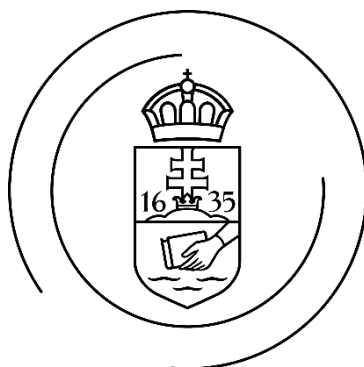


Jégbejelentések és jégkárok vizsgálatának automatizálása radarproduktumok segítségével

TDK DOLGOZAT



Készítette:

Dóka Imre Péter
Meteorológus mesterszak

Témavezetők:

Szobonya Nikoletta, Kocsis Áron
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
2. Szakirodalmi áttekintés.....	4
2.1. Konvektív időjárási jelenségek	4
2.2. A jégeső keletkezésének mikrofizikája	5
2.3. A jégesők térbeli és időbeli eloszlása	6
2.4. Jégbejelentések és jégkárok Magyarországon.....	8
2.5. Módszerek a jégeső környezeti jellemzőinek meghatározására	10
2.5.1. Radar adatok felhasználási lehetőségei.....	11
3. Anyag és módszer	14
3.1. Felhasznált adatbázisok.....	14
3.2. Jégbejelentések vizsgálata	15
3.2.1. Szomszédsági koncepció.....	16
3.2.2. Radarproduktumok számítása.....	17
3.3. Jégkárbjelentések vizsgálata.....	21
4. Eredmények.....	23
4.1. Jégbejelentések statisztikai vizsgálata.....	23
4.2. Jégbejelentések vizsgálatának automatizálása	25
4.3. Jégesők környezeti jellemzői radarproduktumok alapján.....	27
4.4. Jégkárok környezeti jellemzői radarproduktumok alapján	33
Összefoglalás.....	38
Köszönetnyilvánítás	39
Irodalomjegyzék	40
Függelék – saját eredmények	43

1. Bevezetés

A jégeső kialakulásának megértése a Föld időjárási rendszerében nem egyszerű feladat (Allen *et al.*, 2019), és egészen a múlt század közepéig nem is történt ebben jelentős előrelépés. A jégesők komoly károkat okoznak a mezőgazdaságban világszerte (Changnon *et al.*, 2009; Púčik *et al.*, 2019) és hazánkban is évszázadok óta (Wirth *et al.*, 1985), így kutatásuk manapság is nagyon fontos. A JÉGER (Országos Jégkarmérséklő Rendszer) 2018 óta működik hazánkban, melynek célja a jég szemek méretének csökkentésével mérsékelni az okozott károkat. Tehát jégesők továbbra előfordulnak, az ezekről, valamint a jégkárokról szóló bejelentéseket is a JÉGER kapja meg.

Kiindulási célom a jégesőket kísérő villámtevékenység vizsgálata volt, azonban felmerült az a probléma, hogy a rendelkezésemre álló jégbejelentések időpontja meglehetősen pontatlan volt, a jégkárokhöz pedig csupán a káresemény napja állt rendelkezésemre. Emiatt első lépésként a jégbejelentések és jégkárbejelentések vizsgálatának automatizálását tűztem ki célul. Az ehhez vezető úton először áttekintettem a jégesők keletkezését. A zivatarfelhőknek számos megjelenési formája létezik (Markowski és Richardson, 2010), de közös tulajdonságuk, hogy bennük jégreszcscék keletkeznek, hiszen ezek nélkül az elektromos kisülések sem jöhetnének létre (Geresdi, 2007). A jégesőknek jól meghatározott évi és napi menete van Európában (Taszarek *et al.*, 2020a), amelyet Magyarországon már a 20. században is kimutattak (Wirth *et al.*, 1985). Elsőként én is elkészítettem ezeket a statisztikákat a 2019–2024-es időszakra.

A jégesők észlelésére az emberek által végzett megfigyeléseken túl különböző módszerek léteznek. Ezek végső célja közös, a jégeső, valamint a jég szemek méretének minél pontosabb előrejelzése (Allen *et al.*, 2019). A vizsgálatom során ezek közül radarméréseken alapuló jégdetektálást alkalmaztam. A kutatáshoz szükséges programot R programnyelv segítségével írtam meg, amely különböző radarproduktumokat számol ki a jégeső és a jégkár helyszínének ismeretében. A program használatára azért volt szükség, mert nagy számú jégbejelentésről és jégkárbejelentésről van szó, utóbbi száma csak a 2024-es évre meghaladja a tízezret.

Dolgozatom célja bemutatni a jégbejelentések statisztikai vizsgálatának eredményeit, valamint minél részletesebb képet adni a kutatásom során használt program működéséről és a kapott eredményekről. Ezek felhasználásával pedig megállapítani, hogy mikor lehetett pontosan a jégeső, milyen radarproduktumok jellemezték a jégesők és jégkárok környezetét, továbbá becslést adni, hogy valóban jégeső okozhatta-e az adott jégkárbejelentést.

2. Szakirodalmi áttekintés

Mielőtt rátérnék a jégbejelentések és jégkárok elemzésére, fontos áttekinteni a jégesős helyzetek kialakulásának meteorológiai hátterét.

2.1. Konvektív időjárási jelenségek

A konvektív időjárási folyamatok a Kárpát-medence időjárásának fontos meghatározói. A konvektív elnevezés az intenzív, függőlegesen felfelé irányuló mozgásra utal. A konvektív folyamatokat indító feláramlás létrejöttének különböző okai lehetnek. Az egyik a napsugárzás hatására 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 légköri nedvességből kondenzáció során hő szabadul fel, és a légréteg további melegedéséhez vezet a telítettség elérése után, amely erősíti a feláramlást. 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 felhőzet kialakulásához elengedhetetlen a nedvesség jelenléte, ekkor nedves konvekcióról beszélünk (*Horváth, 2007*). Ilyenkor a levegő emelkedése során telítetté válik, kondenzálódik, majd a pozitív felhajtóerő hatására nagy magasságokba is elérhet. A nedves konvekció eredménye lehet a zivatarok kialakulása, melyek heves kísérőjelenségei (például a jégeső) jelentős anyagi károkat és személyi sérüléseket idézhetnek elő. Ezek előrejelzése viszont nem egyszerű, a szinoptikus helyzet pontos ismerete nélkülözhetetlen hozzá (*Markowski és Richardson, 2010*). A nedves konvekció esetén fontos továbbá a szélnyírás szerepe is, amely a feláramlás erősítésére szolgál megfelelő körülmények között, nem pedig annak megindítására. (*Horváth, 2007*)

A felhajtóerő forrásától és az azt elindító kényszertől függően a konvekciónak rendkívül változatos megjelenési formái vannak, méret- és időskálát tekintve is. Ezek alapvetően két típusba sorolhatók. Izolált konvekció esetén leginkább a helyi hatások a meghatározóak, míg mezoléptékű konvektív rendszereknél vagy valamilyen kevésbé lokális kényszer a meghatározó, vagy az elszigetelt cellák kiáramlásainak egyesülése a kiindulási folyamat. (*Markowski és Richardson, 2010*)

Az izolált konvekció megjelenési formái közé tartoznak a termikek és az egycellás zivatarok, amelyek tipikusan a besugárzás hatására, ún. jellegtelen nyomási mezőben jönnek létre. Károkozó jégeső ritkán kíséri őket, ha mégis, akkor leginkább az érettből a leépülő fázisba

való átmenet során (Horváth, 2007; Markowski és Richardson, 2010). Közepes földrajzi szélességeken a konvekció leggyakoribb megjelenési formái a multicellás zivatarok, melyeket már gyakran kísér nagy méretű jég (Markowski és Richardson, 2010). Hazánkban előfordulnak a szélnyírás segítette szupercellák is, amelyek esetén egyetlen, hosszú élettartamú celláról van szó (Horváth, 2007). 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.

A mezoléptékű konvektív rendszereknek (MKR) is gyakori kísérőjelensége a jégeső. Ide tartoznak a Magyarországon is gyakran előforduló zivatarláncok (squall line) és zivatarvonalak, továbbá a hazánkban ritkábban megjelenő, nagy kiterjedésű, és általában igen hosszú ideig fennálló mezoléptékű konvektív komplexumok (MKK). (Horváth, 2007; Markowski és Richardson, 2010).

2.2. 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 folyékony halmazállapotúak maradhatnak (Markowski és Richardson, 2010).

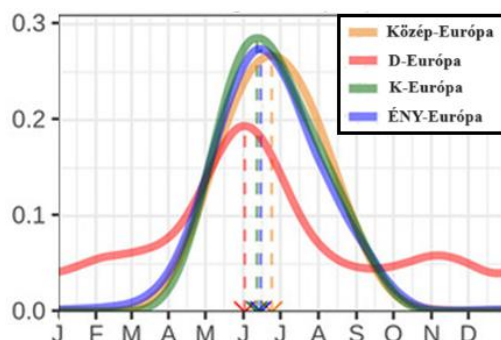
A jégkezdemények intenzív diffúziós növekedésbe kezdenek, majd néhány perc elteltével elegendően nagyra (100 µm körül) nőnek ahhoz, hogy a túlhűlt vízcseppeket begyűjtve már ütközésesen is növekedjenek (Geresdi, 2007; Markowski és Richardson, 2010). A jég szem, hőmérsékletétől függően szárazon (zúzmarásodás) 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 (fagypon alatti hőmérsékleten). 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).

2.3. A jégesők térbeli és időbeli eloszlása

A jégeső keletkezésének áttekintése után a klimatológiai viszonyokra térek át, melynek elemzésében a jégbejelentések időbeli és térbeli vizsgálata ad segítséget. 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 [1 – essl.org - Vision, Mission, and Strategy of ESSL].

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 (1. ábra). Ezt nagyrészt több másik tanulmány is megerősíti (Púčik et al., 2019; Hulton és Schultz, 2024).

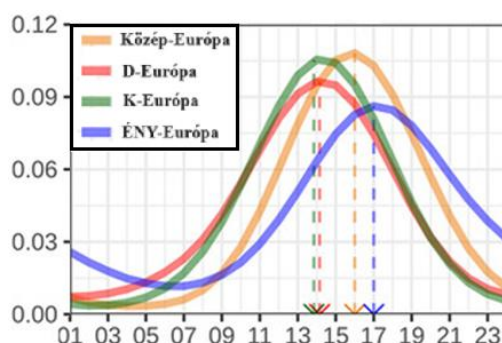


1. ábra: A jégesők éven belüli eloszlása Európában. Minden térségben jelölve van a maximumhoz tartozó nap is (Taszarek et al., 2020a).

Taszarek et al. (2020a) vizsgálatai alapján a jégeső napon belüli eloszlásának maximuma a legintenzívebb besugárzást követi kisebb eltolódással (2. ábra), az izolált konvekció (2.1. Konvektív időjárási jelenségek) 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

¹ European Severe Weather Database: Veszélyes Időjárási Események Európai Adatbázisa

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).



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

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 jeges események hevésségét mutatja, hogy 2023-ban kétszer is megdőlt az európai jégméret rekordja, mindkét alkalommal a Pó-síkság területén, a jelenlegi rekord 19 cm-es átmérő [2 – essl.org - News].

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 jeges események növekvő számát (Púčik *et al.*, 2019). Battaglioli *et al.* (2023) azonban ERA5 reanalízis adatbázisból származtatott paraméterek felhasználásával kimutatták, hogy Európa legnagyobb részén a pozitív trendek dominálnak. Ellenben az Egyesült Államok területén nagyjából megegyezik a csökkenést és növekedést mutató trendek aránya (Battaglioli *et al.*, 2023), Ausztráliában pedig inkább a csökkenő tendencia dominál (Raupach *et al.*, 2023).

Összességében tehát elmondható, hogy nem az események növekvő száma okoz problémát, hanem sokkal inkább azok hevésségének mértéke. A jövőben pedig várhatóan növekedni fog a heves jégesők számára megfelelő környezetek gyakorisága, ám ezek egyre kisebb hányada vezethet majd konvektív csapadékhulláshoz és heves jégesőkhöz (Taszarek *et al.*, 2021).

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 átlagos 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)

2.4. Jégbejelentések és jégkárok Magyarországon

A jégeső okozta károk már régóta komoly problémát jelentenek hazánkban, ezért az 1800-as években megjelent a mezőgazdaságban a jégkárokra vonatkozó biztosítás (*Wirth et al.*, 1985). A jégesőkről szóló feljegyzések azonban egészen a 19. század végéig hiányosak voltak (*Héjas*, 1898). 1896-tól kezdve azonban elkezdtek feljegyezni a jégesők által okozott károkat (*Wirth et al.*, 1985). *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).

Raum (1915) megállapította továbbá, hogy hazánkban a jégbejelentések maximális száma a legtöbbször májusra esett, amit sorrendben a június követett. Az adatokat pedig már ekkor is felhasználták jégkárral kapcsolatos vitás esetek elbírálásánál, akárcsak napjainkban.

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 kárárány legalább 5% volt (Raum, 1915).

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

A 20. század második felében a megfigyelőhálózat bővülésével a rendelkezésre álló adatok száma is megnőtt (*Wirth et al.*, 1985). A kutatások céljának középpontjába a megfigyelések reprezentativitásának növelése került. *Götz és Mészáros* (1968) az észlelések felhasználásával meghatározta Magyarország különböző tájegységein és az egész országra vonatkozóan a jégesős napok számának évi menetét és területi eloszlását. Az éven belüli maximum májusban (Kisalföld, Dunántúl) vagy júniusban (Alföld, Északi-középhegység, országos), a területi maximum pedig az Északi-középhegység térségében volt.

Wirth et al. (1985) a jégesők napon belüli eloszlását egy 11 éves időszakra (1958–1968) vizsgálták. A napon belüli maximum egyértelműen 15 és 18 óra között volt. Ami pedig az évi menetet illeti, ugyanebben az időszakban májusban és júniusban kapták a maximumot.

A jégeső okozta károk az 1970-es években elérték az 1,5 milliárd forintot éves átlagban, így egyre inkább megnőtt az igény a védekezésre. Részletesen tanulmányozták a termesztett növények érzékenységét a jégeső okozta károkra nézve, amely alapján kockázati osztályokba sorolták őket. Emellett áttekintették azt is, hogy milyen egyéb károsodások vannak, amelyek összetéveszthetők a jégkárokkal. Ennek célja a téves kárjelentések kiszűrése volt. Ezt követően különböző módszereket is adtak arra, hogyan lehet megbecsülni a jégeső okozta károkat az egyes növények esetén (*Wirth et al.*, 1985).

A jégeső részletes tanulmányozása azonban hazánkban elsősorban a 20. század második felében a radarok elterjedésével kezdődött el. Ezzel párhuzamosan 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 megjelenése, valamint a jégeső okozta károkról szóló összegzések alapján szükségesnek ítélték a jégkarmérséklés bevezetését hazánkban. 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).

Jelenleg hazánkban a 2018 óta működő Országos Jégkarmérséklő Rendszerhez érkeznek a jégbejelentések és a mezőgazdasági jégkárokról szóló bejelentések, melyek statisztikáiról a későbbiekben részletesen is szó lesz (4.1. Jégbejelentések statisztikai vizsgálata). A dolgozat megírásának idejében már a hetedik védekezési szezon is lezárult, amely minden évben április 15. és szeptember 30. között van.

