

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Földtudományok Doktori Iskola

Meteorológia Program

Csapadékképződési folyamatok számítógépes modellezése

Doktori értekezés tézisei

Sarkadi Noémi

Témavezető:

Dr. Geresdi István DSc

egyetemi tanár

Pécs, 2016

A Doktori Iskola Neve:	PTE Földtudományok Doktori Iskola
Vezetője:	Dr. Dövényi Zoltán DSc. Egyetemi Tanár PTE TTK Földrajzi Intézet Társadalomföldrajzi és Urbanisztikai Tanszék
A Doktori Témacsoport Neve:	Meteorológia, Éghajlatváltozás
Vezetője:	Dr. Geresdi István DSc. Egyetemi Tanár PTE TTK Földrajzi Intézet Földtani- és Meteorológiai Tanszék
Az Értekezés Tudományága:	Meteorológia
Témavezető:	Dr. Geresdi István DSc. Egyetemi Tanár PTE TTK Földrajzi Intézet Földtani- és Meteorológiai Tanszék

1. Tudományos előzmények és célkitűzések

1.1. Témaválasztás

A csapadékképződés folyamatának megismerése, illetve modellezése a napi előrejelzési feladatok ellátásában kiemelkedő fontosságú. A csapadék halmazállapotának, valamint mennyiségének becslése a mindennapok szerves részét képezi, hiszen hatásai széles körűen befolyásolják a mindennapi életet (pl.: közlekedés, mezőgazdaság, hirtelen árvizek kialakulása). Emellett a felhőfizikai folyamatok klimatológiai szempontból is jelentős érdeklődésre tarthatnak számot (pl.: felhők optikai tulajdonságain keresztül a sugárzási egyenleg változásai).

A felhőfizikai folyamatok vizsgálatánál a legnagyobb gondot a széles tér- és időskála megléte okozza. Egyrészt a felhők mozgását és a levegő felhőn belüli áramlását leíró felhődinamika *perc-óra* időbeli és *m-km* térbeli nagyságrendű folyamatokat ír le, míg a mikrofizikai folyamatok *msec-sec*-os és $\mu\text{m-mm}$ -es skálán zajlanak.

A felhőkben lejátszódó folyamatok vizsgálatának több módja lehetséges. A teljes értékű laboratóriumi vizsgálatok elvégzése a széles nagyságrendi elkülönülés miatt nem lehetséges, ám bizonyos folyamatok megismerésének elengedhetetlen módja (például: vízcseppek növekedése, olvadási folyamatok, ütközéses növekedés, csepprobbanás). A felhők közvetlen vizsgálatát teszik lehetővé a műholdak, radarok, illetve egyéb távérzékelési eszközök (LIDAR, SODAR, repülőgépes mérések).

A felhőkben lejátszódó folyamatok vizsgálati módszerei között az előbbiek mellett kiemelkedő szerep jut a numerikus modellezésnek. A modellezés előnye, hogy jól reprodukálhatóan vizsgálhatjuk a folyamatokat. Hátránya, hogy a számítógépek teljesítménye korlátozza, hogy milyen részletesen tudjuk modellezni azokat.

Jelen dolgozat keretein belül számítógépes szimulációk segítségével vizsgáltam a felhőkben lejátszódó mikrofizikai folyamatokat.

1.2. A kutatás előzményei

A felhőfizika az a tudományterület, amely a felhőkben lejátszódó fizikai folyamatok vizsgálatával foglalkozik. Ez egy komplex tudományterület, amelyben a felhők vizsgálatát két részre oszthatjuk. Egyrészt a felhőkben a levegő áramlását a dinamika módszereivel írhatjuk le, míg a felhőket alkotó elemek kialakulását, növekedését, és a részecskék között levő kölcsönhatást a mikrofizika tárgyalja (GERESDI, 2004).

A mikrofizikai folyamatokkal kapcsolatos kutatások egészen az 1500-as évek közepéig nyúlnak vissza, azonban a mai értelemben vett mikrofizikai vizsgálatokról csak az 1940-es évektől kezdődően beszélhetünk. Az 1940-es években az addig leginkább megfigyelésekre alapozott felhőfizikai kutatások új irányt vettek a repülőgépek, radarok, és más, új megfigyelési technikák megjelenésével. A XX. század közepén megjelenő számítógépek pedig új lehetőséget nyitottak a kutatásban (PRUPPACHER – KLETT, 2004).

A dolgozat elsősorban a szilárd halmazállapotú hidrometeorok olvadási folyamataival kapcsolatos eredményeimet mutatja be. Az oladás első elméleti modellje MASON (1956) nevéhez kapcsolódik. Modelljében azzal a feltevessel élt, hogy a jég szemek olvadása során egy vékony vízréteg képződik azok felszínén, amely befolyásolja az esési sebességet, illetve a környezettel való hőcserét. Elképzelése szerint a jég szemek a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os izotermát elérve azonnal olvadni kezdenek. Laboratóriumi mérésekkel bizonyították, hogy az olvadási folyamatokat jelentősen befolyásolja a környező levegő hőmérséklete és relatív páratartalma. Az oladás így – relatív páratartalomtól függően – $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál magasabb hőmérsékleten indulhat csak meg (RASMUSSEN – PRUPPACHER, 1982). Továbbá kimutatták, hogy bár kialakul egy vízréteg a jég szemek felszínén, de az időben nem állandó, hanem a megolvadt víz lesodródásával vízcseppek jönnek létre (RASMUSSEN ET AL., 1984a, b).

