

HÓPELYHEK OLVADÁSÁNAK SZÁMÍTÓGÉPES MODELLEZÉSE

Balogh Adrienn Judit⁽¹⁾, Geresdi István⁽²⁾

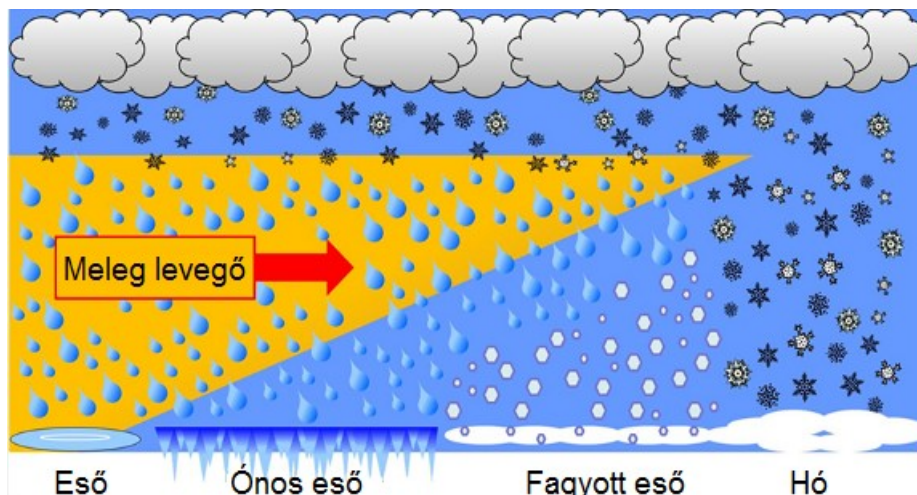
⁽¹⁾ELTE TTK, Meteorológus MSc, II. évfolyam

⁽²⁾Pécsi Tudományegyetem TTK, Földtani és Meteorológiai Tanszék
e-mail: balogh.adrienn.judit@gmail.com, geresdi@gamma.ttk.pte.hu

Bevezetés

A hétköznapi életünket könnyen megzavarhatja egy nem várt csapadékos időjárás, talán ezért is a csapadék intenzitása és halmazállapota az időjárás-előrejelzés egyik legfontosabb eleme. Nagy térségre, durvább térbeli felbontással készített prognózis esetén a csapadék megjelenésének valószínűsége viszonylag pontosan megadható. Jóval nehezebb az előrejelzés, ha jobb térbeli felbontással kívánunk előrejelzést készíteni, hiszen – például a nyári záporok esetén – a kis skálájú folyamatokról (pl. felszíni párolgás) jóval kevesebb információ áll rendelkezésre.

A csapadék térbeli eloszlása mellett a halmazállapotának meghatározása is fontos feladat. A nyári záporokból hulló jégeső kialakulása és méretének előrejelzése – a mezőgazdaságban okozott károk miatt – már régóta kutatott téma (Geresdi et al., 2014; Csirmaz, 2015).



1. ábra: A téli csapadékfajták, melyek a pozitív hőmérsékleti tartományú réteg vastagságától és elhelyezkedésétől függően eső, ónos eső, fagyott eső vagy hó lehet. [1 - Amerikai Meteorológiai Szolgálat]

Télen a konvektív folyamatok gyengébbek a kisebb besugárzási intenzitás miatt, ezért a jégeső előfordulása is ritkább ebben az évszakban. Réteges felhőből hulló csapadék esetén a csapadék felszíni halmazállapota a légréteg hőmérsékleti profiljától függ az *1. ábrán* látható módon. Amennyiben a felszín felett a hőmérséklet $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál magasabb, a hulló hópelyhek részben vagy teljesen elolvadhatnak. A hópelyhek teljes megolvadása a felszínen esővel, a hópelyhek egy részének megolvadása havas esővel jár, míg ha egyáltalán nem olvadnak meg, a felszínen havazást tapasztalunk. A gyakorlatban fontos feladat a csapadék halmazállapotának meghatározása, hiszen a különböző csapadékformák eltérő problémákat okozhatnak, például a közlekedésben.