2.5. 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*, 2021). 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 meglehetősen szubjektívek. Az észlelők mellett ma már lehetőség van automatikus jégdetektálásra is az állomásokon, cseppspektrummérő segítségével, azonban még ezek is csak a jéges események meglehetősen kis hányadát tudják leírni. További, széles körben alkalmazott eljárás cseppspektrummérőkkel 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.

A nagy méretű jégcszemek kialakulásának körülményeivel manapság egyre több kutatás foglalkozik. Ahhoz, hogy a jégcszem 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 jégcszemek növekedése (*Nelson*, 1983; *Knight és Knight*, 2005). Kimutatták azt is, hogy a jégcszemek növekedése szinte kizárólag 0 °C alatti hőmérsékleten történik, efelett az olvadás válik a domináns folyamattá (*Knight és Knight*, 2005).

Ahhoz, hogy még a nagy jégcszemek 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 jégcszemek tudnak képződni (*Knight és Knight*, 2005). A másik oldal szerint azonban létezik egy optimális sebesség, amely nagyjából 20–40 m/s-os nagyságú (*Nelson*, 1983). Napjainkban egyre inkább

bizonyítékot nyernek azok az elméletek, amelyek szerint több környezeti tényező komplex együttese szükséges a nagy jég szemek kialakulásához (*Kumjian et al.*, 2021; *Nixon et al.*, 2023). Fontos továbbá azt is megjegyezni, hogy a heves jégesőt egy adott térségben jól leíró paraméterek nem biztos, hogy máshol is megfelelően alkalmazhatóak (*Taszarek et al.*, 2020b; *Zhou et al.*, 2021).

Összességében elmondható, hogy a jégdetektálásra elsősorban műholdas adatokat (*Bedka*, 2011; *Zhou et al.* 2021; *Kolios*, 2023), konvektív paramétereket (*Taszarek et al.*, 2020b; *Kumjian et al.*, 2021; *Warren et al.*, 2021; *Zhou et al.*, 2021; *Nixon et al.*, 2023), valamint radar adatokat használnak fel (*Allan et al.*, 2019). Utóbbiról a következő alfejezetben részletesen lesz szó.

2.5.1. Radar adatok felhasználási lehetőségei

A radar (**R**adio **D**etection and **R**anging) a konvektív folyamatok megjelenési formáinak (2.1. Konvektív időjárási jelenségek) 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. Az objektum méretének függvényében a visszaérkező jel erősségében több nagyságrendbeli eltérés is lehet, így a gyakorlatban a 10-es alapú logaritmusának 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 a jég szemek alakját és méretét is meghatározni (*Kumjian*, 2013). Manapság a legtöbb kutatás a duál-polarizációs radarok felhasználási lehetőségeivel foglalkozik, melyek célja a szórási jellemzők és a jégesők közötti kapcsolat minél pontosabb megértése (*Allen et al.*, 2019). Hazánkban jelenleg öt, duál-polarizációs radar működik a HungaroMet Zrt. működtetésével [3 – met.hu - Radar ismertető]. A radaros jégdetektálás alapja, hogy radarproduktumok segítségével különböző kritériumokat határoznak meg annak megállapítására, hogy az adott cella jéges-e.

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 2. táblázat tartalmazza.

2. 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]
SHI	Veszélyes jégeső index [Jm ⁻¹ s ⁻¹]
POSH	Veszélyes jégeső valószínűsége [%]
MESH	Várható maximális jégsemméret [mm]

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 (Mason, 1971). Auer (1994) reflektivitás adatok és műholdas felhőtető-hőmérséklet mérések alapján megállapította, hogy alacsonyabb reflektivitás esetén csak magasabb felhőtető-hőmérséklet mellett lehet jeges a cella. Ennek magyarázata, hogy leginkább tavaszi-őszi helyzetben, amikor még alacsonyan van a 0 °C-os izoterma, kis jégsemmek, így alacsony dBZ értékek mellett is kialakulhat a jégeső, hiszen a jégsemmek olvadása csekély mértékű. Ezeket a helyzeteket pedig alacsony felhőtető jellemzi. A Waldvogel-kritérium (H45-H₀ legalább 1,4 km) kidolgozásakor küszöbértéket akartak találni arra, hogy mikor szükséges a rakéták alkalmazása a szovjet jégkarmérséklésben (Waldvogel et al., 1979). A kritérium használatának oka, hogy a jégsemmek ezen magasságok között növekednek a legintenzívebben, így amennyiben nagyobb a kiterjedése, az nagyobb valószínűséggel vezet (nagyobb) jégsemmek kialakulásához. Később Witt et al. (1998) a H45-H₀ értékéhez jégvalószínűséget is társított, miszerint, ha a különbség legalább 6 km, akkor a cella gyakorlatilag 100 százalékos valószínűséggel jeges. A veszélyes jégesők detektálására kidolgozták az SHI-t (Severe Hail Index), amelyből számítható a POSH (Probability of Severe Hail), azaz a veszélyes jégeső valószínűsége és a MESH (Maximum Estimated Size of Hail), azaz a jégsemmek maximális várható mérete (Witt et al., 1998). A jég detektálására használható még a VIL (Vertically Integrated Liquid) érték is, amelyet a heves viharok elemzése és hidrológiai alkalmazhatóság céljából dolgoztak ki (Greene és Clark, 1972). Az elegendően nagy cseppfolyós víztartalom (VIL) ugyanis nélkülözhetetlen feltétele a

jégszemek kialakulásának és növekedésének. Mivel a VIL erősen függ a légtömegtől, „normalizálták”, azaz elosztották a légoszlop magasságával, megkapva a VIL sűrűséget (Amburn és Wolf, 1997).

A kritériumok optimalizálása az egyes országokban napjainkban is zajlik, mindenhol érdemes őket egyedileg meghatározni. A teljesség igénye nélkül Szlovéniában a Waldvogel-kritérium és az SHI (Stržinar és Skok, 2018), Németországban az SHI és a POSH (Kunz és Kugel, 2015), Csehországban a Waldvogel-kritérium és a Witt et al. (1998) által kidolgozott módszer (Skripniková és Řezáčová, 2014), Lengyelországban pedig a nagy (átmérő legalább 4 cm) jégszemek detektálására a Waldvogel-kritérium és a VIL -12 és -25 °C-os izoterma közötti rétegben számított értéke (Pilorz et al., 2022) vált be a leginkább. Az SHI küszöbértékével kapcsolatos kutatások is folytak az elmúlt években. Stržinar és Skok (2018) az SHI számításakor az általam is alkalmazott 40 és 50 dBZ értékek mellett 27 és 66 Jm⁻¹s⁻¹ közötti küszöbértékeket kaptak attól függően, hogy 1 és 3,5 km között mekkora sugarú környezetet használtak. Skripniková és Řezáčová (2014) 60 Jm⁻¹s⁻¹ küszöbértéket kaptak szintén jeges cella detektálásra, míg Pilorz et al. (2022) 110-et nagyon nagy (átmérő legalább 4 cm) jégszemekre vonatkozóan. A POSH értékére pedig 30 és 50% volt a küszöbérték jegeső detektálásra (Skripniková és Řezáčová, 2014) és 80% jégkárokra (Kunz és Kugel, 2015).

A radaros jégdetektálás hazánkban is nagyon aktuális kutatási terület. Baár et al. (2024) elvégezték Magyarország területére a jegeső előrejelzés verifikációját. A beválások vizsgálatához a jégészlelések felhasználásával megalkottak egy radarproduktumokon alapuló kritériumrendszert jeges és nem jeges cellák elkülönítésére. A kritériumokat a H₀ alapján határozták meg, elkülönítve tavaszi-őszi, köztes és nyári helyzetet (3. táblázat).

3. táblázat: Jeges cella kritériumok az egyes légköri helyzetek esetén (Baár et al., 2024). (H₀ – a 0 °C-os hőmérséklet magassága [km]; W₀ – a 0 °C-os nedves hőmérséklet magassága [km]; H45 – 45 dBZ reflektivitás maximális magassága [km]; VIL – Vertikálisan integrált víztartalom [kg/m²]; CMax – oszlopmaximum reflektivitás [dBZ])

Légköri helyzet	H ₀ magassága [m]	Feltétel
Nyári	H ₀ > 3000	H45 - H ₀ ≥ 2,5535
Köztes	2500 < H ₀ ≤ 3000	H45 - W ₀ > 1,458+0,0645·VIL
Tavaszi-őszi	H ₀ ≤ 2500	VIL > 21,8959-0,435·CMax

A radarproduktumok felhasználásával nemcsak jeges cella kritérium határozható meg, hanem annak feltétele is megállapítható, hogy mikor okoz kárt a jegeső. A NAK által végzett számítások során meghatározták, hogy milyen radarproduktumok esetén mekkora méretű jégszemek várhatóak és melyek azonosítják a legjobban a jégkárt.

3. Anyag és módszer

A jégbejelentések és jégkárok vizsgálatát R programnyelv segítségével végeztem el. Ebben a fejezetben a felhasznált adatbázisokat és a vizsgálat folyamatát mutatom be.

3.1. Felhasznált adatbázisok

A NAK (Nemzeti Agrárgazdasági Kamara) minden évben megkapja a részletes adatokat a jégbejelentésekről és a jégkárbejelentésekről (2.4. Jégbejelentések és jégkárok Magyarországon). Ezeket Excel táblázatok formájában kaptam meg. A jégbejelentések az Országos Jégkarmérséklő Rendszer manuális generátorkezelőitől érkeznek. Mivel emberi észlelésekről van szó, így az adatok meglehetősen szubjektívek. Tartalmazzák a jégeső bejelentett időpontját, helyszínét (vármegye, járás, település), pontos földrajzi koordinátáit, a legnagyobb jég szemek méretét (4. táblázat), a jégeső mennyiségét (kevés, közepes, sok), időtartamát és azt, hogy esővel érkezett-e, vagy csak jég szemek hullottak. A jégkárokról rendelkezésre álló információk pedig a káresemény dátuma (év, hónap, nap), a károsodott terület hektárban, valamint az érintett növénykultúra.

4. táblázat: A jégbejelentések során megadott szubjektív jég szemméretekhez tartozó, cm-ben kifejezett mérettartományok.

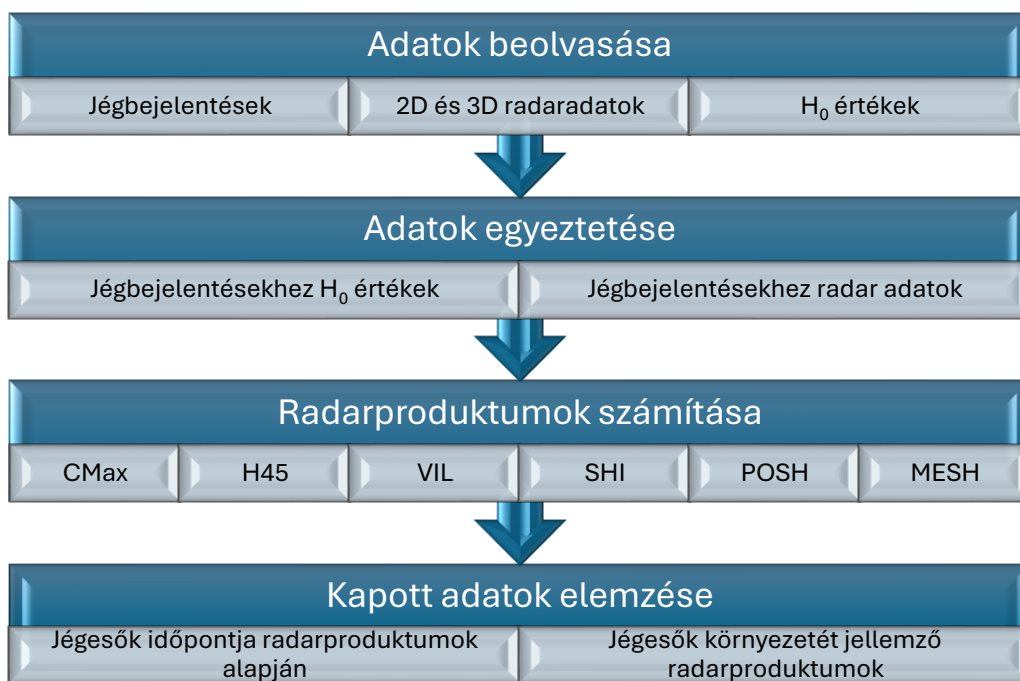
Kategória	Mérettartomány [cm]
búzaszem	0,5 alatt
borsó	0,5–1,5
cseresznye	1,5–2,5
dió	2,5–4,5
tojás	4,5 felett

A vizsgálatom alapját a radaros mérések és az azokból származtatott radarproduktumok adták (2.5.1. Radar adatok felhasználási lehetőségei). Ezek számításához a HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt. radaros méréseiből származó adatokat használtam fel, melyek NetCDF formátumban álltak rendelkezésemre. A kétdimenziós adatok (földrajzi szélesség és hosszúság) minden pontban a pont felett mért CMax (oszlopmaximum) reflektivitás dBZ-ben kifejezve. A háromdimenziós (földrajzi szélesség és hosszúság, valamint 16 magassági szint km-es felbontással) adatok pedig minden pontban az ott mért reflektivitás érték dBZ-ben. A jégeső szempontjából meghatározó paraméter a 0 °C-os izoterma magassága is (H_0), amelyet a rádiószondás felszállások adatainak felhasználásával lehet meghatározni. Ezt

a HungaroMet Zrt. által a NAK számára biztosított meteorológiai adatok közül tudtam lementeni minden egyes jégbejelentéshez.

3.2. Jégbejelentések vizsgálata

A jégbejelentések statisztikai vizsgálatát Excelben végeztem el a 2019–2024-es időszakra vonatkozóan. Ennek segítségével térbeli és időbeli (napi, évi) eloszlásokat kaptam (4.1. Jégbejelentések statisztikai vizsgálata). A statisztikai vizsgálat után a következő célom az volt, hogy a jégbejelentésekhez radarproduktumokat rendeljek. Ehhez R programnyelvben általam megírt kódot használtam fel és különböző beépített csomagokat használtam fel. A következőkben a program működését ismertetem részletesen (3. ábra).



3. ábra: A jégbejelentések vizsgálatának folyamatábrája.

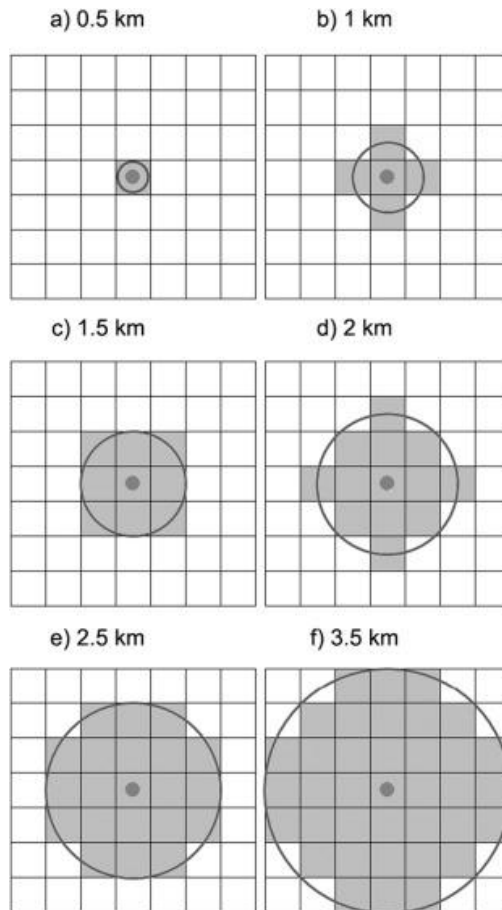
Első lépésként a program a jégbejelentések adatait, valamint a H₀ értékeket kapcsolta össze. A problémát az jelentette, hogy a H₀ értékek járási szinten, 5 perces időpontokra állnak rendelkezésre, míg a jégbejelentések időpontja perces pontosságú. A jégbejelentések időpontját ezért először 5 percre kerekítettem az R lubridate csomagjának segítségével, amely a dátumok és időpontok kezelésére szolgál. Ezután egy azonosítót készítettem, amely tartalmazza a járást és a pontos időpontot, majd ezt az azonosítót a H₀ értékekre is elkészítettem. Ezután már csak meg kellett találni a megegyező azonosítókat. A tidyverse csomag felhasználásával így minden jégbejelentést össze tudtam kapcsolni a megfelelő H₀ értékkel.