Az olvadási folyamatok megfigyelésére nem csak laboratóriumi körülmények között van lehetőség. Az időjárás radarok alkalmasak az olvadó

hidrometeorok detektálására, mert a jég és a víz refraktív indexében tapasztalható eltérés a visszavert jel erőteljes növekedését eredményezi az olvadási rétegben (BATTAN – BOHREN, 1982). Emellett mérési eredményekre alapozva összefüggést mutattak ki a radar jel erőssége és a felszíni csapadék mennyisége, illetve a csapadékintenzitás között (MARSHALL ET AL., 1947). A kapott összefüggés azonban jelentős hibával terhelt, amely a részecskék méret szerinti eloszlásában tapasztalható eltérésekkel van összefüggésben (a hiba akár 100 % is lehet). A részecskék méretének megfigyelése mind felszíni (diszidrométer), mind repülőgépre telepített mérőműszerek (FSSP-100, 2D-C próbák) segítségével történhet.

Napjainkban az időjárás előrejelző modellek integráltan alkalmaznak különböző mikrofizikai parametrizációs eljárásokat. Ezek az eljárások többnyire folytonos, integrálható függvénnyel írják le a részecskék (pl. vízcseppek, hópelyhek, jég szemek) méret szerinti eloszlását. Ezt a fajta közelítést „bulk” sémának nevezik. Az eljárás előnye, hogy számítási igénye viszonylag kicsi. Hátránya viszont, hogy:

- (i) a közelített méret szerinti eloszlás nem mindig felel meg a valóságnak;
- (ii) minden, azonos típusú részecske ugyanakkora, a mérettől független sebességgel esik. Ennek következtében a felszíni csapadék intenzitásának, valamint halmazállapotának előrejelzése gyakran pontatlan.

Az úgy nevezett részletes mikrofizikai leírást („bin” séma) főleg kutatási céllal alkalmazzák, amely a „bulk” parametrizációval ellentétben nem él semmilyen előzetes, önkényes feltevéssel a méret szerinti eloszlásra vonatkozóan. Ennek a sémának az a lényege, hogy a teljes méretspektrumon kisebb intervallumokat definiálnak és a prognosztikai változókat (koncentráció és keverési arány) minden méretintervallumra kiszámítják. A leírás előnye, hogy benne a mérettől függő tulajdonságok (például: esési sebesség, ütközési együttható) pontosabban leírhatók. Hátránya, hogy a fenti részletes tagolás eredményeképpen a számítási igény jelentősen megnövekszik.

1.3. A kutatás célja

A kutatás célja az volt, hogy számítógépes szimulációk segítségével vizsgáljam a felhőkben lejátszódó mikrofizikai folyamatokat, ezáltal nyújtva teljesebb képet arról, hogy mely folyamatok játszanak fontos szerepet a csapadék kialakulásában, növekedésében, illetve a csapadék halmazállapotának meghatározásában. A csapadékelemek kialakulásában és növekedésében mind a környező levegő paramétereinek változása, mind a csapadékelemek (vízcseppek, hópelyhek és hódara/jégszemek) méret szerinti eloszlása jelentős hatással van.

A csapadék halmazállapotának előrejelzése szempontjából elengedhetetlen, hogy a szilárd halmazállapotú csapadékelemek olvadási folyamatairól és a folyamatok dinamikai és mikrofizikai kölcsönhatásrendszeréről minél pontosabb képet kapjunk. Ennek megfelelően a numerikus kísérletek során egy, egydimenziós, időfüggő modellben először azt vizsgáltam, hogy – a dinamikai kölcsönhatások elhanyagolása mellett – az olvadási folyamatokat hogyan befolyásolja a környező levegő hőmérséklete, relatív páratartalma és a csapadékelemek kezdeti méret szerinti eloszlása. Ezt követően esettanulmányok segítségével vizsgáltam – mezoskálájú modellt alkalmazva – a mikrofizikai és dinamikai folyamatok közötti kölcsönhatást.

A kutatás során felmerülő kérdések az alábbiakban foglalhatók össze:

- A modell eredmények mérésekkel való összehasonlítását, ezáltal a modell validálását lehetővé tevő radar reflektivitás számítási algoritmus kidolgozása.
- A téli csapadék (havazás, eső, ónos eső) kialakulásának légköri feltételei.
- Csapadékképződési folyamatok orografikusan gerjesztett felhőkben.
- Intenzív zivatarláncok kialakulását és mozgását meghatározó mikrofizikai folyamatok vizsgálata.

2. Alkalmazott kutatási módszerek

A kutatás során a numerikus szimulációk elvégzéséhez részletes mikrofizikai parametrizációs eljárást használtam. A választást az indokolta, hogy a mikrofizikai folyamatok sokkal pontosabb leírására alkalmasak, mint az operatíván alkalmazott mikrofizikai parametrizációk.