Amennyiben a légkör felszínhez közeli tartományában inverziós réteg alakul ki pozitív hőmérsékletű réteggel, és a felszín feletti légréteg negatív hőmérsékletű, a talajon a csapadék ónos eső vagy szilárd halmazállapotú fagyott eső lesz. Ónos eső esetén a hópilehek az inverziós rétegben teljesen megolvadnak, a negatív hőmérsékletű felszín közeli tartományban negatív hőmérsékletűre hűlnek, azonban a fagyás nem kezdődik meg, így túlhűlt cseppek érnek a felszínre. Ezzel szemben a fagyott eső esetén az inverziós rétegben történő részleges olvadás miatt a negatív hőmérsékletű rétegben a megolvadt víz visszafagy, és fehér színű, szilárd halmazállapotú gömbök formájában hullik a csapadék a földre. Az ónos eső vagy ónos szitálás különösen veszélyes időjárási jelenség, hiszen az utakra, járdákra ráfagyó víz ellehetetleníti a biztonságos közlekedést, jelentős károkat okoz a növényzetre fagyva, továbbá a magasfeszültségű távvezetékekre fagyott víz a többletsúly miatt vezetékszakadást, így a településeken áramkimaradást okozhat.

A modellezés során a téli csapadék halmazállapotát és az ónos eső kialakulását döntően befolyásoló folyamatot, a jégreszecskek olvadási mechanizmusát vizsgáltuk. Arra vonatkozóan végeztünk számításokat, hogy 1000 m-es magasságból lehulló, különböző méretű hópilehek olvadása hogyan függ a környezeti tényezőktől: a hőmérséklettől és a relatív nedvességtől.

Irodalmi áttekintés

Olvadás szerepe a felszíni csapadék kialakulásában

Az olvadást alapvetően befolyásolja a környezet hőmérséklete, így fagypont felett megkezdődhet a hópilehely cseppfolyóssá válása. Abban az esetben, ha a levegő páratartalma túlzottan alacsony, az olvadás csak néhány fokkal $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ felett kezdődik meg.

A légkör jégzemeinek olvadását alapvetően hasonlóan írhatjuk le, fontos azonban megjegyezni, hogy sok tekintetben eltérő folyamatok zajlanak. A jégzeme és hópilehek olvadását többen vizsgálták. Knight (1979), illetve Fujiyoshi (1986) terepi méréseket végeztek. Matsuo és Sasyo (1981) laboratóriumban vizsgálták a rögzített hópilehek olvadását. Mitra et al. (1990) szélcsatorna segítségével vizsgálták a hulló hópilehek olvadását.

A jégzeme, illetve a graupel olvadásakor a megolvadó víz réteggént veszi körül a jégmagot. A hópilehely esetén ez máshogyan megy végbe: az olvadt víz a hópilehely külső részéről a középpontjába gyűlik, így a hópilehely vázának nagy része száraz marad.

Fukuta et al. (1986), valamint Mitra et al. (1990) azt vizsgálták, hogy szabadon eső hópilehek esetén azok darabokra törése, illetve a megolvadt víz lesodródása milyen esetben fordul elő. Eredményeikben azt mutatták, hogy ez akkor valósul meg, ha a hópilehely szerkezete erősen aszimmetrikus, illetve a relatív páratartalom 70% alatti.

A téli csapadék különböző formái Magyarországon is megjelennek, ezért hazánkban is számos erőfeszítés történt a téli csapadék halmazállapotának előrejelzésének javítására.

Geresdi és Horváth (2000) által készített numerikus modell része a Magyar Meteorológiai Szolgálat nowcasting rendszerének, mely nagy vertikális felbontással készült hőmérsékleti és vízgőzprofilok alapján megadja a csapadék típusát és halmazállapotát.

Geresdi et al. (2014) egy részletes mikrofizikai modell alkalmazásával vizsgálták a csapadékképződést. Olvadó hópilehek növekedését modellezték, figyelembe véve a vízcseppekkel történő ütközést is, illetve vizsgálták a részben olvadt jégreszecskek visszafagyását. Az eredmények azt mutatták, hogy az olvadási réteg feletti folyékony víz jelenléte vastagabb olvadási sávot hoz létre, mivel a zúsmarásodás megnöveli az esési sebességet. Az olvadási rétegben található víz nem változtatja meg jelentősen az olvadási réteg vastagságát.

