

# Szupercellák modellezése

SZAKDOLGOZAT  
FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK  
METEOROLÓGUS SZAKIRÁNY



Készítette:

**Páll Márton Tamás**

Témavezető:

**Dr. Breuer Hajnalka**

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2019

## Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés.....</b>	<b>3</b>
<b>2. A légköri konvekció .....</b>	<b>4</b>
2.1. Zivartípusok.....	5
<b>3. Szupercellák .....</b>	<b>7</b>
3.1. Szupercellák szerkezete.....	7
3.2. A középszintű örvényesség eredete .....	9
3.3. Helikalitás .....	11
3.4. Szupercellák fejlődése .....	12
3.5. Előrejelezhetőség a konvektív paraméterek alapján.....	14
3.6. Szupercellák kísérőjelenségei.....	16
<b>4. Szupercellák modellezése.....</b>	<b>18</b>
4.1. Időjárási modellek.....	18
4.2 Esettanulmányok.....	19
<b>5. Összefoglalás .....</b>	<b>35</b>
<b>6. Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>36</b>
<b>7. Irodalomjegyzék .....</b>	<b>37</b>

## 1. Bevezetés

A szupercellás zivatarok működésének megértése érdekében rengeteg módon modellezik őket. Működésük megértése azért fontos, mert ezek a természeti jelenségek évről-évre hatalmas károkat okozhatnak mind emberéletben, mind értéktárgyakban. A leginkább szupercellák által sújtott terület az USA középső része, ahol 1999. május 5-én egy szupercella 2 milliárd dolláros kárt okozott (Calianese et al. 2002), de Magyarországon is jelentős károkat okoznak, gondoljunk csak 2006. augusztus 20-ra, amikor egy zivatarlánc érte el a főváros területét, melyben beágyazva egy nagy csapadékú szupercella is megtalálható volt, és a vihar 5 ember életét követelte (Horváth et al. 2007).

Az ilyen heves zivatarok több veszélyforrást is rejtnek magukban, mint például a heves légzuhatok, a pusztító jégesők, a hirtelen óriási mennyiségű csapadék miatt kialakuló villámárvizek és a Földön mérhető legerősebb szeleket okozó tornádók. A globális felmelegedésnek „hála” a zivatarok, ezáltal a szupercellák hevesége is folyamatosan növekszik (Allen 2017).

Jelen korunk technikai fejlettsége megengedi azt, hogy ne csak nagyskalájú folyamatokat, hanem kisebb, akár néhány kilométer nagyságú folyamatokat modellezzünk és elemezzünk, így a szupercellás zivatarokat is.

Szakedolgozatom célja, hogy a szupercellás zivatarok működését, szerkezetét, kísérőjelenségeit ismertesse, majd az ezen zivatarokról alkotott modellek sokszínűségét és a modellek közötti hasonlóságokat, vagy adott esetben éppen a közöttük lévő különbségeket bemutassa. Mivel rendkívül sokféleképpen vizsgálják ezeket a zivatarokat, ezért esettanulmányokon keresztül mutatom be modellezésüket.

## 2. A légköri konvekció

Az időjárás egyik meghatározó folyamata a légköri konvekció. A konvekció két fő típusra osztható, sekély- illetve mélykonvekcióra.

Sekély konvekcióról abban az esetben beszélhetünk, ha a felszínről meginduló termikek elérik a planetáris határréteget, cumulus humilisek alakulnak ki, azonban a termikek energiája nem elég ahhoz, hogy cumulus congestusok, vagy cumulonimbusok alakuljanak ki, amelyek csapadékot is adnak. Tipikus sekély konvekciós időjárási helyzet az, amikor egy anticiklon területén gomolyfelhők jönnek létre, de azok az anticiklonban uralkodó erős leáramlások hatására nem tudnak tovább fejlődni cumulus humiliseknél.

Mély konvekcióról pedig akkor beszélünk, ha a feláramlás annyira intenzív, hogy akár cumulonimbusok is létrejöhetnek. A mély konvekciós folyamatokhoz tartozik természetesen a szupercellák létrejötte is (Newton; Katz 1958).

A konvekciónak három fő komponensét lehet megkülönböztetni (Horváth 2007). Az első komponens a légköri felhajtóerő. A felhajtóerő legegyszerűbb formája, amikor a Nap besugárzásának hatására termikek indulnak meg a felszínről, amelyek a labilitás és egyéb kedvező feltételek mellett zivatarfelhőkké alakulhatnak. Fontos megjegyezni, ha nincs elég labilitás, akkor is kialakulhat zivatarfelhő, de ebben az esetben más dinamikai hatás kell, hogy kiváltsa a légréteg emelését. A második komponens a konvergencia. A konvergencia hatására a felszíni összeáramlás az anyagmegmaradás törvényének eleget téve feláramlást hoz létre, amely zivatarfelhőt generálhat. Konvergenciavonal mentén a zivatarokfelhőkhöz kapcsolódóan kialakulhatnak úgynevezett nem-mezociklonális tornádók is, de ehhez a vonalnak hosszú időn keresztül szinte mozdulatlanul kell lennie. A harmadik konvektív komponens a szélnyírás. A szélnyírásnak meghatározó szerepe van a multicellás, illetve szupercellás zivatarok létrejöttében és élettartamában, de hatással van a mezoléptékű konvektív rendszerek és a zivatarláncok életében is.

Ha mindhárom komponens fennáll és egyensúlyban vannak, (például a szélnyírás nem túlságosan erős a feláramláshoz képest) akkor jöhetnek létre a szupercellás zivatarok, amelyeknek hosszú, akár több órás élettartamuk is lehet, forgó feláramlással (mezociklonnal) rendelkeznek (Dowell; Burgess 1993). A szupercellák előrejelezhetőség szempontjából különösen kiemelt figyelmet érdemelnek, hiszen ezen zivatarokhoz köthető a szignifikáns heves események nagy része, mint például a nagyméretű jégszemeket tartalmazó jégesők, és ritka esetben a mezociklonális tornádók is. Fontos megemlíteni, hogy különböző határértékek is tartoznak az adott komponensekhez. Ha a szélnyírás értéke 0 és 6 kilométer között nem éri

el a 15 m/s-ot, akkor csekély valószínűséggel alakulhat ki szupercellás zivatar. A labilitásnak nem kell feltétlenül nagyon magas értékűnek lennie, általában elég, ha 1000 J/kg-ot meghaladó mértékű rendelkezésre álló potenciális energia, viszont, ha a labilitás nagyon magas, akkor a szélnyírásnak még a 15 m/s-ot sem kell elérnie ahhoz, hogy szupercella jöjjön létre.

Természetesen a három fő komponens fennállása még egyáltalán nem elegendő nemhogy szupercella kialakulásához, de a felhőképződéshez sem. A nedvesség hiánya miatt a termikek nem tudnak felhővé alakulni, nincs, ami kicsapódjon bennük. Ha megfelelőek a nedvességi viszonyok, vagyis a troposzféra alsó szintjeiben (kb. 500 hPa-ig) kellően nagy mennyiségű nedvesség van jelen, akkor a feláramlással nem csak láthatatlan termikek kezdenek el kialakulni, hanem beindul a kondenzáció, így a felhőképződés is (Horváth 2007).

## 2.1. Zivatartípusok

Zivatarról akkor beszélünk, ha egy felhőben elektromos tevékenység nyilvánul meg, melyhez dörgés társul. A zivataroknak három fajtáját különböztetjük meg.

Az első fajta az úgynevezett monocellás, azaz egycellás zivatar. Ennek a zivatartípusnak általában rövid az élettartama, maximum 1 órán keresztül képes fennmaradni. Létrejöttében többnyire a Nap besugárzása által keltett sűrűségkülönbség hatására elmozduló termikek játszanak szerepet. Az egycellás zivatarok olyan időjárási helyzetben jöhetnek létre, amikor a szélnyírás mértéke nem éri el a 10 m/s-ot a 0 és a 6 kilométeres szint között (Markowski; Richardson 2011). Ennek a zivatarnak a kifutószele nem elég nagy ahhoz, hogy újabb cellák keletkezését tudja beindítani. Tipikus egycellás időjárási helyzet, mikor a nyári hónapok folyamán egy anticiklon peremén megindulnak a termikek, majd, mivel más dinamikai hatás nem éri őket, egycellás zivatarok keletkeznek belőlük.

A második fajta zivatartípus a multicellás zivatar. Ezek a zivatarok akár több órán keresztül is képesek fennmaradni és ha megfelelőek az időjárási viszonyok, akkor akár villámárvíz is létre tudnak hozni. Létrejöttéhez már szükséges a szélnyírás dinamikai hatása is, az értéke multicellás zivatarok esetén meghaladja a 10 m/s-ot de nem éri el a 15–20 m/s-ot a 0 és a 6 kilométeres réteg között. Valószínűleg ez a legelterjedtebb zivatartípus a középső szélességek területén, mivel ritkán adódik olyan helyzet, mikor a szélnyírás mértéke csekély, ugyanakkor még ritkább az a helyzet, mikor a szélnyírás meghaladja a szupercellák kialakulásához szükséges értéket. A multicellás zivatarok életében fontos szerepet játszik az, hogy a kifutószél olyan erejű, hogy az a szabad konvekciós szint fölé tudja emelni a termikeket, ezáltal újabb zivatarokat hozva létre (Rotunno et al. 1988). A multicellás zivatarokra az

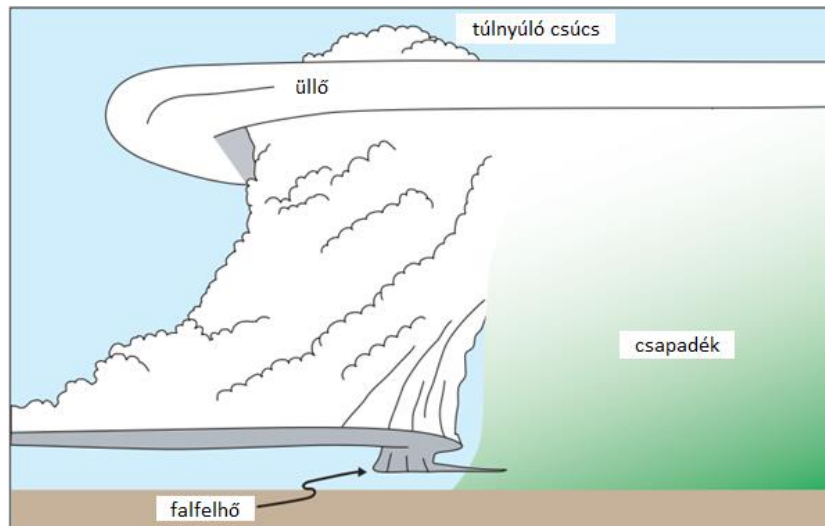
jellemző, hogy az új cellák mindig a cellának a szélnyírásvektor állásával megegyező irányban alakulnak ki, illetve, hogy a multicellás zivatar ugyanebbe az irányba fejlődik (Horváth 2007).

A harmadik, és egyben legpusztítóbb zivatartípus a szupercellás zivatar, amelyről a szakdolgozatom is szól. A szupercellák kialakulásához a megfelelő mértékű labilitáson túl szükség van a szélnyírás megfelelő nagyságára is, amely a 15–20 m/s-os küszöbértéket jelenti a 0 és a 6 kilométeres magasság között. A szupercellákra jellemző, hogy akár extrém hosszú időn keresztül is képesek fennmaradni, átlagos élettartamuk 1–2 óra, de megfigyeltek már 11 órán át fennmaradó szupercellát is [1-met.hu].

### 3. Szupercellák

#### 3.1. Szupercellák szerkezete

A szupercellás zivatarokra jellemző az egy csatornából álló, csavarodó megjelenésű feláramlási torony, amelyben a feláramlási sebesség akár az 50 m/s-os értéket is elérheti. Az 1. ábra bal oldalán látható a gomolyfelhőkből álló ún. szárnyfelhő-torony. Ez a zivatar hátsó oldalán, a leáramlás és a beáramlás zónájának a peremén alakulhat ki. A falfelhő, amely a zivatar alsó részén jelenik meg, kijelöli a feláramlás legalsó részét. A falfelhőnél látható kis csóva, amely a csapadékszónába nyúl át, nedves levegőt szippant fel a csapadékszónából és ez a nedves levegő pluszban biztosítja a feláramlás nedvesség-utánpótlását.



1. ábra: A klasszikus szupercella illusztrációja (Markowski; Richardson 2011)

A feláramlás a radarképeken egy úgynevezett körülhatárolt gyenge reflektivitású betüremkedésként jelenik meg. Ez a régió azért jelenhet meg, mert a fő feláramlási csatornában olyan erős vertikális szél uralkodik, amely nem engedi, hogy akármilyen hidrometeor lefele essen.

A túlnyúló csúcs jelenléte annak tudható be, hogy a zivatarban a feláramlás annyira erős, hogy magasabbra tud emelkedni a kiegyenlítődési szintnél, ahol az üllő található, majd át tudja törni a tropopauzát, ezáltal a sztratoszféra alsó szintjéig tud hatolni.

