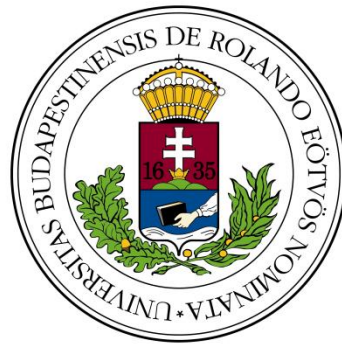


Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Jég a felhőkben: a jégrészecskék szerepe a felhők töltésszétválasztási folyamataiban

SZAKDOLGOZAT



Készítette:

Kordás Nóra

Földtudományi alapszak,
Meteorológus szakirány

Témavezető:

Dr. hab. Ács Ferenc

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2014

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
1.1. Jég a zivatarfelhőkben	3
1.2. Zivatarfelhők töltésszerkezete	5
1.3. Célok	6
2. Nem induktív töltésszétválasztási folyamatok a zivatarfelhőkben.....	7
3. Töltésszétválasztás a jégrészecskéken.....	14
3.1. Töltésszétválasztás molekuláris skálán	14
3.2. Töltésszétválasztás jégrészecskék ütközésekor	26
4. Összefoglalás.....	34
5. Köszönetnyilvánítás	35
6. Irodalomjegyzék.....	36

1. Bevezetés

A jégreszecskek kialakulásával, egyes típusainak vizsgálatával, valamint a zivatarfelhők mikrofizikai folyamataival a felhőfizika, míg a légkörben zajló töltésszétválasztási folyamatokkal és a zivatarfelhők elektromos jelenségeivel a légköri elektromosságban foglalkozik. Mindkét tudományterület a légkörfizika része, mely a meteorológia egyik igen széleskörű és dinamikus fejlődő ága. Szakdolgozatom készítésekor kiemelt figyelemmel tanulmányoztam *Geresdi (2004)* könyvét, valamint *Saunders (2008)* és *Dash et. al. (2001)* számos cikkét. E kutatók már több évtizede végeznek laboratóriumi vizsgálatokat, kísérleteket, valamint zivatarfelhő méréseket annak érdekében, hogy minél pontosabb és átfogóbb leírás szülessen a jégreszecskek töltésszétválasztási folyamatairól. A zivatarfelhőkben a jégreszecskeket a töltésszétválasztási folyamatok egyik alapkövének tekinthetjük. Egyaránt szükségesek mind az induktív, mind a nem-induktív töltésszétválasztási folyamatokhoz.

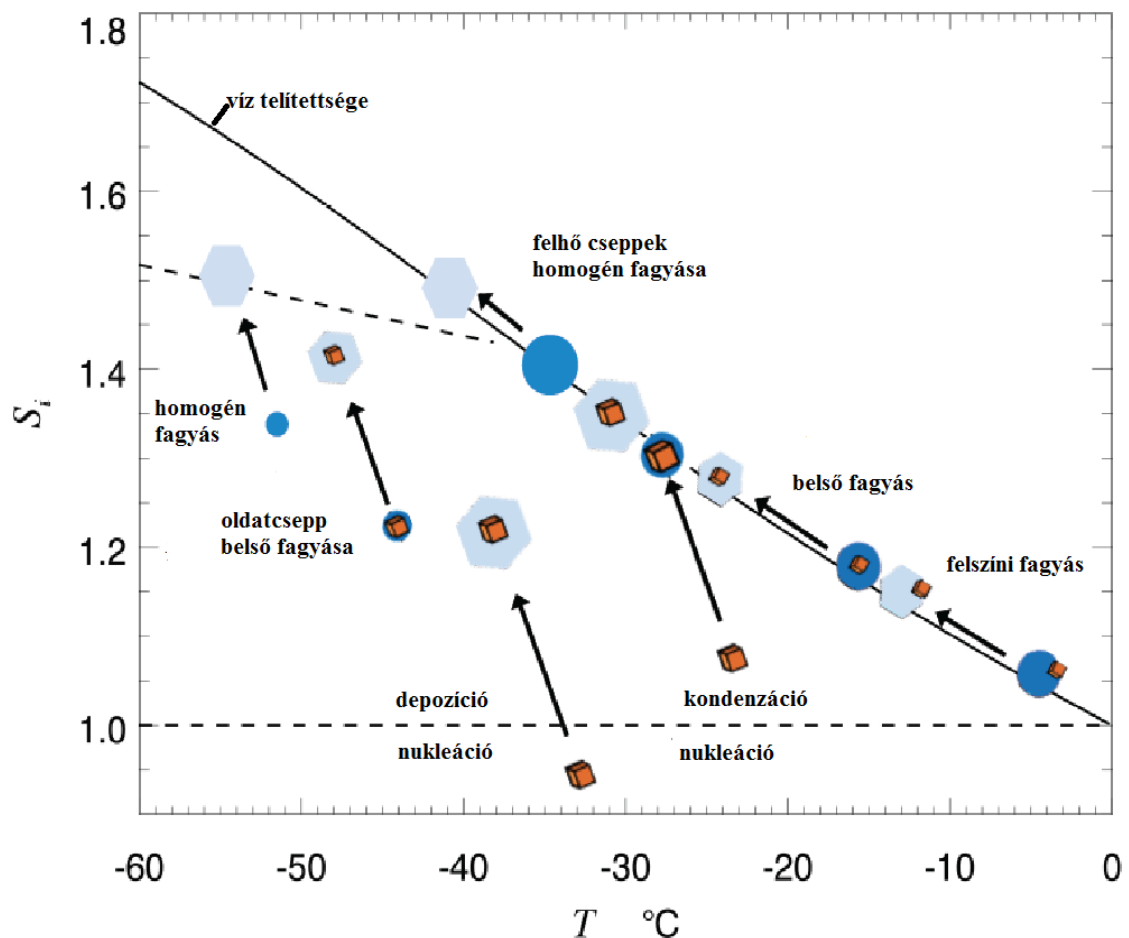
1.1. Jég a zivatarfelhőkben

Számos radarmérés igazolja, hogy zivatarfelhők több fajta jégreszecskeket is jelentős mennyiségben tartalmaznak. Jégreszecskek képződhetnek a zivatarfelhő vízgőzkészletéből és a kondenzálódott vízcseppekből is. Miután a már kondenzálódott vízcseppek a zivatarfelhőben lévő feláramlásokkal a 0°C -os izoterma fölé érnek, megfagyhatnak. A felhőben lévő jégképző részecskének köszönhetően a nagyobb vízcseppek heterogén fagyása viszonylag magas hőmérsékleten is lehetséges. A vízcseppek heterogén belső fagyását már -5°C -on elindítják a bennük lévő jégképző részecskék, valamint heterogén felszíni fagyás zajlik a vízcseppeken, mikor jégképző részecskével ütköznek. Ennek ellenére a legkisebb vízcseppek -35°C -ig folyadék fázisban maradnak. A vízcseppek fagyása során előbb jég szemkezdemények alakulnak ki. Ezen apró jégreszecskek növekedése vízcseppekkel való ütközésük hatására történik. Amennyiben az ütközések nagyon alacsony hőmérsékleten következnek be, a

jégszemkezdeménynek ütköző vízcsepp előbb megfagy, minthogy eloszlan a jégszemkezdemény felszínén (Geresdi, 2004).

A kontinensek felett létrejövő zivatarfelhők általában kevés nagyobb túlhűlt vízcseppet tartalmaznak. Ez esetben a heterogén fagyás helyett a kondenzációs fagyás kerül előtérbe (Geresdi, 2004). -20°C alatti hőmérsékleten kondenzációs fagyás során vízgőzmolekulák csapódnak le a jégképző részecskékre és vékony vízréteget alakítanak ki a felszínükön. E vízréteg fagyásával jelentős mennyiségű jégkristály képződik. Jégkristályok előbb diffúziósan (tehát vízgőzmolekulák beépülésével) növekednek, majd túlhűlt vízcseppekkel ütköznek (zúsmarásodás), a keletkező részecskéket pedig graupelnek nevezzük.

Az 1. ábra a homogén és heterogén (belső és felszíni) fagyást, valamint a depozíciót és a kondenzációs fagyást mutatja a levegő vízgőz telítettségének (S_i) és hőmérsékletének (T) függvényében. Jól látható, hogy a kondenzációs fagyáshoz alacsonyabb hőmérséklet és nagyobb telítettség szükséges, míg a felszíni és a belső fagyás magasabb hőmérséklet és alacsonyabb vízgőztartalom mellett is megvalósulhat.

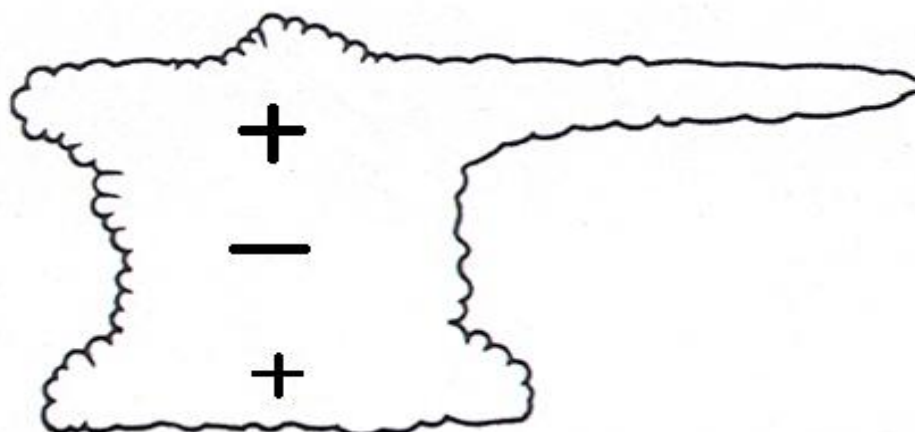


1. ábra: Jégrészecskék keletkezése (Hoose és Möhler, 2012)

Idővel a jégreszecskek olyan nagyra nőnek, hogy a zivatarfelhő feláramlásai már nem képesek a magasban tartani őket (Geresdi, 2004). Ekkor esni kezdenek, majd, miután 0°C -nál melegebb tartományba érnek, olvadásnak indulnak. Felszínükön vízhártya képződik, melyből időnként vízcseppecskék esnek (Geresdi, 2004). Bizonyos környezeti feltételek mellett a jégreszecske felszínéről vízgőzmolekulák lépnek ki, tehát szublimálódik.

1.2. Zivatarfelhők töltésszerkezete

A zivatarfelhőkről - bár sokszor heves jégesővel járnak – általában először nem a jégreszecskek, hanem az elektromos jelenségek (főként a villámlás) jutnak eszünkbe. A villámláshoz potenciálkülönbség, a potenciálkülönbséghez pedig eltérő előjelű elektromos töltésű régiók jelenléte szükséges a zivatarfelhőben (Mona, 2011). A zivatarfelhők töltésszerkezetét általában elektromos tripólussal közelítik (Geresdi, 2004), ahogyan ezt 2. ábra is szemlélteti. A zivatarfelhő földfelszínhez legközelebb eső részén pozitív töltéscentrum is keletkezhet. Felette negatív töltésű tartomány helyezkedik el, melynek felső határa a -20°C -os izoterma környékén van. A zivatarfelhők teteje közelében sok esetben -40°C -os hőmérsékletet és pozitív töltésű régiót észlelnek.



