

Pécsi Tudományegyetem

Földtudományok Doktori Iskola
Meteorológia Program

A légköri mikrofizikai parametrizációk hatása a szupercellás zivatarok numerikus modellezésének eredményére

A PhD értekezés tézisei

Csirmaz Kálmán

Témavezető:
dr. Geresdi István
egyetemi tanár

PÉCS, 2015

1. Tudományos előzmények és célkitűzések

A jégeső az időjárás-eredetű károk nagy hányadáért felelős, emiatt a jégeső egzisztenciájának, a felszínre hulló jégszemek méretének előrejelzése, illetve a jégeső keletkezésével kapcsolatos kutatások alapvető fontosságúak. Az ilyen, előrejelzés igénye szülte kutatásoknak köszönhetően ma már kellően sokat tudunk ahhoz, hogy a jégeső egzisztenciára becslést adjunk, azaz egy adott időjárási helyzetről eldöntsük, hogy az mennyire jégveszélyes. Ugyanakkor a jégszemméret előrejelzése már jóval bizonytalanabb kimenetelű feladat, rövid- és ultrarövidtávon egyaránt. Köszönhető ez annak, hogy a jégszem átmérőjét megbecsülni hivatott módszerek a légkör – rádiószondás felszállások, vagy numerikus modellfuttatások alapján felmért – állapota és a várható maximális méret között többnyire statisztikai alapon, minimális fizikai megfontolással, a folyamatokat túlságosan leegyszerűsítve teremtenek kapcsolatot. Ezek a módszerek többek között nem veszik figyelembe azt a két tényt, hogy 1) a zivatarfelhőkben a mikrofizikai és a dinamikai folyamatok között számos visszacsatolási mechanizmus létezik, amelyek pontos figyelembevétele lényeges az előrejelzés szempontjából; 2) a felszínre hulló jégszemek méretspektruma igen széles lehet, így egy adott zivatarfelhőn belül is térben és időben változatos méretű jégszemek hullhatnak.

A nagy felbontású, nem-hidrosztatikus modellek elterjedésével a fenti folyamatok és problémák megfelelő térbeli részletességgel leírhatók és kezelhetők. Ezekkel a modellekkel mind a jégesők kialakulása, mind pedig a jégesőket előidéző zivatarok explicit módon előrejelezhetők. Ezeket a képességeket kihasználva, jelen disszertáció keretei között egy olyan újfajta jégszemméret előrejelzési módszert mutatunk be, amely egy nagy felbontású, nem-hidrosztatikus numerikus modell, a WRF explicit jégeső

előrejelzésére épül. Megmutatjuk, hogy a modellszimulációk eredményeire – zivatarfelhő dinamikai és mikrofizikai tulajdonságaira – jelentős hatással van a horizontális felbontás is.

2. Kutatási módszerek

Numerikus kísérleteinket és az újonnan kifejlesztett, maximális jég szemméretet számoló módszer tesztelését a valóságban lezajlott konvektív folyamat numerikus modellezésével végeztük el. A számítások elvégzéséhez a WRF-ARW modell 3.1.1-es verzióját használtuk. A numerikus kísérletet menetét az alábbi pontokban vázoljuk:

1. Olyan időjárási eseteket kerestünk, amelyek során megbízható információ állt rendelkezésre a felszínre hulló jég szemek méretére vonatkozóan – leginkább fényképes dokumentációk, illetve egyéb, közvetett információk formájában, mivel pontos felszíni jég szemméret mérések a 90-es évek eleje óta nem készülnek Magyarországon. Emiatt a hazai C-sávú radarmérésekre is támaszkodtunk, amelyek közvetlenül nem alkalmasak a felhőben előforduló – és legfőképpen a felszínre érkező – jég szemek méretének megbecslésére. Ugyanakkor az egyéb, a visszavert jel intenzitásával arányos mennyiségek, többek között a radarreflektivitás, illetve egyes polarizációs mennyiségek közvetetten utalhatnak jégesős zivatar létezésére.
2. A WRF modellel – két különböző horizontális felbontást használva – szimuláltuk a kiválasztott időjárási helyzetet. Ezt követően megvizsgáltuk, hogy a modell milyen pontosan volt képes modellezni a megfigyelt jégesős

zivatart. Ehhez az időjárési radarral mért reflektivitás értékeket a modell mikrofizikai kimeneti mezőiből számolt reflektivitás értékekkel hasonlítottuk össze. Ez a módszer korábbi vizsgálatainkban is megfelelőnek bizonyult a modell validálására.

