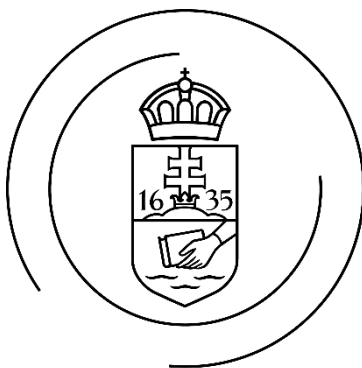


Az Országos Jégkarmérséklő Rendszer generátorainak használata és a jégkárbejelentések közötti kapcsolat előzetes vizsgálata

SZAKDOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK
METEOROLÓGIA SPECIALIZÁCIÓ



Készítette:

Dóka Imre Péter

Témavezetők:

Szobonya Nikoletta

Nemzeti Agrárgazdasági Kamara

dr. Breuer Hajnalka

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2024

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
1. A konvektív időjárási jelenségek és a jégeső kialakulása	4
1.1. A konvekció kiváltó okai	4
1.2. A konvektív folyamatok megjelenési formái	5
1.3. Jégesők.....	8
2. Módszerek a jégeső környezeti jellemzőinek meghatározására	10
2.1. Különböző jeges cella környezetek globálisan	11
2.2. Műholdas adatok felhasználási lehetőségei	14
2.3. Konvektív paraméterek felhasználási lehetőségei	15
2.4. Radar adatok felhasználási lehetőségei.....	17
3. Az időjárás-módosítás története, a jégkarmérséklés technológiájának és az alkalmazott rendszereknek az ismertetése	20
3.1. A jégesők klimatológiája, a jégeső által okozott károk.....	20
3.2. Időjárás-módosítás	23
3.3. A jégkarmérséklő rendszer technológiája, működési elve	27
3.4. A jégkár mérséklésére alkalmazott módszerek eredményei.....	29
3.5. A jégkarmérséklés környezeti hatásai	34
4. Az Országos Jégkarmérséklő Rendszer működése Magyarországon	35
4.1. Előzmények	35
4.2. A jégkarmérséklő rendszer működése.....	37
4.3. Jégkárbejelentések és jégeső detektálás.....	39
Összefoglalás	45
Köszönetnyilvánítás	46
Irodalomjegyzék.....	47

Bevezetés

A jégeső megértése a Föld időjárási rendszerében bizony nem egyszerű feladat (*Allen et al.*, 2019), és egészen a múlt század közepéig nem is történt ebben jelentős előrelépés. Azonban az emberiség érdekei már előtte is azt diktálták, hogy be kell avatkozniuk az időjárásba, és ebben a zivatarfelhők dinamikájáról és a jégesők kialakulásáról való hiányos ismereteik sem akadályozták meg (*Bacsó*, 1939). Napjainkban azonban már tudományosan is megalapozottá váltak a különböző időjárás-módosító tevékenységek, így a jégkár mérséklésére irányuló tevékenységek is (*Geresdi*, 1997).

A jégkármérséklés megértéséhez vezető úton az első lépés áttekinteni a jégesők keletkezését (*Geresdi*, 2007). A zivatarokfelhőknek számos megjelenési formája létezik (*Markowski és Richardson*, 2010), de közös tulajdonságuk, hogy bennük jégrészecskék keletkeznek, hiszen ezek nélkül az elektromos kisülések sem jöhetnének létre (*Geresdi*, 2007). A dolgozatomban ezután arra a kérdésre keresem a választ, hogy milyen lehetőségek vannak a jégeső észlelésére az emberek által végzett megfigyeléseken túl. A különböző módszerek végső célja közös, a jégeső, valamint a jég szemek méretének minél pontosabb előrejelzése (*Allen et al.*, 2019). Amennyiben a jég szemek eléri a talajt, akkor a méretüktől függő kárt okozhatnak, ezek pedig kivétel nélkül mindenkit érinthetnek. A jégkár mérséklésére létrehozott rendszerek a jég szemek méretének csökkentésével hivatottak enyhíteni a károkat (*Geresdi*, 1997).

Természetesen világszerte számos helyen zajlanak időjárás-módosító projektek, hiszen csupán a katonai felhasználásuk nem engedélyezett (*Fleming*, 2006). Ezek bemutatása után rátérek a jégkármérséklés technológiájára, valamint ehhez kapcsolódva a legtöbb embert foglalkoztató kérdésre, a felmerülő lehetséges környezeti hatásokra.

A JÉGER (Országos Jégkármérséklő Rendszer) 2018 óta működik hazánkban, így a dolgozat megírásának idejében már elegendő adat állt rendelkezésre a vizsgálathoz.

Dolgozatom célja a jégeső keletkezésének és a jégkár mérséklésére alkalmazott módszerek elméleti hátterének bemutatása, valamint a mások által a témában végzett vizsgálati eredmények áttekintése. Továbbá ennek felhasználásával a JÉGER jégbejelentéseinek előzetes statisztikai vizsgálata. Saját magam felé kitűzött cél volt továbbá a téma olyan szintű megértése, hogy a vonaton velem szemben ülő laikusnak is el tudjam magyarázni érthetően, hogy mi az a jégkármérséklés.

1. A konvektív időjárási jelenségek és a jégeső kialakulása

Mielőtt rátérnénk a jégeső-elhárítás technológiájának részletes ismertetésére, fontos áttekinteni a jégesős helyzetek kialakulásának meteorológiai hátterét. A konvektív időjárási folyamatok a Kárpát-medence időjárásának fontos meghatározói. A konvektív elnevezés az intenzív, függőlegesen felfelé irányuló mozgásra utal. Konvektív felhőzet kialakulásához elengedhetetlen a nedvesség jelenléte is, ekkor nedves konvekcióról beszélünk (*Horváth, 2007*). Ilyenkor a levegő emelkedése során telítetté válik, kondenzálódik, majd a pozitív felhajtóerő hatására nagy magasságokba is elérhet. A konvektív jelenségek létrejöttének szükséges, de nem elégséges feltétele a környezet konvektív hasznosítható potenciális energiája (CAPE), mely a felhajtóerőt biztosíthatja. Nagyságát a kondenzálódott emelkedő légréteg és a környezet hőmérsékletének különbsége határozza meg. Kellő mennyiségű CAPE mellé szükséges valamilyen kényszer is, az esetek többségében fennálló konvektív gátlás (CIN) leküzdésére. Ezek előrejelzése viszont nem egyszerű, a szinoptikus helyzet pontos ismerete nélkülözhetetlen hozzá (*Markowski és Richardson, 2010*). A nedves konvekció eredménye lehet a zivatarok kialakulása, melyek heves kísérőjelenségei (például a jégeső) jelentős anyagi károkat és személyi sérüléseket idézhetnek elő.

1.1. A konvekció kiváltó okai

A konvektív folyamatokban a feláramlás létrejöttének különböző okai lehetnek. Az egyik a napsugárzás által kialakuló felhajtóerő. A napsugárzás felmelegíti a földfelszínt, amely szenzibilis hőáram formájában átadódik a felette lévő levegőnek. Az így kialakuló termikek melegebbek, környezetüknél kisebb sűrűségűek, ezáltal felhajtóerő hat rájuk. A nedvesség a látens hő szempontjából is nagyon fontos, amely a kondenzáció során szabadul fel, és a légréteg további melegedéséhez vezet a telítettség elérése után. Ezért a CAPE gyakran alkalmazott mérőszám a zivatarok előrejelzésében. A feláramlás felszínközeli konvergencia következtében is megindulhat, ennek tipikus esetei az orografikus emelés, a hidegfrontok menti torlasztó hatás által keltett vertikális irányú áramlás, és a konvergencia vonalak kialakulása. A konvektív folyamatok utolsó tényezője a szélnyírás, amely a feláramlás erősítésére szolgál megfelelő körülmények között, nem pedig annak megindítására. (*Horváth, 2007*)

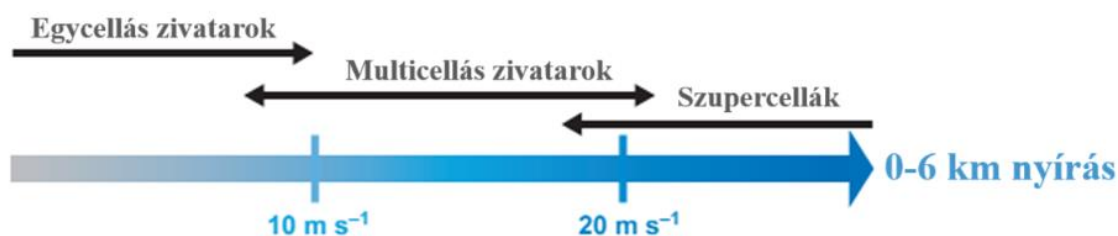
1.2. A konvektív folyamatok megjelenési formái

A felhajtóerő forrásától és az azt elindító kényszerből függően a konvekciónak rendkívül változatos megjelenési formái vannak, méret- és időskálát tekintve is. Ezek alapvetően két típusba sorolhatók. Az egyik az izolált konvekció, amely esetén leginkább a helyi hatások a meghatározóak. A másik típus pedig a mezoléptékű konvektív rendszerek, melyeknél vagy valamilyen kevésbé lokális kényszer a meghatározó, vagy az elszigetelt cellák kiáramlásainak egyesülése a kiindulási folyamat. (Markowski és Richardson, 2010)

1.2.1. Az izolált konvekció típusai

A konvektív komponensek közül a függőleges szélnyírásnak van a legnagyobb szerepe abban, hogy melyik megjelenési forma alakul ki (1. ábra). Mivel másodlagosan egyéb tényezők is szerepet játszanak, így kisebb átfedések láthatóak a tartományok között. A vertikális szélnyírás szerepe azonban kettős, hiszen elősegítheti a szervezettebb és hosszabb élettartamú zivatarok létrejöttét, de túlzott nyírás gyengítheti is azokat bizonyos körülmények között. (Markowski és Richardson, 2010)

Fontos a horizontális szélnyírás is, melynek mértékét a zivatar haladási irányához képesti szél határozza meg (erre a későbbiekben zivatarhoz képesti szélként fogok hivatkozni [1 – szupercella.hu - A konvekció alapjai II.]). Ennek a szerepe abban áll, hogy a zivatarok haladása során a környezeti paraméterek változhatnak, többek között a szél is. Így a felszín egy adott pontjához és a zivatar haladásához viszonyított szél iránya és sebessége eltérő lehet. Ez a zivatarhoz képesti szél a határrétegben nagy hatással van a beáramlási folyamatokra, a közép-troposzférában pedig a horizontális szélnyírás következtében kialakuló örvényességre. (Markowski és Richardson, 2010)

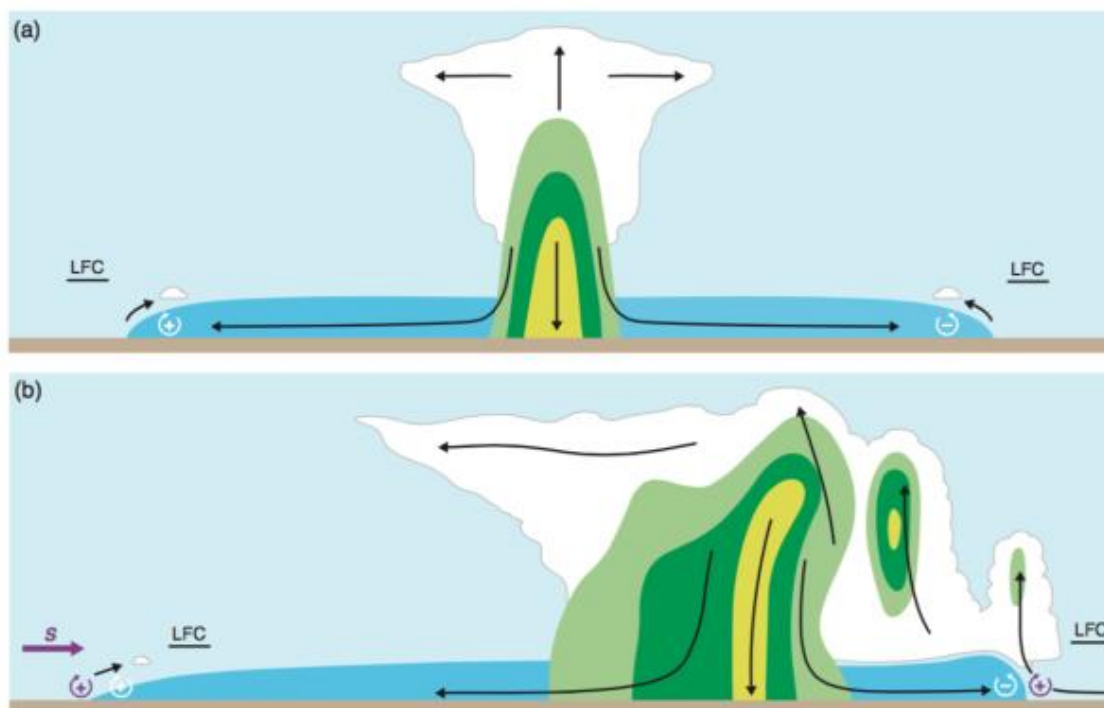


1. ábra: Az izolált konvekció megjelenési formáira jellemző vertikális szélnyírási értékek tartományai (Markowski és Richardson, 2010).

Tipikusan a besugárzás hatására, ún. jellegtelen nyomási mezőben jönnek létre a termikek és az egycellás zivatarok. Kialakulásuk a határréteg napi ciklusához kapcsolódik.

A nap legmelegebb időszakát követően jönnek létre, amikor az éjszakáról visszamaradt inverzió megszűnik, ezáltal a CIN minimális lesz, míg a CAPE maximális. Életciklusuk tornyosuló Cumulus, érett és leépülő fázisokra osztható. A jelentéktelen környezeti szél miatt a vertikális szélnyírás elhanyagolható, így újabb cella nem tud kialakulni (2a. ábra). Károkozó jégeső ritkán kíséri őket, ha mégis, akkor leginkább az érettből a leépülő fázisba való átmenet során. (Horváth, 2007; Markowski és Richardson, 2010)

A multicellás zivatarok esetén maguk a cellák is adhatják a következő zivatar képződését elindító trigger hatást az alacsonyabb hőmérsékletű kifutószél által, így az újonnan kialakuló cella feláramlását már ez a hatás is erősíti a felhajtóerő mellett (Horváth, 2007). A szélnyírásnak a multicellás zivatarok esetén már fontos szerepe van. Az újabb cella ugyanis ott tud legnagyobb valószínűséggel kialakulni, ahol a környezeti szélnyírásból származó és a kifutószél-front által létrehozott horizontális örvényesség ellentétes előjelű (2b. ábra). Ezeket a zivatarokat, amelyek a közepes földrajzi szélességeken a konvekció leggyakoribb megjelenési formái, már gyakran kíséri nagy méretű jég (Markowski és Richardson, 2010). Azon multicellás zivatarokat soroljuk az izolált konvektív jelenségekhez, amelyek kezdetben egycellás konvekcióból indultak ki, és kialakulásukhoz nem szinoptikus, illetve mezoskálájú kényszer (pl. front vagy konvergencia) vezet.



2. ábra: A kifutószél-front emelő hatásának összehasonlítása szélnyírásmentes környezetben (a) és mérsékelt szélnyírás esetén (b). Előbbi egycellás, utóbbi multicellás zivatarok kialakulásához vezet (Markowski és Richardson, 2010). (LFC – szabad konvekciós szint, *s* – szélnyírás iránya)

Hazánkban előfordulnak szupercellák is, amelyek esetén ugyanúgy minden konvektív összetevő szerepet játszik, viszont egyetlen, hosszú élettartamú celláról van szó (*Horváth, 2007*). A szupercellákban egy tartósan fennálló, folyamatosan áthelyeződő feláramlás van. Ahhoz, hogy a zivatar ebbe a kategóriába soroljuk, szükséges egy tartósan jelen lévő, mély mezociklon, amely egy vertikális tengelyű örvény a feláramlásban belül. A mezociklon az erős környezeti vertikális szélnyírás hatására kialakuló horizontális örvényből alakul ki az intenzív feláramlás hatására. A szupercellák felelősek az 5 cm átmérő feletti jégesők jelentős hányadáért, így annak ellenére is fontos foglalkozni velük, hogy viszonylag ritkán fordulnak elő (*Markowski és Richardson, 2010*). Szupercellák többször mezoléptékű konvektív rendszerekhez kapcsolódva alakulnak ki.

1.2.2. Mezoléptékű konvektív rendszerek

Ha a zivatarok tartósan, szervezeten fennmaradnak, akkor már mezoléptékű konvektív rendszerekről (MKR) beszélünk, pontosabb kritériumként a minimum 100 km-es horizontális kiterjedés tekinthető legalább egy irányban. Ennek oka, hogy ez az a méretskála, ahol már nem elhanyagolható a Coriolis-erő hatása (*Markowski és Richardson, 2010*). Ide tartoznak a vonalba rendeződött zivatarok, amelyek Magyarországon is gyakran előfordulnak (*Horváth, 2007*). Ezek típusai egyrészt a zivatarláncok (squall line), amelyek haladási iránya merőleges a lánc vonalára, másrészt a zivatarvonalak, amelyeké viszont párhuzamos [2 – met.hu - Meteorológiai kis-szótár]. Továbbá a zivatarláncok íves megjelenési formája a bow echó, amelyből ritka esetben több is található a squall line-ban, ekkor vonalechós hullámmintáról beszélünk. Zivatarláncok sokszor hidegfront mentén alakulnak ki, a zivatarvonalak pedig elsősorban (melegszektorban megjelenő) felszíni konvergenciához kötődnek. Intenzitásukra jelentős hatással van a (magas- vagy alacsonyszintű) jet jelenléte.

Hazánkban ritkán fordulnak elő a nagy kiterjedésű, és általában igen hosszú ideig fennálló mezoléptékű konvektív komplexumok (MKK), amelyeknek közel kerek formájuk van [2 – met.hu - Meteorológiai kis-szótár]. Az eddig felsorolt megjelenési formák okozzák kísérelként a jégesőt hazánk területén (*Horváth, 2007*).

1.3. Jégesők

A jégeső a konvektív folyamatokhoz kapcsolódó veszélyes kísérőjelenségek egyike a tornádó, a nem tornádóhoz kapcsolódó károkozó szél és a villámárvíz mellett (*Markowski és Richardson, 2010*).

1.3.1. A jégesők megfigyelésének kezdetei Magyarországon

A zivatarok megfigyelésével és leírásával már a 18. század végén is foglalkoztak hazánkban, azonban ezek egészen a következő évszázad végéig meglehetősen szubjektívek voltak, így klimatológiai viszonyok leírására nem voltak alkalmasak. *Héjas* (1898) viszont az adatok alapján már ekkor leírta az alapvető, zivatarok klimatológiájával kapcsolatos észrevételeit, melyek azok éven és napon belüli eloszlására vonatkoztak. A kísérőjelenségek, így a jégeső feljegyzései azonban szintén hiányosak voltak. 1896-tól viszont már szervezett, rendszeres zivatarészlelések kezdődtek (*Raum, 1915*). 1902-ben pedig Az időjárás című folyóiratban meg is jelent az első, jégesőkkel kapcsolatos tanulmány is, amely *Kronich Lénárd* nevéhez fűződik. *Raum* (1915) már 15 év megfigyeléseit összegezte, amely rögtön eloszlatta azt az akkoriban gyakori tévhitet, hogy az ország bizonyos részein sokkal gyakrabban van jégeső. Látható, hogy egyedül a Kis Magyar Alföldön tért el kis mértékben a gyakoriság a többitől (1. táblázat).

1. táblázat: Adott évben jégesőt és jégkárt jelentő állomások és az egyes vidékeken lévő állomások számának %-os aránya (a táblázat 15 év átlagos értékeit mutatja az 1896–1910 időszakra). Jégkárt akkor jelentettek, ha a kárány legalább 5% volt (*Raum, 1915*).