A közelmúltban történt ónos esős helyzeteket Horváth és Nagy (2014) elemezte. Az ECMWF modell eredményei alapján megjelenítették a szinoptikus skálájú légköri folyamatokat, majd a WRF numerikus modell futtatásával meghatározták a csapadék halmazállapotát

és mennyiségét. Ilyen módon készült tanulmány a 2014. december 1-jei ónos esőről is, amikor leginkább a Dunazug-hegységben, a Gödöllői-dombságban, illetve az Északi-középhegységben hullott nagyobb mennyiségű ónos csapadék. Az észak felől érkezett hidegáramlás hatására a talajmenti rétegek erősen átfagytak, majd a Mediterrán térség felől érkező meleg nedves levegő felsiklott erre, így erős inverzió alakult ki, mely kedvezett az ónos eső kialakulásának. A magasabb területeken ennek megfelelően ónos esőt figyeltek meg, az alacsonyabb területeken a csapadék már vastagabb hideg légrétegen haladt át, így fagyott esőt észleltek. A tanulmány az elektromos hálózatban okozott károkat vizsgálja, melyet a vezetékekre ráfagyó csapadék okozott. A károsodás olyan helyeken történt, ahol a hullott ónos eső mennyisége meghaladta a 30 mm-t. A Gödöllői-dombságban azonban voltak olyan területek is, ahol a závorszerű csapadékból 50 mm ónos eső esett 36 óra alatt. Ez a mennyiség a távvezetéseken méterenként körülbelül 10 kg többletterhelést jelentett, mely a tartóoszlopokon jelentős terhet okozott.

A Horváth és Nagy (2016) egy másik, 2016. január 6–7-én történt ónos esős helyzetet is megvizsgált, melynek keletkezésében fontos szerepe volt az átfagyott felszínnek, az afeletti hideg levegőnek, valamint a Kárpát-medence fölé érkező mediterrán ciklonnak. Jelentős károk elsősorban a déli országrész távvezeték-hálózataiban keletkeztek, mivel itt a csapadék-sáv áthelyeződésével kezdetben ónos eső hullott, ráakódott a vezetékekre, majd a többlettömeget tovább gyarapította a jeges lerakódás miatt megnövekedett keresztmetszetre rátapadó hó is.

Módszertan és elemzés

A modell fizikája

A jégtömeg olvadását, vagyis a tömeg időbeli változását az alábbi egyenlet írja le (Geresdi, 2004):

$$\frac{dm_i}{dt} = \frac{4\pi C}{L_m} \cdot k_a \cdot (T_0 - T_\infty) \cdot f_h + \frac{4\pi C}{L_m} \cdot L_d \cdot D_v \cdot (\rho_{v,s}(T_0) - \rho_{v,\infty}) \cdot f_v$$

