

A HÓFÚVÁS ELŐREJELZÉSE MAGYARORSZÁG TÉRSÉGÉRE

DIPLOMAMUNKA

**METEOROLÓGIA MSC
IDŐJÁRÁS-ELŐREJELZŐ SZAKIRÁNY**



Készítette: Tordai János

**Témavezetők: Kolláth Kornél, OMSZ
Tóth Tamás, OMSZ**

Belső konzulens: Dr. Pongrácz Rita, ELTE

**Eötvös Loránd Tudományegyetem
Meteorológiai Tanszék**

Budapest, 2012

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és célkitűzés	3
2. Irodalmi áttekintés.....	6
3. A kutatás módszerének bemutatása.....	10
3.1 Felhasznált adatok	10
3.2 Statisztikai vizsgálatok, a hófűvás index megalkotása.....	12
4. Eredmények.....	19
4.1 Expedíciós mérések és megfigyelések az OMSZ szegedi állomásán	19
4.2 A hófűvás index (BSI) és annak térképes megjelenítése	23
4.3 A hósűrűségre vonatkozó vizsgálat eredményei	26
5. Esettanulmányok	28
5.1 Tapadó havas időjárási helyzet 2009.01.27–30. időszakban.....	28
5.2 Hófűvás 2009.02.16–20. időszakban	31
5.3 Hófűvás 2010.02.11–14. időszakban	34
5.4 Hófűvás 2011.02.03–07. időszakban	38
5.5 Hófűvás 2012.02.15–16. időszakban	44
6. Összefoglalás.....	49
Köszönetnyilvánítás	51
Irodalomjegyzék.....	52

1. Bevezetés és célkitűzés

A szél által szállított hó igen gyakori jelenségnek számít a hideg és szeles területeken, mely elsősorban a hegyvidékeken és a poláris régióban jellemző. A hófűvás hazánkban sem ismeretlen, még ha a fent felsorolt két térség egyikébe sem tartozunk bele. Magyarországon belül is képes évről-évre egész régiók közlekedését megbénítani, ezzel komoly anyagi kárt és esetenként sajnos emberi áldozatot is okozva. Erősebb hófűvások alkalmával az utak megtisztítása sem hoz megnyugtató megoldást, hiszen a szél szinte azonnal újraépíti az elhordott hóakadályokat, s nem ritkán több méter magasságú falat képes kialakítani. Amennyiben szemmagasságban hordja a szél a havat, úgy erőteljes látáscsökkenésre is számítani kell.

Ezen felül a környezetre is hatást gyakorol a jelenség, hiszen például poláris régiók nagykiterjedésű sík vidékein jelentős mennyiségű havat képes távolabbi területekre szállítani a szél, mely már a hidrológiai viszonyokat is erősen befolyásolja. *Déry és Yau (2007)* a Kanada északi területén lévő Mackenzie folyómeder térségében évi 7%-os csökkenést mutatott ki az éves csapadékösszegben, mely részben a hó áthelyeződésének, részben az áthelyeződés közbeni szublimációnak köszönhető. Mindezek tudatában tehát kiemelkedően fontos e problémakör vizsgálata, a hazai részletes, hiánypótló elemzések elvégzése.

Definíció szerint hófűvásról akkor beszélünk, amikor a legalább élénk légmozgás felemeli és magával viszi a friss, vagy könnyen mozgatható havat. Előfordulhat, hogy közben havazás is zajlik, de ez nem alapfeltétel. A jelenség számtalan tényezőtől függ, melyekre igen érzékeny. Például néhány tized °C-os hőmérsékletkülönbség vagy a szélerősség néhány m/s-os változása már megakadályozhatja, de akár fel is erősítheti a hófűvást. További, főként megfigyelésekből származó paraméterekre is szükségünk van az előrejelzéshez, mint például a hóval borított felszín állapota vagy a legutóbbi havazás időpontja.

A minket körülvevő hegyláncok, a köztük meghúzódó hágók és szorosok elhelyezkedése, valamint az ország belső területein fekvő középhegységek alapvetően meghatározzák a hófűvás kialakulására érzékeny területeket. Kiemelten veszélyeztetett térségnek számít hazánkban a Kisalföld, a Móri árok, a Bodrog és a Hernád völgye, valamint a Nyírség.

Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) Repülésmeteorológiai és Veszélyjelző Osztályán a meteorológus szakértők napi 24 órában figyelik az időjárás alakulását, és szükség esetén figyelmeztető előrejelzést, illetve riasztást adnak ki élet- és vagyónvédelmi célból.

Figyelmeztető előrejelzést, illetve riasztást lehet kiadni zivatarra, felhőszakadásra, széllelkésre, ónos esőre és hófúvásra, melyek mindegyikénél több fokozat létezik.

Az OMSZ által hófúvásra alkalmazott riasztási kategóriák (OMSZ, 2010), az alábbiak:

- A hófúvásra vonatkozó jelzés **első** (sárga) szintjén a friss hóval fedett területeken az erős széllelkés alacsony hótorlaszokat emelhet (alacsony szintű hófúvás).
- A hófúvásra vonatkozó jelzés **második** (narancs) szintjén a friss hóval fedett területeken a viharos (> 60 km/h) széllelkés hótorlaszokat emel, sőt akár magas (50 cm-nél magasabb) hótorlaszok is kialakulhatnak.
- A hófúvásra vonatkozó jelzés **harmadik** (piros) szintjén a friss hóval fedett területeken a viharos (> 72 km/h) széllelkés jellemzően magas hótorlaszokat emel, melyek magassága meghaladhatja az 50 cm-t. Mindezek mellett a riasztás, figyelmeztető előrejelzés fenntartásakor rendszerint még havazás is előfordulhat több cm friss hóval.

A veszélyjelző rendszer indulása óta minden évben előfordult több-kevesebb alkalom, amikor a meteorológusok riasztást adtak ki hófúvásra. Bár a legerősebb fokozatot eddig összesen csupán egy alkalommal kellett elrendelni, az 1. táblázatból látható, hogy az első fokozatot több mint 60 napon, a másodikat pedig 18 nap alkalmával adták már ki az évek során a veszélyjelzők. Az egyes riasztási fokozatok számának havi összege azt jelenti, hogy adott hónapban hány napon került kiadásra legalább egy régióra az adott szint.

Hófúvásra kiadott riasztások havi összege (db)				
Év	Hónap	I. fokú	II. fokú	III. fokú
2007	11	3	-	-
	12	2	-	-
2008	1	2	-	-
	2	-	-	-
	3	2	-	-
	11	1	-	-
	12	-	-	-
2009	1	2	-	-
	2	9	3	-
	3	1	-	-
	11	-	-	-
	12	4	2	-
2010	1	5	1	-
	2	9	6	1
	3	2	1	-
	11	2	-	-
	12	8	-	-
2011	1	1	-	-
	2	1	-	-
	3	-	-	-
	11	-	-	-
	12	-	-	-
2012	1	2	-	-
	2	8	5	-
	3	-	-	-

1. táblázat: 2007. november és 2012. március között legalább egy régióra hófúvásra elrendelt első-, másod-, illetve harmadfokú riasztások havi számának összege (forrás: OMSZ).

E dolgozatban az állomási meteorológiai mérésekből és megfigyelésekből összeállított adatbázis segítségével meghatározzuk a hazai hófűvás legnagyobb hatású tényezőit, s ezek jellemző intervallumát. Az adatsor felhasználásával kapcsolatot keresünk a kulcsparaméterek és a hófűvás előfordulása, intenzitása között. Azonosítjuk azon meteorológiai állapot-határozókat, melyek szoros összefüggésbe hozhatók a jelenséggel, valamint egy olyan komplex empirikus paramétert is kidolgozunk, melynek segítségével az előrejelzésben egyetlen mérőszámmal jellemezhetjük a hófűvás várható mértékét. Ezen indexnek magában kell hordoznia a Kárpát-medence éghajlati sajátosságait, hogy helyi viszonylatokban is megfelelő következtetéseket vonhassunk le a kapott adatokból. Ehhez kellően részletes és hosszú időre visszanyúló adatsor szükségeltetik, hogy a statisztikai alapokon nyugvó módszer felhasználásával nyert eredmények a valóságot a lehető legjobb mértékben közelítsék.

A hóállapot mint paraméter igen nagy hatással van a jelenségre, legalább olyan fontos tényező, mint a szél sebessége vagy a hó vastagsága. A hó saját súlya alatt tömörödik, fagypontra feletti hőmérséklet esetén megolvad, a hóréteg összeesik és hófűvás szempontjából igen sokat romlik az állapota (*Dewalle és Rango, 2008*). Ezt követően jelentősen megváltozik a hófűvás megindulásához szükséges minimális szélesebesség, hiszen a jóval ellenállóbb hófelszín megbontásához, levegőbe emeléséhez lényegesen több energia szükséges. Hazánkban még sem dokumentált megfigyelések, sem statisztikai alapokon nyugvó becslések nem születtek a hóállapot hófűvásra gyakorolt hatásának vizsgálatára. Jelen dolgozatban expedíciós mérésekkel erre teszünk kísérletet, s eredményeképpen a hazai hatások minél pontosabb feltérképezését tűztük ki célul.