2. ábra: A zivatarfelhők elektromos szerkezete

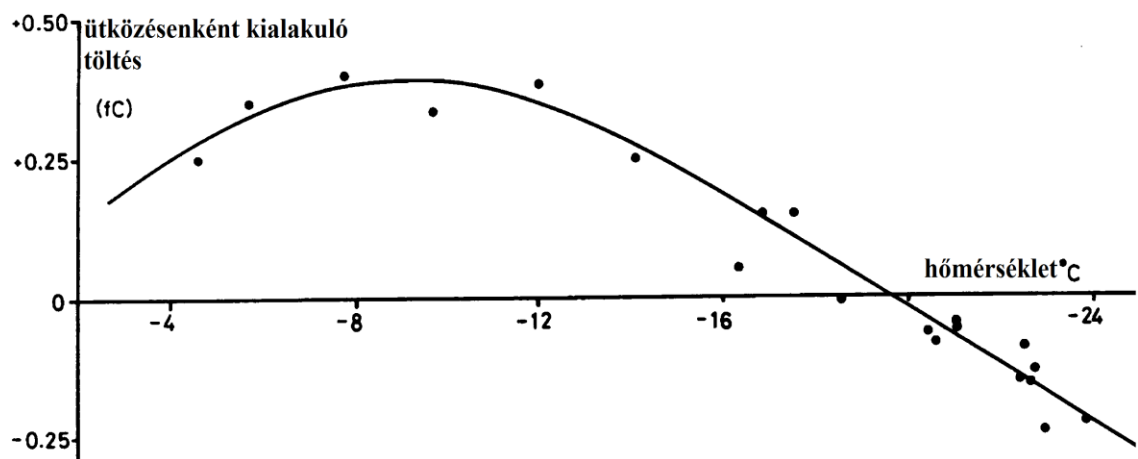
1.3. Célok

Felmerülhet a kérdés, miért pont az előbb említett tripólussal szokás leírni a zivatarok elektromos szerkezetét. Mely folyamatok magyarázzák, indokolják ezen töltéseloszlás kialakulását? Napjainkban az egyik leggyakoribb, legelfogadottabb választ az ún. nem induktív elmélet adja. Ezen elmélet szerint a jégreszecskek egyes felhőfizikai folyamatai eredményezik az elektromos töltések térbeli elkülönülését és a zivatarfelhők tripólus töltésszerkezetét. Dolgozatom legfőbb célja, az úgynevezett nem induktív töltésszétválasztási folyamatok átfogó, részletes ismertetése. A jégkristály/graupel ütközések töltésszétválasztási folyamatainak ismertetése mellett számos más folyamat pl. a Workman-Reynolds fagyási potenciállal és az olvadó graupel elektromos töltésével kapcsolatos folyamatok leírására is kitér.

2. Nem induktív töltésszétválasztási folyamatok a zivatarfelhőkben

A zúzmarásodás során a graupel mellett a Hallett-Mossop folyamatnak köszönhetően (a zivatarok töltésmennyiségéhez képest elhanyagolható mértékű elektromos töltéssel rendelkező) jégkristályok és apró jégzilánkok is keletkeznek. Bár a jégreszecskek depozíciós növekedésével a töltésmennyiségük is növekszik, ennek ellenére csak graupellel ütközve (vagyis közvetten) bírnak jelentős hatással az elektromos folyamatokra (Saunders, 2008). Mivel a zivatarfelhőkben levő feláramlásokkal a jégkristályok egyre magasabbra jutnak, a zúzmarásodó graupel pedig egyre közelebb kerül a felszínhez, gyakoriak a jégkristály és a graupel közötti ütközések. Ezen ütközések során elektromos töltések választódnak szét, amikor a jégkristály és a graupel szétpattannak (Reynolds et al., 1957).

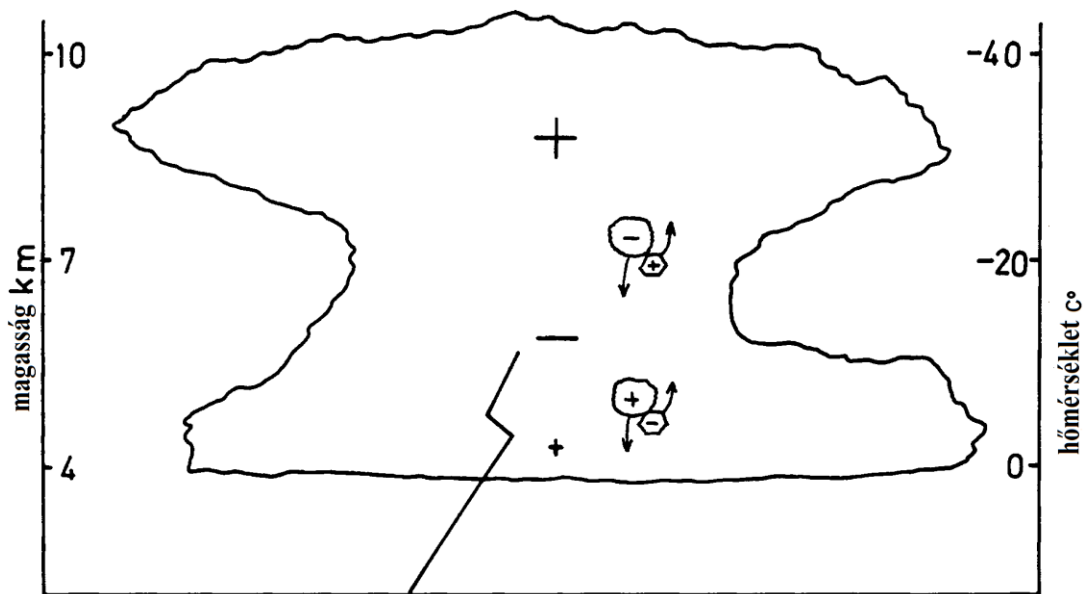
A továbbiakban az az egyik legfontosabb kérdés, hogy az ütközésekkor melyik jégreszecske válik pozitív, ill. negatív töltésűvé, ezen elektromos töltésnek milyen szerepe van a zivatarok elektromos folyamataiban, valamint miben rejlik az előbb említettek magyarázata, oka. Reynolds et al. (1957) szerint az ütközések hatására a graupel negatív töltésűvé válik, majd tovább esik, míg a jégkristályon a pozitív töltések kerülnek túlsúlyba, tovább haladva felfelé a légárammal. Így alakul ki a zivatarfelhő dipólus töltésszerkezete. Takahashi (1978) szerint az ütközésekkor végbemenő töltésszétválasztási folyamatokat a zivatarfelhő hőmérséklete, valamint víztartalma is befolyásolja, ezért egyes esetekben a graupel pozitív töltésűvé, míg más körülmények között negatív töltésűvé válik. Jayaratne et al. (1981) tanulmánya még átfogóbban ismerteti Takahashi (1978) állítását. Egyik kísérletének eredményét a 3. ábra mutatja.



3. ábra: A graupel töltésmennyiségének változása a hőmérséklet függvényében a graupel/jégkristály ütközése során (Jayaratne, 1981)

Az ábrán a graupel töltésmennyiségének hőmérséklet szerinti változása látható egy adott, állandó cseppfolyós víztartalom mellett a graupel/jégkristály ütközés során. Jól kirajzolódik, hogy -10°C -os hőmérsékleten a graupel pozitív töltésűvé, míg -20°C -on már negatív töltésűvé válik az ütközés előtti töltésállapotához képest. Amikor ugyanezt a kísérletet alacsonyabb cseppfolyós víztartalom mellett végezték el, az előjel váltás hőmérsékleti értéke balra tolódott (nőtt a hőmérséklet), így a graupel egy jóval szélesebb hőmérsékleti tartományban (magasabb hőmérsékleteken is) vált negatívvá az ütközés előtti állapotaihoz képest.

Eddig főként arról esett szó, hogy az adott jégreszecske vagy graupel milyen töltést nyer az ütközéskor, most áttérek arra, hogy e folyamat hatására hogyan alakul ki a zivatarfelhők töltésszerkezete.

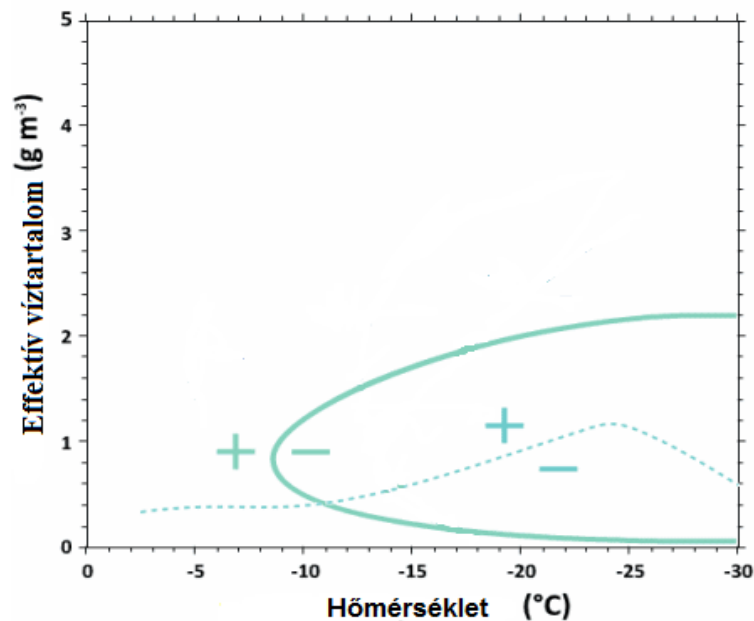


4. ábra: A zivatarfelhő tripólus töltésszerkezete és a graupel/jégkristály ütközésével történő töltésszétválasztás (Saunders, 2008)

A 4. ábra szemlélteti a zivatarfelhők tripólus töltésszerkezetét. Mint látható, a zivatarfelhőkben kb. 7 km magasságban hozzávetőleg -20°C a hőmérséklet. Jayaratne (1981) szerint (víztartalomtól függően) e hőmérsékleten már negatív töltésűvé válik a graupel a jégkristályokkal való ütközés után. Így, nem sokkal a -20°C -os izoterma alatt negatív töltésű graupel-régió alakul ki. A jégkristályok pozitív töltésűvé válva, majd felfelé szállítódva kialakítják a zivatarfelhő felső, pozitív elektromos töltésű régióját. A graupel tovább hullva, és -20°C -nál melegebb, felszínhez közelebbi régiókba jut. A jégkristály/hópehely (angolul aggregate) ütközésekkor megfordul a töltésszétválasztás folyamatának iránya. A hópehelyeken pozitív, míg a jégkristályokon negatív töltések kerülnek túlsúlyba. Ezen ütközéseket követően a negatív töltésű jégkristályok a zivatarfelhők középső negatív elektromos töltésű régiójához járulnak hozzá. A pozitív töltésű hópehelyek pedig kb. 4 km-es magasságban pozitív töltésű tartományt hoznak létre (Saunders, 2008).

Miután beláttuk, hogy a jégkristály/graupel, vagy a jégkristály/hópehely ütközések alakítják döntően a töltésszétválasztás folyamatait, a következőkben e jelenségekkel kapcsolatos különböző kutatási eredmények bemutatására szorítkozunk. Bár eddig nem hangsúlyoztam, a zúzmarásodó graupel, de főleg a jégkristályok depozíciósan is növekednek. A jégrészecskék depozíciós növekedése pedig jelentős szerepet tölt be az

ütközésekkor bekövetkező töltésszétválasztási folyamatokban (*Baker et al., 1987*). Mint már korábban láthattuk számos tanulmány (*Reynolds 1957, Jayaratne 1981*) foglalkozott a jégkristály/graupel, vagy a jégkristály/hópehely ütközések töltésszétválasztási folyamataival. Néhány egymásnak ellentmondó eredmény is született, melyekből arra a következtetésre jutottak, hogy a környezeti feltételek (hőmérséklet és cseppfolyós víztartalom) nagyban befolyásolják az ütközések során tapasztalható töltésszétválasztást (pl. *Jayaratne, 1981*). Emellett egy általánosan elfogadott megállapításnak számított, hogy ütközésekkor a depozíciósan gyorsan növekedő jégfelszínre pozitív, míg a szublimáló jégfelszínre negatív töltések kerülnek (*Saunders, 2008*). Az ellentmondó eredményeket Baker et. al. (*1987*) pontosította és magyarázta meg. Baker szerint az ütköző jégreszecskek egymáshoz viszonyított (azaz relatív) diffúziós növekedési mértéke határozza meg a töltésszétválasztást. Ez az ún. relatív diffúziós növekedési mérték elmélete, mely előírja, hogy a jégkristály/graupel ütközésekkor a gyorsabb diffúziós növekedésű jégfelszín válik pozitív töltésűvé az ütközés előtti állapotához képest. A folyamat még az előbb említettek figyelembe vételével is kétféleképpen mehet végbe: a gyorsabb diffúziós növekedésű részecskéről szállítódnak el a negatív töltések, vagy a lassabb diffúziós növekedésű jégreszecske-ről szállítódnak a pozitív töltések a gyorsabb növekedésű jégreszecske-re. Szükséges tehát a folyamat még részletesebb tanulmányozása, erre a következő fejezetben is ismertetett Dash-elmélet (*Mason és Dash 2000, Dash et al. 2001, Dash és Wettlaufer 2003*) tér ki. A gyorsabb depozíciós növekedésű jégfelszínről a pozitív ionok a jégreszecske belseje felé diffundálnak, így a felszínen az egyszerűen negatív töltésű OH^- ionok lesznek nagy számban. A jégkristály/graupel ütközéskor, amikor a két részecske pillanatszerűen összeér, negatív hidroxid ionok szállítódnak el a gyorsabb depozíciós növekedésű jégkristály felszínéről, majd a két részecske szétpattanásával megvalósul a töltésszétválasztás is. Dash et al. (*2001*) tanulmányát követően a környezeti feltételek elemzésére összpontosítottak, nevezetesen arra, hogy milyen feltételek mellett növekszik gyorsabban a jégkristály a graupelnél (hiszen ütközésük után a graupel negatív töltésűvé válik).