A következő lépés a radarfájlok feldolgozása volt az R ncdf4 csomagjának segítségével, amely netCDF fájlok kezelésére szolgál. Ezek a fájlok elsősorban meteorológiai és éghajlati adatok tárolására használatosak. Mivel az egyik célom a jégeső időpontjának pontosítása volt, így a fájlokat nem csupán a jégbejelentés időpontjára dolgoztam fel, hanem előtte és utána is 6 órás időintervallumban vizsgáltam öt perces időlépcsővel. Ez tehát minden jégbejelentés esetén 145 ($2 \cdot 6 \cdot 12 + 1$) fájl beolvasását jelentette. Minden egyes időpontra felépítettem a kétdimenziós rácshálózatot, amely a rácspontokban tartalmazza a CMax reflektivitás értékét dBZ-ben. Majd felépítettem a háromdimenziós rácshálózatot is, amely a rácspontokban 16 magassági szintben tartalmazza a reflektivitás értékét dBZ-ben. Ezután felmerült a probléma, hogy pontosan mely rácspontokat használjam fel az adott jégbejelentés esetén.

3.2.1. Szomszédsági koncepció

A problémára a legegyszerűbb megoldás az úgynevezett szomszédsági koncepció bevezetése (*Stržinar és Skok*, 2018). Ennek során a bejelentés helyszínének földrajzi koordinátáihoz különböző sugarú köröket rendelnek, majd megnézik, hogy melyek azok a rácspontok, amelyek ezen belül helyezkednek el (4. ábra). Az egyes radarproduktumokat minden egyes rácspontra kiszámolják, amelyek az adott körön belül helyezkednek el. *Stržinar és Skok* (2018) ezt a módszert jéges cella detektálásra használták fel. A kritériumokat különböző radarproduktumokra határozták meg, de általánosan elmondható, hogy a 2 km sugarú környezet bizonyult a legmegfelelőbb választásnak minden esetben.

A saját vizsgálatom során a kör sugarát először 1,8 km-nek választottam annak érdekében, hogy minél inkább a jégbejelentés környezetét jellemezzék, de ne csak egyetlen rácspont adatai legyenek felhasználva. Azonban a kör sugara a programban változtatható, így a próba után a *Stržinar és Skok* (2018) által megadott hat különböző sugarú környezetre (4. ábra) is elvégeztem a számításokat. A kisebb környezetek ugyan jól jellemzik a jégbejelentés pontos helyét, de nem vesznek figyelembe egyéb tényezőket. Ezek többek között a radar adatok térbeli és időbeli pontatlansága, valamint a jégbejelentések helyszínének szubjektivitása. Fontos tényező az is, hogy a zivatarcellák és bennük a jégzemek is mozognak, így nem elegendő csupán azt figyelembe venni, hogy az adott pont felett milyen radar adatokat mérnek. Emiatt szükséges a nagyobb sugarú környezetek használata is.



4. ábra: A jégbejelentések vizsgálatához használt különböző méretű környezetek. A rács az 1 km-es felbontású radar adatokat reprezentálja. (Stržinar és Skok, 2018)

3.2.2. Radarproduktumok számítása

A környezetek definiálása után a kétdimenziós radaradatok felhasználásával megkaptam a CMax (oszlopmaximum) reflektivitás értékét. Ezt azért nem a háromdimenziós adatokból számítottam, mert az csupán diszkrét magassági szinteken tartalmazza a reflektivitás értékeket, amelyek között nem minden esetben szerepelt a maximális érték. A többi radarproduktumot viszont már a program segítségével számoltam ki a háromdimenziós adatok felhasználásával a megfelelő rácpontokban. Az egyik a H45 (2. táblázat), amely a 45 dBZ érték maximális magassága. Ehhez a program megkereste azt a szintet (z_1), ahol még 45 dBZ feletti a reflektivitás. Majd az ezen a szinten mért reflektivitás (dBZ_1) és a felette lévő szinten (z_2) mért reflektivitás (dBZ_2) között lineáris interpolációt alkalmazva határozta meg a H45 értékét:

$$H45 = z_1 * h + \frac{dBZ_1 - 45}{dBZ_2 - dBZ_1} * h \quad (1)$$

ahol $h = 1000$ méter a szintek távolsága.

A Waldvogel-kritérium szerint jeges a cella, ha a H45-H₀ értéke nagyobb, mint 1400 méter (Waldvogel et al., 1979). Azonban azt is megállapították, hogy nagyobb magasságkülönbség esetén alapvetően nagyobb jégszemek várhatók, így az érték alkalmas a várható jégszemek méretének becslésére is (Holleman, 2001). Ennek megfelelően a programban a H45 magasság értékéből kivontam az adott jégbejelentéshez tartozó H₀ értéket.

A következő radarproduktum a VIL érték (2. táblázat), amely a légoszlop víztartalmáról ad információt. Számítása a következő képlettel történik (Greene és Clark, 1972):

$$VIL = 3,44 \cdot 10^{-6} \cdot \int_{h_{felh\hat{o}alap}}^{h_{felh\hat{o}tet\hat{o}}} Z^{\frac{4}{7}} dh' \quad (2)$$

Ehhez a radar által észlelt Z reflektivitás érték használható fel, nem pedig a dBZ-re átszámított érték. Az átszámítás a következőképpen történik:

$$Z = 10^{\frac{Z [dBZ]}{10}} \quad (3)$$

Gyakorlatban a (2) összefüggés nem alkalmazható, hiszen a rendelkezésre álló reflektivitás értékek nem folytonosan állnak rendelkezésre, hanem diszkrét magassági szinteken. Így a következő közelítés használható 16 magassági szintre vonatkozóan:

$$VIL = \sum_{i=1}^{15} h \cdot 3,44 \cdot 10^{-6} \cdot ((Z_i + Z_{i+1}) / 2)^{\frac{4}{7}} \quad (4)$$

ahol h = 1000 méter a szintek távolsága, Z_i az i. szintben mért reflektivitás.

Fontos megjegyezni, hogy a képlet alkalmazása előtt minden 56 dBZ-nél nagyobb reflektivitás értéket 56 dBZ-re kell módosítani (azaz, ha Z > 56 dBZ, akkor Z = 56 dBZ). Ennek magyarázata, hogy az 56 dBZ feletti értékek gyakran jégszemek jelenlétéből adódnak, nem pedig a cseppfolyós víztartalomból. Tehát az extrém magas értékek a VIL túlbecslését eredményeznék. (Stumpf et al., 2004)

Fontos radarproduktum a Witt et al. (1998) által kifejlesztett SHI (2. táblázat), amely hasonló megközelítést alkalmaz, mint a VIL algoritmus, de több újítást is tartalmaz. Az egyik, hogy nem a reflektivitás és a folyékony víztartalom közötti, hanem a reflektivitás és a jégeső közötti összefüggést használja fel. A reflektivitás (Z) adatok segítségével ugyanis kiszámítható a jégeső kinetikus energia fluxusa ($\dot{E}$) a következő összefüggés alapján:

$$\dot{E} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{0,084 \cdot Z} \cdot W(Z) \quad (5)$$

ahol

$$W(Z) = \begin{cases} 0, & Z \leq Z_L \\ \frac{Z - Z_L}{Z_U - Z_L}, & Z_L < Z < Z_U \\ 1, & Z \geq Z_U \end{cases} \quad (6)$$

súlyfüggvény szolgál a jeges és nem jeges zónák elkülönítésére. Az alapértelmezett értékek szerint $Z_L = 40$ dBZ, $Z_U = 50$ dBZ. Ez alapján 40 dBZ alatt 0, 50 dBZ felett 1, a két érték között 0 és 1 közötti a súlyfüggvény értéke. Tehát az $\dot{E}(Z)$ függvény kiszűri a folyékony víztartalomhoz kapcsolódó alacsonyabb reflektivitás értékeket. A másik eltérés a VIL algoritmushoz képest, hogy az SHI tartalmaz egy hőmérsékletalapú súlyfüggvényt is:

$$W_T(H) = \begin{cases} 0, & H \leq H_0 \\ \frac{H - H_0}{H_{m20} - H_0}, & H_0 < H < H_{m20} \\ 1, & H \geq H_{m20} \end{cases} \quad (7)$$

ahol H_0 a 0 °C-os, H_{m20} a -20 °C-os izoterma magassága, H pedig az adott magasság (ahol a Z reflektivitás értéket mértük). Ahogyan korábban említettem (2.5. Módszerek a jégeső környezeti jellemzőinek meghatározására), a jégszemek növekedése 0 °C alatt történik, a legintenzívebben -20 °C-os és ennél alacsonyabb hőmérsékleten (Nelson, 1983; Knight és Knight, 2005). Ennek megfelelően a $W_T(H)$ súlyfüggvény H_0 magasság alatt 0, H_{m20} magasság felett 1, a két érték között 0 és 1 közötti értékeket vehet fel. Végezetül az (5), (6) és (7) egyenletek felhasználásával kapjuk az SHI végső, Witt et al. (1998) által megadott alakját:

$$SHI = 0,1 \cdot \int_{H_0}^{H_T} W_T(H) \dot{E} dH \quad (8)$$

ahol H_T a felhőtető magassága.

Gyakorlatban a (8) összefüggés sem alkalmazható, hasonlóan a VIL számításához használt (2) egyenlethez, így a következőkben leírtaknak megfelelően jártam el. A $W_T(H)$ csak akkor ad nem 0 értéket, ha $H > H_0$, ha pedig $H_0 < H < H_{m20}$, akkor $H = (H_i + H_{i+1})/2$ értékkel számolhatunk. A $W(Z)$ számításához meghatároztam, hogy a Z_i és Z_{i+1} (Z_i a H_i szintben mért reflektivitás) dBZ-ben kifejezett értékek által meghatározott intervallum mekkora része esik az egyes (40 dBZ alatti, 40 és 50 dBZ közötti, 50 dBZ feletti) tartományokba (a,b,c értékek, melyekre $a + b + c = 1$), ezek felhasználásával:

$$W(Z) = 0 \cdot a + X \cdot b + 1 \cdot c \quad (9)$$

ahol X a (6) egyenlet második feltétele ($Z_L < Z < Z_U$) alapján számítható az intervallum 40 és 50 dBZ közé eső részének átlagával (ez adja az összefüggésben a Z értéket). Továbbá az ismert H_0 adatok alapján becsültem a H_{m20} értékét a nedves adiabatikus hőmérsékleti gradiens átlagos értékének felhasználásával. Végül pedig az $\dot{E}$ számításához $Z = (Z_i + Z_{i+1})/2$ átlagos értéket vettem. Az SHI az egyes tartományokban kapott értékek összegeként kapható meg.

Az SHI felhasználásával kapjuk a veszélyes jégeső (átmérő > 19 mm) valószínűségét, a POSH (2. táblázat) értékét (*Witt et al.*, 1998):

$$POSH = 29 \cdot \ln\left(\frac{SHI}{WT}\right) + 50 \quad (10)$$

ahol

$$WT = 57,5 \cdot H_0 [km] - 121 \quad (11)$$

úgynevezett figyelmeztetési küszöbérték. Ha WT értéke kisebb, mint $20 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$, akkor módosítjuk $20 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ -re. Ha a $POSH < 0\%$, akkor $POSH = 0\%$, ha a $POSH > 100\%$, akkor $POSH = 100\%$, és ha a (10) egyenletben $SHI = WT$, akkor $POSH = 50\%$.

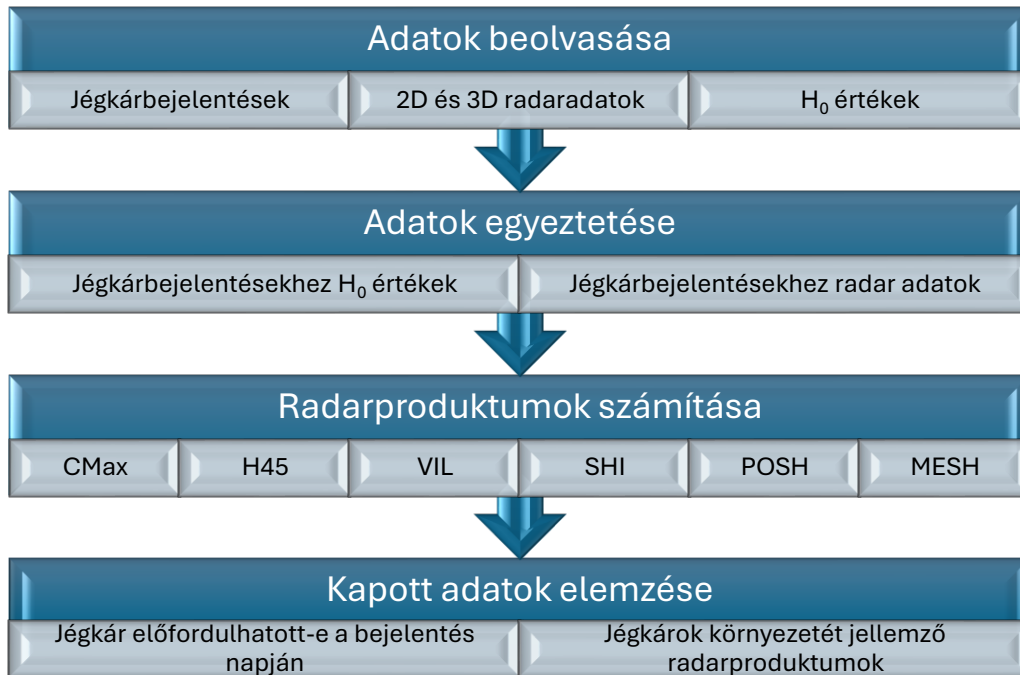
Az SHI másik felhasználási lehetősége, hogy segítségével becslést adhatunk a jég szemek várható legnagyobb méretére, a MESH (2. táblázat) értékére (*Witt et al.*, 1998):

$$MESH [mm] = 2,54 \cdot \sqrt{SHI} \quad (12)$$

A számítások elvégzése után a program megkeresi az adott jégbejelentés adott sugarú környezetébe tartozó rácpontokban a CMax, a H45, a VIL, illetve az SHI radarproduktumok maximumát, utóbbiból pedig számítja a POSH és a MESH értékét. Ezt mind a 12 órára elvégzi 5 perces időlépcsővel, ezáltal kirajzolva az egyes radarproduktumok menetét a jégbejelentés előtti és az azt követő időszakban. A menetek alapján pedig már következtetéseket tehetünk arra, hogy mikor lehetett pontosan a jégeső az adott területen (4.2. Jégbejelentések vizsgálatának automatizálása), valamint milyen radarproduktumok jellemezték az egyes jégesők környezetét (4.3. Jégesők környezeti jellemzői radarproduktumok alapján). Emellett a bejelentett jégméret összehasonlítható a MESH-re kapott értékkel is.

