

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék

**A tapadó hó statisztikus klimatológiai vizsgálata és
előrejelzési lehetőségei**

Diplomamunka



Készítette:

Gulyás Krisztina

II. éves Meteorológus MSc. Éghajlatkutató szakirányos hallgató

Témavezetők:

Kolláth Kornél

Országos Meteorológiai Szolgálat

Repülésmeteorológiai és
Veszélyjelző Osztály

Somfalvi-Tóth Katalin

Országos Meteorológiai Szolgálat

Időjárás-előrejelző Osztály

Belső konzulens:

Dr. Havasi Ágnes

ELTE-TTK Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2012

Tartalomjegyzék

1.	<i>Bevezetés</i>	3
2.	<i>Szakirodalmi kitekintés</i>	5
3.	<i>Fizikai és meteorológiai háttér</i>	8
4.	<i>Téli károk a hazai erdőkben</i>	11
5.	<i>A tapadó hó felhalmozódásának matematikai leírása</i>	13
5.1	<i>A zúzmaramérés általános jellemzése</i>	13
5.2	<i>Sundin és Makkonen módszere</i>	14
5.3	<i>Poots által használt módszer</i>	15
6.	<i>Felhasznált adatok</i>	17
7.	<i>Statisztikus klimatológiai vizsgálatok</i>	18
7.1	<i>A tapadó hó gyakorisága Magyarországon</i>	18
7.2	<i>Tapadó hó kialakulása az egyes makroszinoptikus helyzetekben</i>	22
7.3	<i>A lerakódások víztartalma</i>	28
8.	<i>Előrejelzési lehetőségek</i>	32
8.1	<i>Modellezés</i>	33
8.2	<i>Esettanulmányok</i>	41
8.2.1	<i>Az 1999. november 19-20. havazás vizsgálata</i>	41
8.2.2	<i>Az 1999. december 28-29. havazás vizsgálata</i>	48
9.	<i>Összegzés</i>	53
10.	<i>Köszönetnyilvánítás</i>	55
11.	<i>Mellékletek</i>	56
12.	<i>Irodalomjegyzék</i>	58

1. Bevezetés

Hazánkban nem elhanyagolhatóak a különböző típusú jeges lerakódások. Egy-egy nagyobb súlyú jégbevonat a fák ágain vagy a távvezetékeken óriási problémákat képes okozni. Az északi országokban és a magashegységekben főként a zúzmara és a nedves tapadó hó okozza a legtöbb kárt (Sakakibara et.al., 2007). Hazánk éghajlati adottságainak köszönhetően viszonylag gyakran fordul elő mindkét jegesedési típus, de a tapadó hó esetenként jelentős károkat is okozhat. Az utóbbi évek egy-egy példája ismét rávilágított a jelenség fontosságára, melyeket részletesebben is szeretnénk bemutatni.

Leírás alapján a hópolyhek részleges olvadásával kialakuló, a tereptárgyakon igen jól megtapadó jegesedési típusról van szó, melynek két fajtája a vizes tapadó hó és a fagyott tapadó hó. Az erős tapadás miatt, a felsővezetékeken megjelenő hó egyes esetekben különösen veszélyes is lehet.

Példaként tekintsük a 2009. január 27-28-án Vas és Zala megyékben történt eseményeket. Ekkor olyan időjárási helyzet alakult ki, mely hatására a felsővezetésekre tapadt vizes hó olyan mértékű tehertöbbletet jelentett, hogy a villamosvezetékek elszakadtak, illetve oszlopok dőltek ki. Az EON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt. ellen pedig vizsgálat indult, mivel több száz település maradt áram nélkül, és ezt a problémát nem tudták időben orvosolni.

Az eset okán az EON és az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársai szorosabb együttműködés kialakítására törekedtek a tapadó hó kérdéskörével kapcsolatban. A kezdeményezés célja, hogy a jövőben hatékonyabban lehessen fellépni a hasonló helyzetek ellen, és ennek keretében az OMSz valószínűségi előrejelzéseket, valamint riasztást készítene az áramszolgáltatók felé.

Az előrejelzési módszerek fejlesztéséhez, illetve a klimatológiai sajátosságok jobb felméréséhez egyaránt szükséges a tapadó hó kialakulási körülményeinek minél pontosabb megismerése, ezért a dolgozatban szeretnénk ismertetni a nedves, tapadó hó fizikáját, meteorológiai hátterét. Ez segítséget nyújthat a jövőben esetlegesen bekövetkező károk kockázatáról. Ezenkívül az elmúlt években a magyarországi zúzmaramérő rendszer által regisztrált tapadó havas felhalmozódások elemzésével képet kaphatunk az egyes időjárási helyzetektől való függésre. Ehhez a Péczely-féle makroszinoptikus osztályozás jól alkalmazható, amely tizenhárom kategória alapján jellemzi hazánk időjárási helyzetét. A statisztikus klimatológiai vizsgálatok eredményeiből a jelenség gyakoriságáról, a

lehetséges veszély mértékéről és a fokozottabban veszélyeztetett területekről nyerhetünk információt.

Végül egy-egy kiemelt káresetet is részletesen bemutatunk, mivel néhány kiválasztott eset jó alapot szolgál a szinoptikus háttér vizsgálatához. Az esettanulmányokban két nemzetközi módszerrel mutatjuk be a tapadó hó tömegének időbeli változását. Minden esetben a számított eredményeket mért zúzmara adatokkal hasonlítjuk össze. Amennyiben nem áll rendelkezésünkre zúzmara adat, akkor becslést alkalmazunk a felhalmozott hó mennyiségére.

Az első módszer Sundin és Makkonen (1998) munkája alapján készült. Ennek alapja, hogy egy vezetékre rakódó hó tömege egy meghatározott kritikus hőmérsékleti tartomány esetén csak a csapadék intenzitásának a függvénye. A második módszer Poots (1996) munkájának részletes vizsgálatával készült. Ekkor a szél hatását is figyelembe vesszük.

Ezek a módszerek további fejlesztés alatt állnak, hogy segítségével az előrejelzett hőmérsékleti, csapadék- és széladatok alapján tapadóhó-előrejelzéseket is készíthessünk az áramszolgáltatók számára. Ugyanakkor nemcsak az áramszolgáltatóknak okoz gondot ez a jelenség, hanem a hazai erdőkben is egyre több téli kár kerül feljegyzésre. Több publikáció is található a hazai erdőket fenyegető veszélyes időjárási jelenségekről, amelyekben kiemelten szerepelnek a téli félévben jelentkező veszélyek (Hirka et al., 2008, Hirka et al., 2010). Vizsgálatainkban ezért az Erdővédelmi Figyelő-Jelzőszolgálati Rendszer adatai is igen hasznosnak bizonyultak, mivel 1962 óta regisztrálják a különböző meteorológiai jelenségek okozta károkat, beleértve a havazás okozta kárt is.

A bekövetkezett károk elemzésével olyan információt kaphatunk, mely segítségével a jövőben pontosabb előrejelzések, megalapozottabb veszélyjelzések készülhetnek, ami hozzájárulhat az anyagi károk mérsékléséhez, az emberi élet, javak védelméhez.

2. Szakirodalmi kitekintés

Mielőtt rátérnénk a hazai károk elemzésére, nézzük meg, hogy pontosan milyen problémával is állunk szemben. A nemzetközi szakirodalomban több publikáció jelent meg az említett jelenség kapcsán. Ezek főként a matematikai leírás és a modellezhetőség nehézségeiről tesznek említést. Ezek alapján a tapadó hó előrejelzése egy még megoldatlan, vagy csak részben megoldott nemzetközi probléma.

Számos nemzetközi szakirodalmi forrás található a légköri jegesedés témakörében. Ezek között több mérnöki megközelítésű dokumentum is készült az időjárásnak kitett eszközök, pl. az elektromos vezetékek tervezése és karbantartása miatt. Ilyen az *Atmospheric Icing of Structures* című ISO dokumentum, mely igen részletesen foglalja össze a jegesedéssel kapcsolatos problémákat. Ez az első olyan nemzetközi szabvány, amely leírja az egyes szerkezetek jégterhelésére adott reakcióit, és a különböző jegesedési típusokat részletesen bemutatva írja le azok hatásait a különböző eszközökre.

Ezen lerakódások klimatológiájáról, valamint előrejelzési módszereiről több kutatócsoport kiadványai adnak leírást. Ilyen a *COST 727 Atmospheric Icing on Structures, Measurements and Data Collection on Icing* (Fikke et al., 2007) kiadványa is. Ebben az európai országokban leggyakrabban előforduló jegesedési fajták adataitól kezdve, a modellezésen át, az előrejelzések verifikációjáig szinte minden megtalálható a témán belül. Meg kell említenünk a CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques) munkásságát is, mivel igen széleskörű kutatásokat végez. Főként mérnökökből és kutatókból álló csoportjuk a francia ipar elektromos vezetékhálózatának védelmét tűzte ki céljául (www.cigre.org/).

Magáról a tapadó hó veszélyeiről, a jelenség fizikai hátteréről és a modellezhetőségről a huszadik század második felétől jelennek meg átfogó tanulmányok. A problémáról természetesen azon országok neves kutatói írnak, ahol ez a jelenség rengeteg problémát okoz, ilyenek például a skandináv országok (Svédország, Norvégia, Finnország, Izland), Kanada, USA, valamint Japán is.

A Japánban végzett kutatások a tapadó hó fizikai hátteréről és modellezéséről felbecsülhetetlen értékűek. G. Wakahama *Snow Accretion on Electric Wires and Its Prevention* (1977) című munkája jól összegzi, hogy mekkora károkat képes okozni a jelenség, és bemutatja a modellezés problémáit. Y. Sakamoto összegző cikke a *Snow Accretion on Overhead Wires* (2000) nemcsak a kutatások eredményeiről szól, hanem kísérletek is olvashatók benne, melyek során a kialakulás körülményeit szimulálták. Egy

olyan kísérleti laboratóriumban végeznek kutatásokat, ahol mérik az egyes időjárási elemek hatását, különösen a szél hatását a nedves hó felhalmozódására, ezek az úgy nevezett szélcsatornás kísérletek.

A skandináv területek jeles képviselői E. Sundin és L. Makkonen. Munkájuk az *Ice Loads on a Lattice Tower Estimated by Weather Station Data* (1998), amely alapját képezte a Magyarországon elkezdett modellezésnek is. Makkonen számos más összegző cikke is, pl. *Models for the Growth of Rime, Glaze, Icicles and Wet Snow on Structures* (2000) a nedves tapadó hó modellezésében igen jelentős. Fontos megemlíteni E. P. Lozowski nevét is, aki jegesedési modellek fejlődését mutatja be az elmúlt ötven év folyamán *Fifty Years of Progress in Modelling the Accumulation of Atmospheric Ice on Power Network Equipment* (2005) című munkájában. Jelenleg ezen a területen a norvég B. E. Nyagaard végez kísérleti WRF futtatásokat biztató eredményekkel. Ezekről a *Using a NWP Model to Simulate In-cloud Atmospheric Icing Episodes* (2007) tanulmányban részletesen is olvashatunk.

Kanadában dolgozik Prof. M. Farzaneh, akinek *Atmospheric Icing of Power Networks* (2008) című könyve ad pontos képet mind a légköri jegesedések veszélyeiről (a tapadó hó vezetékre gyakorolt hatásáról is), mind a matematikai leírásról és a modellezési lehetőségekről. Ezen kívül egy rendkívül széleskörű összefoglaló munka az *Atmospheric Icing and Meteorological Variabls - Full scale experiment and testing of models* (Drage, PhD dolgozat, 2005). Ebben az MM5 modellel készített futtatások tesztelése, verifikációja található meg a különböző földrajzi adottságokkal rendelkező területeken (pl. hegyvidéken, sarkvidék parti területén).

Az Amerikai Egyesült Államokban a téma jeles képviselője G. Poots akinek az *Ice and Snow Accretion on Structures* (1996) című munkája szintén hatással volt a hazai modellezésre és az előrejelzési kísérletekre. Könyvében az elmúlt tíz év kutatási eredményei találhatóak meg, melyben mind meteorológiai, mind mérnöki szempontból vizsgálta az egyes jegesedési típusokat, a nedves tapadó havat is beleértve. A részletes matematikai leírás segítségével a numerikus modellezés lehetőségeiről is beszámol.

Egy nemzetközi konferenciáról is említést kell még tennünk ebben a témakörben, méghozzá az IWAIS-ról (International Workshop of Atmospheric Icing on Structures). A konferencia sorozatot 1982 óta 2-3 évente szervezik meg, ahol a legfrissebb kutatási eredményekről számolnak be a jegesedés témakörének szakértői (www.iwais2009.ch/). A legutóbbi konferencia 2011-ben Kínában került megrendezésre.

Magyarországon az 1950-es évektől foglalkoznak a jegesedés problémájával a villamos távvezetékek rongálódása miatt. A legjelentősebb munka Csomor Mihály nevéhez köthető, aki munkatársaival létrehozta a ma is használatban lévő zúzmaramérő műszert, illetve hálózatot 1966-ban. Az ő munkásságából számos cikk hozható fel példaként, amelyek a Léggör, valamint az Időjárás című folyóiratokban jelentek meg az 1960-as évek végétől az 1980-as évek közepéig. Ilyen cikkek: *A hazai zúzmaramérések eredményei* (Léggör, 1979. 4.sz. 10-14.) vagy *A magyarországi zúzmaramérések első eredményei* (Időjárás, 1972. 3. sz. 151-159.). Kutatásai nemcsak a zúzmara megfigyelésére és mérésére korlátozódtak, vizsgálta még a zúzmara képződése után kialakuló klimatikus viszonyokat is (Léggör, 1982), valamint a lerakódások meteorológiai folyamatát és hatását a távvezetésekre (Léggör, 1983).

Speciálisan a tapadó hó hazai kutatásában Kolláth Kornél és Somfalvi-Tóth Katalin munkája emelhető ki. Több tanulmány és cikk is készült, melyek egy-egy kiemelt káreset tanulmányozása alapján mutatják be a terület fontosságát pl. *A tapadó hóteher mennyiségi előrejelzése* (Léggör, 2009). Kutatásuk eredményeit az IWAIS 2009-es Svájcban rendezett konferenciáján is bemutatták.

Egy-egy nagyobb káresemény után az EON felkérésére tanulmányokat készít az OMSz. Egy ilyen megkeresés eredményeként született *A 2009. január 27-28-án kialakult időjárási helyzet elemzése Vas és Zala megye területén* című dokumentáció (Lakatos et. al., 2009). Ebben az aktuális időjárási helyzet átfogó vizsgálatán kívül pontos kárelemzés és statisztikus klimatológiai vizsgálatok is megtalálhatóak. Egy másik hasonló vizsgálat eredménye alapján készült *A 2009. február 8-9-én kialakult időjárási helyzet elemzése Győr-Moson-Sopron, Fejér, Komárom-Esztergom és Veszprém megye területén* című tanulmány (Lakatos et. al., 2009).

A hazai kutatások szintén jeles képviselője Krómer István, akinek nemzetközi publikációi jól összefoglalják a magyarországi jegesedések fontosságát, úgymint a *Hungarian icing activity survey* (1995), vagy a *Probability Based design Approach to Climatic Loadings in Hungary* (1988).

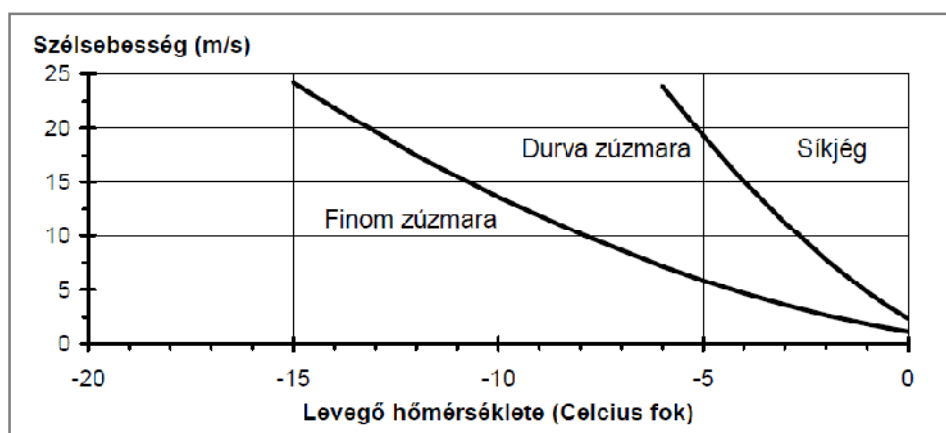
3. Fizikai és meteorológiai háttér

A légköri jegesedési típusok megismerésének és előrejelzésének mind a felszínközeli, mind a magasabb légrétegekben nagy gyakorlati jelentősége van. Széleskörű kutatások folynak ebben a témában, hiszen egyre több helyen épülnek szélérőműparkok, egyre magasabban láthatunk antennatornyokat, és egyre jobban befedik az országokat az elektromos távvezeték-hálózatok. Ezen építmények megrongálódásáért gyakran felelős a téli félévben a lerakódott jég, a tapadó hó vagy a zúzmara tömege (Tóth, 2007).

Légköri jegesedésről beszélünk, ha mikro-, vagy makrocseppek által jeges lerakódás keletkezik a felszín tereptárgyain. A különböző típusok kialakulási feltételei és körülményei eltérőek lehetnek, néhányat azonban viszonylag pontosan lehet leírni. A légköri jegesedést hagyományosan kétféle képződési folyamat alapján osztályozzák: 1. felhőn belüli jegesedés, 2. csapadékból származó jegesedés (1. táblázat).

Jegesedés típusa	Levegő hőmérséklete [°C]	Szélsébség [m/s]	Cseppméret	Víztartalom a levegőben	Karakterisztikus idő	Sűrűség [kg/m ³]
Csapadékból származó jegesedés						
Ónos eső/szitalás	~ 0	Nem játszik szerepet	Nagy	Közepes	Pár óra	900
Tapadó hó	0 < t < 3	Nem játszik szerepet	Hópelyhek	Nagyon magas	Pár óra	300-600
Felhőn belüli jegesedés						
Síkjég	ld. 1. ábra	ld. 1. ábra	Közepes	Magas	Pár óra	900
Durva zúzmara	ld. 1. ábra	ld. 1. ábra	Közepes	Közepes	Napok	600-900
Finom zúzmara	ld. 1. ábra	ld. 1. ábra	Kicsi	Alacsony	Napok	200-600

1. táblázat: A légköri jegesedési típusok és jellemzőik (ISO 12494)



1. ábra: Felhőn belüli jegesedési típusok a léghőmérséklet és a szélsébség függvényében (ISO 12494)

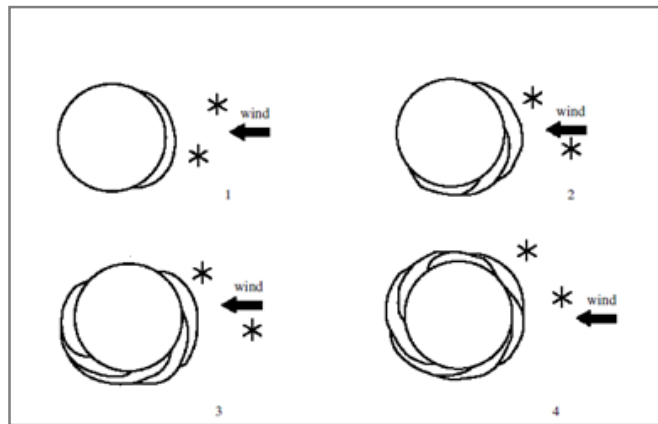
Nedves hó esetében a jelenség fizikai háttere igencsak bonyolult, mivel sok mikrofizikai mechanizmust kell figyelembe venni (Sakamoto, 2000). Már említettük, hogy két típust különböztethetünk meg: vizes tapadó hó és fagyott tapadó hó. A keletkezési feltételeik hasonlóak, különbség csupán abban van, hogy a fagyott tapadó hó erősen lehűlt tereptárgyakon jelenik meg, így a szakirodalom két változatot különböztet meg (Lakatos et al., 2009).

A tapadó hó kialakulásához bizonyos időjárási feltételek együttes fennállása szükséges. A hőmérséklet vertikális rétegződése meghatározó. A magasban még negatív hőmérséklet mellett a hópilekben nincs, vagy nagyon kicsi a folyékony víztartalom (liquid-water content, LWC), viszont a felszín felé haladva, pozitív hőmérsékleti tartományban a hópilek részlegesen megolvadt állapotba kerülnek. Nem teljesen olvadnak el, csak a felületükön képződik egy nedves réteg. A hópilekben ekkor egyre nagyobb lesz az LWC arány, ami lehetővé teszi, hogy a tereptárgyakon megtapadjanak. Azonban ha túlságosan megnőne a víztartalom, akkor a tereptárgyakra rakódó hó lecsúszna annak felszínéről. Tapadás szempontjából felső határnak tekinthető, ha a hópilekben a szilárd rész közel 60%, a folyékony rész 40%. Ha ennél nagyobb a folyékony halmazállapotú rész aránya, egyszerűen lefolyik a felületről (Farzaneh, 2008).

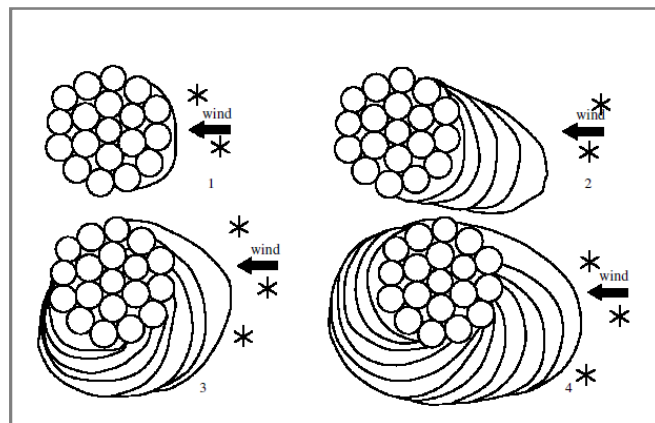
Telítetlen légállapot esetében az olvadni készülő hópilek hőmérséklete hasonlít a szellőztetett, nedves hőmérő által mutatott hőmérsékletéhez. Ez azt jelenti, hogy a hópilek hőmérséklete alacsonyabb a környezeténél. Előfordulhat tehát az az eset, hogy a felszínen már pozitív a hőmérséklet, de a hópilek nem kezdenek olvadni, ezért a száraz hőmérséklet helyett a nedves hőmérsékletet (T_w) használjuk kritériumként. A nedves hőmérséklet a felszín közelében $(-0,5) - (+3) \text{ } ^\circ\text{C}$ között tekinthető megfelelőnek a kialakulás szempontjából. Ez a hőmérsékleti tartomány biztosítja a hópilekben a kívánt nedvességtartalmat. Ekkor egy vezeték esetében, az erős adhéziós erőnek köszönhetően a hópilek a felsővezetéken körszimmetrikusan jelennek meg (Sakamoto, 2000).