A szupercelláknak három fő fajtájuk van: a klasszikus (CL, **C**lassic), a kis csapadékú (LP, **L**ow **P**recipitation), illetve a nagy csapadékú (HP, **H**igh **P**recipitation) (Moller 1990). Azt, hogy milyen fajta szupercella tud kialakulni, nagyban befolyásolják a nedvességi viszonyok, illetve a nagy magasságokban fújó szelek, legalábbis az izolált cellák esetében. Ha a nagy

magasságban fújó szelek gyengék (körülbelül 18 m/s alattiak), akkor a hidrometeorok nem tudnak messzire jutni a feláramlástól, így annak környezetében hullnak le. Ezt nevezzük HP, azaz nagy csapadékú szupercellának. Ha a magasban fújó szél meghaladja a 28 m/s-ot, akkor a hidrometeorok messzire el tudnak jutni a feláramlástól, így látványos szerkezetű, kis csapadékú, LP szupercellák jöhetnek létre. Ha a szél sebessége a két érték közé esik, akkor jön létre a CL, azaz klasszikus szupercella (Markowski; Richardson 2011).

A szupercellás zivatarokhoz két fő leáramlási régió tartozik. Az egyik leáramlási rész az RFD (*Rear Flank Downdraft*), azaz a hátoldali leáramlás. Az FFD (*Forward Flank Downdraft*) előbb alakul ki, mint az RFD, amit a 2. ábra is jól mutat (Bluestein 2013). Az áramlás 4 kilométeren a középszinti áramlást hivatott jelölni, míg a 9 kilométeres áramlás a jet helyzetét jelöli.

A konceptuális modell egyik része, amit nagy valószínűséggel nem szabad szó szerint venni, az a nagy magasságokból teljesen a felszínre történő leáramlás. Ezt azért nem szabad teljesen szó szerint vennünk, mert még nem teljesen tisztázott ez a folyamat.

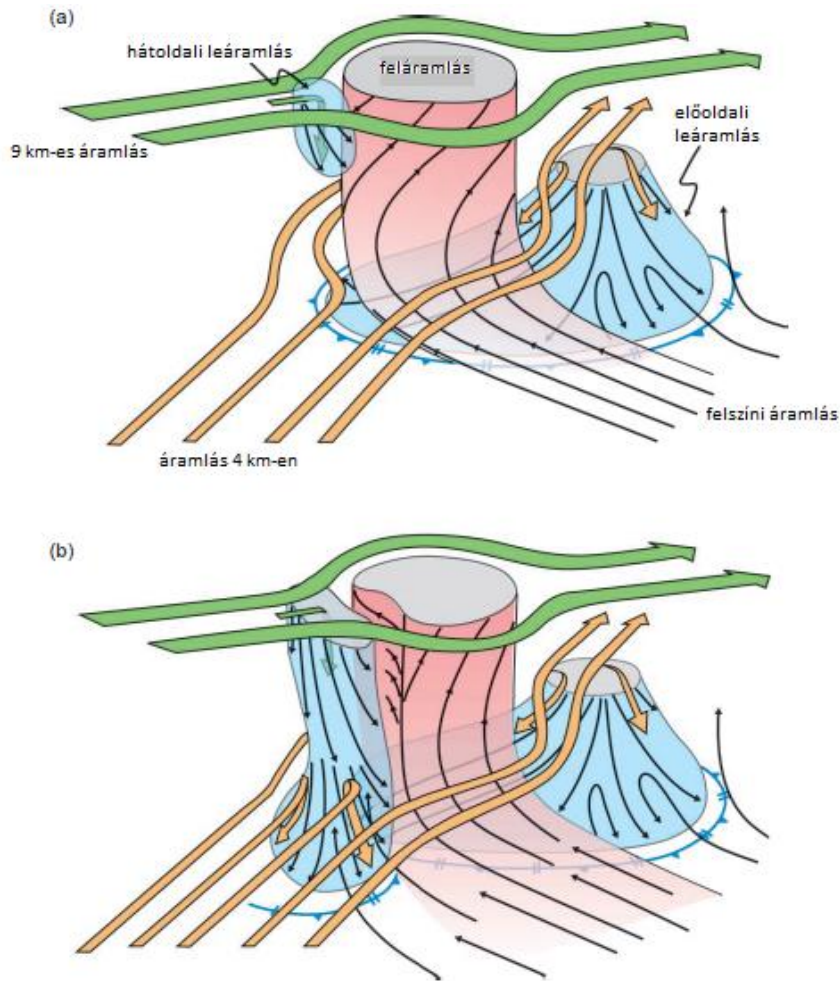
Az RFD kialakulásának két különböző elmélete van. Az egyik a termodinamikai, amely szerint a középső és magas szinteken a zivatarok, pontosabban a feláramlásba keveredő száraz szél hatására elpárolognak a feláramlásban lévő hidrometeorok. Ennek hatására hőfelszabadulás történik, amely a feláramlásnak csapódó levegőre egy negatív gyorsulást fejt ki, ezért ez elindul a földfelszín irányába.

Az RFD hőmérséklet deficitje egyik szupercellától a másikig változik, a 0 K-tól egészen 10 K-ig terjedhet, de megfigyeltek már 20 K deficitet is (Markowski 2002). Ez a különbség erősen függ a hidrometeorok számától, illetve a környezet relatív nedvességétől is. Ugyanakkor a magasabb értékeket önmagában a termodinamika nem magyarázza.

A másikkfajta elmélet szerint a zivatar szélnyírás vektorral szembeni oldalán, azaz a zivatar hátsó oldalán létrejön egy lefelé irányuló nyomási gradiens erő, amely szintúgy szerepet játszhat az RFD kialakulásában. Még nem tisztázott, hogy ez a két folyamat hogyan tart egyensúlyt egymással.

Az FFD kialakulása annak tudható be, hogy a zivatar magas szintjein az erős szelek a hidrometeorok nagy részét a feláramlás elé szállítják. A jég olvadása, majd az ezt követő szublimációja, illetve az esővíz evaporációja révén negatív felhatóerő jön létre ezáltal egy leáramló légtest alakul ki a szupercella ezen részében. Ezt nevezzük az FFD-nek. Az FFD hőmérséklet deficitje az RFD-hez hasonlóan zivatarról zivatarra változik és elérheti a 10 K-t is.

Az RFD és az FFD a felszínen kialakít egy olyan gust frontot, amely kinematikailag nagyon hasonló egy mérsékelt-övi ciklon struktúrájához.



2. ábra: Szupercellás zivatar fel- és leáramlásainak 3D-s sematikus ábrája. Az a) ábra a kezdeti fázisban lévő, míg a b) ábra a fejlett fázisban lévő szupercella áramlási rendszerét mutatja. (Markowski; Richardson 2011)

### 3.2. A középszintű örvényesség eredete

A szupercella keletkezésének és fennmaradásának érdekében meg kell vizsgálnunk, hogy bennük miképp jön létre a hosszú életüket biztosító forgó feláramlás.

A középszintű örvényesség eredete mára már egy jól megértett dolog és a szupercellák dinamikája ennek segítségével írható le. Megvizsgálva a középszintű örvényesség fejlődését, tekintsük először a vertikális örvényesség egyenletét:

$$\frac{d\zeta}{dt} = -\mathbf{v} \cdot \nabla \zeta + \boldsymbol{\zeta} \cdot \nabla \mathbf{w} \quad (1)$$

ahol  $\zeta$  az örvényesség (a rotáció vertikális komponense),  $\mathbf{v}$  a sebesség,  $\boldsymbol{\zeta} = (\xi, \eta, \zeta)$  pedig a 3 dimenziós relatív örvényességi vektor. Ebben az egyenletben elhanyagoltuk a Coriolis-erőt, mert a kis skála miatt nincs nagy befolyásoló szerepe, illetve a vertikális örvényesség által generált baroklinitást.

Ezt követően linearizáljuk (1)-et. A lineáris közelítés elegendő a mezociklogenezis

leírásához. Behelyettesítve  $u = \bar{u}(z) + u'$ ,  $v = \bar{v}(z) + v'$ ,  $w = w'$ ,  $\zeta = \zeta'$  összefüggéseket, illetve elhanyagolva a perturbációból keletkezett maradék tagokat kapjuk a (2)-es egyenletet. Vegyük észre, hogy  $\bar{\zeta} = 0$ , ha  $\bar{v}$  és  $\bar{u}$  csak  $z$  függvényei. Így az egyenletünk a következőképpen fog kinézni:

$$\frac{d\zeta'}{dt} = -\bar{u} \frac{\partial \zeta'}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \zeta'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \frac{\partial w'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \frac{\partial w'}{\partial x} \quad (2)$$

ahol az első két tag a perturbációs örvényesség advekciónak, a második két tag pedig a dőlést jelöli. Ezt az egyenletet a következőképpen is fel tudjuk írni:

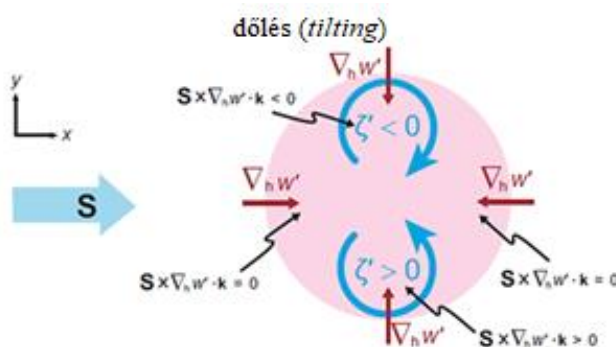
$$\frac{d\zeta'}{dt} = -\bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla_h \zeta' + \mathbf{S} \times \nabla_h w' \cdot \mathbf{k} \quad (3)$$

ahol a vertikális szélnyírás  $\mathbf{S} = \frac{\partial \bar{\mathbf{v}}}{\partial z}$ , az első és a második tag továbbra is az advekciónak és a dőlést jelöli. Vegyük észre, hogy a  $\bar{\mathbf{v}}$  vektor csak horizontális tagokat tartalmaz.

Ezek után az átlagolt változók veszik át a környezet szerepét. Ha a zivatar konstans  $\mathbf{c}$  sebességgel mozog, akkor:

$$\left( \frac{\partial \zeta'}{\partial t} \right)_{sr} = -(\bar{\mathbf{v}} - \mathbf{c}) \cdot \nabla_h \zeta' + \mathbf{S} \times \nabla_h w' \cdot \mathbf{k} \quad (4)$$

ahol a  $\bar{\mathbf{v}} - \mathbf{c}$  a zivatarhoz képesti szelet jelöli,  $\left( \frac{\partial \zeta'}{\partial t} \right)_{sr}$  pedig a zivatarhoz vett rendszerben a függőleges örvényesség tendenciája. Az egyenlet jobb oldalának második tagja felelős  $\zeta'$  keletkezéséért, mégpedig azért, hogy a horizontális örvényességet átfordítja a fő vertikális szélnyírás, a vertikális sebességgradiens által. Az jobb oldalának első tagja reprezentálja  $\zeta'$  advekciónak a zivatarhoz képesti szél által. A 3. ábrán a  $\left( \frac{\partial \zeta'}{\partial t} \right)_{sr}$  fejlődése látható a (4) egyenlet 2. tagja ( $\mathbf{S} \times \nabla_h w' \cdot \mathbf{k}$ ) által, amely létrehoz egy örvénypárt a szupercellán belül.



3. ábra: Az ábra a középszinti feláramlás keresztmetszetét mutatja (rózsaszín), illetve jelzi  $\zeta'$ ,  $\mathbf{S}$  és  $\nabla_h w'$  kapcsolatait. A rotációt a görbült nyíl jelzi. (Markowski; Richardson 2011)

A (4)-es egyenletbeli dőlés tag hatására létrejön egy örvénypár a feláramlási zóna szélén. Ezek az ábrán a már említett örvénypárok  $\zeta' > 0$  illetve  $\zeta' < 0$  jelöléssel vannak ellátva, az ábrán, értelemszerűen, lefelé tekintünk a még nem kettészakadt szupercella tetejéről. Az

örvényesség gradiense ( $\nabla_h \zeta'$ ) dél felé mutat. Ha a zivatarhoz képesti szél merőleges a gradiensre, akkor a (4)-es egyenlet advekción tagja nulla és az örvénypárok megmaradnak. Ha a zivatarhoz képesti szél párhuzamos és ellentétes a gradienssel (áramlásirányú az örvényesség), akkor az örvénypárok északra mozdulnak el, és a pozitív örvényességű rész közel egybe fog esni a feláramlási maximummal.

### 3.3. Helikalitás

A helikalitásnak rendkívül fontos szerepe van a szupercellás zivataroknál, mivel meghatározza a szupercella lehetséges élettartamát, illetve tornádopotenciálját is. Minél nagyobb az értéke, annál több ideig képes fennmaradni a zivatar.

A helikalitás annak a mértéke, hogy a folyadékmozgás iránya mennyire igazodik a folyadék örvényességéhez. A helikalitás emiatt erősen kapcsolódik az áramlásirányú örvényességhez. A nagy helikalitású áramlásokban az áramlásirányú örvényesség az uralkodó (Trapp 2013). A helicitás matematikailag a kovarianciája vagy a skaláris szorzata a sebességnek és az örvényességnek:

$$\mathbf{H} = \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\zeta} = \mathbf{v} \cdot \nabla \times \mathbf{v} \quad (1)$$

Értelemszerűen amikor a  $\mathbf{H}=0$ -val, akkor az örvényesség és a sebességvektor párhuzamosak egymással. Bár a helicitás fogalma a folyadékdinamikához köthető, a szupercellás zivataroknál is használjuk, mivel kapcsolódik az áramlás irányú örvényességhez és az esetleges élettartamukhoz is. A helikális áramlások hajlamosak elnyomni a turbulenciát és néhány hipotézis szerint a szupercellák helikális feláramlása magyarázza a hosszú életüket.