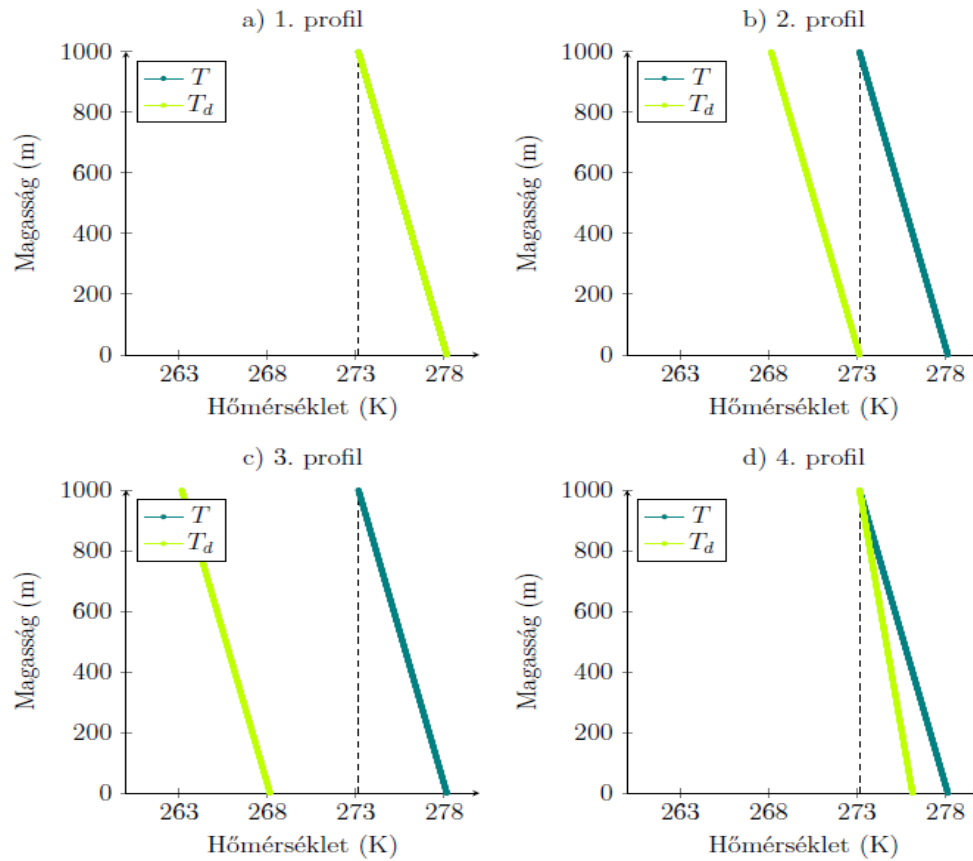
A jobb oldalon található első tag a hővezetési tag, itt a jégrézecske (T_0), és a környezet (T_∞) hőmérsékletkülönbsége látható, illetve mellette a levegő hővezetési együttható (k_a). A második tag a lecsapódás okozta látenshő felszabadulást írja le. Ebben a tagban hóhely felszínéhez közel ($\rho_{v,s}$) illetve attól távol ($\rho_{v,\infty}$) mért vízgőzsűrűség jelenik meg, valamint a diffúziós együttható (D_v). Szerepel az egyenletben az olvadás- (L_m) szublimációs hő (L_d). A hóhely alakját pedig a kapacitás (C) paraméterével vettük figyelembe. Az f_h és f_v tagok a ventilációs hatást veszik számításba.

Hőmérsékleti- és nedvességi profilok

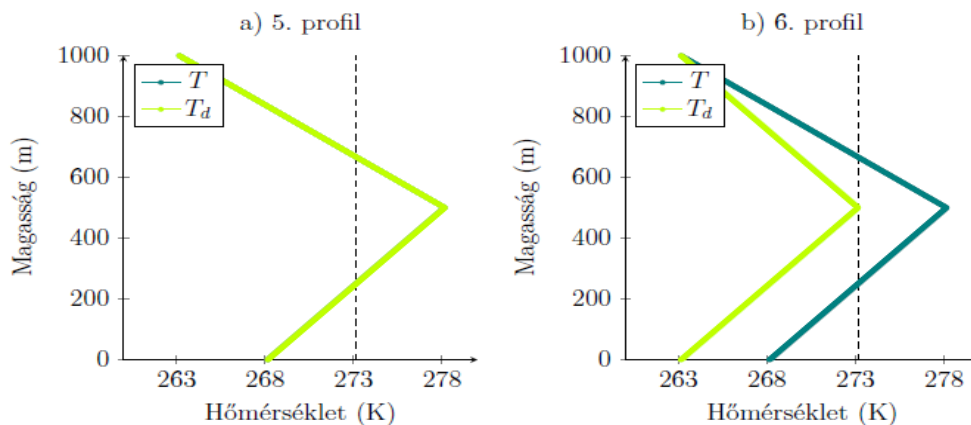
A számításokat a 2. és 3. ábrán megadott hőmérsékleti és harmatpont hőmérsékleti profilok esetén végeztük el. Ezek a profilok nem mért adatok alapján készültek, hanem ún. idealizált profilok.

Az *első profil* esetén (2a. ábra) a hőmérséklet (T) a teljes 1 km-es szakaszon megegyezik a harmatpont hőmérséklettel (T_d), azaz a levegő telített. A hőmérséklet a felszínen 5 °C, 1000 m-es magasságban pedig 0 °C. A *második profil*nál (2b. ábra) a hőmérséklet 5 °C-kal magasabb a harmatpont hőmérsékletnél a teljes szakaszon, így a levegő páratartalma a felszínen közel 70%-os. A *harmadik profil*nál (2c. ábra) a hőmérséklet 10 °C-kal magasabb a harmatpont hőmérsékletnél, így a levegő páratartalma a talajon 50% alatti. A *negyedik profil*nál (2d. ábra) a hőmérséklet a talajon 5 °C, a harmatpont pedig 2,5 °C. A hőmérséklet

