elemzés során a két hidrometeortípus között nem teszünk különbséget, a két elnevezést szinonimaként használjuk. A szimulációk időtartama egységesen 12 000 s volt, 3,5 s-os időlépcsővel. Az eredményfájlok 100 s-onként kerültek kiírásra.

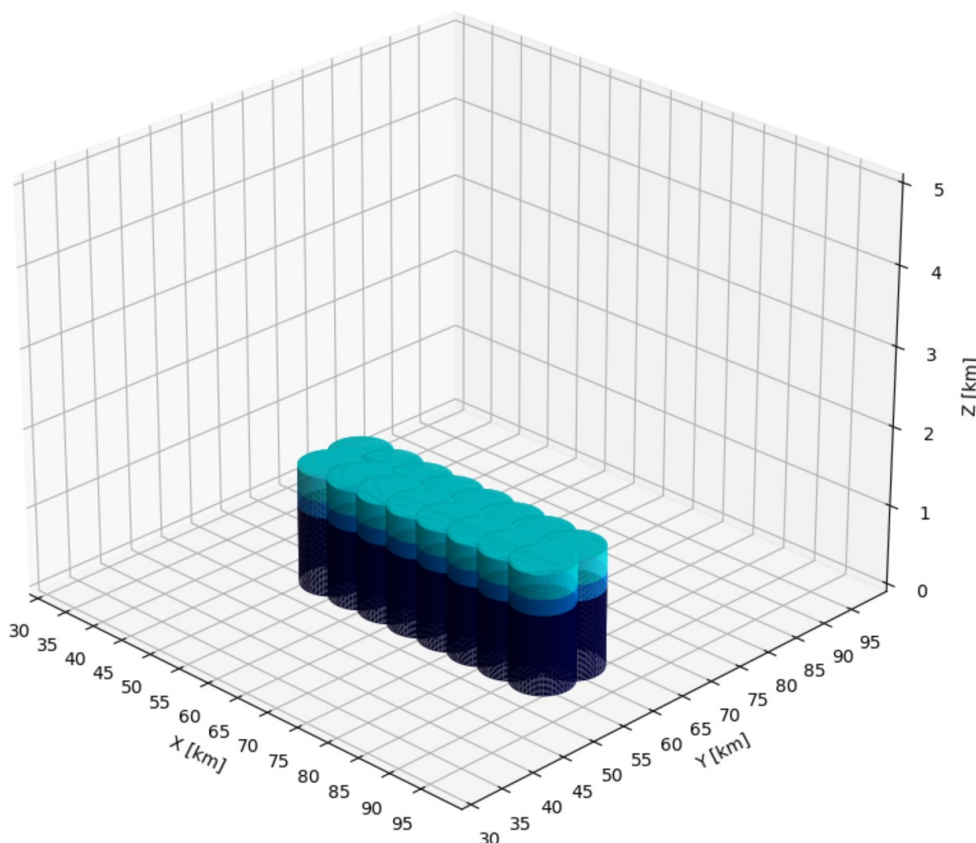
A modellmezőben összesen 16 db hőnyelőt helyeztünk el Fischer & Dahl (2020, 2023) munkáit alapul véve. A hőelvonás meghatározott, 4 km sugarú és eltérő vastagságú hengerekben történt. Az egyes hengerek középpontjában egységes, előre definiált intenzitással zajlott a hőelvonás, amely a középponttól a henger faláig exponenciálisan csökkent. A hőnyelők egységesen a szimulációk felezőpontjában, 6000 s-nál kapcsolódtak be, a jobbra haladó szupercella előterében, haladási irányával párhuzamosan. A hőnyelőkől kialakuló hideg légtömeg (SBZ) elhelyezkedését tekintve háromféle konfigurációt alkalmaztunk: 1.) a hideg légtömeg tengelye a jobbra haladó szupercella előoldali csapadékzónájának legészakabb pontjával legyen párhuzamos, 2.) az 1.) ponttól 10 km-rel északabbra, 3.) az 1.) ponttól 20 km-rel északabbra helyezkedjen el (*1. a–c ábra*).