Vidék	Nagy Magyar Alföld	Kis Magyar Alföld	Dunántúli Dombvidék	Északi Felföld	Északkeleti Felföld	Keleti Felföld	Valamennyi állomás
Jégesők %-ban	72	63	74	71	74	74	71
Jégkár %-ban	22	13	20	16	16	22	18

Raum (1915) megállapította továbbá, hogy hazánkban a jégbejelentések maximális száma a legtöbbször májusra esett, ezt pedig sorrendben a június követte. Az adatokat pedig már ekkor is felhasználták jégkárral kapcsolatos vitás esetek elbírálásánál, akárcsak napjainkban. A jégeső részletes tanulmányozása azonban hazánkban elsősorban a 20. század második felében a radarok elterjedésével kezdődött el.

1.3.2. A jégeső keletkezésének mikrofizikája

A jégeső definíció szerint zivatarfelhőből hulló csapadékfajta. Ez a felhőtípus a benne levő nagy függőleges sebességnek köszönhetően tekintélyes vertikális kiterjedéssel rendelkezik, így a zivatarfelhő jelentős része a 0 °C-os izoterma felett található. Az emelkedő légrészben kialakuló vízcseppek a 0 °C-os hőmérsékleti szint felett elkezdnek megfagyni, ezáltal létrejönnek a jégkezdemények (Geresdi, 2007). Azonban a fagyás főként csak a nagyobb vízcseppek esetén következik be, a jelentős részük azonban folyékony halmazállapotban tovább hűl, túlhűlt vízcseppeket eredményezve. Ennek magyarázata, hogy általában jóval kevesebb aktivizálódott jégképző mag található a felhőben, mint kondenzációs mag, a legkisebb vízcseppek pedig ezek hiányában egészen -40 °C-ig is képesek folyékony halmazállapotúak maradni (Markowski és Richardson, 2010). A jégkezdemények intenzív diffúziós növekedésbe kezdenek, majd néhány perc elteltével elegendően nagyra (100 µm körül) nőnek ahhoz, hogy a túlhűlt vízcseppeket begyűjtve már ütközésesen is növekedjenek (Geresdi, 2007; Markowski és Richardson, 2010). A jég szem, hőmérsékletétől függően szárazon (zúzmarásodás) vagy nedvesen (túlhűlt vízcseppel való ütközés) növekszik, megfelelő körülmények között percek leforgása alatt a cm-es nagyságot is elérheti (Geresdi, 2007). A jég szemek réteges szerkezetét ezen növekedési formák váltakozása okozza, ahogyan a jég szem a feláramlási csatornába többször visszakerül, mielőtt kiesne a felhőből (Knight et al., 2015). A jég szem végső méretét az határozza meg, hogy mekkora a cseppfolyós vízgőztartalom, és hogy mennyi időt tölt a jég szem az intenzív növekedés tartományában. A tartózkodási időt pedig a feláramlás erőssége és a jég szem esési sebessége határozza meg, növekedés szempontjából ideális esetben ezek közelítőleg megegyeznek. További fontos tényező, hogy a talajra való leérkezésig mekkora része tud a jég szemnek elolvadni. Csökkenti a megolvadt jég mennyiségét többek között, ha a jég szem olyan helyen hullik ki a felhőből, ahol alacsonyan van az olvadás szintje és alacsony a páratartalom (Markowski és Richardson, 2010).

Vannak, akik a jégeső keletkezésének ezen tudományosan elfogadott elméletét mind a mai napig megkérdőjelezik. (Akhmedovic, 2014) például a villámlás szerepét emelte ki. Elmélete szerint a villámlás hatására nagy mennyiségű felhőelem párolog el, jelentős mennyiségű hőt elvonva. Ennek hatására a villám környezetében lévő vízcseppek megfagynak, így nem is szükséges fagypon alatti hőmérséklet. A jégeső intenzitását pedig a villámlás erőssége határozza meg, így tehát a jégeső-elhárítás elsődleges eszköze a villámlás megakadályozása. Elméletét azonban nem támasztotta alá kutatási eredményekkel.

2. Módszerek a jégeső környezeti jellemzőinek meghatározására

A jégeső által érintett területek általában kis kiterjedésűek (pár 100 m szélességű sáv), így egyrészt nincs önálló, a jég detektálására szolgáló megfigyelőrendszer, másrészt a numerikus modellekben sem igazán jelennek meg (*Fluck, 2018*). A pontosabb előrejelzésekhez sűrű, kiterjedt mérőhálózat lenne szükséges, de világszerte problémát jelent, hogy a jégeső mérése, skálájából adódóan hiányos, és az emberek megfigyelései alapján közölt jelentések pedig meglehetősen szubjektívek. Az észlelők mellett ma már lehetőség van automatikus jégdetektálásra is az állomásokon, cseppspektrum mérő segítségével, azonban még ezek is csak a jeges események meglehetősen kis hányadát tudják leírni. További, széles körben alkalmazott eljárás cseppspektrum mérőkkel felszerelt repülőgépek in situ mérései, amelyek például a modellek mikrofizikai paraméterezésében is fontos segítséget nyújthatnak (*Hu et al., 2022*). A kevés rendelkezésre álló információ miatt különböző, elsősorban távérzékelési produktumokat és modellanalízisek paramétereit használják a jég észlelésére és előrejelzésére. Ezek segítségével pedig különböző feltételeket és kritériumokat dolgoznak ki arra, hogy mikor jeges egy adott zivatarcella, és mekkora jég szemek alakulhatnak ki benne.

A nagy méretű jég szemek kialakulásának körülményeivel manapság egyre több kutatás foglalkozik. Ahhoz, hogy a jég szem minél hatékonyabban tudjon növekedni, alapvetően két tényező szükséges. Egyrészt minél több ideig maradjon a felhő megfelelő magasságú tartományában, másrészt elegendő nedvesség álljon rendelkezésre túlhűlt víztartalom formájában a gyors ütközéses növekedéshez (*Kumjian et al., 2021*). Ez a megfelelő magasságú tartomány nagyjából a -5 és -25 °C-os izoterma magassága közé esik, itt a legintenzívebb a jég szemek növekedése (*Nelson, 1983; Knight és Knight, 2005*). Kimutatták azt is, hogy a jég szemek növekedése szinte kizárólag 0 °C alatti hőmérsékleten történik, efelett az olvadás válik a domináns folyamattá (*Knight és Knight, 2005*). Ahhoz, hogy még a nagy jég szemek is a levegőben maradjanak, intenzív feláramlás szükséges. Ennek mértékében azonban nincs egyetértés. Az egyik nézőpont, hogy minél nagyobb az instabilitás és a vertikális emelkedési sebesség, annál nagyobb jég szemek tudnak képződni (*Knight és Knight, 2005*). A másik oldal szerint azonban létezik egy optimális sebesség, amely nagyjából $20\text{--}40$ m/s-os nagyságú (*Nelson, 1983*). Ennek a magyarázata az a megfigyelés, hogy a feláramlás legintenzívebb részén a jég kevésbé képes a növekedésre, mint annak szélén, ahol mérsékeltebb a vertikális emelkedés. Napjainkban egyre inkább bizonyítékot nyernek azok az elméletek, amelyek szerint több környezeti tényező komplex

együttese szükséges a nagy jégsemek kialakulásához (*Kumjian et al.*, 2021; *Nixon et al.*, 2023).

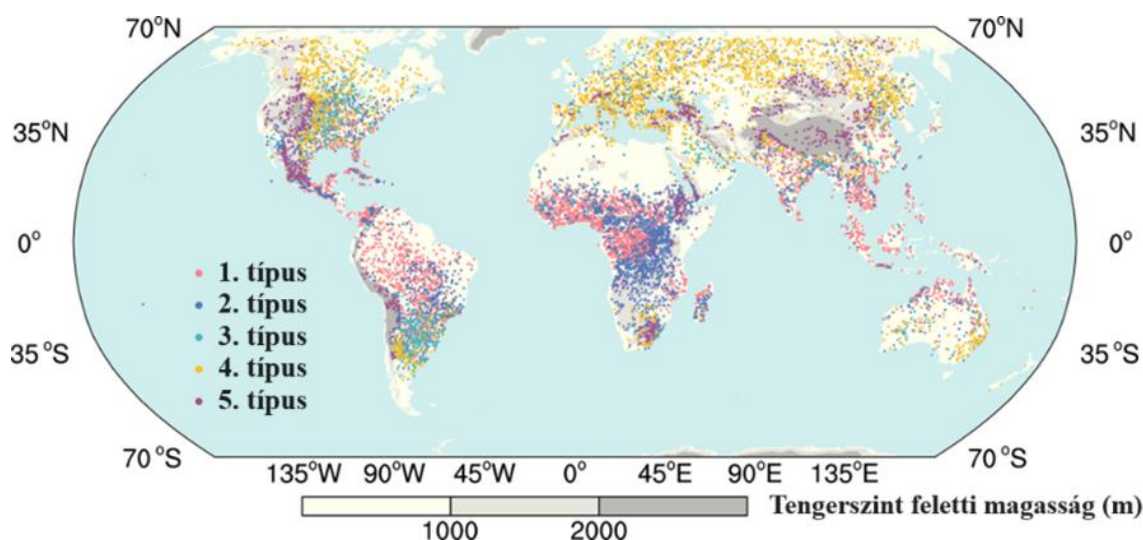
A módszerek ismertetése előtt fontosnak tartom azt is megjegyezni, hogy a heves jégeseit egy adott térségben jól leíró paraméterek nem biztos, hogy máshol is megfelelően alkalmazhatóak. Ugyanígy a klímaváltozásra adott reakciók is eltérőek lehetnek.

2.1. Különböző jégese cella környezetek globálisan

Az előbbi bekezdés végén tett megjegyzés bizonyítására *Zhou et al.* (2021) műholdas adatokat használtak fel, amiket az ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) reanalízis adatbázis segítségével kiszámított környezeti profilokkal vetettek össze. Egy másik vizsgálat az Egyesült Államok és Európa területén megfigyelt jégese eseményeket használt fel, amiket szintén ERA5-ből származó konvektív paraméterekkel vetettek össze (*Taszarek et al.*, 2020b). *Zhou et al.* (2021) globálisan öt különböző környezetet különítették el a Global Precipitation Measurement Core Observatory (Globális Csapadék Mérő Központi Obszervatórium) műhold adatait felhasználva, klaszterező eljárás segítségével. Miután egy algoritmussal kiszűrték a lehetséges jégese eseményeket hét év adataiból (2014–2021), elkülönítették az egyes típusokat különféle konvektív paraméterek figyelembevételével (3. ábra). *Taszarek et al.* (2020b) az Egyesült Államok és Európa területén vizsgálták a jelentéseket az 1979 és 2018 közötti időszakra vonatkozóan, majd a profilok segítségével meghatározták a szükséges paramétereket. Ezek mindkét tanulmány esetén a „jégese cella” környezetével kapcsolatosak: a konvektív instabilitás mérőszámai, a szélnyírás és nedvesség jellemzői, a hőmérsékleti profilok, valamint a 0 °C-os izoterma és a fagyos réteg magassági viszonyai.

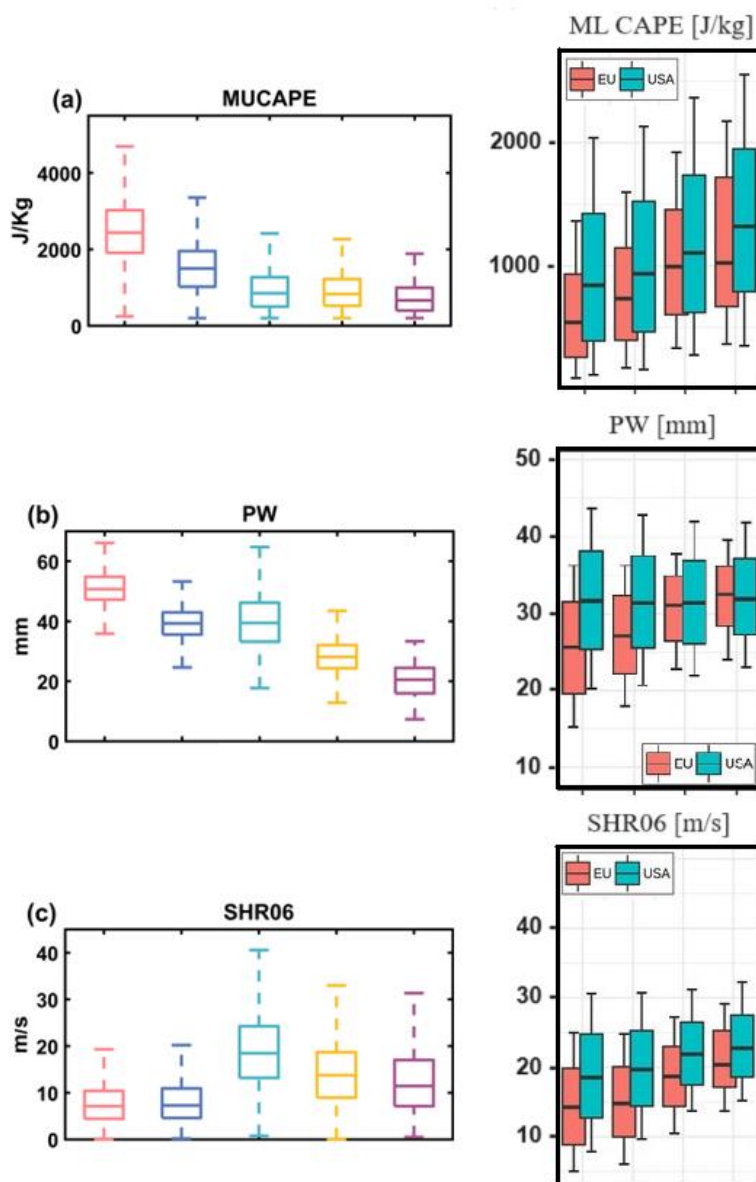
Zhou et al. (2021) az elkülönített típusokat összességében leginkább a földrajzi szélesség és a tengerszint feletti magasság alapján határozták meg (3. ábra). Az azonosítást követően elemezték az egyes területekre jellemző szezonális és napi jégeseeloszlást, valamint a környezeti paraméterek átlagértékeit. *Taszarek et al.* (2020b) a két kontinens esetén szintén eltérő környezeti feltételeket találtak. Az Egyesült Államokban sokkal gyakrabban találtak a nagy jégsemek kialakulásához megfelelő paramétereket, tehát amennyiben kialakulnak a zivatarok, jó eséllyel lesznek hevesek. Viszont Európában nagyobb annak a valószínűsége, hogy a szükséges környezeti feltételek jelenléte mellett valóban kialakuljanak a zivatarok. Az egyes paramétereket aszerint vizsgálva, hogy mennyire alkalmasak önmagukban a jégese előrejelzésére, szintén jelentős eltéréseket

tapasztaltak a két kontinens között (*Battaglioli et al.*, 2023). Természetesen az így kapott értékek önmagukban nem igazán alkalmazhatóak konkrét esetekre, hiszen mint azt később láthatjuk, a körülmények rendkívül sokféle együttese okozhat heves jeges eseményt.



3. ábra: Statistikailag különböző típusú, heves jégesőt okozó környezetek globális eloszlása. Az azonos színű pontok a hasonló környezeti feltételekre utalnak (*Zhou et al.*, 2021).

Zhou et al. (2021) besorolása alapján Közép-Európában a harmadik és a negyedik típusú fordul elő, amelyek általánosan a közepes és magasabb földrajzi szélességek síksági területeire jellemzőek. Azonban megjelenik néhány, kettes típusú pont is, ami pedig általánosan a trópusi területek azon területeit jellemzi, ahol a domborzat hatása jelentős. Mivel a legnagyobb számban a négyes típusú pontok jelentek meg, így az alábbi összehasonlításnál ezt vettem alapul. *Zhou et al.* (2021) megállapították, hogy az instabilitás mértéke egyértelműen kisebb a trópusi területekhez képest (4a. ábra - bal), sőt *Taszarek et al.* (2020b) szerint többnyire a nagy jégesők esetén sem volt szükség kiugróan magas CAPE-re (4a. ábra - jobb). Ha a nagy jégesőt produkáló környezet előrejelzését tekintjük, akkor mind Közép-Európában, mind az Egyesült Államokban a MUCAPE (leginstabilabb CAPE) egy speciális típusa tűnt a legjobb paraméternek: a légrészt legalább 500 méterrel a felszín feletti magasságból indították, és a MUCAPE-t a -10 °C-os izoterma feletti zóna környezeti és légrész hőmérsékletéből számítják (*Battaglioli et al.*, 2023). Viszonylag nagy mennyiségű kihullható víztartalom (4b. ábra) azonban egyértelműen szükséges a nagy jégszemek kialakulásához (*Taszarek et al.*, 2020b; *Zhou et al.*, 2021). A kisebb instabilitást a trópusi területekhez képest elsősorban a vertikális szélnyírás (4c. ábra) tudja kompenzálni (*Zhou et al.*, 2021), amelyre egyértelműen szükség van Közép-Európában a nagy jégszemek kialakulásához (*Taszarek et al.*, 2020b; *Zhou et al.*, 2021).



4. ábra: A Zhou *et al.* (2021) és Taszarek *et al.* (2020b) eredményeinek összehasonlítása az egyes CAPE értékekre (a), a kihullható víztartalomra (b) és a 0–6 km-es szélnyírásra (c). Bal oldalon a Zhou *et al.* (2021) által meghatározott öt jégesőkörnyezet típusra, jobb oldalon pedig a Taszarek *et al.* (2020b) által a jég méretére létrehozott kategóriákra (<2; 2–5; 5–8; >8 cm) vonatkozik az x tengely beosztása.

További, a nagy instabilitást kompenzáló tényező lehet a 0 °C-os izoterma alacsony szintje, amely az olvadás mértékét csökkenti (Zhou *et al.*, 2021). Az Egyesült Államokban az összes paramétert magasabb értékek jellemzik, mint Európában, leszámítva az alsó 3 km-es rétegre számított MLCAPE (kevert rétegű CAPE) és az ugyanezen rétegben mérhető hőmérsékleti gradiens értékét. Ezek azonban nincsenek összefüggésben a kialakuló jégszemek méretével (Taszarek *et al.*, 2020b). Vannak összetett indexek is, amelyek sokkal inkább alkalmasak a várható jég méretének megállapítására, ilyen többek között a Közép-

Európára is jól alkalmazható szignifikáns jég paraméter, továbbá a CAPE és a 0–6 km-es szélnyírás együttesét felhasználó WMAXSHEAR (Taszarek et al., 2020b).

2.2. Műholdas adatok felhasználási lehetőségei

A Zhou et al. (2021) által alkalmazott, korábban kifejtett módszer mellett a műholdas adatok felhasználhatóak az úgynevezett túlnyúló csúcsok észlelésére is (Bedka, 2011). Ezek, a zivatarfelhők üllője felett megjelenő felhőképződmények, amelyek a tropopauzán át egészen a sztratoszféra aljáig is elérhetnek, intenzív feláramlásokhoz kapcsolódnak [3 – szupercella.hu - Túlnyúló csúcs]. Általában szupercellák, vagy MKK-k esetén figyelhetők meg. Bedka (2011) egy, a konvektív események heves kísérijelenségeit tartalmazó európai adatbázis alapján megvizsgálta, hogy a veszélyes időjárási jelenségek közelében észleltek-e túlnyúló csúcsokat. Vizsgálatai során megállapította, hogy a heves kísérijelenségek közül a nagy jégesőkre vonatkozóan a legerősebb a kapcsolat a túlnyúló csúcsokkal (2. táblázat). Ez lehetőséget ad arra, hogy az adatok felhasználhatóak legyenek az előrejelzések megbízhatóságának javítására, elsősorban azokon a területeken, ahol nem áll rendelkezésre gyakori, radarból származó adat. Az észlelések hiánya ugyanakkor azt a problémát idézi elő, hogy nem tudjuk, hogy a túlnyúló csúcsok megjelenése milyen gyakran okoz heves kísérijelenséget.