A szimmetrikus lerakódást nagyban befolyásolja a szél, amelynek erőssége kulcsfontosságú. A szél sebessége egyenes arányosságban van a felhalmozódás ütemével. Minél erősebb a szél, annál nagyobb a hópilek fluxusa, továbbá a szél által kifejtett aerodinamikai erő egyensúlyt tart a gravitációval. Így egyre nagyobb tömegű hó megtartásához egyre nagyobb szélesebesség is szükséges. Kísérletek azt mutatják, hogy a maximális szélesebesség, amely mellett még megfigyelhető felhalmozódás, 20 m/s. Az ennél erősebb légmozgás már lefújja a vezetékekről a megtapadt hótöbbséget (Wakahama et al., 1977).

Ha a folyamat közben változik a szél sebessége, akkor a hó aszimmetrikusan rakódik a vezetékre, ha hirtelen lecsökken, vagy eláll, akkor pedig a teljes hómennyiség lehullhat. Az egyenletes és a változó szélesség hatását röviden a 2. és 3. ábrák mutatják.



2. ábra: Az egyenletes szélesség hatására körszimmetrikusan felhalmozódott hó (Dobesch et al., 2005)



3. ábra: A változó szélesség hatására aszimmetrikusan felhalmozódott hó (középpontban a vezetéken belüli sodronyok) (Dobesch et al., 2005)

Az elektromos távvezetéseken kívül számos más objektumra is hatással lehet a tapadó hó, ezért kutatást végeztünk, hogy hol merül fel még a havazás okozta veszély Magyarországon.

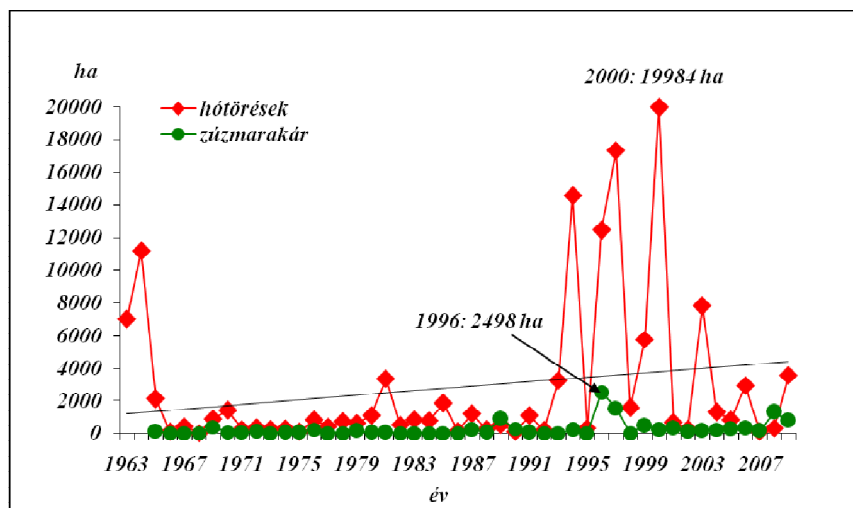
4. Téli károk a hazai erdőkben

Az energiaszektoron kívül jelentős anyagi károk keletkezhetnek egy-egy jelentősebb havazás során az erdőkben is. Több publikációt is találtunk a hazai erdőket fenyegető veszélyes időjárási helyzetekről, amelyekben kiemelten szerepelnek a téli félévben jelentkező veszélyek (Hirka et al., 2008, Hirka et al., 2010). Ennek hatására megvizsgáltuk, hogy az elmúlt évek során mekkora károkat okozott a hazai erdőkben a hóteherterhelés.

A magyarországi erdőségek összterülete 18900 km² (1.890.000 ha) 2009-es adatok alapján. Az erdőtelepítéseknek és a hazai erdők védelme érdekében hozott intézkedéseknek köszönhetően lassan növekszik erdőségeink területe. A védelem érdekében az ERTI (Erdészeti Tudományos Intézet) Erdővédelmi Osztálya 1962 óta minden évben készít erdővédelmi helyzetjelentést. A jelentés a komplex Erdővédelmi Figyelő-Jelzőszolgálati Rendszer adataira támaszkodva az elmúlt évi károsításokat összegzi, valamint prognózist készít a következő évben várható károkról is (Hirka et al., 2010). A vizsgálataik során azt az eredményt kapták, hogy az időjárás következményeként fellépő károk (abiotikus károk) növekvő tendenciát mutatnak. Ezen károk közül a tapadó havas lerakódás is szerepet játszhatott, így figyelmesebben néztük meg a hótörések és zúzmarakárok éves gyakoriságát.

Magyarországon minden 200 ha-nál nagyobb területtel rendelkező erdőgazdának évente 4 jelentést kell küldenie, melyben az éves kárösszesítést foglalja össze, ezek az ún. Erdővédelmi Jelzőlapok. Ezek közül az elsőt minden év április 8-án, amikor a gazdák a téli károkat összesítik. Ebben az előző év október 1. és a következő év március 31. közötti időszakról készítenek kárfelmérést, melyben a téli jégkárokat, a zúzmarakárokat és a hótörések okozta károkat foglalják össze.

A Magyarországon történt téli károkat (ezen belül is a zúzmarakárokat és a hótöréseket) a 4. ábra mutatja. Néhány évet kiemeltünk, amikor kiemelkedően nagy területen történt káresemény. Az 1963-tól 2009-ig terjedő időszakban a hótörések okozta károk évente átlagosan 2801 ha területet fedtek le, ehhez képest az időszak utolsó harmadában lényegesen több kár fordult elő. Példaként a 2000-es év telén 19984 ha-on, 1997-ben 17332 ha-on, 1994-ben pedig 14576 ha-on történt hótörés okozta károkozás. Az átlagos 239 ha zúzmarakárhoz képest pedig 1996-ban volt nagy területre, 2498 ha-ra kiterjedő pusztítás. A feltüntetett időszak utolsó harmadában néhány évben jelentős kiugrás látható, ezáltal egy növekvő trend sejtethető.



4. ábra: A Magyarországon regisztrált hótörések és zúzmarakárok (Hirka et al, 2010)

A kérdés, hogy mindkét általunk vizsgált kategória esetén (hótörés, zúzmarakár) a kialakult károk a tapadó hó következményeként léptek-e fel. Ha igen, akkor mekkora lehetett ennek a mennyisége, és milyen volt az aktuális időjárási helyzet. Ahhoz, hogy erre választ kapjunk, meg kell ismernünk, hogy milyen gyakorisággal és mennyiségben fordul elő Magyarországon tapadó hó.

5. A tapadó hó felhalmozódásának matematikai leírása

5.1 A zúzmaramérés általános jellemzése

A tapadó hó mennyiségi jellemzésére leginkább a zúzmara megfigyeléseket alkalmazzuk. A magyarországi zúzmaramérő rendszer kidolgozása Csomor Mihály (1966) nevéhez fűződik. Az ő munkája alapján készült el a ma is használatban lévő mérőrendszer.

A mérések az október 15-től április 15-ig terjedő időszakban történnek. A zúzmaramérő műszer 4 db 31 mm átmérőjű 1 m hosszú távvezeték mintadarabból áll. Ebből kettő észak-déli, kettő kelet-nyugati irányban áll merőlegesen a felszíntől számítva 2 m-es magasságban. Olyan helyre állítják fel, ahol a légáramlás akadálytalanul éri. A különböző jegesedési típusok mérése hivatalosan a reggeli főterminusban történik, azonban megméri a csapadék elállta után is, tehát a lerakódás befejezésével. Amennyiben megfigyelhető a vezetékeken szilárd bevonat, akkor megméri tolómércével annak vastagságát. Azt a helyet, ahol a lerakódás vastagsága szemmel láthatóan, illetve mérés alapján a legnagyobb, maximális lerakódásnak nevezzük. A lerakódások teljes tömegét (víztartalmát) is megméri úgy, hogy a vezetékek leemelése után egy fűtött helyiségben felolvasztják a lerakódásokat. Fontos, hogy vigyázni kell az olvasztásnál arra, hogy ne legyen párolgási veszteség, ennek kiküszöbölése érdekében pontos szabályokat kell követni. Praktikus okokból a felolvasztott lerakódás tömegének meghatározására a csapadékmérő üveghengert használják, melynek mm-es beosztásai 20 gramm víznek felelnek meg. (Domonkos et.al., 2009). Ez a későbbiek folyamán (7.3-as fejezet) még fontos lesz.

Ezenkívül feljegyzik a lerakódás kezdetét, végét, irányát, fajtáját és a bevonatok lehullásának időpontját is (Lakatos et al., 2009). Két óránként ellenőrizni kell a bevonatok változását, napsütéses időben akár óránként is lehet, a lehullás időpontja miatt.

Tapasztalatok szerint egy-egy szabad vezetéken, pl. a villamosvezetéseken sokkal nagyobb tömegű hó képes megjelenni, mint az állomásokon használt zúzmaramérő műszer vezetékmentáján. Ez azért lehetséges, mert míg a zúzmaramérő vezetékdarabjai stabilan, fixen állnak, addig a szabad vezetékek képesek forogni. Emellett a zúzmaramérő műszert 2 m-es magasságban helyezik el, a távvezetékek pedig kb. 6 m magasan húzódnak, így nagyobb mennyiségű hó tapadhat meg rajtuk (Csomor, 1980).

A mérőrendszer vezetékdarabjai nem képesek forogni, ezért a szilárd bevonat (jelen esetben a tapadó hó) a vezeték tetején jelenik meg. Emiatt ki kell számolnunk, hogy a

mérőrendszeren mért vastagság (mm-ben) mekkora tehertöbbletet jelentene egy távvezeték esetében (kg/m-ben).

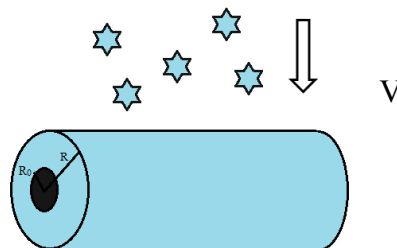
Feltételezzük, hogy a megjelent tapadó hó vastagsága a zúzmaramérő tetején megegyezik a távvezeték 1 m-es darabján körszimmetrikusan felrakódó hó sugarával. Ez természetesen egy maximális becslést ad, azonban így már egyszerűen számolhatjuk ki a tömeget:

$$M = \rho_{\text{hó}} \cdot R_{\text{hó}}^2 \cdot \pi - \rho_{\text{vezeték}} \cdot R_{\text{vezeték}}^2 \cdot \pi$$

ahol M a távvezetékre felrakódott hó tömege [kg/m], $\rho_{\text{hó}}$ a hó sűrűsége, amelyet konstans 300 kg/m^3 -nek feltételezünk (ld. 1. táblázat), $R_{\text{hó}}$ a zúzmaramérő rendszeren mért hó vastagsága [m], $R_{\text{vezeték}}$ a vezetékdarab vastagsága (0,03 m), $\rho_{\text{vezeték}}$ a vezeték darab sűrűsége. A kapott M értéket hasonlítjuk össze a későbbiekben a modellezett értékekkel. A modellezéshez, vagy mennyiségi előrejelzéshez két nemzetközileg ismert módszert alkalmazunk, de mindkettő esetében számos egyszerűsítést kell végeznünk, hogy numerikusan is leírjuk a fizikai folyamatot.

5.2 Sundin és Makkonen módszere

Az első módszernél két paramétert veszünk figyelembe, a csapadékot és a hőmérsékletet. Sundin és Makkonen (1998) azzal a feltételezéssel él, hogy az akkumulált hó tömege arányos a csapadék intenzitásával. Ez az összefüggés leírja egy vezeték keresztmetszetén megjelenő tömegfluxust. Szemléletesen ez azt jelenti, hogy egy vezetékre rakódó tapadó hó tömege csak a függőlegesen érkező csapadék fluxusának a függvénye (5. ábra). Ekkor a felső térfélről érkező hópelyhek V [m/s] esési sebességgel mozognak lefelé.



5. ábra: Hó okozta terhelés Sundin és Makkonen módszere alapján

Ha a hőmérséklet a megfelelő tartományban van ($-0,5^{\circ}\text{C} \leq T_w \leq 3^{\circ}\text{C}$), és van csapadék, mely hó formájú, akkor a következő egyszerű összefüggéssel adhatjuk meg a nedves hó tömegét:

$$dm = 2 \cdot R(t) \cdot P \cdot dt$$

ahol dm a felhalmozódott hó tömege t és dt időpontok között [kg/m], P a csapadék intenzitása [mm/h], t az idő [h], és $R(t)$ a körkörösen rakódott hó sugara [m]. Számolásunk során egységnyi időintervallumokkal dolgoztunk, ezért minden esetben $dt = 1$.

$R(t)$ -t egy egyszerű összefüggés alapján megkaphatjuk, mivel az $m(t)$ (a felhalmozott hó mennyiség tömege t időpillanatban) a teljes sugár és a vezeték sugár négyzetének a különbségével arányos.

$$m(t) = (R^2(t) - R_0^2) \cdot \pi \cdot \rho_s$$

$$m(t) / (\pi \cdot \rho_s) = R^2(t) - R_0^2$$

Vagyis:

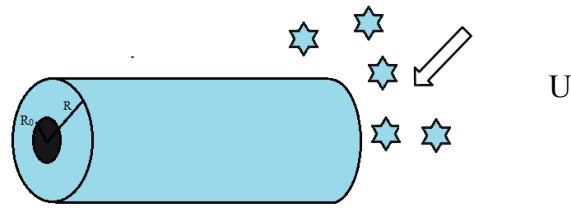
$$R(t) = \sqrt{\frac{m(t)}{\rho_s \cdot \pi} + R_0^2}$$

Itt $m(t)$ a felrakódott hó tömege [kg/m], ρ_s a hó sűrűsége [kg/m³] és R_0 a vezeték sugara (0,03 m). Fontos megemlíteni, hogy a leggyakrabban használt vezetéktípusnál (12,5 mm keresztmetszetű sodronyok) a méterenkénti 3 kg tehertöbblet már veszélyeztetheti a felsővezetékek épségét. Az Olaszországban végzett kutatások alapján határozták meg ezt az értéket (Bonelli et al., 2011), azonban a BME 2009-ben végzett kárvizsgálatai alapján 4 kg/m-es értéket állapítottak meg (Szabó et. al., 2009). Ebben az esetben már történhetnek vezetékszakadások, akár oszlopkidőlések is. Ezért az $m(t)$ tapadó hó tömegének kritikus értékét 3-4 kg/m-nek választjuk meg.

A módszer alkalmazásánál azzal a feltételezéssel élünk, hogy a ρ_s hósűrűség konstans (300 kg/m³, ld. 1. táblázat). Ezen kívül, hogyha a száraz hőmérséklet három órán keresztül 4°C felett alakul, akkor a teljes hőtömeg elolvad, vagy leesik a vezetékről (Kolláth et al., 2009).

5.3 Poots által használt módszer

A másik módszer Poots (1996) munkája alapján készült, amelyben már a szél hatása is szerepel. Ez a módszer csupán annyiban különbözik, hogy míg az első esetben a felső térfélről érkező csapadék fluxusát vettük figyelembe, azaz a hópelyhek fluxusa V [m/s] határsebességgel történik, addig ebben az esetben az U [m/s] szélesebbesség által szállított csapadék fluxusát is figyeljük (6. ábra). A képen is látható U jelölés nem a szél horizontális komponensére utal, hanem a teljes szélesebbeségre.



6. ábra: Hó okozta terhelés Poots módszere alapján

Ebben az esetben az író azzal a feltételezéssel élt, hogy az esési sebesség, és a szélesség által szállított csapadék fluxusa nem adódik össze vektoriálisan, hanem a két sebességtől függően egy speciális formulával közelíthető:

$$dm = 2 \cdot R(t) \cdot P \cdot \sigma \cdot dt$$

$$\sigma = V/U$$

$$\rho_s = 300 + 20 \cdot U$$

➤ Feltétel: ha $U < 1 \rightarrow \sigma = 1$

Itt dm a felhalmozott hó tömege t és $t+dt$ időpontok között [kg/m], $R(t)$ a tapadó hó sugara, melyet az előző módszernél is feltüntetett képlet alapján számolhatunk ki. P a csapadékintenzitás [mm/h], U a szélesség [m/s], σ dimenzió nélküli felhalmozódási együttható (vagy korrekciós együttható), V [m/s] a hópelyhek esési sebessége. A ρ_s (hósűrűség kg/m^3 -ben) a megadott empirikus képlet alapján számolható ki (Poots, 1996).

Nemzetközi tanulmányokban általában a korrekciós együtthatót $1/U$ -nak választják meg, azonban a tapasztalatok azt mutatják, hogy ez az érték nem megfelelően adja vissza a tapadó hó mennyiségét. Az esettanulmányokban megvizsgáljuk, hogy amennyiben nem ezt az értéket választjuk meg, (tehát korrekciót végzünk) milyen eredményt kaphatunk. A választásunk során az esési sebességet (V) konstans 2 m/s -nak feltételeztük, ezáltal $\sigma=2/U$ lett. Ha az esési sebesség állandó 2 m/s , akkor arra az eredményre jutunk, hogy az ennél kisebb szélességek esetén a legnagyobb a felhalmozódás üteme, míg a nagyobb szélességek már a felhalmozódás ütemét csökkentik, de magát a felhalmozódást még nem akadályozzák meg.

Ebben az esetben is azzal a feltételezéssel éltünk, hogy ha három órán keresztül meghaladja a hőmérséklet a 4°C -ot, akkor a teljes hó mennyiség elolvad, vagy leesik a vezetékről. Egy másik feltétel, hogy ha a szél sebessége meghaladja a 20 m/s -os értéket, akkor az egész mennyiséget is lefújhatja a vezetékről. Ha a szélesség lecsökken és a körülmények ismét megfelelően alakulnak, a felhalmozódás természetesen újra kezdődhet.

6. Felhasznált adatok

A tapadó hóra vonatkozó vizsgálatainkhoz az OMSz adatbázisából vett napi zúzmaramérési adatokat használtuk fel az 1980-2011-es időszakból. Ezen adatok közül is azokat az eseteket válogattuk ki, amikor tapadó hóként regisztrált (16-os és 32-es kód) értékeket találtunk. Az esettanulmányok és gyakoriságok esetében az eredmények diagramok formájában kerülnek bemutatásra. Mivel a zúzmaramérési adatok között a lerakódások vastagságai mellett azok víztartalmát is feltüntetik, így ezeket is felhasználtuk.

Kiválasztottunk néhány esetet, melyeket a két előzőleg bemutatott mennyiségi előrejelzési módszerrel is megvizsgáltunk. Az esettanulmányok elkészítéséhez az adott szinoptikus állomások órás adatait használtuk fel. Az egyes állomások adataiban kiemelten foglalkoztunk a hőmérséklet, nedves hőmérséklet, csapadékmennyiség, hóvastagság és szél adatokkal. Mivel a csapadék mennyiségét a főterminusokban regisztrálják, így csak 6 óránként van csapadékról szóló információ. A módszereinkben azonban a csapadék intenzitása szerepel, ezért szükséges volt a csapadék mennyiségét órás felbontásba átszámítani. Ehhez fel kellett használnunk a látástávolságot. A csapadék intenzitása és a látástávolság egymással fordítottan arányosak (Rasmussen et al., 1999). Az intenzitást így a hat óra csapadékösszegéből és a látástávolságból határoztuk meg, ezáltal már órás adatokkal dolgozhatunk. Egyes esetekben sikerült 6 órás felbontás helyett 10 perces automata műszerrel mért adatokkal dolgoznunk, ekkor a módszerekkel kapott eredmények sokkal jobbnak bizonyultak. Ezenkívül az ERA Interim $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ rácsfelbontású 3 órás adatait is felhasználtuk összehasonlítás céljából. Ez az adatbázis az ECMWF globális légköri reanalízis és előrejelzési adatait tartalmazza 1979-től napjainkig (www.ecmwf.int/). Az állomáson mért, és az adatbázisban szereplő adatok közül a hőmérséklet, szél és csapadék információkat vetettük össze, a reanalízis adatok céljainkra történő használhatósága érdekében.

Az aktuális időjárási helyzeteket bemutató térképek elkészítéséhez az OMSz adatbázisából a magyarországi szinoptikus állomások órás adatsorait használtuk fel. Ezek alapján készítettünk napi csapadékösszeg, napi hőmérséklet átlag és napi hóvastagság maximum térképeket az INDA adatbázis MESH interpolációs program segítségével.

A statisztikai vizsgálatokhoz a Péczely-féle makroszinoptikus osztályozást használtuk fel az 1980-2010-es időszakban, melynek eredményei diagramok formájában kerülnek bemutatásra. A naponta lejegyzett Péczely-kódokat ezúton is köszönjük Károssy Csabának (Nyugat-Magyarországi Egyetem).

7. Statisztikus klimatológiai vizsgálatok

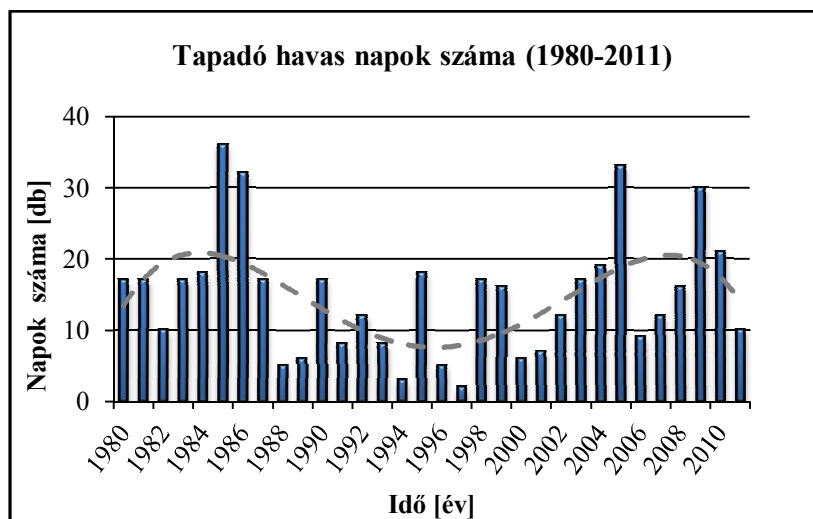
Érdeemes utána nézni, hogy hazánkban mennyire gyakran fordul elő tapadó hó, és hogy ez követ-e valamilyen trendet. Láthattuk, hogy a hótörések vagy zúzmarakárok az erdőségekben növekvő tendenciát mutatnak, ezért is kezdődött el a jelenség részletesebb vizsgálata. Mivel az erdészeti adatbázisban tájegységként jelölik meg a károsodott területeket, ezért összehasonlítottuk, hogy a 30 év alatt hol alakult ki nedves hó. Kíváncsiak voltunk arra is, hogy kimutatható-e, hogy az ország bizonyos területein többször fordult elő ez a típus. Ezenkívül a statisztikus klimatológiai vizsgálatokban arra kerestünk választ, hogy mely időjárási helyzetekhez köthető ez a fajta jegesedési változat. Statisztikai próbák alapján bizonyosodtunk meg arról, hogy a tapadó hó kialakulása, valamint annak vastagsága is függ az egyes makroszinoptikus helyzetektől.

