

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 nagyfelbontású, nem-hidrosztatikus modellek elterjedésével a fenti folyamatok és problémák megfelelő térbeli részletességgel leírhatók és kezelhetők. Ezeket az elvi képességeket kihasználva, jelen disszertáció keretei között a következő két kérdésre kerestem a választ: 1) a jégeső, illetve a felszínre hulló jégszem méretének előrejelzése elvégezhető-e egy ilyen korszerű, nagyfelbontású, nem-hidrosztatikus, numerikus modell segítségével. 2) a numerikus modell horizontális felbontásának milyen hatása van

a szimulált zivatar mikrofizikai tulajdonságaira, különös tekintettel a jég szemek mennyiségére, illetve a jég szemeket eredményező átalakulási folyamatokra.

2. Kutatási módszerek

A kérdések megválaszolásához szükséges numerikus kísérleteket és az általam kifejlesztett, maximális jég szem méretet számoló módszer tesztelését a valóságban is lezajlott konvektív esetek numerikus modellezésével végeztem el. A számításokhoz a WRF-ARW modell 3.1.1-es verzióját használtam. A numerikus kísérletek menetét az alábbi pontokban vázolom:

1. Olyan időjárási eseteket kerestem, 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 szem méret mérések a 90-es évek eleje óta nem készülnek Magyarországon. Napjainkban csupán a Nefela Dél-Magyarországi Jégesőelhárítási Egyesülés hálózatában végeznek szisztematikus jég észlelést, amely során a jég szemeket méretkategóriákba sorolják be. A felszíni, közvetlen megfigyelések mellett a hazai C-sávú radarmérésekre is támaszkodtam, amelyek közvetlenül nem alkalmasak a felhőben előforduló – és legfőképpen a felszínre érkező – jég szemek méretének megbecslésére. Ugyanakkor a visszavert jel intenzitásával arányos mennyiségek, többek között a radarreflektivitás, illetve egyes polarizációs mennyiségek közvetetten utalhatnak jégesős zivatar

létezésére. A módszertan tesztelése során ezeket a megfigyeléseket is felhasználtam. A vizsgálatokhoz a következő két esetet választottam ki: 2009. június 7 és 2009. június 16.

2. A WRF modellel – három különböző horizontális felbontást használva – szimuláltam a kiválasztott időjárási helyzeteket. Első lépésként megvizsgáltam, hogy a modell milyen pontosan volt képes modellezni a megfigyelt jégesős zivatarot. Ehhez az időjárási radarral mért reflektivitás értékeket a modell mikrofizikai kimeneti mezőiből számolt reflektivitás értékekkel hasonlítottam össze. Ez a módszer korábbi vizsgálatainkban is megfelelőnek bizonyult a modell validálására.
3. Megvizsgáltam azt is, hogy a modell horizontális felbontásának milyen hatása van a szimulált zivatarok mikrofizikai tulajdonságaira, különös tekintettel a bennük lezajló hó-dará-/jégszemképződési folyamatokra és a számolt maximális jégszemméretre.
4. Meghatároztam a zivatarfelhőhöz tartozó maximális jégszemméretet a modell kimeneti mezői alapján, és az eredményeket összevettem a megfigyelésekkel.

A futások során egymásba ágyazott rácshálókat alkalmaztam, ami azt jelenti, hogy a fő futási területbe kettő, szintén egymásba ágyazott rácshálót helyeztem el, amelyeken eltérő horizontális felbontás mellett végeztem a szimulációt. A kiindulási és oldalsó peremfeltéteket a legbelső rácsháléhoz a közbülső rácsháló, a közbülső rácsháléhoz pedig a fő terület eredményei szolgáltatták. A fő területhez az ECWMF globális modell nyújtotta a kezdeti és oldalsó peremfeltéteket, ugyanezeket a közbülső rácsháléhoz a fő futási terület, míg a legbelső rácsháléhoz a közbülső rácsháló szolgáltatta. A legbelső rácsháló felbontását 100 m-nek, a közbülső rácshálóét 2 km-nek, a fő futási területét pedig 6 km-nek választottuk. A 100 m-es ráctávolság választását az indokolta, hogy

a szakirodalomban fellelhető numerikus vizsgálatok alapján a konvektív eredetű folyamatokat ezen a felbontáson lehet fizikailag a legrealisztikusabban és legkonzisztensebben leírni. A modellt minden esetben a Thompson-féle, egymomentumos mikrofizikai sémával futtattam. A séma öt hidrometeor kategóriát tartalmaz: felhőcseppek, esőcseppek, jégkristályok (felhőjég), hópelyhek, valamint hódara-/jég szemek. A séma explicite nem tesz különbséget a hódaraszemek és a jég szemek között. Az ebbe hidrometeor kategóriába tartozó részecskék esetében a néhány milliméteres méretnél kisebb részecskékre a hódara tulajdonságai (pl. kisebb sűrűség), az ennél nagyobb részecskékre a jég szemek tulajdonságai jellemzők.