1. ábra: A jobbra, illetve balra haladó szimulált szupercella (fekete dBz kontúr vonalak) és az SBZ egymáshoz viszonyított pozíciója 6200 s-kor: a) a jobbra haladó szupercella legészakabb pontjával párhuzamosan; b) ettől 10 km-rel északabbra; c) a) pozíciójától 20 km-rel északabbra. A színezett terület a potenciális hőmérséklet perturbációs mezőt jelöli.

A szimulált SBZ horizontális terjedését az határozta meg, hogy milyen vastagságban és milyen intenzitással történt a hőelvonás a modellmezőben. Az SBZ vastagságát a különböző szimulációkban 1000 m, 1200 m és 1500 m értékre állítottuk (2. ábra), míg a hőelvonás intenzitása rendre $0,0002 \text{ K s}^{-1}$, $0,0005 \text{ K s}^{-1}$, illetve $0,0007 \text{ K s}^{-1}$ volt. Az SBZ elhelyezkedésének, vertikális kiterjedésének és intenzitásának variálásával összesen $3 \times 3 \times 3 = 27$ különböző szimulációt készítettünk, amelyeket a kontroll taggal¹ vetettünk össze.

A vizsgálat célja annak feltárása volt, hogy az SBZ egyes jellemzői (elhelyezkedése, vastagsága és intenzitása) milyen hatást gyakorolnak a kifejlett szupercellára. Az egyes paraméterek külön-külön történő elemzése mellett azok együttes hatását is értékeltük. Ennek érdekében definiáltunk egy összesítő paramétert, a Boundary Indexet (továbbiakban: BI), amely az SBZ három fő tulajdonságát egyesíti. Feltételeztük, hogy a leggyengébb hatást az a konfiguráció fejtja ki, amelyben az SBZ a legtávolabb helyezkedik el, a legkisebb vertikális kiterjedéssel és a legalacsonyabb intenzitással rendelkezik. Ezzel szemben a legerősebb hatást a legközelebbi, legvastagabb és legintenzívebb SBZ váltja ki. Az egyes tulajdonságokat 0 és 1 közé normalizáltuk, majd lineáris súlyozás nélkül összegeztük őket. Ennek megfelelően a legkevésbé hatékony SBZ BI értéke 0, míg a legerőteljesebb konfigurációé 3 lett. Ez az index lehetőséget biztosított arra, hogy az SBZ tulajdonságainak kombinált hatását kvantitatívan értelmezzük.



2. ábra: A modellmezőben elhelyezett hőnyelők vertikális kiterjedése és pozíciója a különböző szimulációk során: 1000 m (sötétkék hengerek); 1200 m (azúrkék hengerek); 1500 m (világoskék hengerek).

¹ A kontroll szimuláció a Weisman-Klemp analitikai felszállás (Weisman & Klemp, 1982) által kialakított szupercellát tartalmazta, homogén környezetben.

A vizsgálat során elsősorban a szupercellák felszíni jégesőtermelésére, valamint a felszín közeli tornádó-szerű örvényesség (a továbbiakban: tornádó) erősségére összpontosítottunk. A jégesőtermelés jellemzéséhez meghatároztuk a jobbra haladó szupercella közvetlenül felszín feletti egységnyi térfogatú területére (a 45 dBz-es szimulált reflektivitási izovonal alapján kijelölt tartományra) integrált graupel összmennyiséget, kg m^{-3} egységben kifejezve. Ezt az integrált értéket a szupercella teljes vertikális térfogatára vonatkoztatva is kiszámítottuk. A tornádó intenzitását a 4. modellszinten (~300 m-rel a felszín felett) számított vertikális örvényesség maximumával jellemeztük, a jobbra haladó szupercella feláramlási régióján belül.