7.1 A tapadó hó gyakorisága Magyarországon

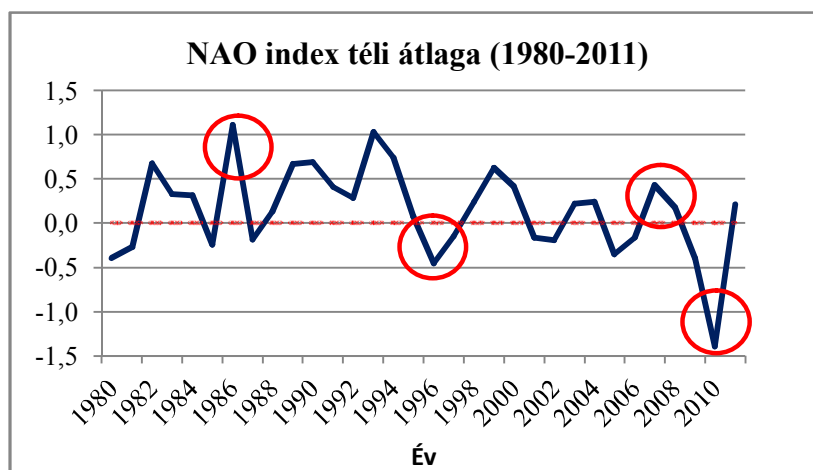
Megvizsgáltuk, hogy az 1980-2011 közötti téli időszakban (október 1. – március 31.) milyen rendszerességgel fordult elő tapadó hó Magyarországon. A 7. ábrán feltüntettük a tapadó havas napok számát. Tapadó havas napnak tekintjük azokat a napokat, amikor legalább egy zúzmaramérővel ellátott állomáson nedves vagy fagyott tapadó havat regisztrálnak. Ezt a fogalmat azért vezettük be, mert tekintettel kell lennünk arra, hogy ugyanazon a napon, de különböző helyszíneken mért lerakódásokat ne vegyünk többször számításba. Ennek oka, hogy egy havazási esemény ugyan több területet érinthet, ezáltal több meteorológiai állomás is regisztrálhatja, azonban ettől függetlenül csak egyszer számítandó. A hiba kiküszöbölése érdekében kizárólag az egzisztenciát vettük figyelembe. Az eredmények azt mutatják, hogy a legtöbb eset 1985-ben (36 nap), 2005-ben (33 nap) és 2009-ben (30 nap) történt. Tehát az elmúlt harminc évet tekintve nem mutatható ki növekvő trend úgy, mint az erdészeti károk esetében. Figyelmesebben vizsgálva az adatokat azonban egy kb. 5-8 éves ciklust tapasztalunk. Szaggatott szürke vonallal jelöltük a periodicitást jellemző görbét, melyen látható, hogy 1982-86 között és 2004-2009 között többször fordult elő a jelenség, mint 1994-96-ban. A ciklikusság pontos oka nem teljesen tisztázott, valószínűleg kapcsolatba hozható a különböző makrocirkulációs rendszerek változásaival, azonban erre vonatkozó részletes vizsgálatokat nem végeztünk. A magyarországi havazások statisztikus klimatológiai elemzése során korábban azonban már felfigyeltek erre a jelenségre pl. *Makrocirkulációs rendszerek és kapcsolatuk a téli időszak időjárásával Magyarországon* (Tabi, 2010) című diplomamunka. Ezek ismeretében

kíváncsiak voltunk arra, hogy a saját eredményeink kapcsolatba hozhatóak-e a különböző makrocirkulációs rendszerekkel, mint pl. a NAO (North Atlantic Oscillation) változásaival.

A NAO egy észak-déli tengelyű légnyomás-anomálián alapszik, melynek az egyik központja Grönland, illetve Izland közelében található, a másik az észak-atlanti térség közepes szélességein (é. sz. 35°-45°). A 8. ábrán feltüntettük a NAO téli átlagos menetét, melyen látható, hogy a több tapadó havas naphoz pozitív, míg kevesebbhez negatív NAO index tartozik.



7. ábra: Tapadó havas napok száma Magyarországon 1980-2011 között

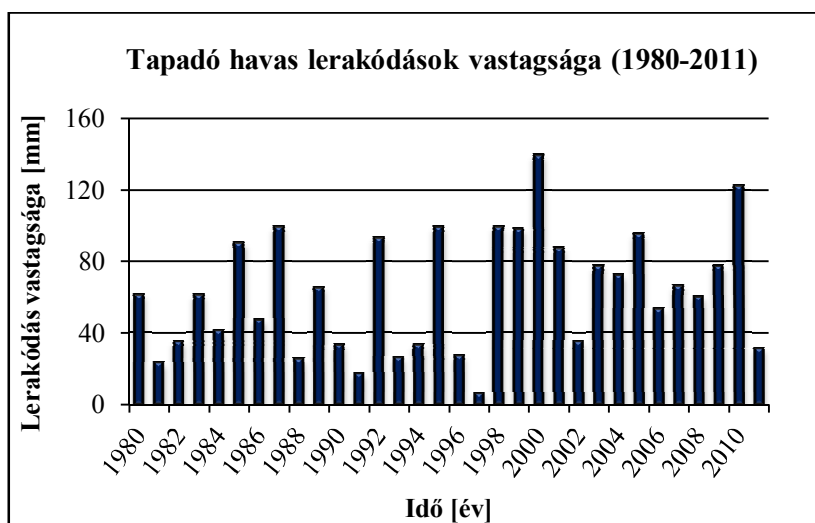


8. ábra: A NAO index téli átlagos változása 1980-2011 között

Sokkal részletesebb vizsgálatra lenne szükség ahhoz, hogy megbizonyosodjunk a periodicitás pontos jellemzőiről, azonban a két jelenség között bizonyosan van összefüggés. A fent említett dolgozatban több magyarországi város adatai alapján, a havas napok száma és a NAO index közötti korreláció $-0,49 - -0,59$ értékű. Elvégezve a tapadó

hó és a NAO index között ugyanezen számítást $-0,3$ -at kapunk, amely sejteti a kettő közötti kapcsolatot.

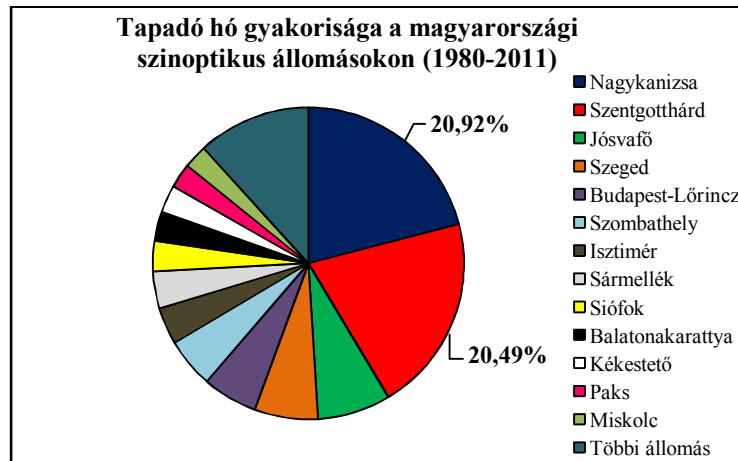
Megnéztük, hogy az adott időszakban hol és mikor fordultak elő a legnagyobb vastagságú lerakódások. Az egyes években történt lerakódások maximumai láthatóak a 9. ábrán. Ezek alapján kiugróan magas értékek (100 mm körüli és e feletti érték) 1987-ben, 1995-ben, 1998-ban, 1999-ben, 2000-ben és 2005-ben voltak. Ezek közül a legvastagabb lerakódást 2000-ben (pontosabban 2000. december 30-án) mérték Szentgotthárdon, ennek értéke 139 mm. Ekkora többlet egy vezeték esetében igen veszélyes lehet, mivel az érintett térségben vezetékszakadások, oszlopkidőlések és áramkimaradások is előfordulhatnak.



9. ábra: Tapadó havas lerakódások vastagságai Magyarországon 1980-2011 között

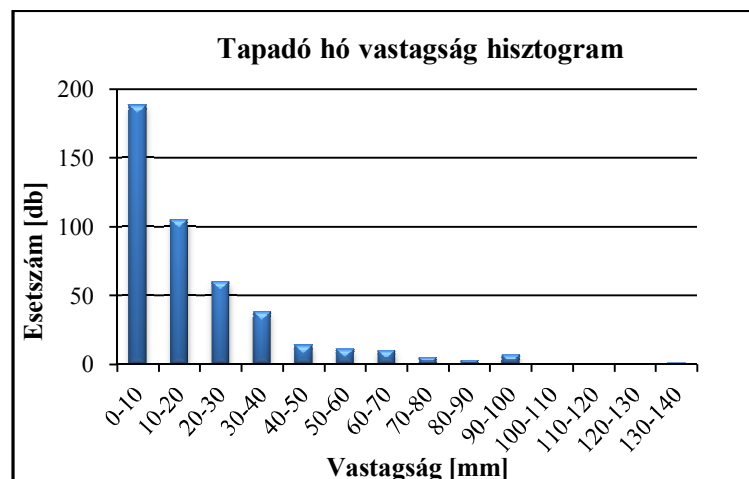
Lényeges kérdés, hogy melyek az érintett területek, illetve hogy hol fordult elő gyakrabban ez az adott jegesedési típus.

A fent kimutatott maximumok Nagykanizsán, Szentgotthárdon, Pakson, Szegeden és Győrben fordultak elő. Ezen belül nyolc évben Szentgotthárdon, és hét évben Nagykanizsán regisztrálták az éves maximumot. Ebben a két városban különösen nagy gyakorisággal lép fel tapadó havas lerakódás. Amennyiben figyelembe vesszük az ugyanazon naphoz tartozó, de különböző területeken regisztrált hófelhalmozódást is, azt tapasztaljuk, hogy Szentgotthárdon 143-szor, Nagykanizsán 146-szor fordult elő ez a jelenség, a többi szinoptikus állomáshoz képest 2-szer, 3-szor több alkalommal. Emellett a már említett erdészeti adatokban a tájegységenként lejegyzett károsodott területek főként a Zalai-dombságot, Somogyi-dombságot, Belső-Somogy területét, valamint a Duna-Tisza között jelölik meg. A 10. ábrán feltüntettük a szinoptikus állomásokon regisztrált esetek relatív gyakoriságát. Ezek alapján a déli, délnyugati országrész a legérintettebb terület.



10. ábra: A magyarországi szinoptikus állomásokon regisztrált tapadó hó gyakorisága

Elkészítettük a vastagságok gyakorisági eloszlását is. Az eloszlást szemléltető 11. ábrán az abszcissa tengely minimuma 0 – 10 mm, amelyhez egyben a legtöbb esetszám is tartozik (188 eset). A vastagságok növekedésével exponenciálisan lecseng a gyakoriság. A 2000-ben történt kiugró eset összesen egyszer fordult elő a 30 év folyamán. Az 1980-2011 közötti időszakra kiválogattuk azt a 10 esetet, amikor a legnagyobb felhalmozódást regisztrálták a zúzmaryamérő műszeren. Ezek rangsorát láthatjuk a 2. táblázatban, ahol a bekövetkezés helyét, időpontját és a hólerakódás maximális vastagságát is feltüntettük. Szentgotthárd és Paks kétszer, míg Nagykanizsa háromszor is szerepel a legvastagabb lerakódások listáján.



11. ábra: A regisztrált tapadó havas lerakódások vastagságainak hisztogramja

Rangsor	Város	Időpont	Vastagság (mm)
1.	Szentgotthárd Farkasfa	2000.12.30	139
2.	Budapest-Lőrinc	1999.02.10	99
3.	Nagykanizsa	1996.01.02	99
4.	Isztimér	1988.02.25	99
5.	Paks	1999.12.20	98
6.	Szeged-külterület	2005.12.15	95
7.	Nagykanizsa	1993.02.26	93
8.	Szentgotthárd Farkasfa	1986.01.01	90
9.	Nagykanizsa	2001.12.23	87
10.	Paks	1999.11.20	82

2. táblázat: A tíz legvastagabb tapadó havas lerakódás az elmúlt 30 évben

Ezek szerint érdemes lenne a déli, délnyugati országrészben jobban figyelemmel kísérni a nedves tapadó hó felhalmozódását. Mind a gyakoriságokat, mind a vastagságokat tekintve is ezek a területek veszélyeztetettek.

7.2 Tapadó hó kialakulása az egyes makroszinoptikus helyzetekben

Megvizsgáltuk, hogy az egyes tapadó havas lerakódások milyen időjárási helyzetekben alakulnak ki. Ehhez a Péczely-féle osztályozást alkalmaztuk. A Péczely-féle makroszinoptikus osztályozás 13 kategóriáját a 3. táblázatban tüntettük fel.

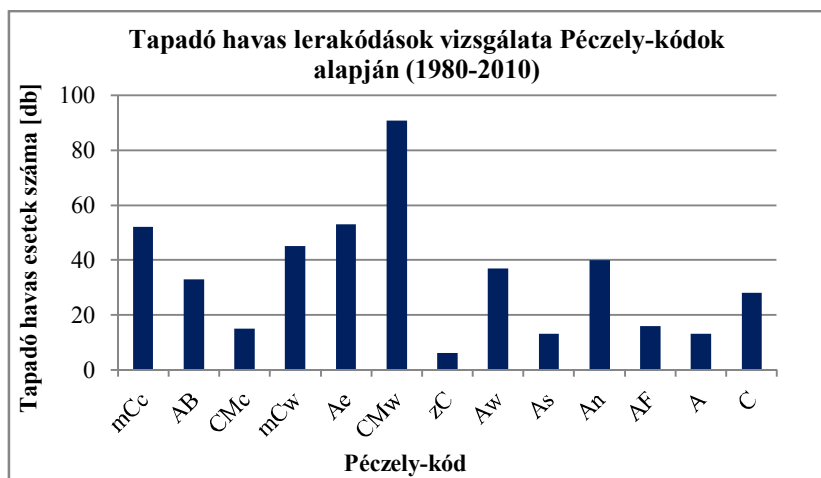
Péczely-típus	Rövidítés	Időjárási helyzet
1.	mCc	Ciklon hátoldali áramrendszere
2.	AB	Anticiklon a Brit-szigetek felett
3.	CMc	Mediterrán ciklon hidegfrontja
4.	mCw	Meridionális ciklon melegfrontja
5.	Ae	Anticiklon a Kárpát-medencétől keletre
6.	CMw	Mediterrán ciklon melegfrontja
7.	zC	Zonális ciklon
8.	Aw	Anticiklon a Kárpát-medencétől nyugatra
9.	As	Anticiklon a Kárpát-medencétől délre
10.	An	Anticiklon a Kárpát-medencétől északra
11.	AF	Anticiklon a Skandináv-félsziget felett
12.	A	Anticiklon a Kárpát-medence felett
13.	C	Cikloncentrum a Kárpát-medence felett

3. táblázat: A Péczely-féle osztályozás 13 kategóriája

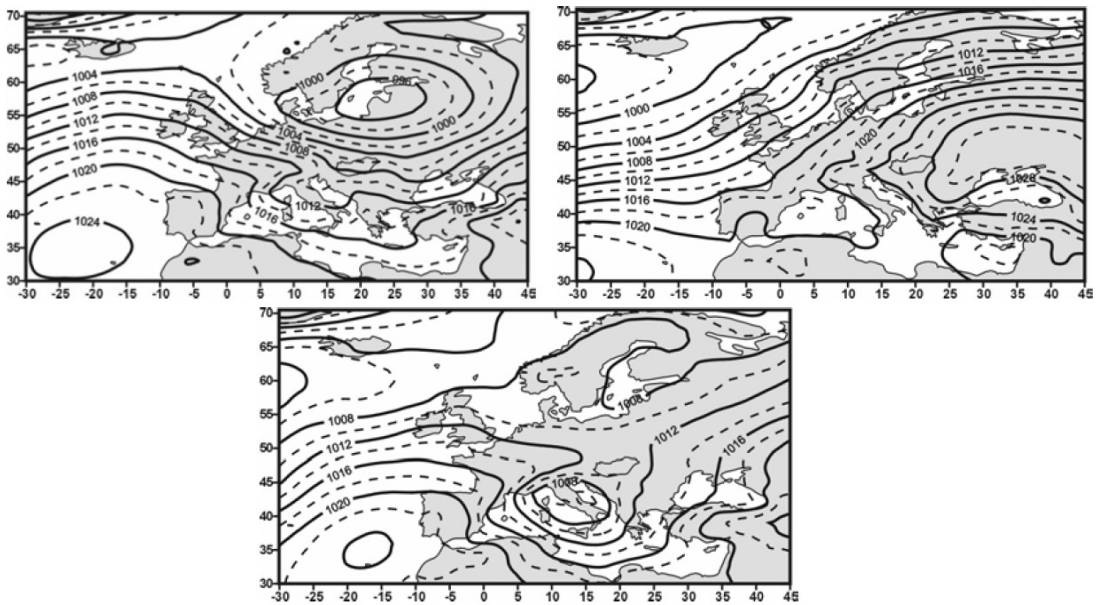
Az egyes típusokban előforduló gyakoriságok a 12. ábrán láthatóak. Megfigyelhető, hogy nagy gyakorisággal jellemezhető az 1-es (mCc), 5-ös (Ae) és 6-os (CMw) helyzet. Az mCc esetében Magyarország egy tőle kelet-északkeletre elhelyezkedő ciklon hátoldali hidegfronti áramrendszerébe esik. Változékony, szeles és csapadékos időjárást okoz a Kárpát-medencében. Ebben a helyzetben 52-szer fordult elő tapadó hó. Az Ae kódhoz

szintén sok (53) eset tartozik annak ellenére, hogy ez egy anticiklonális helyzet. Ukrajna felett anticiklon helyezkedik el, melyben száraz déli, délkeleti légmozgás érvényesül. Télen gyakran ködöket okoz, és jellemző a zúzmaraképződés is. Végül a legtöbbször (91 esetben) a CMw kódnál fordult elő nedves hó. Kiemelkedően sok esetszám tartozik ehhez a makroszinoptikus helyzethez, az összes esetszám 21%-át teszi ki. Ennek oka, hogy hazánkban az áramlást a Földközi-tenger felett kialakult, és az adriai térségbe áthelyeződő ciklon határozza meg. A ciklon melegfrontja áthaladva Magyarország felett az őszi és a téli hónapokban nagy mennyiségű esőt és/vagy havazást eredményez (Makra et al., 2007). Ez a három Péczy-féle típus látható a 13.a ábrán.

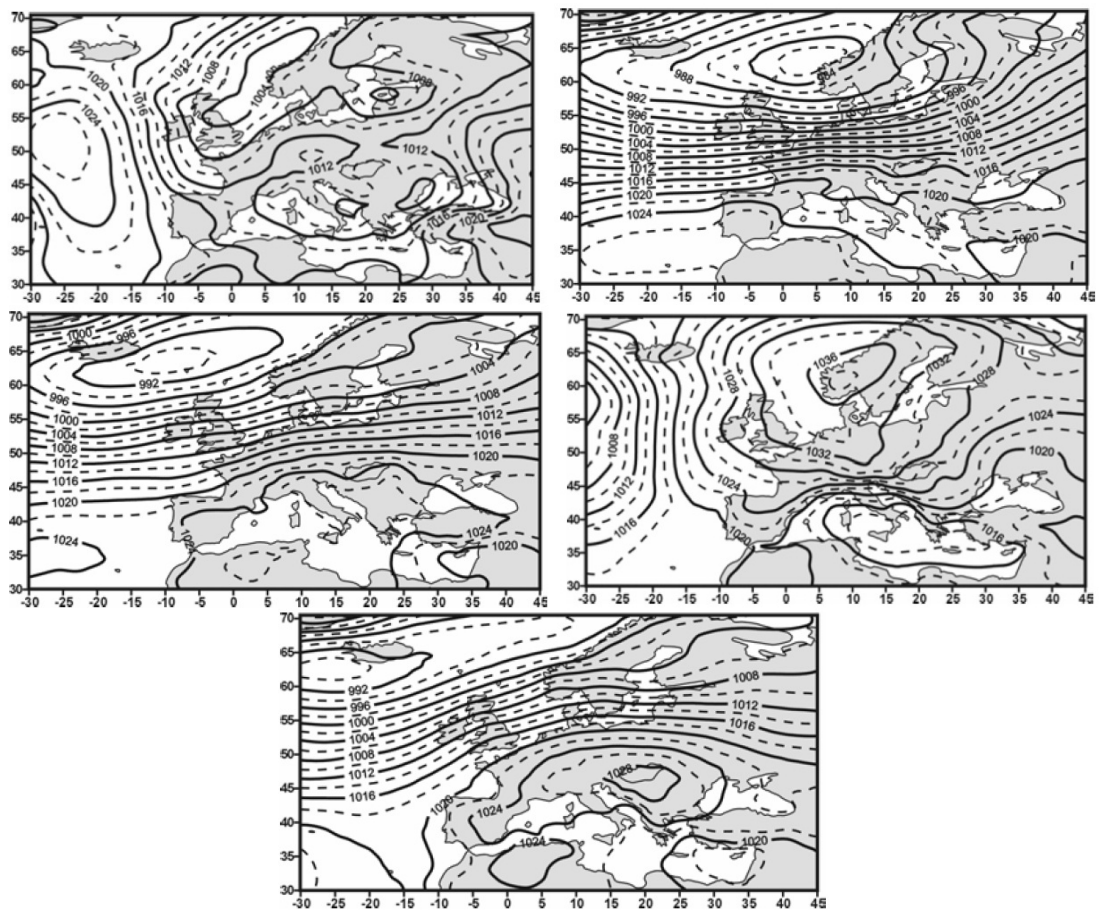
A legkisebb gyakorisággal a 3-as (CMc), és 7-es (zC) helyzet jellemezhető, melyek ugyan ciklonális esetek, azonban kevés csapadékkal járnak, és szeles, változékony időjárást okoznak. Ezenkívül a 9-es (As), 11-es (AF) és a 12-es (A) (anticiklonális helyzetek) is kis gyakorisággal szerepelnek. Jellemzőjük, hogy erős lehűlést okoznak a Kárpát-medencében, valamint a téli hónapokban gyakran inverzióval is járnak. Ezek a típusok a 13.b ábrán láthatók.