A maximális jég szem méret meghatározását, valamint a dinamikai és a mikrofizikai tulajdonságok összehasonlítását a modell η -szintű és térképvetületi rendszerében végeztem el 2 km-es, valamint 100 m-es felbontású rácshálón. A mikrofizikai tulajdonságok vertikális keresztmetszetekben történő ábrázolásához a kimeneti mezőket descartes-i koordináta rendszerbe transzformáltam (a vertikális tengelynek a tengerszint feletti magasságot választva). A kimeneti mezőket öt, illetve egyperces időbeli sűrűséggel állítottam elő (abban az időszakban írtam ki sűrűbben az eredményeket, amikor a zivatar a 100 m-es felbontású rácshálón tartózkodott).

A felbontástól való függés vizsgálata során kiértékeltem az egyes, a Thompson-sémában a hódara-/jég szem kialakulását vagy növekedését eredményező folyamatokat a 2 km-es, illetve a 100 m-es rácshálón. Ezek a következők: túlhűlt esőcseppek heterogén fagyása; túlhűlt esőcseppek fagyása jégkristályokkal történő ütközés következtében; hópelyhek autokonverziója zúzmarásodás hatására; a már kialakult hódara-/jég szemről jégkristályok letöredezése, majd zúzmarásodással történő átalakulása hódara-/jég szemmé; a hódara-/jég szem deposíciója; illetve szublimációja; a hódara-/jég szem ütközése eső-, illetve felhőcseppekkel.

A maximális jég szemméret meghatározása a következő módon történt: A hó dara-/jég szemek méret szerinti eloszlását a Thompson sémában gamma eloszlással közelítik. A Thompson-séma minden időlépcsőben meghatározza a rácshálón a hó dara-/jég szemek keverési arányt, amelyből minden időpillanatban megadhatók az eloszlás paraméterei. Az eloszlás alakjának ismeretében kiszámolható, hogy tetszőleges méretintervallumban mekkora a hó dara-/jég szemek koncentrációja. Az eloszlást leíró függvény alakjából következően az is analitikusan kiszámolható, hogy mekkora az egy, előre meghatározott méretküszöböt meghaladó hó dara-/jég szemek koncentrációja. Ezek alapján a maximális jég szemméretnek azt a méretet tekintem, amely felett a hó dara-/jég szemek koncentrációja már elhanyagolható. Szakirodalmi hivatkozásra támaszkodva a koncentrációt a 10^{-4} $1/m^3$ -es küszöb alatt vettem elhanyagolhatónak, a hozzá tartozó hó dara-/jég szem méretet a Newton-Raphson-féle iteráció alkalmazásával kerestem meg. A számításokat minden esetben a legalsó modellszinten végeztem, mivel ez a szint a talaj felett néhány száz 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 kettő olyan konkrét esetet modelleztem, amikor zivatarból nagyméretű, jelentős kárt okozó jég hullott. Az első választott esetet és a hozzá kapcsolódó numerikus szimulációt részletekbe menően kielemeztem, a második esetet arra használtam fel, hogy az első során levont néhány következtetést általánosítani tudjam, és a jég szeméret számoló módszert ellenőrizzem. Az első választott eset 2009. június 7-e, 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 megállapítottam, hogy a légköri feltételek kedveztek a szupercellák kialakulásának. A radarmérések vizsgálata szintén megerősítette a jégesős zivatar szupercellás jellegét: hosszú, mintegy 3 és fél óra élettartam; izolált jelleg; magas reflektivitási értékek; a PPI (*Position Plan Indicator*) méréseken megfigyelt kampós echó alak; ezzel összefüggésben gyenge reflektivitású terület (*Weak Echo Region* – WER) jelentkezése; a vertikális keresztmetszeteken az átnyúlás, valamint a körülhatárolt gyenge reflektivitású betüremkedés (*Bounded Weak Echo Region* – 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 vizsgáltam meg, és azt találtam, 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. Elvégeztem az esetre a WRF modellfutás ellenőrzését. Ehhez összehasonlítottam a modellezett és a mért reflektivitási értékeket a 2 km-es és a 100 m-es felbontású rácshálón egyaránt. Az összehasonlítás alapján a modell jó közelítéssel képes volt visszaadni a zivatar valós reflektivitás struktúráját mindkét felbontás esetében. Ugyanakkor, míg a 2 km-es felbontáson a méréshez képest alábecsülte a zivatarhoz tartozó maximális reflektivitást, addig a 100 m-es felbontás esetén már nagyobb intenzitás értékeket adott a modell, ami jó közelítéssel megegyezett a tényleges értékekkel. Megvizsgáltam azt is, hogy modell mennyire volt képes szimulálni a zivatar dinamikáját és szupercellás jellegét. Ehhez a vertikális örvényesség maximumának alakulását követtem a szimulált zivatarban. Az eredmények alapján elmondható, hogy bár mindkét rácshálón 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. Megvizsgáltam, hogy a szimulált szupercella mikrofizikai tulajdonságai hogyan változnak a horizontális felbontás függvényében. A vizsgálatok alapján a következő megállapításokat tehetjük (részleteiben lásd 4.2-es fejezet!):