3. Megvizsgáltuk azt is, hogy a modell horizontális felbontásának milyen hatása van a szimulált zivatark mikrofizikai tulajdonságaira, különös tekintettel a bennük lezajló hó-dara-/jégszemképződési folyamatokra és a számolt maximális jégszemméretre.
4. Ezt követően meghatároztuk a zivatarfelhőhöz tartozó maximális jégszemméretet, és az eredményt összevetettük a megfigyelésekkel.

A kísérletekhez a WRF futás során ún. egyirányú (*one-way*) nestelési technikát alkalmaztunk. Ez azt jelenti, hogy a fő futási területbe kettő, egymásba ágyazott nestet helyeztünk el, amelyeken eltérő horizontális felbontás mellett végeztük a szimulációt. A kiindulási és oldalsó peremfeltételeket a legbelső nesthez a közbülső nest, a közbülső nesthez pedig a fő domain eredményei szolgáltatták. A fő domainhez az ECWMF globális modell nyújtotta a kezdeti és oldalsó peremfeltételeket. A legbelső nest felbontását 100 m-nek, a közbülső nestét 2 km-nek, a fő futási területét pedig 6 km-nek választottuk. A 100 m-es rács-távolság választását az indokolta, hogy numerikus vizsgálatok alapján a konvektív eredetű folyamatokat ezen a felbontáson lehet fizikailag a leghalványabban és legkonzisztensebben leírni. A modellt minden esetben a Thompson-féle, egymomentumos mikrofizikai sémával futtattuk. A séma öt hidrometeor kategóriát tartalmaz: felhőcseppek, esőcseppek, jégkristályok (felhőjég), hó-pelyhek, valamint hó-dara-/jégszemek. A séma explicite nem tesz különbséget a hó-daraszemek és a jégszemek között. Az ebbe hidrometeor kategóriába tartozó részecskék esetében a néhány milliméteres méretnél kisebb részecskékre a hó-dara tulajdonságai (pl. kisebb sűrűség), az ennél nagyobb részecskékre a

jégszemek tulajdonságai a jellemzők. A hódara-/jégszemek méret szerinti eloszlását a Thompson sémában gamma eloszlással közelítik.

A maximális jégszemméret meghatározását, valamint a dinamikai és a mikrofizikai tulajdonságok összehasonlítását a modell η -szintű és térképvetületi rendszerében végeztük el 2 km-es, valamint 100 m-es felbontású nesten. A mikrofizikai tulajdonságok vertikális keresztmetszetekben történő ábrázolásához a kimeneti mezőket descartes-i koordinátarendszerbe transzformáltuk (a vertikális tengelynek a tengerszint feletti magasságot választva). A kimeneti mezőket öt, illetve egyperces időbeli sűrűséggel állítottuk elő (abban az időszakban írtuk ki sűrűbben az eredményeket, amikor a zivatar a 100 m-es felbontású nestben tartózkodott).

A felbontástól való függés vizsgálata során kiértékeljük az egyes, a Thompson-sémában a hódara-/jégszem kialakulását vagy növekedését eredményező folyamatokat. Ezek a következők: túlhűlt esőcseppek heterogén fagyása; túlhűlt esőcseppek fagyása jégkristályokkal történő ütközés következtében; hópolyhek autokonverziója zúzmarásodás hatására; majd zúzmarásodással történő átalakulása hódara-/jégszemmé; a hódara-/jégszem depozíciója; illetve szublimációja; a hódara-/jégszem ütközése eső-, illetve felhőcseppekkel.