12. ábra: Tapadó havas lerakódások előfordulása a Péczy-kódok alapján

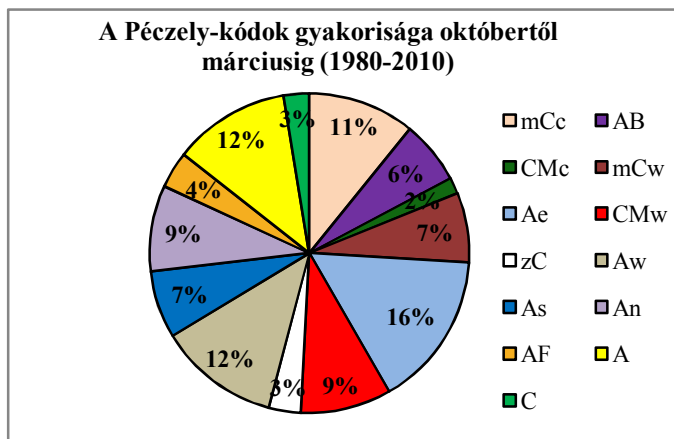


13.a ábra: A tapadó hó előfordulásának kedvező helyzetek (sorrendben balról jobbra, fentről lefelé): mCc, Ae és CMw típusok (Makra et al., 2007)



13.b ábra: A tapadó hó előfordulásának nem kedvező helyzetek (sorrendben balról jobbra, fentről lefelé): CMc, zC, As, AF és A helyzetek (Makra et al., 2007)

Azonban azt is figyelembe kell vennünk, hogy az egyes kódok sem fordulnak elő azonos gyakorisággal. Bizonyos helyzetek többször, mások ritkábban jelentkeznek hazánkban. A 14. ábrán a Péczy-kódok gyakorisága látható az 1980-2010 közötti téli időszakokra, azaz októbertől márciusig.



14. ábra: A Péczy-féle makroszinoptikus helyzetek gyakorisága októbertől márciusig

Az Ae (16%), az Aw (12%) és az A (12%) helyzetek fordultak elő a leggyakrabban, azonban láthattuk, hogy a nedves tapadó hó előfordulása a CMw kódhoz, tehát mediterrán ciklonhoz kapcsolódik általában. Ez az eredmény azt sugallja, hogy a téli időszakban kisebb a mediterrán ciklonok gyakorisága a többi makroszinoptikus helyzethez képest, ugyanakkor ezeknél a ciklonoknál, ha eléri hazánkat, nagyobb valószínűséggel számíthatunk tapadó hó kialakulására.

Hogy megbizonyosodjunk arról, hogy az egyes makroszinoptikus helyzetektől valóban függ-e a tapadó hó előfordulása, statisztikai próbát végeztünk el. A χ^2 próba során a H_0 hipotézis szerint a tapadó hó előfordulása nem függ az egyes Péczy-kódoktól. A H_1 hipotézis szerint van összefüggés. A próba alapját képező statisztika a következő:

$$n \cdot \sum_{i=1}^{13} \frac{(r_i - p_i)^2}{p_i}$$

r_i : A kódok relatív gyakorisága abban az esetben, ha regisztráltak tapadó havat

p_i : A kódok relatív gyakorisága októbertől márciusig, minden esetben

n : Az összes tapadó havas eset darabszáma

Elvégezve a fenti összegzést, a kapott eredményt összehasonlítjuk a χ^2 táblázatában lévő kritikus értékekkel. Amennyiben a számított eredmény átlépi a kritikus értékeket, elvetjük a H_0 hipotézist. Ha az eredmény nem lépi át a kritikus értékeket, akkor elfogadjuk

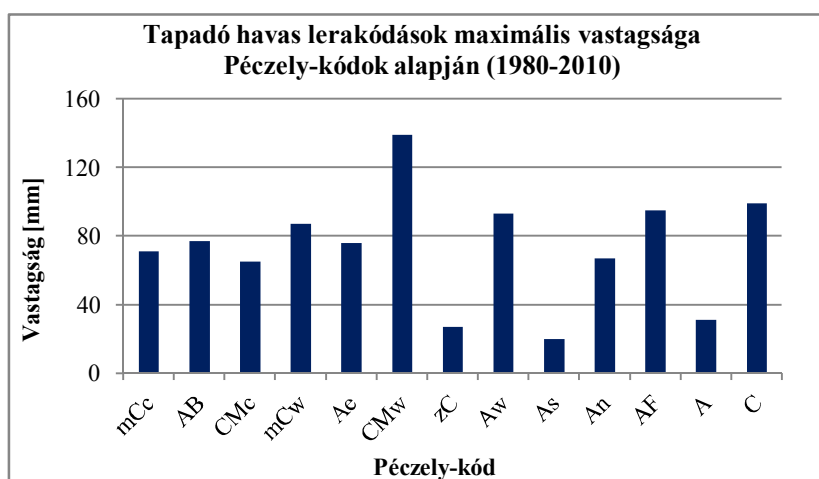
H_0 -t. A 4. táblázatban az alábbi kritikus értékeket találjuk meg a $\chi^2_{(12)}$, vagyis a 12 szabadsági fokú próba alapján.

Szignifikanciaszint (%)	10	20	50	80	90	95	98	99	99,9
Kritikus érték	6,30	7,81	11,34	15,81	18,55	21,03	24,05	26,22	32,91

4. táblázat: $\chi^2_{(12)}$ próba adott szignifikanciaszintjeihez tartozó kritikus értékek

A kiszámított érték 155,1, amely a táblázatban szereplő összes kritikus értéket átlépi. Tehát az eredmény alapján elvetjük a H_0 hipotézist, és elfogadjuk H_1 -et. Tehát valóban igaz, hogy a tapadó hó előfordulása függ a Péczely-féle makroszinoptikus helyzetektől.

A 15. ábrán az egyes helyzetekben előfordult maximális lerakódásokat ábrázoltuk. Ekkor azt tapasztaljuk, hogy a legvastagabb lerakódás a CMw kódhoz tartozik (139 mm), de az mCw, Aw, AF és C kóddal jelölt időjárési helyzetekben is kialakulhat igen vastag, 80 mm-t is meghaladó tapadó hó.



15. ábra: Tapadó havas lerakódások maximális vastagsága a Péczely-kódok alapján

A lerakódások vastagsága alapján is végeztünk statisztikai vizsgálatot, melyben arra voltunk kíváncsiak, hogy van-e összefüggés az egyes helyzet típusok és a felhalmozott hó vastagsága között. Ehhez a vizsgálathoz az ún. analysis of variance, azaz varianciaanalízist alkalmaztuk, röviden: ANOVA. A módszer az egyező szórású, normál eloszlású csoportok átlagának összevetésére alkalmas statisztikai eljárás. Adott vizsgálat során a teljes adatmennyiség, mint alaphalmaz össz-szórását, konkrétan összvarianciáját analizálva abból a nézőpontból, hogy a szórásbeli eltérések mögött a véletlen vagy egy ismert tényező hatása áll-e. A számítás során feltesszük, hogy a különböző kódok alatt regisztrált nedves hó vastagságai normál eloszlást alkotnak, tehát $N(m, \sigma^2)$ ahol m a várható érték, σ^2 pedig a szórásnégyzet. H_0 hipotézis szerint nincs különbség az egyes vastagságok várható

értékeiben, így nincs összefüggés az egyes helyzettípusok és a felhalmozott hó vastagságai között. H_1 hipotézis szerint legalább egy csoport mintái eltérnek a várhatóértéktől. Az alábbi adatokat kell kiszámítani a módszerhez, amelyhez a táblázatban feltüntetett jelöléseket alkalmazzuk:

	Péczy-kódok			
Elemek (Vastagsági értékek [mm])	x_{11}	x_{12}	...	x_{1j}
	x_{21}	x_{22}	...	x_{2j}

	x_{i1}	x_{i2}	...	x_{ij}

külső variancia:
$$S_k^2 = \frac{\sum_{j=1}^m n_j \cdot (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{m-1}$$

belső variancia:
$$S_b^2 = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-m}$$

ahol n az összes elem száma, n_j az egyes kódok elemeinek száma, m az összes kód darabszáma (13), \bar{x}_j az egyes kódokhoz tartozó vastagsági értékek átlaga, \bar{x} a teljes átlag. Ezután az úgynevezett F értéket kell kiszámítani.

$$F = \frac{\text{külső variancia}}{\text{belső variancia}}$$

Amennyiben az F érték átlépi a küszöbként meghatározott $\alpha=0,05$ értéket, akkor szignifikáns eltérés tapasztalható és elvetjük H_0 hipotézist. Végül az egyes csoportokat is összehasonlítjuk t-próbával (Tukey-próba), mely során megtudhatjuk, hogy mely Péczy-kódhoz tartozó vastagságok térnek el szignifikánsan.

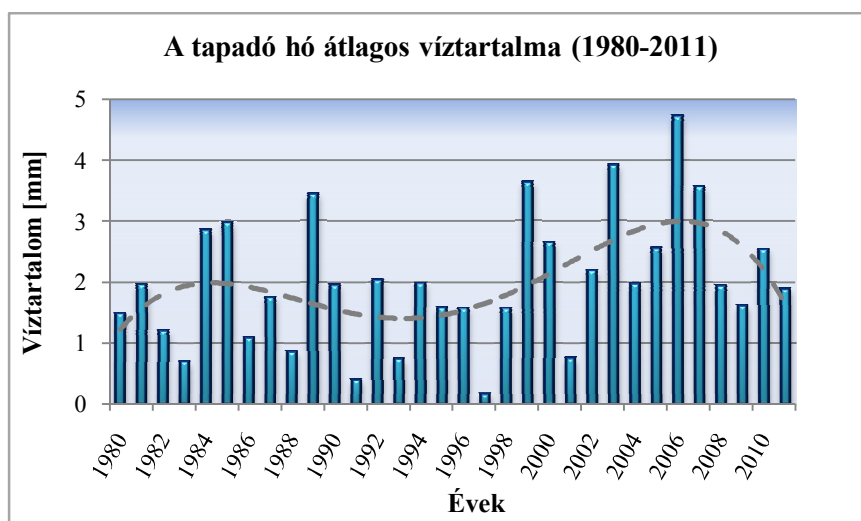
A vizsgálat eredménye, hogy a C (13-as) Péczy-típus átlagos vastagsága szignifikánsan eltér a többi típusétól 99%-os szignifikanciaszinten. Ez azzal magyarázható, hogy a 13. típus – cikloncentrum – a többi típushoz képest jelentős csapadékkal bír, ezen kívül egy részét mediterrán ciklonok alkotják. A kódhoz tartozó eseteket ezért külön is megvizsgáltuk abból a szempontból, hogy a ciklonok honnan érkeztek hazánk fölé.

Összesen 28 esetben volt a vizsgált időszakban C makroszintoptikus helyzetben tapadó havas lerakódás. Az Időjárási napijelentések alapján ebből 9 esetben a mediterrán térségből származó ciklonok kerültek a hazánk fölé, ami az esetek 32%-át teszi ki. Tehát a CMw kódhoz tartozó tapadó havas lerakódások vastagsága is szignifikánsnak tekinthető a többi típuséhoz képest.

7.3 A lerakódások víztartalma

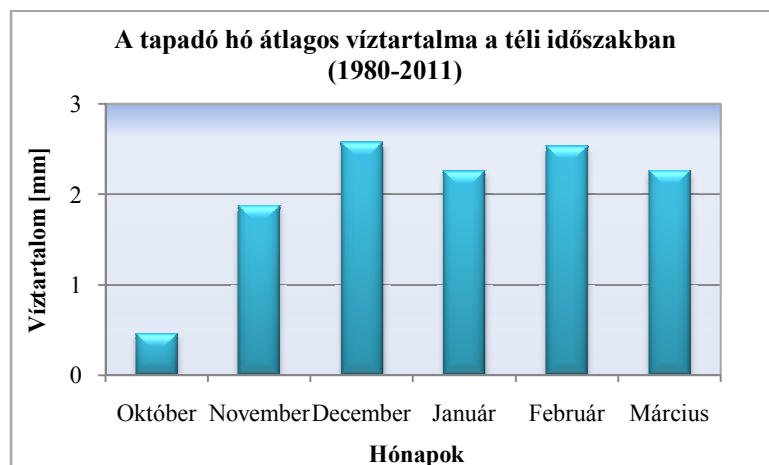
Elemeztük az 1980-2011 téli időszak alatt bekövetkezett nedves, ill. fagyott tapadó hó víztartalmait is. A víztartalom, ahogy arról már korábban is tettünk említést a zúzmaryamérő rendszeren felhalmozott hó üveghengerben történő felolvasztásával kapott érték mm-ben. Ez átváltható tömegegységre, méghozzá úgy hogy 1 mm megfelel 20 g-nak (Domonkos et.al, 2009). Ezáltal a víztartalom tekinthető a lerakódások tömegének is. Mivel ez a mennyiség 1 m hosszú vezetékmentára rakódik fel, így g/m (vagy kg/m) értékben is megkapjuk az adatokat.

Az egyes években előfordult tapadó havas napok átlagos víztartalmait a 16. ábrán tüntettük fel. Átlagosan 2-4 mm (40-80 g) közötti értéket kapunk, ami alacsonynak számít, azonban megfigyelhető egy kb. 5-8 éves periodicitás az adatok között. 1984-89 között, valamint 1999-2007 között is magasabb víztartalom (nagyobb tömeg) volt a jellemző, mint 1990-1998 között. Láthattuk azonban, hogy egy hasonló menet a tapadó havas napok száma között is kimutatható. Ebből arra következtethetünk, hogy a Magyarországon fellépő nedves hó előfordulása és annak mennyisége is egy bizonyos ciklust követ. Az ábrán a periodicitást szürke szaggatott vonal szemlélteti.



16. ábra: Tapadó havas lerakódások átlagos víztartalma (mm-ben) 1980-2011 között (1 mm=20 g)

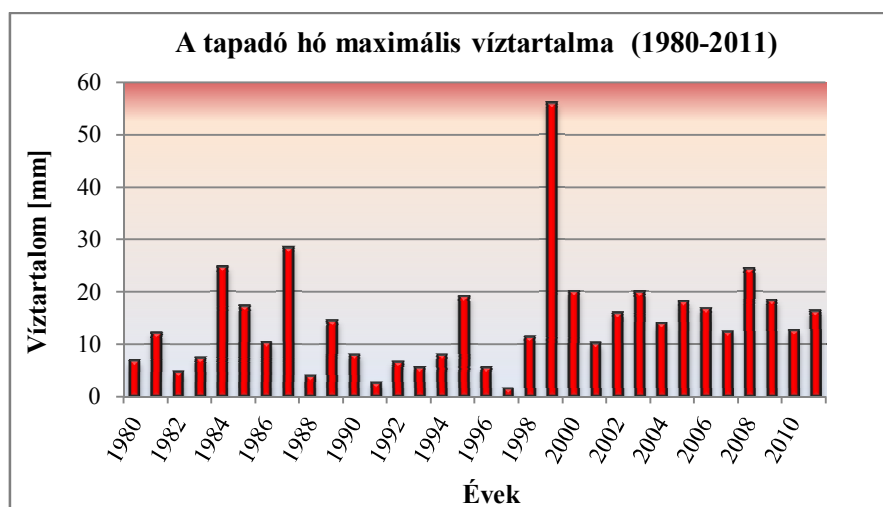
Amennyiben havi bontásban nézzük meg az egyes esetek átlagos víztartalmát, azt tapasztaljuk, hogy a „legvizesebb” tapadó hó általában decemberben fordul elő. Azonban februárban hasonlóan magas a víztartalom, januárban és márciusban megegyező (2,25 mm), ezt követi a november, és végül a legalacsonyabb októberben fordul elő (17. ábra).



17. ábra: A tapadó hó átlagos víztartalma a téli időszak egyes hónapjaiban (1 mm=20 g)

Ezeztől az értékektől sokkal jobban eltérnek az igazán veszélyes (anyagi károkat okozó, és emberi életet veszélyeztető) tapadó havas lerakódások víztartalmai. Ezért az éves maximumokat is figyelembe kell vennünk. A 18. ábrán láthatjuk, hogy 10-20 mm fordult elő a leggyakrabban, azonban e feletti értékeket is találunk. Egy igencsak kiugró érték az 1999 telén mért 55,8 mm-es víztartalom, melyet Pakson regisztráltak (1999.11.20-án), a kódolás alapján 13-as – ciklonközpont – Péczy-típusba tartozik. Ebből is látszik, hogy a 13-as típusba tartozó helyzetek mennyire veszélyesek lehetnek.

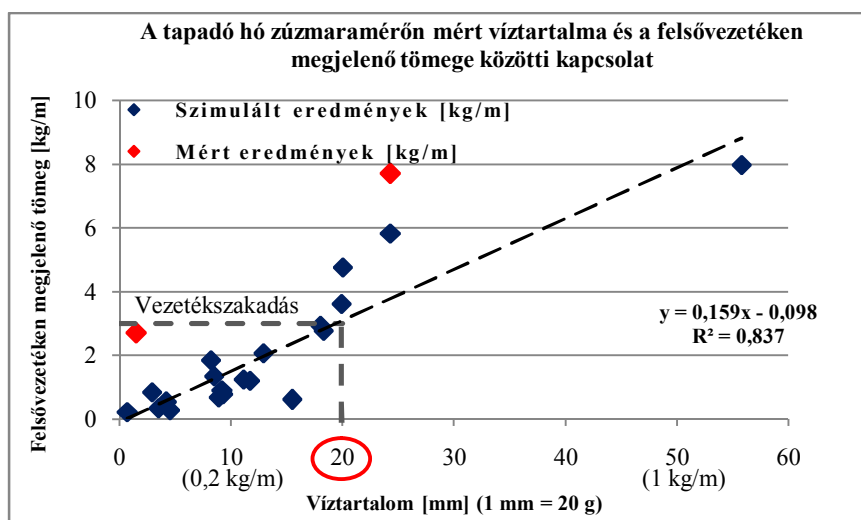
Azonban attól, hogy ismerjük a lerakódások víztartalmát, illetve ebből a zúzمامamérőn felhalmozott hó tömegét, még nem tudjuk, hogy egy távvezeték esetében ez mekkora tehertöbbletet jelenthet. Az eredmények alapján tehát arra a kérdésre kerestük a választ, hogy az adott lerakódások víztartalma között és egy vezetéken körkörösén felhalmozódott hó tömege között milyen kapcsolat írható le.



18. ábra: A tapadó havas lerakódások maximális víztartalma 1980-2011 között (1 mm=20 g)

Szimulációkat végeztünk tehát a már bemutatott Poots-féle módszer segítségével, mivel az eddigi kísérletek alapján ez a módszer pontosabbnak bizonyult, mint a Sundin és Makkonen-féle eljárás. Kiválasztottunk néhány esetet, melyekhez az OMSz adatbázisából 10 perces hőmérséklet, csapadék és szél adatokat használtunk fel. Ez alapján kiszámítottuk, hogy egyes esetekben mekkora felhalmozódás lenne [kg/m] egy vezetéken, és összehasonlítottuk a zúzmaramérőn regisztrált víztartalommal (19. ábra). Tehát a vízszintes tengelyen a mérőrendszeren regisztrált víztartalom (átváltással tömeg), a függőleges tengelyen a távvezetéseken megjelenő tömeg látható. A szimulációval végzett eredmények erős korrelációt mutatnak a két tényező között ($R^2=0,837$). Mivel 3 kg/m súlytöbblet esetén már súlyos károk alakulhatnak ki, ezért az ábrán megjelöltük azt a víztartalom-mennyiséget, mely esetén már számíthatunk akár vezetékszakadásra is. A módszer alapján ez 20 mm-es víztartalom (400 g) esetén következik be.

In situ mérések híján sajnos nem tudjuk összehasonlítani az általunk kapott eredményeket terepen mért adatokkal. Szerencsére a 2009. január 27-28-i Vas és Zala megyében történt tapadó hó okozta károkról a BME folytatott vizsgálatokat, így két mérési eredményt feltudunk tüntetni (Szabó et. al., 2009). A tanulmány szerint a távvezetéseken felhalmozódott hó 2,7 és 7,7 kg/m, melyek az általunk szimulált adatoknál jóval magasabbak (19. ábra). Több mérés alapján lehetne verifikációt végezni a mért és modellezett eredmények között, így azonban csak feltételezhetjük, hogy az általunk használt módszer alábecsüli a felhalmozott hó tömegét.



19. ábra: A tapadó hó mérőrendszeren mért víztartalma és a felsővezetéseken megjelenő tömege közötti kapcsolat

Fontos megjegyezni, hogy a zúzmaramérőn regisztrált víztartalomtól számított lerakódások tömege sokkal kevesebb, mint a távvezetékeken megjelenő tapadó hó mennyisége. Példaként a mérési eredményeket emelnénk ki. A 2009. január 28-29.-én Szentgotthárdon történt károk elemzésénél a felsővezetékeken 2,7 kg/m és 7,7 kg/m tehertöbblet adódott egy-egy távvezetéken. A zúzmaramérési adatok között ebben az időpontban regisztrált nedves hó víztartalma 1,5 mm és 24,3 mm volt. Tehát:

zúzmaramérőn: $1,5 \cdot 20 \text{ g} = 30 \text{ g}$

felsővezetéken: 2,2 kg

zúzmaramérőn: $24,3 \cdot 20 \text{ g} = 486 \text{ g} \cong 0,5 \text{ kg}$

felsővezetéken: 7,7 kg

Ezt a nagy különbséget a hazai kutatások során már Kolláth Kornél és Somfalvi-Tóth Katalin is megemlíti (Légkör, 2009). Ezenkívül az előzőekben volt szó arról, hogy a tapasztalatok azt mutatják, hogy sokkal nagyobb mennyiségű hó képes megtapadni a magasban elhelyezkedő vezetékeken (Csomor, 1980).