- 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 hópohely keverési aránya esetében. A felhővíz mennyiségben sem adódott szignifikáns eltérés a kétféle felbontáson. A felhőjég keverési arányok esetében a

2 km-es rácshálón jóval nagyobb értékeket számolt a modell, mint a finomabb felbontás esetében.

- A nagyobb maximális hódara-/jégyszem keverési arány a 100 m-es rácshálón az erősebb feláramlásnak köszönhető, mivel az erősebb feláramlás nagyobb hódara-/jégyszem 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-/jégyszemet 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 korábban publikált esettanulmányokkal összhangban – a zivatarok mikrofizikai folyamatai és áramlási viszonyai közötti erős kölcsönhatást bizonyítja.
- A finomabb felbontású számítások esetén a zivatarban lényegesen nagyobb hódara-/jégyszem 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 maximális hódara-/jégyszem keverési aránnyal magyarázható.
- Nemcsak a maximális felszíni hódara-/jégyszem keverési arány adódott jelentősen nagyobbak a finomabb felbontás esetén, hanem az átlagos felszíni hódara-/jégyszem mennyiség is. Ugyanakkor a durvább felbontású szimuláció esetén a hódara-/jégyszem tömege nagyobb területen oszlott

el a finomabb felbontáshoz képest. Mindez azt jelenti, hogy a finomabb felbontású zivatar jelentősebb hódara-/jég szem csapadékot produkált egy-egy rácspontban a felszínen, ugyanakkor ez 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.
- Vertikális keresztmetszeteken kiértékeltem a hódara-/jég szem kialakulásához és növekedéséhez vezető mikrofizikai folyamatokat is. A hódara-/jég szem mennyiség legnagyobb hányada a 3 és 9 km-es szintek közötti rétegben keletkezett mindkét rácshálón, e réteg alatt, illetve fölött a hódara-/jég szem részecskék jelenléte az advekciónak, valamint a kihullásnak köszönhető. A legintenzívebb hódara-/jég szemképződés mindkét esetben a túlhűlt vízcseppek heterogén fagyása, illetve az esőcseppek és jégkristályok ütközése következtében valósult meg. A 2 km-es rácshálón ez a két folyamat hasonló intenzitásúnak adódott, míg a 100 m-es felbontáson a jégkristályok vízcseppekkel történő ütközése volt meghatározóbb. A jégképző folyamatok erősebbnek bizonyultak a finomabb felbontáson. A hódara-/jég szemek növekedése mindkét felbontáson a felhő-, illetve esőcseppek gyűjtésével valósult meg. 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-/jégszemek főleg a túlhűlt vízcseppek heterogén fagyásával keletkeztek, és a felhőcseppek gyűjtésével növekedtek. A finomabb felbontás esetén hatékonyabb hódara-/jégszem képződés és növekedés valósult meg ebben a rétegben, emellett a nagyobb vertikális sebesség is hozzájárult a nagyobb összes hódara-/jégszem tömeghez. A hódara-/jégszem részecskék képződése döntően a 3 és 8 km közötti rétegben zajlott. A teljes hódara-/jégszem mennyiség ebben a rétegben a durvább felbontáson nagyobbnak adódott, mint a 100 m-es szimuláció esetében. Ez pont ellentétes a maximális keverési arányok esetében tett megállapításokkal. A legtöbb hódara-/jégszem részecske elsődlegesen a túlhűlt esőcseppek jégkristályokkal történő ütközése során, másodlagosan a túlhűlt vízcseppek heterogén fagyásával alakult ki. A durvább felbontáson az előbbi folyamat időben igen változékony 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 rácshálón 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-/jég szem részecskék képződése és növekedése elhanyagolható mértékű volt mindkét szimuláció esetében.