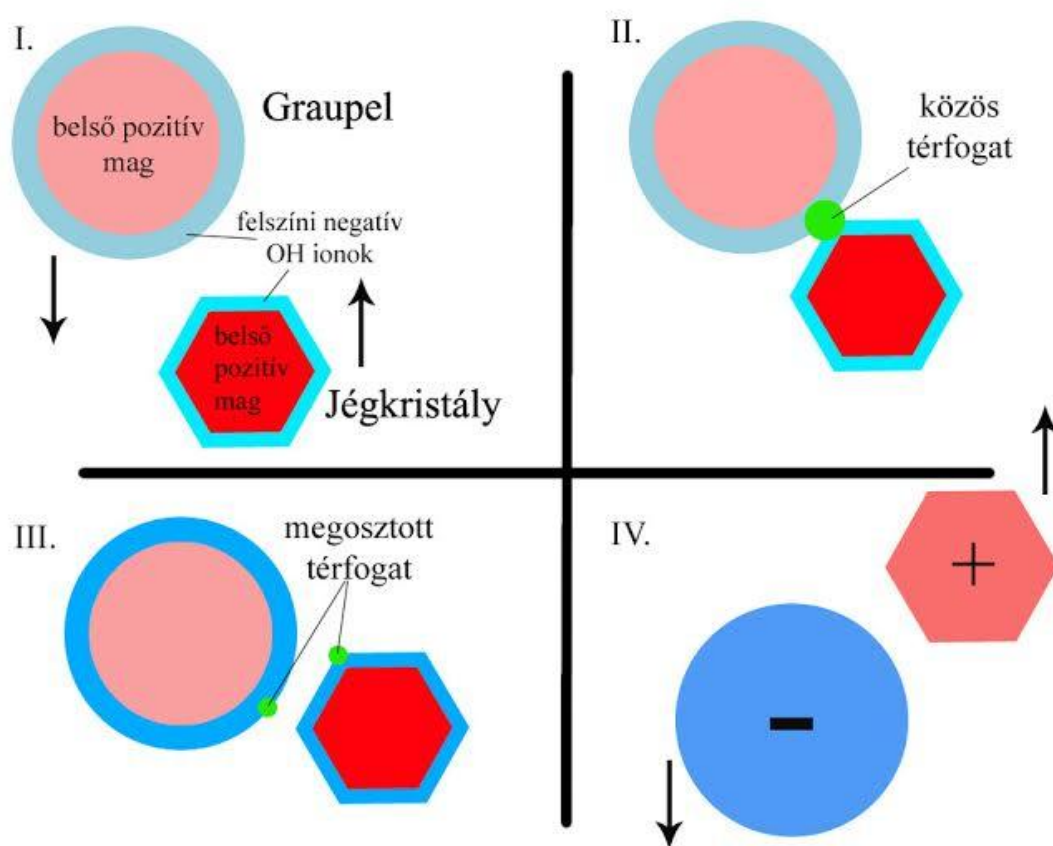


5. ábra: A zúzmarásodó graupel elektromos töltése a hőmérséklet és az effektív cseppfolyós víztartalom függvényében *Takahashi (1978)* eredménye (folytonos vonallal), valamint *Saunders és Peck (1998)* eredménye (szaggatott vonallal) alapján

Az 5. ábrán *Takahashi (1978)*, valamint *Saunders és Peck (1998)* kísérleteinek eredményei láthatók. Fontos megjegyezni, hogy e kísérleteket meglehetősen hasonló körülmények között végezték. Az elemzés céljából tekintsük a -15°C -os és az 1 g/m^3 effektív cseppfolyós víztartalom értékeket! (Zivatarfelhők effektív víztartalma azon vízcseppek mennyisége, melyek graupellel ütköznek (*Saunders, 2008*).) Jól látható, hogy *Takahashi (1978)* kísérletében a graupel negatív töltésűvé válik. Ugyanakkor *Saunders és Peck (1998)* kísérletében pozitív töltésűvé. *Saunders (2008)* ezt az ellentmondásosnak tűnő eredményt a jégkristályok és a vízcseppek közvetlen környezetében levő parciális vízgőznyomás értékek fluktuációival magyarázta. E véleményét a részletes, felhőkben uralkodó viszonyokat reprodukáló kamra kísérletek eredményei alapján fejtette ki (*Saunders, 2008*).

A graupel/jégkristály ütközése során fellépő töltésszétválasztást az elméleti leírások (*Saunders et. al., 2014*), valamint a 6. ábra alapján jellemezhető. A Cb magasabb régióiban az alacsony hőmérsékletek miatt nagy a jégkristályok feletti túltelítés, így a jégkristályok felszínén a depozíciós növekedés nagyobb mértékű, mint a graupelek

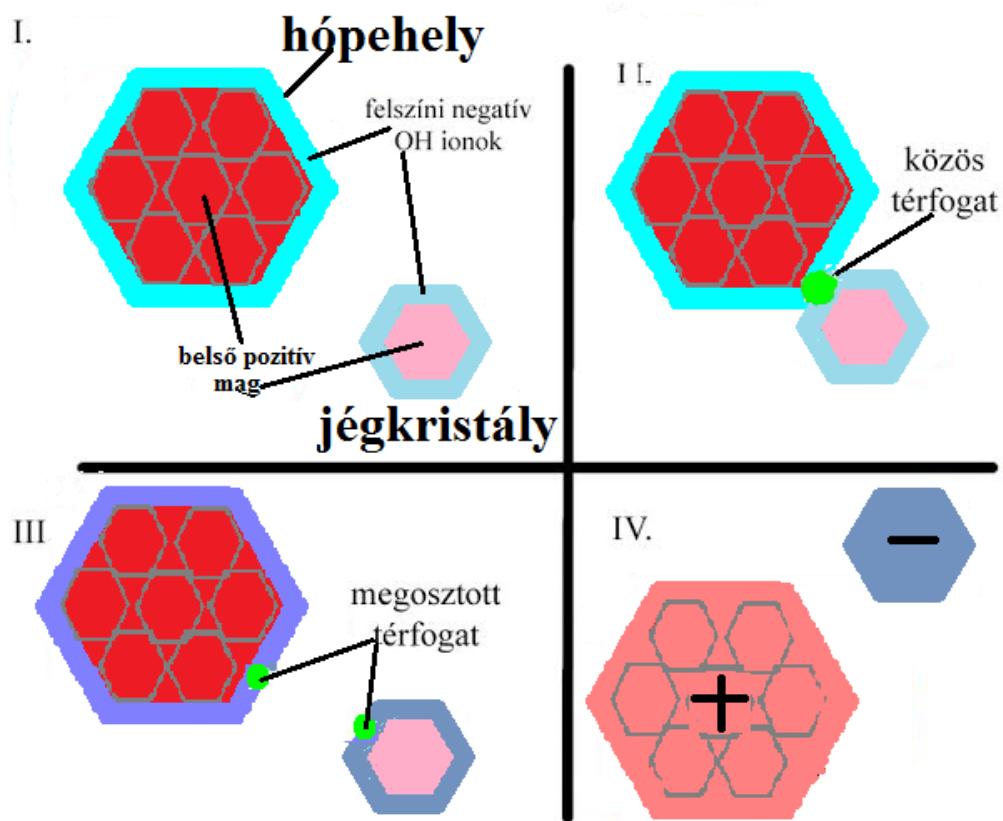
felszínén. A jégkristályok intenzív depozíciós növekedésének hatására magas a felszíni OH^- ion sűrűségük (melyet a 6. ábra élénk kék színnel érzékeltet). A graupel felszínén (a kisebb mértékű depozíciós növekedés miatt) kevesebb OH^- ion található (ezt halvány kék színnel szemlélteti a 6. ábra). Jégkristály/graupel ütközések során a közös térfogatban a töltéssűrűség különbség kiegyenlítődik, majd a relatív diffúziós növekedési mérték elméletnek megfelelően, ütközést követően pozitív töltésű a jégkristály és negatív töltésű a graupel.



6. ábra: Jégkristály/graupel ütközések töltésszétválasztási folyamata (Mona, 2011)

A jégkristály/hópehely ütközések során lejátszódó töltésszétválasztást az előbb mondottak alapján a 7. ábrán a következőképpen jellemezhetjük. Itt hangsúlyozzuk, hogy a jellemzés az analógiából indul ki, és nem a kísérleti eredmények leírását adja, szemben a 6. ábrával, mely megfigyelésekkel igazolható. A hópehelyek feletti aktuális vízgőznyomás igen magas, így a hópehelyek depozíciós növekedési mértéke meghaladja a jégkristályok depozíciós növekedési mértékét. Ebből kifolyólag a hópehelyek felszíni OH^- ion koncentrációja magasabb (melyet a 7. ábra élénk kék színnel érzékeltet), mint a

jégkristályoké. A jégkristály/hópehely ütközéskor ezen koncentrációkülönbség kiegyenlítődik, s a relatív diffúziós növekedési mérték elmélet értelmében az ütközést követően a hópehely pozitív, míg a jégkristály negatív töltésűvé válik, mint ahogy azt a 7. ábra is mutatja.



7. ábra: Jégkristály/ hópehely ütközések töltésszétválasztási folyamatai

Legvégül hangsúlyozzuk még egyszer, hogy a 7. ábra csak egy értelmezési keret, alapjait a hópehelyekre és a jégkristályokra vonatkozó telítési vízgőznyomás értékek közötti viszony határozza meg, mely igen sok tényezőtől függ, függhet.

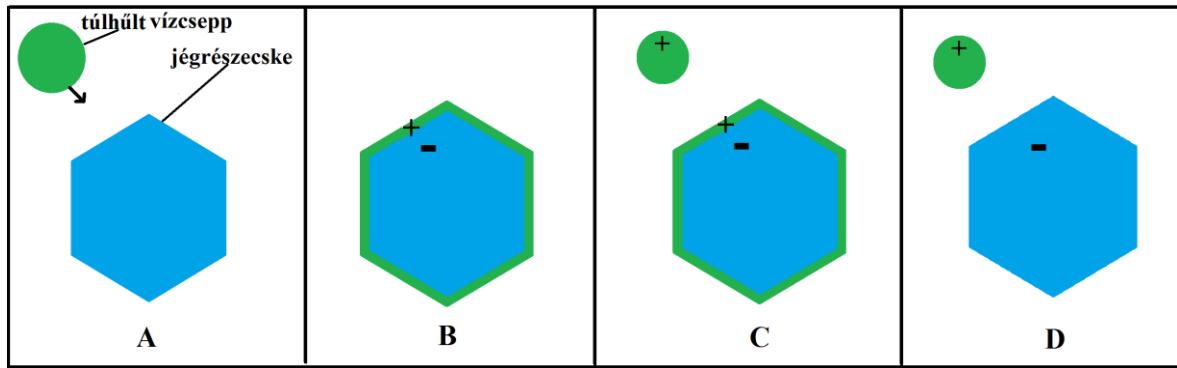
3. Töltésszétválasztás a jégrészecskéken

Zivatarfelhők nem induktív töltésszétválasztási folyamatának átfogó, de vázlatos ismertetése után egyes nem induktív elmélethez tartozó jelenségek részletesebb bemutatására kerül sor. Figyelembe véve az egyes mechanizmusok hatását, dolgozatom e fejezetét két alfejezetre bontottam: az ún. „Töltésszétválasztás molekuláris skálán” című alfejezetre, melyben olyan jelenségek kerülnek leírásra, melyek a jégrészecskék felszínén a pozitív, ill. a negatív elektromos töltések megjelenését szabályozzák. Ezen folyamatok főként közvetetten - az ütközéseken keresztül - járulnak hozzá a zivatarfelhők elektromos szerkezetéhez. A „Töltésszétválasztás a jégrészecskék ütközései során” című alfejezetben, a jégrészecskék ütközésének szentelünk kitüntetett figyelmet.