A maximális jégszemméret meghatározása a következő módon történt: a Thompson-séma minden időlépcsőben meghatározza a rácshálón a hódara-/jégszemek keverési arányt, amelyből minden időpillanatban megadhatók a méret szerinti eloszlás paraméterei. Az eloszlás alakjának ismeretében kiszámolható, hogy tetszőleges méretintervallumban mekkora a hódara-/jégszemek koncentrációja. Az eloszlást leíró sűrűségfüggvény alakjából következően az is analitikusan kiszámolható, hogy mekkora az egy, előre meghatározott méretküszöböt meghaladó hódara-/jégszemek koncentrációja. Ebből következően a maximális jégszemméretnek azt a méretet tekintjük, amely felett a hódara-/jégszemek koncentrációja már elhanyagolható. A koncentrációt 10^{-4} m^{-3} -os küszöb alatt tekintettük

elhanyagolhatóan, a hozzá tartozó hódara-/jég szem méretet a Newton-Raphson-féle iteráció alkalmazásával kerestük meg. A számításokat minden esetben a legalsó modellszinten végeztük, mivel ez a szint a talaj felett néhányszor tíz méteres magasságban található, így innen a jég szemek már jelentősebb olvadás nélkül hullnak a felszínre.

3. Az eredmények összefoglalása

A kutatás főbb eredményei pontokba szedve a következők:

1. A kísérletekhez és vizsgálatokhoz egy olyan konkrét esetet modelleztünk, amikor zivatarból nagyméretű, jelentős kárt okozó jég hullott. A választott eset 2009. június 7-en történt, amikor is egy intenzív szupercella vonult végig az ország északkeleti részén, a Nyírségben több településen hatalmas jégkárokat okozva. A szinoptikus helyzetet, valamint a zivataros környezet elemezve megállapítottuk, hogy a légköri feltételek kedveztek a szupercellák kialakulásának. A radarmérések vizsgálata szintén megerősítette a jégesős zivatar szupercellás jellegét: hosszú, mintegy 3 és fél óras élettartam; izolált jelleg; magas reflektivitási értékek; a PPI méréseken megfigyelt kampós echó alak; ezzel összefüggésben gyenge reflektivitású terület (WER) jelentkezése; a vertikális keresztmetszeteken az átnyúlás, valamint a körülhatárolt gyenge reflektivitású betüremkedés (BWER) megjelenése; a radiális széltérképeken a ciklonális örvénylés jelenléte. A vizuális megfigyeléseken túl, amelyek 4 cm körüli jégátmérőről számoltak be, nagyméretű jég szemek jelenlétére utaltak a radarral végzett duál-

polarizációs mérések is. A rendelkezésre álló polarizációs mennyiségek közül a jégjel (HDR) alakulását vizsgáltuk meg, és azt találtuk, hogy ez a paraméter ebben a helyzetben megfelelő indikátora volt a nagyméretű, károkozó jég szemek jelenlétének. A megfigyelések részletes tárgyalását a 4.1.1. alfejezet tartalmazza.

2. Elvégeztük az esetre a WRF modellfutás validációját. Ehhez összehasonlítottuk a modellezett és a mért reflektívítási értékeket a 2 km-es és a 100 m-es felbontású nesten egyaránt. Az összehasonlítás alapján a modell jó közelítéssel képes volt visszaadni a zivatar valós reflektívítási struktúráját mindkét felbontás esetében. Ugyanakkor, míg a 2 km-es felbontáson a méréshez képest alábecsülte a zivatarhoz tartozó maximális reflektívítást, addig a 100 m-es felbontás esetén már nagyobb intenzitás értékeket adott a modell, ami jó közelítéssel megegyezett a tényleges értékekkel. Megvizsgáltuk azt is, hogy modell mennyire volt képes szimulálni a zivatar dinamikáját és szupercellás jellegét. Ehhez a vertikális örvényesség maximumának alakulását követtük a szimulált zivatarban. Az eredmények alapján elmondható, hogy bár mindkét nesten olyan zivatar jelent meg a modell terében, amelyhez tartós, középszintű rotáció is társult, az ultrafinom felbontás esetében a vertikális örvényesség lényegesen intenzívebbnek adódott, mint a 2 km-es felbontás esetében. Azaz a finomabb felbontású szimulációban – a megfigyelésekkel jobban egyezően – sokkal markánsabbak voltak a zivatar szupercellás jegyei. A validáció részletes eredményeit a 4.1.2-es alfejezet tartalmazza.