3.3. Jégkárbejelentések vizsgálata

A jégbejelentések vizsgálata után a célom az volt, hogy a jégkárokhoz is radarproduktumokat rendeljek. Ehhez a korábban bemutatott (3.2. Jégbejelentések vizsgálata), R programnyelvben megírt kódomat fejlesztettem tovább. A következőkben ismertetem a módosított programot (5. ábra).

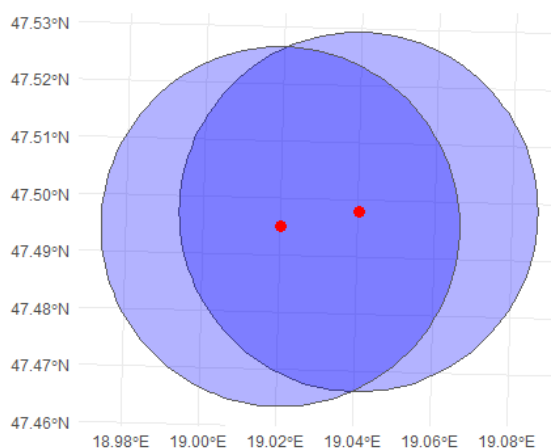


5. ábra: A jégkárbejelentések vizsgálatának folyamatábrája.

Első lépésként a program a jégbejelentések adatait, valamint a H₀ értékeket kapcsolta össze. A jégkárok esetén azonban nem állt rendelkezésemre konkrét időpont, sőt a végső célom az volt, hogy a jégkárbejelentés teljes napjára megkapjam a radarproduktumok menetét. Ennek érdekében itt is egy azonosítót készítettem, amely tartalmazza a megyét, és hogy melyik napon történt a jégbejelentés. Ezután már itt is hozzá tudtam rendelni a H₀ értékeket a jégkárbejelentésekhez.

A következő lépés a radarfájlok feldolgozása volt. Mivel a teljes napra szerettem volna megkapni a jégkárrel érintett területeken a radarproduktumokat, így a fájlokat mindig 24 órás időintervallumban olvastam be, szintén öt perces időlépcsővel. Ez ugyan minden jégkárbejelentés esetén 288 fájl beolvasását jelentette, de ha az adott napon több jégkárbejelentés is volt, akkor mindegyikhez megkaptam a szükséges információt. Minden egyes időpontra felépítettem a rácshálózatot, ezután viszont felmerült a probléma, hogy pontosan mely rácspontokat használjam fel az adott jégkárbejelentés esetén. Ebben újra a szomszédsági koncepció segített (3.2.1. Szomszédsági koncepció).

Azonban kérdés, hogy egy területhez hogyan lehet adott sugarú környezeteket rendelni. Az egyes területek különböző számú ponttal voltak megadva nagyságuktól függően. Kiindulásként először két pontra vizsgáltam meg a problémát, 3,5 km sugarú körrel. Mindkét ponthoz hozzárendeltem a 3,5 km sugarú kört, azok unióját véve kaptam egy olyan területet, amelyet a két pont 3,5 sugarú környezetének tekintettem (6. ábra). Gyakorlatban ehhez kiszámoltam a pontok és az összes radaros rácsponthoz távolságát, majd vettem minden rácspontra vonatkozóan a két adat minimumát (tehát minden rácsponthoz a kisebb távolságot). Azok a rácsponthoz tartoznak a két pont környezetébe, melyeknél a minimum távolság legfeljebb 3,5 km volt. Az egyes területekhez gyakran kettőnél több pont is tartozott, azonban ebben az esetben is az előző módszer szerint számíthattam a *Stržinar és Skok* (2018) által megadott hat különböző sugarú (4. ábra) környezetet. Azaz vettem minden egyes radaros rácsponthoz és a hozzá legközelebb eső, a területhez tartozó pont távolságát. Ha a távolság kisebb, mint r , akkor a radaros rácsponthoz tartozik a környezetbe.



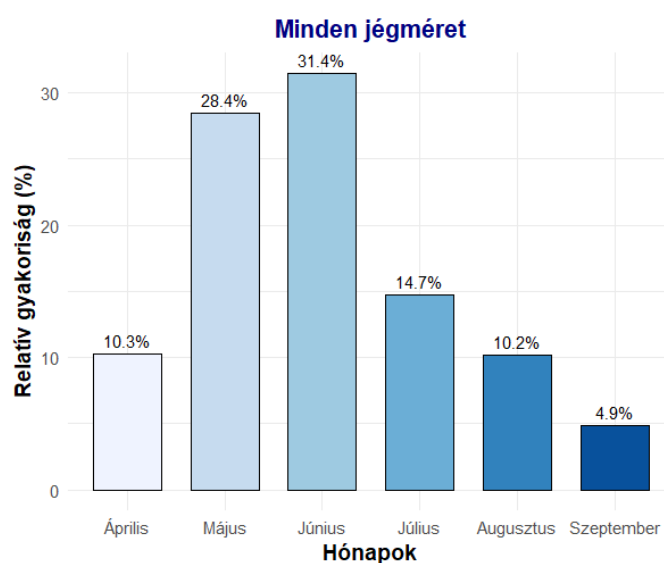
6. ábra: Két tetszőleges pont 3,5 km sugarú környezete földrajzi koordinátákkal megadva.

Miután tehát a program megkereste az adott jégkárbejelentéshez tartozó radar rácsponthoz, a korábban bemutatott módon (3.2.2. Radartermékek számítása) kiszámolta a CMax, a H45, a VIL és az SHI értékeket minden egyes rácsponthoz, majd vette az értékek területi maximumát. Ezt mind a 24 órára elvégezte 5 perces időlépcsővel, ezáltal kirajzolva az egyes radartermékek napi menetét a jégkárbejelentés napján. Ezek alapján pedig már következtetéseket tehetünk arra, hogy mikor keletkezhetett pontosan a jégkár az adott területen, valamint milyen radartermékek jellemezték. Az SHI felhasználásával pedig megállapíthatjuk annak valószínűségét, hogy előfordult-e veszélyes jégeső (jégszemek átmérője > 19 mm) az adott területen (POSH), és hogy maximálisan mekkora jégszemek eshettek (MESH).

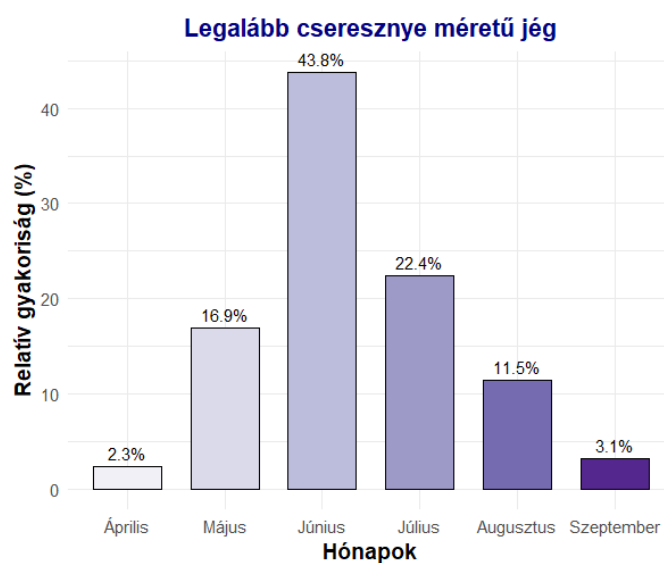
4. Eredmények

4.1. Jégbejelentések statisztikai vizsgálata

Először a jégbejelentések általános statisztikai vizsgálatával foglalkoztam hat évre vonatkozóan (2019–2024). 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 és júniusban van, ha minden jégészlelést figyelembe veszünk (7. ábra), ellenben egyértelműen júniusban, ha csak a legalább cseresznye méretű jég szemeket (4. táblázat) tekintjük (8. ábra).



7. ábra: Jégesők bejelentett időpontjának havi eloszlása relatív gyakoriság diagramon 2019–2024-ig minden méretű jég szemre.

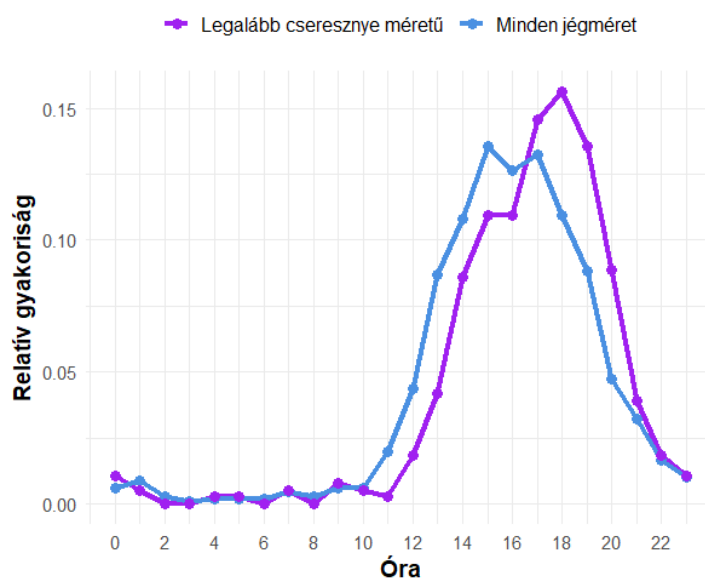


8. ábra: Jégesők bejelentett időpontjának havi eloszlása relatív gyakoriság diagramon 2019–2024-ig, csak a legalább cseresznye méretű jég szemekre.

Megállapítható, hogy amennyiben csak a legalább cseresznye méretű jég szemek előfordulását vizsgáljuk, akkor a tavaszi-őszi relatív gyakoriság csökken. Ennek magyarázata, hogy ilyenkor még gyakran alacsonyan van a H_0 , így a kialakuló kisebb jég szemek nem olvadnak el (2.5.1. Radar adatok felhasználási lehetőségei). Ezzel párhuzamosan a nyári hónapokban megnőtt a relatív gyakoriság ezzel a szűkítéssel.

A 8. ábra eredményei összhangban vannak *Taszarek et al.* (2020a) korábban bemutatott eredményeivel (1. ábra), akik olyan jég esőkkel számoltak, amelyek során legalább 2 cm átmérőjű jég szemek is előfordultak. Kisebb eltérés, hogy Magyarországon júliusban már jóval kisebb volt a legalább cseresznye méretű jég szemek relatív gyakorisága, míg a júniusi érték meglehetősen kiugró. Az említett régebbi hazai vizsgálatokkal (*Wirth et al.*, 1985) pedig az összes jég szemre vonatkozó 7. ábra van összhangban, hiszen korábban is májusi és júniusi maximumot kaptak (2.4. Jégbejelentések és jégkarak Magyarországon).

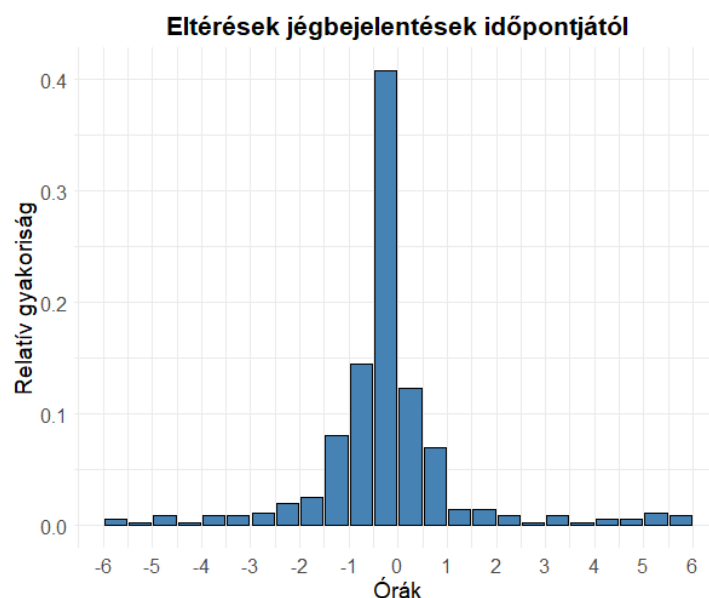
A napon belüli eloszlást tekintve szintén különbség van, ha minden méretű jég szemet tekintünk, és ha csak a legalább cseresznye méretűket (4. táblázat). Előbbi esetben a maximum helyi idő szerint 15 és 18, míg utóbbi esetben 17 és 20 óra közé tehető (9. ábra). Ahogy korábban láttuk, *Taszarek et al.* (2020a) 16 UTC (18 óra helyi idő szerint) körüli maximumot állapított meg (2. ábra), amely összhangban van a legalább cseresznye méretű jég szemekre kapott eredménnyel. *Wirth et al.* (1985) pedig 15 és 18 óra közötti maximumot kaptak az összes jégbejelentést vizsgálva, ami szintén összhangban van az általam kapott, minden jég méretre vonatkozó eredménnyel.



9. ábra: Jég esők bejelentett időpontjának napi eloszlása relatív gyakoriság diagramon 2019–2024 között minden méretű jég szemre (kék) és csak a legalább cseresznye nagyságúakra (lila).

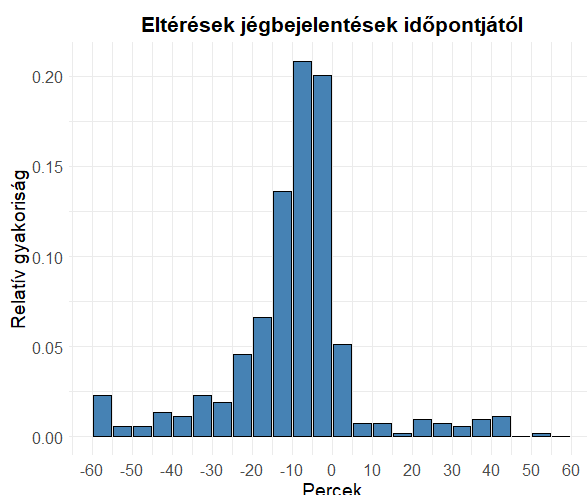
4.2. Jégbejelentések vizsgálatának automatizálása

Ahogy korábban kifejtettem, a jégbejelentések vizsgálatának egyik célja az volt, hogy a bejelentés időpontjának pontosságát ne egyesével, manuálisan kelljen visszaellenőrizni, hanem ez automatikusan történjen. A vizsgálathoz három év (2022–2024) jégbejelentéseit használtam fel. A radarproduktumokat mind a 863 jégbejelentés időpontja előtti és utáni hatórás időszakra is kiszámítottam (3.2. Jégbejelentések vizsgálata). Az egyes radarproduktumok esetén a program meghatározta, hogy mikor volt a legnagyobb értékük, ezt tekintettem a jégeső hozzávetőleges időpontjának. Mivel a jég hullás időtartama alapvetően 1 és 20 perc között változott a vizsgált bejelentések során, így a jégeső valószínűsíthető idejét egy 20 perces időintervallumban határoztam meg (a radarproduktum időbeli maximuma előtti és utáni 10 perc). Példaként tekintsük a CMax oszlopmaximum reflektivitás értékei alapján kapott időpontokat, nevezzük ezeket ezután „javasolt” időpontoknak. A program minden egyes jégbejelentésre meghatározta a javasolt és a bejelentett időpont eltérését. Amennyiben az eltérés abszolút értékben kisebb volt mint 10 perc, a bejelentés időpontját pontosnak tekintettem. Ez a vizsgált 863 esetből 514-et jelentett (59,42%). Ezután tekintettem a 10 percnél nagyobb eltérések eloszlását (10. ábra). A negatív értékek arra utalnak, hogy a jégeső bejelentett időpontja későbbi, mint amit a CMax alapján a program várt. A pozitív értékek pedig arra, hogy a bejelentett időpont korábbi, mint a javasolt.