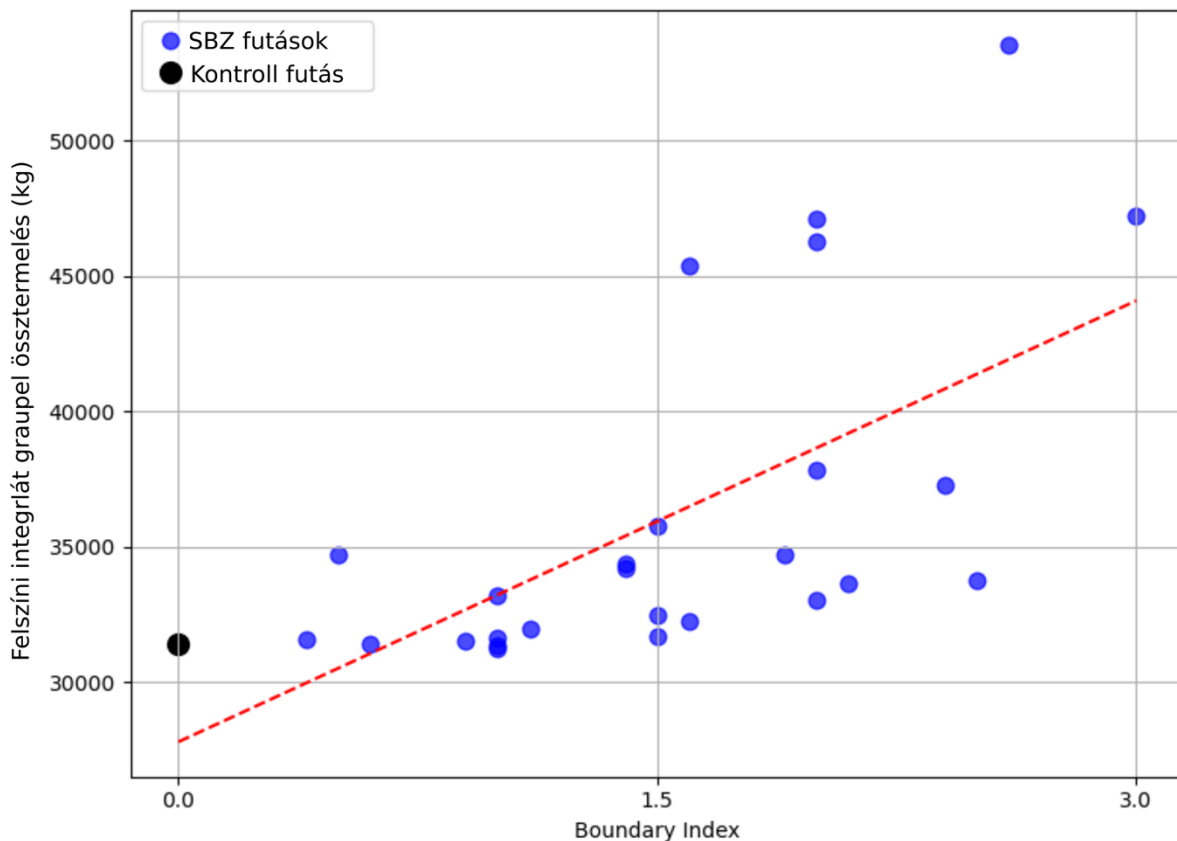
CM1 szimuláció eredmények

A szimulációk kiértékelését a jégesőre vonatkozó eredmények ismertetésével kezdjük. A kontroll szimulációban a maximális felszíni graupel mennyiség 31 411 kg volt, amely 8600 s-nál jelentkezett. A 27 tesztszimuláció közül mindössze négy esetben fordult elő, hogy a felszíni graupel összmennyisége alacsonyabb volt a kontroll értékénél. Ezek mindegyike a 20 km-re elhelyezett SBZ konfigurációkhoz tartozott, közülük a legalacsonyabb érték 31 224 kg volt. A legmagasabb értékeket rendre a 0 km-es távolságba elhelyezett SBZ szimulációk produkálták, a maximális érték 53 506 kg volt, amelyet a 0 km-re lévő, 1500 m vastagságú és $0,0005 \text{ K s}^{-1}$ hőelvonási intenzitással jellemzett futtatás mutatott, 11600 s-kor. Ez a graupel termelés 71,3%-kal haladta meg a kontroll futását. A 0 km-re elhelyezett esetekben jellemzően a $0,0005 \text{ K s}^{-1}$ és $0,0007 \text{ K s}^{-1}$ intenzitású szimulációk hozták a legnagyobb graupel mennyiségeket, amelyek mindegyike meghaladta a 40 000 kg-ot.

Ezeknél a futásoknál a felszíni potenciális hőmérséklet (θ) rendre alacsonyabb volt (289,1–290,7 K), mint a kontroll szimulációban (291,1 K), ami valószínűleg mérsékelte a felszínre jutó jég szemek olvadását. Az eredmények alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a felszíni jégtermelés szempontjából a közelebb elhelyezkedő és intenzívebb (azaz hűvösebb) SBZ-k hatékonyabbak voltak. Ezt BI is alátámasztja (3. ábra). A BI-re elvégzett korrelációs vizsgálat alapján (Spearman $r = 0,739$; $p = 0,00001$) statisztikailag