2. táblázat: Azon események száma és aránya, amikor veszélyes időjárási jelenségek közelében túlnyúló csúcsot észleltek a műholdas adatok felhasználásával (Bedka, 2011).

<i>Veszélyes időjárási jelenség típusa</i>	<i>Találatok száma a túlnyúló csúcsokkal</i>	<i>Veszélyes időjárási események száma</i>	<i>A találatok aránya %-ban kifejezve</i>
<i>Tornádó</i>	48	345	14
<i>Viharos szél</i>	248	477	52
<i>Nagy szemű jégeső</i>	347	653	53
<i>Összesen</i>	643	1475	44

A műholdas adatok felhasználásával mostanában egy gépi tanulós módszer is kifejlesztettek. Lényege, hogy geostacionárius, Második Generációs Meteosat műholdak infravörös tartományban készült képeit összevetették jégesővel kísért eseményekkel, és ennek segítségével betanítottak egy modellt (DNN – Deep machine learning Neural Network), amely a jégeső detektálására szolgál. Ehhez egy új indexet (HPI – Hail Potential Index) hoztak létre, melynek alapja a túlnyúló csúcsok detektálása különböző hullámhosszokon mért fényességi hőmérséklet segítségével. Ha a HPI, egy kritikus érték

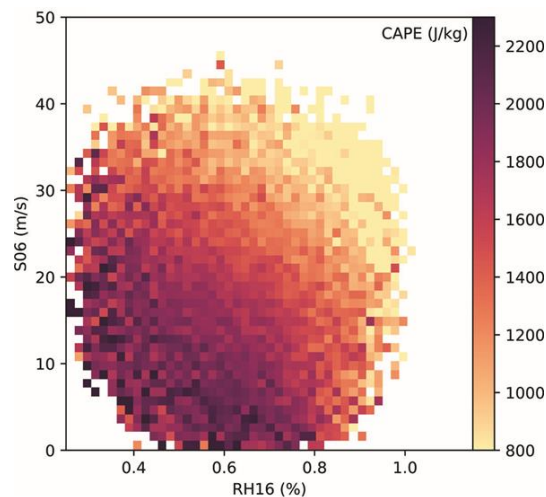
(1,0) alatti, akkor a jégeső valószínűsége 80% feletti. A módszer további felhasználása abban mutatkozik meg, hogy egyéb műholdak, többek között a Harmadik Generációs Meteosat műholdak adataira is alkalmazható. A HPI alkalmazásával pedig jelentős javulást értek el a DNN modell pontosságában. (Kolios, 2023)

2.3. Konvektív paraméterek felhasználási lehetőségei

A műholdak mellett a numerikus modellek és a mezőikből számolt konvektív paraméterek is alkalmazhatók a jéges környezetek feltárására, ahogy már korábban is láttuk (Taszarek *et al.*, 2020b; Zhou *et al.*, 2021). A legtöbb kutatás statisztikai elemzést végez annak érdekében, hogy feltérképezze a jégeső átlagos környezeti paramétereit (például Taszarek *et al.*, 2020b). Egy másik lehetőség egy numerikus módszer, az úgynevezett önszerveződő térképek (SOM) használata. Ezt használták fel többek között Zhou *et al.* (2021) a korábban már említett vizsgálatukban, valamint Warren *et al.* (2021) is. Utóbbiak rádiószondás adatok segítségével heves zivatarok környezeti feltételeit elemezték, azonban nemcsak heves jégesők szempontjából, hanem többek között tornádókra nézve is. A legtöbb vizsgált jégesőjelentés esetén a legfőbb szabályozónak a termodinamikai környezetet találták. A szélnyírás ugyan szükséges a heves konvektív folyamatok létrejöttéhez, de a nyírási profil kevésbé változott a jég szemek méretének növekedésével, így a tanulmány szerint nem annyira bizonyul használhatónak a jég szemek várható méretének előrejelzésében (Warren *et al.*, 2021). Nixon *et al.* (2023) viszont specifikusan heves jégesővel kapcsolatos eseményekre használták fel az önszerveződő térképeket, a zivatarhoz képesti szelek (1.2.1. Az izolált konvekció típusai) és a jégeső növekedési zóna alatti felhajtóerő egymáshoz való viszonyának jég szem méretére gyakorolt hatását vizsgálva.

Nixon *et al.* (2023) összességében három, egymásnak ellentmondó kapcsolatot mutatnak be, amelyek mind hatással vannak a heves jégesőt okozó zivatarok környezetének leírásában. Az első szerint ugyan a nagyobb CAPE és szélnyírás növelése kedvezőbb lehet a jégeső előfordulása szempontjából, de a jég szemek méretére ez már nem feltétlenül igaz. Ehelyett a CAPE, a szélnyírás és a relatív nedvesség megfelelő egyensúlya szükséges (5. ábra). A legfontosabb következtetés, hogy létezhet egy optimálisnak tekinthető, a szélnyírástól és a páratartalomtól függő CAPE. A nagy jégesők esetén tehát ezek egyikének hiánya kompenzálható a többivel, azaz az erőjelzések során az együttes alkalmazásuk szükséges. A második hatás, hogy az alacsony szinten fellépő erős, megfelelő irányú (a zivatarcellába való beáramlást elősegítő) zivatarhoz képesti szél, a feláramlás erősítésével

csökkentheti a jég szem tartózkodási idejét a jégeső növekedési zónában. Azonban megvizsgálva az adatokat, ezen feltétel mellett is jelentős számú heves jégeső alakult ki. Ezekben az esetekben ugyanis a jégeső növekedési zóna alatt az átlagosnál gyengébb volt a felhajtóerő. Fordítva is igaznak bizonyult, az erős felhajtóerőt a gyenge vagy nem megfelelő irányú (a zivatarcellába való beáramlást nem elősegítő) zivatarhoz képesti szél kompenzálta az alsó légrétegben. A harmadik kapcsolat a hőmérsékletre vonatkozik. A magasabb hőmérsékletű profillal jellemzett környezetben általában magasabb a CAPE és több a nedvesség, azonban magasabban van a 0 °C-os izoterma szintje is, ami viszont csökkenti a jégeső növekedési zóna kiterjedését. Azt találták, hogy a heves jégeseményeknél a kisebb mélységű zivatarok esetén a 0 °C-os izoterma szintje is alacsonyabban volt, azaz nagy mélységgel kell rendelkezniük ezen szint felett. Ennek a mélységnek a mértéke tehát hasznos lehet a jég szemek méretének előrejelzésében *Nixon et al. (2023)* szerint.



5. ábra: A jégesős környezetek paramétertere. Az S06 a jégjelentésekhez tartozó 0–6 km-es szélnyírás, az RH16 az 1–6 km-es réteg átlagos relatív nedvessége, a színek pedig az adott esetekhez tartozó CAPE értéket mutatják (*Nixon et al., 2023*).

A nagy jégesők egy jelentős része szupercellákhoz kapcsolódik nemcsak az Egyesült Államokban, hanem hazánkban is. Azonban a konvekciónak ez a megjelenési formája sem okoz minden esetben nagy méretű jeget. *Kumjian et al. (2021)* USA-ban kialakuló szupercellák szimulációjának segítségével modellezte azokat az ideális körülményeket, amelyek a nagy szemű jégesőhöz vezettek. Az egyik kulcsfontosságú tényező, ahogy korábban már említettem, a tartózkodási idő a jégeső növekedési zónában. Kimutatták, hogy akkor képződtek a legnagyobb jég szemek, amikor a vertikális emelkedési sebesség némileg csökkent az átlagoshoz képest, a feláramlási csatorna pedig szélesebbé vált. Ezt a szélesebb feláramlást, amelynek belseje jobban védett az esetleges környezeti száraz levegő káros hatásaival szemben, egyrészt a kellően nagy CAPE, azaz instabilitás, másrészt a megfelelően

nagy szélnyírás idézheti elő. Az instabilitás közvetlenül a feláramlásra van hatással, míg a szélnyírás a beáramlás fokozásán keresztül közvetetten vezethet a feláramlás szélességének növekedéséhez. A tartózkodási idő abban az esetben is nőhet, ha a jég szem pályája egyenes helyett görbe vonalúvá válik, akár teljes körpályát is leírva. Ez az örvénylő áramlás és a magassággal forduló szél hatására következhet be. A másik kulcsfontosságú tényező a nagy mennyiségű túlhűlt víztartalom, amelyhez a beáramló levegő nagy nedvességtartalma szükséges. Ezeknek a feltételeknek (*Kumjian et al., 2021*) a teljesülését magyarországi szupercellákra is ellenőrizték, például 2021. június 25-én előforduló szupercellás esetekre, amelyek 5 cm feletti jég szemeket produkáltak [4 – *Kolláth és Csirmaz, 2021*]. Összességében azt állapították meg, hogy a feltételek többsége teljesült, azonban néhány csak részlegesen, valamint térben és időben sem folytonosan. Ennek ellenére több helyen, több hullámban alakultak ki komoly jégesőt okozó szupercellák, ami újabb kérdéseket vet fel az alkalmazásra vonatkozóan és további vizsgálatokat igényel.

2.4. Radar adatok felhasználási lehetőségei

Végül a legelterjedtebben használt módszerről még nem esett szó, ez pedig a radaros jégdetektálás. A radar (**R**adio **D**etection and **R**anging) a konvektív folyamatok megjelenési formáinak (1.2. A konvektív folyamatok megjelenési formái) legfőbb megfigyelőrendszerének tekinthető (*Allen et al., 2019*). A radar egy aktív távérzékelési eszköz, amely mikrohullámú elektromágneses hullámokat bocsát ki. Elérve a hidrometeorokat (és egyéb objektumokat), az energia egy része abszorbeálódik, másik része pedig minden irányba szóródik. A visszaérkező jel a kibocsátotthoz képest 18 nagyságrenddel is kisebb lehet, így a radarnak nagyon érzékenynek kell lennie. Az objektum méretének függvényében a beérkező jel erősségében több nagyságrendbeli eltérés is lehet, így a gyakorlatban a 10-es alapú logaritmusanak felhasználásával kapott dBZ értéket használják fel. A legnagyobb reflektivitás értékek a jégesőkhöz kapcsolódnak (*Markowski és Richardson, 2010*). A hagyományos radarok egyetlen, horizontálisan polarizált elektromágneses hullámot bocsátanak ki, míg a modern, duál-polarizációs radarok egy erre merőleges, vertikálisan polarizált hullámot is. Ennek segítségével képesek akár a hidrometeorok alakjának és méretének meghatározására is, így a jégeső méretének detektálása szempontjából is fontos szerepük van (*Kumjian, 2013*). Hazánkban jelenleg öt, duál-polarizációs radar működik a HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt. működtetésével [5 – met.hu - Radar ismertető]. A radaros jégdetektálás alapja, hogy a radarproduktumok segítségével

különböző kritériumokat határoznak meg annak megállapítására, hogy az adott cella jegese.

Manapság a legtöbb kutatás a duál-polarizációs radarok felhasználási lehetőségeivel foglalkozik (*Allen et al.*, 2019). Az ezekkel történő mérések alapja, hogy az eltérő irányokban polarizált sugárzást a különböző szórási tulajdonsággal rendelkező részecskék másképp verik vissza. Tehát a duál-polarizációs radarok mérnek horizontális és vertikális reflektivitást is, ezek egymáshoz való viszonyából pedig kiszámítható a differenciális reflektivitás, amely információt ad például a jégszem alakjáról és méretéről. A további polarizációs radarváltozók a csapadékelemek tulajdonságainak egyre szélesebb körű leírását teszik lehetővé (*Kumjian*, 2013). A napjainkban zajló vizsgálatok a szórási jellemzők, valamint az egyes változók és a jégesők közötti kapcsolat minél pontosabb megértésére irányulnak (*Allen et al.*, 2019). Ahol nem állnak rendelkezésre duál-polarizációs radarok, ott számos lehetőség van a hagyományos radarral történő jégdetektálásra is (*Holleman*, 2001). A hagyományos radarok legfontosabb radarproduktumait és jelentésüket a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: A jégeső detektálása szempontjából legfontosabb radarproduktumok.

CMax	Oszlopmaximum reflektivitás [dBZ]
PseudoCappi	Kvázi-izohipsza menti horizontális metszet indikátor [dBZ]
H45	A 45 dBZ reflektivitás maximális magassága [m]
H55	Az 55 dBZ reflektivitás maximális magassága [m]
H45-H0	A H45 és a 0 °C-os izoterma magasságának különbsége [m]
VIL	Vertikálisan integrált víztartalom [kg/m ²]
VIL sűrűség	VIL érték és a vizsgált légoszlop magasságának hányadosa [g/m ³]

A radarproduktumok felhasználásával kapott legegyszerűbb kritérium az úgynevezett Mason-kritérium, amely szerint jeges a cella, ha a reflektivitás meghaladja az 55 dBZ értéket, ettől kisebb reflektivitás ugyanis még lehet intenzív csapadékhullás esetén is (*Holleman*, 2001). Ezt *Auer* (1994) kibővítette azzal, hogy reflektivitás és műholdas felhőtető-hőmérséklet méréseket jégeső észlelésekkel vetett össze. Ez alapján megállapította, hogy alacsonyabb reflektivitás esetén csak magasabb felhőtető-hőmérséklet mellett lehet jeges a cella. Ennek magyarázata abban keresendő, hogy leginkább tavaszi-őszi helyzetben, amikor még alacsonyan van a 0 °C-os izoterma, kis jégszemek, így alacsony dBZ értékek mellett is kialakulhat a jégeső, hiszen a jégszemek olvadása csekély mértékű. Ezeket a helyzeteket pedig alacsony felhőtető jellemzi. Emellett a két paraméter segítségével a jégszemek méretére is becslést tudott adni. A H45-H0 magasságkülönbségre vonatkozó

Waldvogel-kritérium kidolgozásának célja a jégkarmérséklés szovjet alkalmazásával volt kapcsolatos. Egy küszöbértéket akartak találni arra, hogy mikor szükséges a rakéták alkalmazása, ezt pedig végül a H45-H0 legalább 1,4 km-es magasságkülönbségében határozták meg (Waldvogel *et al.*, 1979). A kritérium használatának oka, hogy a jég szemek ezen magasságok között növekednek a legintenzívebben, így amennyiben nagyobb ezen zóna kiterjedése, az nagyobb valószínűséggel vezet (nagyobb) jég szemek kialakulásához. Később Witt *et al.* (1998) a H45-H0 értékéhez jég valószínűséget is társított, miszerint, ha a különbség legalább 6 km, akkor a cella gyakorlatilag 100 százalékos valószínűséggel jéges. Továbbá kidolgozásra került egy index (SHI – Severe Hail Index) is a reflektivitás és a kinetikus energiaáram (amely ugyancsak eltérő jég szemek és esőcseppek esetén) kapcsolata alapján, amelyet szintén jég valószínűség megállapítására használtak fel (Witt *et al.*, 1998). A jég detektálására használható még a VIL érték is, amelyet a heves viharok elemzése és hidrológiai alkalmazhatóság céljából dolgoztak ki (Greene és Clark, 1972). Az elegendően nagy cseppfolyós víztartalom ugyanis nélkülözhetetlen feltétele a jég szemek kialakulásának és növekedésének. Később azt tapasztalták, hogy magas VIL mellett sem volt mindig nagy jégeső, ha a felhőtető is magasan volt, néha pedig alacsony VIL mellett is kialakult, ha alacsonyan volt a felhőtető. Mivel tehát a VIL erősen függ a légtömegtől, „normalizálták”, azaz elosztották a légoszlop magasságával, megkapva a VIL sűrűséget, amely így az említett esetekben is alkalmas volt a jéges cella azonosítására (Amburn és Wolf, 1997).

A kritériumok optimalizálása az egyes országokban napjainkban is zajlik. A teljesség igénye nélkül tekintsünk át néhány példát. Szlovéniában a Mason-kritérium, a VIL, a Waldvogel-kritérium és az SHI vizsgálata zajlott, és utóbbi kettő teljesített a legjobban (Stržinar és Skok, 2018). Németországban a Mason-kritérium és a Waldvogel-kritérium mellett az Auer-kritériumot, továbbá a Witt *et al.* (1998) által kidolgozott jég valószínűséget is vizsgálták egy 15 éves időintervallumra, és utóbbi bizonyult a legjobban alkalmazhatónak egy épületbiztosító társaság kárbejelentéseivel való összehasonlítás után (Kunz és Kugel, 2015). Csehországban az összes, előbbi bekezdésben említett kritériumot tesztelték, leszámítva az Auer-kritériumot. A Waldvogel *et al.* (1979) és Witt *et al.* (1998) által kidolgozott módszerek bizonyultak a leginkább megfelelőnek arra, hogy egy összetett kritériumot is létrehozzanak (Skripniková és Řezáčová, 2014). Lengyelországban pedig a Waldvogel-kritérium vált be a legjobban a vizsgálatok során, továbbá megállapították, hogy a VIL -12 és -25 °C-os izoterma közötti rétegben számított értéke a leginkább megfelelő a jég detektálására (Pilorz *et al.*, 2022). Ez is mutatja, hogy a pontos kritériumokat mindenhol érdemes egyedileg meghatározni.

3. Az időjárás-módosítás története, a jégkarmérséklés technológiájának és az alkalmazott rendszereknek az ismertetése

A jégesőt okozó környezetek kellő ismerete lehetőséget ad különböző, a jégkarmérsékléssel kapcsolatos technológiák alkalmazására. Ezek ismertetése előtt röviden tekintsük át a jégesők klimatológiáját, valamint a jégeső által okozott károk nagyságrendjét, azaz azt, hogy tulajdonképpen miért is van szükség a rendszerek telepítésére, valamint a folyamatos kutatásokra és fejlesztésekre.

3.1. A jégesők klimatológiája, a jégeső által okozott károk

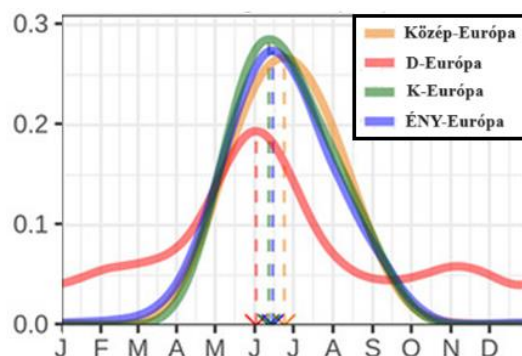
3.1.1. Térbeli és időbeli eloszlás

Számos, napjainkban zajló kutatás az ESWD¹ adatbázist használja fel, melynek célja, hogy rögzítse és dokumentálja az Európában előforduló heves időjárási eseményeket, ezáltal elősegítve azok elemzését és kutatását [6 – [essl.org](https://www.essl.org) - Vision, Mission, and Strategy of ESSL].

A jégesők térbeli eloszlásának vizsgálatát megnehezíti a bejelentések egyenlőtlen száma, Közép-Európa térségét leszámítva ugyanis túl kevés a beérkező jelentés az összehasonlításhoz (*Púčik et al.*, 2019). Így a Közép-Európa egyes részein és az Alpok keleti részein kapott maximumokat fenntartásokkal kell kezelni, még akkor is, ha az utóbbi években csökkent a jelentések térbeli inhomogenitásának mértéke (*Taszarek et al.*, 2020a). A másik maximum Észak-Olaszországban tapasztalható, azon belül a Pó-síkság kiemelten veszélyeztetett terület (*Púčik et al.*, 2019). A jéges események hevésségét mutatja, hogy 2023-ban kétszer is megdőlt az európai jégméret rekordja, mindkét alkalommal a síkság területén, a jelenlegi rekord 19 cm-es átmérő [7 – [essl.org](https://www.essl.org) - News].