3. Megvizsgáltuk, hogy a szimulált szupercella mikrofizikai tulajdonságai hogyan változnak a horizontális felbontás függvényében. A vizsgálatok alapján a következő megállapításokat tehetjük:

- A finomabb felbontású nesten végzett szimuláció jóval nagyobb maximális, felhőbeli hódara-/jégszem, illetve esővíz keverési arányokat produkált, mint a durvább felbontású szimuláció. Ugyanakkor nem mutatkozott lényeges különbség a hópéhely keverési aránya esetében. A felhővíz mennyiségben sem adódott szignifikáns eltérés a kétféle felbontáson. A felhőjég keverési arányok esetében a 2 km-es nest-en jóval nagyobb értékeket számolt a modell, mint a finomabb felbontás esetében.
- A 100 m-es nesten a nagyobb maximális hódara-/jégszem keverési arány főként a szignifikánsan nagyobb mértékű heterogén fagyásnak köszönhető. Emellett a nagyobb felbontás esetében lényegesen hatékonyabb a hódara-/jégszemek és a felhőcseppek közötti ütközés. Ezzel szemben a túlhűlt vízcseppeknek jégkristályokkal történő ütközése jóval nagyobb hódara-/jégszem tömeget generál a durvább felbontáson, mint a 100 m-es nest-en.
- A nagyobb maximális hódara-/jégszem keverési arány a 100 m-es nesten az erősebb feláramlásnak köszönhető, mivel az erősebb feláramlás nagyobb hódara-/jégszem tömeget képes a levegőben tartani, másrészt erőteljesebb felfelé irányuló vízgőzfluxust eredményez, ami hatékonyabb felhőelemképződéshez vezet. A nagyobb mennyiségű felhőelem pedig az ütközések révén több hódara-/jégszemet eredményez. Az intenzívebb felhőelemképződés ugyanakkor növeli a látens hő felszabadulást is, ami tovább erősíti a feláramlást (pozitív visszacsatolás).
- A nagyobb maximális hidrometeor keverési arányok a nagyobb közegellenállási erő, a jelentősebb olvadás, valamint párolgás miatt erőteljesebb leáramlásokat eredményeztek a 100 m-es felbontáson a 2 km-es felbontáshoz képest. Mindez – a korábbi

esettanulmányokkal összhangban – a zivatarok mikrofizikai folyamatai és áramlási viszonyai közötti erős kölcsönhatást bizonyítja.

- A finomabb felbontású számítások esetén a zivatarban lényegesen nagyobb hódara-/jégszem keverési arányok alakultak ki a felszínen, mint a durvább felbontású szimuláció esetében, helyenként az eltérés elérte az egy nagyságrendet is. Ez a különbség a közepes magasságokon (3 – 9 km) tapasztalt nagyobb hódara-/jégszem mennyiséggel magyarázható.
- Nemcsak a maximális felszíni hódara-/jégszem keverési arány adódott jelentősen nagyobbak a finomabb felbontás esetén, hanem az átlagos felszíni hódara-/jégszem mennyiség is. Ugyanakkor a durvább felbontású szimuláció esetén a hódara-/jégszem tömege nagyobb területen oszlott el a finomabb felbontáshoz képest. Mindez azt jelenti, hogy a finomabb felbontású zivatar jelentősebb hódara-/jégszem csapadékot produkált egy-egy rácspontban a felszínen, ugyanakkor a csapadék kisebb területen volt jellemző, mint a 2 km-es szimuláció esetében.
- A vertikális keresztmetszetek vizsgálata alapján a zivatar morfológiája mindkét felbontáson hasonlóan adódott, viszont az egyes kvantitatív jellemzők (pl. feláramlás, leáramlás nagysága, a maximális hidrometeor keverési arányok, a számított radarreflektivitás) értékében már jelentős különbségeket találtunk. A 100 m-es felbontású zivatar minden tekintetben intenzívebb volt a 2 km-es rácshálón szimulálthoz képest.
- A vertikális keresztmetszeteken kiértékeljük a hódara-/jégszem kialakulásához és növekedéséhez vezető mikrofizikai folyamatokat is. A hódara-/jégszem mennyiség legnagyobb hányada a 3 és 9 km-es szintek közötti rétegben keletkezett mindkét nesten, e réteg alatt, illetve fölött a hódara-/jégszem részecskék jelenléte az advekción