10. ábra: Jégesők CMax alapján javasolt és bejelentett időpontjának előjeles eltérése a 2022–2024-es időszakra vonatkozóan relatív gyakoriság hisztogramon (csak az abszolút értékben 10 percnél nagyobb eltéréseket ábrázolva).

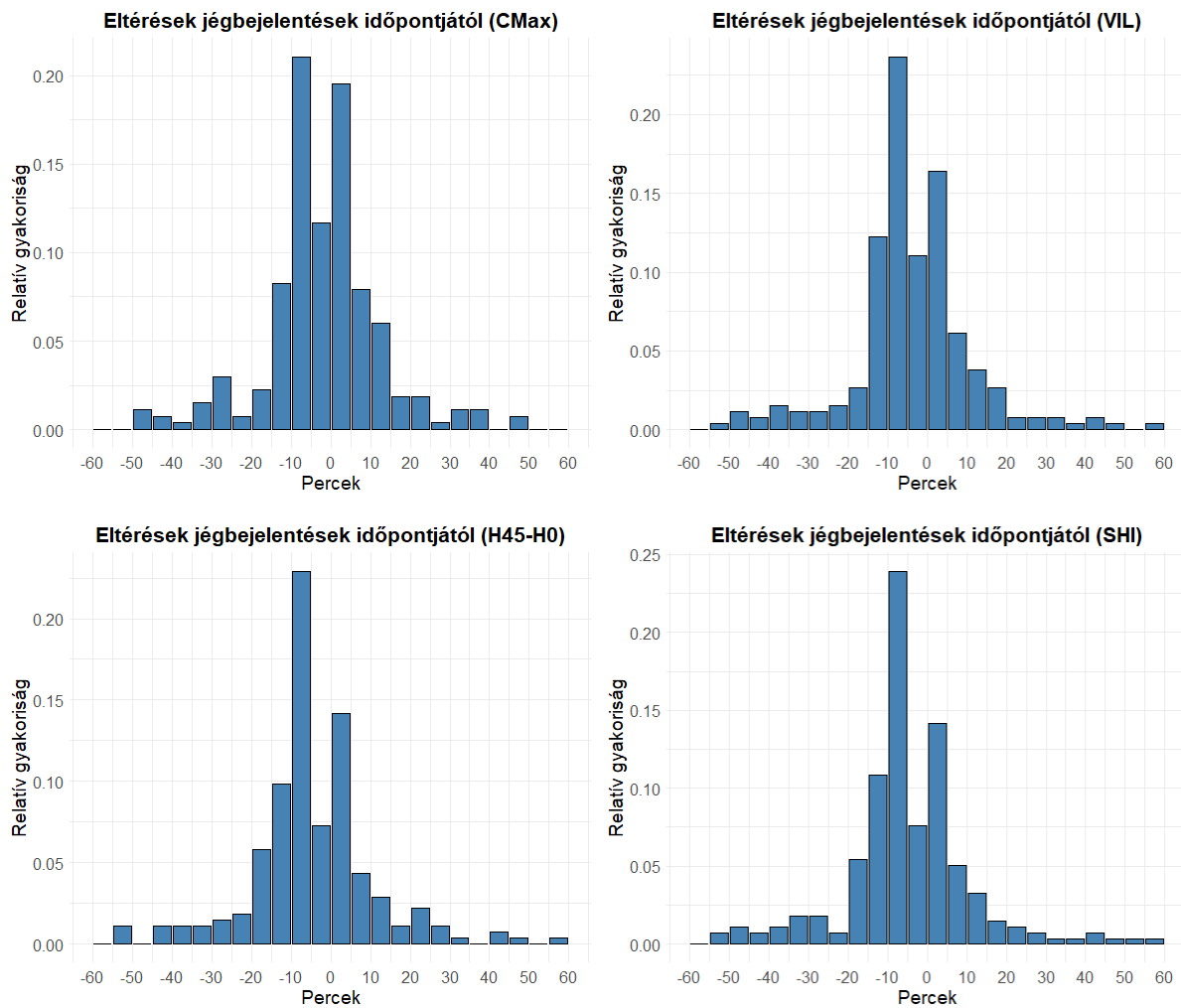
Látható az ábrán, hogy a legtöbb esetben az eltérés kisebb volt egy óránál, továbbá van egy kiugróan nagy relatív gyakoriságú oszlop, amiben a -10 és -30 perc közötti értékek szerepelnek. Emiatt részletesebben is megvizsgáltam a bejelentett időpont előtti és utáni óra adatait (11. ábra).



11. ábra: Jégesők CMax alapján javasolt és bejelentett időpontjának előjeles eltérése a 2022–2023-as évre vonatkozóan relatív gyakoriság hisztogramon (csak a nem 0 adatokat ábrázolva).

Az évek (2022–2023) választásának indoka, hogy 2023-ig csak a bejelentés időpontja állt rendelkezésre a jégbejelentésekkel kapcsolatban. Szöveges megjegyzés formában ugyan volt pontosítás az időpontra, ezeket azonban nem lehet programban, automatikusan feldolgozni. 2024-től kezdve viszont a manuális generátorkezelők meg tudták adni a jégeső kezdetének időpontját is. A 2024-es évre vonatkozóan már ezeket az adatokat használtam az eltérések megállapítására.

A 2022–2023-as év adatai alapvetően szimmetrikusak, de nem a 0 ponton átmenő függőleges tengelyre (11. ábra). Ennek legegyszerűbb magyarázata, hogy a bejelentés leggyakrabban a jégesőt követő 5–15 percben történhetett. Mivel 2024-ben ez a probléma az adatokkal már nem állt fent, ezért ezek már alkalmasabbak a radarproduktumok és a jégeső kezdeti időpontja közötti kapcsolat kimutatására. Így az eltéréseket megvizsgáltam négy különböző radarproduktumra 2024-re vonatkozóan (12. ábra). A CMax esetén kiugró a -5 és -10 perc közötti értékek száma. Ezt okozhatja az, hogy a CMax értékek maximuma kissé megelőzi azt az időpontot, amikor a jég szemek elérik a földfelszínt, azaz a jégeső kezdetét. A másik három radarproduktum (VIL, H45-H₀, SHI) esetén pedig már egyértelműen a -5 és -10 perc közötti értékek relatív gyakorisága a legnagyobb. A jégeső kezdete előtti maximum, és a csökkenés mindhárom esetén magyarázható a jég szemek kihullásával.



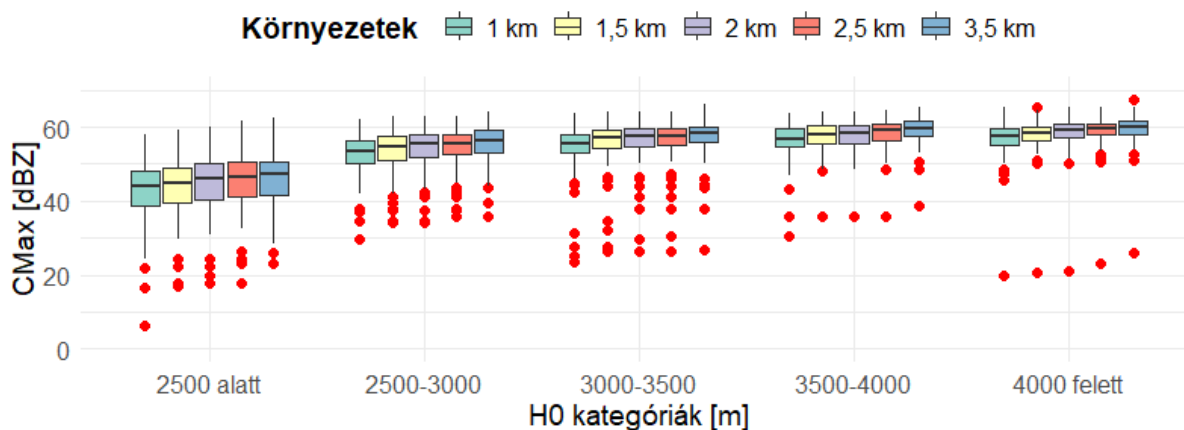
12. ábra: Jégesők CMax, VIL, H45-H₀ és SHI alapján javasolt és bejelentett időpontjának előjeles eltérése a 2024-es évre vonatkozóan relatív gyakoriság hisztogramon (csak a nem 0 adatokat ábrázolva).

Fontos megjegyezni, hogy mivel egyetlen év adatairól van szó, így biztos következtetés nem tehető, további elemzést igényel. Lehetséges, hogy csupán véletlenszerűen alakult így az adatok eloszlása.

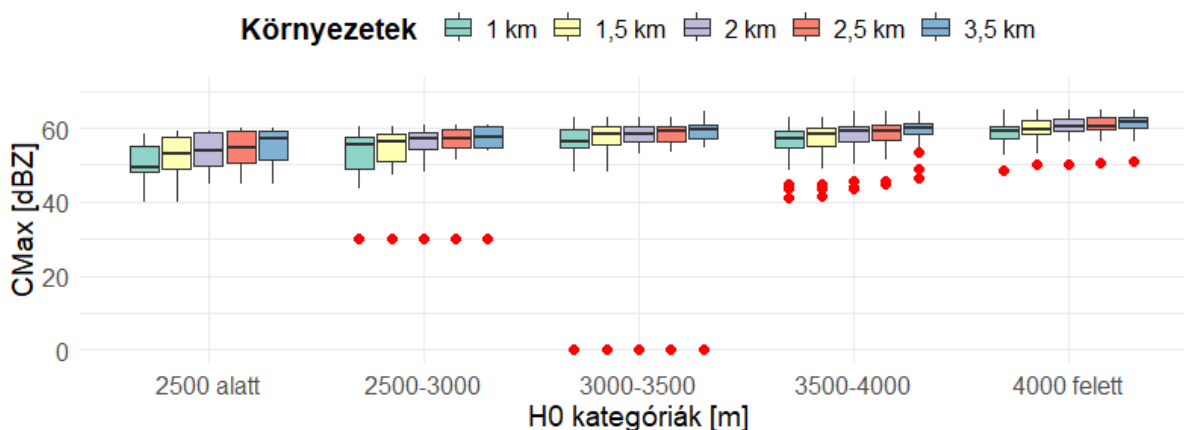
4.3. Jégesők környezeti jellemzői radarproduktumok alapján

A kapott radarproduktumokat arra is felhasználtam, hogy áttekintsem a jégesők környezeti jellemzőit. A vizsgálatot a különböző sugarú környezetekre (3.2.1. Szomszédsági koncepció) végeztem el, kivéve a 0,5 km sugarú kört, mivel sok esetben egyetlen radaros rácsponst sem tartozott hozzá. A kapott értékeket a H₀ magasság alapján osztályoztam *Baár et al.* (2024) vizsgálatához hasonlóan, annyi kiegészítéssel, hogy 3000 méter felett is több kategóriát alkalmaztam. Innentől a búzaszem és borsó méretű jég szemek bejelentéseire „kis jég szemek”, a legalább cseresznye méretűekére „nagy jég szemek” néven fogok utalni.

Először a kis jég szemekre néztem meg a CMax adatok eloszlását (13. ábra), majd a nagy jég szemekre (14. ábra). Utóbbit annak érdekében, hogy a károkat okozó jégesők környezeti jellemzőit is át tudjam tekinteni. Látható, hogy amennyiben H_0 (a 0 °C-os izoterma szintje) 2500 méter alatt helyezkedik el, a jégeső kialakulásához gyakran 40 dBZ körüli CMax értékek is elegendőek voltak. Ennek magyarázata, hogy a kialakuló, jellemzően kis méretű jég szemeknek nem volt ideje elolvadni, amíg elérték a földfelszínt. Ugyanis, ha megnézzük a nagy jég szemekre, akkor már az 50–60 dBZ értékek voltak jellemzőek, ugyanazon H_0 magasság mellett. Kétezer-ötszáz méter felett elmondható, hogy minél magasabban van a H_0 szintje, annál nagyobb CMax értékek jellemezték a jégesőt okozó zivatarokat. A nagyobb jég szemek esetén 4000 méteres H_0 felett már a 60 dBZ körüli értékek domináltak. Nagyobb sugarú környezet alkalmazásakor ugyan kissé nőttek a maximális CMax értékek, de jelentős eltérés nem tapasztalható.



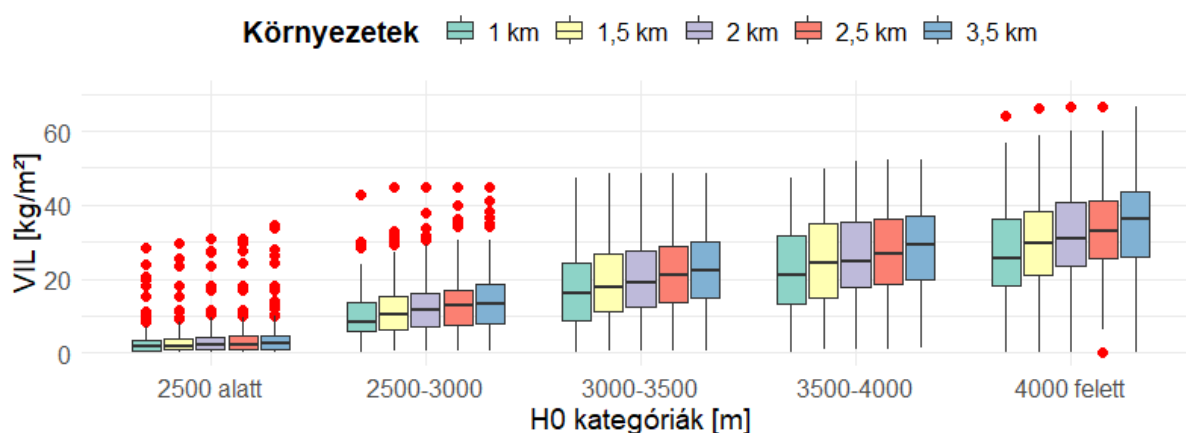
13. ábra: Kis jég szemekhez kapcsolódó maximális CMax értékek dobozdiagramja a H_0 értékek alapján kategorizálva a jégbejelentések különböző sugarú környezetei esetén.