1000 m-es magasságban lesz egyenlő a 0 °C-os harmatpont hőmérséklettel. A megszokott hőmérsékleti rétegződésen kívül megvizsgáltunk két, idealizált inverziós helyzetet is. Az *ötödik profilnál* (3a. ábra) a talajon -5 °C a hőmérséklet, 1000 m-es magasságban pedig -10 °C, azonban 500 m-en 5 °C van. Ennél a profilnál 100%-os a levegő páratartalma, vagyis a harmatpont hőmérsékleti és a hőmérsékleti értékek a teljes rétegben megegyeznek. A *hátodik profil* esetén (3b. ábra) a hőmérsékleti profil szintén tartalmaz inverziós réteget, de ebben az esetben a harmatpont hőmérséklet és a hőmérséklet közötti különbség függ a magasságtól. A hőmérséklet az *ötödik profil* értékeivel egyezik meg. Ennél a profilnál az 1000 m-es magasságot kivéve nem lesz telített a levegő.



2. ábra Alkalmazott hőmérsékleti profilok (1.–4. profil).

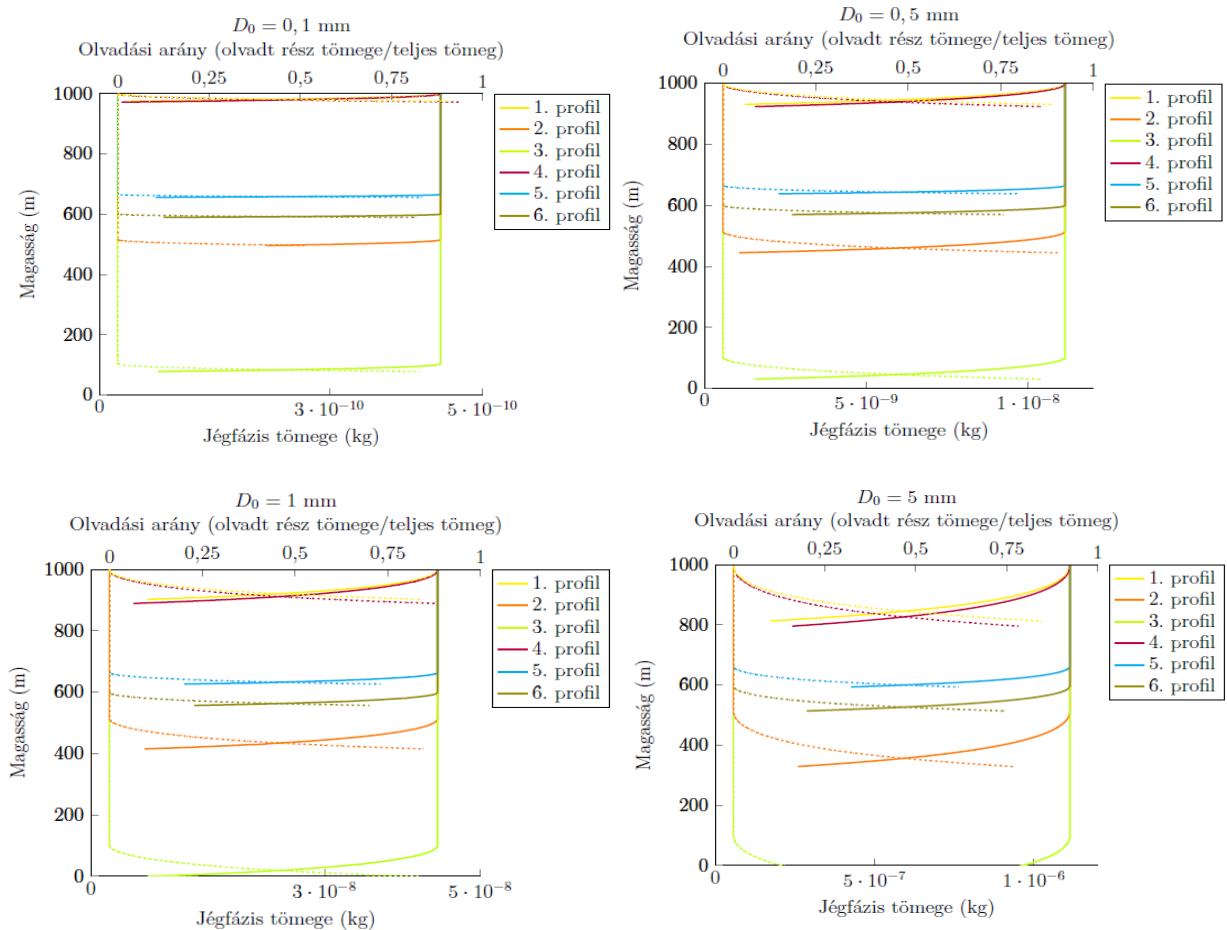


3. ábra: Alkalmazott inverziós profilok (5.–6. profil).