A részletes mikrofizikai modellben négy hidrometeor típust különböztettünk meg: a vízcseppeket, jégkristályokat, hópelyheket, valamint hódara részecskéket. A hidrometeorokat méretük szerint 36 intervallumra osztottuk, és minden méretintervallumban kiszámításra kerültek a koncentráció és a keverési arány, valamint hópelyhek esetében a hópelyhely felszínére ráfagyott víz tömege (zúzmarásodás), a zúzmarásodott hópelyhek koncentrációja, valamint az olvadási tartományban a hópelyhely megolvadt részének a tömege. A hódara esetében a koncentráció és a keverési arány mellett a megolvadt víz tömege került kiszámításra.

A modellezés során az alábbi mikrofizikai folyamatokat vettük figyelembe: (i) Vízcseppek kialakulása aktív kondenzációs magvakon, valamint jégkristályok képződése jégképző aeroszol-részecskéken. (ii) Különböző típusú hidrometeorok diffúziós növekedése. (iii) Túlhűlt vízcseppek fagyása, megolvadt jég-részecskék újrafagyása. (iv) Vízcseppek egymással való ütközése és összeolvadása. (v) Csepprobbanás. (vi) Vízcseppek ütközése szilárd halmazállapotú csapadékelemekkel (jégkristályok, hópelyhek, hódara részecskék zúzmarásodása a negatív hőmérsékletű tartományban). (vii) Jégkristályok összeütközése és összetapadása (aggregáció, hópelyhek kialakulása). (viii) Hópelyhek ütközése (aggregáció). (ix) Szilárd halmazállapotú elemek olvadása. (x) Mérettől függő esési sebesség. (xi) Részben olvadt hódara szemek ütközése vízcseppekkel a pozitív hőmérsékletű tartományban, a megolvadt víz részleges lesodródása az ütközés hatására. (xii) Radar paraméterek kiszámítása a méret függvényében.

A részletes mikrofizikai modellhez integráltan kidolgozásra került egy radar reflektivitás számítási algoritmus. A radar paraméterek származtatása közvetlenül a

részletes mikrofizikai séma eredményeire épült. A kód korábbi kutatási eredményekre alapozva került kidolgozásra. BOHREN – HUFFMAN (1983) eredményeit felhasználva a részlegesen megolvadt hópelyhek és hódara szemek esetében a refraktív indexet az alábbi összefüggéssel számoltam ki:

$$m_{keverék}^2 = \frac{p_{közeg} \cdot m_{közeg}^2 + \sum_{i=2}^n p_i \cdot \beta_i \cdot m_i^2}{p_{közeg} - \sum_{i=2}^n p_i \cdot \beta_i}, \quad (1)$$

ahol m az anyag refraktív indexe, p az anyag fajlagos térfogata a teljes hidrometeorra vonatkoztatva, míg β_i együttható az alábbi formában számítható:

$$\beta_i = \frac{2 \cdot m_{közeg}^2}{m_i^2 - m_{közeg}^2} \cdot \left(\frac{m_i^2}{m_i^2 - m_{közeg}^2} \cdot \ln \left(\frac{m_i^2}{m_{közeg}^2} \right) - 1 \right). \quad (2)$$

A fenti egyenlet alkalmazása során az alábbi feltevésekkel éltem a részben olvadt jégreszecskek (hópelyhek és hódara szemek) esetében:

- (i) a részecskéket szférikusnak tekintetem;
- (ii) az olvadó részecskéket kétrétegű szféroiddal közelíttem, ahol a hópelyhek és a hódara szemek esetében az olvadékvíz a szilárd csapadékelem sűrűségétől függően oszlik el a hidrometeor belsejében és annak felszínén;
- (iii) a visszaszórási keresztmetszet $\sigma_{b,k}$ a különböző részecskék víz ekvivalens átmérőjével arányos, és függ a sugárzás hullámhosszától (λ), valamint a visszaverő részecskék refraktív indexétől (m).

A numerikus kísérleteket két részre bontottam:

- (i) Az érzékenységi vizsgálatokhoz egydimenziós, időfüggő modellt használtam. Ez lehetőséget biztosított arra, hogy a dinamikai hatások elhanyagolásával a mikrofizikai változásokra fókuszáljak.
- (ii) A dinamikai és a mikrofizikai folyamatok közötti kölcsönhatás vizsgálata során az alkalmazott kód már rendelkezésre állt a WRF (Weather Research and Forecast) előrejelzési modellben.