A konvektív viharok esetében a helikalitás egy integrálként értelmezett, amely a környezet szelét és az örvényesség szorzatát jelenti, ez az integrál 0-tól egy  $d$  magasságig terjed, általában a 0-3 km-es helikalitást szokták vizsgálni:

$$\mathbf{H} = \int_0^d \bar{\mathbf{v}} \cdot \boldsymbol{\zeta}_h dz, \quad (2)$$

ahol

$$\boldsymbol{\zeta}_h = \left( -\frac{\partial \bar{v}}{\partial z}, \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = \mathbf{k} \times \mathbf{S}. \quad (3)$$

A helikalitás csak a zivatarhoz képest lényeges, mivel a mozgó feláramlás okozza a dőlés mechanizmusát.

Az SRH-t (*Storm Relative Helicity*), azaz a zivatarhoz képesti helikalitást így kapjuk meg:

$$\text{SRH} = \int_0^d (\bar{\mathbf{v}} - \mathbf{c}) \cdot \zeta_h dz = \int_0^d |\bar{\mathbf{v}} - \mathbf{c}| \zeta_s dz = - \int_0^d \mathbf{k} \cdot (\bar{\mathbf{v}} - \mathbf{c}) \times \mathbf{S} dz \quad (4)$$

Az SRH leolvasható a hodográfól. A mértéke egyenlő a hodográf és a zivatar mozgásvektora által bezárt terület kétszeresével. Az SRH pozitív, ha azt az áramlásirányú örvényesség alakítja ki. A 0–6 km-es nyíráshoz hasonlóan az SRH-t is gyakran használják a szupercellák valószínűségének előrejelzésében. leginkább a 0–3 km közötti rétegben. A nagysága szinte az összes jellemzőjét befolyásolhatja (Guarriello et al. 2018). Amikor az érték  $150 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  fölött van, akkor potenciálisan megnő az esély a szupercellák kialakulására. Habár úgy tűnik, hogy a szélnyírás és a helikalitás független egymástól, mégis van köztük korreláció. Az SRH értéke arra is rámutat, hogy mekkora valószínűséggel alakulhat ki tornádó egy szupercellából. Erre a sekély réteg (alsó 1 km) SRH értéke a mérvadó, ez minél nagyobb, annál erősebb tornádó tud kialakulni (Rasmussen 2003).

### 3.4. Szupercellák fejlődése

#### 3.4.1. A nemlineáris dinamikus kényszer hatása

A nemlineáris dinamikus kényszer elősegíti azt, hogy a szupercella kettéváljon a zivatar életének első fázisaiban legalább akkor, amikor szignifikánsan fennál a keresztirányú örvényesség. A keresztirányú örvények bedőlése azt okozza, hogy létrejön egy egymással ellentétes irányban forgó örvénypár, amely a középső szintek feláramlására terjed ki.

Alacsony nyomás ott található, ahol a  $|\zeta'|$  nagy értéket vesz fel, függetlenül  $\zeta'$  előjelétől. Ez azt jelenti, hogy a nyomási minimum létrejön mind a ciklonálisan, mind az anticiklonálisan forgó örvényben. A  $|\zeta'|$  maximuma általában a földfelszíntől 4–8 kilométeres magasságban helyezkedik el.

A kettéválás általában a zivatar keletkezésétől számított 30–60 percen belül következik be és akár többször is megismétlődhet (Markowski; Richardson 2011). A kettéválást a csapadék és a hozzá kapcsolódó leáramlás is elősegíti, de az nem kedvez neki, ha ez a leáramlás túlságosan nedves.

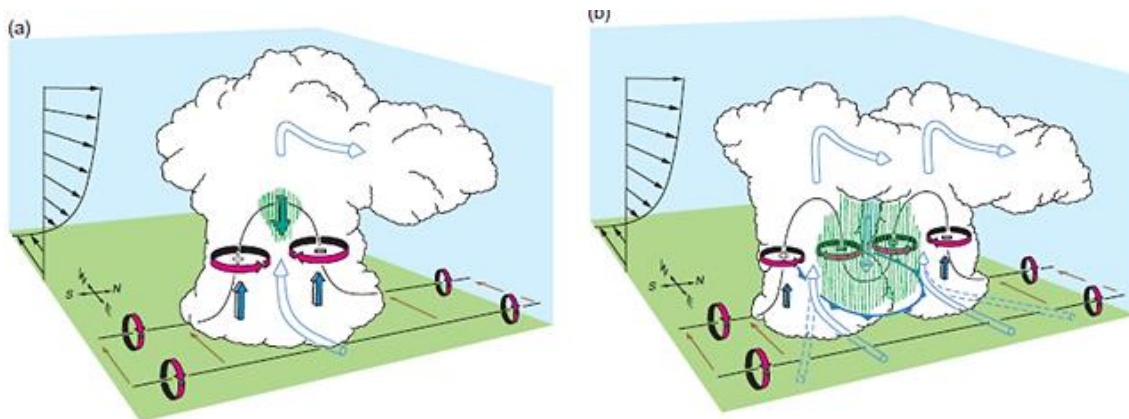
A kettéválás ahhoz vezet, hogy létrejön egy jobb-, illetve egy bal-irányba mozgó zivatar. A jobb és a bal oldalt az alacsony szintű szélnyírási vektor határozza meg, nem pedig az átlagos szél a zivatar környezetében. Ennek ellenére általában a zivatar jobb irányba tér ki az átlagszélhez viszonyítva, ha az jobbra mozog a szélnyírás vektorhoz képest.

A zivatar kettéválását követően az oldalsó feláramlás növekedése (a nyírási vektor jobb oldalán) növeli az áramlás irányú örvényességét, amelyet jobbra mozgó feláramlás hasznosít.

Fontoljunk meg egy olyan esetet, amikor a hodográf egyenes és a nyírás nyugati irányú. A feláramlás eleinte az átlagos szélességgel megegyezően mozog, ebből adódóan a zivatar a hodográf irányával megegyezően mozog így a feláramlás beindít egy tisztán keresztirányú örvényességet mert a zivatarhoz képesti relatív szél minden szinten merőleges a horizontális örvényességre (Markowski; Richardson 2011). Ha az SRH szemszögéből vizsgálódunk, akkor az SRH az 0, mivel nincs közrezárt szög a zivatar mozgása és a hodográf között, hiszen a zivatar pont a hodográf állása szerint mozog, azaz egyenesen.

A zivatar kettéválását követően a jobbra- illetve balra mozgó feláramlások szert tesznek arra, hogy oldalirányba fejlődjenek oly módon, hogy a mozgásuk többé nem a hodográf irányában fog folytatódni.

Habár a nemlineáris dinamikus kényszer nem támogatja az oldalirányú feláramlás terjedését egy tökéletesen görbülő hodográf esetén, oldalirányú növekedés létrejöhet a lineáris dinamikus kényszer hatására, amelyet szakdolgozatomban nem részletezek.



4. ábra: A szupercella kettéválásának sematikus folyamata (Markowski; Richardson 2011).

Ahogy megjelennek az csapadékos leáramlások és a cella kettéhasad (4. ábra), az örvényvonalak hátrafelé dőlnek és az eredetileg feláramlás középpontú örvénypárból két különböző örvény jön létre. A jobb oldali feláramlás megy a pozitív örvényesség irányába és ez korrelációt fejleszt a feláramlás, valamint a pozitív örvényesség között. A 4.a és 4.b ábrán az átlátszó kék nyilak jelölik a zivatarhoz képesti trajektóriákat. A 4.b ábrán a kék szaggatott vonalak a kettéválás utáni zivatarhoz képesti trajektóriákat jelölik.

### 3.4.2. Dinamikus perturbációs nyomás

A szupercellák dinamikai növekedési folyamatát a perturbált nyomás változása írja le, mely függ a háromdimenziós szél- illetve felhajtóerő-mezőktől:

$$p' \propto \underbrace{\left[ \left( \frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v'}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w'}{\partial z} \right)^2 \right]}_{\text{I.}} + \underbrace{2 \left( \frac{\partial v'}{\partial x} \frac{\partial u'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial x} \frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial y} \frac{\partial v'}{\partial z} \right)}_{\text{II., } p'_{\text{dnl}}} + \underbrace{+2S \cdot \nabla_h w'}_{\text{III., } p'_{\text{dl}}} - \underbrace{\frac{\partial B}{\partial z}}_{\text{IV., } p'_b}$$

Ahol  $p'$ , azaz a perturbált nyomás kényszer egyenesen arányos egy folyadéktágulási tag (I.), egy nemlineáris dinamikus nyomás perturbációs tag (II.), egy lineáris dinamikus nyomás perturbációs tag (III.), illetve egy felhajtóerőből származó nyomási tag (IV.) összegével. A nemlineáris dinamikus perturbált nyomási tag egyszerűsíthető. Bennünket csak az erősen forgó feláramlás érdekel. Egyszerűsítések után a perturbált nyomás arányos lesz egy folyadéktágulási tag, egy forgási tag (melyeket közösen nemlineáris dinamikus nyomás perturbációs tagnak is nevezhetünk), egy lineáris dinamikus nyomás perturbációs tag, és a felhajtóerőből származó nyomási perturbációs tag összegével.

Habár a tagok külön-külön is meghatározzák  $p'$ -t, a dinamikus perturbált nyomási gradiens erő (amelyet dinamikai kényszernek is neveznek) szerepe jelentős a vertikális gyorsulásban. A folyadéktágulási tag elhanyagolható, illetve elhagyható a felhajtóerőből származó nyomási tag is. Az utóbbinak csak az egycellás és a multicellás zivataroknál van jelentősége. A felfelé ható dinamikus kényszer hideg levegőt szállít az LFC szintjére, ennek köszönhető a szupercellák feláramlásának bordázott formája.

### 3.5. Előrejelezhetőség a konvektív paraméterek alapján

A szupercellás zivatarok létrejöttéhez elengedhetetlen a megfelelő mértékű labilitás, amelyre több mérőszám is rendelkezésre áll.

A legfontosabb instabilitási mérőszám a CAPE (*Convective Available Potential Energy*), azaz konvektív hasznosítható potenciális energia (Moncrieff; Miller 1976). A CAPE indexnek sok változatát használják, amikor a dolgozatban CAPE értéket említek, akkor az

SBCAPE (*Surface Based Convective Available Potential Energy*), azaz a felszínről emelkedő légréteg konvektív hasznosítható potenciális energiáját kell alatta érteni. A CAPE értéke a következő integrállal kapható meg:

$$\int_{LFC}^{EL} g \frac{T'_v - T_v}{T_v} dz, \quad (5)$$

ahol az **EL** a kiegyenlítődési szintet, az **LFC** a szabad konvekció szintjét, a  $T_v$  a környezet virtuális hőmérséklete, míg a  $T'_v$  az emelkedő légréteg virtuális hőmérséklete. (Horváth 2007)

Megfigyelések szerint a CAPE értéke minden esetben magas a szupercellás zivatarok kialakulása előtt, de ennek az értéknek nem kell extrém magasnak lennie, hogy szupercellák alakuljanak ki. Magyarországon területén a 2500 J/kg-os CAPE értékek már extrém magasnak számítanak.

Az instabilitás mérésére szokás még az LI (*Lifted Index*) használata is. Az LI egy egyszerű mérőszám, amely az 500 hPa-on található légelem hőmérsékletének, és az azonos szinten a környezet hőmérsékletének különbségét veszi figyelembe. Ha az LI negatív, akkor azt jelenti, hogy a légelem hőmérséklete magasabb a környezeténél, tehát a rétegződés labilis. Hátránya, hogy a talajról induló légészt vizsgálja, ezáltal nem veszi figyelembe, ha a légréteg egy magasabb szintről indítva labilisabb értéket venne fel.

Fontos még megemlíteni az SSI (Showalter-féle stabilitási index) is (Showalter 1953), amely az LI indexhez hasonlóan az 500 hPa-on található két légelem hőmérsékletét veszi figyelembe, viszont itt a légelem hőmérsékletét úgy kapjuk, hogy 850 hPa-os szintről száraz adiabata mentén az LCL-ig (*Lifted Condensation Level*), majd onnan nedves adiabata mentén 500 hPa-os szintig emeljük. Ha az SSI index kisebb, mint -3, akkor heves zivatar kialakulása valószínű (Gyúró et al. 2013.).

A K index is fontos szerepet tölt be a konvektív folyamatok előrejelzésében. Ez az index azért vált népszerűvé, mert figyelembe veszi több szint nedvességi és hőmérsékleti viszonyait is. A K index a következőképp áll elő:

$$K = T_{850} - T_{500} + T_{D850} - (T_{700} - T_{D700}) \quad (6)$$

ahol az alsóindexben található D betűk az adott szint harmatpontjait hivatják jelölni. Ha a K index meghaladja a 38-40 °C-ot, akkor vertikális szélnyírás hiányában is képesek lehetnek szupercellák kialakulni a horizontális örvényesség segítségével (Horváth 2007).