folyamatoknak, valamint a kihullásnak köszönhető. A legintenzívebb hódara-/jég szemképződés mindkét esetben a túlhűlt esőcseppek és jégkristályok ütközése következtében valósult meg. Ennél kisebb jelentőségűnek adódott a túlhűlt esőcseppek heterogén fagyása, amely a 100 m-es nesten meghatározóbbnak bizonyult, mint a 2 km-es nesten. A fagyáshoz hasonlóan szintén alacsonyabb maximális értékekkel rendelkezik a hódara-/jég szemek növekedése felhő- illetve esőcseppekkel történő ütközéssel. Ez a két folyamat a felhő jóval nagyobb térfogatára terjedt ki, mint az előzőekben említett folyamatok. A felhőcseppekkel történő ütközés mindkét felbontáson hatékonyabb hódara-/jég szemképződést eredményezett az esőcseppekkel történő ütközéshez képest.

- A hódara-/jég szem kialakulását és növekedését eredményező mikrofizikai folyamatok felhő térfogatra összegzett mennyiségének időbeli változását is vizsgáltuk mindkét felbontáson. Ehhez a felhőt vertikálisan három rétegre bontottuk: 8-14 km; 3-8 km; illetve 0-3 km.
- 8 km-es szint felett a hódara-/jég szemek főleg a túlhűlt vízcseppek heterogén fagyásával keletkeztek, és a felhőcseppek gyűjtésével növekedtek. A finomabb felbontás esetén hatékonyabb hódara-/jég szem képződés és növekedés valósult meg ebben a rétegben, emellett a nagyobb vertikális sebesség is hozzájárult a nagyobb összes hódara-/jég szem tömeghez. A hódara-/jég szem részecskék képződése döntően a 3 és 8 km közötti rétegben zajlott. A teljes hódara-/jég szem mennyiség ebben a rétegben a durvább felbontáson nagyobbak adódott, mint a 100 m-es szimuláció esetében. Ez pont ellentétes a maximális keverési arányok esetében tett megállapításokkal. A legtöbb hódara-/jég szem részecske a túlhűlt esőcseppek jégkristályokkal történő ütközése során és a túlhűlt vízcseppek heterogén fagyásával alakult ki. A durvább

felbontáson az előbbi folyamat igen hektikus képet mutat, és esetenként jelentősen hatékonyabbnak bizonyult, mint a finom felbontású zivatar esetében. Ami a heterogén fagyást illeti, a finomabb szimuláció esetében ez hatékonyabb hódara-/jégszem produkáló folyamatnak bizonyult a kisebb felbontású szimulációhoz képest. Végül, a hópelyhek és esőcseppek ütközése a finomabb felbontáson elhanyagolható folyamatnak bizonyult, míg a 2 km-es nesten nem elhanyagolható mértékben járult hozzá a hódara-/jégszem képződéséhez a 3 és 8 km közötti rétegben. A hódara-/jégszemek felhő-, illetve vízcseppek gyűjtésével növekedtek ebben a rétegben. A felhőcseppekkel történő ütközés mindkét felbontáson hatékonyabb hódara-/jégszemképződést eredményezett az esőcseppekkel történő ütközéshez képest. A 3 km alatti, döntően 0 °C-nál magasabb hőmérsékletű rétegben a hódara-/jégszem részecskék képződése és növekedése elhanyagolható mértékű volt mindkét szimuláció esetében.