A markánsabb eseteket további különböző források (amatőr megfigyelési adatbázisok, média) felhasználásával és globális, valamint korlátos tartományú numerikus modell-futtatások segítségével mutatjuk be. Mindezek elemzésével a hófűvás intenzitására vonatkozó ideális veszélyjelzési küszöbszinteket is igyekszünk behatárolni.

Célunk, hogy e tanulmány az előrejelző szakemberek napi gyakorlatában támogatásul szolgáljon, s ezáltal segítséget nyújtson az agyagi és az esetlegesen személyi kárt okozó események előrejelzésében, az azokra való felkészülésben. A hófűvás előrejelzésének objektívvá tétele elsődleges feladat, hiszen a hazai szinoptikus gyakorlatban jelenleg jórészt korábbi esetek emlékeiből, tapasztalatból prognosztizálják azt. A hófűvás index jó viszonyítási alapot nyújt majd a jövőbeli esetekhez, segítségével objektívan összehasonlíthatóvá válnak az eltérő körülmények között bekövetkező hófűvások alkalmak.

2. Irodalmi áttekintés

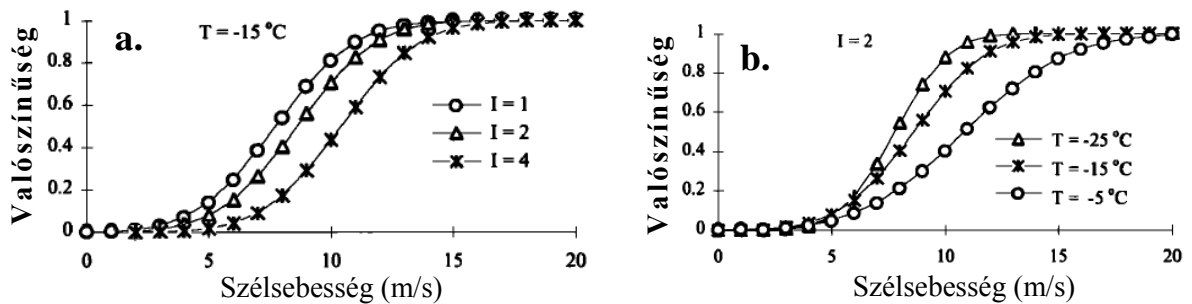
Bár a téli időjárás alapvető jelenségeit már számtalan cikk taglalta (pl. *Goree* és *Younkin*, 1966; *Hirsch*, 2000; *Reisz*, 2005), ám magáról a hófúvásról viszonylag kevesen írtak külföldi szakirodalomban, de főképp Magyarországon, hiszen hazai szerző tollából eddig csupán leíró jellegű értekezés született, a jelenséget behatóan a mai napig senki sem kutatta. Jóllehet azért, mert bár általában évről-évre előfordul, hogy a megélénkülő szél felkapja és elszállítja a friss havat, azonban komoly, akár a fél ország közlekedését megbénító erősségű hófúvás ritkábban alakul ki. Az összegyűjtött szakirodalom alapján elmondható, hogy a jelenségkör kutatásával főként a kanadai, örökké fagyos prérin (*Baggaley* és *Hanesiak*, 2004), az Antarktiszon (*Skarchilli et al.*, 2009), valamint – lavinák előrejelzéséhez (*Guyomarc'h et al.*, 2008) – Európában foglalkoztak. Míg az előbbi két területen általában konkrét méréseket is végeztek, addig az európai térségben jórészt modellezési feladatokat láttak el, s a hófúvás legtöbbször kiegészítő jelenségként szerepelt ezen cikkekben. Mivel hazánkban a magas hegyvidékek hiánya miatt nem fordul elő lavina, ezért figyelmünket az antarktisi és főleg a kanadai kutatások felé fordítottuk, ahol egyes térségekben a hófúvásos órák száma elérheti az évi 600–800-at is (*Shea*, 2008).

Mielőtt egy térség hófúvással kapcsolatos problémáit megoldhatnánk, számos klimatológiai tényezőt kell vizsgálat alá vonni. Mindenképp szükségesek éghajlati feljegyzések a havazás előfordulási viszonyairól, a széljárás jellegzetes irányairól és sebességbeli eloszlásáról, valamint a hőmérsékleti menetről. Ezek megléte esetén lehetséges gyakorlati módszerek kidolgozása. A téma a látástávolság csökkenésének vizsgálatával is megközelíthető (*Pomeroy* és *Male*, 1988), ám ebben az esetben olyan paraméterek ismeretére is szükség volna (hópelyhek mérete, alakja, stb.), melyek egyáltalán nem állnának rendelkezésünkre.

Fontos állapothatározó a hófúvást kiváltó minimális szélesebesség, mellyel elsőként *Li* és *Pomeroy* (1996) foglalkozott. Ezen érték a hótakaró tulajdonságaival van szoros kapcsolatban, azaz a hóréteget alkotó részecskék közti összetartó erővel, a kohéziós erővel, valamint a mozgásból származó súrlódással. Az említetteket pedig döntően a meteorológiai állapothatározók alakítják. Mivel jelentős különbség van a száraz, illetve a nedves/jeges hó között, ezért szükség van ezek pontos definiálására. A hóréteget, melyet egyszer sem ért $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál melegebb levegő, s melynek hőmérséklete korábban sem emelkedett fagypont fölé, azt száraz hónak, mely viszont, ha rövid időre is, de fagypont feletti hőmérsékleti tartományba

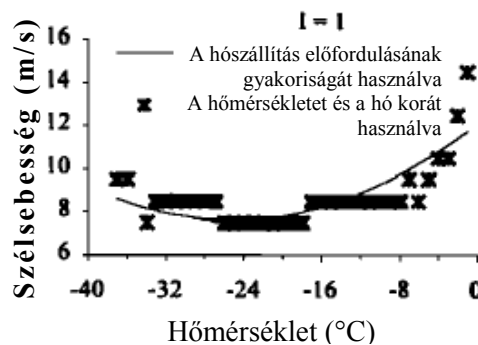
került, nedves/jeges hónap neveztek. Jelentős különbséget kaptak e két típusú hó mozgásba hozásához szükséges minimális szélességben, hiszen míg az előbbi érték átlagosan 7,7 m/s-nak, addig utóbbi 9,9 m/s-nak adódott. Kutatásaik során egy nemlineáris, de alapvetően pozitív korrelációt mutattak ki a hófúvást kiváltó szélesség és a léghőmérséklet között. Egy megfigyelésen alapuló, a száraz hóra vonatkozó hőmérséklet-szélesség modellt is megalkottak, mely jó becslést ad a szükséges szélesség küszöbértékre.

A hófúvás előfordulásának valószínűségét vizsgáló cikkek közül kiemelendő *Li és Pomeroy* (1997) írása, melyben a szél, a hőmérséklet és a hófelszín állapotának függvényében vizsgálták az esemény előfordulásának valószínűségét. Alacsony hó-víz egyenértékű hótakaró esetén 5 hőmérsékleti küszöbértéket választottak ($T = -1\text{ °C}$, -5 °C , -15 °C , -25 °C és -35 °C), valamint 5 féle kategóriát jelöltek ki a hó korára ($I = 1-2,7$ óra; $2,7-7,4$ óra; $7,4-20,1$ óra, $20,1-54,6$ óra; és $54,6-148,4$ óra). Általánosságban elmondható, hogy az előfordulási valószínűség a szélerősség növekedésével, a hőmérséklet csökkenésével, valamint a fiatalabb hórétegek esetén nő (1. ábra).



1. ábra: Hófúvás előfordulásának valószínűsége a hőmérséklet (a), illetve a hófelszín korának (b) függvényében (*Li és Pomeroy*, 1997).

A 1.a. ábrán a kör a legfrissebb állapotú ($1-2,7$ óra), a háromszög a $2,7-7,4$ órás, a csillag pedig a $20,1-54,6$ órás havat jelzi. Az 1.b. ábrán ugyanezek a szimbólumok a hőmérsékleti kategóriákat hivatottak elkülöníteni. A vizsgálat során megállapították, hogy -25 °C -os hőmérséklet alatt ismét csökkenni kezdett a kialakulási valószínűség (2. ábra).



2. ábra: Hófúvás előfordulásának valószínűsége a hőmérséklet és a szél függvényében (*Li és Pomeroy*, 1997).