A termodinamikai paraméterek mellett a legfontosabb tényező a szupercella kialakulásához a vertikális szélnyírás megfelelő mértéke. A szélnyírás a szél sebességének és irányának a magassággal történő megváltozása. A szupercellák esetén a legfontosabb szélnyírási érték a 0 és a 6 km közötti. Ha ez az érték nem éri el a 15 m/s-ot, akkor kis

valószínűséggel alakulhat ki szupercella.

### 3.6. Szupercellák kísérőjelenségei

A szupercellákat, gyönyörű kinézetükön kívül leginkább a károkozásukról ismerhetjük fel. Pusztító jégesővel csaphatnak le, amelyek akár 1 milliárd dolláros kárt is okozhatnak (Allen 2017). A legpusztítóbb kísérőjelenségük viszont a tornádó, amely mindent képes a föld színével egyenlővé tenni.

#### *Jégesők*

Jégeső csak konvektív felhőből hullhat, ezért leginkább a nyári hónapokra jellemző csapadékfajta. A jégeső kialakulásának egyik feltétele az erős feláramlás, ez az, ami leginkább befolyásolja, hogy mekkora méretűre tudnak a jég szemek megnőni. A másik fontos befolyásoló tényező, hogy a kezdetleges jégcsíra huzamosabb ideig  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  alatti hőmérsékleten legyen. A  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os hőmérséklet természetesen az olvadás szempontjából meghatározó.

A jég szemnek kétféle növekedési folyamata lehet: a száraz, illetve a nedves növekedés. A jég szemmen jól látható, hogy milyen növekedési folyamat révén jött létre. Ha száraz növekedés során keletkezett, akkor a jég szem átlátszatlanná válik, míg nedves növekedés során a jég szem átlátszó marad.

A jég szem növekedést elősegítő folyamatok egyike az, hogy közép magas szinteken a levegő megfelelően száraz legyen. Ha nem elég száraz, akkor a jég szem nem kemény formában érkezik a földre, hanem olvadt, latyakos alakban.

Érdemes megemlíteni a nedves hőmérséklet  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  szintjét, hiszen ez meghatározó szerepet tölt be a jégeső keletkezésében (Appleman 1959). Ha ez a hőmérséklet egy bizonyos magasságban helyezkedik el, amely a kutatások szerint 2,2 és 2,8 km között kell, hogy megtalálható legyen, akkor nagyon kedvező a jég képződéshez a légrétegződés, de ha ezen kívül esik a szintje, akkor nem valószínű jégeső kialakulása.

A jég szem mérete rendkívül nagy skálát ölel fel, hiszen a milliméteres nagyságtól egészen a 20 centiméteresig előfordulhat. A legnagyobb valaha lehullott regisztrált jég szem 20,3 cm átmérőjű és 0,87 kg tömegű volt (Monfredo 2011). Magyarországon az 5 centimétert meghaladó jég átmérő már nagyon ritkának számít, pontos adatok nem állnak rendelkezésre a rekord méret szempontjából.

## *Tornádók*

A tornádók pusztító természeti jelenségek, melyek viszonylag ritkának számítanak a többi időjárási jelenségtől eltérően. A tornádókhoz köthetők a Földön mért legnagyobb szélsőségek. A legtöbb tornádóban a szélsőségek kisebbek, mint  $50 \text{ ms}^{-1}$ , és mindössze a tornádók kevesebb, mint 1%-a éri el a  $75 \text{ ms}^{-1}$ -os szélsőséget (Markowski & Richardson, 2010). Leggyakrabban az Egyesült Államok területén alakulnak ki, azon belül is a tornádófolyosónak nevezett területen amely Texitól egészen Minnesotáig húzódik (Gagan et al. 2010). Újabban a tornádófolyosóhoz hozzá lehet kapcsolni, egy, a Dixie folyosónak nevezett területet is, mivel kimutatták, hogy a tornádók sűrűsége alapján ez is egy kiemelten gazdag rész (Dixon et al. 2011).

A tornádók kialakulásuk szerint két nagy csoportba oszthatók: nem-mezociklonális és mezociklonális tornádókat különböztethetünk meg.

A nem-mezociklonális tornádók kialakulásához tartós talajmenti konvergencia szükséges. A tartós konvergencia hatására a kontinuitási egyenletnek eleget téve feláramlás keletkezik. A konvergenciavonal mentén mezociklonok (Fujita; Wakimoto 1981) alakulnak ki, melyek a feláramlás hatására egyre keskenyednek, míg tornádó-szélességűvé nem válnak és mivel teljesül az impulzusmegmaradás, így az eleinte lassú forgású örvények gyors forgású válnak és akár EF3-as erősségű tornádó is keletkezhet belőlük.

A mezociklonális tornádók teljesen más módon jönnek létre. Ezek a tornádók a szupercellákhoz köthetők. Először megjelenik a falfelhő a szupercellában, amely a mezociklon jelenlétére utal. A mezociklon a szupercella jelentős, nagyjából 2/3-ára kiterjedő forgó feláramlási szakasz, amelynek meghatározott forgási sebessége és élettartama is van. Miután megjelenik a falfelhő, ezután elkezdődik az RFD ún. bevágódása. A megfigyelések azt mutatják, hogy a tornádók nem a falfelhő közepéből ereszkednek le, hanem a falfelhő jobb oldala felől. A tornádókról készült fotók gyakran felfednek egy olyan területet a tornádóhoz közel, amely kevés felhőt, szinte tiszta eget tartalmaz. Ezt „clear slot”-nak, tiszta résznek nevezzük. Ha ez a tiszta rész megjelenik, akkor a szupercella közeli állapotba kerül ahhoz, hogy tornádó ereszkedjen le belőle (Lemon; Doswell III 1979).

A tornádók Magyarországon viszonylag ritka jelenségnek mondhatók, pontos számukat nehéz megmondani. Ha a mediterrán ciklon aktivitás erős, akkor évente akár 10 tornádó is kialakulhat hazánkban (Horváth; Geresdi 2001).

## 4. Szupercellák modellezése

A szupercellás zivatarokat rendkívül sok módon és sok oldalról megközelítve modellezik. A modellekben az a hasonlóság, hogy mindegyikük nem hidrosztatikus fizikával működik, mivel csak ezzel a módszerrel lehet őket szimulálni. Szakdolgozatomban esettanulmányokon keresztül mutatom be, hogy milyen kezdeti és peremfeltételeket, milyen felbontást alkalmaznak, és ezekből milyen eredményeket kapnak a szupercellák fejlődésére vagy kísérőjelenségeikre.

### 4.1. Időjárási modellek

Az időjárás előrejelzésében az idő előrehaladtával, és a technika fejlődésével egyre inkább fontosabbá váltak a numerikus prognosztikai módszerek. A numerikus prognosztika lényege, hogy a légköri egyenletekre egy matematikai modellt állítunk fel, majd ezt oldjuk meg. A numerikus prognosztikában közelítésekkel kell, hogy éljünk, mivel a légköri hidrodinamikai egyenletrendszernek nem létezik analitikus megoldása. A közelítések lehetnek térbeliek és időbeliek egyaránt. Térbeli közelítés a rácshálózat használata, mivel a modellek nem képesek a valóságot a felbontása, ezáltal a számításigénye miatt kezelni.

#### 4.1.1. Globális időjárási modellek

Az időjárási modellek lehetnek globálisak, ilyen globális modell például az ECMWF (*European Centre for Medium Range-Weather Forecasts*), azaz Középtávú Időjárás Előrejelzések Európai Központ IFS (Integrated Forecasting System – Integrált Előrejelző Rendszer) modellje, amely determinisztikus felbontása kb. 9 km-es napjainkban [2-met.hu]. Ez a felbontás alkalmas a nagyskálájú folyamatok modellezésére, mint például a Rossby-hullám, vagy a frontok szimulációjára, de nem enged betekintést a kisebb, mezoskálájú folyamatokba, úgy, mint a zivatarképződés. A másik fő globális modell a GFS (*Global Forecast System*), amely az NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) által, az egész Földre futtatott globális időjárási modell. Ennek a felbontása kisebb az ECMWF-énél, 13 km-es az első 10 nap előrejelzésében, 10-16 nap között pedig 34 km-es felbontással működik [3-NCEP].

#### 4.1.2. Korlátos tartományú modellek

A korlátos tartományú modellek célja, hogy a mezoskálájú jelenségeket, amelyeket a globális modellek nem tudnak megmutatni, előrejelezzék. Az ilyenfajta modellek az oldalsó határfeltételeiket a globális modellekből vagy egy nagyobb méretű korlátos tartományú modellből kapják. Ilyen korlátos tartományú modell például az OMSZ által használt AROME

modell (*Application of Research to Operations at Mesoscale*) (Seity et al. 2011), amely horizontális felbontása 2,5 km, mellyel már mezoskálájú folyamatok is előre lehet jelezni. \_Az OMSZ-nél az AROME-hoz hasonló módon mezoskálájú folyamatok modellezésére használják az amerikai fejlesztésű WRF modellt is 2,6 km-es felbontással. A feldolgozott cikkekben legtöbbször a WRF modellt alkalmazták.

#### 4.1.3. A WRF modellről általánosságban

A WRF (*Weather Research and Forecasting*) modell egy nyílt forráskódú, numerikus prognosztikai időjárási modell, amely mind előrejelzésre, mind operatív felhasználásra alkalmas. A modell nagy felbontása miatt, amely 1-10 km közötti rácestávolságokat jelent, nem globális folyamatokra, hanem mezoskálájú folyamatok modellezésére használják.

A WRF-ben két dinamikus megoldó mag található: az egyik a WRF-ARW (*Advanced Research WRF*), azaz fejlett kutatású WRF, illetve a WRF-NMM (*Nonhydrostatic Mesoscale Model*), azaz nemhidrosztatikus mezoskálájú modell.

Az általam feldolgozott cikkekben legtöbb esetben WRF-ARW modellt használnak, mivel ez a modell nyújtja a legtöbb lehetőséget egy felhasználó számára. A legtöbb esetben a szimulációk során 3, egymásba épített domainnel dolgoztak, melyek felbontása rendre 9, 3, 1 km-es volt. A modell felszínkövető koordináta-rendszert használ, amelyet legfőbbképpen mezoskálájú folyamatok, illetve a planetáris határréteg modellezésében alkalmaznak. A modell megoldja a teljesen összenyomható, nemhidrosztatikus egyenleteket a légkörben zajló mozgásokra (Skamarock; Klemp 2005).

## 4.2 Esettanulmányok

### 4.2.1. Kezdeti feltétel szerepe egy supercella előrejelezhetőségében (Miglietta et al. 2016)

A cikk északkelet-Olaszország, méghozzá a Friuli Velence Giulia területi részen (FVG) történt eseményeket vizsgálták, az első speciális megfigyelési időszak alatt (SOP1), amely a HyMeX-nek, azaz a Mediterrán Hidrológiai Ciklus Kísérletnek (*HYdrological cycle in Mediterranean EXperiment*) az első időszaka.

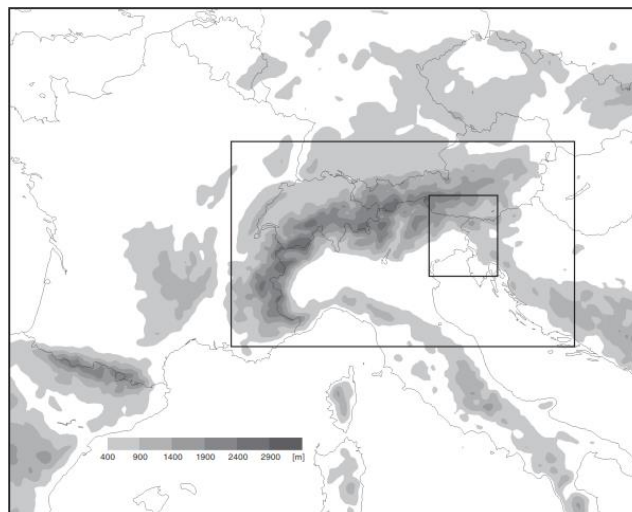
#### *Időjárási helyzet*

Az emelő hatást egy hidegfront hozta létre, amely az FVG területet 12-e reggel érte el.

A felszíni légnyomás-térképeken még két kis skálájú ciklont is azonosítani lehet, melyek nedves levegőt szállítottak az Adriai-tenger felől az FVG területre, amely a konvekció melegágyaként szolgált. Ez a melegadvekción széltérképen is megfigyelhető volt. A Marshall-Palmer formula alapján származtatott 6 órás csapadékösszeg alapján a területen mért csapadék maximuma elérte a 150 mm-t. A nedves levegő advektálódása alacsony szinteken magas ekvivalens potenciális hőmérsékleti értékeket okozott, a troposzféra középső rétegeiben viszont hidegadvekción zajlott. A CAPE értéke néhol elérte a 2000 J/kg-ot. A konvekció megindulását az alacsony értékű CIN (20 J/kg) nem gátolta szignifikánsan.

#### *Modellbeállítások, szimulációk*

A numerikus szimulációkat a WRF-ARW modell 3.5.1-es verziója segítségével végezték. A modellben 40 vertikális szint lett felhasználva, a meteorológiai paramétereket az elemzés érdekében 5 percnként mentették. A modell 3 különböző felbontást használt: egy 9 km-est, amely 190x150 pontból, egy 3 km-est, amely 273x161 pontból, illetve egy 1 km-es felbontást, amely 181x181 rácspontból áll. A legjobb felbontású terület értelemszerűen a középső domain (5. ábra).