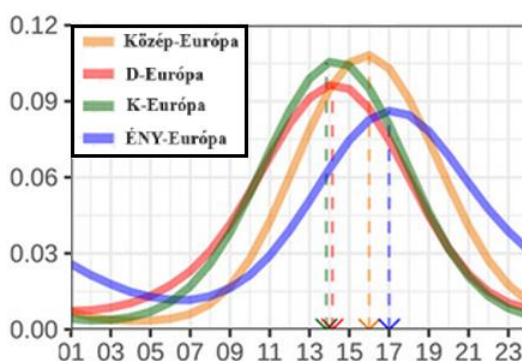
Az éves eloszlást tekintve Európa legnagyobb részére a nyári maximumok jellemzők, júniusi vagy júliusi tetőzéssel, kivéve Olaszországot és Görögország déli részét, ahol téli maximum jellemző (*Taszarek et al.*, 2020a), ami Dél-Európában egy kisebb másodmaximumot is eredményez (6. ábra). Ezt nagyrészt több másik tanulmány is megerősíti (*Púčik et al.*, 2019; *Hulton és Schultz*, 2024).

¹ European Severe Weather Database: Veszélyes Időjárási Események Európai Adatbázisa



6. ábra: A jégesők éven belüli eloszlása Európában. Minden térségben jelölve van a maximumhoz tartozó nap is (Taszarek et al., 2020a).

Taszarek et al. (2020a) vizsgálatai alapján a jégeső napon belüli eloszlásának maximuma a legintenzívebb besugárzást követi kisebb eltolódással (7. ábra), az izolált konvekció kialakulásával párhuzamban. Ez a maximum nagyjából 14 és 17 UTC közé tehető, egész Európára együttesen nézve pedig 15 és 16 UTC közé (Púčik et al., 2019; Hulton és Schultz, 2024). Ahogyan nyugati irányba haladunk, úgy ez az időszak a besugárzás maximumával együtt (az időeltolódás miatt) alapvetően későbbre tolódik, így a maximumok finomabb térbeli felbontást tekintve 12 és 20 UTC közé esnek Európában (Púčik et al., 2019).

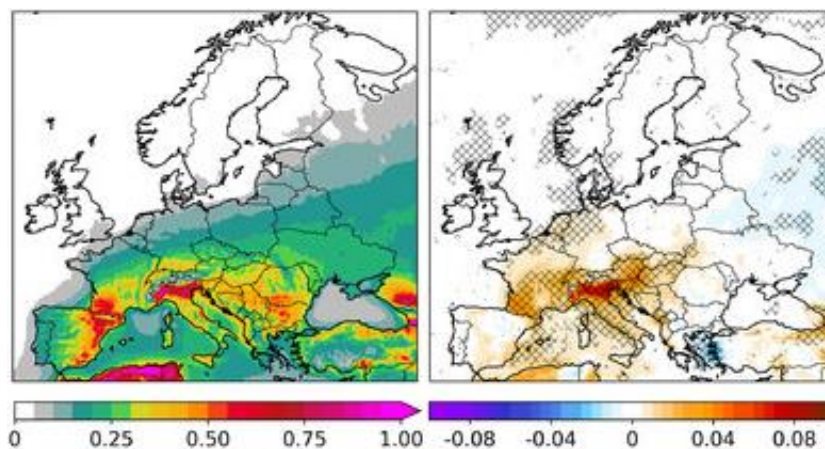


7. ábra: A jégesők napon belüli eloszlása Európában. Minden térségben jelölve van a maximumhoz tartozó időpont is (Taszarek et al., 2020a).

3.1.2. Hosszú távú tendenciák

Púčik et al. (2019) megállapították, hogy az ESWD adatok nem reprezentatívak, ha a jégesők előfordulásának tendenciáit szeretnénk vizsgálni. Ennek oka, hogy a bejelentések növekvő száma sokkal inkább az észlelőhálózat fejlődését képes kimutatni, mintsem a jéges események növekvő számát (Púčik et al., 2019). Így az adatok mellé ERA5 reanalízis adatbázisból származtatott paramétereket is felhasználtak az 1950–2021-es időszakra vonatkozó trendek kimutatása érdekében (Battaglioli et al., 2023). A vizsgálatok alapján a legerősebb pozitív trendek Észak-Olaszországban, a Pó-síkságon figyelhetők meg, ahol

elérte a 8%-os relatív növekedést évtizedenként a legalább 2 cm-es szemeket tartalmazó jégesők gyakoriságára nézve. Hazánkban ennek a növekedésnek a mértéke nagyjából 2–3% közé tehető. Azonban Európa egyes területein negatív trendet kaptak, elsősorban Nyugat-Oroszországban és az Égei-tenger térségében (8. ábra). Míg Európa legnagyobb részén összességében a pozitív trendek dominálnak, addig az Egyesült Államok területén nagyjából megegyezik a csökkenést és növekedést mutató trendek aránya (Battaglioli *et al.*, 2023). Ausztrália jelentős részén csökkenést detektáltak az 1979–2021-es időszakban, azonban a keleti és nyugati partok déli részén, ahol több nagyváros is van, szignifikáns növekedést (Raupach *et al.*, 2023). Összességében tehát elmondható, hogy nem az események növekvő száma okoz problémát, hanem sokkal inkább azok hevességének mértéke.



8. ábra: A 2 cm feletti jégesős órák 1950–2021 időszakra vonatkozó átlagos éves száma Európában (balra) és a detektált évtizedes trend (jobbra) szintén órákban kifejezve (Battaglioli *et al.*, 2023).

Ha a jövőbeli európai tendenciát tekintjük, akkor még nehezebb konkrétumokba bocsátkozni. A konvektív paraméterek trendjeinek vizsgálata során ugyanis többek között megfigyelték az alsó 4 km-es réteg relatív nedvességének csökkenését, a felhajtóerő növekedését (Lifted Index csökkenése) és a konvektív gátlás növekedését (CIN csökkenése) egyaránt (Pilguy *et al.*, 2022). Ezek alapján a növekvő instabilitással ugyan várhatóan növekedni fog a heves jégesők számára megfelelő környezetek gyakorisága, ám a csökkenő nedvesség és a növekvő konvektív gátlás miatt ezek egyre kisebb hányada vezethetne konvektív csapadékhulláshoz és heves jégesőkhöz (Taszarek *et al.*, 2021).

3.1.3. A jégeső által okozott károk

A jégeső a gazdaság számos területén okoz károkat, elsősorban a mezőgazdaságban és az ingatlanokban, de az erdőkben okozott károk sem elhanyagolhatóak, nem is beszélve a személyi sérülésekről. Konkrét adatokat tekintve csak az Egyesült Államokban évente

átlagosan majdnem másfél milliárd dolláros kárt okoznak a jégesők, amelyek nagyjából 60–40%-os arányban érintik az ingatlanokat és a mezőgazdasági terményeket (*Changnon et al.*, 2009). Európa területén ez az érték éves szinten ugyancsak meghaladja az egy milliárd dollárt, egyes heves konvektív események pedig önmagukban több milliárd dolláros kárt képesek okozni akár egy-két nap leforgása alatt (*Púčik et al.*, 2019).

Az ESWD felhasználásával két hasonló, mégis eltérő alkalmazhatóságú kérdésre kaphatunk választ. Az egyik, hogy adott méretű jégeső előfordulása esetén milyen jellegű károkra kell felkészülnünk. A másik pedig egyfajta feltételes valószínűség, hogy ha előfordul az adott méretű jégeső, akkor ahhoz kapcsolódva mekkora valószínűséggel következik be a kár vagy sérülés. A különbséget abban a tényben kell keresni, hogy az egyre nagyobb jégszemek egyre kisebb valószínűséggel fordulnak elő. Szemléletesen tekintve ugyan a személyi sérüléseket leggyakrabban az 5 cm-es átmérőjű jég okozza, de a legnagyobb valószínűséggel természetesen a 10 cm feletti jég okoz problémát. A pénzügyi veszteségekhez képest a személyi sérülések viszonylag ritkák, azonban előfordultak, elsősorban a fejsérülések jelentenek nagy kockázatot ilyenkor. (*Púčik et al.*, 2019)

Az okozott károk ismeretében érthető, hogy miért szeretnék az emberek kezükbe venni az időjárás irányítását. Nézzük is meg, hogy hogyan jutottunk el a napjainkban alkalmazott technológiákhoz.

3.2. Időjárás-módosítás

Az embert természeténél fogva ősidők óta az vezérli, hogy minél inkább élhető környezetet biztosítson önmaga számára. Ha az időjárás irányítására úgy tekintünk, hogy a légkör egy részének fizikai állapota emberi beavatkozás hatására megváltozik, akkor ez többek között már a ruházkodással és a házak építésével megkezdődött. (*Bacsó*, 1939)

Az időjárás-módosítás eredményessége a kezdetektől fogva elsősorban attól függött, hogy milyen méretekben kívánják befolyásolni a légkör állapotát. Lokálisan már régóta alkalmaznak sikeresen különböző módszereket, azonban a nagyobb légtömegek állapotának megváltoztatására tett kísérletek többnyire kudarcba fulladtak. Például a fagy elleni védekezés sikeres a kisugárzási fagy esetében, amelynek mértékét alapvetően a helyi hatások határozzák meg. Ellenkezőleg, ha a nagytérségi helyzet a meghatározó, akkor a fagyos levegő akkora mennyiségét kellene felmelegíteni, ami egyáltalán nem megtérülő energiafelhasználással járna (*Bacsó*, 1939). Kezdetben szintén kis területen végeztek ködoszlatást többek között kalcium-klorid permetezésével (*Bacsó*, 1939), azóta viszont már

nagyobb területre kiterjedően is alkalmazzák jégképző magvak vagy szárazjég ködbe való juttatásával (*Geresdi, 1997; Elbing et al., 2001*). A legelterjedtebb időjárás-módosító tevékenységek a csapadékkeltés és a jégeső-elhárítás, amelyek történetéről a következőkben részletesen lesz szó.

3.2.1. Csapadékkeltés

A csapadékkeltés is évszázadok óta az emberiség tervei közé tartozik, amelyet kezdetben különleges, esőt előidéző gyógynövényektől, vagy az eget „végigsöprő” fénysugártól vártak, ami majd csapadékot okoz (*Spence, 1961*). Célja nem a kihullható nedvességtartalom növelése, hanem hogy a vízgőz minél nagyobb része a földfelszínre hulljon. Tehát a csapadékmennyiség növelése csak akkor lehetséges, ha elegendő vízgőz áll rendelkezésre a légkörben (*Geresdi, 1997*). Az első remény a 19. század közepén csillant fel James Pollard Espy nyomán, aki már értette a szél, a hő és a nedvesség konvektív folyamatokban betöltött szerepét. Környezetvédelmi szempontból meglehetősen vitatható terve, amely szerint erdők felégetésével állít elő mesterségesen esőt, végül kudarcot vallott. Több hektáron gyújtott meg vékony fenyőfákat egy júliusi napon, azonban csapadék nem keletkezett. A kudarcra a kedvezőtlen környezeti feltételeket adta magyarázatul (*Fleming, 2006*). Később két magyar tudós vízfelszín feletti nyersolaj égetéssel kívánta elérni a megfelelő hatást. Számításaik szerint a mesterséges eső jelentősen lecsökkentené az öntözési költségeket egy aszályos évben (*Görög és Rovó, 1938*). Ezután újabb ötletek születtek, mint a levegő feláramoltatása különböző csatornákon keresztül, vagy az elektromosság „lehozása”, amely a csapadékot is magával hozza (*Spence, 1961*), azonban ezek legfeljebb annyira voltak hasznosak, mint az úgynevezett esőcsinálók tevékenysége, akik mind az Egyesült Államokban (*Fleming, 2006*), mind hazánkban (*Bacsó, 1939*) nagy népszerűségnek örvendtek. Egy másik elmélet szerint, mivel csaták után gyakran figyeltek meg csapadékot, ezt biztosan az ágyúk által okozott rezgések okozzák. Robert St. George Dyrenforth vezetésével több kísérletet is tettek ennek bizonyítására, ám ezek természetesen kudarcba fulladtak (*Spence, 1961*).

Az előzőekben említett módszerek nem tekinthetőek tudományosan megalapozottnak, az időjárás-módosítás történetében azonban 1946-ban új korszak kezdődött, amely Vincent Schaefer nevéhez kötődik (*Geresdi, 1997; Fleming, 2006*). Schaefer a nyári melegben le akarta hűteni a hidegkamráját, ennek érdekében száraz jeget használt, azonban mellékhatásként megannyi jégreszecske is képződött a kamrában.

Ugyanebben az évben Vonnegut felfedezte, hogy a jégképződést más anyagok is előidézhetik, mint például az ezüst-jodid és az ólom-jodid (*Schaefer*, 1968). Ezenkívül, mint később kiderült, még más anyagok is alkalmasak erre a célra. Ezek közös tulajdonságai, hogy vízben nem oldódnak és kristályszerkezetük a jégéhez hasonló (*Geresdi*, 1997). Schaefer meg is kísérelt szárazjég részecskék repülőgépről való leszórásával csapadékot előidézni. A Stratocumulus felhőből valóban havazni kezdett, tehát a feltevése igazolódott. Később a Cirrus Projekt keretében kísérletek sorozatát hajtották végre a lehetőségek és korlátok megismerése érdekében (*Schaefer*, 1968). Az első sikeres beavatkozások után gyorsan a katonai hasznosíthatóság kérdése merült fel, néhányan egyenesen világuralmat reméltek az időjárás sikeres irányítása által. A hidegháborúban fegyverként használták fel az időjárás-módosítást, azonban végül 1978-ban elegendő számú ország ratifikálásával életbe lépett a katonai felhasználás tilalmáról szóló törvény (*Fleming*, 2006). Ezt követően jelentősen csökkent a kutatásra fordított összeg, de csak részben a katonai alkalmazás tiltása miatt. Kezdetben ugyanis többnyire úgy gondolták, hogy csupán néhány éves vizsgálattal ki lehetne fejleszteni egy tudományosan megalapozott, hatékonyan működő technológiát. Azonban rájöttek, hogy ehhez jóval több erőforrásra van szükség (*Bruintjes*, 1999).

3.2.2. Jégeső-elhárítás

A jégeső-elhárítás alapelve hasonló, mint amit a csapadékkeltésnél alkalmaznak. Azonban fontos különbséget jelent, hogy milyen típusú felhőkbe juttatják be a jégképző magokat. Amikor a csapadék mennyiségének növelése a cél, akkor többnyire réteges felhőkben történik a beavatkozás, míg a jégeső zivatarfelhőkből hullik, amelyben viszont jóval bonyolultabb, intenzívebb és gyorsabb folyamatok zajlanak le (*Geresdi*, 1997). A zivatarfelhőkben zajló folyamatok ismeretének hiánya a középkorban sem riasztotta el az embereket attól, hogy harangozás révén megpróbálkozzanak a felhők eloszlatásával és ezáltal a jégkárok csökkentésével. A villámhárító feltalálása után pedig széles körben terjedtek el olyan nézetek, amelyek a zivatarok esetében fellépő feszültségkülönbség mesterséges kiegyenlítésétől várták a megoldást. Miután a 19. század közepére ennek a hatástalanságát is bebizonyították, megkezdődött a jeget okozó felhők ágyúzásának fénykora (*Bacsó*, 1939). Hazánkban viharágyúzás néven terjedt el a módszer, és sokan meglátták benne az üzleti lehetőséget. Újabb és újabb ágyúkat fejlesztettek ki, melyekhez használati utasítást és felszerelést is biztosítottak. A hirdetésekben természetesen rendkívül hatékonynak mutatják be az ágyúkat (*Farkas és Faragó*, 1900). Az eszköz használatakor

arra alapoztak, hogy az ágyú által létrehozott rezgések, valamint az elsülés után kialakuló légörvény akadályozza meg a jégesőt. A módszer hatástalanságát mi sem mutatja jobban, mint az, hogy az ágyúzást gyakran amiatt kellett félbehagyni, mert a jég már megtöltötte az eszközt (Bacsó, 1939).

Ahhoz, hogy sikeres lehessen a jégeső elleni védekezés, első lépésben fel kellett ismerni, hogy a zivatarok és a jégesők megakadályozása gyakorlatilag lehetetlen, így az elsődleges cél a jég szemek méretének csökkentése lett. Tehát a jégeső-elhárítás kifejezés innentől kezdve nem helytálló (Geresdi, 1997), helyette a jégkarmérséklést fogom használni. Schaefer és Vonnegut korábban már említett felfedezései nyomán az 1950-es években jégképző magokat (elsősorban ezüst-jodidot) kezdtek alkalmazni, a generátorokat repülőgépekre vagy a talajra telepítették (Dessens *et al.*, 2016). További elterjedt módszerré vált a rakéták használata, amelyet orosz tudósok fejlesztettek ki szintén az 50-es években, majd a következő évtizedben már a tesztelésre is sor került, később pedig Magyarországon is alkalmazták. Lényege, hogy a rakétákat a zivatarfelhőbe lőtték, ahol azok szétrobbanva szétszórta a jégképző részecskéket (Abshaev *et al.*, 2022).

Az Egyesült Államokban az első komolyabb projektek az 1970-es években zajlottak, amelynek eredményeit Changnon (1977) foglalta össze. Megemlíti azt is, hogy a jégkarmérséklés sikerességéről alkotott vélemények nagy mértékben megosztották a szakmai közösséget. Az azonos időszakból származó európai projekteket pedig Federer (1977) mutatja be, kitérve arra a már akkoriban is fellépő problémára, hogy hogyan lehet a jégkarmérséklés eredményességét kimutatni, ha nem tudjuk mi történt volna beavatkozás nélkül.

3.2.3. Időjárás-módosítás napjainkban

Annak ellenére, hogy még ma is számos vita övezi a csapadékkeltés alkalmazhatóságát, számos országban folytatódnak a kutatások, többek között az Egyesült Arab Emírségekben [8 – uaerep.ae]. Ennek oka pedig az egyre súlyosbodó vízhiányban keresendő, de a városi légszennyezettség csökkentése is kiemelt célja a mesterséges esőnek (Bruinjes, 1999). Napjainkban több mint 50 országban alkalmaznak különböző csapadékkeltéssel kapcsolatos módszereket ezen problémák kezelése céljából, vitatott sikerességgel [9 – zmescience.com].

Egy világszerte ismertté vált projekt a 2008-as, Pekingben megrendezett olimpiával kapcsolatos. A megnyitót egy fedetlen stadionban tartották, így a szervezők mindenképpen

el akarták kerülni, hogy az ünnepség alatt csapadékhullás következzen be. A célt elérték, azonban felvetődött a kérdés, hogy ebben mekkora szerepe volt az időjárás-módosításnak. *Li et al.* (2017) részletesen elemezték a helyszín környezetében lezajló konvektív eseményeket radar- és csapadékadatok felhasználásával, és vizsgálták a rakétával feljuttatott ezüst-jodid hatását. Egyértelmű bizonyítékok hiányában kiemelték, hogy a bizonytalanságok csökkentése érdekében további vizsgálatokra van szükség. Ezzel együtt Kínában 2013 óta évente átlagosan kb. 80 milliárd Ft-ot fordítottak időjárás módosításra (*Simon et al.*, 2023).

A jégeső okozta károk következtében számos országban zajlik jégkármérséklés is napjainkban, a következő alfejezetekben ennek technológiájáról és az alkalmazott rendszerekről lesz szó.