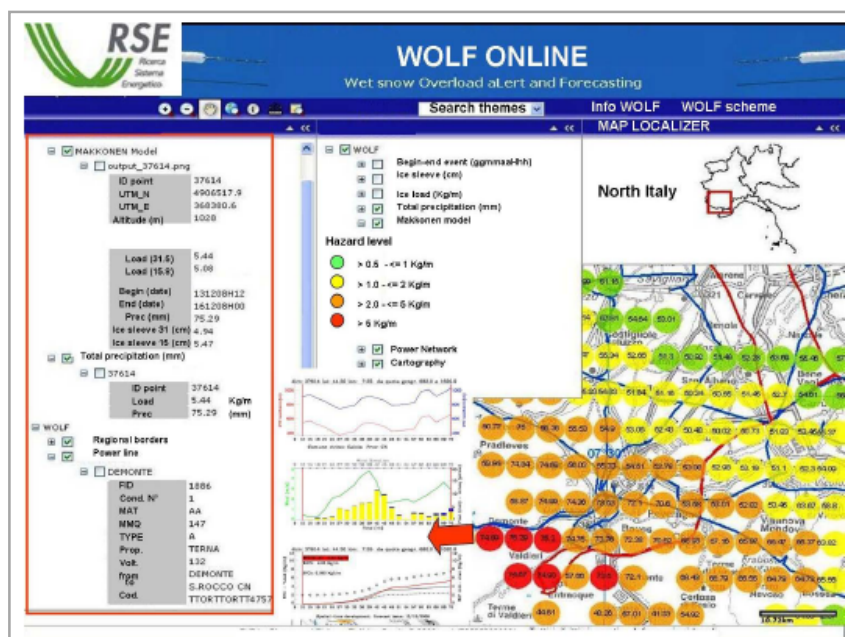
8. Előrejelzési lehetőségek

Magyarországon az EON részére 3 cm feletti hó esetén küld az OMSz írásos prognózist, de még nincs nedves hóra vonatkozó veszély-előrejelzés. A különböző módszerekkel történő modellezés verifikációja jelenleg még folyamatban van. Szeretnénk, ha sikeresen lehetne alkalmazni egy olyan eljárást, mely segítségével előrejelzett hőmérséklet, csapadék, szél és nedvesség adatokból tapadó hó felhalmozódás is számíthatóvá válna.

Léteznek már különböző jegesedési típusokra bevezetett veszélyjelző rendszerek, azonban csak 2010 óta működik tapadó hóra vonatkozóan veszélyjelző rendszer (Olaszországban), melynek neve WOLF (**W**et snow **O**verload **a**lert and **F**orcasting). Segítségével nyomon követhető hogy hol, mikor és mekkora mértékű hófelhalmozódás várható (Bonelli et al., 2011). A térképes megjelenítésben az alábbi, nemzetközileg is elfogadott színskálát alkalmazzák a veszélyességi fok meghatározására:

- ❖ 0,5 – 1 kg/m → **zöld jelzés**
- ❖ 1 – 2 kg/m → **sárga jelzés**
- ❖ 2 – 5 kg/m → **narancssárga jelzés**
- ❖ > 5 kg/m → **piros jelzés**

A rendszerrel megjelenített eredmények könnyen és gyorsan értelmezhetőek, akár 72 órára előre képes jelezni a felhalmozódás mértékét, ill. az egyes rácspontokon térképes formában is meg lehet tekinteni az adatokat (20. ábra).



20. ábra: Olaszországban használt WOLF rendszer kezelő felülete

Ahhoz, hogy hazánkban is sikeresen tudjunk alkalmazni egy tapadó hó veszélyjelző rendszert, előtte számos kísérletet és szimulációt kell végeznünk. Amennyiben a múltban bekövetkezett eseteket már viszonylag pontosan tudjuk modellezni, lehetővé válik egy, az olaszországihoz hasonló rendszer bevezetése.

8.1 Modellezés

Néhány kiválasztott esetre elemeztük a két eljárást (Sundin és Makkonen, valamint a Poots-féle módszer). Ebben a fejezetben összesen 6 esetet mutatunk be, amelyeket a zúzmaramérő rendszeren felhalmozódott hó vastagságai alapján válogattunk ki. A legnagyobb felhalmozódással járó helyzeteket (100 mm, ill. e feletti értékeket) vizsgáltuk meg, mivel kíváncsiak voltunk, hogy a módszerek képesek-e visszaadni ezen lerakódások vastagságait. Mielőtt azonban rátérnénk az eredmények értelmezésére, szükséges az adott meteorológiai hátteret is megvizsgálni.

A megfelelő vertikális hőmérsékleti rétegződés és a folyékony víztartalom (LWC) elengedhetetlen feltétele a nedves hó kialakulásának. Ezért az ERA Interim adatbázisa (www.ecmwf.int/) alapján készítettük el GRADS program segítségével a kiválasztott esetek vertikális hőmérsékleteinek, valamint folyékony víztartalmainak profiljait (21.a, 22.a, 23.a, 24.a, 25.a, 26.a ábrák).

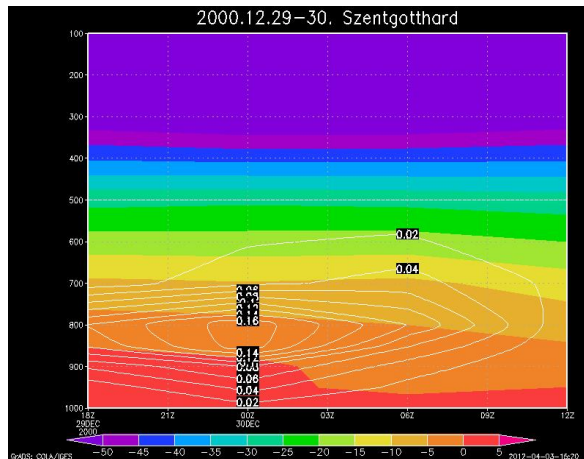
Az esetekhez tartozó modellfuttatás eredményei a 21.b, 22.b, 23.b, 24.b, 25.b, 26.b ábrákon láthatók. A mérés időpontjában, vagyis a felhalmozódás befejezésével egyidejűleg feltüntettük a két módszer alapján kapott végső eredményeket [mm], valamint összehasonlítás céljából a mért értéket is [mm]. Minden esetben megnéztük, hogy a mért adatok (hőmérséklet, szél, csapadék) és az ERA Interim adatbázisából vett adatok mennyire térnek el egymástól. Ezt azért végeztük el, mert az adatbázis $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ rácscsatlósítású, így egy adott város koordinátáihoz csak a legközelebbi rácspont koordinátáit tudtuk felhasználni, mely lehetséges, hogy nem felel meg a mért adatoknak.

Az eltérést az átlagos abszolút hibával jellemeztük (Mean Absolute Error: MAE), melynek kiszámítása a következőképpen történik:

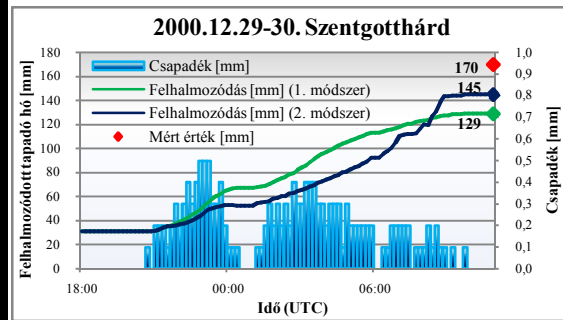
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i - y_i|$$

ahol n az adatsor hossza, f_i az adatbázisban szereplő érték, y_i a mérési adat.

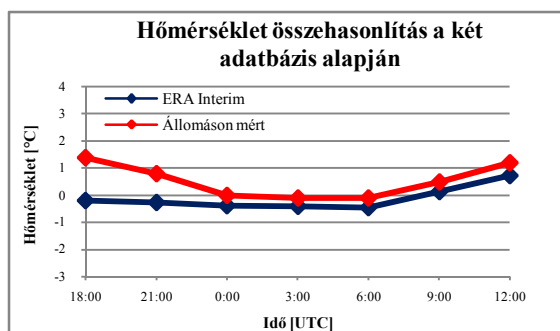
A felszíni hőmérsékletek összehasonlítása a 21.c, 22.c, 23.c, 24.c, 25.c, 26.c ábrákon, míg a szél adatok összevetése a 21.d, 22.d, 23.d, 24.d, 25.d, 26.d ábrákon látható.



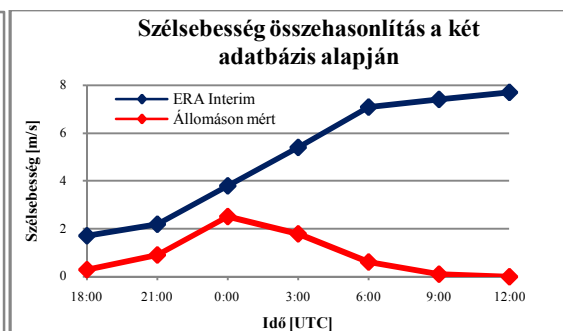
a.,



b.,



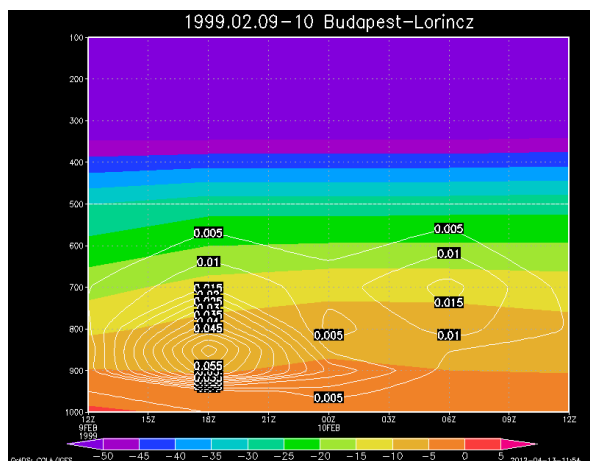
c.,



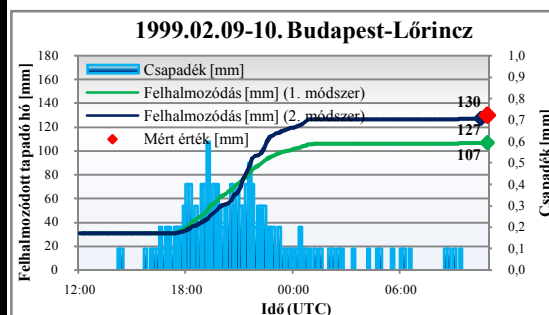
d.,

21. a,b,c,d ábrák: 2000.12.29-30-án történt havazás vizsgálata Szentgotthárdon

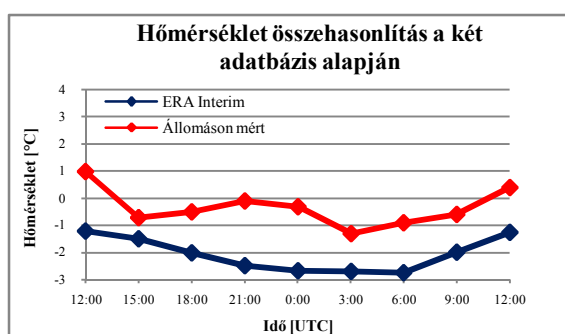
Szentgotthárdon a vizsgált időpontban mérték a legvastagabb tapadó havas lerakódást Magyarországon. Ekkor egy mediterrán ciklon érte el hazánk területét (6-os Péczy-típus), amely északkeleti irányba mozgott, és főként havazást, havas esőt okozott. A vertikális hőmérsékleti profil alapján a felszíni hőmérséklet végig 0-5°C között alakult, melyhez 850 hPa-os magasságban, a felhőzetben 0,14-0,16 kg/m³-es folyékony víztartalom párosult. Kb. 22:00-kor havazás kezdődött, mely akkora víztartalommal rendelkezett, hogy megkezdődött a nedves hó megtapadása a vezetékeken. A felhalmozott hó modellezett növekedését láthatjuk a két módszer alapján a 21.b ábrán, melyen jól látható, hogy amikor nem vesszük figyelembe a szél hatását, és konstans hósűrűséggel számolunk (1. módszer), nem alakul ki a valóságnak megfelelő hóvastagság. A második módszer már közelebb áll a mért értékhez (145 mm), azonban ez is alábecsüli a tapadó hó mennyiségét. A 21.c ábra alapján az ERA Interim adatai és a mért értékek nagy hasonlóságot mutatnak egymással. Mérés alapján 0-2°C közötti, reanalízis adatok alapján 0-1°C értékeket kapunk. A két adatsor közötti átlagos abszolút hiba: MAE=0,65. A szélesség összehasonlítása esetén azt tapasztaljuk, hogy az ERA Interim adatai jóval nagyobb értékeket mutatnak, ebben az esetben MAE=4,16.



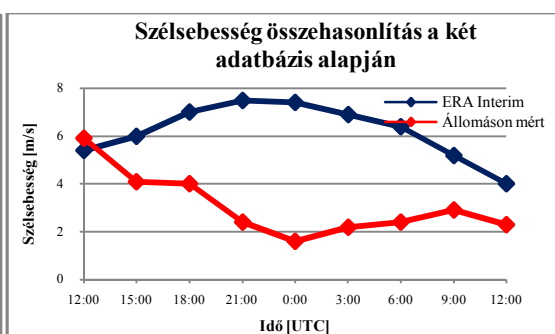
a.,



b.,



c.,



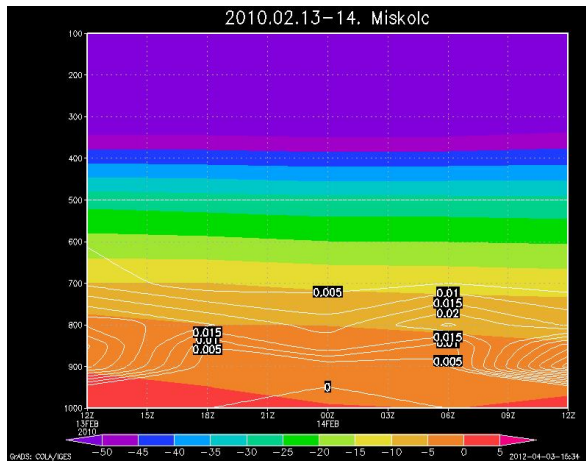
d.,

22.a,b,c,d ábrák: 1999.02.09-10-én történt havazás vizsgálata Budapest-Lőrincen

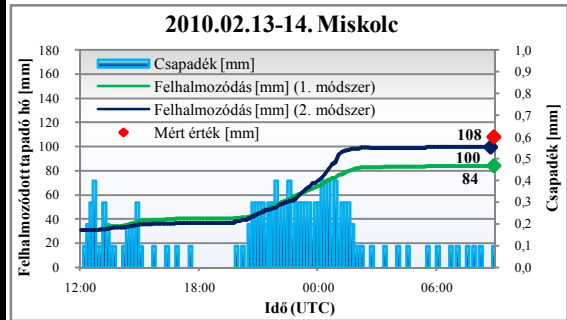
Budapest-Lőrinc állomáson mérték a második legvastagabb tapadó havas lerakódást. Ekkor a Közép-, és Dél-európai térség időjárását intenzív ciklonok alakították (13-as Péczy-típusú helyzet).

A vertikális hőmérsékleti profil alapján (22.a ábra) látható, hogy a felhőzetben (900-800 hPa-os szinteken) a folyékony nedvességtartalom 0,045-0,055 kg/m³ körül alakult. Az ERA Interim adatai szerint túl hideg volt az idő nedves hófelhalmozódáshoz (22.c ábra), azonban a mérési adatok alapján 01:00 UTC-ig kedvezőek voltak a hőmérsékleti viszonyok, és csak ezután csökkent $-0,5^{\circ}\text{C}$ alá. Ezáltal a felhalmozott nedves hó ráfagyhatott a vezetésekre, ami megegyezik a modellezés alapján kimutatott egyenes szakasszal (22.b ábra). Az első módszer alábecsüli a hó vastagságát, de a második módszer nagy pontossággal visszaadja a mérési eredményt (127 mm). Ezenkívül megfigyelhető, hogy a csapadékintenzitást jól követi a felhalmozódás üteme, vagyis nagyobb csapadékintenzitás mellett gyorsabb a lerakódás sebessége is.

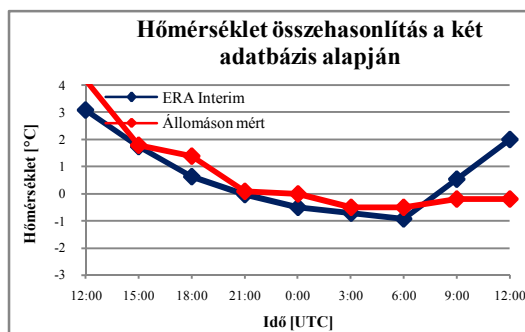
A két hőmérséklet alapján számolt MAE=1,72, tehát a hiba több mint 1°C. A szélsebességek összehasonlítása esetében az ERA Interim reanalízis adatai magasabbnak bizonyultak, a mérési eredményekhez viszonyítva. A kiszámított MAE=3,22.



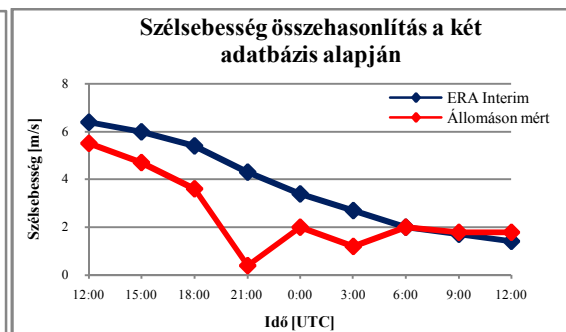
a.,



b.,



c.,



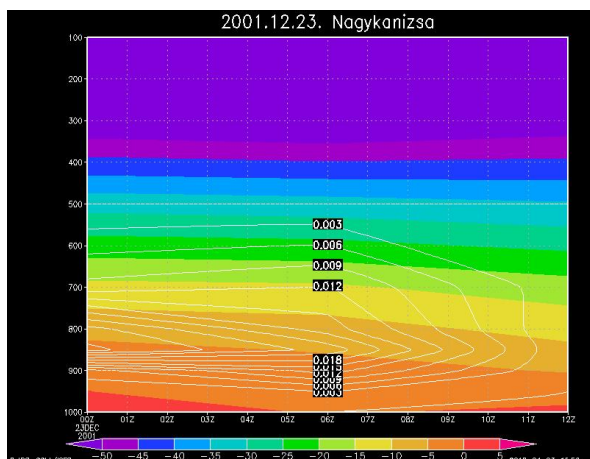
d.,

23.a,b,c,d ábrák: 2010.02.13-14-én történt havazás vizsgálata Miskolcon

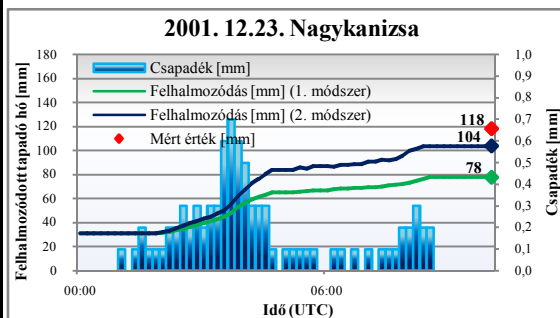
Európa időjárását a Brit-szigetek felett lévő anticiklon határozta meg (2-es Péczy-típus), ugyanakkor a Balkán-félsziget felett örvénylő nagykiterjedésű ciklon is hatással volt hazánkra.

Miskolcon 12:00 UTC-kor még eső formájában hullott csapadék, amit a hőmérsékleti értékek (23.c ábra) is alátámasztanak, mivel a mérés alapján 4,2°C, az ERA Interim adatai alapján pedig 3,14°C volt. A hőmérséklet csökkenésével a csapadék halmazállapota is megváltozott, aminek köszönhetően kialakult a nedves hó. 00:00 UTC-kor a hőmérséklet negatív tartományba lépett, ezt a vertikális hőmérsékleti profilon is láthatjuk (23.a ábra), azonban a felhalmozódáshoz még elégséges -0,5°C felett alakult. A magasabb szinteken (850-700 hPa) láthatjuk a folyékony víztartalmat a felhőzetben, amely 0,005-0,015 kg/m³ között változott. 02:00 UTC után a csapadék mennyisége csökkent, így a folyamat végére 108 mm tapadó havat mértek, melyhez a legközelebb ismét a második módszer áll.

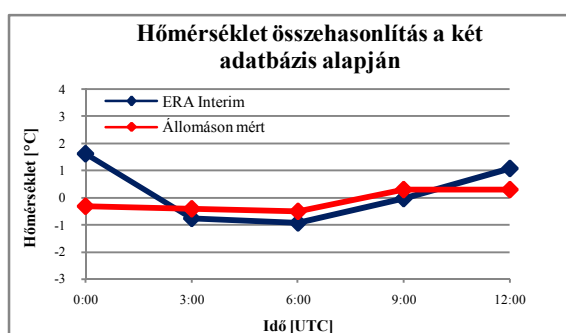
A két adatbázis hőmérsékleti különbségeiből számolt MAE=0,68. A szélprofilok összehasonlítása alapján a mérési eredmények alacsonyabb értékeket mutatnak, azonban menetükben hasonlítanak. Az átlagos abszolút hiba a két sebességi adatsor között MAE=1,26.



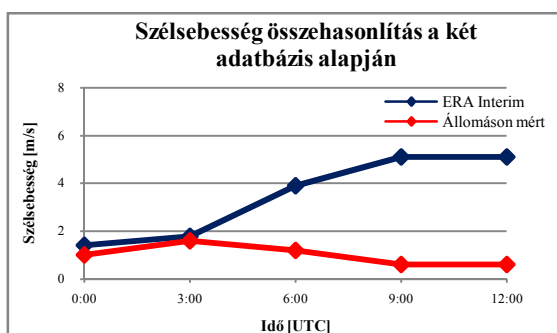
a.,



b.,



c.,



d.,

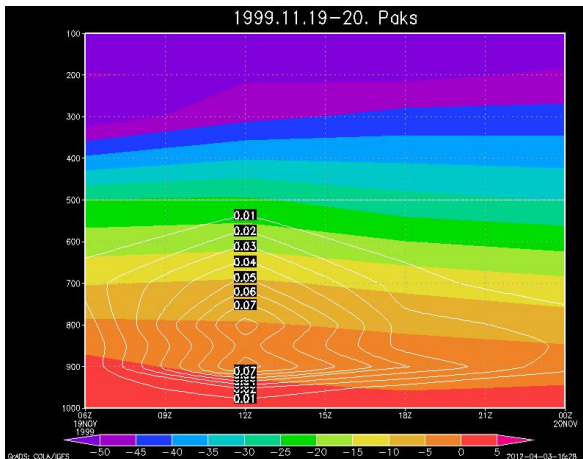
24.a,b,c,d ábrák: 2001.12.23-án történt havazás vizsgálata Nagykanizsán

A vizsgált időszakban egy hosszan elnyúló, hullámzó frontálzóna húzódik a Kelet-európai-síkság középső területétől egészen a Földközi-tenger nyugati medencéjéig. Hazánk időjárását is ez határozta meg (4-es Péczely típus).