Eredmények

Megvizsgáltuk az egyes kezdeti átmérőjű hópolyhek olvadását a különböző hőmérsékleti- és relatív nedvességi profilok esetén. Fontos megjegyezni, hogy a méretváltozásnál csak a jégtömeg csökkenését engedjük meg, a hópolyhek darabokra törését, illetve a megolvadt víz le-szodródását nem vettük figyelembe. A teljes tömeg (víz + jég) csak az olvadó részecske párolgása miatt változhatott, ennek mértéke azonban többnyire elhanyagolható volt.

A 4. ábra diagramjain a különböző kezdeti átmérőjű hópolyhek (0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm, illetve 5 mm) olvadásának a magasság függvényében történő változása látható eltérő profilok esetén. A folytonos görbék a jégfázis tömegének (m_i) magasság szerinti változását (alsó vízszintes tengely) magasság szerinti változását mutatják (ez kezdetben megegyezik a hópolyhely tömegével (m_{snow})). A szaggatott vonal az olvadási arányt jelöli (felső vízszintes tengely). Ez a megolvadt víz tömegének (m_w) és a hópolyhely tömegének (m_{snow}) aránya, mely kezdetben nulla, az olvadás során m_w növekedni fog m_i rovására, teljes megolvadás esetén pedig a csepp teljes tömegét az olvadó víz adja, ezért az olvadási arány értéke 1 lesz.



4. ábra: A hópolyhek esetén a jégtömeg megváltozása (folytonos vonal), illetve a megolvadt víz tömegének aránya a teljes hópolyhely tömegéhez viszonyítva (szaggatott vonal) a különböző profilok esetén.

A 4. ábrán az 1000 méteres magasságból leejtett hópolyhek különböző profilok melletti olvadását láthatjuk. Az olvadás sebességét a görbék meredeksége szemlélteti: minél kisebb

szöveget zár be a görbe az x -tengellyel, annál gyorsabb az olvadás. Amíg a görbe az y -tengellyel párhuzamos, addig nem kezdődik meg az olvadás.

A grafikonokon láthatjuk, hogy elsőként a magas relatív nedvességű 1. és 4. profilnál kezdődik az olvadás, ezt követik az inverziós profilok (5. és 6. profil), legkésőbb pedig a 2. és 3. profilnál kezdődött az olvadás, melyeknél a relatív nedvesség már igen alacsony.

Az olvadás megkezdődésének magassága csak a környezeti profiltól függ, nem függ a részecskék kezdeti méretétől. Nagyobb kezdeti átmérő, és ezzel arányosan a nagyobb kezdeti tömeg esetén lassabban megy végbe a hópelyhek olvadás.

700 m-es magasság közelében kezdődik az olvadás a telített inverziós profil, 600 m alatt pedig a szárazabb inverziós profil esetén. Ez a magasság azt a szintet jelöli ki, ahol a hőmérséklet a pozitív tartományba lép. Az inverziós profilok esetén a különböző szintek közti hőmérsékleti gradiens igen nagy, ezért a teljes olvadás gyorsan végbemegy.

500 méteres magasságnál kezdődik az olvadás a 2. profil esetén, ahol az olvadás sebessége is lassabb a párolgás okozta hőelvonás miatt, mely hűti a részecskét. A leglassabb olvadást okozó profilnál (3. profilnál) a relatív nedvesség már igen alacsony ($f < 50\%$), ezért az olvadás sebessége sokkal lassabb lesz a többi profilhoz képest. A nagyobb méretek (0,5 mm felett) egyik profil esetén sem olvadnak el teljesen a hópelyhek.

Összegzés

Négy, kezdetben különböző méretű hópehely megolvadását vizsgáltuk hat eltérő hőmérsékleti és relatív nedvességi profil mellett.