- Ami a teljes zivatarra összegzett hódara-/jégszem tömeget illeti, ez mindkét szimuláció esetén hasonlóan alakult, azaz a felbontásnak alig volt hatása a zivatarban kialakuló összes hódara-/jégszem mennyiségére. Mindkét esetben az összes mennyiség legnagyobb hányada elsősorban esőcseppek és jégkristályok ütközésével, másodsorban túlhűlt esőcseppek heterogén fagyásával keletkezett. Ugyanakkor a durvább felbontáson nem elhanyagolható mértékben járult hozzá a hódara-/jégszemek képződéséhez az esőcseppek és hópelyhek ütközése, míg ez a folyamat a 100 m-es nesten elhanyagolhatónak mutatkozott. Az így kialakult hódara-/jégszem részecskék ezt követően a felhő- és esőcseppek gyűjtésével növekedtek. Mindkét felbontáson a felhőcseppekkel történő ütközés lényegesen felülmúlta az esőcseppekkel történő ütközés hatékonyságát.

4. Mivel a kétféle szimuláció szignifikánsan eltérő hódara-/jég szem keverési arányokat produkált a felszínen, így a kapott maximális lehetséges jég szem méretben is jelentős különbségek mutatkoztak. A finomabb felbontás esetében a maximális jég szem méret lényegesen nagyobbak (~5 cm) adódott, mint a kisebb felbontás esetében (~2,5 cm). Az előbbi értékek jó közelítéssel megegyeztek a megfigyelt értékekkel. Nemcsak a maximális jég szem méret adódott nagyobbak a 100 m-es szimuláció esetében, hanem a nagyméretű (2 cm feletti) jég szemek által érintett terület nagysága is. Mindez azt bizonyítja, hogy a felbontás növelésével jelentősen javulhat a maximális jég szem méret előrejelzésének megbízhatósága.

4. Az eredmények hasznosításának lehetőségei

A dolgozatban áttekintést nyújtottunk a jégesős zivatarok hazai modellezésében elért eredményeinkről, amelyek 1) bemutatják a szimulált radarreflektivitásnak a numerikus modellek validációjában történő alkalmazhatóságát; 2) megmutatják a numerikus modellek horizontális rácsfelbontásának a hatását a modellezett, jégesős zivatarok mikrofizikai tulajdonságaira; 3) bizonyítják egy, a WRF modellre és a csatolt Thompson-féle mikrofizikai parametrizációra épülő, maximális jég szemméret előrejelző módszer használhatóságát. Kérdés, hogy a fenti eredmények hasonlóan érvényesek-e eltérő konvektív helyzetekben kialakuló (pl. multicellás zivatarokat eredményező) helyzetekre is. További kutatást igényel annak kiderítése, hogy a felbontás mellett a turbulens diffúzió kezelése hogyan módosítja a zivatarok mikrofizikai jellemzőit. Eltérő mikrofizikai parametrizáció alkalmazása szintén hatással lehet a kapott eredményekre. A maximális jég szemméret előrejelzésére kidolgozott módszert akár operatív körülmények között, a mindennapos előrejelzési gyakorlatban is alkalmazhatónak véljük. Ugyanakkor a megfigyelt jég szemméretet kellően pontosan visszaadó ultrafinom (~100 m-es) felbontású szimulációk mai körülmények között még nem kivitelezhetők.

5. A dolgozat témájához szorosan kapcsolódó publikációk jegyzéke:

Horváth Á., Geresdi I., Csirmaz K., 2006: Numerical simulation of a tornado producing thunderstorm: A case study. *Időjárás*, Vol. 104. 279-297.

Horváth Á., Geresdi I., Németh P., Csirmaz K., Dombai F., 2009: Numerical modeling of severe convective storms occurring in the Carpathian Basin. *Atmos. Res.* 93, 221–237.

Csirmaz K., 2015: Numerical modeling of hailstorms in Hungary: A case study and a new hail size forecasting technique. *Időjárás*, 119, xx-xx. *Megjelenés alatt, közlésre elfogadva.*