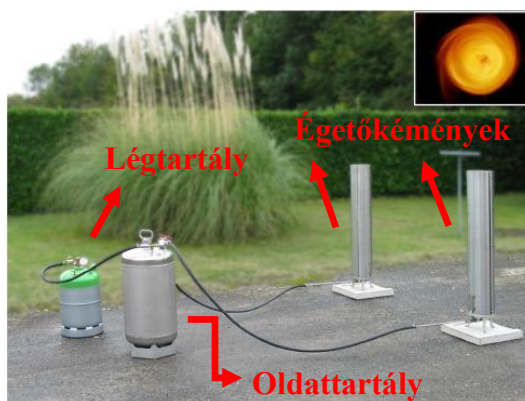
3.3. A jégkármérséklő rendszer technológiája, működési elve

Ahogy a történeti bevezetőben említettem, a jégkár mérséklésére irányuló rendszerek egyre inkább elterjedtek a 20. század második felében, így szükségessé vált kereteket szabni ezen tevékenységeknek. 2003-ban ki is adtak egy szabványt, összefoglalva a legfőbb alapelveket, amelyek a minél sikeresebb alkalmazást segítik elő (*ASCE*, 2003). A téma jelentőségét mutatja, hogy ezt kétszer meg is újították az azóta szerzett tapasztalatokat felhasználva (*ASCE*, 2015; *ASCE*, 2024).

A jégkármérséklés technológiájának alapja, hogy a zivatarfelhőbe jégképző magokat juttatnak, lehetőleg annak megfelelő részébe. Erre három, széleskörűen elterjedt módszer létezik: repülőgépek, rakéták és talajgenerátorok használata (*Geresdi*, 1997). Ha a pontosságot helyezzük előtérbe, akkor a rakéták és repülőgépek alkalmazása előnyösebb. A repülők pontosan a célzott terület fölé tudnak repülni, míg a rakétákat oda lehet irányítani. Természetesen ennek a tartománynak a kijelölése és kellő mértékű leszűkítése nem egyszerű feladat (*Horváth et al.*, 2015). További hátrányuk, hogy meglehetősen drágák, nagy emberi erőforrást igényelnek és kockázatosak (*Geresdi*, 1997). Minimális biztonsági kockázattal rendelkeznek és sokkal kevésbé költségesek a talajfelszínen elhelyezett talajgenerátorok (*Geresdi*, 1997), ráadásul telepítésük és működésük is egyszerű (*Horváth et al.*, 2015).

A talajgenerátorok alkalmazása során ezüst-jodid és különféle kémiai oldatok (elsősorban aceton) keverékét égetik el, amelynek eredményeként ezüst-jodid aeroszokok keletkeznek (*Dessens et al.*, 2016). Napjainkban számos helyen használják a Vortex típusú talajgenerátort, kétkéményes változatának felépítése látható a 9. ábrán. A gyakrabban alkalmazott, hazánkban is elterjedt változatnak csak egy kéménye van. Működés közben a

légtartály túlnyomása a fűvókán keresztül az égetőkéménybe porlasztja az oldattartályban lévő acetonos ezüst-jodid oldatot, a nagyjából 800 °C-os égés során pedig az ezüst-jodid kristályok kijutnak a kémény tetején [10 – nefela.hu – A jégeső-elhárítás]. A generátor tehát közvetlen környezetében, a talajhoz közeli rétegben növeli meg a jégképző magok koncentrációját. Amennyiben a kialakuló zivatarfelhőbe beáramló levegő ebből a környezetből származik, akkor a jégképző magvak megnövekedett koncentrációja már a fejlődési szakasz kezdetén jelen lesz (Horváth *et al.*, 2015). Fontos tényező az ezüst-jodid részecskék mérete, hiszen míg a nagyobb aeroszokok már akár -5 °C környékén aktivizálódnak, addig a kisebbek csak jóval alacsonyabb hőmérsékleten (Dessens *et al.*, 2016). Ami pedig a koncentrációt illeti, a felhő megfelelő tartományába bejutó ezüst-jodid kristályok mennyisége elérheti a 10 db/l értéket. Mivel ez összemérhető a természetes jégképző magok koncentrációjával, így a keletkező jégszemek száma érdemben befolyásolható (Horváth *et al.*, 2015).



9. ábra: Kétkéményes, Vortex típusú generátor és részei, valamint egy felülnézeti kép a kéményről, miközben az égés folyamata zajlik (Dessens *et al.*, 2016).

Amennyiben a zivatarfelhőben lévő cseppfolyós víztartalom mennyisége nem halad meg egy bizonyos mértéket, akkor a jégszemek számának növekedése a kívánt célt eredményezi, azaz a jégszem méretének csökkenését (Geresdi, 1997). A jégszem kinetikus energiája és egyúttal az okozott kár mértéke a sebesség második hatványával, ez pedig elvileg a sugár harmadik hatványával arányos, tehát összességében ötödfokú kapcsolat van közöttük (Geresdi, 1997). Szemléletesen, ha a beavatkozás következtében 5 cm-es jégszemek helyett csupán 4,5 cm nagyságúak keletkeznek, már ez is körülbelül 41%-kal csökkenti a kinetikus energiát. Azonban kísérletek alapján (a jégszemek eltérő sűrűsége miatt), a hatványkitevő inkább 3,5-höz közeli (Heymsfield *et al.*, 2018). Ugyanakkor, ha a jégképző magok száma nem elegendő a rendelkezésre álló cseppfolyós víztartalomhoz viszonyítva, akkor előfordulhat, hogy a méret csökkentése helyett csak a jégszemek száma

növekszik (Geresdi, 1997). Emiatt nagyon fontos, hogy a generátorok minél sűrűbben legyenek elhelyezve, ez nagyban növeli az alkalmazás sikerességét (Horváth et al., 2015).

3.4. A jégkár mérséklésére alkalmazott módszerek eredményei

A jégkármérséklés eredményeinek értékelése meglehetősen nehéz feladat. Az egyik lehetőség megvizsgálni, hogy a felhőkben lezajló mikrofizikai folyamatok hogyan változnak a mesterséges jégképző magok hatására. A másik módszer a jégeső és az általa okozott károk vizsgálata, amely azonban sosem jelent biztos eredményt. Léteznek véletlenszerű eljárások, amikor egy adott terület felett véletlenszerű időpontban avatkoznak be, vagy éppen nem avatkoznak be. További lehetőség két terület kiválasztása, ahol az egyikken végeznek jégkármérséklést, a másikon nem. Ennek során fontos, hogy a két területen minél korábban visszamenőleg elemezzék az adatokat, többek között a jégesők visszatérési idejéről, valamint azok eloszlásáról. A cél két, minél hasonlóbb terület kiválasztása. Fontos továbbá, hogy a mesterséges magok ne kerülhessenek véletlenül arra a területre, ahol nem avatkoznak be, hiszen ez is torzíthatja az eredményeket (ASCE, 2015). A mérések során a jég detektálása történhet úgynevezett Hail Pad Networks (jégeső indikátorok hálózata) segítségével közvetlenül (Székely és Zoltán, 1984; Torralba et al., 2023), valamint radar adatok felhasználásával (Fluck et al., 2021) és túlnyúló csúcsok műholdas érzékelésével (Bedka, 2011) közvetetten. A másik módszer pedig a jégkárokból visszavezetni a jégeső jellemzőit (Púčik et al., 2019).

A vizsgálatok értékelésének összehasonlításakor fő szempontként az alkalmazott módszert (repülőgépes, rakétás, talajgenerátoros) vettem, megvizsgálva más kontinensek és európai országok tanulmányait is.

3.4.1. Repülőgépes módszer

A repülőgépes módszer esetén a jégképző magok felhőbe juttatása közvetlenül történik. Emiatt azonban fontos az, hogy pontosan meghatározzák azt a tartományt, ahová bejuttatják az ezüst-jodid részecskéket. Erre a célra elsősorban radarokat használnak, amelyekkel folyamatosan követik a keletkező zivatarfelhőket (Rudolph et al., 1994; Smith et al., 1997; Krauss et al., 2000; Gilbert et al., 2016). Eleinte többnyire a repülőgépek szárnyára telepített generátorokban (10. ábra - bal) égették el az acetonos oldatot (Dennis et al., 1981), később pedig az oldattal átitatott, égő fáklyákat (10. ábra - jobb) is alkalmaztak

erre a célra (*Rudolph et al.*, 1994; *Krauss et al.*, 2000), de előfordult vegyes alkalmazás is (*Smith et al.*, 1997; *Gilbert et al.*, 2016).



10. ábra: Szárnyvégi ezüst-jodid generátor (bal) és helyben égő fáklyák (jobb) felhőmagvasítást végző repülőgépekre felszerelve [11 – nawmc.org]

Az eredmények azt mutatják, hogy a jégesős napok és a jeges események száma nem csökkent (*Rudolph et al.*, 1994). Ez is azt bizonyítja, hogy nem a jégeső teljes megszüntetéséről van szó, hanem a jégszemek méretének csökkentése által a károk mérsékléséről. Egyértelműen a jégkárok csökkenését tapasztalták a repülőgépes módszert alkalmazó területeken az Egyesült Államokban, Dél-Dakotában (*Dennis et al.*, 1981) és Észak-Dakotában (*Smith et al.*, 1997), Kanadában, Albertában (*Gilbert et al.*, 2016), továbbá a világ egyik, jégkárok által leginkább érintett területén, Argentína nyugati részén (*Krauss et al.*, 2000). Európában is hasonló eredményre jutottak Görögországban (*Rudolph et al.*, 1994). Fontos azonban, hogy a jégkárok vizsgálata sosem jelent garanciát, hiszen nem lehet kizárni a klimatológiai tényezőket, mint a károkozó jégesemények csökkenésének okozóit (*Smith et al.*, 1997). A bevetések során azt tapasztalták, hogy nagyobb hatást érnek el, amennyiben a felhőbe repülnek, azonban ez jóval kockázatosabbnak bizonyult (*Dennis et al.*, 1981). Természetesen felmerül, hogy a berepülés következtében történő szárítás okozta-e a hatás növekedését. Egy újabban alkalmazott technológia heves zivatarfelhők esetén az, hogy mind a felhőalapnál, mind a felhőtetőnél végzik a magvasítást. Előbbi az erős feláramlásokba, utóbbi pedig a jégeső legintenzívebb növekedésének zónájába juttatja bele a jégképző magokat (*Gilbert et al.*, 2016).

3.4.2. Rakétás módszer

A rakétás módszert, ahogy arról már korábban szó esett, az oroszok alkották meg, és a legnagyobb hagyománnyal is ők rendelkeznek az alkalmazás terén, sőt az utóbbi időkben növekedett is az évente felhasznált rakéták száma (*Abshaev et al.*, 2022). Ennél a módszernél is fontos a radar jelenléte, az irányítás annak adatai segítségével adja ki a parancsot a rakéták

kilövésére (*She et al.*, 2019; *Abshaev et al.*, 2022). Azonban ez az eljárás magában hordozza az információ átadása miatti idővesztést és az ember által végzett kilövés következtében fellépő térbeli pontatlanságot. Kínában, ahol szintén az 1950-es évek óta végeznek kutatásokat a témában, nemrég fejlesztettek ki egy olyan rendszert, ami ezt a problémát hivatott megoldani. *She et al.* (2019) által leírt tervek szerint a jeges környezetek radaradatok segítségével történő korai detektálása automatikusan történne. Ezután a rendszer kiszámítaná a környezet pontos helyét, ez alapján pedig automatikusan pozícionálná a rakétát kilövő szerkezetet.

Oroszországban a védett területeken azon napok száma, amelyeken ezüst-jodid részecskéket juttatnak a felhőbe, meghaladja a jégesős napok számát, tehát igyekeznek biztosra menni. *Abshaev et al.* (2022) az elmúlt évtizedek eredményeit kimagaslónak írják le, az elemzéseik alapján nagyjából hatod részére csökkent a jégkár mértéke. Árnyalja a képet viszont, ha Jugoszláviát és utódállamait vizsgáljuk. Operatíván először 1967-ben kezdték alkalmazni a rakétás módszert a Szovjetunióban kifejlesztett rendszer mintájára. *Mesinger és Mesinger* (1992) még arra jutottak, hogy az éghajlati ingadozásokkal korrigálva is 15–20 %-os csökkenés detektálható a jégeső gyakoriságában. Megjegyzendő, hogy a jégeső okozta károkkal azonban mindezt nem hozzák összefüggésbe. Az utóbbi években újabb eredmények jelentek meg. *Gavrilov et al.* (2010) a trendelemzések során azt kapták, hogy Szerbiában adott terület felett stagnált a jégeső gyakorisága a rakéták használatakor, de csökkenés volt megfigyelhető azokban az időszakokban, amikor semmilyen módszert nem használtak. Emiatt javasolták a rendszer bővítését, fejlesztését. Azonban három évvel később *Gavrilov et al.* (2013) már tudományosan megalapozatlannak nevezte a jégkár mérséklésére irányuló tevékenységeket. Érvei azonban megkérdőjelezhetők, egyrészt amiatt, hogy a jégkarmérséklés célja alapvetően nem a jégeső gyakoriságának csökkentése. Másrészt pedig *Gavrilov et al.* (2010) még a növekedési trendet nem tekintették szignifikánsnak az elvégzett statisztikai próba alapján, míg *Gavrilov et al.* (2013) a 2010-es, kiugróan magas értéket mutató év hozzáadásával már igen, tehát tulajdonképpen egyetlen év okozta ezt. Ráadásul a vizsgált időszak is meglehetősen rövid, nyolc évre vonatkozik. Bosznia-Hercegovinában szintén növekvő trendet mutattak ki a jégesős napok számában (*Dejanovic et al.*, 2018), azonban a kérdés itt is felvetődik, hogy a megfigyelések gyakoriságának változása ebben milyen mértékben játszik szerepet. Szintén komoly múltra tekint vissza a rakétás módszer Bulgáriában, ahol a jég okozta károk tendenciáját vizsgálva jelentős csökkenést tapasztaltak, tulajdonképpen a felére csökkent annak mértéke (*Simeonov*, 1996). Romániában pedig 2008-ban indult el a projekt. Különlegessége abban áll, hogy a védekezést elsősorban azokra a

területekre összpontosítják, ahol a legértékesebb mezőgazdasági növények vannak, a néhány éves tapasztalat alapján az elért eredményeket hatásosnak ítélik (*Istrate et al.*, 2019). Összességében elmondható, hogy a rakétás alkalmazás értékelései nem adnak egyértelmű választ a hatékonyság kérdésére.

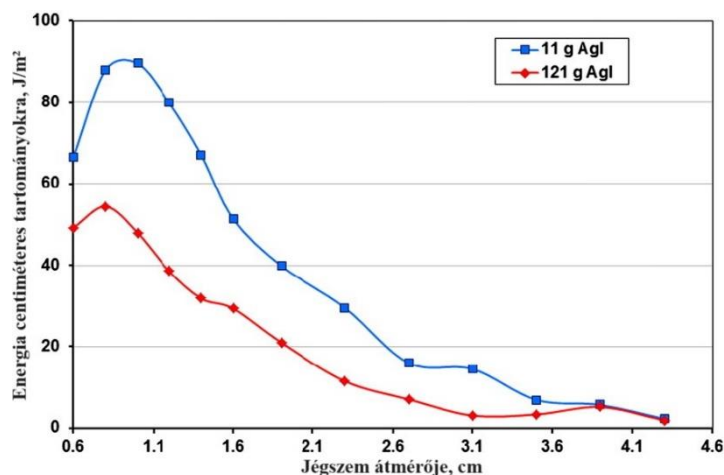
3.4.3. Talajgenerátoros módszer

A talajgenerátoros módszer működéséről már volt szó, így ebben a részben az elért eredményekre összpontosítok. Az egyik fontos korabeli, időjárás-módosítására létrehozott projekt a Grossversuch III volt, amely Svájc területén valósult meg, nagy számú ezüst-jodid generátor használatával (*Schmid*, 1967). Véletlenszerűen választották ki azokat a napokat, amikor működtetik a rendszert és amikor nem. A hatéves időszak eredményeit vizsgálva azt tapasztalták, hogy a jégeső gyakorisága nagyobb volt azokon a napokon, amikor be voltak kapcsolva a generátorok. Azonban megjegyzik, hogy kevés a rendelkezésre álló adat, ráadásul a károkkal ez nem is feltétlenül van összefüggésben (*Schmid*, 1967). Lehetséges az is, hogy a rendszer működése miatt egyszerűen többször keletkezett apró szemű jég, hiszen a jég méretéről nincs információ. *Schmid* (1967) egyértelműen negatívan értékelt, javaslata szerint minden akkoriban működő, hasonló jégkarmérséklő rendszert azonnal meg kell szüntetni. Ez a kijelentés természetesen visszavetette a technológia fejlődését (*Dessens et al.*, 2016). Mivel a hasonló, korabeli projektek szintén nem hoztak egyértelmű eredményeket (*Dessens et al.*, 2016), még nem volt kijelenthető, hogy érdemes talajgenerátorokat használni a jégkár mérséklése érdekében.

Jóval hosszabb időszakból állnak rendelkezésre adatok Franciaországban, ahol már nagyon hosszú ideje, 1952 óta alkalmaznak talajgenerátorokat jégkarmérséklés céljából az ANELFA² irányításával (*Dessens*, 1986). Harminc év után 455 talajgenerátor működött (*Dessens*, 1986), ez pedig újabb harminc év után 838-ra bővült (*Dessens et al.*, 2016). Az elv azonban nem változott, miszerint a generátorokat 10*10 km-es hálózat rácspontjaiban érdemes elhelyezni (*Dessens*, 1986; *Dessens et al.*, 2006; *Dessens et al.*, 2016). Az előrejelzéseket a meteorológiai szolgálat készíti el, és a cél, hogy három órával a várható jégeső előtt már be legyenek kapcsolva a generátorok (*Dessens*, 1986). A nem véletlenszerű

² Association Nationale d'Etude et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques: Nemzeti szövetség a légköri csapások tanulmányozásáért és az ellenük való küzdelemért

eljárás eredményeinek első kiértékelése azt mutatta, hogy nagyjából 40%-os csökkenés történt a jég által okozott károkból (*Dessens, 1986*), a fizikai értékelés pedig szignifikáns negatív korrelációt mutatott a kijuttatott ezüst-jodid részecskék és a lehulló kárt okozó (0,7 cm feletti átmérőjű) jég szemek száma között (*Dessens, 1998*). Ennél a legfőbb problémát az jelentette, hogy nem vették figyelembe a felhők belsejébe valóban bejutó jégképző magok számát. Az eljárás finomítása érdekében később a kinetikus energia változását is megvizsgálták (*Dessens et al., 2006*) és a jég szemek minden mérettartományában csökkenést tapasztaltak, bár a nagyobb jég szemek esetén ez nem jelentős (11. ábra). Összességében a kinetikus energia 50%-os mérséklődését találták a talajgenerátorok alkalmazása mellett (*Dessens et al., 2006; Dessens et al., 2016*). Megállapítást nyert még az is, hogy a talajgenerátoros módszer a repülőknél és rakétáknál sokkal jobban alkalmazható ott, ahol nagy területen és az év jelentős részében védekezni kell (*Dessens, 1986*).



11. ábra: Jégesők kinetikus energia eloszlása 24 olyan napra vonatkozóan, amikor nagy számú jéges eseményt figyeltek meg. Két esetre látható az eloszlás, az átlagosnál kevesebb és több kijuttatott ezüst-jodid mellett (*Dessens et al., 2016*).

Érdemes megemlíteni még a Spanyolországban végzett talajgenerátoros beavatkozásokat. Az 1982 és 1987 közötti időszak vizsgálatai jelentős hatást találtak elsősorban a működés első órájában és elsősorban a közepes (cseresznye) méretű jég szemek esetén (*Balasch et al., 2004*). Azonban *Dessens et al. (2016)* eredményeivel összhangban nem volt eredményes a nagy jég szemek méretének csökkentésében. Később Spanyolország egy adott területén, két négyéves időszakot hasonlítottak össze, 2000 és 2004 között alkalmaztak talajgenerátorokat, 2005 és 2009 között nem. Az eredmények itt is szignifikáns különbséget mutattak, a jégeső szemek mérete egyértelműen kisebb volt a korábbi időszakban (*Dessens et al., 2016*).