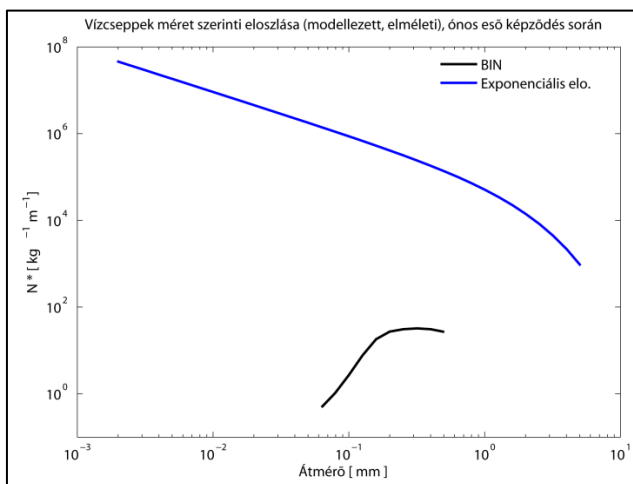
3. Eredmények

3.1. Olvadási folyamatok

Részletes mikrofizikai modellel, idealizált szimulációk segítségével vizsgáltam, hogy a környező levegő hőmérséklete és relatív páratartalma milyen hatással van a szilárd halmazállapotú csapadékelemek olvadási folyamataira. A numerikus szimulációk részletes leírását lásd a dolgozat 5.1. fejezetében. Az eredmények alapján a következő megállapításokat tehetjük:

- Amennyiben a légkör hőmérsékleti rétegződése nedves adiabatikus, akkor az olvadási réteg vastagságát jelentős mértékben befolyásolja a hópelyhek és vízcseppek kezdeti méret szerinti eloszlása. Az olvadás miatt bekövetkező hőmérséklet-csökkenés mértéke szintén függ a hidrometeorok kezdeti mennyiségétől és típusától.
- A modellezés során figyelembe vettem, hogy milyen hatással van az olvadás a környező levegő tulajdonságaira. Az eredmények azt mutatják, hogy a csapadékhullás (párolgás) és az olvadás együttes hatására egyre szélesedő tartományban néhány óra elteltével egy, közel 0 °C-os izoterm réteg alakul ki, így a szilárd halmazállapotú csapadékelemek olvadása jelentősen lelassul, illetve megszűnik. A hópelyhek esetén az olvadási réteg vastagsága a keverési aránytól függően 100 és 1000 m között változik. A relatív páratartalom csökkenése miatt az olvadási réteg vastagsága mintegy 100 – 600 méterrel nő meg.
- Azonos hőmérsékleti rétegződés, de kezdetben alacsonyabb relatív páratartalom (70 %) mellett is megvizsgáltam az olvadási folyamatokat. A megfigyelésekkel (laboratóriumi mérések) összehangban az olvadás csak nagyobb hőmérsékletnél (+1 – +1,5 °C) indult meg.
- A modellezés során megvizsgáltam, hogy inverziós helyzetekben hogyan változik a részecskék méret szerinti eloszlása. A szimulációk során arra a

következtetésre jutottam, hogy az ónos eső képződése során a vízcseppek méret szerinti eloszlása nem írható le exponenciális eloszlással (**1. ábra**). Az operatíván használt időjárás modellekben igen elterjedten alkalmazzák az exponenciális eloszlást a méret szerinti eloszlások közelítésére, ezért a téli csapadék intenzitásának, mennyiségének és halmazállapotának előrejelzése sok esetben pontatlan.



1. ábra: Vízcseppek méret szerinti eloszlása a felszínen, ónos eső képződése során (St. John's eset). A fekete vonal a modellezett (BIN), a kék vonal az azonos keverési arányhoz és koncentráció értékhez tartozó exponenciális eloszlást szemlélteti.

- A részletes mikrofizikai leírás során lehetőség nyílik a részecskék méret szerinti eloszlásának vizsgálatára is. Az eredmények azt mutatják, hogy a vízcseppek és a hópelyhek ütközése során kialakuló hódara szemek esetében az olvadás hatékonysága jelentősen csökken a méret növekedésével. Míg a kisméretű ($d \sim 0,5$ mm) hódara szemek esetén az olvadási arány (a hidrometeor teljes tömegének és a megolvadt víz tömegének aránya) 80 % körül mozog, addig a 3 mm-t meghaladó hódara részecskék esetében ez az arány 20 % alatt marad.
- Az olvadás vizsgálata során nem tekinthetünk el a vízcseppek és a hópelyhek közötti ütközési folyamatoktól sem. A vízcseppekkel való

ütközés kettős hatása: (i) a hópelyhek felszínén növeli a víz mennyiségét, amely gyorsítja az olvadást. (ii) Emellett a növekvő víz mennyisége a részlegesen olvadt hópelyhek esési sebességének növekedéséhez vezet, ami miatt azok gyorsabban hullnak keresztül a pozitív hőmérsékletű tartományon. Ez a gyors kihullás csökkenti az olvadás mértékét.