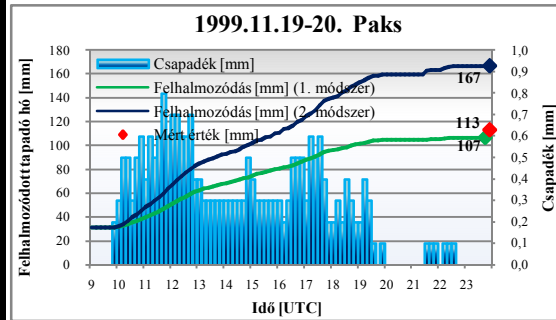
Nagykanizsán a zúzmaramérő rendszeren 118 mm nedves tapadó havat regisztráltak. A 24.b ábrán láthatjuk, hogy az első módszer szerint 78 mm, míg a második alapján 104 mm nedveshó-felhalmozódás történt, tehát ismét a második módszer bizonyult jobbnak. Megfigyelhető, hogy a csapadék hirtelen ugrása maga után vonja a felhalmozott hó erősebb növekedését, míg alacsonyabb és egyenletesebb csapadék lassabb felhalmozódást eredményez.

A vertikális hőmérsékleti és LWC profilon (24.a ábra) látható a 900 hPa-os magasságban lévő felhőzet folyékony víztartalma, mely 0,012-0,018 kg/m³ körül alakult.

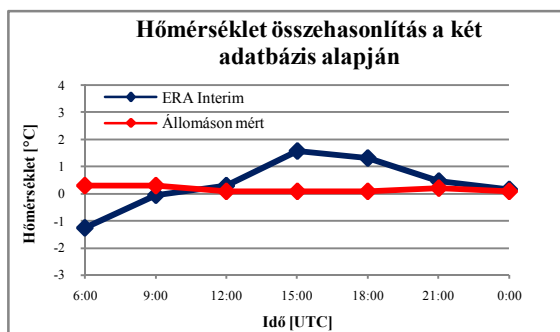
A felszíni mért hőmérsékleti és a reanalízis adatok nagy hasonlóságot mutatnak egymással, MAE=0,76, azonban a szélsébségek összehasonlítása során úgy tűnik, szisztematikus felülbecslést kapunk az ERA Interim adatoknál. MAE=2,46.



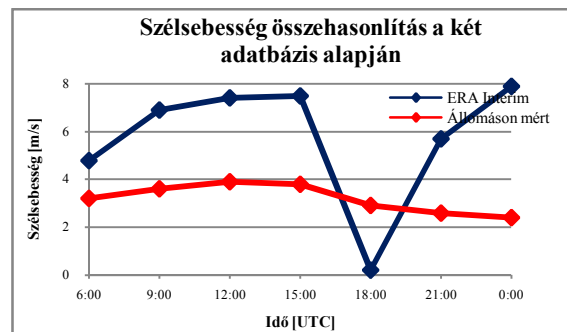
a.,



b.,



c.,

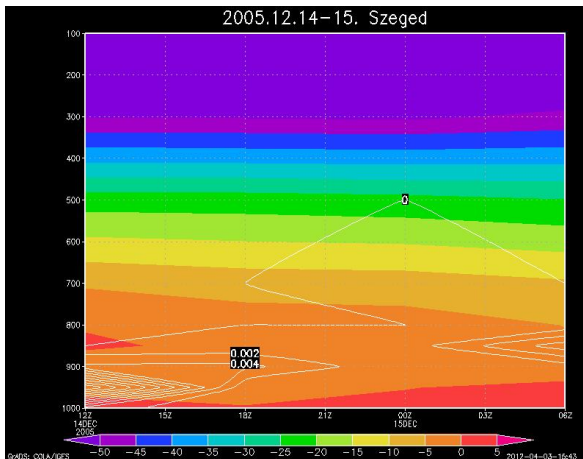


d.,

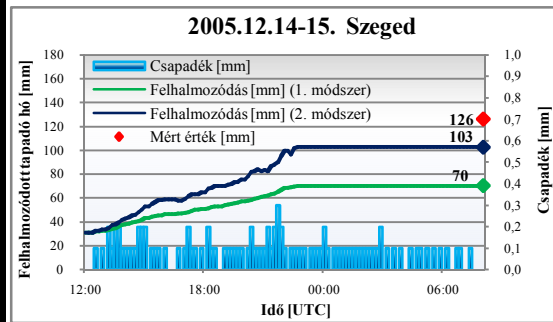
25.a,b,c,d ábrák: 1999.11.19-20-án történt havazás vizsgálata Pakson

Pakson mérték az elmúlt 30 év során a legtöbb vizet tartalmazó tapadó havas lerakódást (55,8 mm-es víztartalom). Ekkor egy gyors mozgású aktív ciklon vonult át Magyarország középső területein. Ahogy azt láthatjuk, a vertikális hőmérsékleti rétegződés megfelelő volt a kialakulás szempontjából, és a felhőzetben lévő LWC 0,01-0,07 kg/m³ körül alakult. A hatalmas mennyiségű csapadék főként havas eső és hó formájában hullott. A sok csapadéknak és a viszonylag egyenletes 3-4 m/s-os szélsébségnek köszönhetően az állomáson 113 mm nedves tapadó havat regisztráltak. Módszereink között az első közelítette meg jobban a valóságnak megfelelő eredményt, míg a második módszer felülbecsülte a felhalmozódás mértékét. A hiba abban keresendő, hogy jelenleg még nem tudjuk figyelembe venni azt, hogy kisebb vastagságú felhalmozódás is tartalmazhat magas víztartalmat, ami egyben nagyobb súlyt is jelent. Tehát a második módszer esetében a magas víztartalomhoz természetesen nagyobb felhalmozódás is párosul.

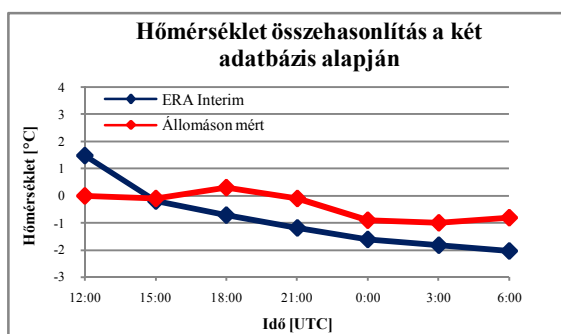
A hőmérsékleti és szélsébségi adatok közötti különbségek a 25.c,d ábrákon láthatóak. Míg a hőmérsékletek esetében a hiba kisebb (MAE=0,73) addig a szélsébség esetében nagy különbségek adódtak. MAE=3,34.



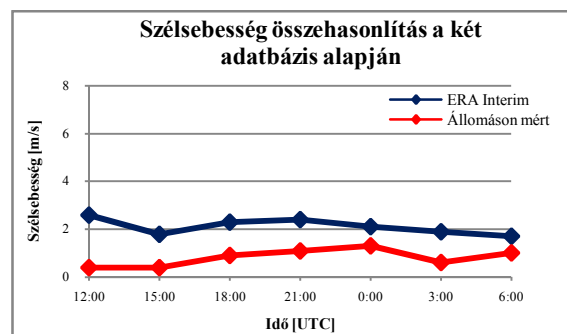
a.,



b.,



c.,



d.,

26.a,b,c,d ábrák: 2005.12.14-15-én történt havazás vizsgálata Szegeden

Ebben az időszakban a Kárpát-medencétől keletre húzódó anticiklon határozta meg Magyarország időjárását (5-ös Péczy-típus), ugyanakkor a Földközi-tenger déli medencéje fölött elhelyezkedő ciklon is hatással volt hazánk déli területeire.

Szegeden 12:20 UTC-kor havazás kezdődött, melyből a csapadék intenzitása egyenletes 0,1-0,2 mm között változott. Ahogy azt már láthattuk, az egyenletes csapadékintenzitás lassabb tapadó havas felhalmozódást eredményez, ezt láthatjuk a 26.b ábrán. Mindkét módszer esetén alábecslést kapunk, az első módszer 70 mm-es, míg a második 103 mm-es többletet ad a valós 126 mm-hez képest. A vertikális hőmérsékleti profilon (26.a ábra) megfigyelhető, hogy a felszíni 1000 hPa-os szinten folyamatosan 0-5°C között alakult a hőmérséklet, azonban a 26.c ábra mért felszíni, és reanalízis adatai alapján is már 00:00 UTC előtt (mérés szerint 21:40-kor) a hőmérséklet -0,5°C alá csökkent. Ennek a hőmérsékleti tartománynak köszönhetően a további csapadék már nem tudott megtapadni a vezetékeken. A két adatsor alapján számított MAE=0,91. A két adatbázis szélsebességeinek összehasonlítása alapján az ERA Interim analízis adatai egyenletes 2 m/s-nak adódtak. Az eddigiektől eltérően ezek az adatok nem állnak messze a mért eredményektől, MAE=1,3.

A fenti eredmények alapján kimutattuk, hogy az általunk használt második módszer (Poots-féle módszer) sokkal jobban közelíti a felhalmozódások vastagságát, mint az első (Sundin és Makkonen-féle). Azonban láthatjuk, hogy a megfelelő eredményekhez szükséges az adatok minél finomabb felbontása, továbbá a hőmérsékleti és csapadékintenzitási adatok minél pontosabb ismerete. Az ERA Interim reanalízis adatbázisával való összehasonlítás során megállapíthatjuk, hogy a hőmérséklet kevesebb, mint 1°C-os abszolút hibával, míg a szélesség kb. 2-3 m/s (egyes esetekben akár több mint 3 m/s) abszolút hibával rendelkeznek. Az ezen az adatokkal történő számolás hibás tapadó havas felhalmozódásokat eredményezett. Többször előfordult az az eset, hogy a reanalízis adatok alapján egyáltalán nem történt felhalmozódás, (a hőmérséklet nem megfelelő intervalluma vagy a csapadék hiánya miatt), míg a mérési eredmények alapján számottevő hófelhalmozódás történt.

Következtetésünk, hogy a tapadó hó sikeres előrejelzéséhez nagyon pontos hőmérsékleti, csapadék és szél adatok szükségesek, valamint részletes tér- és időbeli felbontás.

8.2 Esettanulmányok

Részletesen elemeztük két időpont meteorológiai hátterét, mivel ezekben az esetekben komoly károkat okozó nedves hófelhalmozódás történhetett. Ezeket az 5.2 és 5.3 fejezetben részletesen leírt módon vizsgáltuk meg.

Az első az 1999.11.19-20-án történt eseményeket mutatja be, mivel regisztrálták a legnagyobb víztartalommal rendelkező havas lerakódást a 30 éves zúzmara adatsorok alapján. Erre láthattunk már példát az előző fejezetben, azonban megvizsgáltuk, hogy mely területeket érinthetett még a havazás.

A második esettanulmány az 1999.12.28-29-én történt események részletes meteorológiai hátterét mutatja be. Ekkor szintén jelentős mennyiségű nedves hó alakult ki az országban.

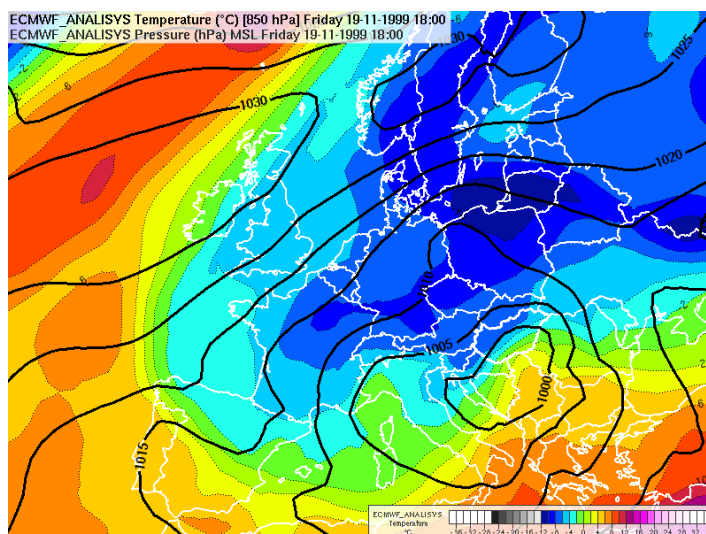
Az aktuális meteorológiai háttér leírásához az észlelővel ellátott szinoptikus állomások órás adatait használtuk fel (hőmérséklet, csapadék, szél, hóvastagság és zúzmara adatok).

8.2.1 Az 1999. november 19-20. havazás vizsgálata

Télen a nagy mennyiségű csapadékot hozó időjárási rendszerek hazánkban többnyire mediterrán ciklonokhoz társulnak. Az OMSz által készített Időjárás napijelentésekben megtaláljuk, hogy 19-én (pénteken) Európa középső és déli területein egy intenzív ciklon alakította az időjárást. A 45. szélességi körtől északra általában hó, attól délre pedig eső volt a jellemző csapadékforma. Magyarországon az ország nagy részén havazást jelentettek, azonban a Dél-Alföldön, valamint a Tiszántúlon havas eső és eső egyaránt előfordult. A hőmérséklet a dél-délnyugati országrészben (-1) – (+1) °C között alakult, amihez a délután folyamán csapadék is társult, ez kedvezett a tapadó hó kialakulásának. A nap folyamán lehullott csapadék mennyisége 0-34 mm között változott. Ennek maximuma Nagykanizsán és térségében, valamint Pakson és környékén volt. A Zala megyei térségben havazás volt az uralkodó, Bács-Kiskun megyében havazás, havas eső és eső is előfordult. A csapadék másnap hajnalban állt el, vagyis 20-án reggel (Gulyás, 2011).

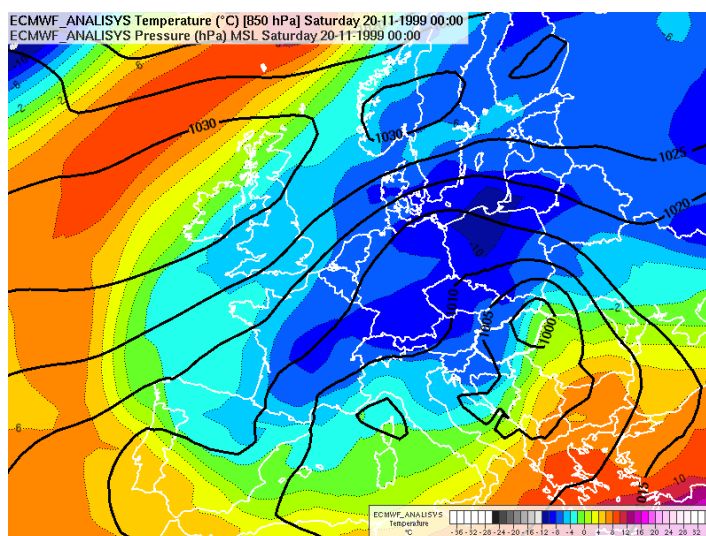
Pécs, Paks, Nagykanizsa, Szeged, Békéscsaba, Kecskemét és Szolnok térségéből jelentettek 19-én havazást, 0 °C körüli hőmérséklet mellett. A csapadékzóna délnyugat felől érkezett, így Pécs és Szeged esetében már délelőtt 9-10 órakor megjelent, majd haladt Paks, Kecskemét irányába, ahol először 13 órakor észleltek havazást. A csapadékintenzitás egyenletes 1-2 mm/h volt, a szélesség 3-5 m/s között változott, de egyes állomásokon erős lökések is jelentettek (Időjárás napijelentés 112. évfolyam 324. szám).

Másnap reggelre a zúzmaramérő műszeren Pakson 113-116 mm, Nagykanizsán 70-78 mm nedves tapadó havat regisztráltak. A pontos időjárási helyzetet a 27. és 28. ábrák mutatják.



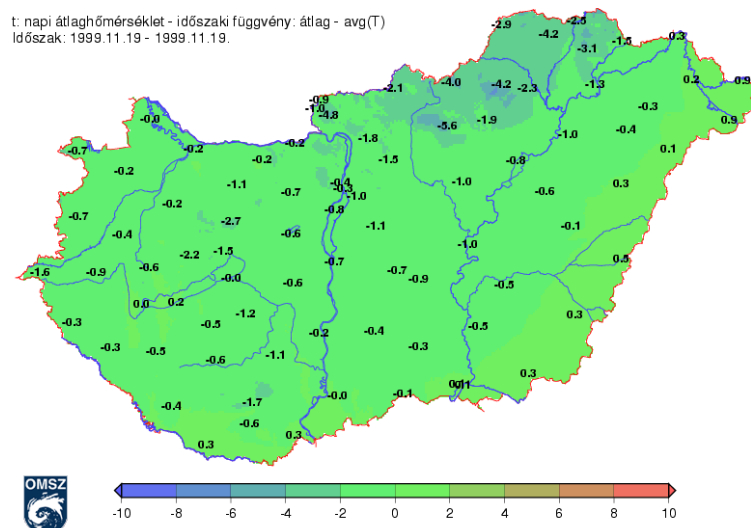
27. ábra: ECMWF analízis 1999. november 19-én 18 UTC időpontban

Az ECMWF talaj analízis térképén fekete folytonos vonalak jelölik a talajszinti légnyomás izovonalait, míg a színezés a 850 hPa-os nyomási szinten lévő hőmérsékleti mezőt.



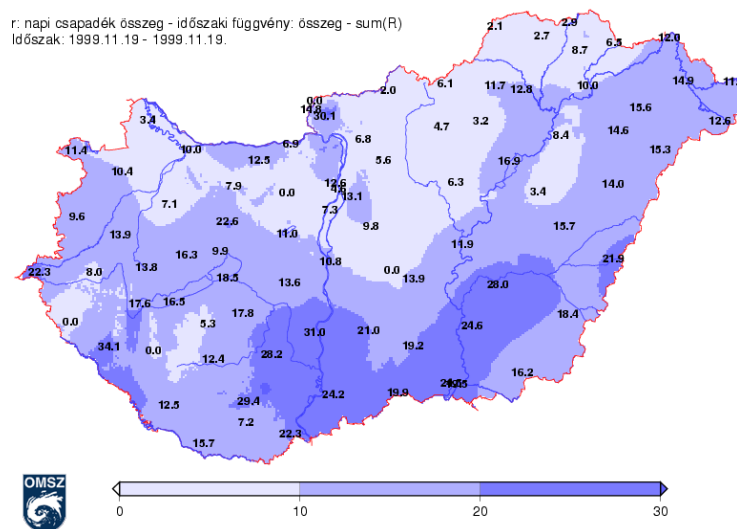
28. ábra: ECMWF analízis 1999. november 20-án 00 UTC időpontban

Látható, hogy a mediterrán ciklon középpontja a keleti országrész felett vonult át. A ciklon áramlási rendszerében enyhébb levegő érkezett a keleti, délkeleti országrészbe, ezért ott zömében eső esett. Eközben a nyugati országrészbe északnyugat felől a magasban hideg levegő szivárgott be, havazást okozva ezzel. A kettő közötti területen vegyes halmazállapotú csapadék volt a jellemző. Az országos napi átlaghőmérsékletet, a napi (24 órás) csapadékösszeget és a másnapra lehullott hó vastagságát a 29. 30. 31. ábrák mutatják



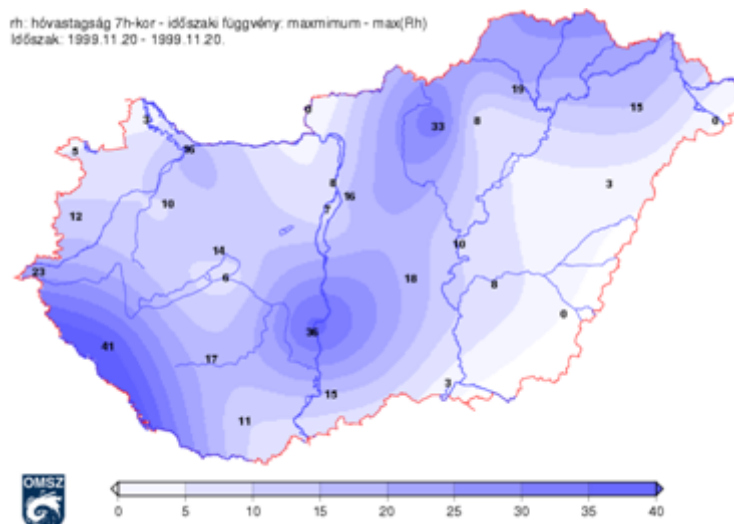
29. ábra: Napi átlaghőmérséklet 1999. november 19-én [C°] Magyarországon

Magyarországon a napi átlaghőmérsékleti térkép alapján alacsonyabb hőmérsékletek az ország északi és északnyugati területein voltak, a déli és délnyugati országrészben azonban enyhébb idő volt a jellemző (pl. Békéscsaba 0,5 C°).



30. ábra: A Magyarországon lehullott csapadék mennyisége 1999. november 19-én [mm]

A legtöbb csapadék az ország déli részén (Paks és környéke), valamint a délnyugati területeken (Nagykanizsa és térsége) hullott (20-30 mm). A legkevesebb csapadék észak-északkeleten esett (0-10 mm).