3.5. A jégkarmérséklés környezeti hatásai

Az egyik, jégkarmérsékléssel kapcsolatban leggyakrabban felmerülő aggodalom az emberekben az ezüst-jodid környezetre gyakorolt hatásával kapcsolatos. A legnagyobb mennyiség összességében talajgenerátorokból kerül ki, így elsősorban ezek használati területén végeztek vizsgálatokat. Kitértek a csapadéokban (*Causapé et al.*, 2021a; *Sánchez et al.*, 1999; *Williams és Denhom*, 2009), a talajban (*Causapé et al.*, 2021a) és a természetes vizekben (*Causapé et al.*, 2021b; *Williams és Denhom*, 2009) mért koncentrációkra, valamint az élővilágra gyakorolt hatásra is (*Causapé et al.*, 2021b; *Williams és Denhom*, 2009). A vizsgálatok kimutatták, hogy a csapadéokban mért koncentráció nagyobb azokon a napokon, amikor zajlik a beavatkozás (*Causapé et al.*, 2021a), ez azonban jóval a megengedett határérték alatt van, így nem okoz problémát (*Sánchez et al.*, 1999; *Williams és Denhom*, 2009). A talajban való felhalmozódás szintén bizonyította a generátorok környezetében, azonban a kibocsátás alapján várttól jóval kisebb mennyiségben (*Causapé et al.*, 2021a). Erre magyarázatul a különböző élőlények által végzett nyelési folyamatokat adták (*Causapé et al.*, 2021b). Az ezüst-jodid mennyisége még a potenciális akkumulációs zónákban is alacsony, továbbá vízben oldhatatlan, így nincs bizonyíték, hogy káros hatással lenne a környezetre (*Williams és Denhom*, 2009).

A másik felmerülő probléma a jégkarmérséklés és az aszály közötti kapcsolat lehetősége. Romániában tavaly alkalmaztak először talajgenerátorokat, de a gazdák már az első szezon után kifejtették aggodalmukat, miszerint a rendszer szárazságot okoz, így működése katasztrofális következményekkel járhat [15 – maszol.ro]. Franciaországban a jégkarmérséklés hasznát élvező borászok és az aszályt elszenvedő, és ezért a rendszert okoló szarvasmarha-tenyésztők között merült fel konfliktus. A vizsgálatok során nem mutattak ki kapcsolatot a lehullott csapadék mennyisége és a generátorok használata között, sokkal inkább a sebezhetőség növekedését emelték ki az éghajlatváltozáshoz kapcsolódva (*Petit et al.*, 2023). Romániában tavaly alkalmaztak először talajgenerátorokat, de a gazdák már az első szezon után kifejtették aggodalmukat, miszerint a rendszer szárazságot okoz, így működése katasztrofális következményekkel járhat [15 – maszol.ro].

4. Az Országos Jégkármérséklő Rendszer működése Magyarországon

4.1. Előzmények

Hazánkban az 1960-as években megalakult a felhőfizikai kutatócsoport, amelynek egyik fő célkitűzése a jégképző magok szerepének és a jég szemek növekedésének vizsgálata volt. A tudományos háttérrel szóló cikkek mellett megjelentek a jégeső okozta károkról szóló összegzések is, amelyek következtében szükségesnek ítélték az első, rakétás rendszer bevezetését. Miután minden szükséges műszaki felszerelést beszereztek és a személyzet is rendelkezésre állt, 1976. július 23-án végrehajtották az első, tudományosan megalapozott időjárás-módosítást Magyarországon (*Wirth, 1984*).

A rendszer eleinte három járást fedett le Baranya megyében és 11 kilövőállomásból állt, majd ezt később tovább bővítették. Ami a működést illeti, különböző radaros paramétereket használtak fel, és a beavatkozáskezelő által meghatározott időpontban lőtték fel a rakétákat, ha a jégeső előfordulásának valószínűsége meghaladott egy bizonyos értéket. Feltételezve, hogy az időpont meghatározása megfelelő, statisztikailag kétféle hibát követhettek el. Az egyik, hogy bekövetkezett a jégeső, mégis elmulasztották a rakéták kilövését (elsőfajú hiba). A másik, hogy kilőtték őket, pedig szükségtelen volt (másodfajú hiba). Az elsőfajú hiba minimalizálása a kockázatot, a másodfajú hiba minimalizálása a költségeket csökkenti. Végül az eredmények figyelembevételével inkább az elsőfajú hiba bekövetkezését igyekeztek minél inkább kizárni (*Wirth, 1984*).

A rendszert Bács-Kiskun megye egyes részeire is telepítették, valamint tervben volt további terjeszkedés is (*Wirth, 1984*), de a túl nagy üzemeltetési költség és a rakéták kilövésének korlátozásai miatt végül 1990-ben beszüntették [12 – nefela.hu - Az egyesülésről]. Ekkorra már több évtizedes tapasztalatok gyűltek össze a talajgenerátoros módszerekről, többek között *Dessens* (1986) korábban bemutatott eredményei. A francia kutató ajánlásai alapján, az 1991-ben megalakuló NEFELA (Dél-magyarországi Jégesőelhárítási Egyesülés) működtetésével, létrehozták a Baranya, Somogy és Tolna megye területét lefedő, talajgenerátorokból álló hálózatot. Miután több mint húsz éven át működött a rendszer, értelmet nyert elkezdni mélyebben foglalkozni az elért eredményekkel. A hatékonyságot alapvetően két féle szempontból közelíthették meg.

Az egyik szempont objektívan tekint a problémára, a jégképző magok zivatarfelhőkbe való bekerülését vizsgálja (*Horváth et al., 2015*). Ahhoz, hogy ezeknek a részecskének az útját követhessük, elengedhetetlen az adott környezetben uralkodó szelek

és a turbulencia ismerete. A légkört leíró törvények alapján pedig numerikus szimulációk segítségével modellezhető a részecskék útja (*Dessens et al.*, 2016). Az Országos Meteorológiai Szolgálat a NEFELA egyesülettel együttműködve három, tipikusan jégesőt produkáló időjárási helyzetben vizsgálta az ezüst-jodid részecskék útját. Ebben a környezet leírására a WRF³, míg a részecskék útjának és a koncentrációjának kiszámítására a FLEXPART⁴ modellt alkalmazták. Mivel a cél annak a kérdésnek a megválaszolása volt, hogy a mesterséges jégképző magvak mekkora mennyisége jut be a zivatarfelhőbe, így a száraz és nedves ülepedés miatti veszteséget is figyelembe kellett venni. A kísérletek során igyekeztek minden körülményt pontosan beállítani, többek között a generátorhálózat sűrűségét, valamint az azok által kibocsátott ezüst-jodid mennyiségét (*Horváth et al.*, 2015).

Az első kísérlet során egy igen heves, szupercellás jegyeket mutató zivatart vizsgáltak, amely a talajgenerátorok feletti területre érve nagyon hatékonyan szívta magába a jégképző magokat, olyannyira, hogy a kisebb, szomszédos zivatarcellákba gyakorlatilag nem is jutott belőle. A második kísérletben egy zivatarláncot vizsgáltak, amely maga előtt nagy területen szórta szét az ezüst-jodid részecskéket. Ugyan a szupercellához képest lassabban, de ez is nagy mennyiségben szívta fel a hatóanyagot, amelyet aztán lassabban használt fel, így hosszabb ideig kitartott az adott mennyiség. A harmadik kísérletet légtömegben belüli, multicellás zivatarokra végezték el. Szignifikáns áramlás hiányában a jégképző magok egyenletesen oszlottak szét a terület felett, az egyes zivatarok így megegyező arányban, viszont kisebb mennyiségben szívták be őket, azonban ez az alacsonyabb koncentráció tartósan is megmaradt. Megállapították, hogy az ezüst-jodid száraz ülepedése elhanyagolható, tehát azok képesek tartósan a levegőben maradni és a zivatarok feláramlási csatornáin keresztül nagy mennyiségben a felhő jégképződési zónájába jutni. A részecskék magasság szerinti eloszlása eltérő volt a három esetben (4. táblázat), azonban a különböző magasságban lévő részecskék eltérő módon ugyan, de minden esetben a jégrészecskék keletkezését segítették elő. Összességében tehát elmondható, hogy a zivatarfelhőkbe való bejutás hatékony, de minden időjárási helyzetben másképp történik (*Horváth et al.*, 2015).

³ Weather Research & Forecasting Model: Időjárás Kutató és Előrejelző modell

⁴ FLEXible PARTicle dispersion model: Rugalmas részecske diszperziós modell

4. táblázat: A jégképző részecskék maximális felhőbeli koncentrációja három különböző magasságon, ng/m³ egységben (Horváth *et al.*, 2015).

<i>Jelenség</i>	<i>1000 méter</i>	<i>3000 méter</i>	<i>5000 méter</i>
<i>Szupercella</i>	~0,06	0,01–0,05	0,01–0,04
<i>Zivatarlánc</i>	0,08–0,10	0,05–0,09	0,01–0,04
<i>Izolált cellák</i>	0,09–0,11	0,04–0,06	0,03–0,06

A hatékonyság másik, szubjektívebb módja a károk felmérése alapján történik. Ehhez összehasonlították, hogy Baranya megyében a védekezés előtti és alatti időszakban a mezőgazdasági növények hány százaléka semmisült meg jégkár következtében. Egyéb tényezők figyelembevétele nélkül azt kapták, hogy a talajgenerátoros védekezési időszakban nagyjából negyedére csökkent ez az úgynevezett kárány [13 – nefela.hu – A jégeső-elhárítás hatékonysága]. Természetesen ez a fajta statisztika mindig hordoz magán némi bizonytalanságot, hiszen nem lehet tudni, hogy mi történt volna a rendszer használata nélkül. Azonban a tendenciák megállapítására alkalmas.

Mivel a különböző vizsgálatok egyaránt azt mutatták, hogy érdemes kiterjeszteni a talajgenerátoros rendszert az egész ország területére, így 2014-ben megindult a feltételek kidolgozása, amelyeket a NEFELA, az OMSZ (Országos Meteorológiai Szolgálat), a NAK (Nemzeti Agrárgazdasági Kamara) és a Miniszterelnökség szakemberei vitattak meg. A NAK a JÉGER (Országos Jégkarmérséklő Rendszer) projekt keretében megírta a pályázatot, 2017 áprilisában beadták, ugyanezen év októberében pedig el is nyerték. A megvalósítás már a következő év májusára befejeződött, így ebben az évben meg is kezdődött az országos szintű védekezés [14 – nefela.hu – Országos jégeső-elhárítás].

4.2. A jégkarmérséklő rendszer működése

Hazánk teljes területén 2018 óta működik az Országos Jégkarmérséklő Rendszer, a dolgozat megírásának idejében pedig már a hetedik védekezési szezon kezdődik, amely minden évben április 15. és szeptember 30. között van. Az országos szintű jégkarmérséklésnek nemcsak a mezőgazdasági értékek megóvásában van szerepe, hanem minden lakos számára védelmet nyújt a jégeső okozta anyagi károk megelőzésében. A 986 darab talajgenerátorból álló rendszer 2023-ig az Országos Meteorológiai Szolgálat, majd 2024-től a HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt. által küldött, járási szintre lebontott riasztás alapján kerül bekapcsolásra az érintett területeken. A generátorok jelentős része a manuális generátorkezelők által kerül bekapcsolásra, 219 pedig automatikusan működik. Rendelkezésre állnak a bekapcsolás részletes adatai is, amelyek

tartalmazzák járási szintre lebontva, percre pontosan a bekapcsolás és a kikapcsolás időpontjait. A jégkarmérséklés technológiájának alapját korábban (3.3. A jégkarmérséklő rendszer technológiája, működési elve) már megismertük, így erre itt nem térek ki, azonban a környezeti hatásokról hazai viszonylatban is érdemes néhány szót ejteni.

Az ezüst-jodid környezetre gyakorolt hatásával kapcsolatos aggodalom hazánkban is felmerült. Az Országos Jégkarmérséklő Rendszer létrehozása után a csapadékban, a talajban és a természetes vizekben mért koncentrációkra, valamint az élővilágra gyakorolt hatásra is kiterjedő, széleskörű vizsgálatot végeztek. Kimutatták, hogy a talajban lévő koncentráció legfeljebb csak több ezer év használat után haladná meg a szennyezettségi határértéket. Emellett mind a talajra, mind a talajvízre vonatkozóan végeztek mintavételi eljárásokat, és megállapították, hogy a talajgenerátorok használata nem okozott káros mértékű ezüstoffelhalmozódást (NAK, 2020). Hazánkban is felmerülő probléma a jégkarmérséklés és az aszály közötti kapcsolat lehetősége. Magyarországon 2022-ben, egy hosszú aszályos időszak következtében széles körben terjedt el az a nézet, hogy ez a jégkarmérséklés következménye. Azonban ezt semmilyen tudományos magyarázat nem támasztotta alá, ráadásul az aszály Európa jelentős részét érintette, jégkarmérséklést nem végző országokat is. Az aszályhoz vezető problémát tehát sokkal inkább nagytérségű időjárási folyamatokban kell keresni (Horváth és Breuer, 2023).

A működésre visszatérve, a NAK közvetlenül megkapja a manuális generátorkezelők jégbejelentéseit, valamint az ehhez kapcsolódó esetleges károkat is. A jégbejelentés tartalmazza a jégeső időpontját, helyszínét, mennyiségét, méretét, valamint szöveges leírását is, amely azonban meglehetősen szubjektív. A kárbejelentések pedig az időpont és helyszín mellett a jégkarral érintett terület nagyságát és a károsodott növénykultúra típusát is tartalmazzák.

Fontos azt is látni, hogy milyen körülmények vezettek az egyes jéges eseményekhez, valamint ezek mekkora területre terjedtek ki, és mekkora károkat okozhattak. Ennek érdekében a meteorológiai adatok felhasználásával létrehoztak egy webalkalmazást, a Jégveledet, amelynek segítségével az egyes, jégesőt okozó zivatarcellák életútját is végig lehet követni. A program megjeleníti az 5 percenként rendelkezésre álló különböző radarproduktumokat (CMax, PseudoCAPPI, H45, H55, VIL), valamint rétegeket is tehetünk rájuk, mint például az adott időpont környékén előforduló jégeseteket.

Mivel már hat éve működik a rendszer, érdemes az eddig elért eredményeket is áttekinteni.

4.3. Jégkárbejelentések és jégeső detektálás

Az általam elvégzett vizsgálatokhoz a NAK rendelkezésemre bocsátotta az említett adatokat (jégbejelentések, kárbejelentések, bekapcsolások, kiegészítve a meteorológiai paramétereket tartalmazó adatokkal) Excel táblázatok formájában. Az adatok Excelben történő kisebb átalakítása után R program segítségével dolgoztam fel azokat, és az ábrák elkészítése is itt történt. A saját vizsgálatom mellett a NAK és a HungaroMet Nonprofit Zrt. által elért eredményeket is bemutatom.

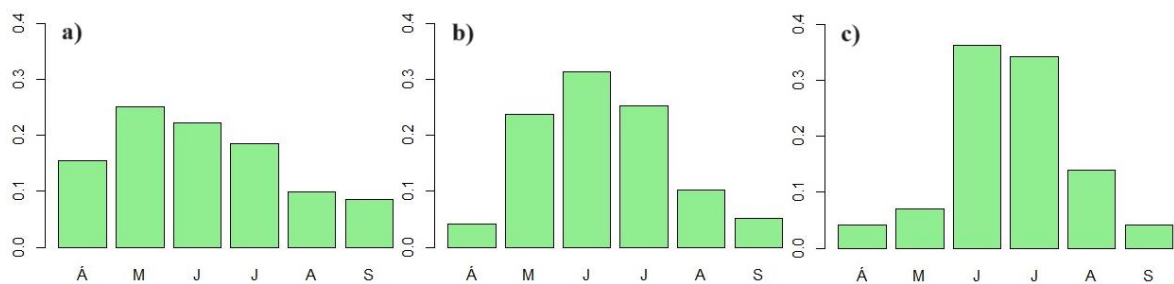
4.3.1. Jégbejelentésekkel kapcsolatos vizsgálatok

Először a jégbejelentések általános statisztikai vizsgálatával foglalkoztam három évre (2021–2023). Az éven belüli eloszlás esetén fontos előzetesen megjegyezni, hogy az adatok a védekezési időszakból állnak rendelkezésre, így áprilisban csak a hónap második feléből származnak jégesőről szóló jelentések. A maximum májusban van, ha minden jégészlelést figyelembe veszünk (12a. ábra), ellenben júniusban, ha csak a legalább cseresznye méretű jég szemeket nézzük (12b. ábra). A 2022-es évi aszályos időszak miatt ebben az évben a legalább cseresznye méretű jégjelentések döntő többsége májusból származik, júliusban és augusztusban pedig gyakorlatilag nem is volt (5. táblázat). Fontos megjegyezni, hogy a 2022. májusi esetek 90 százaléka is egy adott eseményhez kapcsolódik, május 25-én több szupercella vonult végig az ország déli részén. Hasonlóan 2021. júniusához, amikor szintén az összes esemény egy adott naphoz [4 – Kolláth és Csirmaz, 2021] kötődött.

5. táblázat: A jégbejelentések havi száma a 2021–2023-as időszakban a legalább cseresznye méretű jég szemekre.

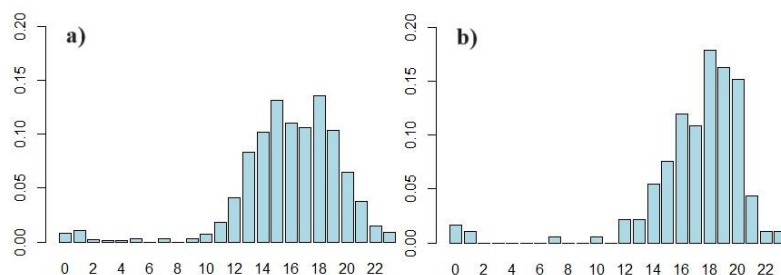
	<i>Á</i>	<i>M</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>A</i>	<i>S</i>
2021	4	4	39	25	10	0
2022	2	36	9	0	0	4
2023	2	6	13	24	10	6

Emiatt érdemes a másik két évet külön is megvizsgálni, a 2022-es adatok nélkül. Ekkor egyértelműen ebben a két, nyári hónapban (június és július) van a maximum (12c. ábra). Ez összhangban van *Taszarek et al.* (2020a) korábban bemutatott eredményeivel (3.1.1. *Térbeli és időbeli eloszlás*), akik olyan jégesőkkel számoltak, amelyek során legalább 2 cm átmérőjű jég szemek is előfordultak. Természetesen a vizsgált időszak rövidsége miatt nem lehet komolyabb következtetéseket levonni ebből.



12. ábra: Jégesők bejelentett időpontjának havi eloszlása relatív gyakoriság diagramon 2021–2023-ig minden méretű jégszemre (a), csak a legalább cseresznye nagyságúakra (b), a 2022-es év adatai nélkül, de szintén csak a legalább cseresznye méretűekre (c).

A napon belüli eloszlást tekintve szintén különbség van, ha minden méretű jégszemet tekintünk, és ha csak a legalább cseresznye méretűeket. Előbbi esetben a maximum helyi idő szerint 14 és 18 óra közé tehető (13a. ábra), míg utóbbi esetben egyértelműen 18 óra körül és kicsivel utána van (13b. ábra). Ahogy korábban láttuk, *Taszarek et al.* (2020a) 16 UTC (18 óra helyi idő szerint) körüli maximumot állapított meg (3.1.1. Térbeli és időbeli eloszlás).