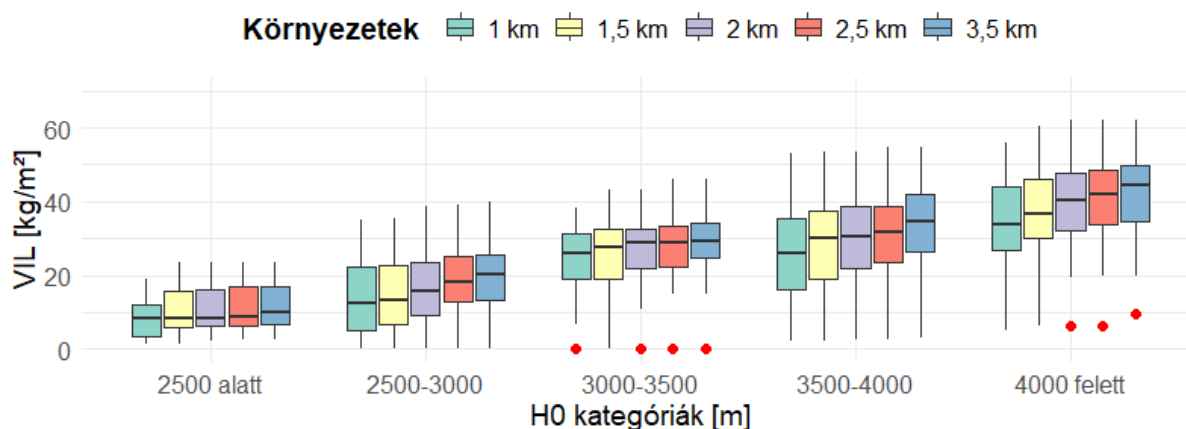
14. ábra: Nagy jég szemekhez kapcsolódó maximális CMax értékek dobozdiagramja a H_0 értékek alapján kategorizálva a jégbejelentések különböző sugarú környezetei esetén.

A 14. ábra alapján nagy jég szemek alakultak ki 0 és 30 dBZ esetén is, ami nem reális. A 0 dBZ értéket azért kaptam, mert a jégeső nem a bejelentett időpont előtti vagy utáni hat órában történt, hanem valamikor az időintervallumon kívül. A 30 dBZ magyarázata pedig, hogy a jégbejelentés helyszínétől 4–5 km-re vonult el az adott zivatarcella, vagyis ennél az esetben valószínűleg másik helyszínrre történt a bejelentés, mint ahol a jégeső volt. Ez a két példa jól mutatja a jégbejelentések szubjektivitását és az ellenőrzés szükségességét.

A VIL értékeket szintén megvizsgáltam a kis (15. ábra) és a nagy (16. ábra) jég szemekre is. A különbség itt is a 2500 méter alatti H_0 esetén volt a legnagyobb. Ha a kis jég szemeket tekintjük, akkor a víztartalom meglehetősen alacsony volt néhány kiugró esetet leszámítva, míg a nagyobb jég szemek esetén már nagyobb VIL érték volt szükséges. Itt fontos megjegyezni, hogy a kis jég szemek téves képet mutathatnak, mivel csak annyit tudunk, hogy búzaszem vagy borsó méretű jég biztosan esett. Ez viszont nem zárja ki azt, hogy a környéken előfordult nagyobb méretű jég is.



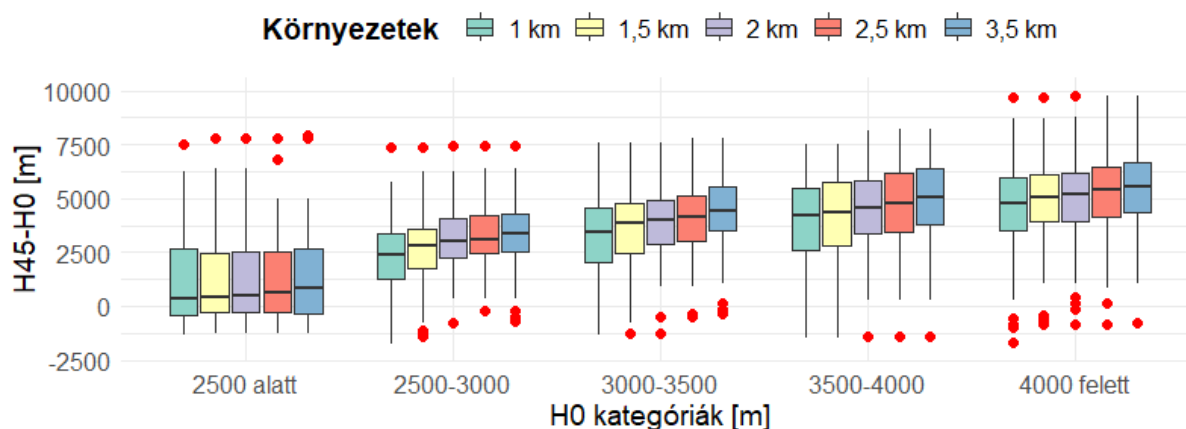
15. ábra: Kis jég szemekhez kapcsolódó maximális VIL értékek dobozdiagramja a H_0 értékek alapján kategorizálva a jégbejelentések különböző sugarú környezetei esetén.



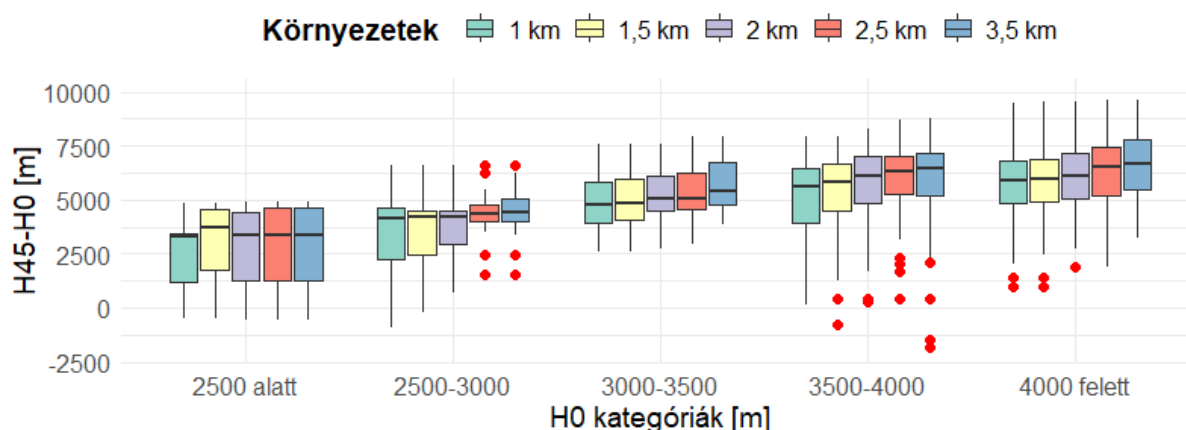
16. ábra: Nagy jég szemekhez kapcsolódó maximális VIL értékek dobozdiagramja a H_0 értékek alapján kategorizálva a jégbejelentések különböző sugarú környezetei esetén.

Látható az is, hogy a H_0 növekedésével egyre szélesedik a VIL értékek tartománya, és az értékek növekedő tendenciája is egyértelmű. Főként 4000 méter felett jellemzően nagy mennyiségű víztartalomra volt szükség. Kétezer-ötszáz méter alatt a különböző sugarú környezeteknél nem volt jelentős eltérés a VIL értékekben, de 2500 méter felett már látszik a szerepe. Négyezer méteres H_0 esetén például 10 kg/m^2 különbség volt az 1 és a 3,5 km sugarú környezet használatakor a VIL értékek mediánjában.

A $H_{45}-H_0$ értékeket nem tudtam megvizsgálni az összes jégbejelentésre, mivel több esetben nem is volt 45 dBZ feletti érték. Így az esetek száma csökkent (10%-kal) a korábbihoz képest. A $H_{45}-H_0$ értékeket is megvizsgáltam a kis (17. ábra) és a nagy (18. ábra) jég szemekre is. A negatív vagy alacsony értékeket akkor kaptam, mikor a legnagyobb dBZ értékek a fagyhatár környékén, vagy kicsivel annak szintje alatt fordultak elő.



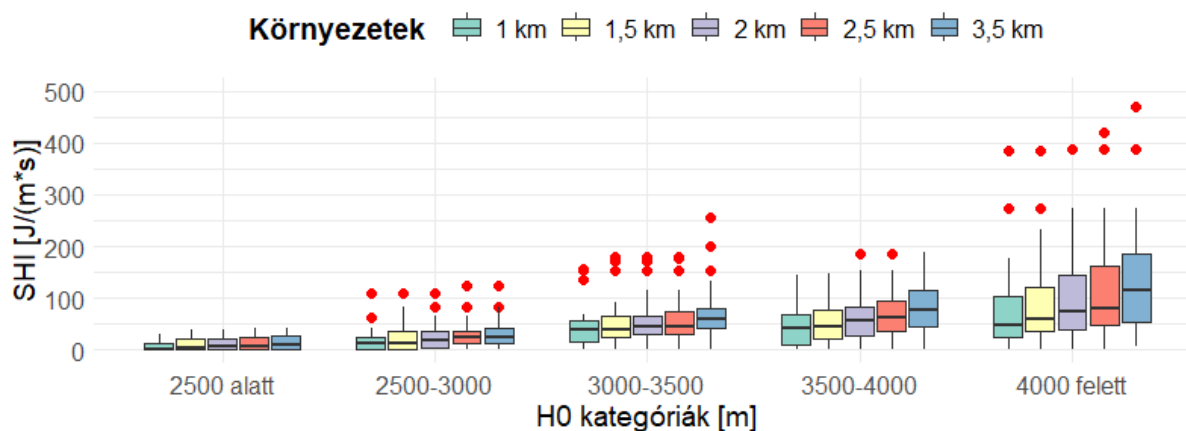
17. ábra: Kis jég szemekhez kapcsolódó maximális $H_{45}-H_0$ értékek dobozdiagramja a H_0 értékek alapján kategorizálva a jégbejelentések különböző sugarú környezetei esetén.



18. ábra: Nagy jég szemekhez kapcsolódó maximális $H_{45}-H_0$ értékek dobozdiagramja a H_0 értékek alapján kategorizálva a jégbejelentések különböző sugarú környezetei esetén.

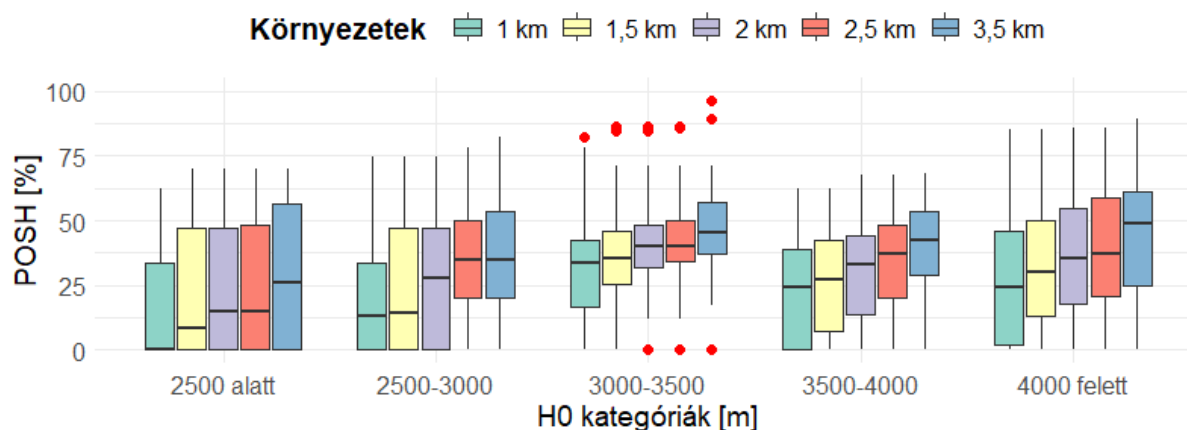
Látható, hogy jóval nagyobb $H_{45}-H_0$ értékek fordultak elő a nagy jég szemek esetén. Ennek oka, hogy ebben az esetben nagyobb volt annak a rétegnek a vastagsága, amely a jég eső-növekedés zónájának tekinthető. Fontos azt is látni, hogy nagyobb H_0 értékek esetén az olvadás zónája is nő, tehát adott méretű jég esőhöz alapvetően kissé nagyobb $H_{45}-H_0$ szükséges. Négyezer méter felett már 5000–7000 méter körüli $H_{45}-H_0$ volt jellemző. A környezetek szerepe itt is akkor mutatkozik meg, amikor 2500 méter feletti a H_0 , főként 3000 méter felett. Ugyanis ezek esetén már 1000–1500 méter körüli eltérés figyelhető meg az 1 és a 3,5 km sugarú környezet használatakor a $H_{45}-H_0$ értékek mediánjában. Szemben alacsony H_0 mellett, ahol nincs jelentős eltérés.

A veszélyes jég esőkre vonatkozó radarproduktumok (SHI, POSH, MESH) a 19 mm feletti jég szemekre lettek megalkotva, így én is csak a nagy jég szemekre vizsgáltam meg az értékeit. Az SHI index meglehetősen változatos képet mutatott az alkalmazott környezet függvényében (19. ábra). Ez összhangban van *Stržinar és Skok* (2018) jég es cella detektálásra kapott eredményeivel (2.5.1. Radar adatok felhasználási lehetőségei). A *Stržinar és Skok* (2018) által kapott értékek és a *Skripniková és Řezáčová* (2014) által kapott $60 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ küszöbérték azonban magasabbnak bizonyul az általam kapott értékekénél. Elsősorban alacsony H_0 értékek esetén jóval alacsonyabb SHI mellett is előfordult nemcsak jég eső, de nagy jég szemek is. Kétezeröttszáz méter alatt minden esetben, 2500–3000 méterig az esetek döntő többségében $50 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ alatti volt az SHI értéke a vizsgált környezettől függetlenül. Háromezer méter felett, elsősorban nagy sugarú környezet esetén viszont már az adatok nagy része $50 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ feletti értéket vett fel, 4000 méter felett pedig a $100 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ feletti értékek váltak dominánssá. Kijelenthető tehát, hogy az SHI index alkalmazhatóságában nagy szerepe van a H_0 magasságnak.



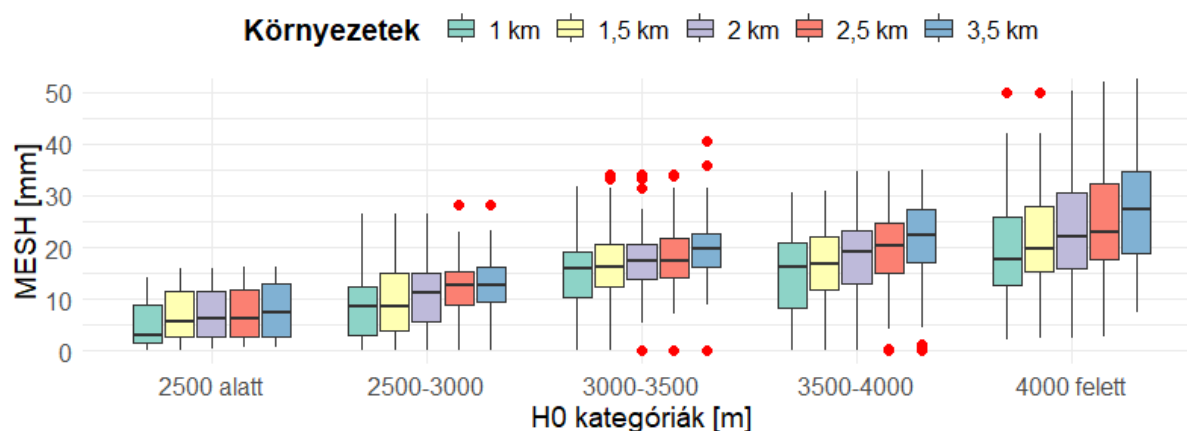
19. ábra: Nagy jég szemekhez kapcsolódó maximális SHI értékek dobozdiagramja a H_0 értékek alapján kategorizálva a jégbejelentések különböző sugarú környezetei esetén.