- Ami a teljes zivatarra összegzett hódara-/jég szem tömeget illeti, ez mindkét szimuláció esetén hasonlóan alakult, azaz a felbontásnak alig volt hatása a zivatarban kialakuló összes hódara-/jég szem 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-/jég szemek képződéséhez az esőcseppek és hópelyhek ütközése, míg ez a folyamat a 100 m-es rácshálón elhanyagolhatónak mutatkozott. Az így kialakult hódara-/jég szem 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 nagyobb (~ 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 nagyobb 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. Az jég szem mérettel kapcsolatos eredmények részletes kifejtése a 4.3-as fejezetben található.

5. A fenti következtetések egy részének érvényességét megvizsgáltuk egy második esettanulmány során is. A választott eset 2009. június 16-a volt, amikor egy izolált szupercella vonult végig Délnyugat-Magyarországon, és Baranya megyében több helyen károkozó jeget produkált. A WRF szimulációt – hasonlóan az előző esethez – egymásba ágyazott rácshálókön végeztük el, összesen 3 rácshálón: a fő területen (6 km-es felbontással), egy közbülső területen (2 km-es felbontással) és egy belső, ultrafinom (100 m-es) felbontású rácshálón. A WRF futás fizikai és dinamikai beállításai az egyes rácshálókön teljes mértékben megegyeztek az első esettanulmány során alkalmazott beállításokkal. A kapott eredmények és következtetések pontokba szedve a következők (részletesen lásd 4.4. fejezet!):

- A finomabb felbontású szimuláció magasabb oszlop maximális radarreflektivitást számolt a 2 km-es rácshálóhoz képest. Emiatt – az első esethez hasonlóan – a 100 m-es felbontás közelebb esett a megfigyelésekhez a radarintenzitást tekintve.
- Ami a felhőbeli maximális csapadékelem keverési arányokat illeti, a finomabb felbontásban magasabb értékek adódtak, ugyanakkor az eltérés közel sem volt olyan mértékű, mint a 2009. június 7-i eset során. Ezzel szemben a maximális felhőjég keverési aránya a 2 km-es rácshálón adódott lényegesen magasabbnak – ez szintén egybevág az első esetnél kapott eredménnyel.
- A finomabb felbontású zivatarban jóval nagyobb feláramlási sebességek jelentek a durvább felbontáshoz képest, az eltérés a kétféle rácshálón nagyobb a 2009. június 7-i esethez képest. Ebből az a következtetés vonható le, hogy a nagyobb feláramlások a finomabb felbontáson nem feltétlenül eredményeznek arányosan nagyobb eltérést a maximális keverési arányokban a kétféle felbontás között.

A leáramlási sebességek a 100 m-es felbontáson adódtak nagyobbak, nagyjából hasonló nagyságrendű eltérés figyelhető meg a kétféle rácsháló közt, mint az első esettanulmány esetén.

- A maximális felszíni hódara-/jégszem keverési arányok esetén a finomabb felbontáson nagyobb értékek jelentkeztek, a maximális eltérés mintegy háromszoros a kétféle felbontás között, ami kisebb a 2009. június 7-i esettel összehasonlítva. A kisebb eltérés a maximális keverési arányokban az előforduló maximális jégszemméretek között is kisebb eltérést eredményezett. Ugyanakkor ebben az esetben is – akárcsak az első esettanulmány során – a finomabb felbontás értékei közelebb, és kellően közel estek a megfigyelésekhez.

4. Az eredmények hasznosításának lehetőségei

A dolgozatban áttekintést nyújtottam a jégesős zivatarok hazai modellezésében elért eredményeimről, 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) demonstrálják 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 módszer akár operatív körülmények között, a mindennapos előrejelzési gyakorlatban is alkalmazhatónak tűnik. 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.*