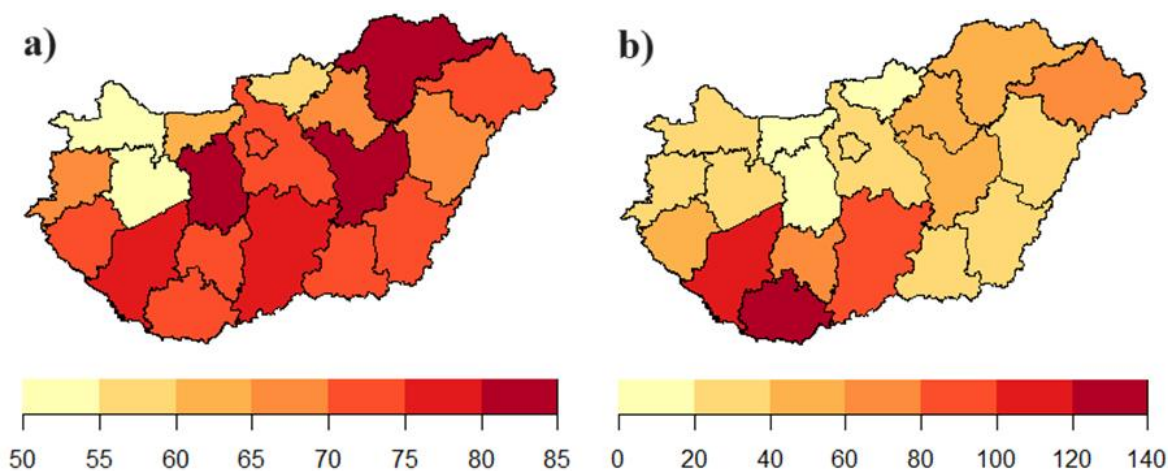
13. ábra: Jégesők bejelentett időpontjának napi eloszlása relatív gyakoriság diagramon 2021–2023 között minden méretű jégszemre (a), csak a legalább cseresznye nagyságúakra (b).

A generátorok bekapcsolása, ahogy említettem, a kiadott riasztás alapján történik, tehát az eredményeket megvizsgálhatjuk az előrejelzői oldal szemszögéből, azok bevalásának vizsgálatával. Ezt kétféle szempontból közelíthetjük meg. Az egyik, hogy a jégesők esetén hány esetben történt meg időben a generátorok bekapcsolása az adott járásban. A másik, hogy a riasztások kiadása (amelynek következménye a generátorok bekapcsolása) esetén hány esetben fordult elő valóban jégeső az adott járás környezetében.

Ahogy korábban is említettem, a jégkármentés célja nem a jégeső megszüntetése, hanem a jégszemek méretének a csökkentése. Azt ugyan nem tudhatjuk biztosan, hogy mekkora átmérőjű jégszemek érték volna el a talajt, ha nem működik a rendszer, de van értelme megvizsgálni, hogy az ezüst-jodid elég hamar a levegőbe került-e. Időben történt a bekapcsolás, ha a jégeső előtt legalább két órával megkezdődött az ezüst-jodid részecskék

kibocsátása, mivel ennyi idő alatt az esetek legnagyobb részében már ki tud alakulni a szükséges koncentráció (Horváth *et al.*, 2015).

Nézzük meg a korábban említett két szempont közül az elsőt. Górcső alá vettem, hogy a 2021–2023-as jégbejelentések esetében milyen beválással teljesült a korábban említett kétórás kritérium. Mivel az előrejelzés járási szinten történik, ezért így célszerű elvégezni a vizsgálatot, minden évre külön-külön, ám az adatok jobb átláthatóságát a megyei összesítés biztosítja. A három évre összesített eredmények megyei bontásban láthatók (14a. ábra). Természetesen a jégbejelentések száma egyáltalán nem homogén (14b. ábra), és nemcsak a jégesők térbeli eloszlásától függ, hanem a megye területétől és a jég bejelentését végző manuális generátorkezelők megyei számától is.



14. ábra: Időben történő bekapcsolások (minimum 2 órával jégesemény előtt) és jégbejelentések számának aránya [%] (a), valamint a jégbejelentések száma [db] (b) a 2021–2023-as időszakban.

Ugyan nem látszik az ábrán, de érdemes kiemelni, hogy a legalacsonyabb beválás 2022-ben volt, Hajdú-Bihar megyében, hétből csupán két esetben történt időben a bekapcsolás. Az alacsony esetszám mellett azonban az is árnyalja a képet, hogy csak az egyik kapcsolódott cseresznye méretű jég hulláshoz, ennél pedig öt perccel múlt a kétórás feltétel teljesülése, továbbá az ötből csak két esetben nem volt egyáltalán bekapcsolva a generátor az adott járásban.

Győr-Moson-Sopron és Veszprém megyében kaptuk a legalacsonyabb összesített értékeket (14a. ábra), így itt részletesen is megvizsgáltam, milyen körülmények jellemezték ezeket a helyzeteket (6. táblázat). A két megyében összesen 56 jégbejelentés történt a három év alatt (14b. ábra), ez viszonylag alacsony szám az 50-es megyei átlaghoz képest. Az 56-ból 29 esetben időben működtek a generátorok. A maradék 27 esetből egyszer a jégbejelentés olyan időpontra vonatkozott, amikor nem lehetett jégeső. A legtöbb esetben a jégészlelés időpontjában már működtek a generátorok, de csupán 40–120 perccel előtte kapcsolták be,

így a kétórás kritériumot nem teljesítette. További öt esetben a jégesemény időpontja előtt már kikapcsoltak a generátorok, de előtte még működtek, így ezekbe még juthatott mesterséges jégképző mag. Két esetben a szomszédos területek védve voltak, csak az adott járás nem. Nagyjából az esetek harmadában pedig egyáltalán nem történt bekapcsolás az adott napon. A már károkozónak tekinthető, cseresznye méretű jégesőket tekintve, az esetek felében be voltak kapcsolva a generátorok, csak késve, és szintén az esetek harmadában nem történt bekapcsolás. Összességében elmondható, hogy még a legalacsonyabb beválást mutató megyékben is csak kilenc esetben, az esetek 16 százalékában nem történt semmilyen (megfelelő vagy nem megfelelő időpontban végzett) beavatkozás.

6. táblázat: A Győr-Moson-Sopron és Veszprém megyei nem megfelelő bekapcsolások körülményei (2021–2023, járási szinten, jégméret alapján): be voltak kapcsolva, csak késve; a jégbejelentés előtti két órán belül még működtek; csak szomszéd járásban működtek az észlelés idejében; egyáltalán nem történt bekapcsolás.

<i>Méret</i>	<i>Késve be</i>	<i>Korán ki</i>	<i>Csak szomszéd járásban</i>	<i>Egyik sem</i>
<i>Búza</i>	4	2	0	3
<i>Borsó</i>	3	3	1	4
<i>Cseresznye</i>	3	0	1	2

Fontos megjegyezni, hogy mivel a jégbejelentések nagyon korlátozott számban állnak rendelkezésre, ezért ez a fajta vizsgálat csak annak számítását teszi lehetővé, hogy amikor jégeső volt, hány esetben volt bekapcsolás, és hány esetben nem. Viszont nem teszi lehetővé annak meghatározását, hogy hány esetben volt felesleges a bekapcsolás (azaz nem volt jégeső, mégis működtek a generátorok), és hány esetben nem történt bekapcsolás, amikor nem is volt szükség rá. A felesleges bekapcsolások számítása abban az esetben lenne lehetséges, ha minden olyan esetről kapnánk jelentést, amikor valahol jégeső hullott. Azonban ez nem lehetséges, ahogy arról a 2. *Módszerek* a jégeső környezeti jellemzőinek meghatározására részletesen szó esett. Emiatt fontos többek között a radaros jégdetektálás is, ugyanis amennyiben pontosan el tudjuk határolni, hogy melyik cella jéges és melyik nem, akkor kiszámítható a felesleges bekapcsolások száma is (2.4. *Radar* adatok felhasználási lehetőségei). Ami viszont ennél is fontosabb, hogy a jéges cellák radarokkal történő azonosítására és a jégesők méretének detektálására szükség van a heves jéges eseményekhez kapcsolódó veszélyek minél jobb előrejelzéséhez (Allen et al., 2019).

4.3.2. Radaros jégdetektálás és felhasználási lehetőségei

A radaros jégdetektálás hazánkban is nagyon aktuális kutatási terület. *Baár et al.* (2024) végezték el Magyarország területére a jégeső előrejelzés verifikációját. Az előrejelzés során négy kategóriát alkalmaznak a jégeső valószínűsége alapján. A generátorok bekapcsolása akkor történik, ha a jégeső valószínűsége meghaladja a 30 százalékot. Ezen belül 30–60% esetén narancssárga, 60% felett piros szín társul a jégeső riasztási térképen az adott járáshoz. A bevételek vizsgálatához a jégészlelések felhasználásával megalkottak egy összetett, radarproduktumokon alapuló kritériumrendszert a jeges és nem jeges cellák elkülönítésére. A kritériumokat a 0 °C-os izoterma magassága alapján határozták meg, elkülönítve tavaszi-őszi, köztes és nyári helyzetet (7. táblázat).

7. táblázat: A magyarországi jeges cella kritériumok az egyes légköri helyzetek esetén (*Baár et al.*, 2024). (H_0 – a 0 °C-os nedves hőmérséklet magassága [km]; $H_{45}-H_0$ – H_{45} és H_0 magasságkülönbsége [km])

<i>Légköri helyzet</i>	<i>H_0 magassága [m]</i>	<i>Feltétel</i>
<i>Nyári</i>	$H_0 > 3000$	$H_{45}-H_0 \text{ [km]} \geq 2,5535$
<i>Köztes</i>	$2500 < H_0 \leq 3000$	$H_{45}-H_0 \text{ [km]} > 1,458+0,0645 \cdot \text{VIL [kg/m}^2\text{]}$
<i>Tavaszi-őszi</i>	$H_0 \leq 2500$	$\text{VIL [kg/m}^2\text{]} > 21,8959-0,435 \cdot \text{CMax [dBZ]}$

Miután a radaros jeges feltétel alapján elkülönítették a jeges cellákat, megállapították, hogy a riasztások kiadása (amelynek következménye a generátorok bekapcsolása) esetén hány esetben teljesült a jeges cella feltétel az adott járás környezetében. A környezet definiálásánál akkora sugarú köröket alkalmaztak, amelyek a legnagyobb járásokat is lefedik. Ami a riasztások bevételeit illeti, a 2023-as évre vonatkozó vizsgálat során megállapították, hogy az esetek 83 százalékában teljesült a kétórás kritérium, ám jelentős a túl korai (több mint 4 órával a jeges esemény előtti) riasztás. Emellett értékelték azt is, hogy a riasztások levétele milyen gyakran késett el, ami azt jelenti, hogy az utolsó jeges cella kritérium teljesülése után egy órával még fenn voltak tartva a riasztások. Azt kapták, hogy az esetek közel 40 százalékában hamarabb is levehették volna a riasztást, viszont elhanyagolható volt azon esetszám, amikor túl korán történt a levétel, és később még teljesült a jeges cella kritérium. Összességében a riasztások bevételeinek hatékonysága narancssárga riasztás esetén 46,2%, piros riasztás esetén 71,7% volt 2023-ban (*Baár et al.*, 2024).

A radarproduktumok felhasználásával nemcsak jeges cella kritérium határozható meg, hanem annak a feltétele is megállapítható, hogy mikor okoz kárt a jegeső. A NAK által végzett számítások során a 0 °C-os izoterma magassága alapján meghatározták, hogy milyen radarproduktumok azonosítják a legjobban a kárt okozó jegesőket. Ennek során a jégkárral érintett területeken meghatározták a maximális értékeket, majd ezeket összehasonlították minden lehetséges paraméterpárossal, és kiválasztották a leginkább megfelelőt (8. táblázat).

8. táblázat: A magyarországi kárt okozó jegesők kritériumai az egyes légköri helyzetek esetén a 0 °C-os izoterma magassága szerint. A lefedett terület azt fejezi ki, hogy a jégkárral érintett területek esetén a jellemző körülmények mekkora részét sikerült a kritériumok segítségével lefedni.

<i>H0 magassága [m]</i>	<i>Jégkár feltétele</i>	<i>Lefedett terület [%]</i>
$H0 \leq 2500$	CMax [dBZ] ≥ 50	99
$2500 < H0 \leq 3000$	CMax [dBZ] ≥ 50 vagy H45-H0 [km] ≥ 3	98
$3000 < H0 \leq 3500$	CMax [dBZ] ≥ 50 és H45- H0 [km] ≥ 3	99,5
$3500 < H0 \leq 4000$	CMax [dBZ] ≥ 50 és H45- H0 [km] ≥ 3	98,5
$H0 > 4000$	CMax [dBZ] ≥ 50 és H45- H0 [km] ≥ 3	98,8

Végezetül, ami a jégkarmérséklés hatéves védekezés során elért tényleges eredményeit illeti, szintén a NAK készített statisztikát (Szobonya & Kocsis – személyes konz.). Ez alapján az elmúlt hat év (2018–2023) adatai azt mutatják, hogy a megelőző időszakhoz (2015–2017) képest mind a bejelentett jégkár területi kiterjedése, mind az összes káreseményen belüli jégkárarány csökkent. Előbbi csaknem felére, utóbbi pedig majdnem a harmadára esett vissza, miközben a zivataros napok átlagos éves számában nem volt jelentős különbség a két időszakban.

Összefoglalás

A szakdolgozatban részletes képet adtam az időjárás-módosító tevékenységek fejlődéséről, és hogy miért fulladt kudarcba nagyon sokáig a kísérletek jelentős része. A jégeső detektálásának különböző módszerei segítségével rávilágítottam az előrejelzés nehézségére. A bonyodalom egyrészt abban rejlik, hogy már azt is nehéz megállapítani, hogy a múltban milyen volt a jégesők pontos tér- és időbeli eloszlása, másrészt a körülmények rendkívül sokféle együttese vezethet jégesőhöz, és még ma sem ismert pontos kritérium, ami ezeket meghatározná. A jégkarmérséklésre alkalmazott három alapvető módszer (repülőgépes, rakétás, talajgenerátoros) előnyeinek és hátrányainak ismertetése mellett bemutattam a felhasználásukkal kapcsolatos legfontosabb, a világ különböző pontjain zajló projekteket, és az elért eredményeket. Az eredmények értékelésénél a leggyakrabban felmerülő problémának a szubjektivitás bizonyult. Ezután részletesen áttekintettem az Országos Jégkarmérséklő Rendszer kialakulásához vezető lépéseket, valamint azt, hogy hogyan is zajlik a működtetés a védekezési időszakban. Az országos hálózat létrehozását megelőzően a hatékonyságot objektívan is megvizsgálták a mesterséges jégképző magok terjedésének modellezésével.

A jégbejelentésekkel kapcsolatban fontos tanulság volt, hogy az emberek által közölt információk feldolgozása nem egyszerű feladat a szubjektivitás miatt, amely óhatatlanul pontatlanságot eredményez. Példaként tekintve a jégészlelés nagyvonalú időbeli behatárolása jelentősen megnehezíti annak automatikus megállapítását, hogy melyik zivatarcella okozta a jégesőt, ami egy lehetséges jövőbeli cél. A jégészlelések esetén érdemes lehet az időszak és a darabszám bővítése egyéb források, például az ESWD adatok felhasználásával. A bevételekkel kapcsolatos vizsgálatok során három év adatainak felhasználásával megállapítottam, hogy a kialakuló jégesők több mint 70 százaléka esetén a jég hullását az ezüst-jodid részecskék időben történő kijuttatása előzte meg, így a méret csökkentése minden ilyen esetben bekövetkezhetett. A legrosszabb bevételek mutató megyék esetén pedig azt kaptam, hogy csak az esetek 16 százalékában nem történt semmiféle beavatkozás (akár késve is), így a többi megyében ez feltehetően még alacsonyabb volt.

A radaros jégdetektálás jövőbeli irányát tekintve a duál-polarizációs radarok produktumai, és az ezekkel kapcsolatos jéges cella azonosítás egy lehetséges irány. További lehetőség a hazánkban legnagyobb méretű jegeket okozó szupercellák vizsgálata, valamint a jégkarmérséklés hatékonyságnak vizsgálata ezek esetén. Különösen problémát jelentenek abban az esetben, amikor határon túlról érkeznek.

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt szeretném megköszönni Kocsis Áronnak és Szobonya Nikolettának, hogy biztosítottak számomra minden, a JÉGER-rel kapcsolatos adatot, amire a rendszer teljeskörű megismeréséhez és a vizsgálatok elvégzéséhez szükségem volt. Köszönöm továbbá a rendszer működésével kapcsolatos részletes magyarázatokat, amik nélkülözhetetlenek voltak a kezdeti lépések megtételéhez, valamint a gyakori konzultációkat is. Nikinek további köszönet a sok-sok egyeztetésért és a számtalan, témával kapcsolatos forrás, cikk elküldéséért. Köszönöm szépen dr. Breuer Hajnalkának a szakmai inspirációt és pontosságot, valamint azt, hogy még a lelegehetlenebb pillanatokban is azonnal, lényegre törően válaszolt a felmerülő legapróbb kérdéseimre is. Köszönöm emellett azt is, hogy a rendszeres konzultációkkal fenntartotta a motivációm, hogy megfelelő tempóban haladjak. Köszönöm a családomnak és a barátaimnak, hogy különféle, akár láthatatlan módokon járultak hozzá a dolgozat sikeres elkészültéhez.