5. ábra: A szimulációban használt 3 domain térbeli elhelyezkedése. A középső domain az FVG (Friuli Velence Giulia) területet jelöli (Miglietta et al. 2016).

A parametrizálásra előzetesen kísérleteket végeztek a cella fejlődése érdekében A következő sémákat használták fel: Thompson mikrofizika, RRTM (*Rapid Radiative Transfer Model*) a hosszuhullámú sugárzásra (Mlawer et al. 1997), Noah (*NOAA/NCEP–Oregon State University–Air Force Research Laboratory–NOAA/Office of Hydrology land surface model*) földfelszín modellt a rövidhullámú sugárzásra (Niu et al. 2011), a planetáris határrétegre pedig a Mellor–Yamada–Janjic-féle parametrizációt (Janić 2001) . A cumulus konvekciót nem

használták egyik domainen belül sem. Az ilyen sémák azért voltak jók, mert megegyeznek Manzato 2015-ös cikkének sémáival, ez olyan szempontból érdekes, mert abban a tanulmányban nem kaptak ilyen pontos eredményeket a szupercellára.

Hat különböző modellfutást készítettek, amelyek 3 különböző időpontból indultak, két különböző analízist/előrejelzést használtak, mint kezdeti/peremfeltétel. A kezdeti feltételek az ECMWF és a GFS modell szolgáltatotta. A peremfeltételeket minden 3 órában frissítették, az ECMWF IFS és a GFS előrejelzések alapján. A különböző kezdeti időpontok a következők voltak: 2012. szeptember 11 00:00 és 12:00 UTC, illetve 2012. szeptember 12 00:00 UTC.

### *Eredmények*

A modelleredmények nagyon különböztek a 6 szimuláció alakalmával. A szimulációk közül csak néhány jelzett előre intenzív esőzést az FVG területén a reggeli időszakban, bár szignifikáns különbségek vannak ezen előrejelzések között is a csapadékeloszlást tekintve. A 6 szimulációból mindössze 2 (mindkettő GFS) tudta reprodukálni a forgó feláramlást és a jobbra mozgó szupercellát, 2 szimuláció (mindkettő IFS) még csapadékot sem prognosztizált a területre. És csak egy reprodukálta jól a cella csapadékmaximumának térbeli eloszlását.

A stabilitási indexek közül az LI előrejelzésében az IFS-ből indított szimuláció bizonyult pontosabbnak a GFS-hez képest, habár a GFS sokkal pontosabb képet adott az alsó 500 m-es réteg instabilitásáról. Az ECMWF által szimulált esőzés területileg megfelelt a vártnak, de a mennyisége a csapadéknak a duplája volt a megfigyeltnek. A különbség oka, hogy a GFS1211-es futása sokkal mélyebb melegadvekción prognosztizált a többi futáshoz képest, ezért is ez jelezte előre legpontosabban a szupercellát.

Néhány instabilitási paramétert megvizsgáltak 5 percenként az FVG területén és annak közelében, például az Adriai-tenger északi részén, és arra jutottak, hogy az esemény során az instabilitás szignifikánsan változik kis területen és időintervallumon belül, a szimulációk között is. A legjobb szimulációk a megfigyelt potenciális instabilitással mutatnak egyezést.

A WRF modell belső domainje által modellezett szupercella jobbra tért ki a troposzféra átlagos szélnyírásához képest. Ez a futás azt is megmutatta, hogy a vertikális szélesebbség maximuma és a vertikális örvényesség maximuma is tipikusan egy szupercellára hasonlított. Észrevehető volt egy anticiklonális rész is, amely a kettéválás után jöhetett létre. A modellezett szupercella nagyban hasonlított a konceptuális modellre, amelyet Rottuno és Klemp fejlesztett ki 1985-ben.

Az eredmény azt mutatja, hogy az ensembles módszer feltétlenül szükséges ahhoz, hogy jól tudjuk lokalizálni a heves konvektív időjárási jelenségeket.

#### 4.2.2. A tengerfelszín hőmérsékletének hatása egy szupercellára (Miglietta et al. 2017b)

A konvekcióra, ezáltal a szupercellák kialakulására, illetve fejlődésére is nagy hatással van a tengerfelszín hőmérséklete (későbbiekben TH), illetve annak esetleges pozitív anomáliája.

##### *Időjárási helyzet*

A szupercella valószínűleg azért jöhetett létre a Jón-tenger térségében, mert az alsó légrétegben nagyon erős volt a szélnyírás (az alsó 700 méteren meghaladta a 22 m/s-ot). A radarképekből az is kiderült, hogy az orográfia is segítette a szupercella fejlődését. Az eseményhez közeli rádiószondás mérések alapján a CAPE értéke 908 J/kg volt [4-weather.uwo.edu]. Ez az érték a tengerfelszín felett magasabb lehetett.

##### *Modellbeállítások, szimulációk*

A szimulációban WRF-ARW 3.5.1. modellt használták, külső domain 210x150 rácspontból, a középső 271x193 rácspontból, a legbelső domain pedig 211x271 rácspontból állt. A parametrizáció nagyon hasonló az előző esethez képest, annyi különbséggel, hogy ebben az esetben a rövidhullámú sugárzásra Dudhia-féle sémát használtak (Dudhia 1989).

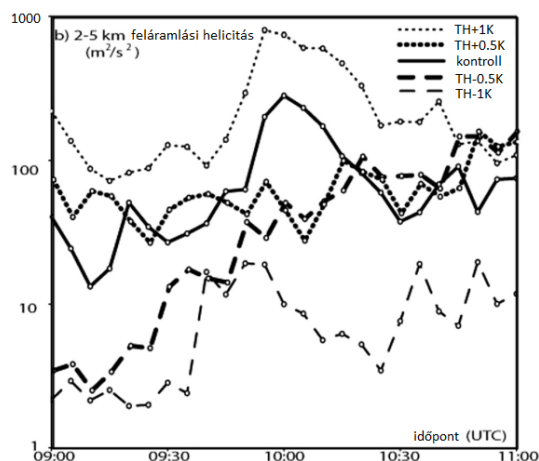
Kontrollfutásként az ECMWF 2012. november 27. 00:00 UTC-s futása szolgált, ez adta a kezdeti, illetve a peremfeltételeket is. A kimenő adatokat 5 percenként mentették a folyamat fejlődésének részletes elemzése érdekében. A TH-t 0,5 és 1 K fokkal változtatták meg pozitív és negatív irányban, de a légköri értékeket változatlanul hagyták.

##### *Eredmények*

A TH hatását a feláramlási helicitásban nem lehetett észrevenni, de az értéke magas volt kezdetben is ( $250 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ), viszont a konvekció aktivitása jelentősebb volt a melegebb tengerfelszín esetén. Ha 2 K-t emeltek a TH-n, akkor az UH<sup>1</sup> a duplájára növekedett (6. ábra). Ez a nagy UH növekedés a látens hő fluxusnak volt köszönhető. A maximális vertikális sebesség 600 és 400 hPa magasan is növekedett a TH növekedésével. A CAPE értékei a TH változtatásai során az 1180 J/kg-tól egészen 1940 J/kg-ig terjedtek. A magasabb CAPE értékek természetesen jobban kedveztek a szupercella kialakulásának.

---

<sup>1</sup> UH: *Updraft Helicity*, azaz feláramlási helicitás.



6. ábra: A feláramlási helicitás értékei a különböző TH-ek esetén (Miglietta et al. 2017b).

#### 4.2.3. Adatasszimiláció hatása nagyfelbontású izolált szupercella modellezésére (Pilguy et al. 2019)

Egy izolált szupercella alakult ki Lengyelország területén, 2016. június 20-án, amelyet 7,5 cm-t meghaladó jégeső és egy tornádó kísért, melynek erőssége a károk alapján Fujita-skála szerinti F1-es lehetett.

##### Időjárási helyzet

Egy kvázi-stacionárius front helyezkedett el Lengyelország felett, amely kettészelte az országot és elválasztotta egymástól a nyugati rész hideg és a keleti rész meleg levegőjét. Ez a front nedvességkonvergenciát eredményezett Görögországtól egészen Fehéroroszországig. Nagy termodinamikai instabilitás jött létre, amely elérte az 1500 J/kg-os értéket, illetve a nedvességi paraméterek, mint például a keverési arány is magas értéket vettek (18 g/kg). A szélnyírás 20-25 m/s-os nagyság közé esett.

##### Modellbeállítások, szimulációk

Az eseményt a WRF-ARW modell 3.9-es változatával szimulálták. A megszokott 3 domainnel dolgoztak, amelyek 260x260, 526x526, 697x697 rácspontot tartalmaztak. Az időlépcsők rendre 45, 15, és 5 s-osak voltak. A modell 45 vertikális szinttel dolgozott és a szimuláció ideje 24 órán keresztül tartott. A parametrizáció eltért az eddigiekhez képest, mivel a PHR-re New Thompson sémát használtak (Thompson et al. 2008).

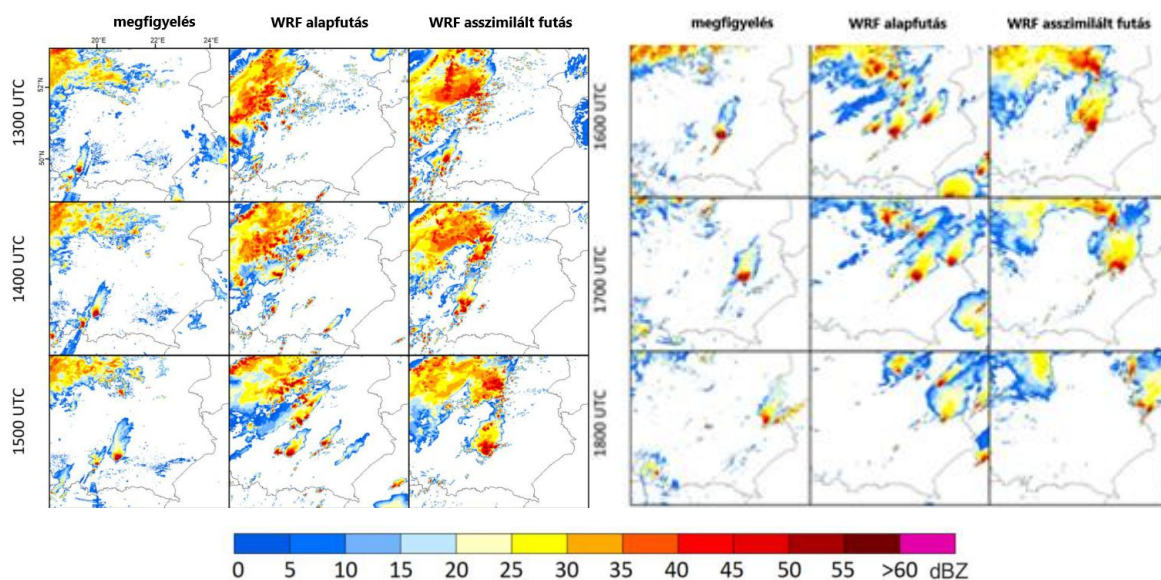
Kezdeti és peremfeltételként a GFS 0.25 fokos felbontású változatát használták, amelyhez a 2016 június 20-i 00:00 UTC-s futást vették alapul. Az adatasszimilációhoz az NCEP

ADP Globális felsőlégköri és felszíni megfigyeléseit használták fel.

Két futást készítettek, egy alap WRF futást és adatasszimilációt alkalmazó futást.

### Eredmények

Az asszimilációs tag erősebb reflektivitást, viszont izolált cellát mutatott, míg az alapfutás gyengébb reflektivitást jelzett előre, de több helyre, nem izolált jelleggel (7. ábra). Az asszimilált futásban a cella gyorsabban mozgott a megfigyelthez képest. A szimulációk, bár nem tudták a tornádót magát modellezni, mivel annak karakterisztikus mérete felbontás alatti, de azt meg tudták mutatni, hogy a szupercella szélmezeje kedvező volt arra, hogy tornádó jöjjön létre belőle. A WRF asszimilált futása alul-, míg az alapfutása felülbecsülte a hőmérsékletet. A reggeli órákban mindkét futás alábecsülte a harmatpontot, habár délutánra az asszimilált közelebb ért a pontos értékhez. Mindkét modell túlbecsülte a vertikális szélességeket.



7. ábra: Megfigyelt és a szimulált radar reflektivitások (Pilguy et al. 2019).

#### 4.2.4. Egy bangladesi tornádó szimulációja WRF-ARW segítségével (Das et al. 2016)

Banglades keleti részén egy mezociklonális tornádó pusztított, mely során 38 ember életét oltotta ki 2013. március 22-én. Az eseményt WRF-ARW-vel szimulálták és hasonlították hozzá doppler radar adatokhoz.

#### Időjárási helyzet

Banglades felett egy mély teknő volt megfigyelhető 500 hPa-on, 850 hPa-on pedig a Bengáli-öböl felől nedvességadvekción zajlott, ezek járultak hozzá a labilis környezethez. Mivel a régió közelében ballonszondás mérés csak 00 UTC-kor van, ezért a vertikális rétegződésről

nincsenek pontos információk, habár a WRF által szimulált CAPE értéke 11 UTC-kor 3650 J/kg volt, ami ezután csökkenni kezdett. Sűrű felszíni mérőhálózat hiányában a szellőkésre, nyomásváltozásra nincs mért információ, ezért ezeket is modellszimulációk alapján vizsgálták.