3.2. Ónos eső képződésének modellezése

A csapadék halmazállapotának előrejelzése, különösen a téli félévben az egyik legnehezebb előrejelzési feladat. A havazás, az eső és az ónos eső kialakulásának mikrofizikai feltételeit vizsgáltam idealizált esetben és egy esettanulmány kapcsán. A numerikus kísérletek eredményei alapján a következő megállapításokat tehetjük:

- A hópelyhek kezdeti keverési aránya meghatározó. Amennyiben a hópelyhek keverési aránya magas ($0,5 > g\ kg^{-1}$), akkor nem alakul ki ónos eső. Ez azzal magyarázható, hogy a pozitív hőmérsékletű tartományban az olvadás során elvont hő miatt rövid idő alatt olyan mértékű hőmérséklet-csökkenés következik be, amely lefékezi, vagy akár meg is állíthatja a lefelé hulló jégreszecskek olvadását.
- Kimutattam, hogy az olvadáshoz szükséges réteg vastagsága jelentősen függ a környező levegő hőmérsékletétől, relatív páratartalmától, valamint a hidrometeorok kezdeti méret szerinti eloszlásától. Amennyiben az inverziós tartomány nem elég széles, úgy abban az esetben a hópelyhek teljes megolvadására nincs lehetőség, így a felszínen nem alakul ki ónos eső.
- A vízcseppek jelenléte kettős hatással van az olvadásra. Egyrészt a vízcseppekkel együtt járó magas relatív páratartalom gyorsítja az olvadást. Másrészt a párolgás okozta hőelvonás miatt csökken a levegő hőmérséklete, ami miatt lassul az olvadás.
- Egy esettanulmány során olyan esetet vizsgáltam, amikor a felszíni csapadék halmazállapotának meghatározása komoly nehézséget okozott. A felszínen

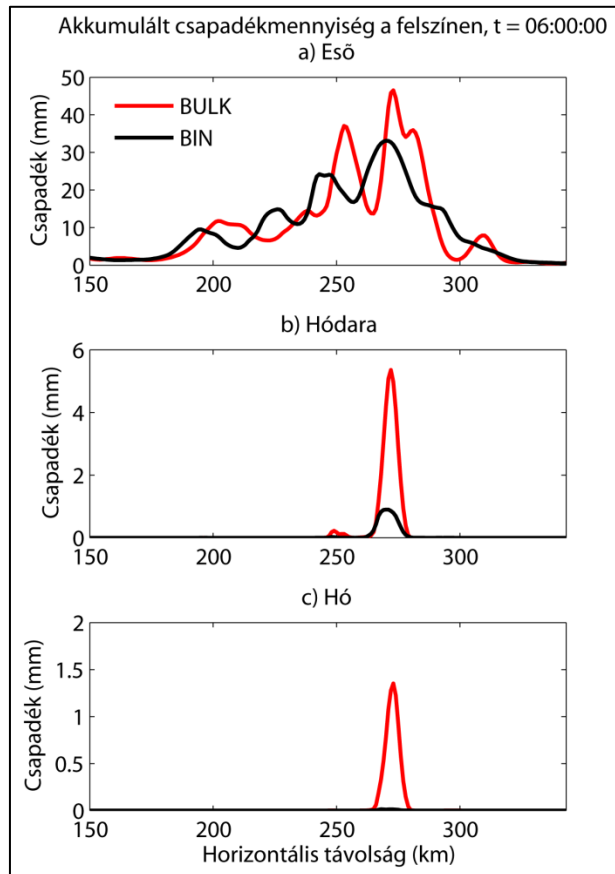
megfigyelt csapadék fagyott eső, illetve ónos eső formájában hullott. Szakirodalomban publikált megfigyelési adatokkal, illetve „bulk” sémával végzett numerikus szimulációk eredményével összevetve a részletes mikrofizikai modell a felszíni csapadék halmazállapotának pontosabb előrejelzését tette lehetővé a vizsgált esetben.

3.3. Csapadékképződési folyamatok orografikus felhőkben

A felszíni csapadék mennyiségének és minőségének előrejelzése komplex felszínek esetében igen problematikus. Az orografikus akadályok által kiváltott konvekció, illetve a módosuló áramlási viszonyok jelentős mértékben befolyásolják a csapadékképződési folyamatokat. Numerikus kísérletek segítségével vizsgáltam a csapadékképződést összetett domborzati viszonyok között. A modell eredményeit mérési és egy operatíván alkalmazott „bulk” mikrofizikai séma (THOMPSON ET AL., 2008) eredményeivel vettem össze. A numerikus szimulációk tapasztalatait a következő pontokban foglalom össze:

- A felszíni csapadék területi eloszlásának vizsgálata azt mutatja, hogy a részletes mikrofizikai parametrizációs eljárás sokkal pontosabban adta vissza a térbeli változékonyságot, mint a „bulk” modell (**2. ábra**). Az eredmények alapján elmondható, hogy a modellezési tartományra illeszkedő mérési pontokban a csapadék mennyiségét is helyesen becsülte meg a „bin” modell. A zúzmarásodási folyamat jelentősen befolyásolta a területi eloszlást, azonban a teljes kihulló csapadék mennyiségére nem volt hatása.
- A modell eredményeket repülőgépes mérési eredményekkel is összevettem. Az összehasonlítás alapján elmondható, hogy a jégkristályok és a vízcseppek koncentrációját a modell megfelelően írja le. A nagyméretű hópelyhek koncentrációját azonban felülbecsüli, amelynek háttérében a zúzmarásodás, illetve a sűrűség pontatlan közelítése állhat.
- A repülőgépes mérések mellett a modell által számított radar reflektivitást is összevettem megfigyelésekkel. A „bin” modell sikeresen becsülte meg a

fényes sáv erősségét, illetve helyzetét. A jó egyezés egyrészt az alkalmazott mikrofizikai leírásnak, másrészt a radar reflektivitás meghatározására alkalmazott módszernek köszönhető.