Ez annak köszönhető, hogy ilyen alacsony értékek esetén már jelentős mértékben megnő a súrlódási ellenállási erő. További tapasztalatuk, hogy -37 °C -nál magasabb hőmérséklet esetén ugyanazon szélesség érték mellett csökken a különbség az előfordulási valószínűségben. Tehát például ha a szél 5 m/s -ról 10 m/s -ra erősödik, akkor az -25 °C -on nagyobb különbséget okoz a bekövetkezés valószínűségében, mint -5 °C -on. Ennek oka, hogy az alacsony hó-víz egyenértékkel rendelkező hó jóval kevésbé ellenálló a szél által okozott nyíróerőre. Száraz hó esetén a hófúvás előfordulási valószínűsége 100% , ha a szélesség meghaladja a 20 m/s -ot, illetve nagyon lecsökken (de nem lesz 0%), ha a szélereő 3 m/s alatti. Nedves/jeges hófelszín esetén a 20 m/s -os sebesség már csak 50% -os valószínűséget jelent, s a 100% -ot semmilyen feltétel esetén nem éri el.

Számos kutató próbálta numerikus modellekkel szimulálni a hófúvást, figyelembe véve mikrometeorológiai tényezőket és a hópelyhek mikrofizikai tulajdonságait. *Pomeroy* (1989) Kanadában megmérte, hogy miként változik a tömegtranszport a magassággal hófúvás közben, majd egy áthelyeződést, leülepedést, szublimációt és eróziót számító kétfázisú áramlási modell segítségével végzett számításokat. Megállapította, hogy a hópelyhek szél miatti felszínközeli sodródása csak akkor teszi ki jelentős hányadát az alacsonyszintű hófúvásból származó tömegfluxusnak, ha a szélesség 15 m/s alatti. Következtetései között szerepel, hogy a szublimáció erősen függ a szélességtől, a hőmérséklettől és a levegő nedvességtartalmától. Ez a folyamat egyes esetekben elegendő lehet ahhoz, hogy egy nem túl vastag hóréteget akár teljes mértékben eltüntessen.

Baggaley és *Hanesiak* (2004) tanulmányukban egy 35 kanadai meteorológiai mérőállomást magába foglaló, 40 évet felölelő adatbázis segítségével új, operatív előrejelzési technikát dolgozott ki veszélyes, a közlekedésre is jelentős hatással lévő magasszintű hófúvás felismerésére. Elkülönítették egymástól azokat az eseteket, amelyek során havazott is, illetve ahol csak hófúvás fordult elő. A vizsgálat során különböző kategóriákat hoztak létre a hófelszín korának jellemzésére. Kapcsolatot kerestek a látástávolság és a hófúvás előrejelzése között, s különböző mérőszámokat képeztek a sikeresen előrejelzett, elmaradt, illetve téves riasztások számából. A legmagasabb CSI-t, azaz kritikus sikerességi indexet akkor tudták elérni, amikor a rendelkezésre álló legtöbb adatot figyelembe vették a prognózis készítése során, míg a vizsgálatot egy paraméterre szűkítve akár 50% -kal is rosszabb előrejelzéseket kaptak. Állításuk szerint az előrejelzések úgy javíthatók jelentős mértékben, ha az előrejelző a szignifikáns látástávolság-csökkenés prognosztizálására helyezi a hangsúlyt, mely egyébként is a legkomolyabb hatással van a közlekedésre.

A hófúvásnak gyakorta kitett útszakaszokon jelentős problémát okoz a hó eltakarítása, az út járhatóságának biztosítása. A nem kellően védett utakon a jármű kormányozhatatlanná válhat, csökken a horizontális látástávolság, olvashatatlanná válnak a közlekedési táblák és csökkenhet a felhasználható útszélesség. A hófúvás elleni védekezés témakörében számos cikk született (pl.: *Brandle és Nickelson, 1996; Brandle et al., 2004*).

Tabler (2003) tanulmányában igen részletesen tárgyalja a hófúvás közlekedésre gyakorolt hatását, a hófogók elhelyezésének fontosságát, azok szükséges fizikai méreteit. Megkísérelte az éves átlagos, szél által szállított hó mennyisége alapján kategorizálni a hófúvásra veszélyeztetett területeket. Számításokat végzett abból a célból, hogy elméleti úton képes legyen meghatározni az adott területre szükséges hófogó típusát, méretét, s az úttól szükséges távolságát.

3. A kutatás módszerének bemutatása

3.1 Felhasznált adatok

Mint ahogy azt már a bevezetésben is említettük, a hófűvés előrejelzéséről, előrejelezhetőségéről hazánkban még nem született megfelelő részletességű vizsgálat. A bőségebb külföldi, valamint az annál jóval szegényebb hazai szakirodalom tanulmányozása és összefoglalása jó kiindulási alapot biztosít a későbbi vizsgálatainkhoz. *Li és Pomeroy (1997)* tanulmányát alapul véve az Országos Meteorológiai Szolgálat adatbázisából származó kétféle adatsorból dolgoztunk. Vizsgálataink az elmúlt 15 évre, 1996/1997 telétől kezdve egészen 2010/2011 téli időszakáig terjednek ki. Ennél korábbi, teljes országra kiterjedő automata mérési adatsor ugyanis nem áll rendelkezésre, ez pedig alapfeltétele kutatásunknak, hiszen csak igen finom időbeli felbontású, 10 perces adatok segítségével lehetséges végigkísérni a hó állapotának változását, tömörödését, olvadását. Egyik esetben a szűrési feltételünk az volt, hogy szerepel-e az észlelésben 36-os (gyenge vagy mérsékelt alacsony hófűvés), 37-es (erős alacsony hófűvés), 38-as (gyenge vagy mérsékelt hófűvés) vagy 39-es (erős magas hófűvés) jelenidő, illetve szerepel-e 3-as kód az elmúlt időben, mely homok-/porvihart, illetve télen hófűvést jelent. A lekérést a november–március időintervallumra szűkítettük, ezáltal kiszűrtük a litometeorológiai jelenségeket. Egy másik kritérium szerint a lekérés során azokat az eseteket tekintettük, amikor egy adott napon a hóvastagság 2 cm-nél több volt, illetve az aznapi maximális széllekedés értéke meghaladta a 7 m/s-ot. Mindkét típusú lekérés esetén a kérdéses nap előtt és után 48 órával bővítettük az adatsort, valamint ennek az időszávnak a nagyobb időbeli felbontású, 10 perces mérési adatait is felhasználtuk. A jelenidőt vizsgáló fájlban megkaptuk a felhőzet óránkénti mennyiségét, a jelenlegi időt, az elmúlt idő kódjait, a horizontális látástávolságot, az elmúlt időre vonatkozó időintervallumot, az órás csapadékösszeget; a 18 UTC-s időpontokban a talajállapot és hóvastagság, 6 UTC-kor pedig ezeken kívül még a hősűrűség értékeit is. Az automata adatsor a következő elemeket tartalmazza: 2 méter magasban mért hőmérséklet, felszíni hőmérséklet, 2 méteres magasságban mért relatív légnedvesség, az elmúlt 10 perc átlagos szélsébsége, az elmúlt 10 perc maximális széllekedés értéke, valamint az elmúlt 10 perc csapadékösszege.

A futtatásokhoz az ECMWF¹ globális tartományú modell (*Persson*, 2011) előrejelzési mezőit használtuk fel. A NetCDF² állományokat az ECMWF MARS³ adatbázisából kértük le a kérdéses időpontokra. A fájlokban szereplő, hófűvés indexhez szükséges meteorológiai állapothatározók segítségével megoldottuk az egyenletrendszer, majd ebből egy új NetCDF fájlt hoztunk létre. A HAWK⁴ meteorológiai munkaállomás segítségével beolvastuk és megjelenítettük a kapott fájlokat. Az OMSZ mérési és megfigyelési adatbázisának felhasználásával képet kaptunk az egyes vizsgált időszakok időjárásáról, s emellett ebből származó hóvastagság, maximális szélökés és hósűrűség adatokat mutatunk be a dolgozatban. Ezek segítségével részletes esettanulmányokat készítünk, melyek tartalmazzák a hótakaró kialakulásának körülményeit és módosulását, s természetesen a hófűvést kiváltó szinoptikus meteorológiai körülményeket. Megvizsgáljuk, hogy az akkori előrejelzéshez felhasználható információk segítségével lehetett-e volna következtetni szignifikáns hófűvés kialakulására, figyelembe véve azt is, hogy az analízisbeli hó- és szélviszonyok milyen mértékben egyeztek a valódi mérésekkel.