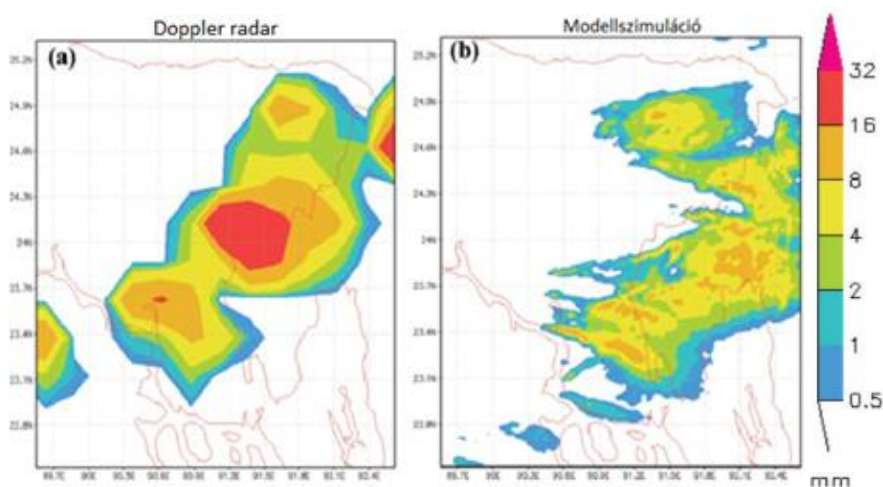
### *Modellbeállítások, szimulációk*

A WRF-ARW 3.5.1-es verziójával dolgoztak. 2 domainnel, amelyek közül az egyik 3, míg a másik 1 km-es felbontású volt, 31 vertikális szinttel. A szimulált terület nagyságáról nincs információ. A kezdeti és peremfeltételek az NCEP analízis adatbázisból származtak, amely 1x1 fok felbontású. A modell integrálási ideje 24 óra volt.

A parametrizációt tekintve a PHR-re YSU sémát, a felhő mikrofizikára: Milbrandt és Yau féle parametrizációt (Milbrandt; Yau 2005), a sugárzásokra: RRTM és Dudhai sémákat, míg a földfelszínre Noah földfelszín modellt alkalmazták. A kimenő adatokat 1 percenként mentették.

### *Eredmények*

Az ARW modell a hőmérsékletet felül-, míg a relatív nedvességet alulbecsülte. Az LI értéke  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  volt, a TT érték  $43\text{ }^{\circ}\text{C}$  körüli, amely ugyancsak kedvez a heves zivatarok kialakulásához. A modell által szimulált LCL 880 hPa-on, míg a megfigyelt 897 hPa magasan volt. A szimulált CAPE és SRH értékek 10:22 UTC-kor rendre 1200 J/kg és  $300\text{ m}^2\text{s}^{-2}$  voltak. Ezek az értékek rendkívül kedvezők mezociklon kialakulásához. A maximális feláramlási sebesség elérte a 60 m/s-ot a modelleredmények alapján. A maximális szimulált szélsősebesség 31 m/s volt a tornádó közelében, amely ez alapján nem érte el az EF2-es erősséget. Habár a modellbeli szupercella megjelenése és a megfigyelés között csak 40 perc különbség volt, térben  $0,5^{\circ}$ -os eltérés volt (8. ábra).



8. ábra: A Doppler radar adatai alapján becsült, és a modell által szimulált csapadékmennyiségek (Das et al. 2016).

#### 4.2.5. A jégméret hatása a szupercellákra (Van Den Heever; Cotton 2004)

Mint láthattuk a hidrometeorok evaporációja befolyásolja a szupercellákban mind az FFD-ben, mind pedig az RFD-ben uralkodó áramlási sebességet. Ebben az esetben idealizált szimulációkban vizsgálták a felhőben kialakuló jég szemek méretének hatását.

##### *Modellbeállítások, szimulációk*

A szimulációhoz a RAMS (Pielke et al. 1992) modellt használták. A légkör állapotát egy oklahomai heves zivataros nap felszállása alapján készítették el. A CAPE értéke 3130 J/kg, a konvekciót pedig egy meleg nedves hőbuborék, 3 K-es hőmérsékleti perturbáció indította, amely mérete 10x10 km volt.

A felhőfizikára egymomentumos bulk mikrofizikát használtak (Walko et al. 1995), amelynek az az előnye a kétmomentumossal szemben, hogy lehetővé teszi, hogy a jég méretét közvetlenül irányítsák. A horizontális felbontás: 1 km-es és 140x170 rácspontot tartalmazott, míg vertikálisan 35 szint volt, a modell teteje 23 km magasan volt található, 9 szint van az első 1 km alatt. Ez azért fontos, mert ez a modellfelbontás lehetővé teszi a zivatar-skálájú képződmények vizsgálatát, de nem enged betekintést a tornádó-skálájú folyamatokra. Az időlépcső 2 s-os, a szimuláció 2 órát ölelt fel.

Az összes hidrometeor fajtát használták a szimuláció közben, melyekre a Marshall-Palmer eloszlást (Marshall; Palmer 1948) illesztettek. A szimulált szupercellákat úgy vizsgálták, hogy a jégméretet 3, 5, 7 mm és 1 cm-es átmérővel adták meg.

##### *Eredmények*

A szimulációkban különbségek mutatkoztak a szupercella kettéválása után a jobbra, illetve balra mozgó tagokban. A jobbra mozgó szupercella tagok maradtak fenn a szimulációk során, ez annak köszönhető, hogy a hodográf állása ezen zivatarok megmaradásának kedvezett. A szupercellák kettéválása az összes szimulációt tekintve megtörtént az első fel órában.

A jobbra mozgó szupercella, ha 1 cm-es jégmérettel szimulálták, akkor az a feláramlását tekintve kis mértékben változott, de végig erős maradt. A feláramlás legerősebb a 3 és 5 mm-es jégátmérő esetén volt, de ez nem maradt fenn sokáig, míg a 7 mm és az 1 cm-es esetben egy állandó feláramlás keletkezett. A 3 mm-es esetben a legkiterjedtebb RFD és FFD jött létre szemben az 1 cm-es esettel.

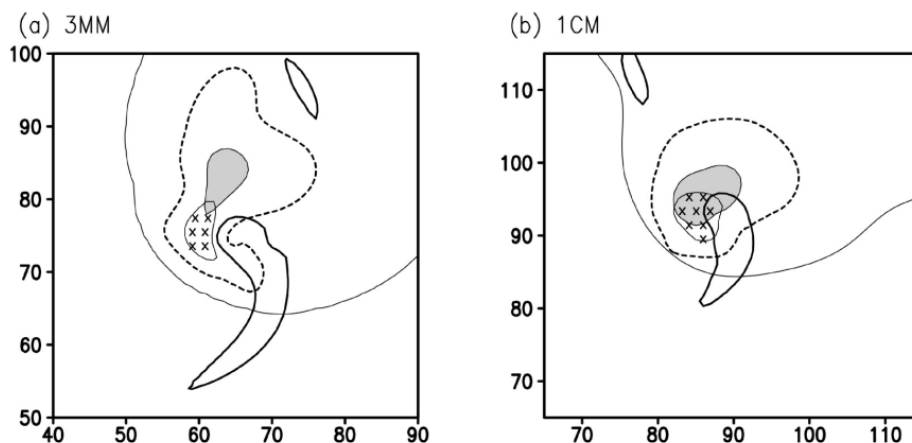
A jégátmérő növekedése hatással volt a felhőalap magasságára is. Kisebb jégátmérő esetén a felhőalap 1100 méter magasságban, nagyobb átmérő esetén pedig 1700 méter

magasságban helyezkedett el.

A hideg légtest a jégátmérő csökkentésével egyre erősödött, illetve a mélysége is hasonló kapcsolatot mutatott a jégátmérővel. A 3 mm-es esetben a hideg légtest 7900 km<sup>2</sup>, az 1 cm-es esetben pedig 5000 km<sup>2</sup>-en területet fedett le 90 perc elteltével.

Az átmérő növekedésével az alacsony szintű vertikális örvényesség csökkent, kis átmérő fennállásakor a szimuláció 0.02 s<sup>-1</sup>-ot, míg nagy átmérő mellett 0.015 s<sup>-1</sup>-ot jelzett, de a nagyobb esetben ez az érték hosszan fennmaradt.

A jégméret-eloszlás megváltoztatása hatással volt arra is, hogy milyen fajta szupercella jött létre. Amikor a jégátmérő 3 mm-es volt, akkor a zivatar a klasszikus szupercella jegyeit mutatta. A méret növelésével HP szupercellák keletkeztek a szimulációkban, amely a 9. ábráról is kivehető. Ez azért fontos, mivel különböző átmérők esetén létrejövő különböző típusú szupercellák más és más veszélyforrások okozói. A CL szupercella esetén a tornádó kialakulása, míg HP esetén a villámárvíz és a nagy méretű jég megjelenése jelenti a legnagyobb fenyegetést (Smith et al. 2001).



9. ábra: Különböző jégméret alapján szimulált szupercellák, a) 3 mm, CL szupercella b) 1 cm, HP szupercella. A 3 mm-es esetben az FFD a feláramlástól messzebb helyezkedik el, mint az 1 cm-es esetben, így jöhet létre a két szupercella típus (Van Den Heever; Cotton 2004).

#### 4.2.6. A Thompson-séma és a spektrál bin mikrofizikai séma összehasonlítása modellezett szupercellákon (Khain; Lynn 2009)

A felhőt alkotó hidrometeorok mennyiségét és méreteloszlását jelentősen meghatározza a rendelkezésre álló kondenzációs magvak száma. Ebben a cikkben idealizált esetre vizsgálták ennek hatását szupercellára.

*Modellbeállítások, szimulációk*

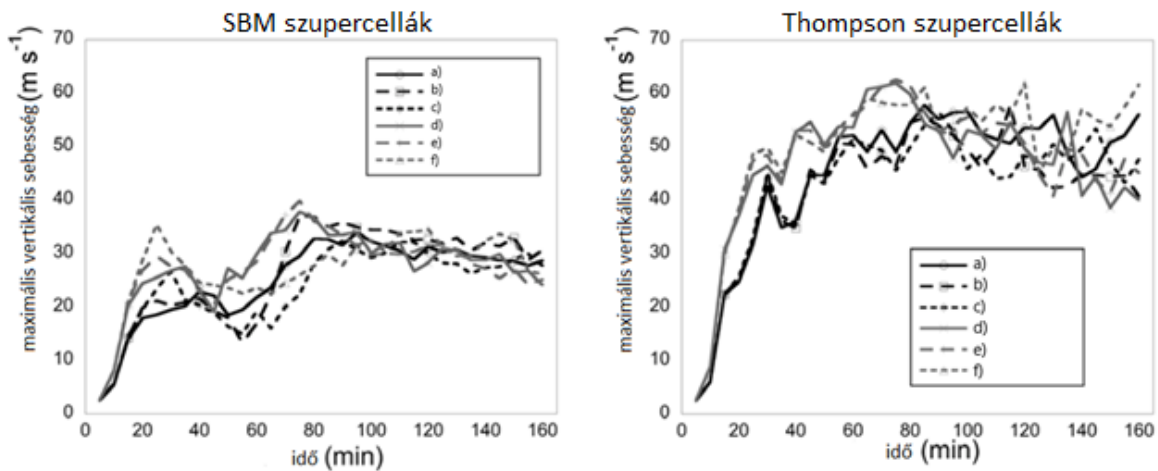
A szimulációk a Nagy Síkság tipikusan heves zivatarok előtti időjárási helyzetével dolgoztak, egy idealizált WRF felszállást használtak a vertikális rétegződésre kiindulásaként. A domain mérete 252x252 km volt, 2 km-es felbontással és az időlépcső automatikusan változott, hogy megmaradjon a numerikus stabilitás. Függőlegesen 41 vertikális szinttel dolgoztak és a modell teteje 20 km-en volt. Periodikus oldalsó peremfeltételeket használtak. Egy 3 °C-os hőmérsékleti impulzus következményeként generálták a szupercellát. A szimulációk 3 órán keresztül futottak és 5 percenként mentették le az adatait.

Szimulációkat futtattak szupercellákra tiszta, félszennyezett és szennyezett levegőre nézve. A szennyezettséget a számkoncentráció megadásával határozták meg, melyek rendre  $10 \text{ cm}^{-3}$ ,  $500 \text{ cm}^{-3}$  és  $1500 \text{ cm}^{-3}$  voltak. A szimulációk közben változtatták továbbá a páratartalmat két érték között, melyek különbsége 10% volt. A modellezés során a spektrál bin mikrofizikát (SBM) (Skamarock et al. 2005) és a Thompson bulk-parametrizációs sémákat hasonlították össze.

### *Eredmények*

A sémák teljesen különböző zivatarokat hoztak létre: az SBM 35 m/s-os feláramlást és jobbra kitérő szupercellát, míg a Thompson parametrizáció 65 m/s-os feláramlást és a balra kitérő szupercella fejlődését jelezte előre.