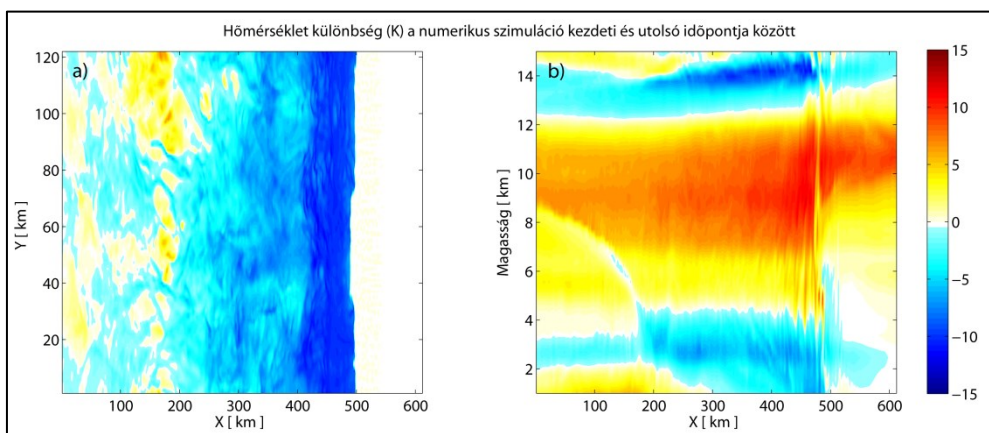
2. ábra: Akkumulált csapadék a felszínen a vizsgált modellek (BULK és BIN) esetében, orografikusan gerjesztett csapadék esetében (IMPROVE-2 eset), a numerikus szimuláció 6. órájában.

3.4. Zivatarokhoz kapcsolódó csapadékképződés modellezése

A mikrofizikai folyamatok szerepe meghatározó jelentőségű az intenzív zivatarok, zivatarláncok kialakulásában és mozgásában. A kialakuló vízcseppek párolgása és az olvadás során elvont hő fontos szerepet játszik a hideg légtömeg (*cold pool*) kialakulásában zivatarfelhők környezetében. A létrejövő hideg párna hatása a

szakirodalmi hivatkozások alapján is jól ismert. Az előrenyomuló hideg levegő felemelkedésre kényszeríti a környező, melegebb levegőt, így a zivatarlánc hosszú utat tud megtenni, mielőtt elhalna.

- A részletes mikrofizikai leírást sikeresen alkalmaztam a zivatarfelhőkben lejátszódó mikrofizikai és dinamikai folyamatok modellezésére. Az intenzív zivatarláncok, az úgy nevezett *squall line*-ok kialakulásában és mozgásában a mikrofizikai folyamatok jelentős szerepet játszanak. A szilárd halmazállapotú csapadékelemek olvadása, valamint a vízcseppek párolgása során elvont hő egy, a környezeténél hidegebb légtömeg kialakulásához vezetett a zivatarfelhő alatt, a felszíntől kb. 4 km-es magasságig terjedő tartományban (**3. ábra**).



3. ábra: „Oklahoma squall line” esettanulmány során modellezett hőmérséklet különbség (K) a numerikus szimuláció kezdeti és utolsó időpontja között (a) a felszínen, horizontális metszetben és (b) vertikális keresztmetszetben ($y = 75$ km).

- A modell által szolgáltatott méret szerinti eloszlásokat összevettem mérési eredményekkel, illetve a szakirodalomban fellelhető eredményekkel. Az eredmények jó egyezést mutatnak a megfigyelésekkel, miszerint a konvektív és a réteges szerkezetű tartomány esetén jelentős különbség figyelhető meg a vízcseppek méret szerinti eloszlásában. Felszíni diszidrométerrel végzett mérési eredményekkel összevetve a modell pontosan becsülte meg az

esőcseppek átlagos méretét. A vízcseppek és az olvadó hódera részecskék közötti ütközés jelentősen befolyásolja a vízcseppek méret szerinti eloszlását.

- A modell eredményeknek radar megfigyelésekkel történt összehasonlítása azt mutatja, hogy az általam kidolgozott algoritmus jól közelíti mind a fényes sáv erősségét, mind a fényes sáv magasságát. A fényes sáv alatt tapasztalható reflektivitás csökkenést is jól adja vissza a modell.