¹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Európai Középtávú Időjárás-Előrejelző Központ)

² NetCDF: Network Common Data Form (hálózati közös adattípus)

³ MARS: Meteorological Archive and Retrieval System (Meteorológiai archiváló és adatvisszanyerő rendszer)

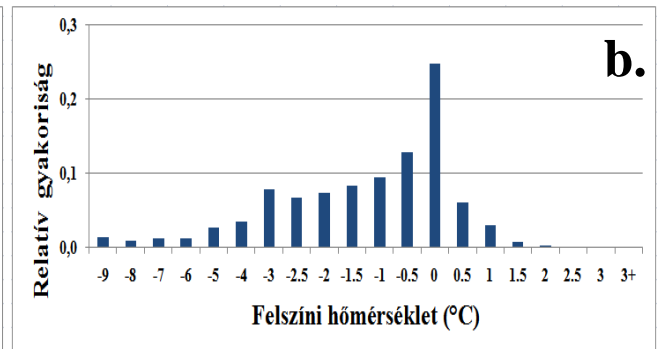
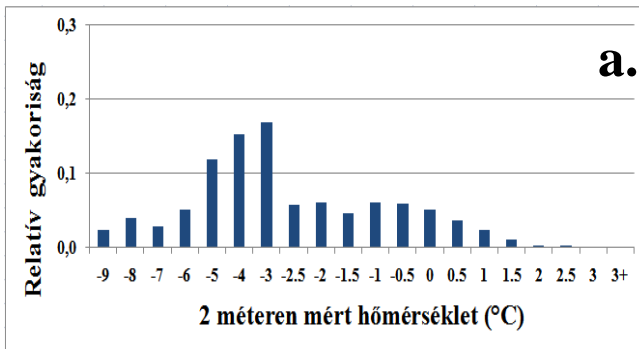
⁴ HAWK: Hungarian Advanced Workstation (magyar fejlesztésű meteorológiai munkaállomás)

3.2 Statisztikai vizsgálatok, a hófűvás index megalkotása

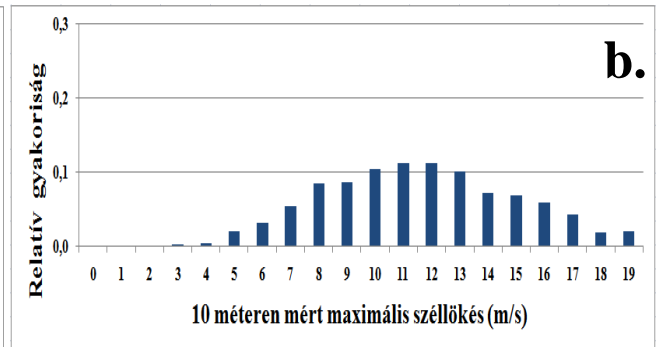
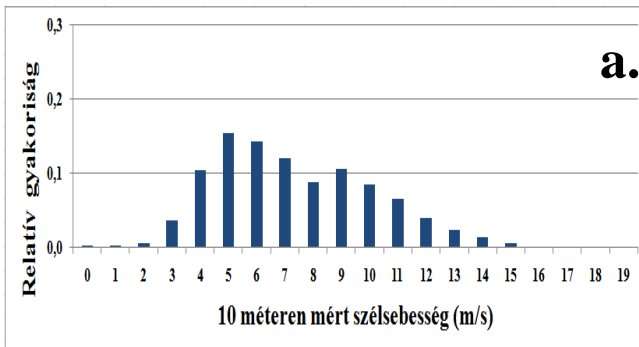
Magyarországon a hófűvás előrejelzése mindeddig jobbára szubjektív alapokon nyugvott, a téma objektív megközelítéséhez hiányzott a méréseken és megfigyeléseken alapuló adatsor gondos feldolgozása, s az azokból levont tényszerű következtetések prognózisba való beépítése. A legtöbb meteorológiai jelenség meglétét vagy későbbi kialakulását bizonyos mértékig lehetséges algoritmusokkal kimutatni, ám ennek pontossága nagyban függ magától a vizsgált jelenségtől. Számos nagyobb repülőtéren alkalmaznak ún. jelenidő-szenzorokat, melyek a légkör aktuális állapotátározóiból hosszabb-rövidebb feltétel-láncok felhasználásával következtetni tudnak az időjárás jellegére. Ezek többnyire a látástávolságra alapozva hoznak döntést, mely a meteorológiában egyelőre igen rosszul előrejelezhető paraméter, így a hófűvás prognosztizálásakor sem lehet erre támaszkodni.

Az Országos Meteorológiai Szolgálattól kapott második adatsort az alábbi feltételrendszerrel kértük le: a napi legnagyobb szélökés értéke meghaladta a 7 m/s-ot és a napi legnagyobb mért hóvastagság értéke pedig elérte vagy meghaladta a 2 cm-t.

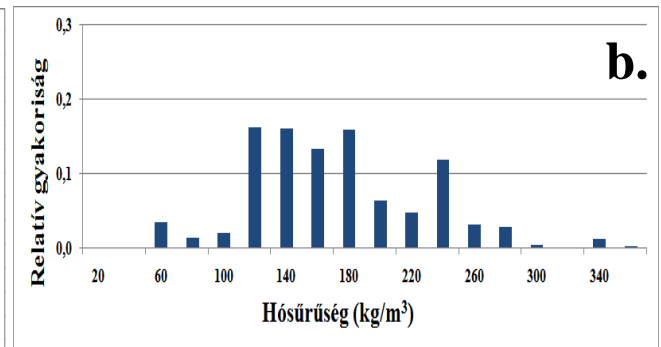
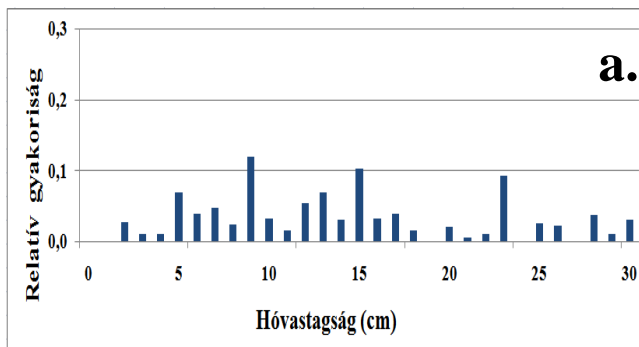
A fenti feltétel teljesülése esetén az adott esethez 96 órányi mérési és megfigyelési adat állt rendelkezésünkre, mely elegendő hosszúságú a hóállapot változásának követésére is. A 15 évet felölelő adatsor több mint 1.300.000 darab tízperces automata mérés, és 200.000-nél is több megfigyelés időpontjából állt össze. Feltételezzük, hogy a hófűvásos eseteknek az adott meteorológiai állapotátározó függvényében kapható eloszlása információ tartalommal bír a hófűvás bekövetkezésének valószínűségére és erősségére. Ennek következtében az adatsort statisztikai vizsgálatoknak vetettük alá, mely során első lépésként az általunk vizsgált meteorológiai állapotátározók gyakoriságát ábrázoltuk. Kiszámoltuk, hogy az egyes hőmérsékleti, szélesebbégi, hóvastagsági és hósűrűségi intervallumokban hány alkalommal fordult elő hófűvás, majd ezt az összes hófűvásos esetek számával osztottuk (3–5. ábra).



3. ábra: A hófűvés előfordulásának gyakorisága a 2 méteren mért hőmérséklet (a) és felszíni hőmérséklet (b) függvényében, 1996–2011.

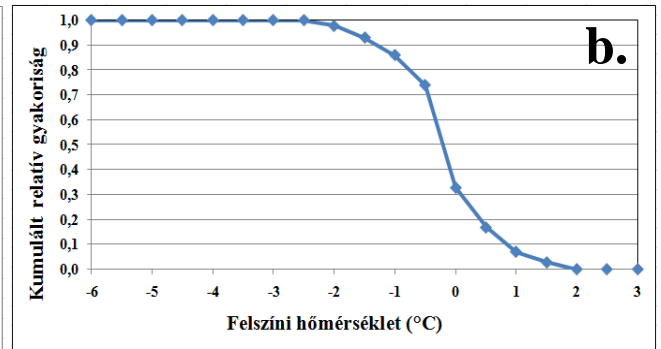
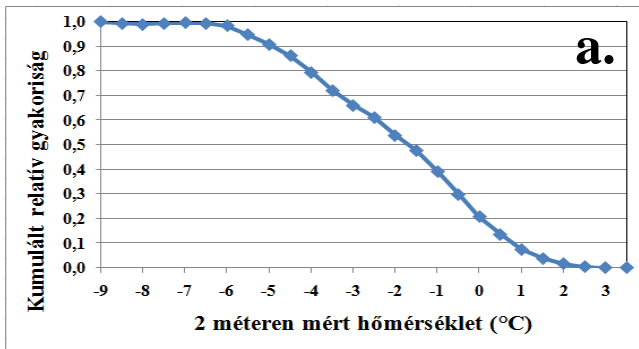


4. ábra: A hófűvés előfordulásának gyakorisága a 10 méteren mért szélsősebesség (a) és a 10 méteren mért maximális szélőkés (b) függvényében, 1996–2011.