Az SBM esetén a maximális feláramlás 35 m/s volt (10. ábra), amely az 5483 J/kg-os CAPE értékhez jó eredményt jelent. A Thompson séma által generált szupercellák feláramlásainak 65 m/s-os értékei irreálisan magasak voltak a fent említett CAPE értékekre nézve. Ez a sebesség felülbecslés és a túl nagy mennyiségű csapadék tipikusan jellemző a bulk-parametrizációs sémákra, így a Thompson sémára is, illetve azért becsülhette ennyire fölé, mert ez a séma kevesebb hó és graupel tartalmat mutatott az SBM-nél. A bulk sémák pontatlansága valószínűleg a látens-hő felülbecsléséből adódik. A szimulációk során a 80. perc elteltével a feláramlási sebessége közötti különbségek csökkentek. Az SBM és a Thompson is érzékeny volt a páratartalomra, mivel, ha azt 10%-kal növelték, akkor az a csapadék mennyiségének megkétszereződéséhez vezetett.



10. ábra: Maximális vertikális sebességek időbeli változása, különböző mikrofizikai séma, kondenzációs mag szám és páratartalom mellett. A betűk a következőket jelentik: a) tiszta levegő-alacsony páratartalom b) közepesen szennyezett levegő-alacsony páratartalom c) szennyezett levegő-alacsony páratartalom d) tiszta levegő-magas páratartalom e) közepesen szennyezett levegő-magas páratartalom f) szennyezett levegő-magas páratartalom (Khain; Lynn 2009).

Az aeroszolok jelenléte a mélykonvekciós folyamatokra, amelyet ez a tanulmány is bemutat, kisebb volt, mint a relatív nedvesség megváltoztatása hatása, hiszen az aeroszolok koncentrációjának 15-szörösére növelése mindössze 10%-kal növelte az SBM sémában a csapadékösszeget, a Thompson sémában meg még ennyivel sem.

A szimulációkban a szupercella dinamikáját az SBM mutatta be jól, mivel a WRF által generált felszállásban a szél jobbra fordul, ez pedig a jobbra kitérő szupercellák fejlődését támogatja. Fontos különbség még a két séma között a csapadék térbeli helyzetének szimulációs eredménye. A Thompson séma érzéketlen volt a cseppecske koncentrációra, míg az SBM nagyon érzékeny volt erre. Ez a különbség abból jöhetett létre, hogy a Thompson séma a hidrometeorok vertikális eloszlására minden szimuláció esetén hasonló képet mutatott.

#### 4.2.7. Egy nagy pusztítást okozó mezociklonális tornádó és szupercella modellezése (Miglietta et al. 2017a)

Dél-Olaszországban 2012. november 28-án egy EF3-as tornádó pusztított, amely 1 halálos áldozatot követelt és 60 millió €-s kárt okozott. A tornádót okozó szupercella a szárazföldön 50 km-t tett meg kb. 50 perc alatt.

A mediterrán térség nagyon különböző a homogén Nagy-Síksághoz képest, mivel míg az USA azon területén a szinoptikus skála alakítja ki az instabilitást, addig ezen a területen az orográfának van nagy szerepe, mégpedig a mezo- $\beta$  és a mezo- $\gamma$  skálájú instabilitás

kialakításában. Az elemzésekből kiderül, hogy ennek az eseménynek mind szinoptikus, mind mezoszínoptikus skálájú támogatás is szükséges volt a létrejöttében.

### *Időjárási helyzet*

A CAPE értéke 1000 J/kg-os volt, amely mérsékeltnek mondható, ellentétben az LCL magasságával, ami 700 m-en volt, amely a Nagy-Síksághoz képest eltérő. Ez az alacsony LCL magasság kedvez a tornádóképződéshez (Rasmussen; Blanchard 1998). A 0–1 km-es SRH értéke  $553 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  volt, amely rendkívül kedvező mezociklonális tornádó kialakulásához. A 900 hPa-os szél megnövelve az alacsony szintű szélnyírást, kedvező feltételeket nyújtott mind a szupercella, mind a mezociklonális tornádó kialakulásához. A középtroposzférában, 500 hPa magasságban a szélsébség meghaladta a 25 m/s-ot, míg 900 hPa-on a Jón-tenger felől meleg nedves levegő szállítódott a terület felé, amíg a középső troposzférában hidegadvekción zajlott, megnövelve a labilitást.

### *Modellbeállítások, szimulációk*

A WRF-ARW 3.5.1-es verziójával dolgoztak, a megszokott parametrizációs sémával. Vertikálisan 40 szinttel modellezték. A modelleredményeket 5 percenként mentették a szupercella-fejlődés vizsgálata érdekében, amely élete kb. 1 óra volt. Három domainnel dolgoztak, melyek 210x150, 271x193 és 211x271 rácspontból álltak.

Különböző kezdeti és peremfeltételeket próbáltak ki, a peremfeltételek 3 óránként frissítették. Az ECMWF-IFS és a GFS analíziseket/előrejelzéseket tesztelték több kezdeti idővel. Ezek közül csak 1 futás tudta reprodukálni a szupercellát, mégpedig az ECMWF-IFS modell 2012 november 27. 00:00 UTC-s futása.

### *Eredmények*

Mivel a rácsávolság 1 km-es volt, ezért nem a tornádót magát, hanem a szupercellát modellezték, hiszen a tornádó a felbontás alatti tartományba esett. Az orográfianak nagy szerepe volt a tornádó kialakulásában. Ha a hegység magasságát a felére csökkentették, akkor a feláramlási helicitás harmadára esett vissza. A hegység magasságának csökkentése fordított arányosságban állt a 0–3 km-es szélnyírással is, minél jobban csökkentették a magasságot, annál kisebb szélnyírási értékeket kaptak. A Sila-hegység kulcsfontosságú volt abban, hogy triggerelje a konvekciót, az orográfia hatását a modell szimulációja képes volt reprezentálni. A pozitív tengerfelszín hőmérséklet anomália is befolyásolta a szupercellát, mivel az esemény idején a megszokotthoz képest 2 fokkal melegebb volt.

#### *4.2.8. A Nagy-Síkság városi területeinek hatása szimulált szupercellákra (Reames; Stensrud 2018)*

Mivel a városok szupercellákra gyakorolt hatása eddig egyáltalán nem kutatott téma, ezért szimulációkat végeztek a szupercellák fejlődésére és erősségére városi területeken belül. A szimulációkat a Dallas-Fort-Worth területre nézve végezték.

##### *Modellbeállítások, szimulációk*

WRF-ARW modellt használtak a modellezésre, 108 szimulációt csináltak, amelyekben hol a város mellett, hol a városon keresztül haladt a szupercella. Három domaint használtak, nem a megszokott felbontással, hanem egy 4,5, egy 1,5 és egy 0,5 km-es felbontásokkal, melyek 300x300, 399x399 illetve 498x498 rácspontból álltak. A modell 119 vertikális szinttel dolgozott. Az időlépcsők rendre 6, 2, és 1 s-ak voltak. NSSL mikrofizikát használtak, a rövid és hosszuhullámú sugárzásra pedig New Goddard-féle sémát. A planetáris határrejteget a YSU sémával modellezték, a földfelszínre pedig módosított Noah LSM sémát alkalmaztak.

##### *Időjárási helyzet*

A modellek egy oklahomai, 2013. május 31-i nap konvektív szempontból rendkívül kedvező időjárási helyzetét használták kezdeti feltételként, amikor is a 4000 J/kg-os CAPE értéke mellett a CIN elhanyagolható mértékű volt. A szélnyírás értékei kedveztek egy szupercellának, 25–30 m/s-os voltak. Ezek mellett az SRH értékei is magasak voltak.

##### *Eredmények*

A szimulációkat csoportokban elemezték, melyre hierarchikus-klaszter analízist használtak, amely segít a rendkívül összetett folyamat potenciálisan fontos kapcsolatainak azonosításában. A klaszter-analízis által a szimulációkat csoportba rendezték és a csoporton belül hasonlították össze a szimulációkat.

A szimulációkból az derül ki, hogy a városoknak leginkább az alacsonyszintű örvényességre és a mezociklon útjára van nagy hatással. Amikor a zivatar a városközponttól északra vagy a városközponton keresztül mozgott, akkor volt a leginkább eltérő az életciklusa a CTRLÉ-től (szimulációk kezdeti együttese). A CTRLÉ-hez hasonlítva ekkor a középszintű mezociklon erősödött, a szimulált szupercella örvényességének maximuma meghaladta a  $0,02 \text{ s}^{-1}$ -ot.

Az egyik legfontosabb eredmény az, hogy a városi területen belül a felszíni szél csökkenése körülbelül 50%-os növekedést okoz a 0–1 km-es SRH esetében. A

csapadékösszeget tekintve nincs statisztikailag kimutatható változás a szupercella útvonalát tekintve.

A zivatar beáramlási régiója melegebb és lassabb volt a felszínen azon szimulációk esetén, amikor a város a zivatar útvonalához képest délre helyezkedett el. Amikor ez az állapot állt fenn, akkor a beáramlás sokkal elnyírtabb volt az alsó 1 km-en.

#### *4.2.9. Időjárási modellek összehasonlítása szupercellák segítségével a DCMIP2016 keretein belül (Zarzycki et al. 2019)*

A DCMIP2016 program keretein belül szupercellákat modelleztek és a kapott eredményeket hasonlították össze. A DCMIP (*Dynamical Core Model Intercomparison Project*), azaz modellek dinamikus magjának összehasonlító projektjében a következő modelleket hasonlították össze: ACME-A, CSU, FV<sup>3</sup>, FVM, GEM, ICON, MPAS, NICAM, OLAM, TEMPEST.

A szupercellás zivatarok azért ideális időjárási jelenségek az ilyen globális léggöri modellek számára, mert a horizontális skálájuk km-es nagyságú, és leírásukhoz szükség van a nem hidrosztatikus megközelítésre.

#### *Modellbeállítások, szimulációk*

A modellek beállítása úgy lett beállítva, hogy a szimulációban a Föld nem forog, a Föld sugara 120-szor kisebb. A planetáris sugarat korlátozták, amely azért hasznos, mert jó horizontális felbontást lehet vele elérni, illetve a nem hidrosztatikus mozgásokat relatíve könnyedén meg lehet vele oldani. A teszt során különböző konstansokkal dolgoztak, például a tropopauza magassága 12 km, hőmérséklete  $-60\text{ °C}$ , a szélnyírás 0–6 km között 30 m/s. A CAPE értéke 2200 J/kg-osra lett beállítva. A modell teteje 20 km magasan található, a vertikális rácsponatok között a távolság 500 méter, így 40 rácspontra található a modell alja és teteje között. A felszínt súrlódásmentesen kezelték. A modell Kessler-féle mikrofizikával lett ellátva. Integrálási ideje 2 órán át tartott. A kimenő adatokat 15 percenként regisztrálták. A csökkentett sugár azt eredményezi, hogy a rács távolságok rendre 4, 2, 1, 0,5 km-esek lehetnek.

#### *Eredmények*

A szupercella evolúciója nagyon hasonló a modellek esetében, viszont a végkimenetekben vannak különbségek. A különbségek valószínűleg abból adódnak, hogy a numerikus diszkretizálásokban, a numerikus diffúzióban, illetve a dinamikai leírásban

különböznek a modellek. A modellekben a 0,5 km-es felbontás még stabil volt, de a 0,25 km-es felbontáson csak 2 modell futott le.

Az összes modell eredményében vannak hasonlóságok a szupercellák általános szerkezetét tekintve. Ilyenek például a leáramlás, amely a feláramlás keleti oldalán található vagy egykaréjos vagy két karéjos alak az összes szimuláció esetén. A NICAM, FV<sup>3</sup>, OLAM és ICON modellek esetén a kettéválás sokkal látványosabb volt, mint a többi modellnél.

Két óra perc elteltével nagyobb lett a különbség a modellek között, az FVM, GEM, ACME-A, OLAM és a MPAS modellek két szupercellát prognosztizáltak míg a FV<sup>3</sup> és TEMPEST modellek hosszan elnyúló zivatarokat és két új cellát mutattak.

Az eredmények azt mutatják, hogy nagy a különbség még akkor is, ha a dinamikus magok ugyanazon felbontásokra készítik el a prognózist.

#### *4.2.10. Alacsony számításgényű modell és X-sávú radar alkalmazása egy hamburgi mezociklonális tornádó reprodukálásában (Hoffmann et al. 2018)*

Hamburg 2016. június 7-én külterületén egy tornádó alakult ki, amely mindössze 13 percen keresztül létezett és 1,3 km-t tett meg. A tanulmány lényege, hogy X-sávú radarral és a CCAM kis számításgényű modellel pontosan előre lehetett jelezni ezt a kisskálájú folyamatot.

A német nemzeti radarokkal szemben az X-sávú radar a jobb felbontásából adódóan képes volt kimutatni a hook echót. A nagyfelbontású előrejelzést a tornádóval egy CCAM nevű modellel végezték, amely képes volt előrejelezni a tornádót a keletkezése előtt pár órával.

#### *X-sávú radarok*

A nagyfelbontású X-sávú radarok részletesebb információkat képesek adni mind térben, mind időben, mint például a csapadékos eseményekről. Az X-sávú radarok 3,2 cm hullámhosszal működnek, amely az egyik leggyakrabban használt [5-met.hu].