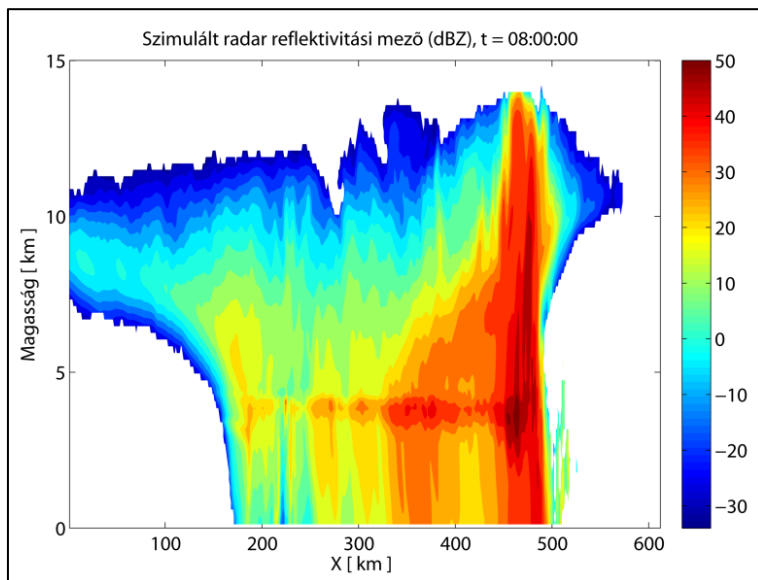
3.5. Radar reflektivitás

A legtöbb időjárás előrejelző modellben már integráltan alkalmaznak a radar paraméterek becslését számító modulokat. Az így számított radar mezők azonban sok esetben pontatlanok, amelynek hátterében a „bulk” mikrofizikai sémák egyszerűsítései állnak. Ugyanis a „bulk” sémákban használt méret szerinti eloszlások gyakran nem megfelelően írják le a hidrometeorok valódi méret szerinti eloszlását (lásd a *squall line* esettanulmányt). Gyakori hibájuk, hogy a kisméretű részecskék koncentrációját alul, a nagyokat pedig felülbecsülik. Ez a fajta pontatlanság a származtatott radar reflektivitás értékek felülbecsléséhez vezet. A részletes mikrofizikai modell esetében eddig nem állt rendelkezésre olyan számítási algoritmus, amelynek segítségével a radar reflektivitás számítását el tudtuk volna végezni.

- Korábbi kutatási eredményekre építve a „bin” sémához integrált radar reflektivitás számítási algoritmus került kidolgozására. Ez által a modell validálása hatékonyabban végezhető el, hiszen a legtöbb esetben rendelkezésre állnak a mért radar mezők, míg a közvetlen méret szerinti eloszlásra vonatkozó mérések csak célzott mérési kampányok során érhetőek el.
- A „bin” séma esetében az olvadó részecskék esetén az olvadási arány közvetlenül kerül kiszámításra, valamint a rendelkezésre álló méret szerinti eloszlás a radar reflektivitás pontosabb meghatározását teszi lehetővé. Az

eddig numerikus szimulációk azt mutatják, hogy a modell helyesen írja le a felhőkben lejátszódó mikrofizikai folyamatokat (például: jégzemek olvadása).

- Érzékenységi vizsgálatokkal is igazoltam, hogy az olvadó részecskék visszaszórási keresztmetszetének változása jelentős mértékben függ az olvadó hidrometeorok méretétől, az olvadás mértékétől és a megolvadt víz eloszlásától a hidrometeorok felszíne és belseje között.



4. ábra: Az „Oklahoma squall line” modellezett radar reflektivitási mezeje (dBZ) az $y=50-100$ km közötti tartományra átlagolt vertikális metszetben, a numerikus szimuláció 8. órájában.

- A „bin” sémát és az újonnan kidolgozott radar reflektivitás számító algoritmust együttesen alkalmazva a modell jól adja vissza a fényes sáv jellemzőit (fényes sáv magassága, erőssége, vagy a fényes sáv alatt megfigyelhető reflektivitás csökkenés – amelyet a legtöbb numerikus modell nem képes megfelelően visszaadni) (**4. ábra**).

4. Eredmények alkalmazása és a kutatás további irányai

Tanulmányaim megkezdését követően egy már folyamatban lévő kutatásba kapcsolódtam be. A kutatás egy olyan mikrofizikai séma kidolgozását célozza meg, amely a felhőkben lezajló csapadékképződési folyamatokat részletesen képes leírni.

A modell fejlesztése során elsősorban a téli csapadék kialakulásának modellezési lehetőségeivel foglalkoztam: szilárd halmazállapotú csapadékelemek olvadása (hópelyhek, hódara szemek), ónos eső képződése, az olvadást meghatározó környezeti és mikrofizikai folyamatok közötti kölcsönhatás vizsgálata.

Emellett a modell validálását lehetővé tevő radar reflektivitás számítási algoritmust dolgoztam ki, integráltan a részletes mikrofizikai sémához. Az alkalmazott radar reflektivitás számítási algoritmus előnye, hogy a részletes mikrofizikai leírásnak köszönhetően a részlegesen olvadt hópelyhek és hódara szemek esetében pontosabb számítást tesz lehetővé, mint az operatíván alkalmazott modellek közelítő eljárása.

A kutatás során idealizált, egy-dimenziós, időfüggő modellel végzett érzékenységi vizsgálatok mellett (dinamikai folyamatok elhanyagolása), valós esetek modellezésére is sor került. Az eredmények alapján elmondható, hogy a részletes mikrofizikai leírás mind a réteges, mind a konvektív felhőkben lezajló csapadékképződési folyamatok modellezése során sikeresen alkalmazható. A valós esetekben a „bin” séma az operatív modellekhez képest jóval pontosabb eredményt szolgáltat a felhőkben lejátszódó folyamatokról.