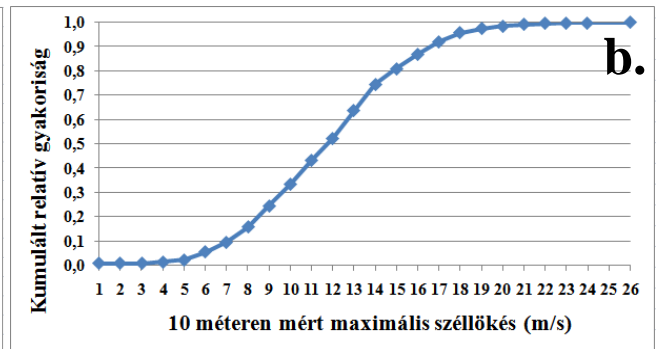
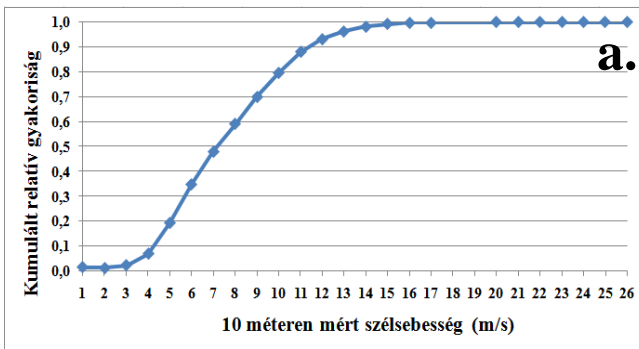


5. ábra: A hófűvés előfordulásának gyakorisága a hóvastagság (a) és a hósűrűség (b) függvényében, 1996–2011.

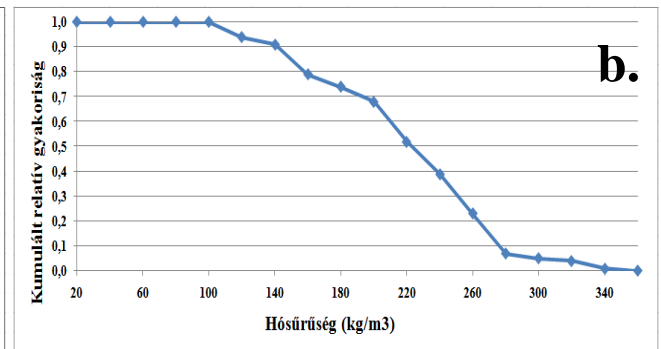
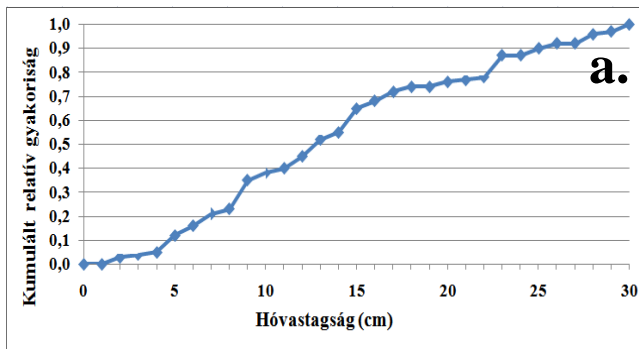
A 3–5. ábra diagramjain látható, hogy a vizsgált paraméterek mind nagyjából normális eloszlást mutatnak, empirikus sűrűségfüggvényük közelíti a haranggörbe alakját, kivéve a hóvastagság esetén, mely nem mutat egyértelműen meghatározható eloszlást. A normális eloszlás következtében az adott paraméterek eloszlásfüggvénye a 0 és 1 értékek között egy szűk átmeneti intervallummal rendelkezik, mely magában foglalja azt a kritikus tartományt, mely elválasztja egymástól a hófűvés szempontjából kedvező és kedvezőtlen feltételeket. E tartomány megjelenítése végett ábrázoltuk a kumulált relatív gyakoriságot az egyes paraméterekre hófűvés jelenidő esetén (6–8. ábra).



6. ábra: A hófúvás előfordulásának kumulált relatív gyakorisága a 2 méteren mért hőmérséklet (a) és a felszíni hőmérséklet (b) függvényében, 1996–2011.



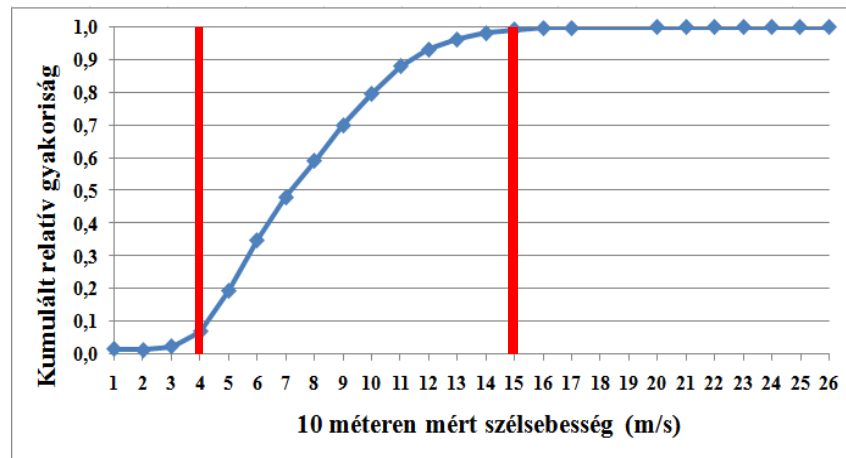
7. ábra: A hófúvás előfordulásának kumulált relatív gyakorisága a 10 méteren mért szélsébség (a) és a 10 méteren mért maximális szélleőkés (b) függvényében, 1996–2011.



8. ábra: A hófúvás előfordulásának kumulált relatív gyakorisága a hóvastagság (a) és a hósűrűség (b) függvényében, 1996–2011.

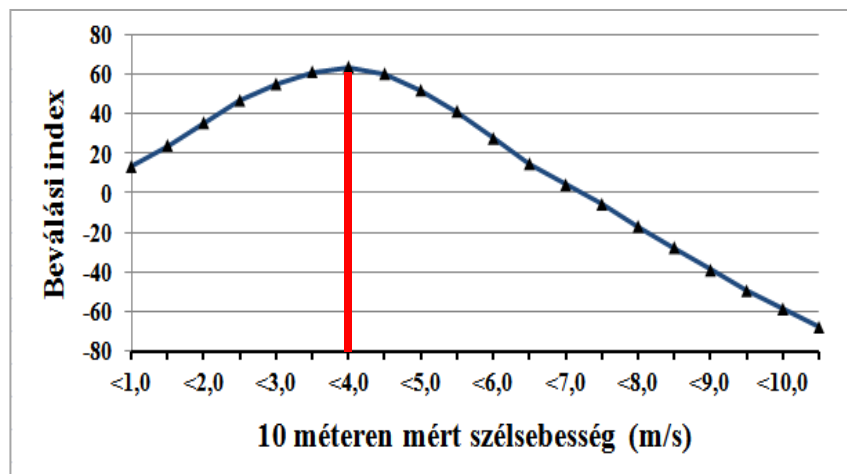
Látható, hogy bár a hóvastagság empirikus eloszlásfüggvénye eltért a többitől, kumulált relatív gyakoriság tekintetében már nagyobb a hasonlóság. A léghőmérséklet, felszíni hőmérséklet és a hósűrűség empirikus eloszlásfüggvénye eltér a megszokottól, iránya fordított. Ennek oka, hogy ezen állapotváltozók értékének növekedése a hófúvás ellen hat. Az egyes paraméterek empirikus eloszlásfüggvényei nem teljesen azonos információ-tartalommal bírnak, hiszen míg a lég- és a felszínhőmérsékletből főként a hófúvás előfordulásának valószínűségére következtethetünk, addig a szél- és hóviszonyokból ezen kívül a hófúvás erősségére is.

Felosztásukra azért volt szükség, hogy azokat elemi függvények segítségével egyszerűbben írassuk le. Terjedelmi korlátok miatt a soron következő lépéseket egy példa paraméter (a 10 méteren mért szélesség) segítségével mutatjuk be.



9. ábra: Az empirikus eloszlásfüggvény intervallumokra való felosztása.

Az intervallum-határokat paramétertől függően a kumulált relatív gyakoriság 1 és/vagy 0 értékeinél állapítottuk meg (9. ábra), míg a köztes intervallumok határértékének meghatározásához egy új jelzőszámot vezettünk be. A beválási index azt jelzi, hogy mely érték kiválasztásával érhetjük el a legkedvezőbb arányt a hófűvások megtartásának és a nem hófűvások kiszűrésének szempontjából. Segítségével megadható az a határérték mely elválasztja a hófűvások szempontjából kedvezőtlen tartományt a kedvezőtől (10. ábra).