Az eredmények alapján látható, hogy a vizsgált hópelyhek esetén legkorábban az olyan profiloknál kezdődik meg az olvadás, ahol az 1000 m teljes tartománya pozitív hőmérsékletű, és a relatív páratartalom igen magas.

Ezt követik az inverziós helyzetek, melyeknél a pozitív hőmérsékleti tartományba érkezve szintén megkezdődik az olvadás, és a hőmérséklet gyors emelkedése miatt gyorsan végbe is megy, először a telített, majd a szárazabb inverziós profil esetében kezdődik meg az olvadás. A halmazállapot-változás az olyan profiloknál zajlott le a leglassabban, ahol a hőmérséklet ugyan $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ fölötti, azonban alacsony a relatív páratartalom. A száraz profiloknál a párolgás okozta hőelvonás hűti a jérrészecskét, és ezzel jelentősen lassítja az olvadást.

Az eddigi elméleti eredményekkel összhangban tehát a modellünk eredményein is látható, hogy az olvadást a minél magasabb hőmérséklet mellett az magasabb páratartalom is elősegíti.

A környezet paraméterein túl természetesen a hópehely tulajdonságai is befolyásolják az olvadást. A modellfuttatás során a hópelyhek alakját minden esetben forgási ellipszoiddal közelítettük, eltérés csupán a méretükben volt. Az 1000 méteres magasságból lehulló hópelyhek közül először a kisebb méretűek, végül a legnagyobbak olvadnak meg. Ez a jelenség két okkal magyarázható: (i) a nagy átmérőjű hópelyhek tömege is nagyobb, emiatt az esési sebességük is nagyobb lesz és gyorsabban érnek földet, (ii) a kisebb hópelyhek felülete a tömegükhöz képest nagyobb emiatt gyorsabban olvadnak, mint a nagyobb hópelyhek.

Hivatkozások

- Csirmaz, K., 2015: A new hail size forecasting technique by using numerical modeling of hailstorms: A case study in Hungary. *Időjárás*, 119: 443–474.
- Fujiyoshi, Y., 1986: Melting snowflakes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 43: 307–311. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043<0307:MS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043<0307:MS>2.0.CO;2)

- Fukuta, N., Savage, R.C., Donovan, G.J., Liu, C-M.*, 1986: Melting of natural snow crystals in a vertical wind tunnel. *Preprints, Conference on Cloud Physics, American Meteorological Society*, 3: 280–283.
- Geresdi, I.*, 2004: Felhőfizika. Dialóg Campus Kiadó, Budapest-Pécs, 91p.
- Geresdi, I., Horváth, Á.*, 2000: Nowcasting of the precipitation type Part I: Winter Precipitation. *Időjárás*, 104: 241–252.
- Geresdi, I., Sarkadi, N., Thompson, G.*, 2014: Effect of the accretion by water drops on the melting of snowflakes. *Atmospheric Research*, 149: 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.06.001>
- Horváth, Á., Nagy, A.*, 2016: A 2016. január 6-7-i szélsőséges időjárás meteorológiai elemzése, különös tekintettel a DÉMÁSZ hálózatában okozott károkra. *Országos Meteorológiai Szolgálat*
- Horváth, Á., Nagy, A.*, 2014: A 2014. december 1-i ónos eső meteorológiai elemzése, különös tekintettel az országos elektromos alaphálózatban okozott károkra. *Országos Meteorológiai Szolgálat*
- Knight, C.A.*, 1979: Observations of the morphology of melting snow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 36: 1123–1130. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1979\)036<1123:OOTMOM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1979)036<1123:OOTMOM>2.0.CO;2)
- Matsuo, T., Sasyo, Y.*, 1981: Non-Melting Phenomena of Snowflakes Observed in Subsaturated Air below Freezing Level. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 59: 26–32. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.59.1_26
- Mitra, S.L., Vohl, O., Ahr, M., Pruppacher, H.R.*, 1990: A wind tunnel and theoretical study of the melting behavior of atmospheric ice particles. *The Journal of Atmospheric Sciences*, 47: 584–590. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<0584:AWTATS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<0584:AWTATS>2.0.CO;2)

Internetes hivatkozások

[1 - Amerikai Meteorológiai Szolgálat] http://www.weather.gov/rnk/Measure_Icing