szignifikáns összefüggés mutatkozott. A lineáris regressziós illesztés (Montgomery et al., 2012) egyértelműen pozitív meredekségű trendet mutat, azonban különösen a magasabb BI értékeknél jelentős szórás figyelhető meg, ami arra utal, hogy a graupel termelést további tényezők is befolyásolhatják.

Érdekes azonban megjegyezni, hogy bár a felszíni jégeső össz tömegben jelentős növekmény adódott a magas BI értékű szimulációk esetén, a jég szemek méretében szinte egyáltalán nem mutatkozott eltérés. A kontroll szimulációban a maximális jég szemátmérő 2,50 cm volt, míg a legnagyobb értéket produkáló szimulációban – amely a 0 km-es, 1500 m vastagságú, $0,0005 \text{ K s}^{-1}$ intenzitású SBZ-vel futott – ez csupán 0,04 cm-rel haladta meg a kontroll értékét.

A szimulált szupercellák teljes vertikumára is meghatároztuk a maximális graupel tömeget. A kontroll futás maximális értéke 16 421 888 kg volt. Ezzel a szimulációk rangsorában a 14. helyet foglalta el. Érdekes azonban, hogy a legnagyobb felszíni termelést produkáló szimuláció ebben a viszonylatban a kontroll tagnál gyengébben teljesített, a cella teljes vertikumára integrált jégeső össz tömeg 15 740 201 kg volt, ez 4,15%-kal kisebb, mint a kontroll futásé. A legnagyobb össz tömeget (18 201 254 kg) a 0 km-re elhelyezett, 1500 m vastagságú és $0,0002 \text{ K s}^{-1}$ intenzitású SBZ-t tartalmazó szimuláció produkálta. A BI értékeket vizsgálva statisztikailag nem található szignifikáns összefüggés (Spearman $r = -0,077$; $p = 0,70294$) az SBZ karakterisztikája és a cellák teljes vertikumára integrált graupel össz tömeg összefüggésében.