A POSH értéke függ a H_0 értékétől, így némileg kiküszöböli az SHI-vel kapcsolatos problémát. A (10) egyenletnek megfelelően ugyanis adott SHI mellett kisebb H_0 nagyobb POSH értéket ad, és fordítva. Ennek megfelelően látszik, hogy nincs jelentős eltérés a H_0 értékektől függően, csupán a 0-hoz közeli értékek száma csökken némileg (20. ábra). Az alkalmazott környezet viszont nagy jelentőséggel bír, 15–25% különbségek is vannak a POSH értékében. Azonban még a legnagyobb alkalmazott sugár esetén is elmondható, hogy már 25% POSH mellett is kialakultak nagy jég szemek, és csak ritkán volt szükség 60% feletti valószínűsége.



20. ábra: Nagy jég szemekhez kapcsolódó maximális POSH értékek dobozdiagramja a H_0 értékek alapján kategorizálva a jégbejelentések különböző sugarú környezetei esetén.

A (12) egyenletnek megfelelően a MESH csak az SHI függvénye, így a kapott értékek alakulása (21. ábra) is hasonló az SHI adatokhoz (19. ábra). Látható, hogy 2500 méteres H_0 alatt szinte kizárólag, 2500–3000 méteres H_0 esetén pedig az esetek nagy részében 1,5 cm alatti maximális jég szem méretet várt a MESH. Ez viszont ellentétben áll azzal, hogy nagy jég szemet (átmérő 1,5 cm felett) észleltek. Háromezer méter felett viszont már többnyire 1,5 és 3,5 cm-t kaptunk, tehát a MESH 3000 méteres H_0 alatt nem használható, felette viszont jobb becslést ad.



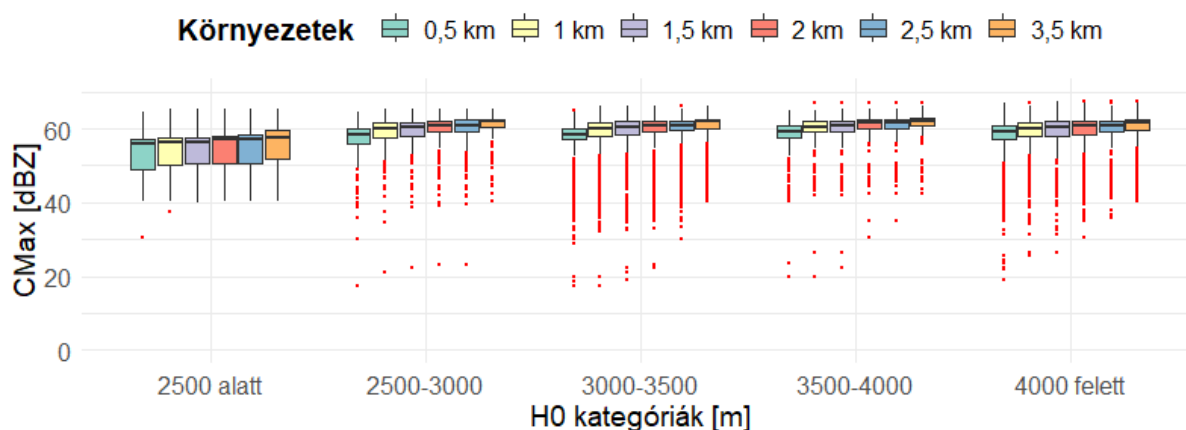
21. ábra: Nagy jég szemekhez kapcsolódó maximális MESH értékek dobozdiagramja a H_0 értékek alapján kategorizálva a jégbejelentések különböző sugarú környezetei esetén.

4.4. Jégkárok környezeti jellemzői radarproduktumok alapján

A jégbejelentések vizsgálata után a jégkárbejelentéseket jellemző radarproduktumokat is kielemeztem. A jégkárbejelentésekre még inkább igaz, hogy fontos az automatikus ellenőrzés, mivel csak 2024-ben 10516 bejelentés történt a különböző növénykultúrák jég okozta károsodására. Azonban ekkora számú bejelentést ellenőrizni még program segítségével is időigényes feladat, így egyelőre csak az említett 2024-es évet elemeztem. A vizsgálatot mind a hat különböző sugarú környezetre elvégeztem. A 0,5 km sugarú kör itt pontosan azt a területet jellemezte, ahol a jégkár keletkezett (3.3. Jégkárbejelentések vizsgálata). A kapott értékeket pedig ugyanúgy a H_0 magasság alapján osztályoztam az öt különböző magassági szintet felhasználva.

Első lépésként kiszűrtem azokat a bejelentéseket, amelyeknél még a legnagyobb (3,5 km) sugarú környezet esetén sem érte el a CMax a 40 dBZ értéket. Ilyenkor ugyanis minimális annak a valószínűsége, hogy károkozó méretű jég szemek alakuljanak ki. Ezzel a lépéssel 358 jégkárbejelentést szűrtem ki (esetek 3,4%-a). Ez a legtöbb esetben azt jelentette, hogy rossz napra történt a bejelentés. Megfigyelhető, hogy a kiemelkedő napok (bejelentések száma > 1000) utáni napokra több téves bejelentés is érkezett, amik feltehetőleg a korábbi napon történt káresemények. Például a legtöbb kárbejelentés június 1-re történt (3403 eset), de néhányat június 2-re jelenthettek be, ugyanis ezen a napon csupán a bejelentések 15%-a esetén érte el a legnagyobb CMax a 40 dBZ-t. A téves bejelentés mellett a másik lehetőség, hogy nem megfelelő kárnemre történt a bejelentés, vagyis valójában szél vagy felhőszakadás okozta a kárt.

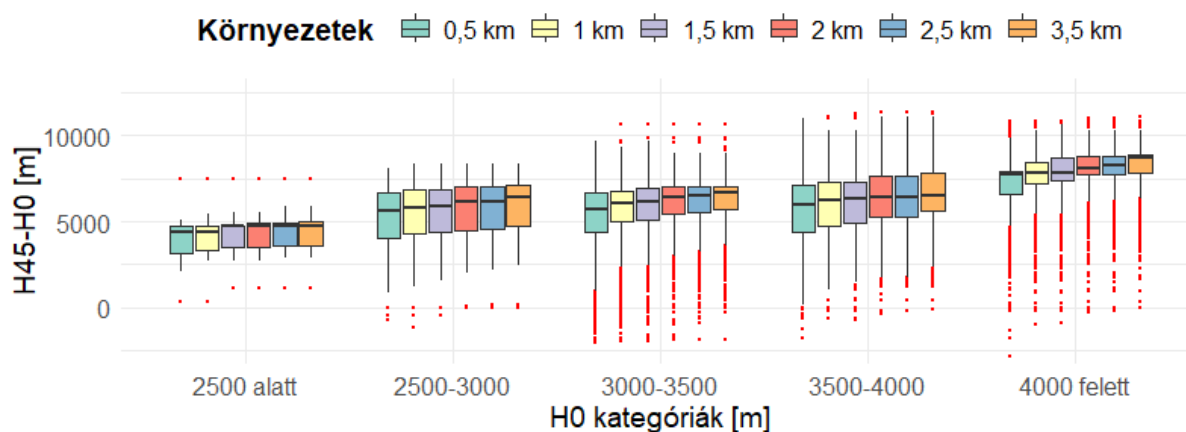
A jégkárok környezeti jellemzőinek megismeréséhez a jégbejelentésekhez hasonlóan megvizsgáltam a jellemző radarproduktumokat, elsőként a CMax értékekre (22. ábra).



22. ábra: A 2024-es jégkárbejelentésekhez kapcsolódó maximális CMax értékek dobozdiagramja a H_0 értékek alapján kategorizálva a jégkárbejelentések különböző sugarú környezetei esetén.

A 22. ábra nagy mértékben hasonlít a nagy jég szemekre kapott eredményre (14. ábra). Ezt vártam is, hiszen eleve úgy különítettem el a kis és nagy jég szemek kategóriát, hogy utóbbiba kerüljenek a károkozó méretűek. Látható, hogy 2500 méter alatt általában elegendő volt 50–60 dBZ a jégkárkhoz, de 2500 méter felett már a 60 dBZ körüli értékek domináltak. Az adatok nagy száma miatt viszont a kiugró értékek száma is jelentősen nőtt még a 40 dBZ szűrés ellenére is.

A $H_{45}-H_0$ értékek vizsgálatához további szűrésre volt szükség. Minden olyan jégkárbejelentést figyelmen kívül hagytam, amikor a legkisebb sugarú környezetre a legnagyobb CMax értéke 45 dBZ alatti volt. Itt nem alkalmazhattam a legnagyobb sugarú környezetre, mivel akkor lettek volna olyan bejelentések, melyeknél egyes környezetekre nincs értelmezve a $H_{45}-H_0$, egyesekre viszont van. Így az esetek száma csökkent (3,5%-kal) a korábbihoz képest. Az így kapott eredményt a 23. ábra mutatja.

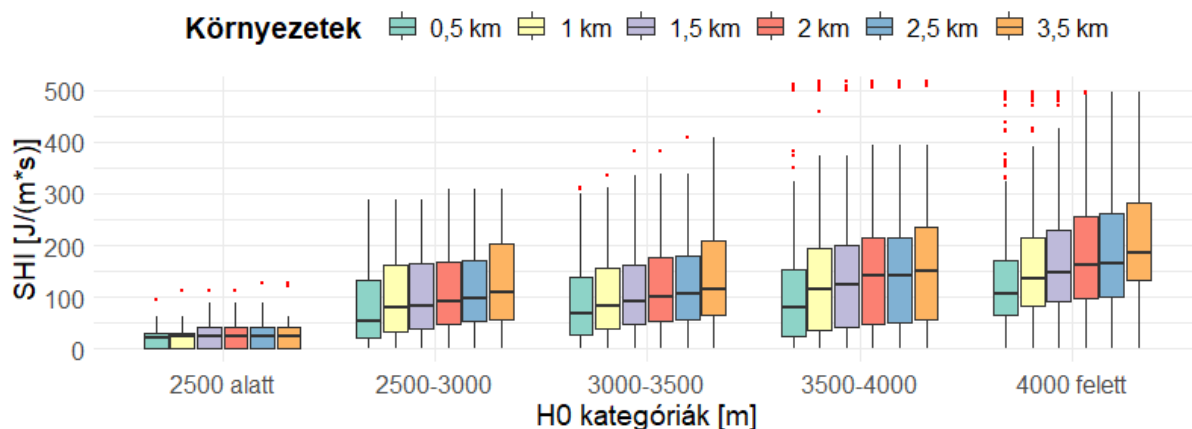


23. ábra: A 2024-es jégkárbejelentésekhez kapcsolódó maximális $H_{45}-H_0$ értékek dobozdiagramja a H_0 értékek alapján kategorizálva a jégkárbejelentések különböző sugarú környezetei esetén.

A H_0 kategorizálás szerepe itt is megmutatkozik, hiszen 2500 méter alatt inkább 2500–5000 méteres, 2500–4000 méter között 5000–7500 méteres, míg 4000 méter felett már 7500 méter feletti $H_{45}-H_0$ volt jellemző. Az értékekben ez némi eltérés a 18. ábra képest, ahol minden H_0 kategória esetén nagyjából 1000 méterrel kisebb értékek voltak jellemzőek. Tehát jégkár ugyan keletkezik olyan feltételek mellett is, ami a nagy jég szemek kialakulásának alsó határa, de a legtöbb kár magasabb értékek mellett jön létre. A környezetek szerepe a nagy jég szemekhez hasonlóan főleg nagyobb H_0 mellett nő meg, különösen 4000 méter felett.

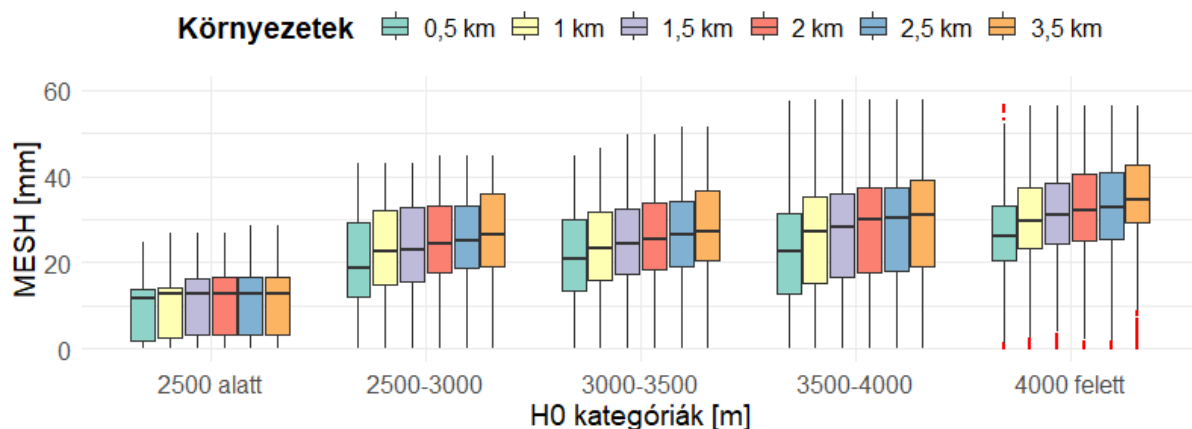
Az SHI radarproduktum akkor adhat nem 0 értéket, ha a CMax értéke 40 dBZ feletti, így ennél elegendő az elsőként alkalmazott szűrés az adatok ábrázolásához (24. ábra). Ahogyan korábban megállapítottam, az SHI index alkalmazása nagy mértékben függ a H_0 értékétől (19. ábra). Ez a jégkárk esetén is megmutatkozik abban, hogy 2500 méteres H_0 alatt, alkalmazott

környezettől függetlenül $50 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ alatti értékek is elegendőek, minden más esetben viszont inkább $50 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ feletti értékek szükségesek. Azonban az is látható, hogy főleg 3000 méter felett meglehetősen tág tartományban alakulnak az SHI értékei, ez már inkább a kialakuló jég szemek méretéről ad információt a MESH értéken keresztül, mintsem a kár tényéről.



24. ábra: A 2024-es jégkárbejelentésekhez kapcsolódó maximális SHI értékek dobozdiagramja a H_0 értékek alapján kategorizálva a jégkárbejelentések különböző sugarú környezetei esetén.

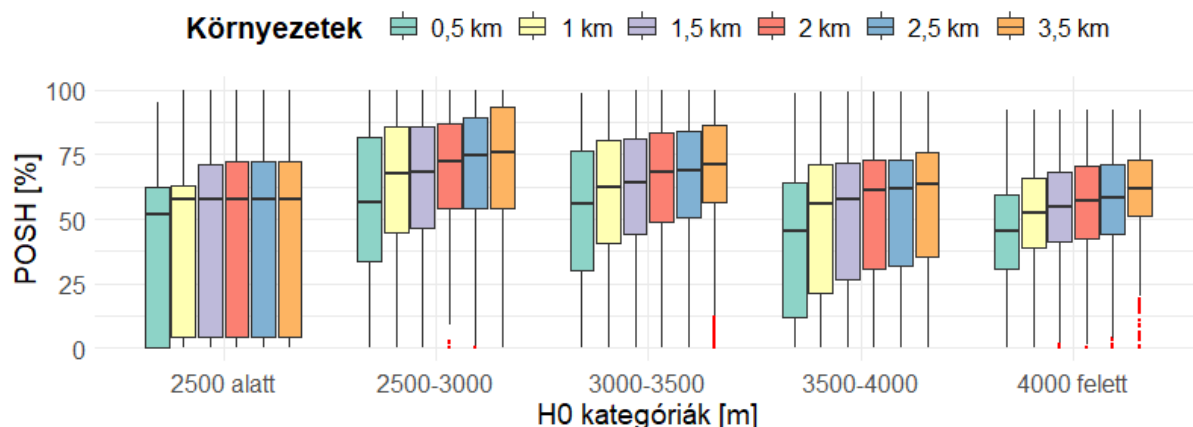
A MESH használatára korábban azt kaptam, hogy csak 3000 méter feletti H_0 esetén nyer értelmet (21. ábra), viszont a jégkárak eredményei (25. ábra) azt mutatják, hogy már 2500–3000 méterig is használható. Az viszont kijelenthető, hogy 2500 méteres H_0 alatt nem ad jó becslést a maximálisan várható jég szemméretre. Kétezer-ötszáz méteres H_0 felett a jégkárak jelentős részénél 2 és 4 cm közötti, néhány esetben 6 cm-hez közeli volt a várható legnagyobb jég szemméret.