3.1. Töltésszétválasztás molekuláris skálán

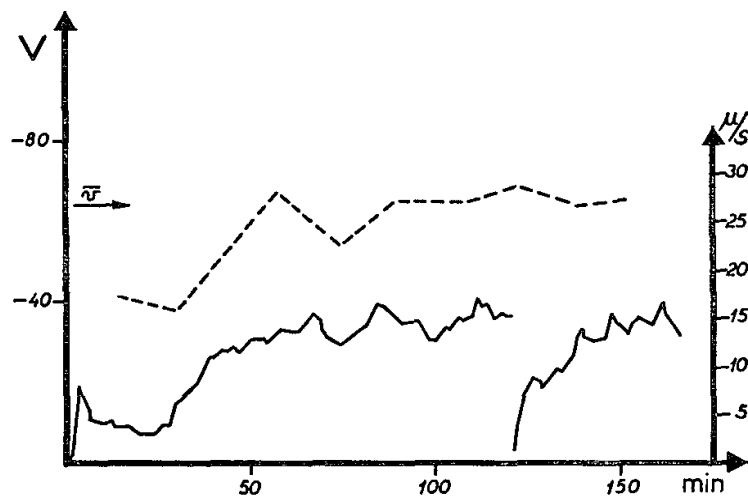
Workman–Reynolds (1950) féle fagyási potenciál

Kis túlhűlt vízcseppek ütközve nagyobb jégrészecskével, ráfagynak a nagy jégrészecske felületére (száraz növekedés), de úgy, hogy a jégfelszín mindig hajszálvékony vízréteggel borított. Workman és Reynolds (1950) szerint e folyamatban töltésszétválasztás következik be a jég/víz határfelületen. Korábban úgy vélték, hogy a zivatarok elektromossága jelentősen nő, amikor a felhőtető magasan és hideg környezetben van. Ekkor a felhőben levő víz fagyásával jégrészecskék képződnek, melyeken (ha azok túlhűlt vízcseppekkel ütköznek) kialakul a fagyási potenciál és végbemegy a határfelszín menti töltésszétválasztás. E gondolatmenetet tartalmazó kezdetleges zivatarmodell szerint, a felhőben levő vízcseppek és jégrészecskék mennyisége, valamint halmazállapot-változásuk befolyásolja a zivatar töltésszétválasztási folyamatait. A -10°C -os izoterma közelében már vannak jégrészecskék és túlhűlt vízcseppek is, melyek egymással is ütközhetnek. Ütközésük során, lévén száraz vagy nedves növekedés esetén is, a jégrészecske és a víz határfelületén kialakul a fagyási potenciál. A jégfázis negatív, míg a folyadékfázis pozitív töltésűvé válik, ahogyan ezt a 8. ábra is mutatja.

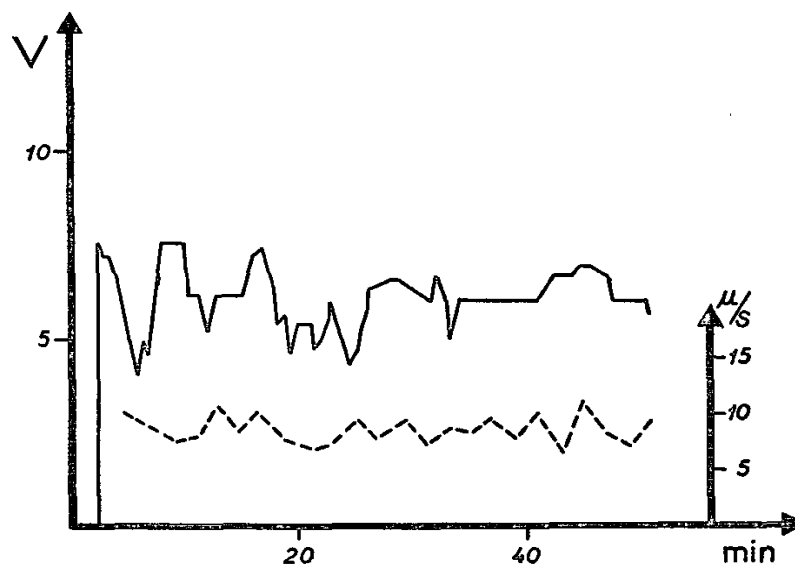


8. ábra: Workman-Reynolds fagyási potenciál: **A** és **B** ábra: a túlhűlt vízcsepp és a jégrézecske ütközése, valamint a fagyási potenciál kialakulása, **C** ábra: pozitív töltésű vízcsepp visszapattanása, **D** ábra: jégrézecske borító vízréteg teljes fagyása

E negatív töltésű jégrézecskek kiemelkedő szerepet játszhatnak a töltésszétválasztásban, így a Workman-Reynolds fagyási potenciál, ha közvetlen is, de hatással lehet a zivatarok töltésszétválasztási folyamataira, elsősorban a továbbiakban ismertetett folyamatok révén. A fagyási potenciál kémiai magyarázatát figyelembe véve fontos megemlíteni, hogy a felhőkben lévő főként kalcium-karbonát aeroszolon kialakuló szén-dioxid tartalmú vízcseppekben kalcium-bikarbonát képződik. A kalcium-bikarbonát (más néven kalcium-hidrogénkarbonát) képződése elősegíti, hogy a fagyás során jelentős potenciálkülönbség jöjjön létre (*Workman és Reynolds, 1950*). Workman és Reynolds 1950-ben publikálták kutatásuk eredményét, azonban a mai napig számos tanulmány készül annak érdekében, hogy minél pontosabb, átfogóbb leírás szülessen a Workman-Reynolds fagyási potenciálról és annak jellemzőiről. (*Levi és Milman, 1965*) ammónia és nátrium-klorid oldatokkal végeztek kísérleteket, eredményeik egy részét a 9. és a 10. ábra szemlélteti.



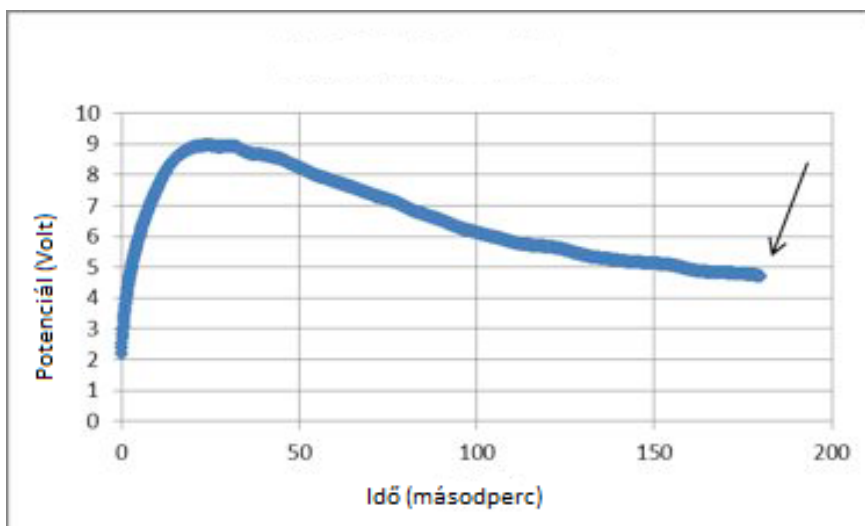
9. ábra: Ammónia oldat fagyása (Levi és Milman, 1965)



10. ábra: Nátrium-klorid oldat fagyása (Levi és Milman, 1965)

A fenti ábrákon a folytonos vonal a fagyási potenciált, míg szaggatott vonal a fagyás gyorsaságát jelöli. Ammónia oldat fagyásakor közelítőleg -40 Voltos negatív potenciál alakul ki, mely rövid időre megszűnik, amikor a 121. másodpercben kiveszik, majd visszateszik az elektródot az oldatba. Nátrium-klorid oldat fagyásakor 5 és 10 Volt között ingadozó pozitív fagyási potenciált mértek. Fontos kiemelni, hogy ammónia oldat fagyásakor a fagyási sebesség is jóval meghaladja a nátrium-klorid oldat fagyási sebességét így megállapítható, hogy a fagyási potenciál arányos az ammónia és a nátrium-klorid oldat fagyási sebességével. Johnson, Park és Hand a 45. Hold-és Bolygó

Tudományos Konferencián (Lunar and Planetary Science Conference) ismertették híg sóoldatokkal végzett kísérleteik eredményét. A felhők vízkészletében (részben az ammónium-szulfát aeroszolok miatt) nátrium-, klorid-, szulfát-, nitrát-, ammónium- és hidrogén-ionok vannak. Johnson, Park és Hand főként nátrium-klorid (mint híg só) oldat fagyását vizsgálva 6-10 Voltos fagyási potenciált mértek. A 11. ábra a NaCl oldat fagyását mutatja be a fagyás kezdete óta eltelt idő és a kialakuló potenciál függvényében.



11. ábra: NaCl oldat fagyása (Johnson et al., 2014)

Kísérleteik közben mind a keletkező jég, mind az NaCl oldat pH értékét mérték, és azt tapasztalták, hogy az oldat pH értéke magasabb, mint a keletkező jégé. Ezen eredményből pedig arra következtettek, hogy a klorid egyszerűen negatív töltésű anionok beépülnek a keletkező jég kristályrácsába, míg a nátrium egyszerűen pozitív töltésű kationok az oldatban maradnak, így jön létre az említett fagyási potenciál.

Érintkezési potenciál

Eltérő fizikai, kémiai, vagy szerkezeti tulajdonságokkal rendelkező anyagok érintkezési felületén potenciálkülönbség alakul ki. E jelenség a jégreszecskek növekedésekor és szublimációjakor is létrejöhet. A jégreszkek depozíciós növekedése során vízgőzmolekulák épülnek be a jégreszkek kristályszerkezetébe, s inhomogén töltéeloszlást hoznak létre. A jégreszkek felületén jelenlevő inhomogén töltéeloszlás váltja ki a töltések szétválasztódását is, így alakul ki az érintkezési felületen a

potenciálkülönbség. E folyamatot nagymértékben befolyásolja az a tény, hogy egységnyi idő alatt mennyivel nő a jégrész tömege.

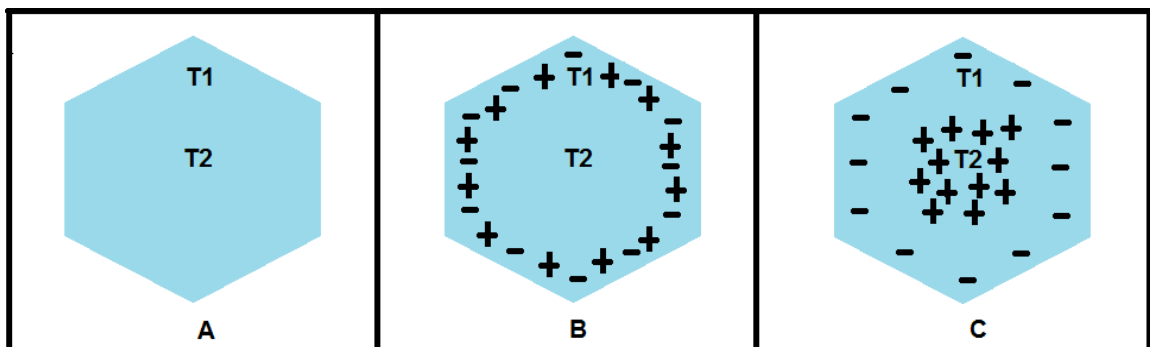
Zúzmarásodáskor jégrészecskék ütköznek túlhűlt vízcseppekkel, és a túlhűlt vízcseppek részben vagy akár teljesen ráfagynak a jégrészecskék felszínére, azaz, graupel képződik. A zúzmarásodó jégrészecskék felszínén töltések válnak szét, ennek következtében negatív elektromos potenciál jön létre. Caranti et al. (1985) mérésekkel igazolta, hogy a zúzmarásodó és a nem zúzmarásodó jégfelszín között potenciálkülönbség van. Ilyenkor a graupel felszíne negatív töltésű. Az érintkezési potenciál hatására a negatív töltésű graupelnek jelentős szerepe van a következő fejezetben is tárgyalt jégkristály/graupel ütközésben (Saunders, 2008).