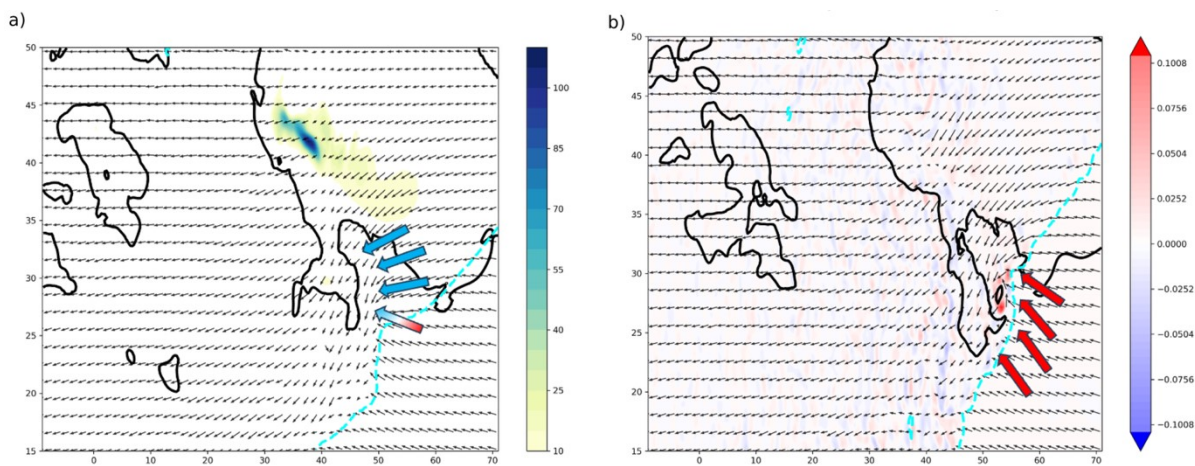
3. ábra: Szórásdiagram a felszíni integrált maximális graupel össztermelés (kg) a jobbra haladó szupercella területén és a BI függvényében. A fekete kör a kontroll futás, míg a kék körök az egyes SBZ-s futások értékeit mutatják. A piros vonal a lineáris trend.

A jégeső termelés mellett a szupercellák maximális örvényességét is megvizsgáltuk, kiemelten a felszín közeli légrétegben (~300 m, 4. modellszint), amellyel a cellák tornádópotenciáljáról kaptunk képet. A kontroll tag maximális örvényessége a 4. modellszinten $0,0705 \text{ s}^{-1}$ volt, amellyel a szimulációk rangsorában a 16. helyet foglalta el. Ez fontos eredmény, ugyanis ebből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az SBZ-t tartalmazó szimulációk több, mint felében a mesterséges hideg légtömeg gyengítette a tornádók intenzitását. Ezen szimulációk között nem fedezhető fel különösebb összefüggés, változatos távolságú, vastagságú és intenzitású SBZ-k is képesek voltak gyengíteni az örvényességi mezőt. Akadnak azonban szimulációk, amelyek különösen kedveztek a tornádók megerősödésének. A legdominánsabb örvényességi érték a 10 km távolságú, 1500 m vastagságú és $0,0007 \text{ K s}^{-1}$ intenzitású SBZ és szupercella interakciójából adódott. A maximális örvényesség ezen szimuláció esetében $0,103 \text{ s}^{-1}$ volt. Mindez 46,1%-os intenzitásnövekedést jelentett a kontroll futáshoz képest. A kontrollnál erősebb örvényességi értékek változatos karakterisztikájú SBZ-k mellett alakultak ki, a felszíni graupel termeléshez hasonló mintázat nem látszik. Mindebből arra következtetünk, hogy a tornádók intenzitásának alakulása sokkal érzékenyebb az egyes SBZ tulajdonságok megváltoztatására, szűk tartományon belül extrémén erős, de akár a kontrollnál gyengébb felszín-közeli örvények is kialakulhatnak.

A következőkben összehasonlítjuk a legintenzívebb felszíni jégesőtermelő és legintenzívebb tornádót produkáló szupercellákat. A két szimuláció közötti eltérés az SBZ tulajdonságait tekintve a következő: míg a legjelentősebb jégtermelő cella egy 0 km

távolságra elhelyezett, 1500 m vastagságú és $0,0005 \text{ K s}^{-1}$ intenzitású hideg légtömeggel lépett interakcióba, addig a legerősebb tornádót produkáló szimulációban egy 10 km távolságra található, 1500 m vastag és $0,0007 \text{ K s}^{-1}$ intenzitású SBZ volt elhelyezve. A legfőbb különbség tehát a távolság és az intenzitás között volt. A felszíni jégtermelés maximuma 11 600 s-kor, míg a legerősebb tornádó 11 800 s-kor jelentkezett az egyes szimulációkban.