25. ábra: A 2024-es jégkárbejelentésekhez kapcsolódó maximális MESH értékek dobozdiagramja a H_0 értékek alapján kategorizálva a jégkárbejelentések különböző sugarú környezetei esetén.

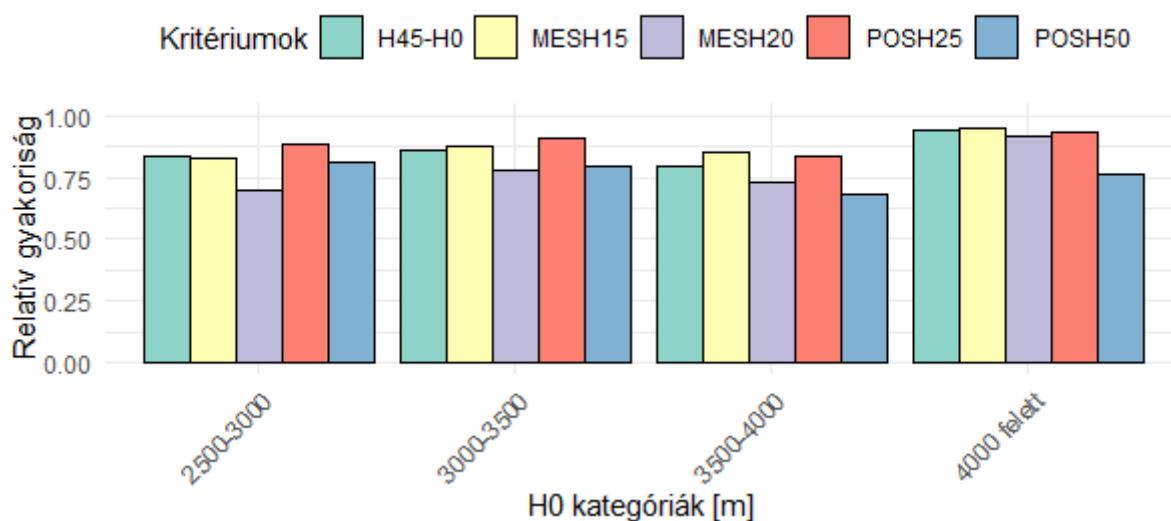
A képletében H_0 -tól függő POSH értékekről megállapítottam, hogy nagy mértékben függ a környezettől, és a legnagyobb környezet esetén is már 25% elegendő a nagy jég szemek kialakulásához. Ez 2500 méteres H_0 felett az esetek többségében teljesült a jégkárak esetén is

(26. ábra). Kissé meglepő, hogy a legnagyobb POSH értékeket 2500–3000 méteres H_0 esetén kaptuk. Ez azzal magyarázható, hogy a (10) egyenletnek megfelelően, adott SHI mellett kisebb H_0 nagyobb POSH értéket ad, ahogyan korábban is említettem. A POSH nagy mértékű függése a környezettől a jégkároknál is megfigyelhető, továbbá 2500 méteres H_0 alatt gyakorlatilag használhatatlan az értékek tág tartománya miatt.



26. ábra: A 2024-es jégkárbejelentésekhez kapcsolódó maximális POSH értékek dobozdiagramja a H_0 értékek alapján kategorizálva a jégkárbejelentések különböző sugarú környezetei esetén.

A jégkárokat jellemző radarproduktumok megismerése után a végső célom becslést adni, hogy valóban jégeső okozhatta-e az adott jégkárbejelentést. Ehhez a H_0 kategóriák szerint különböző kritériumokat alkalmaztam és megvizsgáltam, hogy az egyes kritériumok az esetek hány %-át fedik le. A célom az volt, hogy a legtöbb olyan esetet megtaláljam, amikor kárt okozó jégeső hullott, így a legnagyobb (3,5 km sugarú) környezetet vettem figyelembe. Először megvizsgáltam, hogy a különböző kritériumok a jégkárok mekkora részét fedik le (27. ábra).



27. ábra: Jégeső kritériumok teljesülésének relatív gyakorisága a 2024-es jégkárbejelentések 3,5 km sugarú környezetében H_0 értékek alapján kategorizálva.

Az első alkalmazott kritérium a $H_{45}-H_0$, melynél a küszöbértéket a 18. ábra eredményei alapján rendre 4000, 4500, 5000, 5500 méterben határoztam meg az egyes H_0 kategóriák esetén. A másik négy kritérium a MESH15 ($MESH > 15 \text{ mm}$), a MESH20 ($MESH > 20 \text{ mm}$), a POSH25 ($POSH > 25\%$) és a POSH50 ($POSH > 50\%$), H_0 kategóriától függetlenül. A POSH és a MESH nem alkalmazható megfelelően 2500 méter alatti H_0 esetén (20. ábra és 21. ábra), továbbá csupán a bejelentések elhanyagolható részénél (0,1%) volt ekkora a H_0 értéke, ezért ezeket ebben a vizsgálatban figyelmen kívül hagytam.

A 27. ábra alapján megállapítható, hogy 2500–3500 méteres H_0 mellett a POSH25, 3500 méter felett a MESH15 fedi le a jégkárok legjelentősebb részét. A legkisebb részét pedig 2500–3500 méteres H_0 mellett a MESH20, 3500 méter felett a POSH50 fedi le. A $H_{45}-H_0$ 4000 méternél nagyobb H_0 mellett fedi le a bejelentések legnagyobb hányadát, 3500–4000 méteres H_0 esetén a legkisebb részét.

Utolsó lépésként megszámoltam, hogy a jégkárbjelentések közül hány esetben teljesült a $H_{45}-H_0$, a POSH25 és a MESH15 kritériumok közül legalább az egyik. A 10140 bejelentésből ($H_0 > 2500$ méter és $C_{Max} > 40 \text{ dBZ}$ alapján lett leválogatva) 9321 esetben teljesült legalább az egyik kritérium. Tehát ezeknek a kárbejelentéseknek kb. 92%-a esetén valóban előfordult károkozó jég szemeket produkáló jégeső (legalábbis amennyiben az általam alkalmazott feltételek helyesek). További vizsgálatot igényel, hogy a maradék 8%-ról is állítani lehessen bármit.

Fontos megjegyezni, hogy a kritériumok megállapításakor nem támaszkodtam olyan adatokra, amikor nem történt jégkárbjelentés. Ezáltal a kritériumokra vonatkozóan pontosabb eredmények érhetők el, azonban ez már túlmutat a dolgozat jelenlegi témáján.

Összefoglalás

A dolgozatban a jégeső detektálásának különböző módszereit, elsősorban a radaros jégdetektálást vizsgáltam, és rávilágítottam az előrejelzés nehézségeire. A kihívás abban rejlik, hogy nehéz pontosan meghatározni a jégesők múltbeli tér- és időbeli eloszlását, valamint a jégeső kialakulásához vezető feltételek sokfélesége miatt nem ismert egyértelmű kritériumrendszer az előrejelzéshez. A jégesők hazai vizsgálatának történetét áttekintve bemutattam, hogy napjainkban hogyan történik a jégbejelentések és jégkárok feldolgozása.

Elvégeztem a jégbejelentések statisztikai vizsgálatát, amelynek során megállapítottam, hogy a károkat okozó jégesők napon belüli maximuma két órával később következik be, mint az összes jégeső maximuma. Fontos tanulság volt, hogy az emberek által közölt információk szubjektivitása pontatlansághoz vezethet, ami megnehezíti ezek automatizált feldolgozását. A jégesemények időpontjának pontatlan behatárolása akadályozza annak automatikus meghatározását, hogy melyik zivatarcella okozta a jégesőt. Ezt a problémát részben megoldottam egy saját fejlesztésű programmal, amely radarproduktumok segítségével 20 perces időintervallumot határoz meg a jégeső bekövetkezésére. Vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy az egyes radarproduktumok időbeli maximuma általában 5–10 perccel megelőzi a jégeső kezdetét az adott területen.

A jég- és jégkárbejelentések elemzése során megvizsgáltam a radarproduktumok maximális értékeit a H_0 alapján kategorizálva. Ezeket a bejelentések különböző sugarú környezeteire számítottam ki a szomszédsági koncepció alapján. Általánosságban megállapítottam, hogy jelentős eltérés tapasztalható a tavaszi-őszi, köztes és nyári időszakokban kialakuló jégesők környezetében mérhető radarproduktumok között. Az elemzés során külön figyelmet fordítottam a veszélyes jégesők (19 mm-nél nagyobb jég szemek) környezetére vonatkozó radarproduktumok számítására, hogy jobban elkülönítsem a károkozó jégesők jellemzőit. A vizsgálat célja az volt, hogy automatikusan megállapítható legyen, okozhatott-e jégeső károkat egy adott mezőgazdasági területen. A 2024-es jégkárbejelentések 92%-ában arra jutottam, hogy valóban előfordulhatott károkozó jégeső az adott területen.

Jövőbeli célkitűzésem, hogy pontosabb kritériumrendszert dolgozzak ki a veszélyes jégesőket és jégkárokat okozó zivatarok elkülönítésére. Ezen kritériumok felhasználásával terveim között szerepel a jégbejelentésekhez és jégkárokhoz kapcsolódó radarproduktumok menetének összehasonlítása a villámtevékenység adataival (például villámsűrűség az érintett területeken). Emellett célom a hazai jégesők és a különböző villámtípusok közötti összefüggések feltárása.

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt szeretném megköszönni Szobonya Nikolettának és Kocsis Áronnak, hogy biztosítottak számomra minden, a JÉGER-rel kapcsolatos adatot és eszközt, amire a vizsgálatok elvégzéséhez szükségem volt. Köszönöm továbbá a kérdéseimre adott részletes válaszokat, a gyakori megbeszéléseket, amikor elakadtam, hogy hogyan kellene tovább haladni. 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 mindig megtalálhattam a kérdéseimmel. Köszönöm a családomnak és a barátaimnak a türelmüket, és hogy különféle, akár láthatatlan módokon járultak hozzá a dolgozat sikeres elkészültéhez.

Irodalomjegyzék

- 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:VDAAH1>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1997)012<0473:VDAAH1>2.0.CO;2)
- 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)
- Baár, P., Csirmaz, K., Kelemen, T., 2024: A jégeső előrejelzés verifikációja. *Légkör: az Országos Meteorológiai Intézet szakmai tájékoztatója* 69(1), 41–47.
- 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>
- 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.
- 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>
- Götz, G., Mészáros, E., 1968: A jégesők gyakoriságának területi eloszlása a nyári félévben Magyarországon. *Időjárás* 72(1), 46–54.
- Geresdi, I., 2007: *A légköri konvekció*. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 18–20.
- 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)
- Héjas, E., 1898: *A zivatarok Magyarországon az 1871-től 1895-ig terjedő megfigyelések alapján*. Királyi Magyar Természettudományi Társulat, Budapest, 174 p.
- Holleman, I. 2001: *Hail detection using single-polarization radar*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt, The Netherlands, 72 p.
- Horváth, Á., 2007: *A légköri konvekció*. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 4–17.
- 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>
- 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>
- 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>
- Markowski, P., & Richardson, Y., 2010: *Mesoscale meteorology in midlatitudes*. Wiley-Blackwell, Penn State University, University Park, PA, USA, 407 p.
- Mason, B. J., 1971: *The Physics of Clouds*. Clarendon Press, Oxford, UK, 671 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>
- Pilorz, W., Zięba, M., Szturc, J., & Lupikasz, 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>
- Skripniková, K., & Řezáčová, D. 2014: Radar-based hail detection. *Atmospheric Research* 144, 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.06.002>
- 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>
- Stumpf, G. J., Smith, T. M., & Hocker, J., 2004: New hail diagnostic parameters derived by integrating multiple radars and multiple sensors. In *Preprints, 22nd Conf. on Severe Local Storms, Hyannis, MA, Amer. Meteor. Soc. P* (Vol. 7).
- 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>
- 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>
- Wirth, E., 1984: Jégesőelhárítás Magyarországon. *Időjárás* 88(2), 57–85.
- Wirth, E., Zakócs, J., Földvári, J., 1985: *Jégesők, jégkárok, védekezés, biztosítás*. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 222 p.
- 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 – essl.org - Vision, Mission, and Strategy of ESSL] <https://www.essl.org/cms/vision-mission-and-strategy-of-essl/> (utoljára megnyitva: 2024.11.25.)
- [2 – essl.org - News] <https://www.essl.org/cms/hail-record-broken-again-19cm-hailstone-confirmed-in-italy/> (utoljára megnyitva: 2024.11.25.)
- [3 – met.hu - Radar ismertető] https://www.met.hu/ismertetok/radar_ismerteto.pdf (utoljára megnyitva: 2024.11.17.)

Függelék – saját eredmények

1. A megoldott tudományos kérdés:

- Automatizált, hatékony módszert dolgoztam ki nagy mennyiségű jég- és jégkárbejelentés feldolgozására, amely segíthet a jégeső események jobb azonosításában.

2. Alkalmazott módszerek:

- A jégbejelentés, jégkárbejelentés és H_0 adatokat Excel segítségével hoztam R program által feldolgozható formára.
- A jégbejelentések statisztikai vizsgálatát Excelben végeztem el, de az ábrákat R program segítségével készítettem el.
- Az adatok beolvasását, egyeztetését, a radarproduktumok számítását, az eredmények kiértékelését és az ábrák készítését általam megírt R programkód segítségével végeztem el.
- Az SHI elméleti képlete alapján én határoztam meg a gyakorlatban történő számításhoz szükséges lépéseket.

3. Kapott eredmények:

- Hazai jégesők éven belüli és napi eloszlását határoztam meg, ezek alapján a károkat okozó jégesők napon belüli maximuma két órával követi az összes jégeső napon belüli maximumát.
- Megállapítottam, hogy a jégbejelentések időpontjai gyakran eltérnek a valós jégesemény időpontjától, így 20 perces időtartamot adtam a bejelentett jégesők valós időpontjára.
- A kapott adatok alapján arra jutottam, hogy az egyes radarproduktumok időbeli maximuma a jégbejelentés környezetében 5–10 perccel megelőzi a jégeső kezdetét.
- Átfogó képet adtam a jégesők és jégkárak környezeti jellemzőiről különböző radarproduktumok segítségével.
- Meghatároztam a nagy jégzemeket okozó zivatarok környezeti jellemzőit és ennek segítségével becslést adtam arra, hogy valóban jégeső okozhatta-e az egyes jégkárokat.
- 2024-re vonatkozóan a jégkárbejelentések 92%-a esetén arra jutottam, hogy valóban előfordulhatott károkozó jégeső az adott területen.