Diszlokációs töltésszétválasztás

A zúzmarásodás és a depozíciós növekedés különféle szerkezeti hibákat, ún. lyukakat eredményezhet a jégkristályok hexagonális kristályrácsában. Ezek az ún. diszlokációk mozoghatnak, és mozgásuk pozitív töltés transzportot eredményez a kristályrácsban belül. Keith és Saunders (1990) szerint e diszlokációs töltésszállítási mechanizmus is okozhat töltésszétválasztást a jégrészecskék ütközései során. Például abban az esetben is, amikor a depozíciós növekedésű jégkristály ütközik egy zúzmarásodó, nála nagyobb diszlokációs koncentrációval rendelkező graupellel. Itt említsük meg azt is, bár ez a következő alfejezetben részletezve lesz, hogy a jégrészecskék növekedési mértéke szabja meg a bennük levő diszlokációk koncentrációját.

Jégrészecskék termoelektromos jelenségei

Termoelektromos jelenség alatt valamilyen hőmérsékletkülönbség vagy hőmérsékletváltozás hatására kialakuló elektromos potenciálkülönbséget értjük. Mind a légkörben, mind egy adott jégrészecskében, vízcseppben, térben és időben is változik a hőmérséklet, ezért az alábbiakban a zivatarfelhőkben lehetséges termoelektromos jelenségek bemutatása következik.



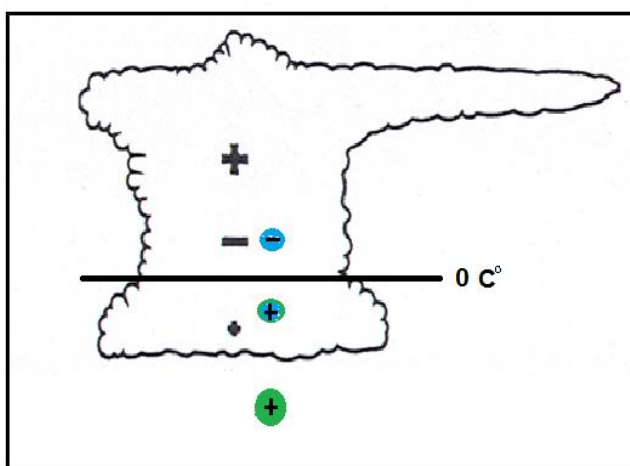
12. ábra: Jégrészecskék felszínének hőmérsékletváltozása és töltésszerkezete. Az **A** ábrán a jégrészecske T1 felszíni és T2 belső hőmérséklete megegyezik, a **B** ábrán a T1 hőmérséklet nagyobb a T2 hőmérsékletnél, a jég molekulái kationokra és anionokra váltak szét, a **C** ábrán a kationok a jégrészecske belsejében, míg az anionok a felszínén vannak.

Elsőként vegyük azt az általános esetet, amikor egy adott jégrészecske felszíne valamilyen (később részletesen tárgyalt okból) felmelegszik (12. ábra). A hőmérsékletváltozás hatására a jégrészecske néhány molekulája egyszeresen pozitív töltésű hidrogén-ionra (kationra) és egyszeresen negatív töltésű OH⁻-ionra (anionra) bomlik. Mivel a jégben a kation mobilitása jelentősen meghaladja az anion mobilitását, így a „mozgékony” kationok eltávolodnak a jégrészecske felmelegedett felszínétől. Töltésszétválasztás megy végbe a jégrészecskében: a felhalmozódó kationok hatására a jégrészecske belseje pozitív elektromos töltésű zónává válik, a hátramaradt anionok hatására pedig a felszín negatív töltésűvé. A termoelektromos jelenségek jégrészecskék töltésszétválasztásában és töltésszállításában játszott szerepét elsőként Workman és Reynolds (1950) tanulmányozta. Később Latham és Mason (1961) kísérletileg is igazolták ezen elméletet. Laboratóriumi munkájuk során mesterségesen fűtött

jégkristályok ütközését vizsgálták, s e tapasztalataik alapján írták le a túlhűlt vízcseppekkel ütköző jégkristályok (zúzmarásodás) esetén a termoelektromos jelenségeket. Későbbi kutatások (*Jayaratne et al., 1983*) azonban kimutatták, hogy a termoelektromos jelenségek lejátszódásához több idő szükséges, mint amennyi idő alatt az ütközések végbemennek, így a zúzmarásodó jégreszecskek esetén nem jelentkeznek, azonban, mint látni fogjuk, más folyamatokra jelentős hatással vannak. Megemlítendő az is, hogy a jégreszecsken belüli hőmérsékleti eltérések hatására mozgásba jöhetnek a jégkristály rácshibái is, azaz, a diszlokációs effektus. Depozíció során vízgőzmolekula épül be a jég kristályrácsába, s eközben látens hő szabadul fel. A felszabaduló látens hő hatására a jégkristály felszíne lokálisan felmelegszik, így jönnek létre depozíció esetén a már ismertetett termoelektromos jelenségek. Szublimáció következtében a jégfelszín hőmérséklete csökken s ez szintén termoelektromos jelenséghez vezet. A jég felszíne (az oda „érkező” kationok miatt) pozitív töltésűvé válik a hozzá képest melegebb, negatív töltésű belső részéhez képest.

Az olvadó graupel elektromos töltése

A zivatarfelhőkben a magasság csökkenésével nő a hőmérséklet. A zivatarfelhő negatív töltés tartományából eső graupelek, amikor elérik a 0°C-os szintet, olvadni kezdenek, s végül pozitív töltésű esőcseppekként érik el a földfelszín, ahogyan a 13. ábra is mutatja.



13. ábra: Zivatarfelhő töltésszerkezete és a graupel olvadása

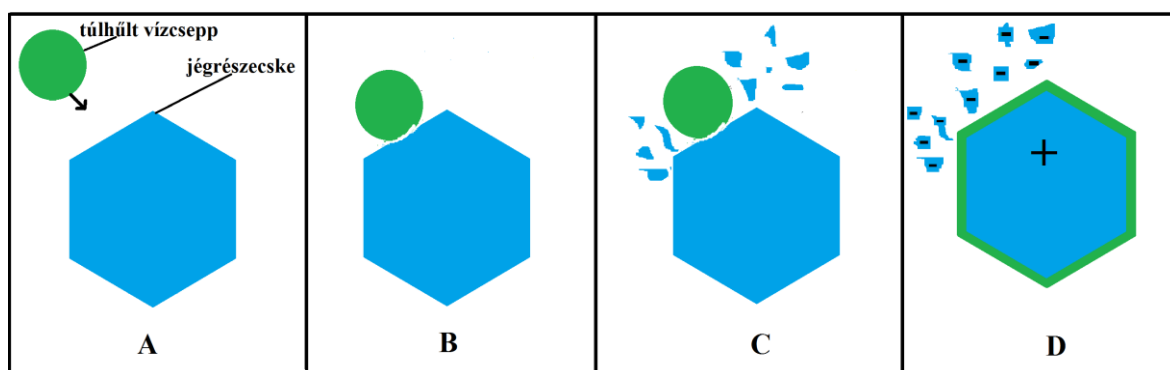
A fenti jelenség magyarázata abban rejlik, hogy az olvadó graupel felszínén vékony, kettős elektromos töltésű vízhártya alakul ki, miközben a benne lévő szén-dioxid molekulák diffundálnak. Szén-dioxid buborékok jönnek létre, melyek a jégreszecske vékony vízrétegének felszínére jutnak és kipukkadnak. A kipukkadó buborékok hatására a kettős töltésű vízhártyáról apró részecskék távoznak. Ezen kis részecskék negatív töltéseket szállítanak el, míg az olvadó jégreszecskeben pozitív töltések maradnak hátra (Saunders, 2008). Részben pozitív töltésű olvadó jégreszecskek okozzák, hogy a zivatarfelhők tripólus töltésszerkezetének megfelelő alacsonyabb pozitív régiójához a felhőalap alatti régió is pozitív töltésűvé válik. Az olvadáskor fellépő folyamatokat jelentősen befolyásolják a jégreszecskek szennyező anyagai, valamint a bennük levő szén-dioxid mennyisége (Saunders, 2008). Dinger (1964) kísérletei során különböző mértékben desztillált vizeket fagyasztott, majd a keletkező jég oladásának elektromos jelenségeit vizsgálta. Az 1. Táblázatot Dinger (1964) munkájából vettem. A táblázatban is közölt eredményei igazolják azon állítását, hogy a jégreszecskekben lévő szennyező anyagok hatására csökken az olvadáskor bekövetkező töltésszétválasztás mértéke (hiszen a hó oladásából származó víz esetén alacsonyabb töltéssűrűséget és szűkebb mérési tartományt tapasztaltak, mint pl. a háromszor desztillált tehát kevesebb szennyeződést tartalmazó víz esetén). Miután a részecske teljesen elolvadt, pozitív töltésű esőcseppként hullik.

Jéghez használt víz forrása	Hasonló vízforrások méréseinek száma	Mért töltéssűrűség átlaga (esu gm ⁻¹)	Mérés tartománya (esu gm ⁻¹)
Háromszor desztillált			
Készlet #1 Desztillálás 11/26/63	9	1.50	1.01 to 2.57
Háromszor desztillált			
Készlet #2 Desztillálás 1/8/64	17	3.84	2.65 to 5.02
Háromszor desztillált			
Készlet #3 Desztillálás 2/11/64	8	4.17	3.25 to 6.59
Hó oladásából származó víz	8	0.173	0.108 to 0.243
Eső víz	6	0.274	0.244 to 0.314

1. Táblázat: Különböző vízforrásokból származó eredmények összehasonlítása (Dinger, 1964)

A Hallett-Mossop (1974) féle jégreszecske-képző mechanizmus és elektromos jelenségei

Zúzmarásodáskor a graupel mellett (a másodlagos kristályképződés, ez esetben ún. Hallett-Mossop jégreszecske-képző folyamat miatt) apró jégzilánkok is képződnek. Hallett és Saunders (1979) a graupel és a jégzilánkok elektromos töltését vizsgálták. Úgy vélték, hogy a zúzmarásodás következtében növekvő jégreszecskek pozitív töltésűek a keletkező jégzilánkok negatív töltéséhez képest, ahogyan ez a 14. ábrán is látható. Kutatásuk egyik fontos kérdése az volt, hogy a Hallett-Mossop jégreszecske-képző folyamat során képződő elektromosan töltött jégzilánkok mennyiben járulnak hozzá a zivatarok elektromos jelenségeihez.

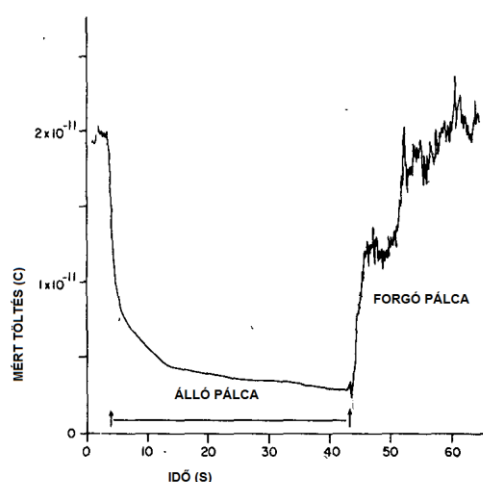


14. ábra: A Hallett-Mossop folyamat és elektromos jelenségei. **A** és **B** ábrák: a túlhűlt vízcsepp és a jégreszecske ütközése, **C** ábra: jégzilánkok képződése, **D** ábra: a képződő hidrometeorok elektromos töltései.