A két szimuláció között a legfőbb különbség az SBZ és a szupercella egymáshoz viszonyított helyzetében rejlik (4. a, b ábra). A legnagyobb jégtermelést produkáló cella egyértelműen az SBZ hűvös, stabil oldalán helyezkedett el, a zivatarhoz viszonyított áramlási mező alapján a szupercella beáramlási régióját már jellemzően a hűvös légtömeg töltötte ki. A szupercella az SBZ-vel történő interakciója során fokozatosan elvesztette a kapcsolatot a felszíni vertikális örvényességgel, ahogyan az SBZ határvonala alávágta a feláramlási csatornát, a szupercella emelt konvekciós jelleget kezdett mutatni.



4. ábra: a) szimulált szupercellák (45 dBz reflektivitási érték fekete felszíni izovonalai) és az SBZ határvonala (-1 K perturbált potenciális hőmérséklet türkiz szaggatott izentrop vonal) egymáshoz viszonyított helyzete a legnagyobb felszíni jégtermelést (sárgából sötétkékbe hajló színezett terület) okozó cella esetén; illetve b) a legerősebb tornádó örvényességét (kékből pirosba hajló színezett terület) produkáló futás esetén. A kék nyilak a hűvös oldalról történő zivatarhoz viszonyított beáramlást jelölik (a), míg a piros nyilak a meleg oldalról történő zivatar-relatív áramlást (b).

A pirosból kékbe hajló színezett nyíl a meleg és hűvös légtömeg átmeneti zónájából történő beáramlást mutatja (a).

Ezzel szemben a legerősebb tornádót produkáló szimuláció esetén az SBZ szinte tökéletesen illeszkedett a szupercella leáramlási területeinek határvonalaival, amelynek köszönhetően a szupercella beáramlása még egyértelműen a felszíni, meleg, instabil oldalról történt. A cellán belüli leáramlási régiók örvényessége és az SBZ keltette környezeti örvényesség együttesen pedig többlet örvényességgel járulhatott hozzá a tornádó megerősödéséhez.

Összefoglalás

Jelen tanulmányban a CM1 modell segítségével idealizált szupercellákat vizsgáltunk, amelyek termikus határvonalakkal (sekély baroklin zóna – SBZ) léptek interakcióba. Összesen 28 szimuláció készült, melyek közül 1 a kontroll tag volt (nem tartalmazott mesterséges hideg légtömeget, a szupercella homogén mezőben terjedt), míg a többi 27 szimuláció eltérő karakterisztikájú SBZ-eket tartalmazott. A szupercellák minden szimulációban az SBZ-vel párhuzamosan haladtak. Jelen tanulmányban a cellák jégesőtermelését és tornádó potenciálját vizsgáltuk. A jégeső szempontjából egyértelmű, szignifikáns összefüggések adódtak a felszíni

graupel össztermelés, illetve az SBZ távolsága és intenzitása között (Spearman $r = 0,739$; $p = 0,00001$). Minél közelebbi, intenzívebb volt a hőelnyelés a modellmezőben, annál nagyobb össz tömegű jégeső termelést produkáltak a cellák. Ezen szimulációkban a szupercellák jellemzőn az SBZ határvonala mögött helyezkedtek el, beáramlási területük a hűvös, stabilabb légtömegből történt, s fokozatosan emelt konvekciós jelleget mutattak. Mindez összecseng megfigyelésekkel is, miszerint a jégesőtermelés szempontjából a szupercellák számára kedvezőbb lehet a termikus határvonalak hűvösebb oldala (Magee & Davenport, 2020; Nixon et al., 2024) és nem ritka, hogy az emelt konvekciós zivatarok esetén is fennállhat az intenzív jégesőtermelés (Nixon et al., 2023). Fontos azonban kiemelni, hogy a szimulációink során az SBZ-k látszólag nem fejtettek ki hatást a cella teljes vertikumára vett graupel össz tömeg termelésére, ahogyan a jégszemek maximális méretét sem befolyásolták.