A kutatás további irányai között szerepel a kidolgozott radar reflektivitás számítási algoritmus további fejlesztése, figyelembe véve a hidrometeorok változatos alakját, illetve a zúzmarásodás mértékét. Napjainkban egyre szélesebb körben alkalmaznak polarizációs radarokat a meteorológiai megfigyelések során. A polarizációs radar mezők szimulációjához kapcsolódó numerikus algoritmus kidolgozása fontos előrelépést jelentene a modell validálását, illetve a modell eredmények mérésekkel történő összevetését tekintve.

Publikációs lista

1.1. Az értekezés témájához kapcsolódó közlemények, publikációk

Sarkadi, N., Geresdi, I. and Thompson, G., 2016: Numerical simulation of precipitation formation in the case orographically induced convective cloud: comparison of the results of bin and bulk microphysical schemes. *Atmospheric Research*, Vol. 180, November 2016, pp. 241-261. – *In press* (Várható IF: 3.377; SciMago besorolás: Q1), DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.04.010

Thériault, J. M., Milbrandt, J. A., Doyle, J., Minder, J. R., Thompson, G., **Sarkadi, N.** and Geresdi I, 2015: Impact of melting snow on the valley flow field and precipitation phase transition. *Atmospheric Research*, Vol. 156, April 2015, pp. 111-124. (IF: 2.844; SciMago besorolás: Q1)

Geresdi, I., **Sarkadi, N.** and Thompson, G., 2014: Effect of the accretion by water drops on the melting of snowflakes. *Atmospheric Research*, Vol. 149, November 2014, pp. 96–110. (IF: 2.844; SciMago besorolás: Q2)

Sarkadi, N. – Geresdi, I., 2014: Új lehetőségek a felhőfizikai modellezésben - Bin modell, pp. 52-56. In: Pongrácz et al. (szerk.): *Légköri folyamatok előrejelzésének módszerei és alkalmazásai*. 130 p. Budapest, 2014. (*Egyetemi Meteorológiai Füzetek 25.*) (ISBN:978-963-284-538-8)

Sarkadi, N., 2013: A jégszemek növekedésének numerikus modellezése. In.: Dövényi Z. – Donka A. (szerk.): *A geográfia változó arcai*. Idresearch Kft. – Publikon Kiadó, 2013, pp. 9-22. (Geographia Pannonica Nova; 15) (ISBN:978-615-5001-88-8).

1.2. Az értekezés témájához kapcsolódó konferenciaközlemények és absztraktok

Sarkadi, N. – Geresdi, I. – Thompson, G., 2015: Numerical simulation of the formation of precipitation using bin microphysics. *16th Annual WRF Users' Workshop*. Konferencia helye, ideje: Boulder CO, USA; 2015.

Sarkadi, N. – Geresdi, I., 2014: Polarization radar reflectivity calculations using the output of bin microphysics. *15th Annual WRF Users' Workshop*. Konferencia helye, ideje: Boulder, CO, USA, 2014.

Geresdi, I. – Thompson, G. and **Sarkadi, N.**, 2013: Numerical simulation of squall line by using detailed microphysics. *7th European Conference on Severe Storms*. Konferencia helye, ideje: Helsinki, Finnország; 2013.

Sarkadi, N. – Kereszturi, Cs. – Geresdi, I., 2013: A felhőkben lejátszódó mikrofizikai folyamatok modellezése. In.: Dr. Buday-Sántha, A – Danka, S. – Komlósi, É. (szerk.): *Régiók fejlesztése*. Pécsi Tudományegyetem, Carboncomp Számítástechnikai és Nyomdai Kft. pp. 151-162. (ISBN:978-963-642-530-2). Konferencia helye, ideje: Pécs, Magyarország; 2013.

Sarkadi, N. – Geresdi, I., 2012: Numerical simulations of melting of graupel particles and snowflakes. Konferencia megnevezése: *16th International Conference of Cloud and Precipitation*. Konferencia helye, ideje: Lipcse, Németország; 2012.

Sarkadi, N. – Geresdi, I., 2012: A szilárd halmazállapotú csapadékelemek olvadásának számítógépes modellezése. *38. Meteorológiai Tudományos Napok*. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország; 2012.

Sarkadi, N., 2011: Csapadék halmazállapotának numerikus előrejelzése. – In. Rab, V. – Dévényi, A. – Sarlós, I. (szerk.): *IX. Interdiszciplináris Grastyán Konferencia Előadásai*. PTE Grastyán Endre szakkollégium, Pécs, pp. 3. Konferencia helye, ideje: Pécs, Magyarország; 2011.

2.1. Az értekezés témájához nem kapcsolódó konferenciaközlemények és absztraktok

Marton, G. – Prisztóka, Gy. – **Sarkadi, N.**, 2016: A globális klímaváltozás környezeti hatásai Magyarországon. *"Duna-Dráva árvízi tapasztalatai és villámárvizek Baranya megyében védelem és tudomány egymás szolgálatában"*. Konferencia helye, ideje: Pécs, Magyarország; 2015. – *Megjelenés alatt*