Mint ahogyan azt számos korábbi kutatás is igazolta, a graupel jelenléte kulcsfontosságú a légköri töltésszétválasztásban és ez által a zivatarfelhők elektromos mezőjének kialakulásában. Reynolds et al. (1957) és Takahashi (1978) is azt tapasztalták, hogy zúzmarásodást követően megjelenő jégkristályok, valamint a felhő víztartalma jelentősen befolyásolta a töltésszétválasztást és a mért elektromos töltés mennyiségét. Hallett és Mossop (1974) azt tapasztalták, hogy a graupelek növekedésekor apró jégzilánkok képződtek. E folyamat vizsgálatánál lényeges feladat azt eldönteni (Hallett és Saunders, 1979), hogy maguk a jégzilánkok, vagy az általuk előidézett további folyamatok a nagyobb hatásúak a zivatarfelhők töltésszétválasztási folyamataiban.

Hallett és Saunders (1979) kísérletei

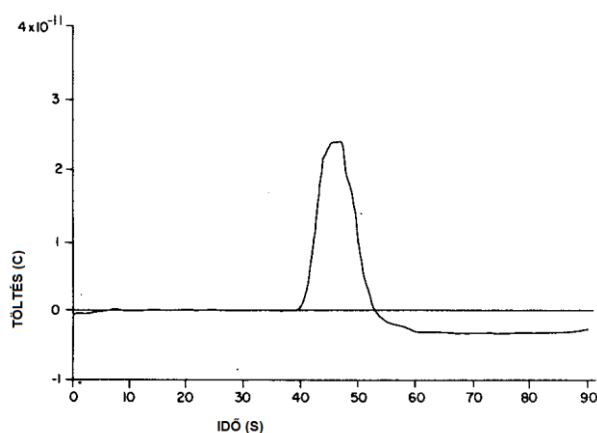
Egyik korai kísérletük során speciális zúzmarásodó pálcák forgatásakor másodlagos jégkristályképződés ment végbe. Ekkor jégzilánkokat és a zúzmarásodó pálcák pozitív töltését észlelték. Mint ahogyan az a 15. ábrán látható, amikor megállították a pálcák forgását a rajtuk mért töltés jelentősen lecsökkent. 40 másodperc elteltével a pálcákat ismét forgásba hozták és ekkor a töltésük is megnövekedett. E folyamat oka valószínűleg abban rejlik, hogy álló pálcák esetén nem képződnek elektromos töltéseket szállító jégzilánkok és nincsenek további töltésszétválasztó ütközések, tehát ezért esik le a pálcák töltése.



15. ábra: A pálcák töltése az idő és a forgás függvényében (Hallett és Saunders, 1979)

Saunders a leírásaiban a Hallett-Mossop jégreszecske-képző folyamat részeként említi a jégzilánkok depozíciós növekedését és az így kialakuló jégkristályokat is. Fontos észrevétel, hogy mind a Workman-Reynolds fagyási potenciál, mind a Hallett-Mossop jégreszecske-képző folyamat, a zúzmarásodás esetén valósul meg. A Workman-Reynolds fagyási potenciál esetén a graupelen pozitív töltést (Reynoldset. al., 1957), míg a Hallett-Mossop jégreszecske-képző folyamat esetén a graupelen negatív töltést (Hallett és Saunders, 1979) mértek. Ezen látszólag ellentmondó eredményeket az indokolja, hogy Reynolds kísérleteiben a vízgőzforrást, mely a vízcseppeket biztosítja, az elektromos töltés mérése előtt elzárják, míg Hallett és Saunders kísérleteiben folyamatos a vízgőzforrás (Hallett és Saunders, 1979). A 16. ábrán Hallett és Saunders egyik – az iménti megállapítást igazoló – kísérletének egyik eredménye látható. E kísérlet során a graupel a rendszerben lévő vízgőz hatására kb. 45. másodpercig növekedett és a 40.

másodperctől a graupelen pozitív töltést mértek. Ezt követően a rendszerben levő vízgőzt elzárták és a graupel negatív töltését észlelték.



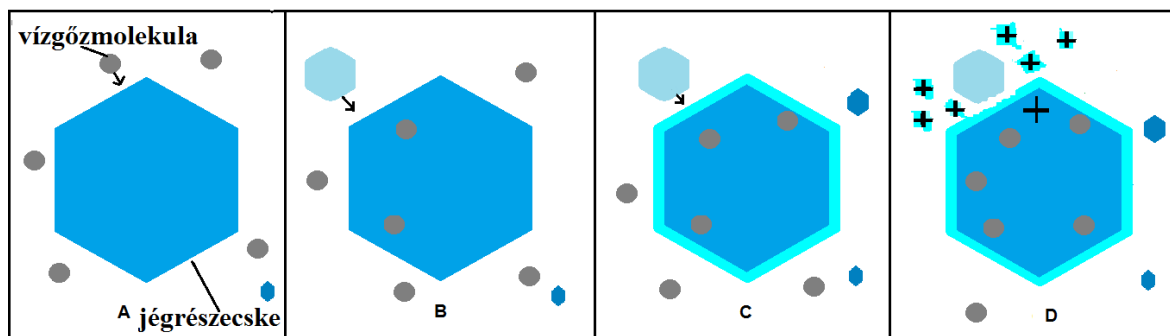
16. ábra: A depozíció majd a szublimáció során bekövetkező töltésváltozás időbeni alakulása (Hallett és Saunders, 1979)

Reynolds et. al. (1957) a zúzmarásodó jégfelszínen negatív töltéseket észlelt, míg Hallett és Saunders kísérleteiben a graupel elektromos töltését környezete vízgőztartalma és a képződő jégzilánkok töltésszállítása is befolyásolta. Végül azt állapították meg, hogy a zúzmarásodást majd a jégzilánk képződés során fellépő elektromos jelenségeket jelentősen befolyásolják mind a hidrometeorok, mind a környezetük fizikai jellemzői. Ebből, valamint a kísérletek során tapasztalt csekély mértékű töltés szállításból arra következtettek, hogy a Hallett-Mossop jégreszecske-képző folyamat a jégreszecskek magas koncentrációja esetén játszik döntő szerepet. A keletkező jégreszecskek töltésszállítása önmagában nem magyarázza a zivatarok elektromos jelenségeit. A jégreszecskek nagy koncentrációja kiemelkedően fontos a további folyamatok számára, melyek meghatározzák a zivatarfelhők többi jelenségeit is.

A jégfelszín töredezése és elektromos jelenségei

A jégreszecskek depozíciós növekedése (vagy szublimációja) során némiképp átalakul a felszínük: a becsapódó (vagy kilépő) vízgőzmolekulák hatására kristályhibák jönnek létre egy vékony felszíni rétegben (melyet az angol nyelvű szakirodalom „frost”-nak nevez). E felszíni réteg a depozíciós növekedésű (vagy szublimálódó) jégreszecskek – későbbiekben is tárgyalt - ütközései során letöredezik róluk (Saunders, 2008). Számos kutatás igazolja, hogy ütközéskor a depozíciós növekedésű jégreszecske felszínén a

pozitív, míg a szublimálódó jégreszecske felszínén a negatív töltések kerülnek túlsúlyba. A leváló jégtöredékek elektromos töltése is az imént említett megállapításnak megfelelően alakul, tehát a depozíciós növekedésű jégreszecskekről leváló töredékek pozitív, míg a szublimálódó jégreszecske felszínéről leváló töredékek negatív töltésűek (Saunders, 2008). A 17. ábra a depozíciós növekedésű jégreszecske ütközését és felszíni „frost” rétegének töredezését mutatja.



17. ábra: A jégreszecske depozíciója (A, B), a jégreszecske felszíni „frost” rétegének kialakulása (C), jégreszecskek ütközése, „frost” réteg töredezése valamint a részecskék elektromos töltései (D)

Rövid összefoglalás

Mielőtt áttérnék a nem induktív elmélet legmeghatározóbb elemére, a jégreszecskek ütközésének a töltésszétválasztási folyamatokra gyakorolt hatásának elemzésére – a könnyebb átláthatóság érdekében – a 2. Táblázatban röviden összefoglalom a fent leírtakat. A táblázat kapcsán csupán arra szeretném felhívni a figyelmet, hogy a folyamatok és a hatásukra keletkező elektromos jelenségek nem mondanak ellent egymásnak, így elméletileg egy adott zivatarfelhőn belül akár egyszerre is előfordulhatnak. Fontosnak tartom továbbá azt is kiemelni, hogy az itt említett folyamatok némelyike az ütközések során is működik, elég, ha a termoelektromos jelenségekre, vagy a diszlokációs töltésszállításra gondolunk, míg a Workman-Reynolds fagyási potenciál például a graupel negatív töltését indokolja.

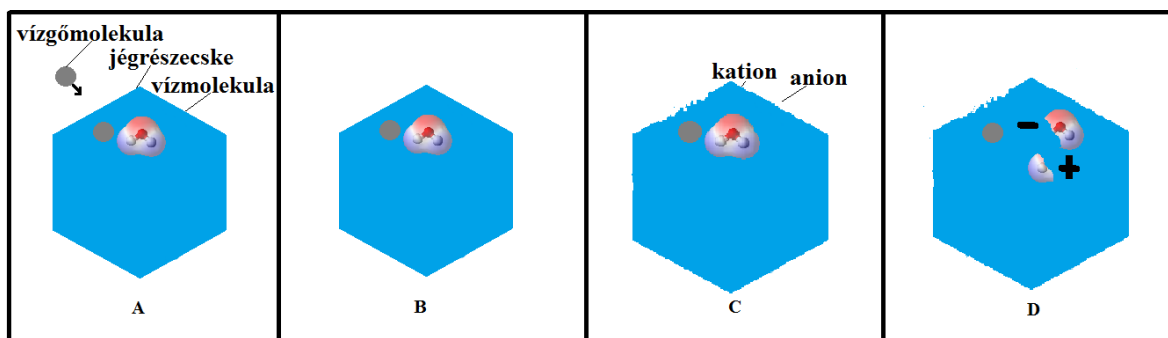
FOLYAMAT NEVE	KAPCSOLÓDÓ FELHŐFIZIKA	ELEKTROMOS JELENSÉG, HIDROMETEOROK TÖTÉSE
Workman-Reynolds fagyási potenciál	zúzmarásodás	a jégrészecske negatív, a vízcsepp pozitív
Érintkezési potenciál	depozíciós növekedés, szublimáció, zúzmarásodás	graupel negatív töltése zúzmarásodó jégrészecskék negatív potenciálkülönbsége
Diszlokációs töltésszállítás	depozíciós növekedés, szublimáció	diszlokációk pozitív töltésszállítása a jégkristályokban, töltésszállítás ütközéskor
Jégrészecskék termoelektromos jelenségei	depozíciós növekedés, szublimáció	depozíciós növekedésű jégrészecske negatív, a szublimálódo pozitív
Olvadó graupel elektromos töltése	olvadás	az olvadó graupel negatív, az apró vízcseppek pozitívak
Hallett-Mossop jégrészecske-képző folyamat elektromos jelenségei	zúzmarásodás, másodlagos jégkristályképződés	a graupel pozitív, a jégzilánkok negatívak
Jégfelszín töredezésének elektromos jelenségei	depozíciós növekedés, szublimáció jégrészecskék ütközése során	depozíciós növekedés: pozitív jégtöredékek, szublimáció: negatív jégtöredékek

2. Táblázat: A molekuláris skálán zajló töltésszétválasztási mechanizmusok és a hidrometeorok mikrofizikai folyamatainak rövid áttekintése

3.2. Töltésszétválasztás jégrészecskék ütközésekor

A jégrészecskék ütközésekor bekövetkező töltésszétválasztást döntően befolyásolja az ütközést megelőző depozíciós növekedésük, ill. szublimációjuk (*Dash et al., 2001*). A jégrészecskék depozíciós növekedésekor vízgőzmolekulák épülnek be a jég kristályszerkezetébe. A (gyors) depozíciós növekedés hatására egyrészt érdekessé válik a jégrészecskék felszíne, másfelől mivel rövid idő alatt nagyszámú vízgőzmolekula csapódik be a jég kristályrácsába, ezért e terhelés sok helyütt felszakítja a vízmolekulák egyes kémiai kötéseit. Ionizáció megy végbe, mely OH^- egyszeresen negatív töltésű ionokat (anionokat) és H^+ egyszeresen pozitív töltésű ionokat (kationokat) eredményez.