31. ábra: A Magyarországon regisztrált hóvastagság 1999. november 20-án [cm]

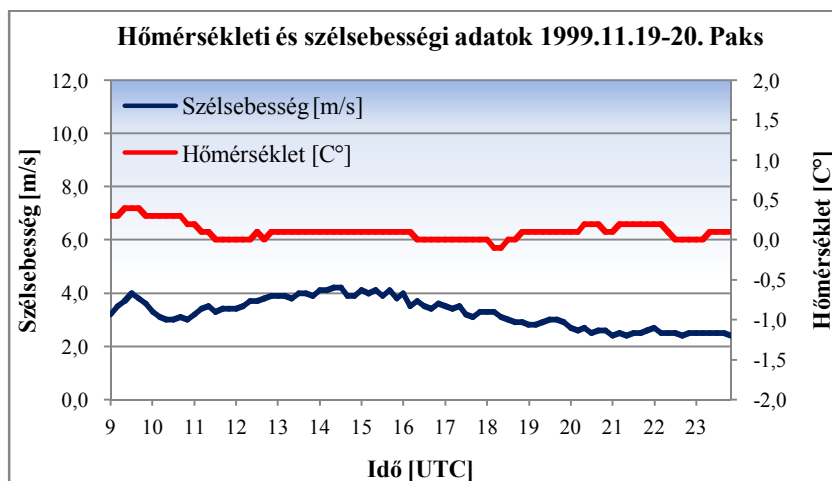
A kialakult hóvastagság maximumai Pakson (36 cm) és Nagykanizsán (41 cm) voltak. Ezek ismeretében megvizsgáltuk, hogy mekkora lehetett a tapadó hó mennyisége [kg/m] egy szabadon álló elektromos távvezeték esetén a két nap folyamán, és összevetettük a zúzmaramérő műszeren felhalmozódott mennyiségekkel.

i.) Az eredmények elemzése - Paks

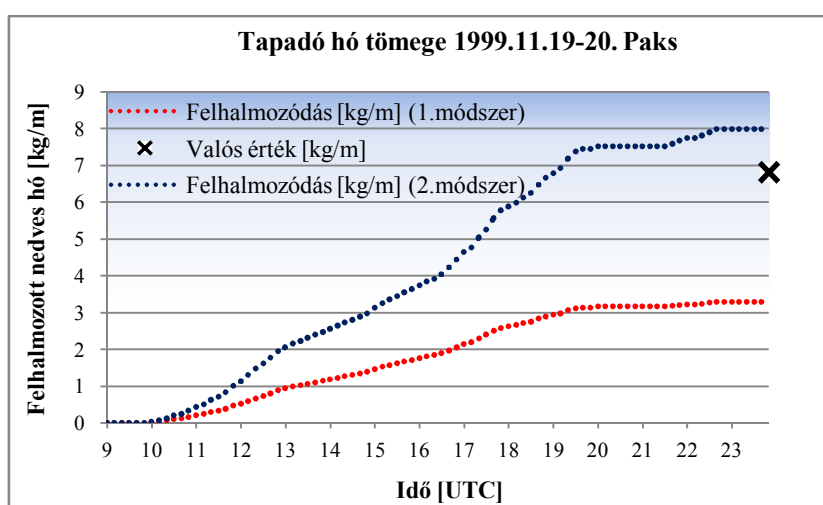
1999.11.19-én délután 14 órától másnap hajnalig tartó havazást jelentettek Pakson. A hőmérséklet a két nap folyamán folyamatosan 0°C körül mozgott, míg a szélesebbég kiegyenlített 2-4 m/s között alakult (32.a ábra). A másnapra kialakult friss hóréteg vastagsága 36 cm, a zúzmaramérő műszeren pedig 82-85 mm nedves tapadó havat regisztráltak (a zúzmaramérő kábelének 31 mm-es darabja nélkül).

A mért és a modellezett eredmények alapján (32.b ábra) az első módszerrel, amely csak a csapadékintenzitást veszi figyelembe, maximálisan 3,28 kg/m hótöbblet adódik, viszont a második módszerrel 7,9 kg/m-es értékeket kapunk. Tehát ahogy azt már a vastagságok modellezésénél is láthattuk, az első módszer túlságosan alulbecsli a felhalmozódás mértékét. A Sundin-féle módszer alulbecslésének oka, hogy konstans 300 kg/m³ hósűrűséggel számolunk, ami a valóságban sokkal nagyobb értékeket is felvehet, akár 500-600 kg/m³ is lehet (ISO12494).

A második módszer az előző fejezet alapján ebben a esetben nagy felülbecslést mutatott a vastagság modellezésénél, azonban mennyiségileg (kg/m-ben) már közelebb áll a valósághoz (mely 6,8 kg/m). A valós értéket a zúzmaramérések alapján számoltuk ki, az 5.1 fejezetben leírt módon.



32.a ábra: Hőmérsékleti és szélességi adatok Pakson 1999.11.19-20-án



32.b ábra: Akkumulált nedves hó tömege Pakson 1999.11.19-20-án

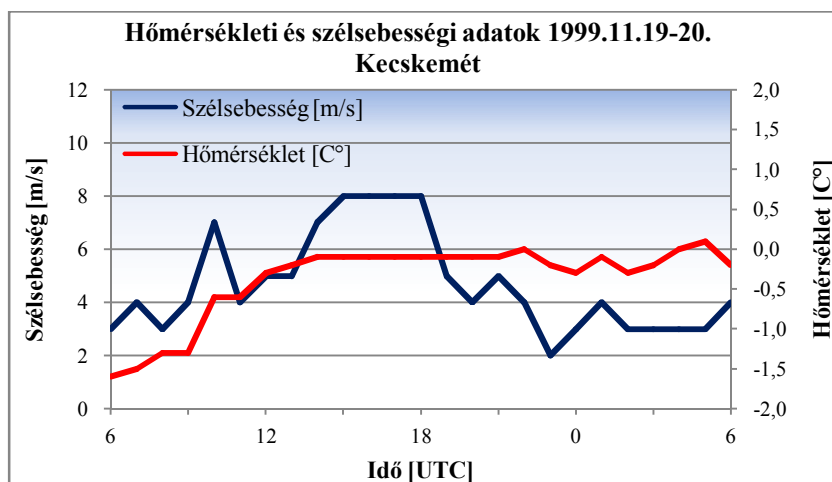
A nedves hófelhalmozódás görbéi 3 szakaszra oszthatóak. Az első 11-19 óráig intenzíven növekvő szakasz, ekkor a csapadékintenzitás 2,8 mm/h, majd egy gyengén növekvő szakasz 20-22 óráig (a csapadék intenzitása csökken 0,5 mm/h-ra), majd a csapadék megszűnésével 23 órától a tapadó hó a vezetéken megmaradt, de ekkora többlet esetében már a vezeték el is szakadhatott. Az olaszországi veszélyjelző rendszer esetében már láthattuk, hogy ekkora mennyiségű nedves hó felhalmozódásánál már piros riasztás lép érvénybe (Bonelli et. al., 2011).

ii.) Az eredmények elemzése - Kecskemét

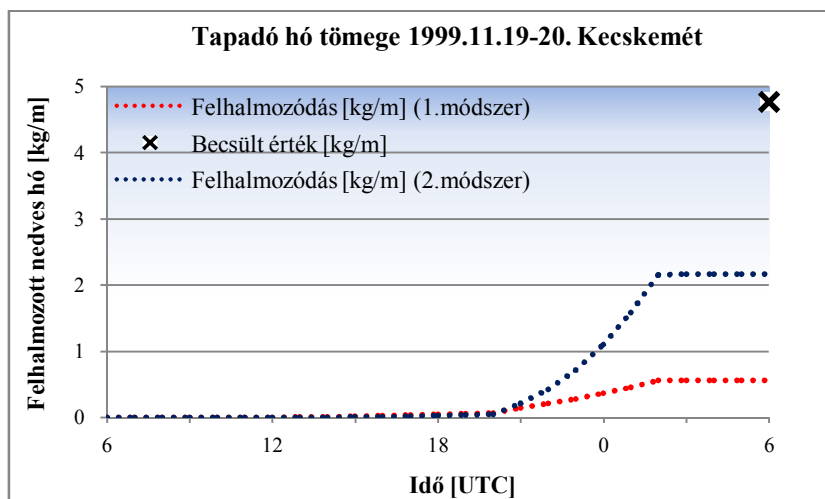
Kecskeméten 12 órától kezdődött havazás, ami másnap hajnali 2 óráig tartott. A hőmérséklet (-1,5) – (0,0) °C között alakult. A csapadék intenzitása kezdetben 0,1-0,3 mm/h, majd az 1,6-2 mm/h-t is elérte 19 órától. Az éjszakai órákban, amikor intenzívebbé vált a csapadékhullás, a hófelhalmozódás is megnövekedett. A hajnali órákban a havazás megszűnt, és a kialakult nedves hó a vezetékeken megmaradt. A szélesebbesség erős változékonyságot mutatott, 2-8 m/s között váltakozott. A másnapra kialakult hóvastagság a talajon 15 cm, mely alapján csak egy durva becslést tudunk adni a felhalmozódott nedves hó mennyiségére, mivel az OMSz adatbázisában erre vonatkozó információt nem találtunk. A becslés a következő:

$$M = N/\pi$$

ahol M a vezetékre rakódó nedves hó [kg/m], N pedig a talajon mért hóvastagság [cm] (Farzaneh et.al 2008). Ez alapján a kapott érték 4,77 kg/m (amely az olasz mintát követve már narancssárga riasztást vonna maga után). Legjobban a második módszer közelített meg (2,16 kg/m), azonban ekkor is alábecslés tapasztalható. Az eredmények a 33.a és 33.b ábrán láthatók.



33.a ábra: Hőmérsékleti és szélesebbességi adatok Kecskeméten 1999.11.19-20



33.b ábra: Akkumulált nedves hó tömege Kecskeméten 1999.11.19-20

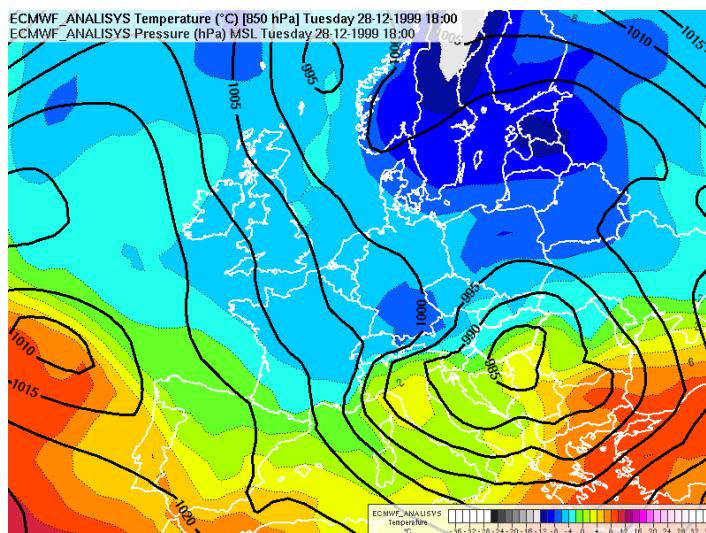
További eredményeink az I.sz. mellékletben található, melyben ugyanezen időpontban mért és modellezett felhalmozódási görbéket számítottunk ki Szolnok, Pécs és Szeged területére.

8.2.2 Az 1999. december 28-29. havazás vizsgálata

Európa időjárását egy hatalmas méretű ciklon uralta, melynek déli felén peremciklonok vonultak nyugatról kelet felé. Az egyik peremciklon a Fekete-tenger felett, a másik Franciaország felett alakult ki. Az utóbbi gyors mozgású aktív ciklon Magyarország középső területein vonult át, ezért az észak-magyarországi területeken jelentős mennyiségű csapadék hullott. Az Időjárási napijelentések alapján 28-án (kedden) a hőmérséklet a délnyugati országrészben $(-0,2) - (+2,5)$ °C között alakult, és főként eső volt a jellemző csapadékforma. Az északnyugati területeken a hőmérséklet $(-1,3) - (+1,1)$ °C között változott, és vegyesen alakult ki hó, havas eső, eső. Az északkeleti tájakon a hőmérséklet jóval alacsonyabb, $(-4,8) - (+0,1)$ °C között mozgott. A napi csapadék mennyiség 3-56 mm között alakult. Ennek maximumai a Börzsöny, ill. a Mátra területén voltak, ezeken a helyeken alakult ki másnapra a legnagyobb hóvastagság is (Kékestető: 65 cm). A csapadék másodlagos maximuma a nyugati területeken, Sopron, Szentgotthárd térsége. Itt 21-28 cm vastag hóréteg halmozódott fel szerdára. Szentgotthárd, Nagykanizsa, Sopron, Mosonmagyaróvár, Győr, Szentkirályszabadja, Szombathely és Pápa jelentettek havazást 0 °C körüli hőmérséklet mellett. A csapadékintenzitás erősebb volt, mint az előző esetben, hiszen ekkor 2-3 mm/h körül alakult, de helyenként meghaladta a 3 mm/h-t is. A szélesebbég 2-8 m/s között változott, Szentkirályszabadján regisztráltak 12 m/s-os lökéseket is. (Időjárási napijelentés 112. évfolyam 362. szám).

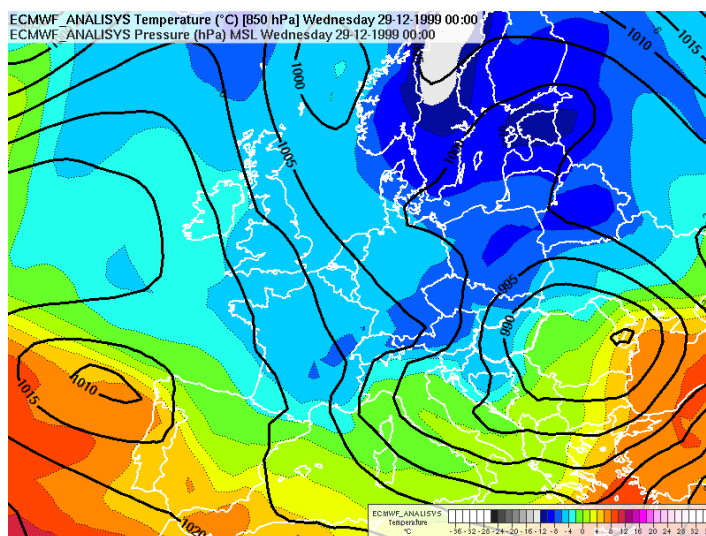
Szerda reggelre Miskolcon a zúzomarmérő műszeren 120 mm, Szentgotthárdon 82 mm nedves tapadó havat regisztráltak (a mérőműszer 31 mm-es darabjával együtt).

A részletes időjárási helyzetet a 34. és 35. ábrák mutatják. Az országos napi átlaghőmérsékletet, a lehullott napi csapadékösszeget, és a másnapra kialakult hó vastagságát pedig a 36. 37. és 38. ábrákon láthatjuk.

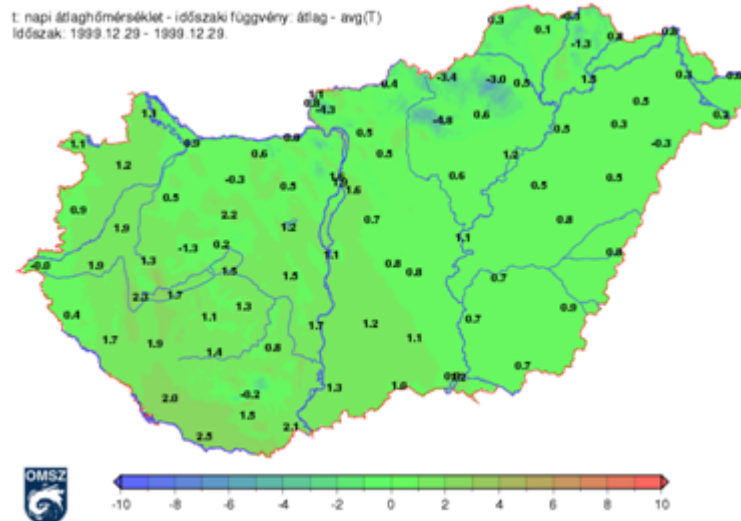


34. ábra: ECMWF analízis 1999. december 28-án 18 UTC időpontban.

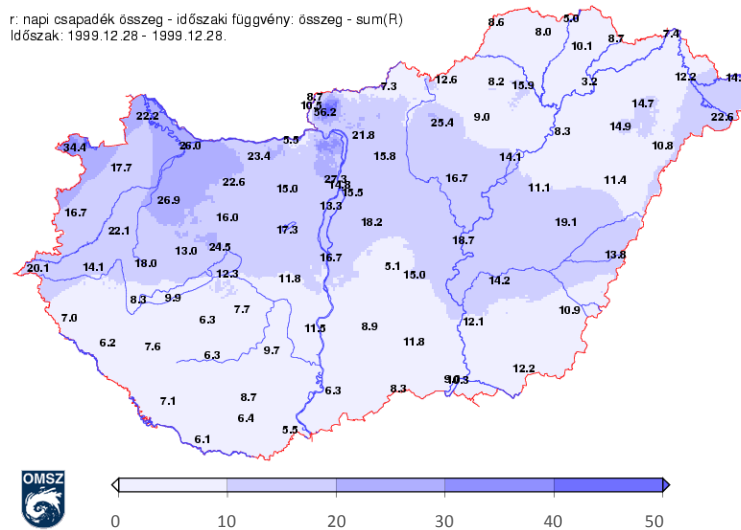
A fekete folytonos vonalak, ahogy azt már az előző esettanulmánynál is láthattuk, a talajszinti légnyomás izovonalai, míg a színezés a 850 hPa-os nyomási szinten lévő hőmérsékleti mező. Jól látható a délnyugat felől érkező mediterrán ciklon, melynek középpontja hazánk keleti felén vonult át.



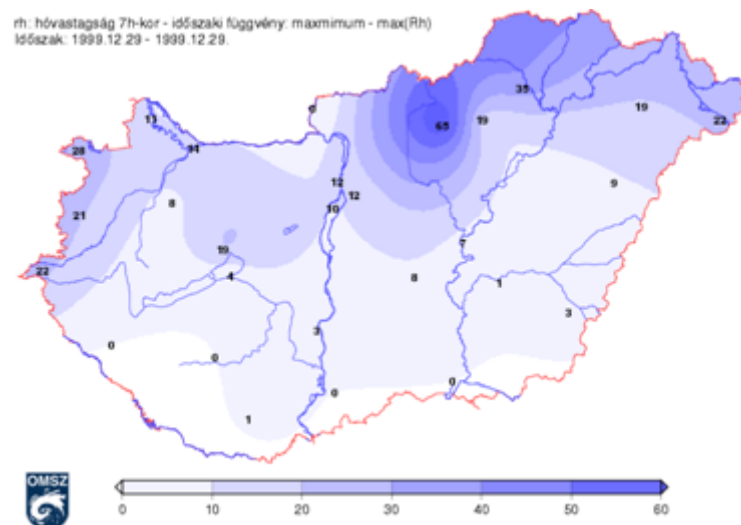
35. ábra: ECMWF analízis 1999. december 29-én 00 UTC időpontban



36. ábra: Napi átlaghőmérséklet 1999. december 29-én [C°]



37. ábra: A lehullott csapadék mennyisége 1999. december 28-án [mm]

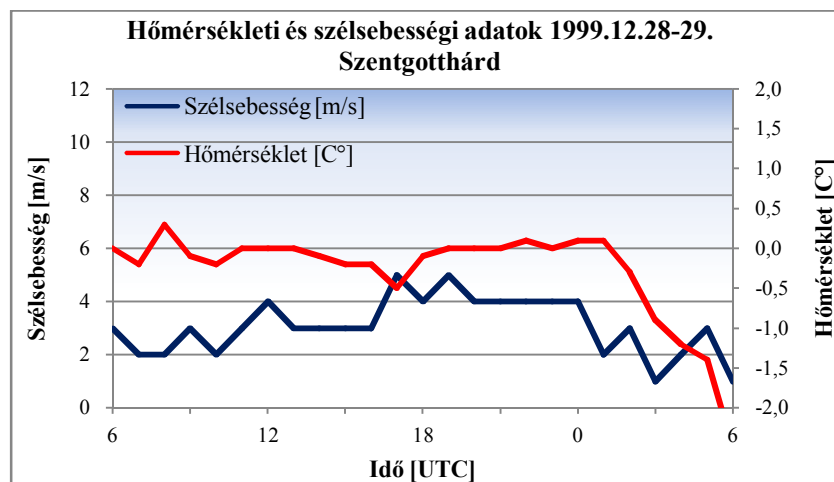


38. ábra: A regisztrált hóvastagság 1999. december 29-én [cm]

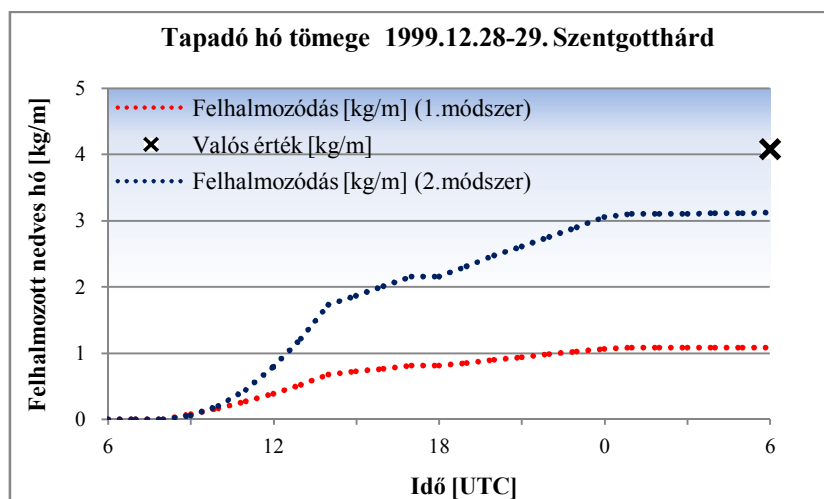
iii.) Az eredmények elemzése - Szentgotthárd

Szentgotthárdon 8 órakor havazás kezdődött, ami éjfélig tartott. A csapadék intenzitása igen változó volt, kezdetben 2-2,4 mm/h volt, majd délután 14 órától csökkent 0,5 mm/h-ra, 18 órától ismét megerősödött, ekkor 1 mm/h volt. A hőmérséklet (-0,5) – (0,3)°C között alakult, de másnap hajnalra (-1)°C alá süllyedt (39.a ábra), így a kialakult nedves hó ráfagyhatott a vezetékekre. A másnap mért hó vastagsága a talajon 18 cm.

A tapadó hó mennyisége az első módszer alapján 1,08 kg/m, a második módszerrel 3,12 kg/m, amely jobban megközelíti a valóságos 4,08 kg/m-t. Az eredmény a 39.b ábrán látható.