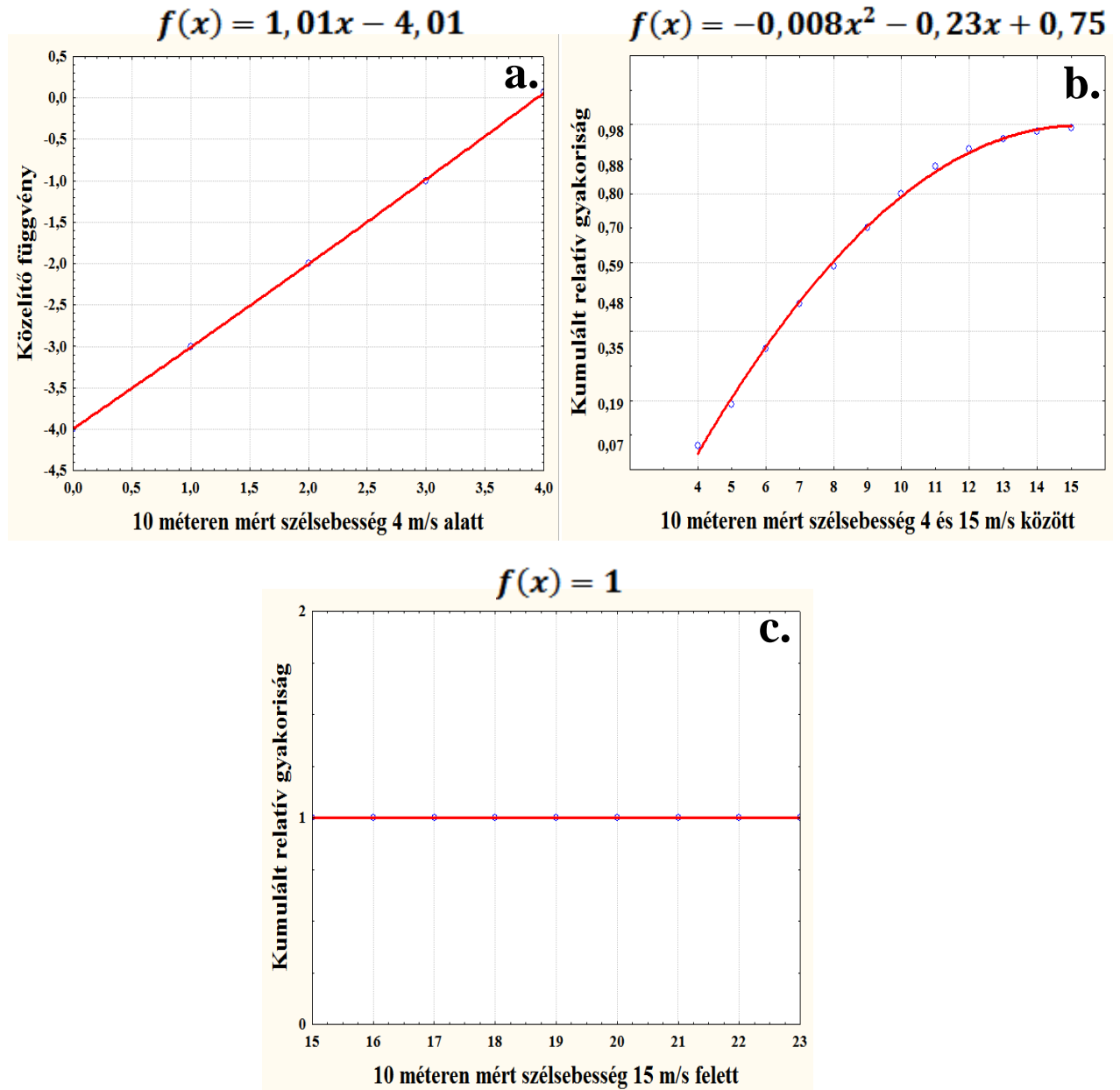


10. ábra: A beválási index maximuma 4 m/s-nál található a 10 méteren mért szélesség esetén.

Kiszámításához a hányadosát képeztük az adott intervallumba eső összes eset számának ($N_{(i)}$) és az összes vizsgált eset számának (N). Ebből kivontuk az adott intervallumba eső hófűvások eset ($N_{h(i)}$) és az összes hófűvások eset (N_h) arányának kétszeresét. A BI beválási index definíciójához tehát a következő képletet alkalmaztuk:

$$BI = \left[\frac{N_{(i)}}{N} - 2 * \frac{N_{h(i)}}{N_i} \right] * 100$$

A Statistica nevű szoftver segítségével ismételten ábrázoltuk a kapott értékeket, majd ezekre a lehető legjobban simuló függvényt illesztettük (11. ábra).



11. ábra: A 10 méteren mért szélsébségre vonatkozó eloszlásfüggvény-darabok Statistica programmal való közelítése.

Az adott paraméternek a jelenségre nézve elégtelen értékeit a hófűvás-index összeadandókból álló jellege miatt negatív pontokkal értékeltük, s ehhez a hófűvásra nézve kedvezőtlen tartomány felé csökkenő függvényt vezettünk be, melynek szélsőértéke arányos a hófűvás-index maximális értékével (11.a. ábra). A közelítő függvények egyenleteit, s a bennük szereplő együtthatókat szintén a felhasznált program segítségével állapítottuk meg.

A 2. táblázatban foglaljuk össze a hat vizsgált meteorológiai paraméterre vonatkozó közelítő függvényeket. Jelentős többségük másodfokú polinom, a maximális érték esetén pedig 1 értékű konstans.

Állapothatározó	Intervallum	Közelítő egyenlet
2 méteren mért hőmérséklet [°C] T	$T \leq -6,5$	$f(T) = 1$
	$-6,5 < T \leq 0,5$	$f(T) = -0,0087T^2 - 0,178T + 0,2196$
	$T > 0,5$	$f(T) = -0,0181T^2 - 0,139T + 0,2257$
Felszíni hőmérséklet [°C] T_s	$T_s \leq -3,0$	$f(T_s) = 1$
	$-3,0 < T_s \leq 0,5$	$f(T_s) = -0,0564T_s^2 - 0,2969T_s + 0,611$
	$0,5 < T_s \leq 2,0$	$f(T_s) = 0,3419\exp(-1,5923T_s)$
	$T_s > 2,0$	$f(T_s) = -0,1707T_s^2 + 0,8301T_s - 1,007$
10 méteren mért maximális szélökés [m/s] U	$U < 6,0$	$f(U) = -0,075U^2 + 1,1364U - 3,9657$
	$6,0 \leq U \leq 21,0$	$f(U) = -0,0029U^2 + 0,1501U - 0,8183$
	$U > 21,0$	$f(U) = 1$
10 méteren mért szélesség [m/s] G	$G < 4,0$	$f(G) = 1,014G - 4,014$
	$4,0 \leq G < 15,0$	$f(G) = -0,0076G^2 + 0,2299G - 0,7527$
	$G \geq 15,0$	$f(G) = 1$
Hóvastagság [cm] H	$H < 5,0$	$f(H) = 0,0732H^2 + 0,6711H - 4,9321$
	$5,0 \leq H < 31,0$	$f(H) = -0,0007H^2 + 0,0452H + 0,1908$
	$H > 31,0$	$f(H) = 1$
Hósűrűség [kg/m ³] ρ_H	$\rho_H > 240$	$f(\rho_H) = -0,0534\rho_H + 13,207$
	$100 < \rho_H < 240$	$f(\rho_H) = -0,0000183\rho_H^2 + 0,002\rho_H + 0,975$
	$\rho_H < 100$	$f(\rho_H) = 1$

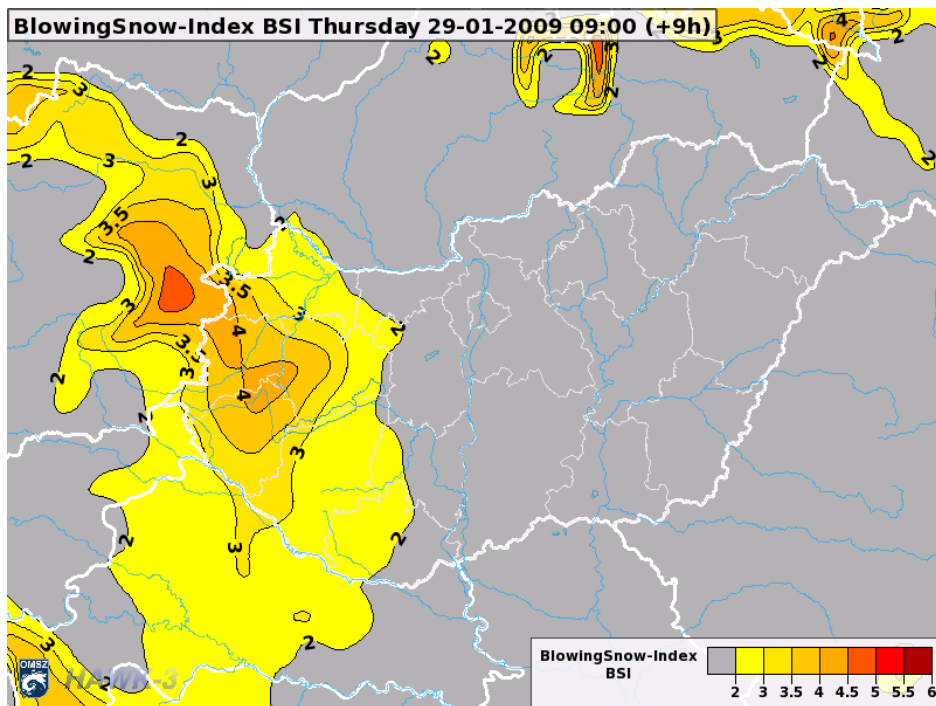
2. táblázat: A hófűvás index alkotóegyenletei.