Az anionok a megmaradó hidrogénkötéseik hatására a jégrészecskék felszínén maradnak, míg a „mozgékony” kationok a jégrészecske belseje felé indulnak (Dash et al., 2001). A jégrészecskék felszíne az előbbieik hatására negatív, míg a belső tartományuk pozitív elektromos töltésűvé válik, így ún. kettős elektromos töltésű réteg alakul ki rajtuk (Dash et al., 2001). A 18. ábra szemléletesen próbálja érzékeltetni a depozíció során bekövetkező ionizációs effektust.



18. ábra: A jég kristályrácsába „beépülő” vízgőzmolekula (depozíció) és a nem tökéletes beépülésével kapcsolatos ionizációs hatás

A jégrészecskék depozíciós növekedésének mértéke arányos a folyamat hatására keletkezett töltések mennyiségével (Dash et al., 2001). Ezért a depozíciós növekedés folyamatát kell minél átfogóbban jellemezni, ha a jégrészecskék felszínén keletkező töltéssűrűség meghatározása a cél. Ha egy adott vízgőzmolekula molekuláris skálán nagy úthossz megtételére képes a jégrészecskében, akkor sok kémiai kötést szakít fel és így közvetve jelentős ionizációt okoz. A vízgőzmolekulák jégrészecskékben megtett úthosszát, a λ -t, a jégrészecskében levő rendezetlenségek, valamint a vízgőz fluxus, F határozzák meg. Ha például rövid idő alatt nagy mennyiségű vízgőz érkezik egy adott jégrészecskére, akkor sok vízgőzmolekula épül be, de az egyes molekulák rövid utat tesznek meg, mielőtt eltemetődnének a „rájuk” érkező többi vízgőzmolekula által. $\lambda = \sqrt{2D_s T'}$ (Einstein, 1905), ahol D_s a felszíni diffúziós együttható, a T' idő pedig a „beépülési” idő, mely a következő képlettel fejezhető ki: $T' = 1/(AF)$, ahol A a jégrészecske felszínének depozíció által érintett területe. Az utóbbi képletet felhasználva, $\lambda = \sqrt{2D_s / AF}$ (Dash et al., 2001).

A depozíciós vízgőzmolekulák által okozott rendellenességek felszíni sűrűsége arányos a hatásukra létrejövő ionizáció mértékével (*Dash et al., 2001*):

$$\sigma_g = e/\lambda^2 = \xi eAF/2D_s, \quad (1)$$

ahol σ_g a felszíni töltéssűrűség, e az elemi töltés, ξ a Dash elmélet változó paramétere az ún. felszíni szerkezeti rendellenességi tényező, mely a légköri szennyezők és a hőmérséklet hatását írja le. A későbbiekben tárgyalt ütközési olvadás szempontjából is kiemelkedően fontos a kationok eloszlásának meghatározása a jégreszcskében. A depozíció okozta ionizáció hatására létrejövő „mozgékony” kationok jelentős kinetikus energiával rendelkeznek, mikor a jégreszcse belseje felé indulnak. A felszíni anionok azonban vonzzák őket, így a jégreszcse felszínétől korlátozott mértékben távolodhatnak csak el (*Dash et al., 2001*). Ennek ellenére, az esetek többségében, a kationok messze kerülnek a jégreszcse felszínétől, ha molekuláris skálán szemlélődünk, így az ütközések során csak a „közeli” felszíni negatív anionok szállítódhatnak el róla (*Dash et al., 2001*). A jégreszcse felszínén levő kettős elektromos rétegben a kationok és az anionok közti potenciálkülönbséget a ψ_s felszíni érintkezési potenciál (contact potential) jellemzi, melynek segítségével a potenciálkülönbség profilja (a mélységi z koordináta szerinti változása), $\psi(z)$, a következő képlettel adható meg (*Dash et al., 2001*):

$$\psi(z) = \frac{2k_bT}{e} \ln \left[\frac{1 + \tanh\left(\frac{e\psi_s}{4k_bT}\right)e^{-\kappa z}}{1 - \tanh\left(\frac{e\psi_s}{4k_bT}\right)e^{-\kappa z}} \right] \quad (2)$$

ahol k_b a Boltzmann állandó, T a hőmérséklet, e az elemi töltés, z a jégreszcse felszínétől a belsejébe mért távolság, κ pedig az ún. Debye hossz, mely ez esetben a kation által megtett „úthosszat” jelöli. A fenti képlet kiszámításához szükséges a Debye hossz és az érintkezési potenciál meghatározása (*Dash et al., 2001*):

$$\kappa^{-1} = \left(\frac{\epsilon\epsilon_0 k_b T}{n_{b\pm} e^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$\psi_s = \frac{2k_bT}{e} \sin^{-1} \left(\frac{\sigma_s}{\sqrt{8\epsilon\epsilon_0 k_b T n_{b\pm}}} \right) \quad (4)$$

ahol ε az átlagos dielektromos állandó, ε_0 a vákuum permittivitása, $n_{b\pm}$ a kationok (n_{b+}) és az anionok (n_{b-}) háttér ion sűrűsége a jég belsejében, σ_s pedig a felszíni töltéssűrűség.

Fizikai szempontból két jégrészecske ütközése rugalmatlan ütközésnek számít, tehát az ütközésben résztvevő részecskék mozgási energiájának egy része hővé alakul. Ezen hő (és a felszabaduló depozíciós hő) hatására a két jégrészecske ütközésekor határfelületi olvadás megy végbe mielőtt a mozgási energia megmaradó részének következtében szétpattannának. Az ütközés alatt végbemenő olvadás hatására (ha rövid időre is) folyadékréteg alakul ki a jégrészecskék között. Ezen folyadékréteg fontos szerepet tölt be az ütközéskor végbemenő töltésszétválasztásban és a tömegáramlásban (*Dash et al., 2001*). A jégrészecskék felszínén levő hidroxid-ionok diffundálnak a folyadékfázisba. Az ütközési olvadáskor zajló töltésszállítást leginkább az olvadt folyadék vastagsága, dm befolyásolja, mely a következő képlet segítségével határozható meg (*Dash et al., 2001*):

$$dm = \Delta E / Aqt \quad (5)$$

ahol ΔE a teljes ütközési energia hővé alakuló része, A a jégrészecskék felszínének ütközés által érintett területe, q a fúzió látens hője (mely alatt ez esetben állandó hőmérséklet mellett egységnyi szilárd fázisú anyag olvadásához szükséges hőmennyiség értendő (*Singh, 2001*)), t pedig a jégrészecske felszínének redukált olvadási hőmérséklete $t = (T_o - T) / T_o$ ahol T_o a jég olvadáspontja). A fenti képlet jól érzékelteti az ütközési energia hővé alakuló részének és az olvadt réteg vastagságának kapcsolatát (minél nagyobb része alakul hővé a teljes ütközési energiának, annál vastagabb lesz az olvadt réteg). Az ütközési olvadást a környezet hőmérséklete, a jégrészecskék molekuláris kölcsönhatásai, valamint a bennük levő szennyező anyagok is befolyásolják. Ha a jégrészecskék felszínének közelében rendellenességek vannak, akkor növelik a jégfázis szabad energiáját, s ezáltal az olvadt réteg vastagságát is (*Dash et al., 2001*). Fontos megjegyezni, hogy az ütközések időtartama általában igen rövid, kb. 0.1 ms (*Dash et al., 2001*). Ez idő alatt csak a jégrészecskék felszínén levő hidroxid-ionok diffundálnak az olvadékvízbe, mivel a pozitív kationok túl messze vannak, mélyebben jégrészecskék belsejében. A fenti (olvadt réteg vastagságának meghatározására szolgáló) képletben az ütközési energia hővé alakuló részének nagysága függ a részecske méretétől, a teljes ütközési energiától és az ütközés szögétől is, általában 10 %-ra becsülik. Az ütközés

területe A a rugalmas ütközés Hertzian elméletéből határozható meg a következő képlettel (*Dash et al., 2001*):

$$A = 13,4V^{4/5} R^2(\rho/E_e)^{2/5}(\cos\varphi)^2 \quad (6)$$

ahol V a sebesség, R a gömb sugara, ρ a sűrűség, φ az ütközés szöge, E_e az effektív Young modulus, mely a következő képlet segítségével határozható meg (*Dash et al., 2001*):

$$1/E_e = (1 - \gamma_1^2)/E_1 - (1 - \gamma_2^2)/E_2 \quad (7)$$

ahol γ_1 és γ_2 a Poisson hányadosok, E_1 és E_2 az egyéni modulusok.

A határfelületi olvadás mellett *Dash et al. (2001)* tanulmánya említést tesz a felszíni olvadásról, mely jégreszecskek és vízgőzmolekulák érintkezési felületén a fázisváltásból eredő hőfelszabadulás hatására megy végbe. Azonban számos tanulmány igazolja, hogy a felszíni olvadásnál (mely egyes kutatások szerint kizárólag $-4C^\circ$ feletti hőmérsékleten lehetséges) sokkal jelentősebb mértékű a határfelületi olvadás. A határfelületi olvadás során általában egy alacsonyabb hőmérsékletű, depozíciós növekedésű és egy melegebb, szublimálódó jégreszecske ütközik (*Mason és Dash, 1999, 2000*). Felvetődhet a kérdés, magyarázzák-e egy melegebb és egy hozzá képest hidegebb jégreszecske ütközésekor zajló töltésszétválasztást az előző fejezetben ismertetett termoelektromos jelenségek. *Mason és Dash (2000)* kutatásai alátámasztják, hogy depozíciós növekedésű és szublimálódó jégreszecskek ütközésekor határfelületi olvadás megy végbe. Az olvadás hatására zajló tömegáramlásnak, valamint a jégreszecskek eltérő növekedési mértékének jóval nagyobb szerepe van a töltésszétválasztásban, mint a termoelektromos jelenségeknek (*Mason és Dash 2000*). Ütközéskor a hidegebb, depozíciós növekedésű jégreszecske felszíne kevésbé, a szublimálódó jégreszecske felszíne nagyobb mértékben olvad meg. Az olvadt folyadékban a felszíni töltéssűrűség különbségük kiegyenlítődnek, majd a részecskék szétpattannak (*Dash et al., 2001*). Ekkor az olvadt folyadékból azonos mennyiséget szállítanak el, melynek következtében tömeg áramlik a depozíciós növekedésű jégreszecske felé, a töltéskiegyenlítés pedig töltésszétválasztást eredményez az ütközés előtti állapothoz képest. A környezet alacsony hőmérsékletein előfordulhat, hogy a jégreszecskek megolvadt része a szétpattanásukat megelőzően fagyni kezd. Ekkor a hidegebb részecske szállít el egy kicsivel többet a folyadékból (*Dash et al., 2001*). Különböző hőmérsékleti, fizikai paraméterek

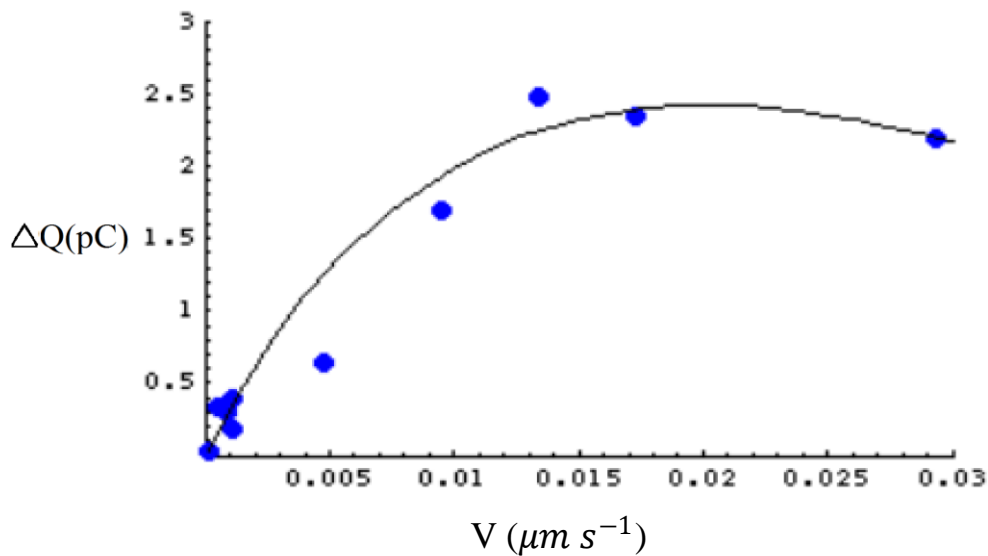
segítségével becslést készíthetünk arra, hogy mennyi folyadék fagy újra a visszapattanást megelőzően δh (Dash et al., 2001):

$$\delta h = \frac{\delta \tau}{\rho_s q} k_t \nabla T \quad (8)$$

ahol $\delta \tau$ az ütközés időtartama, ami általában 0.1-1 ms, ρ_s a sűrűség, q az ütközéskor felszabaduló látens hő, k_t a jég hővezetési együtthatója, ∇T pedig a helyi hőmérsékleti gradiens értéke. Bár nem az újra fagyás a folyamat legmeghatározóbb tényezője, ennek ellenére, mivel az újra fagyott folyadékban már nem lehetséges a töltésszállítás, e jelenséget érdemes számításba venni.