Irodalomjegyzék

- Abshaev, M. T., Abshaev, A. M., & Malkarova, A. M., 2022, May: Results of 65-Years Project of Hail Suppression in Russian Federation. In International Scientific Conference "Problems of Atmospheric Physics, Climatology and Environmental Monitoring" (pp. 1–28). Cham: Springer International Publishing.
- Akhmedovic, I. S., 2014: The Mechanism of Hail Formation and a Method to Prevent It. *Physical Chemistry* 4(2), 21–29. 10.5923/j.pc.20140402.01
- Allen, J. T., Giammanco, I. M., Kumjian, M. R., Jurgen Punge, H., Zhang, Q., Groenemeijer, P., ... & Ortega, K., 2020: Understanding hail in the earth system. *Reviews of Geophysics*, 58(1), e2019RG000665. <https://doi.org/10.1029/2019RG000665>
- Amburn, S. A., & Wolf, P. L., 1997: VIL density as a hail indicator. *Weather and forecasting* 12(3), 473–478. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1997\)012<0473:VDAHI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1997)012<0473:VDAHI>2.0.CO;2)
- American Society of Civil Engineers, 2003: Standard Practice for the Design and Operation of Hail Suppression Projects. *American Society of Civil Engineers*, Reston, Virginia 59 p. <https://doi.org/10.1061/9780784406519>
- American Society of Civil Engineers, 2015: Guidelines for Operational Hail Suppression Programs. *American Society of Civil Engineers*, Reston, Virginia 51 p. <https://doi.org/10.1061/9780784413562>
- American Society of Civil Engineers, 2024: Guidelines for Operational Hail Suppression Programs. *American Society of Civil Engineers*, Reston, Virginia 59 p. <https://doi.org/10.1061/9780784416129>
- Auer Jr, A. H. 1994: Hail recognition through the combined use of radar reflectivity and cloud-top temperatures. *Monthly weather review* 122(9), 2218–2221. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<2218:HRTTCU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<2218:HRTTCU>2.0.CO;2)
- Bádr, P., Csirmaz, K., Kelemen, T., 2024: A jégeső előrejelzés verifikációja. *Légekör: az Országos Meteorológiai Intézet szakmai tájékoztatója* 69(1), 41–47.
- Bacsó, N., 1939: *Kísérletek az időjárás és az éghajlat irányítására*. Kis Akadémia, Budapest, 40 p.
- Balasch, S., Romero, R., & Ferrer, A. 2004: A logistic regression model applied to evaluate the influence of operating time of AgI ground acetonic generators on the size and hardness of hail. *Natural Hazard*, 32, 345–355. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000035546.55306.6b>
- Battaglioli, F., Groenemeijer, P., Púčik, T., Taszarek, M., Ulbrich, U., & Rust, H., 2023: Modeled Multidecadal Trends of Lightning and (Very) Large Hail in Europe and North America (1950–2021). *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 62(11), 1627–1653. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0195.1>
- Bedka, K. M., 2011: Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI Infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe. *Atmospheric Research* 99(2), 175–189. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.001>
- Bruintjes, R. T., 1999: A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80(5), 805–820. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0805:AROCSE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0805:AROCSE>2.0.CO;2)
- Causapé, J., Pey, J., Orellana-Macías, J. M., & Reyes, J., 2021a: Influence of hail suppression systems over silver content in the environment in Aragón (Spain). I: Rainfall and soils. *Science of the Total Environment* 784, 147220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147220>
- Causapé, J., Orellana-Macías, J. M., Valero-Garcés, B., & Vázquez, I., 2021b: Influence of hail suppression systems over silver content in the environment in Aragón (Spain). II: Water,

- sediments and biota. *Science of the Total Environment*, 779, 146403. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146403>
- Changnon Jr, S. A., 1977: On the status of hail suppression. *Bulletin of the American Meteorological Society* 58(1), 20–28. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1977\)058<0020:OTSOHS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1977)058<0020:OTSOHS>2.0.CO;2)
- Changnon, S. A., Changnon, D., & Hilberg, S. D., 2009: Hailstorms across the nation: An atlas about hail and its damages. ISWS Contract Report CR-2009-12.
- Dejanovic, T., Trbić, G., & Popov, T., 2019: Hail as a natural disaster in Bosnia and Herzegovina. *Climate Change Adaptation in Eastern Europe: Managing Risks and Building Resilience to Climate Change*, 245–266. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03383-5_17
- Dennis, A. S., & Brown, B. G., 1981: Variations in rainfall and insured crop-hail losses associated with operational cloud seeding in South Dakota. *The Journal of Weather Modification* 13(1), 150–160. <https://doi.org/10.54782/jwm.v13i1.46>
- Dessens, J., 1986: Hail in southwestern France. II: Results of a 30-year hail prevention project with silver iodide seeding from the ground. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 25(1), 48–58. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025<0048:HISFIR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<0048:HISFIR>2.0.CO;2)
- Dessens, J., 1998: A physical evaluation of a hail suppression project with silver iodide ground burners in southwestern France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 37(12), 1588–1599. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1998\)037<1588:APEOAH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1998)037<1588:APEOAH>2.0.CO;2)
- Dessens, J., Berthet, C., & Sanchez, J. L., 2006: A sensitivity test for hail prevention assessment with hailpad measurements. *The Journal of Weather Modification* 38(1), 44–50. <https://doi.org/10.54782/jwm.v38i1.213>
- Dessens, J., Sánchez, J. L., Berthet, C., Hermida, L., & Merino, A., 2016: Hail prevention by ground-based silver iodide generators: Results of historical and modern field projects. *Atmospheric Research* 170, 98–111. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.11.008>
- Elbing, F., Möller, D., & Ulbricht, M., 2001: Fog dissipation by dry ice blasting: technology and applications. In Proc. 2nd Int. Conf. On Fog and Fog Coll., St. John's, Canada, pp. 485–488.
- Farkas és Faragó, 1900: Reklám Farkas és Faragó viharagyú szabadalmáról az Időjárás c. folyóiratban. *Időjárás* 4(4), 96.
- Federer, B., 1977: Methods and results of hail suppression in Europe and in the USSR. *Meteorological Monographs* 16(38), 215–223.
- Fleming, J. R., 2006: The pathological history of weather and climate modification: Three cycles of promise and hype. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 37(1), 3–25. <https://doi.org/10.1525/hsps.2006.37.1.3>
- Fluck, E., Kunz, M., Geissbuehler, P., & Ritz, S. P., 2021 Radar-based assessment of hail frequency in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21(2), 683–701. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-683-2021>
- Gavrilov, M. B., Lazić, L., Pešić, A., Milutinović, M., Marković, D., Stanković, A., & Gavrilov, M. M., 2010: Influence of hail suppression on the hail trend in Serbia. *Physical geography* 31(5), 441–454. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.31.5.441>
- Gavrilov, M. B., Marković, S. B., Zorn, M., Komac, B., Lukić, T., Milošević, M., & Janičević, S., 2013: Is hail suppression useful in Serbia?—General review and new results. *Acta geographica Slovenica* 53(1), 165–179. <https://doi.org/10.3986/AGS53302>
- Geresdi, I., 1997: Időjárás-módosítás. In: Csapadék kialakulása a légkörben. Janus Pannonius Tudományegyetem, Pécs, 32–38.
- Geresdi, I., 2007: *A légköri konvekció*. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 18–20.

- Gilbert, D. B., Boe, B. A., & Krauss, T. W., 2016: Twenty seasons of airborne hail suppression in Alberta, Canada. *J. Wea. Modif* 48, 68–92. <https://doi.org/10.54782/jwm.v48i1.551>
- Greene, D. R., & Clark, R. A., 1972: Vertically integrated liquid water—A new analysis tool. *Monthly Weather Review* 100(7), 548–552. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0548:VILWNA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0548:VILWNA>2.3.CO;2)
- Görög, H., Rovó, A., 1938: Kísérlet mesterséges eső előállítására. *Időjárás* 42(1–2), 2–9.
- Héjas, E., 1898: *A zivatarok Magyarországon az 1871-től 1895-ig terjedő megfigyelések alapján*. Királyi Magyar Természettudományi Társulat, Budapest, 174 p.
- Heymsfield, A., Szakáll, M., Jost, A., Giammanco, I., & Wright, R., 2018: A comprehensive observational study of graupel and hail terminal velocity, mass flux, and kinetic energy. *Journal of the Atmospheric Sciences* 75(11), 3861–3885. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-18-0035.1>
- Holleman, I. 2001: Hail detection using single-polarization radar (p. 70). De Bilt, The Netherlands: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- Horváth, Á., 2007: *A légköri konvekció*. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 4–17.
- Horváth, Á., Nagy, A., Geresdi, I., 2015: A jégeső-elhárítási módszerek hatékonyságának objektív vizsgálata. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, belső anyag, 22 p.
- Horváth, Á., & Breuer, H., 2023: A víz körforgalma a légkörben és a 2022-es rendkívüli aszály meteorológiai háttere. *Légkör: az Országos Meteorológiai Intézet szakmai tájékoztatója* 68(1), 2–8.
- Hu, X., Huang, H., Xiao, H., Cui, Y., Lv, F., Zhao, L., & Ji, X., 2022: Microphysical characteristics of precipitating stratiform clouds in north China revealed by joint observations of an aircraft and a polarimetric radar. *Journal of the Atmospheric Sciences* 79(11), 2799–2811. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-21-0248.1>
- Hulton, F., & Schultz, D. M., 2024: Climatology of large hail in Europe: characteristics of the European Severe Weather Database. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 24(4), 1079–1098. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-1079-2024>
- Istrate, V., Ursu, A., Dobri, R. V., Axinte, A. D., & Stoica, D., 2019: Hail suppression system in Romania and its relation with land cover. In SGEM 2019 Conference Proceedings (Vol. 19, pp. 871–878). <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3455697>
- Knight, C. A., & Knight, N. C., 2005: Very large hailstones from Aurora, Nebraska. *Bulletin of the American Meteorological Society* 86(12), 1773–1782. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-12-1773>
- Knight, C., Knight, N., Brooks, H.E., 2015: Hail and Hailstorms, Mesoscale Meteorology (Szerk.: North, G.R., Pyle, J., Zhang, F.) *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (Second Edition), Academic Press, 2015, pp. 334–338
- Kolios, S., 2023: Hail detection from meteosat satellite imagery using a deep learning neural network and a new remote sensing index. *Advances in Space Research* 72(8), 3009–3021. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.06.016>
- Krauss, T. W., Brintjes, R. T., & Martinez, H., 2000: A new hail suppression project using aircraft seeding in Argentina. *The Journal of Weather Modification* 32(1), 73–80. <https://doi.org/10.54782/jwm.v32i1.466>
- Kumjian, M. R., 2013: Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part I: Description of the polarimetric radar variables. *J. Operational Meteor.*, 1 (19), 226–242. <http://dx.doi.org/10.15191/nwajom.2013.0119>
- Kumjian, M. R., Lombardo, K., & Loeffler, S., 2021: The evolution of hail production in simulated supercell storms. *Journal of the Atmospheric Sciences* 78(11), 3417–3440. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-21-0034.1>

- Kunz, M., & Kugel, P. I. 2015: Detection of hail signatures from single-polarization C-band radar reflectivity. *Atmospheric Research* 153, 565–577. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.09.010>
- Li, H., Dai, Y., Wang, H., & Cui, J., 2017: Artificial seeding effects of convective clouds on the opening day of Beijing 2008 summer olympics. *Journal of Geoscience and Environment Protection* 5(4), 118–138. 10.4236/gep.2017.54010
- Markowski, P., & Richardson, Y., 2010: *Mesoscale meteorology in midlatitudes*. Wiley-Blackwell, Penn State University, University Park, PA, USA, 407 p.
- Mesinger, F., & Mesinger, N., 1992: Has hail suppression in eastern Yugoslavia led to a reduction in the frequency of hail? *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 31(1), 104–111. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1992\)031<0104:HHSIEY>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1992)031<0104:HHSIEY>2.0.CO;2)
- Nemzeti Agrárgazdasági Kamara, 2020: Az országos hatókörű, talajgenerátoros technológiájú jégkármentesítő rendszer (JÉGER) által okozott környezeti terhelés felmérése, modellezése a Kelet-Magyarországi, Közép-Magyarországi, Észak-Dunántúli és a Dél-Dunántúli régióban. Nemzeti Agrárgazdasági Kamara, Budapest, belső anyag, 135 p.
- Nelson, S. P., 1983: The influence of storm flow structure on hail growth. *Journal of Atmospheric Sciences* 40(8), 1965–1983. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1983\)040<1965:TIOFSFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040<1965:TIOFSFS>2.0.CO;2)
- Nixon, C. J., Allen, J. T., & Taszarek, M., 2023: Hodographs and skew T s of hail-producing storms. *Weather and Forecasting* 38(11), 2217–2236. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-23-0031.1>
- Petit, S., Castel, T., Henrion, G., Richard, Y., Traore, M., Vergote, M. H., & Young, J., 2023: Changing local climate patterns through hail suppression systems: conflict and inequalities between farmers and wine producers in the Burgundy Region (France). *Regional Environmental Change* 23(3), 89. <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02076-5>
- Pilguy, N., Taszarek, M., Allen, J. T., & Hoogewind, K. A., 2022: Are trends in convective parameters over the United States and Europe consistent between reanalyses and observations? *Journal of Climate* 35(12), 3605–3626. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0135.1>
- Pilorz, W., Zięba, M., Szturc, J., & Łupikasza, E. 2022: Large hail detection using radar-based VIL calibrated with isotherms from the ERA5 reanalysis. *Atmospheric Research* 274, 106185. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106185>
- Púčik, T., Castellano, C., Groenemeijer, P., Kühne, T., Rädler, A. T., Antonescu, B., & Faust, E., 2019: Large hail incidence and its economic and societal impacts across Europe. *Monthly Weather Review* 147(11), 3901–3916. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0204.1>
- Raum, O., 1915: A Magyarországon észlelt 15 évi zivatarmegfigyelések eredményei az 1896–1910. időszakban. *Időjárás* 19(9), 161–172.
- Raupach, T. H., Soderholm, J. S., Warren, R. A., & Sherwood, S. C., 2023: Changes in hail hazard across Australia: 1979–2021. *npj Climate and Atmospheric Science* 6(1), 143. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00454-8>
- Rudolph, R. C., Sackiw, C. M., & Riely, G. T., 1994: Statistical evaluation of the 1984–88 seeding experiment in northern Greece. *The Journal of Weather Modification* 26(1), 53–60. <https://doi.org/10.54782/jwm.v26i1.291>
- Sánchez, J. L., Dessens, J., Marcos, J. L., & Fernández, J. T., 1999: Comparison of rainwater silver concentrations from seeded and non-seeded days in Leon (Spain). *The Journal of Weather Modification* 31(1), 87–90. <https://doi.org/10.54782/jwm.v31i1.251>
- Schaefer, V. J., 1968: The early history of weather modification. *Bulletin of the American Meteorological Society* 49(4), 337–342. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-49.4.337>
- Schmid, P., 1967, January: On "Grossversuch III", a randomized hail suppression experiment in Switzerland. In *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and*

- Probability, Volume 5: Weather Modification (Vol. 5, pp. 141–160). University of California Press.
- She, Y., Chen, L., & Zhang, Y., 2019, December: Design of the artificial operation directing-system based on weather radar and antiaircraft-gun & rocket for hail suppression. In 2019 International Conference on Meteorology Observations (ICMO) (pp. 1–4). IEEE. 10.1109/ICMO49322.2019.9026038
- Simeonov, P., 1996: An overview of crop hail damage and evaluation of hail suppression efficiency in Bulgaria. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 35(9), 1574–1581. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<1574:AOOCHD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<1574:AOOCHD>2.0.CO;2)
- Simon, M., McDonald, J., & Brent, K., 2023: Transboundary Implications of China's Weather Modification Programme. *Transnational Environmental Law* 12(3), 594–622. <https://doi.org/10.1017/S2047102523000146>
- Skripniková, K., & Řezáčová, D. 2014: Radar-based hail detection. *Atmospheric Research* 144, 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.06.002>
- Smith, P. L., Orville, H. D., Boe, B. A., & Stith, J. L., 1992: A status report on weather modification research in the Dakotas. *Atmospheric research* 28(3–4), 271–298. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(92\)90013-Z](https://doi.org/10.1016/0169-8095(92)90013-Z)
- Smith, P. L., Johnson, L. R., Priegnitz, D. L., Boe, B. A., & Mielke, P. W., 1997: An exploratory analysis of crop hail insurance data for evidence of cloud seeding effects in North Dakota. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 36(5), 463–473. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036<0463:AEAOCH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036<0463:AEAOCH>2.0.CO;2)
- Spence, C. C., 1961: A Brief History of Pluviculture. *The Pacific Northwest Quarterly* 52(4), 129–138. <https://www.jstor.org/stable/40487683>
- Székely Cs., és Zoltán Cs., 1984: A jégesőindikátor és felhasználásának lehetőségei. *Időjárás* 88, 32–45.
- Stržinar, G., & Skok, G., 2018: Comparison and optimization of radar-based hail detection algorithms in Slovenia. *Atmospheric research* 203, 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.01.005>
- Taszarek, M., Allen, J. T., Groenemeijer, P., Edwards, R., Brooks, H. E., Chmielewski, V., & Enno, S. E., 2020a: Severe convective storms across Europe and the United States. Part I: Climatology of lightning, large hail, severe wind, and tornadoes. *Journal of Climate* 33(23), 10239–10261. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0345.1>
- Taszarek, M., Allen, J. T., Púčik, T., Hoogewind, K. A., & Brooks, H. E., 2020b: Severe convective storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes. *Journal of Climate* 33(23), 10263–10286. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0346.1>
- Taszarek, M., Allen, J. T., Brooks, H. E., Pilguy, N., & Czernecki, B., 2021: Differing trends in United States and European severe thunderstorm environments in a warming climate. *Bulletin of the American Meteorological society* 102(2), E296–E322. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0004.1>
- Torralba, V., Hénin, R., Cantelli, A., Scoccimarro, E., Materia, S., Manzato, A., & Gualdi, S., 2023: Modelling hail hazard over Italy with ERA5 large-scale variables. *Weather and Climate Extremes* 39, 100535. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100535>
- Waldvogel, A., Federer, B., & Grimm, P., 1979: Criteria for the detection of hail cells. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 18(12), 1521–1525. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<1521:CFTDOH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<1521:CFTDOH>2.0.CO;2)
- Warren, R. A., Richter, H., & Thompson, R. L., 2021: Spectrum of near-storm environments for significant severe right-moving supercells in the contiguous United States. *Monthly Weather Review* 149(10), 3299–3323. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0006.1>

- Williams, B. D., & Denhom, J. A., 2009: An assessment of the environmental toxicity of silver iodide with reference to a cloud seeding trial in the snowy mountains of Australia. *The Journal of Weather Modification* 41(1), 75–96. <https://doi.org/10.54782/jwm.v41i1.178>
- Wirth, E., 1984: Jégesőelhárítás Magyarországon. *Időjárás* 88(2), 57–85.
- Witt, A., Eilts, M. D., Stumpf, G. J., Johnson, J. T., Mitchell, E. D. W., & Thomas, K. W. 1998: An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting* 13(2), 286–303. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0286:AEHDAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0286:AEHDAF>2.0.CO;2)
- Zhou, Z., Zhang, Q., Allen, J. T., Ni, X., & Ng, C. P., 2021: How many types of severe hailstorm environments are there globally? *Geophysical Research Letters* 48(23), <https://doi.org/10.1029/2021GL095485>

Internetes hivatkozások:

- [1 – szupercella.hu - A konvekció alapjai II.]
- [2 – met.hu - Meteorológiai kis-szótár] https://www.met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_alapismeretek/meteorologiai_szotar/ (utoljára megnyitva: 2024.04.22.)
- [3 – szupercella.hu - Túlnyúló csúcs] <https://www.szupercella.hu/kislexikon/tulnyulo-csucs> (utoljára megnyitva: 2024.04.08.)
- [4 – Kolláth és Csirmaz, 2021] https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekesssegek_tanulmanyok/index.php?id=3137&hir=Szupercellak_es_extrem_meretu_jeg_2021._junius_25-en (utoljára megnyitva: 2024.04.08.)
- [5 – met.hu - Radar ismertető] https://www.met.hu/ismerteto/radar_ismerteto.pdf (utoljára megnyitva: 2024.05.17.)
- [6 – essl.org - Vision, Mission, and Strategy of ESSL] <https://www.essl.org/cms/vision-mission-and-strategy-of-essl/> (utoljára megnyitva: 2024.04.25.)
- [7 – essl.org - News] <https://www.essl.org/cms/hail-record-broken-again-19cm-hailstone-confirmed-in-italy/> (utoljára megnyitva: 2024.04.25.)
- [8 – uaerep.ae] <https://www.uaerep.ae/> (utoljára megnyitva: 2024.05.18.)
- [9 – zmescience.com] <https://www.zmescience.com/feature-post/natural-sciences/climate-and-weather/weather-and-atmosphere/cloud-seeding-22042022/> (utoljára megnyitva: 2024.04.21.)
- [10 – nefela.hu – A jégeső-elhárítás] <https://www.nefela.hu/index.php?fid=3> (utoljára megnyitva: 2024.04.29.)
- [11 – nawmc.org] <http://www.nawmc.org/cloudseeding/seeding.html> (utoljára megnyitva: 2024.05.06.)
- [12 – nefela.hu - Az egyesülésről] <https://www.nefela.hu/index.php?fid=1> (utoljára megnyitva: 2024.04.29.)
- [13 – nefela.hu – A jégeső-elhárítás hatékonysága] <https://www.nefela.hu/index.php?fid=4> (utoljára megnyitva: 2024.04.29.)
- [14 – nefela.hu – Országos jégeső-elhárítás] <https://www.nefela.hu/index.php?fid=18> (utoljára megnyitva: 2024.04.29.)
- [15 – maszol.ro] <https://maszol.ro/gazdasag/A-jegeso-elharito-rendszer-leallitasat-kovetelik-a-gazdak> (utoljára megnyitva: 2024.05.08.)