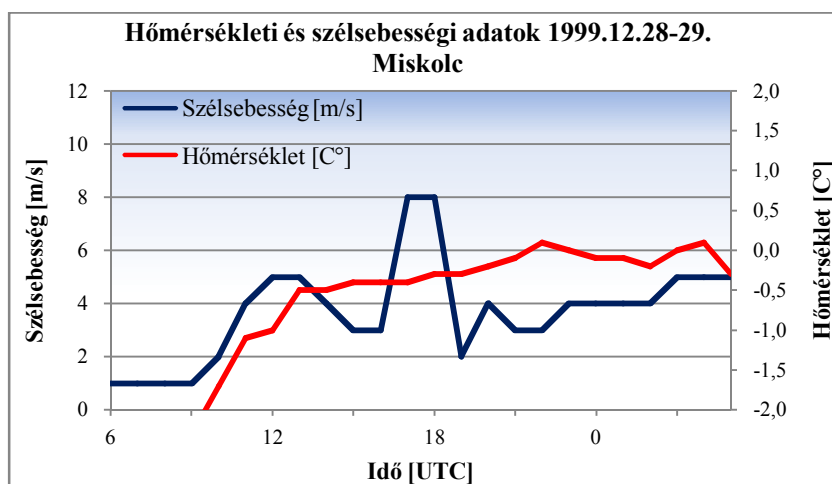
39.a ábra: Hőmérsékleti és szélsébségi adatok Szentgotthárdon, 1999.12.28-29



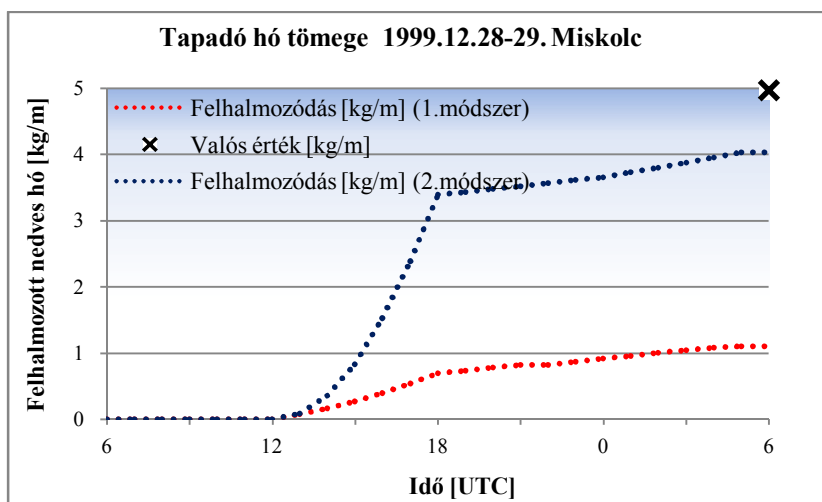
39.b ábra: Az akkumulált nedves hó tömege Szentgotthárdon, 1999.12.28-29-én

iv.) Az eredmények elemzése - Miskolc

Délután 13 órától másnap 6 óráig tartó havazást észleltek Miskolcon. A hőmérséklet a reggeli órákban még (-2) °C alatt tartózkodott, majd folyamatosan növekedve 13 órától másnap 6 óráig (-0,5) – (+0,1) °C között változott (40.a ábra). A csapadék intenzitása kezdetben 2,5 mm/h, majd 0,1-0,2 mm/h között alakult. A szél általában gyenge vagy mérsékelt maradt (1-6 m/s), de a kora esti órákban átmenetileg élénk szellőkések is előfordultak. A 40.b ábrán látható, hogy a valós 5 kg/m-es felhalmozódáshoz a 2. módszer áll legközelebb 4 kg/m-es értékkel. Az első módszer rendkívül alábecsüli a tapadó hó mennyiségét, 1,1 kg méterenkénti értéket ad a folyamat végére.



40.a ábra Hőmérsékleti és szélességi adatok Miskolcon, 1999.12.28-29



40.b ábra: Az akkumulált nedves hó tömege Miskolcon, 1999.12.28-29-én

További eredményeink a II. sz. mellékletben található melyben ugyanezen időpontban becsült és modellezett felhalmozódási görbéket számítottuk ki Szentkirályszabadja, Mosonmagyaróvár és Szombathely területére.

9. Összegzés

Jelen dolgozatban bemutattunk egy gyakran előforduló veszélyes jelenséget, amely több kárt okozott már hazánkban is. Ez a jelenség a nedves tapadó hó, amelynek egy-egy nagyobb tömegű bevonata sok problémát okozhat mind az elektromos távvezetékeken, így az áramszolgáltatóknak, mind a fák ágain, így az erdészeknek is.

A havazás okozta károkat már régóta figyeli az ERTI (Erdészeti Tudományos Intézet), hiszen 1962 óta regisztrálja a téli félévben történt hótöréseket, zúzmarakárokat, feljegyvezve az érintett területeket is. Ezek alapján kiderült, hogy a havazás okozta problémák növekvő trendet mutatnak.

A jelenség gyakoriságára a Magyarországon regisztrált zúzmara adatokat (ezen belül a nedves és fagyott tapadó hóra vonatkozó adatokat) használtuk fel az 1980-tól 2011-ig terjedő időszakban. Az elmúlt harminc évet tekintve nem mutatható ki emelkedő tendencia, mint az erdészeti adatok esetében, azonban a jelenség előfordulásában ciklikusságot fedezhetünk fel. Ezt a periodicitást már korábban is megfigyelték, és a vizsgálatok alapján a különböző makrocirkulációs rendszerekkel hozható kapcsolatba. A NAO (North Atlantic Oscillation) index téli átlagaival végzett összehasonlítás során kiderült, hogy az index negatív értékei esetében kevesebbszer, pozitív értékek esetén többször fordul elő ez a fajta jegesedési típus.

Kimutatható továbbá, hogy a jelenség függ az adott makroszinoptikai helyzettől. A Péczely-féle osztályozást alkalmazva láthattuk, hogy tapadó havat is eredményező időjárási helyzetek legnagyobb számban mediterrán ciklonokhoz kötődnek. Kitüntetett helyzeteknek tekinthetjük a centrumával hazánk felett örvénylő ciklonokat, melyek a többi makroszinoptikus helyzethez képest nagyobb mennyiségű havat eredményezhetnek. Ezen kívül megállapíthatjuk, hogy a leginkább veszélyeztetett terület a déli, délnyugati országrész mind az előfordulás valószínűsége, mind a felhalmozódás vastagsága tekintetében.

Vizsgálatokat végeztünk a zúzmaramérő rendszeren felhalmozott hó víztartalmával (tömegével) kapcsolatban is. Szimulációk, illetve a 2009-es káresemények adatai alapján a zúzmaramérőn megjelenő kb. 400 grammos hőteherhez már veszélyes mértékű hőtömeg társulhat a felsővezetékeken. A káreseményekre vonatkozó kevés adat miatt viszont ezt a küszöbértéket csak egy tág határokkal értelmezett elsődleges becslésnek tekinthetjük.

Magyarországon még nincs erre az eseményre vonatkozó veszélyjelzés, ezért a jövőbeni előrejelzéshez két nemzetközi módszer segítségével végeztünk kísérleteket.

Kiválasztottunk hat esetet, amelyek a legvastagabb nedves hófelhalmozódások voltak hazánkban. A két módszer közül a második (Poots-féle) adott jobb eredményeket. Ez az eljárás a csapadékintenzitás mellett a szél hatását is figyelembe veszi, valamint a hősűrűséget változónak feltételezi.

Ezenkívül az ERA Interim reanalízis adatbázisával hasonlítottuk össze a mérési eredményeket, mely során megállapítottuk, hogy a fél fokos felbontású adatok közvetlen felhasználása nem elégséges a vizsgálatokhoz. Következtetésünk, hogy a tapadó hó sikeres előrejelzéséhez nagyon pontos hőmérsékleti, csapadék és szél adatok szükségesek, valamint részletes tér- és időbeli felbontás.

Esettanulmányokat is készítettünk, melyekben részletesen elemeztük két időpont – az 1999. november 19-20-án és az 1999. december 28-29-én történt – eseményeit. Részletesen megnéztük az aktuális időjárási helyzetet, és a kialakult tapadó hóra mennyiségi becslést adtunk, melyeket mért adatok alapján kiszámított valós értékekkel hasonlítottunk össze. A vizsgálatok azt mutatják, hogy mindkét módszer alábecsüli a mérési eredményeket, tehát további fejlesztések szükségesek.

Célunk, hogy a bekövetkezett tapadó hó okozta károk elemzésével a jövőben pontosabb előrejelzések készüljenek, így biztosítva az anyagi károk mérséklését, valamint az emberi életek és javak védelmét.

10. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, először is Somfálvi-Tóth Katalinnak, aki bevezetett a választott téma rejtelmeibe és problémáiba, emellett rengeteg segítséget nyújtott és kitartóan javította munkámat. Nélküle nem sikerült volna elkészíteni ezt a dolgozatot.

Köszönöm Kolláth Kornélnak, aki a témán belüli irány megválasztásában járult hozzá a munkához, valamint gondolatébresztő meglátásaival és értékes megjegyzéseivel segített, vagy éppen elgondolkodtatott.

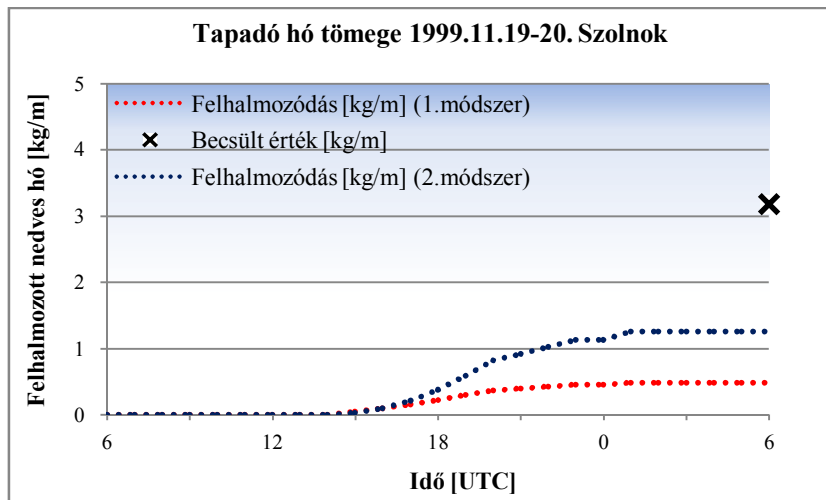
Köszönöm belső konzulensemnek Dr. Havasi Ágnesnek, aki mindig nagyon segítőkész volt velem. Hálás vagyok a gyors, pontos és precíz munkájáért.

Köszönöm Dr. Hirka Anikónak, aki az erdészeti adatokat szolgáltatta, Károssy Csabának a naponta lejegyzett Péczely-kódokat, valamint Dr. Matyasovszky Istvánnak a statisztikai számításokban nyújtott segítséget.

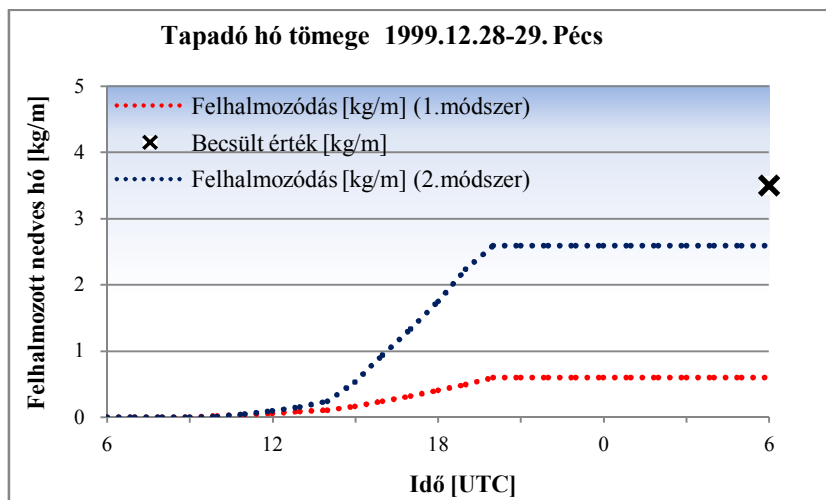
Nem utolsó sorban szeretném megköszönni egész családomnak a sok türelmet és támogatást, amelyre igen nagy szükségem volt.

11. Mellékletek

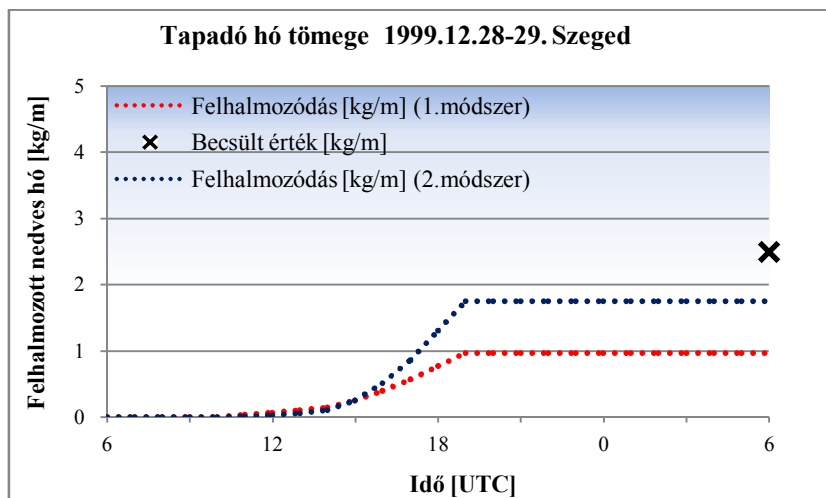
I. sz. melléklet:



Az akkumulált nedves hó tömege Szolnokon, 1999.11.19-20-án

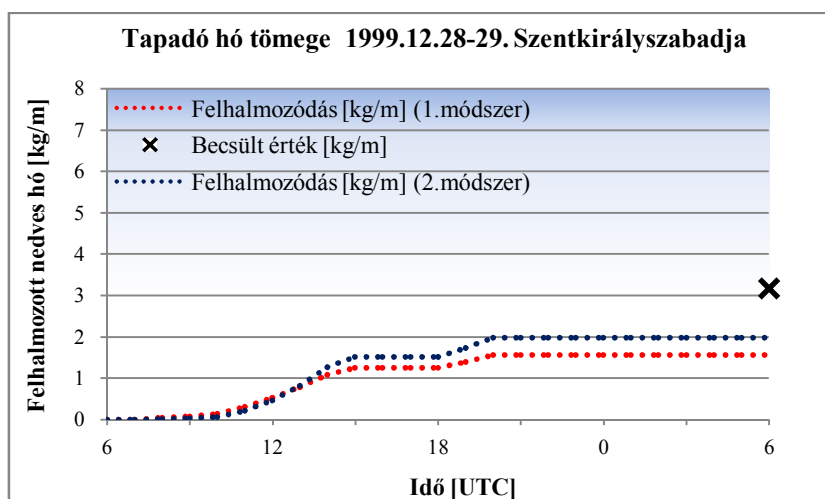


Az kkkumulált nedves hó tömege Pécsen, 1999.11.19-20-án

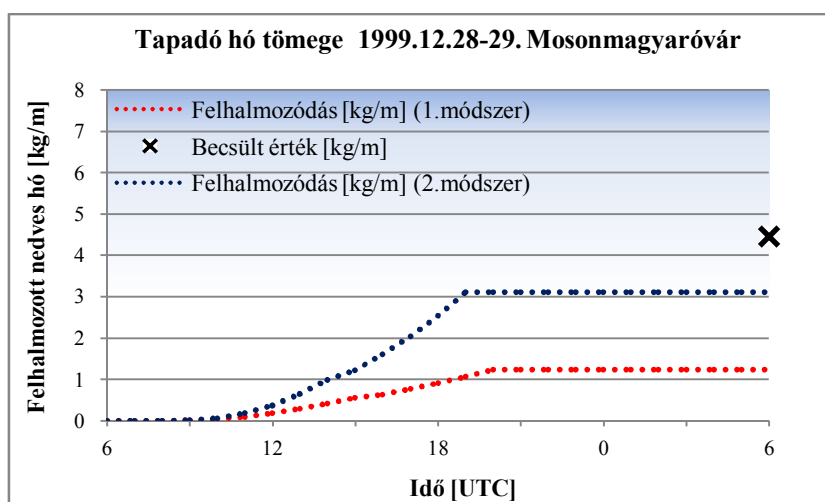


Az akkumulált nedves hó tömege Szegeden, 1999.11.19-20-án

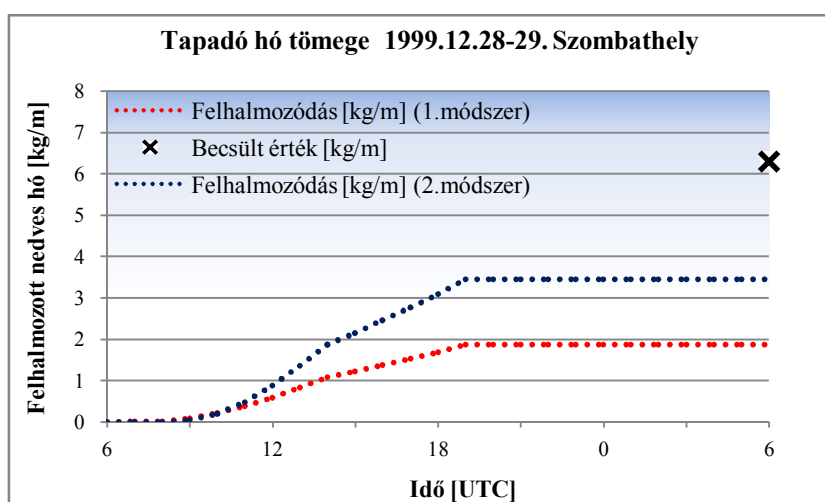
II. sz. melléklet:



Az akkumulált nedves hó tömege Szentkirályszabadján, 1999.12.28-29-én



Az akkumulált nedves hó tömege Mosonmagyaróváron, 1999.12.28-29-én



Az akkumulált nedves hó tömege Szombathelyen, 1999.12.28-29-én

12. Irodalomjegyzék

- Bonelli P., Lacavalla M., Marcacci P., Mariani G., Stella G.: Wet snow hazard for power lines: a forecast and alert system applied in Italy (National Hazards Earth System Sciences, Vol. 11, p. 2419–243. 2011)
- Csomor M.: A hazai zúzmaramérések eredményei. (Légekör, 4.sz. p. 10-14. 1979)
- Csomor M.: A magyarországi zúzmaramérések első eredményei. (Időjárás, 3.sz. p. 151-159. 1972)
- Csomor M.: Klimatikus viszonyok a zúzmara képződése után. (Légekör, 3.sz. p. 90-95. 1982)
- Csomor M.: Összehasonlító zúzmaramérések eredményei (Légekör, évf. 25.. 4.sz. 1980)
- Dobesch H., Nikolov D., Makkonen L.: Physical processes, modelling and measuring of icing effects in Europe (Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Bécs, 2005)
- Domonkos P., Béla Sz., Mihály J.: Előírás a földfelszíni meteorológiai megfigyelésekre (OMSZ, 2009)
- Drage M.A.: Atmospheric Icing and Meteorological Variabels - Full scale experiment and testing of models (PhD dolgozat, 2005)
- Farzaneh M.: Atmospheric Icing of Power Networks (ISBN 978-1-4020-8530-7, Springer Science+Media B.V. Kanada 2008)
- Fikke S., Ronsten G., Heimo A., Kunz S., Ostrozlik M., Persson P.E., Sabata J., Wareing B., Wichura B., Chum J., Laakso T., Säntti K., Makkonen L.: Atmospheric Icing on Structures Measurements and data collection in icing: State of the Art (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, 2007)
- Gulyás K.: Tapadó hó miatti káresemények meteorológiai hátterének vizsgálata (TDK dolgozat 2011)
- Hirka A., Csóka Gy.: Abiotikus erdőkárok Magyarországon (1961-2009) (Erdészeti lapok, CXLV. évf. 7-8. szám p. 246-248. 2010)

- Hirka A., Csóka Gy.: 2007: az abiotikus erdőkárok éve (Erdészeti Lapok 143. évf. 1. füzet p. 12-14. 2008)
- Időjárési napijelentés (112. évfolyam 324.szám, Budapest)
- Időjárési napijelentés (112. évfolyam 362.szám, Budapest)
- ISO 12494 (ISO: the International Organization for Standardization 12494- Atmospheric Icing of Structures, 2001)
- Kolláth K., Tóth K.: A tapadó hóteher mennyiségi előrejelzése (Légkör, évf. 54. 2.sz. 2009)
- Krómer I.: Hungarian icing activity survey (Atmospheric Research, Volume 36, Issues 3-4, p. 311-319. 1995)
- Krómer I.: Probability Based design Approach to Climatic Loadings in Hungary (Conference on Atmospheric Icing of Structures. Franciaország, p. 30-33. 1988)
- Lakatos M., Bihari Z., Kolláth K., Marton K.: A 2009. január 27-28-án kialakult időjárési helyzet elemzése Vas és Zala megye területén (Előrejelzési és Éghajlati Főosztály, OMSZ dokumentáció 2009)
- Lakatos M., Bihari Z., Kolláth K.: A 2009. február 8-9-én kialakult időjárési helyzet elemzése Győr-Moson-Sopron, Fejér, Komárom-Esztergom és Veszprém megye területén (Előrejelzési és Éghajlati Főosztály, OMSZ dokumentáció 2009)
- Lakatos M., Bihari Z.: Hóteher a távvezetéseken. A 2009. január 27-28-án kialakult időjárési helyzet elemzése Vas és Zala megye területén (Légkör, évf. 54. 2. szám 2009)
- Lozowski E.P., Makkonen L.: Fifty Years of Progress in Modelling the Accumulation of Atmospheric Ice on Power Network Equipment (11th IWAIS, 2005)
- Makkonen L.: Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures (Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 358. p. 2913-2939. 2000)
- Makra L., Mika J., Bartzokas A., Sümeghy Z.: Relationship between the péczy's large-scale weather types and air pollution levels in szeged, southern hungary (Fresenius Environmental Bulletin, vol.16. no.6. 2007)

- Nygaard B.E., Kristjansson J.E., Berge E., Makkonen L.: Using NWP models to simulate in-cloud atmospheric icing episodes. (12th IWAIS, 2007)
- Poots G.: Ice and snow accretion on structures (ISBN 0 86380 189 7, Research Studies Press Ltd, Anglia 1996)
- Rasmussen R.M., Vivekanandan J., Cole J.: The Estimation of Snowfall Rate Using Visibility (Journal of applied meteorology Vol. 38, p.1542-1563 1998)
- Sakakibara D., Nakamura Y., Kawashima K., Miura S.: Experimental Result for Snow Accretion Characteristics of Communications Cable (56th IWCS, 2007)
- Sakamoto Y.: Snow accretion on overhead wires (Phil. Trans. R. Soc. Lond. Vol. 358, p. 2941-2970. 2000)
- Sundin E., Makkonen L.: Ice loads on lattice tower estimated by weather station data (Journal of applied meteorology, Vol 37, Issue 5, p. 523-529. 1998)
- Szabó Gy., Farkas Gy.: 2009.01.27-30. közötti időszakban, Vas és Zala megyében tömeges üzemzavart okozó közép feszültségű (KÖF) oszlopok kitörési okainak, vezetőkek szakadásának feltáró elemzése (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar. Hidak és Szerkezetek Tanszéke 2009)
- Tabi K.: Makrocirkulációs rendszerek és kapcsolatuk a téli időszak időjárásával Magyarországon (Diplomamunka, 2010)
- Tóth K.: Zúzmaraképződés előrejelezhetőségének vizsgálata numerikus modell outputok alapján (Diplomamunka, 2007)
- Wakahama G., Kuroiwa D., Goto K.: Snow accretion on electric wires and its prevention (Journal of Glaciology, Vol. 19, No. 8, p. 479-487. 1977)

www.cigre.org

www.ecmwf.int

www.iwais2009.ch