Két depozíciós jégreszecske ütközésekor a gyorsabban növekvő (a nagyobb depozíciós növekedésű) jégreszecske körül (mivel ő kezdetben több negatív töltéssel rendelkezik) szállítódnak el a negatív töltések (hidroxid-ionok), így pozitív töltésűvé válik (Baker et al., (1987) relatív diffúziós növekedési mérték elmélete).

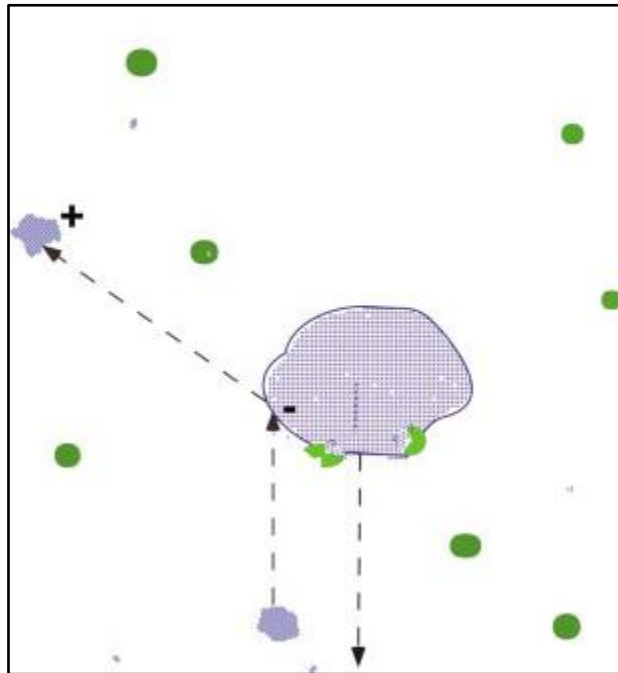
Mint azt már korábban is említettem, a jégreszecskek depozíciós növekedési mértéke arányos a növekedés hatására keletkező töltések mennyiségével. Azonban a depozíciós növekedésű jégreszecskek ütközésekor szállított negatív töltésmennyiség már nem feltétlenül arányos a depozíciós növekedéssel. Az ütközéskor bekövetkező töltésszétválasztásnak van egyfajta túltelítése. Tegyük fel, hogy nagyon nagy a jégreszecske depozíciós növekedési mértéke. Ekkor a felszínén levő rendkívül sok egyszeresen negatív töltésű, OH^- ion már jelentős elektromos teret hoz létre, melynek hatására a jégreszecske felszínének közelében maradnak pozitív kationok. Ez esetben, ha a jégreszecskek ütközési energiája elég nagy, akkor a felszín közeli felszabaduló pozitív ionok semlegesítik a felszabaduló negatív ionokat s ez a töltésszétválasztás csökkenését eredményezi (Dash et al., 2001).



19 ábra: Töltésváltás az ütközési sebesség függvényében (*Dash et al., 2001*)

Az 19. ábra a jégreszecskek töltésváltásának túltelítését hivatott bemutatni. ΔQ a 10^{-8} m^2 -es ütközési területen levő töltésmennyiség (mely függ a depozíciós növekedés mértéktől), V a jégreszecskek ütközési sebessége (mely meghatározza az ütközési energia nagyságát) (*Dash et al., 2001*). Mint látható, $0,03 \mu\text{m s}^{-1}$ ütközési sebesség esetén az ütközési energia már elég nagy ahhoz, hogy a jégreszecskek felszínéhez közelebb levő pozitív ionok is diffundáljanak a határfelületi olvadás hatására kialakuló folyadék rétegbe. Ezen pozitív ionok semlegesítik az olvadt folyadékrétegbe jutó negatív ionokat. Így a kisebb sebességű ütközésekhez képest kevesebb nettó töltés van az ütközési felületen.

A valóságban a zivatarfelhők környezeti paraméterei gyorsan változnak, bennük egyszerre több olyan felhőfizikai folyamat is végbemehet, amely töltésszállítást és töltésváltást okoz és e folyamatok egymásra is hatással vannak. A 20. ábra egy zúzmarásodó graupel és egy apró jégreszecske ütközését és az ütközés által okozott polarizációt mutatja. A depozíció mellett más jelenségek – akár zúzmarásodás – hatására is létrejöhet negatív töltéstöbblet a jégreszecskek felszínén. *Baker et al. (1987)* számításai szerint előfordulhat, hogy zúzmarásodáskor, miközben a jégreszecske felszínére fagy a túlhűlt vízcsepp, vízgőz molekula is jut levegőbe (párolgás). A vízgőzmolekulák a jégreszecske felszínére rakódnak és így depozíciós növekedés is zajlik.



20 ábra: A zúzmarásodó graupel és az apró jégrészecske, valamint az ütközésükkel megvalósuló töltésszétválasztás (Dash és Wettlaufer, 2003)

Annak érdekében, hogy Dash elméletével a zivatarfelhők meglehetősen bonyolult és összetett jelenségeit is le lehessen írni, szükséges néhány egyszerűsítés. Például a zivatarfelhőkben a depozíciós növekedésű – és a zúzmarásodó - jégrészecskék felszíne érdes és egyenetlen, ennek ellenére a Dash-elmélet sima felszínnel számol. Depozíciós jégrészecskék ütközésekor az ütközési olvadás a jégrészecskék felszínének mélyebb rétegeit is érinti, így olvadáskor „eltűnnek” a felszín egyenetlenségei. Ezért nem okoz nagy hibát, ha simának tekintik a jégrészecskék felszínét.

4.Összefoglalás

Miután röviden bemutattam, mely felhőfizikai folyamatok határozzák meg a jégreszecskek tulajdonságait a zivatarfelhőkben, a nem induktív elmélet átfogó ismertetését tűztem ki célul. A 2. fejezet – véleményem szerint – tömör válasszal szolgál arra a kérdésre, hogy miképp alakul ki a zivatarfelhők tripólussal közelíthető elektromos szerkezete. Számszerűen összesen 7 olyan molekuláris skálán működő mechanizmust írtam le, melyek hozzájárulhatnak a nem induktív elmélet legfontosabb elemének, a jégkristály/graupel ütközések elektromos jelenségeinek megértéséhez. A jégkristály/graupel ütközések bemutatásához segítségül hívtam Dash (2001) elméletét, mely részletesen és számszerűen jellemzi e folyamatot.

Dolgozatom készítésekor igyekeztem részletesen, széleskörűen tanulmányozni a témához tartozó szakirodalmat. Természetesen e dolgozat kereteit messze meghaladja az összes jelentős kutatási eredmény feldolgozása, ennek ellenére a legmeghatározóbb cikkek értelmezésével mélyebb betekintést nyerhettünk a nem induktív mechanizmusok töltésszétválasztási folyamatairól.

5. Köszönetnyilvánítás

A legnagyobb köszönettel témavezetőmnek, dr. Ács Ferencnek tartozom munkám irányításáért, valamint a témaválasztásban és szakmai kérdésekben nyújtott segítségéért. Köszönöm továbbá családom, barátaim, türelmét és megértését, így nyugodtan koncentrálnálhattam dolgozatom készítésére.

6. Irodalomjegyzék

- Baker, B., Baker, M., B., Jayaratne, E., R., Latham, J., Saunders, C., 1987: The Influence of Diffusional Growth Rates On the Charge Transfer Accompanying Rebounding Collisions Between Ice Crystals and Soft Hailstones. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1987, 1193.–1215. p.
- Caranti, J., M., Illingworth, A., J., Marsh, S., J., 1985: The charging of ice by differences in contact potential. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 6041.-6046. p.
- Dash J., G., Wettlaufer J., S., 2003: The surface physics of ice in thunderstorms. *Can. J. Phys.*, 2003, 64-70.
- Dinger, J., E., 1964: Electrification Associated with the Melting of Snow and Ice. *J. of Atmos. Sci.*, 1964, 162-166.o
- Einstein, A., 1905: On the movement of small particles suspended in stationary liquid demanded by the molecular-kinetic theory of heat. *Investigations on the Theory of Brownian Movement*, 1905, 1-18.o
- Geresdi, I., 2004: Felhőfizika. Dialóg Campus Kiadó, Budapest-Pécs. 272 p.
- Hoose, C., és Möhler, O., 2012: Heterogeneous ice nucleation on atmospheric aerosols: a review of results from laboratory experiments. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, 2.o
- Jayaratne, E., R., Saunders, C., Hallett, J., 1983: Laboratory Studies of the Charging of Soft hail During ice Crystal Interactions. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1983,609-630.o
- Jayaratne, E., R., 1981:Laboratory studies on thunderstorm electrification. Ph.D. Értekezés, The University of Manchester, Manchester.
- Johnson, T., A., Park, A., Hand, K., P., 2014: The Workman-Reynolds Effect: An Investigation of the Ice-Water Interface of Dilute Salt Solutions. 45th Lunar and Planetary Science Conference (2014)
- Keith, W., D., Saunders, C., 1990: Further laboratory studies of the charging of graupel during ice crystal interactions. *Atmospheric Research*, 1990, 445-464.o
- Levi, L., Milman, O., 1965: Freezing Potential of Electrolytic Solutions. *J. of Atmos. Sci.*, 1965, 182-186.o
- Mason, B., L., Dash J., G., Wettlaufer J., S., 2001: Theory of charge and mass transfer in ice-ice collisions. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 20,395-20,401.o
- Mason, B., L., Dash J., G., 2000: Charge and mass transfer in ice-ice collisions: Experimental observations of a mechanism in thunderstorm electrification. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 10,185-10,191.o
- Mason, B., L., Dash, J., G., 1999: *Ice Physics in the Natural Environment*. Springer-Verlag, New York.
- Mason, B., L., Latham, J., 1961: Generation of Electric Charge Associated with the Formation of Soft Hail in Thunderclouds. *Proc. R. Soc.*, 1961, 537–549.o

- Mona, T., 2011:A villámgyakoriság parametrizálása. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Dr. hab. Ács Ferenc). 30 p.
- Reynolds, S., E., Brook, M., Gourley, M., F., 1957: Thunderstorm Charge Separation. *J. of Met.*, 1957, 426-436. o
- Saunders, C., 2008: Charge Separation Mechanisms in Clouds. *Space Sci Rev*, 2008, 335-353.o
- Saunders, C., Bax-Norman, H., C. Emersic, C., Avila, E., E., Castellano N., E., 2006: Laboratory studies of the effect of cloud conditions on graupel/crystal charge transfer in thunderstorm electrification. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2006, 2653-2673.o
- Saunders, C., Mitzeva, R., Tsenova, B., 2014:Further analysis of the effects of supersaturation on graupelcharging – modeling study. XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A. 1-9. o.
- Saunders, C., Peck, S., L., 1998: Laboratory studies of the influence of the rime accretion rate on charge transfer during crystal/graupel collisions. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 13,949-13,956
- Saunders, C., Hallett, J., 1979: Charge Separation Associated with Secondary Ice Crystal Production. *J. of Atmos. Sci.*, 1979, 2230-2235.o
- Singh, P., Singh, V., P., 2001:Snow and Glacier Hydrology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 743 p.
- Takahashi, T., 1978: Riming Electrification as a Charge Generation Mechanism in Thunderstorms. *J. of Atmos. Sci.*, 1978, 1536-1548.o
- Workman, E., J., Reynolds, S., E., 1950: Electrical Phenomena Occurring during the Freezing of Dilute Aqueous Solutions and Their Possible Relationship to Thunderstorm Electricity. *Phys. Rev.*, 1950, 254-259.o