A tornádókat illetően – ellentétben a jégesőtermeléssel – nem találtunk statisztikailag szignifikáns összefüggéseket az egyes SBZ karakterisztikák és a maximális örvényesség értékek között. A legerősebb tornádót produkáló szimulációban azonban jól megfigyelhető volt, hogy a szupercella SBZ határvonala a szupercella leáramlási területeinek határvonalai közvetlen közelében helyezkedett el, amely egyfelől további tartós örvényességforrást biztosított a feláramlás számára, másfelől pedig lehetővé tette, hogy a beáramlási régió az előoldali, meleg, instabil légrétegben maradjon.

A megfigyelések alapján a tornádók sokkal érzékenyebbek a környezeti változékonyságra és csak 7 esetben tapasztaltunk a kontroll tag örvényességénél jelentősebb ($> 10\%$), pozitív eltérést. Mindez nem meglepetés, hiszen jól ismert, hogy a tornádók dinamikája rendkívül összetett és cellán kívüli és belüli folyamatok egységes, megfelelő egyensúlya szükséges kialakulásukhoz (pl. Fischer et al., 2024). A vizsgálatunk során tapasztalt megfigyelések alátámasztásához azonban további, mélyebb elemzésre van szükség. Mindazonáltal, a kutatás kezdeti eredményei összhangban állnak a nemzetközi szakirodalomban leírtakkal, így megfelelő kiindulási alapot nyújtanak a jövőbeli vizsgálatokhoz.

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)
- Blair, S. F., Deroche, D. R., Boustead, J. M., Leighton, J. W., Barjenbruch, B. L., Gargan, W. P., 2011: A radar-based assessment of the detectability of giant hail. *Electronic Journal of Severe Storms Meteorology*, 6 (7). <https://doi.org/10.55599/ejssm.v6i7.34>
- Blair, S. F., Laflin, J. M., Cavanaugh, D. E., Sanders, K. J., Currens, S. R., Pullin, J. I., ... & Mallinson, H. M., 2017: High-resolution Hail Observations: Implications for NWS Warning Operations. *Weather and Forecasting*, 32(3): 1101–1119.
<https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0203.1>
- Blanchard, D. O., 2008: Interactions Between a Supercell and a Quasi-Stationary Frontal Boundary. *Monthly Weather Review*, 136(12): 5199–5210.
<https://doi.org/10.1175/2008MWR2437.1>
- 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(6): 1498–1523.
<https://doi.org/10.1175/WAF-D-12-00102.1>
- Bryan, G. H., Fritsch, J. M., 2002: A Benchmark Simulation for Moist Nonhydrostatic Numerical Models. *Monthly Weather Review*, 130(12): 2917–2928.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<2917:ABSFMN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<2917:ABSFMN>2.0.CO;2)