A vizsgált időszakra olyan adatfájlokat kértünk le az ECMWF MARS adatbázisából, melyek tartalmazzák a kérdéses meteorológiai paraméterek előrejelzett mezőit, s melyet az Országos Meteorológiai Szolgálatnál dolgozó meteorológusok is felhasználnak az előrejelzés elkészítéséhez. A léghőmérsékletre, felszíni hőmérsékletre, 10 méteren mért szélességre,

10 méteren mért maximális szélességre, a hóvastagságra és a hósűrűsége vonatkozó intervallumok feltételként való felhasználásával kiszámoltuk az adott paramétereiből származtatott tagok értékeit. Ezek összeadásával kaptuk meg a hófúvás-index értékét:

$$BSI = f(T) + f(T_s) + f(U) + f(G) + f(H) + f(\rho_H)$$

ahol $f(T)$ a hőmérsékleti tag, $f(T_s)$ a felszíni hőmérsékleti tag, $f(U)$ a szélesség tag, $f(G)$ a szellőkés tag, $f(H)$ a hóvastagság tag és $f(\rho_H)$ a hósűrűség tag. Az adatok megjelenítéséhez a HAWK meteorológiai munkaállomást használtuk, melynek segítségével megadható a térkép színskálája, a rajta szereplő izovonalak sűrűsége, vastagsága, a feliratok mérete, a kivágat és a vetület típusa. A könnyű átláthatóság végett egy igen kontrasztos, nagy átmenetekkel rendelkező színskálát készítettünk, melyre tekintve könnyedén elkülöníthetőek a hófúvás szempontjából veszélyeztetett területek (12. ábra).



12. ábra: Példa hófúvás-index térképre a HAWK megjelenítő rendszerben.

4. Eredmények

4.1 Expedíciós mérések és megfigyelések az OMSZ szegedi állomásán

Hófúvás szempontjából kedvezően alakult a 2011/2012-es téli időszak, hiszen terepi méréseket és megfigyeléseket végezhattünk az Országos Meteorológiai Szolgálat szegedi észlelési állomásán. Célunk volt, hogy konkrét mérési eredményeket, s ezáltal tapasztalatot gyűjtsünk a hófúvás előfordulása és a hófelszín állapota, valamint az arra közvetetten és közvetlenül hatást gyakoroló tényezők között.

A 2012. február 3. és 5. közötti időszakban a Kárpát-medencében megüledett igen hideg, szibériai eredetű légtömeg és a déli, délnyugati irányból, egy mediterrán ciklon előoldalán érkező nedves levegő találkozásának hatására hazánk déli megyéiben jelentős mennyiségű hó hullott. Február 4-én 00 UTC-kor a helyi rádiószonda-felszállás során a csapadék képződésének körülbelüli magasságában, 850 hPa-on $-12,1$ °C volt a hőmérséklet, valamint az e szint alatti teljes légoszlopban sem fordult elő -9 °C-nál enyhébb érték. Így a csapadékképződés során igen apró méretű, alacsony hó-víz egyenértékű hópelyhek keletkeztek. Az ezekből képződő hótakaró kezdetben igen laza szerkezetű, a szél által könnyen mozgatható volt.

Megfigyeléseink szerint a 10 méteres magasságban mért 5 m/s-os szélsébség már elegendő volt ahhoz, hogy a talajon mozgásba kerüljenek a hópelyhek. A gyenge alacsonyszintű hófúvás miatt egyenetlenné vált a hófelszín, valamint hónyelvek, hóbuckák is kialakultak, melyek közül a legnagyobbak a 40 cm-es magasságot is meghaladták (13. ábra).



13. ábra: Szél által épített, 40 cm magas hónyelv.

A hóvastagságot hivatalosan 12 óránként, minden reggeli (06 UTC) és esti főterminus (18 UTC) idejében, míg a hósűrűséget 24 óránként, a reggeli főterminuskor kell mérni. A különleges időjárási helyzetre való tekintettel az előírtnál sűrűbben végeztünk méréseket a hóréteg állapotára vonatkozóan. 6 óránként legalább 3 alkalommal mindkét mérést elvégeztük, s a kapott értékeket a 3. táblázatban tüntettem fel.

	Időpont (UTC)	Mérés	Hóvastagság (cm)	Hó tömege (g)	Sűrűség (kg/m³)
február 4.	06	1	19	18	99
		2	21	21	
		3	21	21	
	12	1	20	22	111
		2	22	25	
		3	23	25	
	18	1	24	31	121
		2	27	32	
		3	27	31	
február 5.	00	1	30	35	120
		2	31	36	
		3	26	33	
	06	1	31	38	125
		2	26	34	
		3	30	37	
	12	1	26	38	136
		2	26	35	
		3	25	32	
	18	1	29	37	137
		2	26	32	
		3	23	38	

3. táblázat: A 6 óránként elvégzett mérések eredménye, valamint az ezekből kapott hósűrűség-értékek.

A hósűrűség kiszámításához ismernünk kell a vizsgált hóoszlop magasságát (azaz az adott pontban a hóréteg vastagságát, 14. ábra), valamint annak tömegét. Utóbbit az ún. hósűrűség-mérő segítségével kaphatjuk meg. Ennek használati elve, hogy nyitott részével lefelé a hórétegbe helyezzük, majd óvatosan kiemeljük és megfordítjuk a hengert, hogy abból a belekerülő hó ne essen ki. Ezután egy erre akasztható kézi mérleg segítségével megállapítjuk a csőben lévő hó tömegét (15. ábra). A mérést abban az esetben kell elvégezni, ha a hóréteg vastagsága eléri a 3 cm-t.



14. ábra: A hóvastagság mérése
(A képen a szerző látható.)



15. ábra: A hósűrűség-mérő
(forrás: Takács Lajos)

A hósűrűség kiszámításához szükséges egyenletek (Domonkos, 1997):

$$V = \pi \cdot \left(\frac{d^2}{4}\right) \cdot h, \quad \text{ahol}$$

V : a hóoszlop térfogata
 d : a hósűrűség-mérő henger átmérője
 h : hóvastagság

illetve $\rho = \frac{m}{V},$ ahol

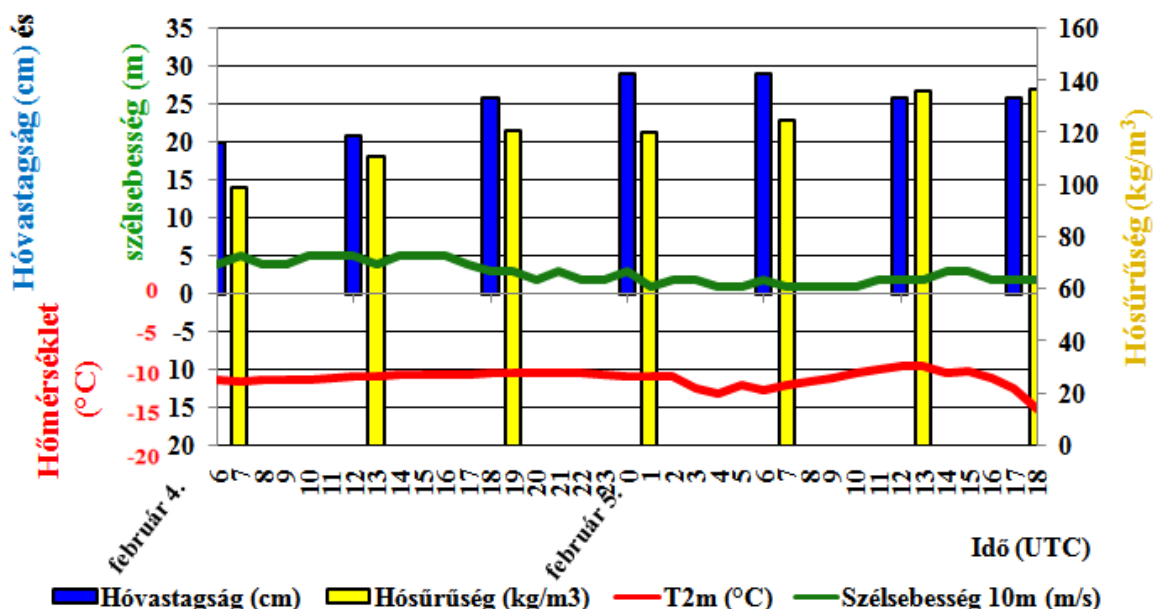
m : a hóoszlop tömege
 V : a hóoszlop térfogata