Az X-sávú radarok felbontása 4-szer, míg időbeli felbontásuk 6-szor jobb a C-sávú radarokénál, viszont hatótávolságuk mindössze 20 km, szemben a C-sávú radarok 150 km-es hatótávolságával. Az itt használt radar felbontása 60 méteres térben és 30 s-os időben. A tanulmányban, ezzel a felbontással a radar képes volt észlelni a hook echót (kampós echó), amelyet a szupercellákra jellemző forgómozgás alakít ki. A radar által mért legmagasabb reflektivitás 69,7 dBZ értékű volt, amely 474 mm/órás csapadékinzintitásnak megfelelő értéket jelent.

### *Modellbeállítások, szimulációk*

A CCAM (*Conformal Cubic Atmospheric Model*) egy nyílt forráskódú, nem hidrosztatikus, globális, feszített rácsú modell. A mikrofizikára egy egymomentumos sémát alkalmaztak, amely folyékony vizet, jeget, havat és graupelt tartalmaz. A modell kezdeti feltételei az NCEP analízisből származtak. Három lépéses leskálázást alkalmaztak az 1 km-es felbontás elérése érdekében.

### *Időjárási helyzet*

Az alsó középtroposzférában, 700 hPa-on egy száraz réteg helyezkedett el, 12 UTC-kor a CAPE értéke 392 J/kg-os volt, 860 méter magasan egy alacsonyszintű jet húzódtott. Németország területe felett egy konvergenciavonal épült ki, amely kelet felé mozgott. A szélnyírás a rádiószondás felszállás szerint elhanyagolható volt, amely nem kedvezett volna szupercella kialakulásának, ezt az akadályt a konvergenciavonal döntötte le. A meleg és nedves határrétegnek és a konvergenciavonal emelő mechanizmusának a segítségével ki tudtak alakulni zivatarok Nyugat- és Észak-Németországban. A tornádót egy helyben álló szupercella hozta létre.

### *Eredmények*

A CCAM által modellezett a tornádó ugyanabból a cellából keletkezett, mint a valóságban, de a cella útját a modell néhány rácsponttal odébb tette. Az előrejelzett csapadékmennyiség a fele volt az X-sávú radar által mértnek, ez a CCAM kisebb felbontásának eredménye. A zivatar fejlődése gyorsabb volt a modell szerint, mint a valóságban. A CCAM modell által készített előrejelzésnek kiszámítása 3 órát vett igénybe egy laptop segítségével, és jól adta vissza a valóságban megtörtént eseményeket.

## 5. Összefoglalás

A szupercellás zivatarok a legveszélyesebb időjárási jelenségek közé tartoznak. Pusztító villámárvizeket, jégesőket és tornádókat hozhatnak létre, amelyek jelentős károkat okozhatnak. Kutatásuk az 1950-es évekre nyúlik vissza, hiszen már ekkor felismerték, hogy ezek a legveszélyesebb zivatarfajták.

Szakedolgozatomban bemutatásra került a szupercellák felépítése és kísérőjelenségeik, illetve a dinamikájuk, amelynek megértése fontos mind előrejelzési, mind modellezési szempontból. A dolgozat második részében esettanulmányokon keresztül bemutattam a szupercellák modellezési lehetőségeit, mivel számtalan féleképpen vizsgálják és rendkívül sok oldalról közelítve tanulmányozzák ezen zivatarok működését.

A modellek fejlődésével lehetővé vált, hogy az ilyen bonyolult folyamatokat is reprodukálni tudjunk és ezáltal jobban megértsünk, és pontos előrejelzésükkel akár emberek életét is megmentünk. Fontos tanulság, hogy a modellek mind nagy térbeli felbontással dolgoztak, illetve, hogy mennyire jelentős a parametrizációk szerepe, például a cumulus konvekció elhagyása vagy a megfelelő mikrofizikai séma megválasztása. A kezdeti feltételeket általában a korlátos tartományú modellek egy globális modellből nyerték, így ezek a kisebb felbontású modellek is nélkülözhetetlen a szupercellák modellezésének szempontjából. A WRF modellt használták a legtöbb tanulmányban, ez valószínűleg a modell sokszínűségéből adódik, mivel nyílt forráskódú, így bárki számára elérhető és rengeteg opciót kínál a felhasználó részére.

## 6. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, dr. Breuer Hajnalkának a témaválasztásban nyújtott segítségével és a nehéz, vagy csak nehéznek tűnő matematikai rész magyarázásáért és hasznos tanácsaiért, amelyek segítettek megérteni a szupercellák működését és a szakdolgozatom elkészülését.

Hatalmas köszönettel és hálával tartozom Sike Diánának, a barátnőmnek, aki végig támogatott, ösztönzött, de mindenekelőtt szeretett, és fantasztikus angol tudásának hála a lehetetlennek tűnő angol szövegek lefordításával lehetővé tette, hogy elkészüljön a szakdolgozat.

Szeretném még megköszönni a családomnak, legfőképpen a szüleimnek, akik végig támogattak a gyerekkorom óta tartó meteorológia iránti rajongásom megőrzésében és erősítésében.

## 7. Irodalomjegyzék

- Allen, J. T., 2017: Hail potential heating up. *Nature Climate Change*, **7**, 474.
- Appleman, H., 1959: An investigation into the formation of hail. *Nubila*, **2**, 28-37.
- Bluestein, H. B., 2013: Severe convective storms and tornadoes. *Springer*, **10**, 978-973.
- Calianese, E. J., J. K. Jordan, E. B. Curran, A. R. Moller, and G. Woodall, 2002: The Mayfest high-precipitation supercell of 5 May 1995—A case study. *Preprints, 21st Conf. on Severe Local Storms, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc.*, 105-108.
- Das, M. K., S. Das, M. A. M. Chowdhury, and S. Karmakar, 2016: Simulation of tornado over Brahmanbaria on 22 March 2013 using Doppler weather radar and WRF model. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **7**, 1577-1599.
- Dixon, P. G., A. E. Mercer, J. Choi, and J. S. Allen, 2011: Tornado risk analysis: Is Dixie alley an extension of tornado alley? *Bulletin of the American Meteorological Society*, **92**, 433-441.
- Doswell, C. A., and D. W. Burgess, 1993: Tornadoes and tornadic storms: A review of conceptual models. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, **79**, 161-161.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the atmospheric sciences*, **46**, 3077-3107.
- Fujita, T. T., and R. M. Wakimoto, 1981: Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980. *Monthly weather review*, **109**, 1438-1456.
- Gagan, J. P., A. Gerard, and J. Gordon, 2010: A historical and statistical comparison of “Tornado Alley” to “Dixie Alley.”. *Natl. Wea. Dig.*, **34**, 145-155.
- Guarriello, F., C. J. Nowotarski, and C. C. Epifanio, 2018: Effects of the Low-Level Wind Profile on Outflow Position and Near-Surface Vertical Vorticity in Simulated Supercell Thunderstorms. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **75**, 731-753.
- Gy, B., Á. Bordás, G. Gy, Á. Havasi, Á. Leelőssy, R. Mészáros, and G. Szépszó: Tasnádi P.(szerkesztő), Weidinger T.(szerkesztő), 2013: Klasszikus dinamikus meteorológiai feladatgyűjtemény II. *Eötvös Loránd Tudományegyetem*.
- Hoffmann, P., C. Merker, K. Lengfeld, and F. Ament, 2018: The Hamburg Tornado (7 June 2016) from the perspective of low-cost high-resolution radar data and weather forecast model. *Atmospheric Research*, **211**, 1-11.
- Horváth, Á., 2007: A légköri konvekció. *Országos Meteorológiai Szolgálat*, **64**.
- Horváth, Á., and I. Geresdi, 2001: Severe convective storms and associated phenomena in Hungary. *Atmospheric research*, **56**, 127-146.
- Horváth, Á., I. Geresdi, P. Németh, and F. Dombai, 2007: The Constitution Day storm in Budapest: Case study of the August 20, 2006 severe storm. *Id járás*, **111**, 41-63.
- Janić, Z. I., 2001: Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model.
- Khain, A., and B. Lynn, 2009: Simulation of a supercell storm in clean and dirty atmosphere using weather research and forecast model with spectral bin microphysics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **114**.
- Lemon, L. R., and C. A. Doswell III, 1979: Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. *Monthly Weather Review*, **107**, 1184-1197.

- Markowski, P., and Y. Richardson, 2011: *Mesoscale meteorology in midlatitudes*. Vol. 2, John Wiley & Sons.
- Markowski, P. M., 2002: Hook Echoes and Rear-Flank Downdrafts: A Review. *Monthly Weather Review*, **130**, 852-876.
- Marshall, J. S., and W. M. K. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *Journal of meteorology*, **5**, 165-166.
- Miglietta, M. M., A. Manzato, and R. Rotunno, 2016: Characteristics and predictability of a supercell during HyMeX SOP1. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **142**, 2839-2853.
- Miglietta, M. M., J. Mazon, and R. Rotunno, 2017a: Numerical simulations of a tornadic supercell over the Mediterranean. *Weather and Forecasting*, **32**, 1209-1226.
- Miglietta, M. M., J. Mazon, V. Motola, and A. Pasini, 2017b: Effect of a positive Sea Surface Temperature anomaly on a Mediterranean tornadic supercell. *Scientific reports*, **7**, 12828.
- Milbrandt, J., and M. Yau, 2005: A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II: A proposed three-moment closure and scheme description. *Journal of the atmospheric sciences*, **62**, 3065-3081.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **102**, 16663-16682.
- Moller, A., 1990: High-precipitation supercells: A conceptual model and documentation. *Preprints 16th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc.*, 52-57.
- Moncrieff, M., and M. Miller, 1976: The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **102**, 373-394.
- Monfredo, W., 2011: Investigation into the record hailstone on 23 July 2010 at Vivian, South Dakota, USA. *Weather*, **66**, 216-221.
- Newton, C. W., and C. S. Katz, 1958: Movement of Large Convective Rainstorms in Relation to Winds Aloft. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **39**, 129-136.
- Niu, G. Y., and Coauthors, 2011: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **116**.
- Pielke, R. A., and Coauthors, 1992: A comprehensive meteorological modeling system—RAMS. *Meteorology and atmospheric Physics*, **49**, 69-91.
- Pilgus, N., M. Taszarek, Ł. Pajurek, and M. Kryza, 2019: High-resolution simulation of an isolated tornadic supercell in Poland on 20 June 2016. *Atmospheric Research*, **218**, 145-159.
- Rasmussen, E. N., 2003: Refined Supercell and Tornado Forecast Parameters. *Weather and Forecasting*, **18**, 530-535.
- Rasmussen, E. N., and D. O. Blanchard, 1998: A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters. *Weather and Forecasting*, **13**, 1148-1164.
- Reames, L. J., and D. J. Stensrud, 2018: Influence of a Great Plains urban environment on a simulated supercell. *Monthly Weather Review*, **146**, 1437-1462.
- Rotunno, R., J. B. Klemp, and M. L. Weisman, 1988: A Theory for Strong, Long-Lived Squall Lines. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **45**, 463-485.
- Seity, Y., and Coauthors, 2011: The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Monthly Weather*

- Review, **139**, 976-991.
- Showalter, A. K., 1953: A stability index for thunderstorm forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **34**, 250-252.
- Skamarock, W., and J. Klemp, 2005: Coauthors, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2005: A description of the advanced research WRF version 2.
- Smith, J. A., M. L. Baeck, Y. Zhang, and C. A. Doswell III, 2001: Extreme rainfall and flooding from supercell thunderstorms. *Journal of Hydrometeorology*, **2**, 469-489.
- Thompson, G., P. R. Field, R. M. Rasmussen, and W. D. Hall, 2008: Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Monthly Weather Review*, **136**, 5095-5115.
- Trapp, R. J., 2013: *Mesoscale-convective processes in the atmosphere*. Cambridge University Press.
- Van Den Heever, S. C., and W. R. Cotton, 2004: The impact of hail size on simulated supercell storms. *Journal of the atmospheric sciences*, **61**, 1596-1609.
- Walko, R. L., W. R. Cotton, M. Meyers, and J. Y. Harrington, 1995: New RAMS cloud microphysics parameterization part I: the single-moment scheme. *Atmospheric Research*, **38**, 29-62.
- Zarzycki, C. M., and Coauthors, 2019: DCMIP2016: the splitting supercell test case. *Geoscientific Model Development*, **12**, 879-892.

[1-met.hu]

<http://owww.met.hu/pages/bogacs20080714.php> [olvasva:2019.05.10.]

[2-met.hu]

[https://www.met.hu/omsz/OMSZ\\_hirek/index.php?id=1502&hir=ECMWF\\_modell\\_horizontalis\\_felbontasa\\_mar\\_10\\_km\\_alatt\\_van](https://www.met.hu/omsz/OMSZ_hirek/index.php?id=1502&hir=ECMWF_modell_horizontalis_felbontasa_mar_10_km_alatt_van) [olvasva:2019.05.14.]

[3-NCEP]

<https://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/doc.php> [olvasva:2019.05.14.]

[4-weather.uwyo.edu]

<http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=europe&TYPE=PDF%3ASKEWT&YEAR=2012&MONTH=11&FROM=2812&TO=2812&STNM=16320> [olvasva:2019.04.29.]

[5-met.hu]

[https://www.met.hu/ismertetok/radar\\_ismerteto.pdf](https://www.met.hu/ismertetok/radar_ismerteto.pdf) [olvasva:2019.05.05.]