- Bunkers, M. J., Johnson, J. S., Czepyha, L. J., Grzywacz, J. M., Klimowski, B. A., Hjelmfelt, M. R., 2006: An Observational Examination of Long-Lived Supercells. Part II: Environmental Conditions and Forecasting. *Weather and Forecasting*, 21(5): 689–714. <https://doi.org/10.1175/WAF952.1>
- Davies-Jones, R., 2015: A review of supercell and tornado dynamics. *Atmospheric Research*, 158–159: 274–291. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.04.007>
- Doswell, C. A., Baker, D. V., Liles, C. A., 2002: Recognition of Negative Mesoscale Factors for Severe-Weather Potential: A Case Study. *Weather and Forecasting*, 17(5): 937–954. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2002\)017<0937:RONMFF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2002)017<0937:RONMFF>2.0.CO;2)
- Feldmann, M., Blanc, M., Brennan, K. P., Thurnherr, I., Velasquez, P., Martius, O., Schar, C., 2025: European supercell thunderstorms—an underestimated current threat and an increasing future hazard. *arXiv preprint*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.07466>
- Fischer, J., Dahl, J. M. L., 2020: The Relative Importance of Updraft and Cold Pool Characteristics in Supercell Tornadogenesis Using Highly Idealized Simulations. *Journal of Atmospheric Sciences*, 77(12): 4089–4107. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0126.1>
- Fischer, J., Dahl, J. M. L., 2023: Supercell-External Storms and Boundaries Acting as Catalysts for Tornadogenesis. *Monthly Weather Review*, 151(1): 23–38. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0026.1>
- Fischer, J., Dahl, J. M., Coffey, B. E., Houser, J. L., Markowski, P. M., Parker, M. D., ... & Schueth, A., 2024: Supercell Tornadogenesis: Recent Progress in Our State of Understanding *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(7): E1084–E1097. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0031.1>
- Flournoy, M. D., Coniglio, M. C., Rasmussen, E. N., Furtado, J. C., Coffey, B. E., 2020: Modes of Storm-Scale Variability and Tornado Potential in VORTEX2 Near- and Far-Field Tornadoic Environments. *Monthly Weather Review*, 148(10): 4185–4207. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0147.1>
- 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, 1–29. <https://doi.org/10.55599/ejssm.v7i1.37>
- Maddox, R. A., Hoxit, L. R., Chappell, C. F., 1980: A Study of Tornadoic 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., 1998: The Occurrence of Tornadoes in Supercells Interacting with Boundaries during VORTEX-95. *Weather and Forecasting*, 13(3): 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)
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., Vining, G. G., 2012: Introduction to Linear Regression Analysis (5th ed.). John Wiley & Sons, Hoboken, pp. 12–67.
- Morrison, H., Milbrandt, J., 2015: Parameterization of Cloud Microphysics Based on the Prediction of Bulk Ice Particle Properties. Part I: Scheme Description and Idealized Tests. *Journal of Atmospheric Sciences*, 72(1): 287–311. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0065.1>
- Nixon, C. J., Allen, J. T., 2022: Distinguishing Between Hodographs of Severe Hail and Tornadoes. *Weather and Forecasting*, 37(10): 1761–1782. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-21-0136.1>

- Nixon, C. J., Allen, J. T., Taszarek, M., 2023: Hodographs and Skew Ts of Hail-Producing Storms. *Weather and Forecasting*, 38(11): 2217–2236. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-23-0031.1>
- Nixon, C. J., Allen, J. T., Wilson, M. B., Bunkers, M. J., Taszarek, M., 2024: Cell Mergers, Boundary Interactions, and Convective Systems in Cases of Significant Tornadoes and Hail. *Weather and Forecasting*, 39(10): 1435–1458. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-23-0117.1>
- 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>
- Skinner, P. S., Weiss, C. C., French, M. M., Bluestein, H. B., Markowski, P. M., Richardson, Y. P., 2014: VORTEX2 Observations of a Low-Level Mesocyclone with Multiple Internal Rear-Flank Downdraft Momentum Surges in the 18 May 2010 Dumas, Texas, Supercell. *Monthly Weather Review*, 142(8): 2935–2960. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-13-00240.1>
- Taszarek, M., Allen, J. T., Púčik, T., Hoogewind, K. A., Brooks, H. E., 2020: Severe Convective Storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 Environments Associated with Lightning, Large Hail, Severe Wind, and Tornadoes. *Journal of Climate*, 33(23): 10263–10286. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0345.1>
- Weisman, M. L., Klemp, J. B., 1982: The Dependence of Numerically Simulated Convective Storms on Vertical Wind Shear and Buoyancy. *Monthly Weather Review*, 110(6): 504–520. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110<0504:TDONSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0504:TDONSC>2.0.CO;2)
-

ORCID

Komjáti K.  <https://orcid.org/0009-0005-8022-8682>
Breuer H.  <https://orcid.org/0000-0002-0271-095X>