Megfigyeléseink alapján körülbelül 18–20 cm-es hóvastagság eléréséig folyamatos ütemben gyarapodott a hótakaró a havazás függvényében, azonban e vastagság felett a laza szerkezetű hó a saját súlya miatt tömörödni kezdett. Hiába esett továbbra is hasonló intenzitással, a hóréteg már nem vastagodott a korábbihoz hasonló mértékben, melyre *Judson* és *Doesken* (2000) is felhívta a figyelmet. Ahogy az a 3. táblázatban is látszik, a tömörödés miatt a hó sűrűsége folyamatosan emelkedett, a még lazább állapotú hótakarót jellemző 99 kg/m^3 -es érték 6 óra elteltével 12%-kal, 12 óra elteltével pedig 22%-kal vált nagyobb sűrűségűvé. A legnagyobb átlagos hóvastagságot, 29 cm-t, február 5-én 00 UTC-kor mértük, a legnagyobb, 137 kg/m^3 -es hósűrűség-értéket pedig ugyanezen a napon este 18 UTC-kor, mely már több mint 38%-kal magasabb a kezdetben mért friss porhó sűrűségénél. Összehasonlításképpen a 4. táblázatban feltüntettük a víz különböző megjelenési formáinak és a száraz levegő átlagos sűrűségének értékeit.

Anyag	Sűrűség (kg/m ³)
Víz	1000
Jég	920
Hó	100–500
Vizgőz (100 °C)	0,6
Száraz levegő	1,29

4. táblázat: Sűrűség-táblázat a víz különböző megjelenési formáira, valamint a száraz levegőre.

A hóréteg alapján véve kis hókristályok és levegő keveréke. Így lehetséges, hogy a száraz porhó sűrűsége 100 kg/m³ körüli általában, míg a nedves, tapadó hóé jóval magasabb, 400–500 kg/m³ is lehet extrém esetben (Höllér és Fromm, 2008). Látható tehát, hogy a hósűrűség igen fontos jellemzője a hótakarónak, megfigyeléseink szerint már 20% körüli sűrűség-növekedés is jelentősen csökkenti a hófúvás kialakulásának valószínűségét. A 16. ábrán feltüntettem a hóvastagság, a hósűrűség, a 2 méteren mért hőmérséklet és a 10 méteren mért szél sebességének alakulását a vizsgált időszakban. Látható, hogy a hőmérséklet még –10 °C fölé is csupán igen rövid időre emelkedett, így a hó tömörödése nem írható a hőmérséklet számlájára. Az időszak során mérsékelt erejűnél erősebb átlagos szélsebesség nem fordult elő, élénk szellőkések is csupán időnként adódtak. Ennek következtében 36-os jelenidő kódnál, azaz gyenge alacsony hófúvásnál nem is észleltünk veszélyesebb körülményeket, azonban így is értékes adatokat gyűjtöttünk a hófúvást megindító minimális szélsebesség és a hó állapotának tömörödéseken alapuló módosulását illetően.

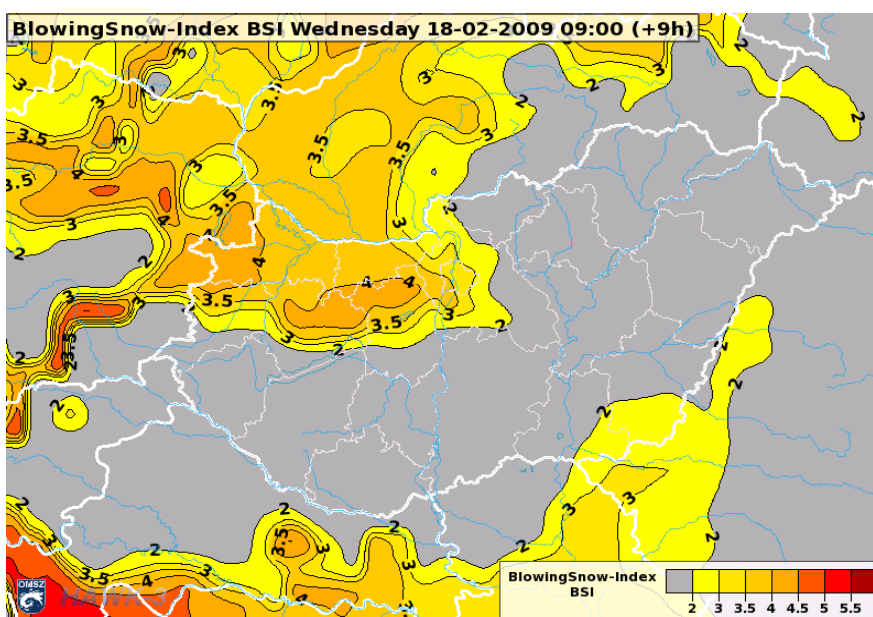


16. ábra: Hófúvás szempontjából legfontosabb meteorológiai paraméterek alakulása 2012.02.04. 06 UTC és 2012.02.05. 18 UTC között.

4.2 A hófúvás index (BSI) és annak térképes megjelenítése

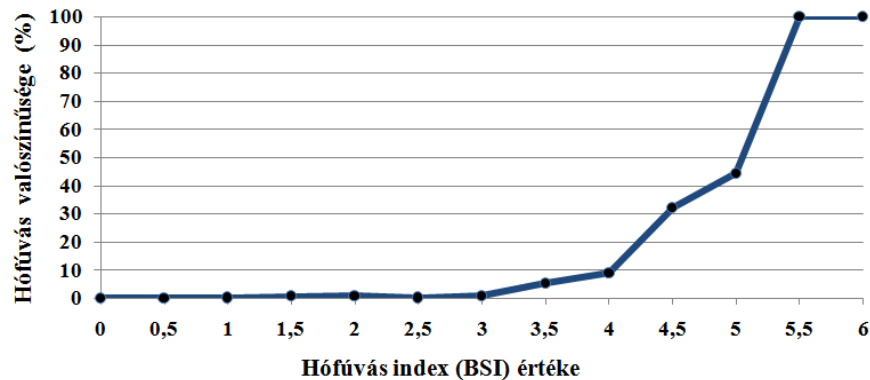
A statisztikai és matematikai alapokon nyugvó hófúvás-index egy komplex mutatószám, mely az elmúlt évtizedek során mért meteorológiai állapotjelzőkből lett meghatározva. Az egyes tagok egyváltozós függvények, önállóan jellemzik a kérdéses változó hófúvásra gyakorolt hatását, így a probléma bonyolultságához képest egy könnyen átlátható matematikai modellt alkottunk. Az előrejelzés során nyújtott felhasználhatósága jelentősen függ a modelltől származó bemenő adatoktól: akár egyetlen állapotjelző téves analízise is komoly mértékben módosíthatja az eredményt. Éppen ezért fontos ismerni az index modelljének felépítését, valamint az előrejelző modell előnyeit és esetleges hiányosságait. Ha például egy adott területre a hófúvás index értéke alacsonyabb, mint azt az előrejelző várna, akkor érdemes ellenőrizni, hogy a két leginkább bizonytalan paraméter, a hóvastagság és a hósűrűség közül nem történt-e valamelyikben alá- vagy fölébecslés.

Az index oly módon van megalkotva, hogy akár egyetlen, a hófúvás szempontjából döntő paraméter nagyfokú kedvezőtlenése is megmutatkozzon a BSI értékében, azaz például szélcsend, vagy 0 cm-es hóvastagság esetén a hófúvás-index értéke 0 körüli lesz, még akkor is, ha a további körülmények kedveznek a jelenség számára. A BSI negatív irányban bármekkora értéket felvehet, azonban pozitív irányban legfeljebb 6 lehet, ha minden egyes tag a maximális, 1 értéket éri el. A BSI 2 alatti értékei esetén már olyan alacsony a hófúvás valószínűsége, hogy azt nem jelöltük külön színnel, azaz a hófúvás-indexet 2-nél kisebb esetben ugyanazzal a semleges szürke színnel ábrázoljuk (17. ábra).



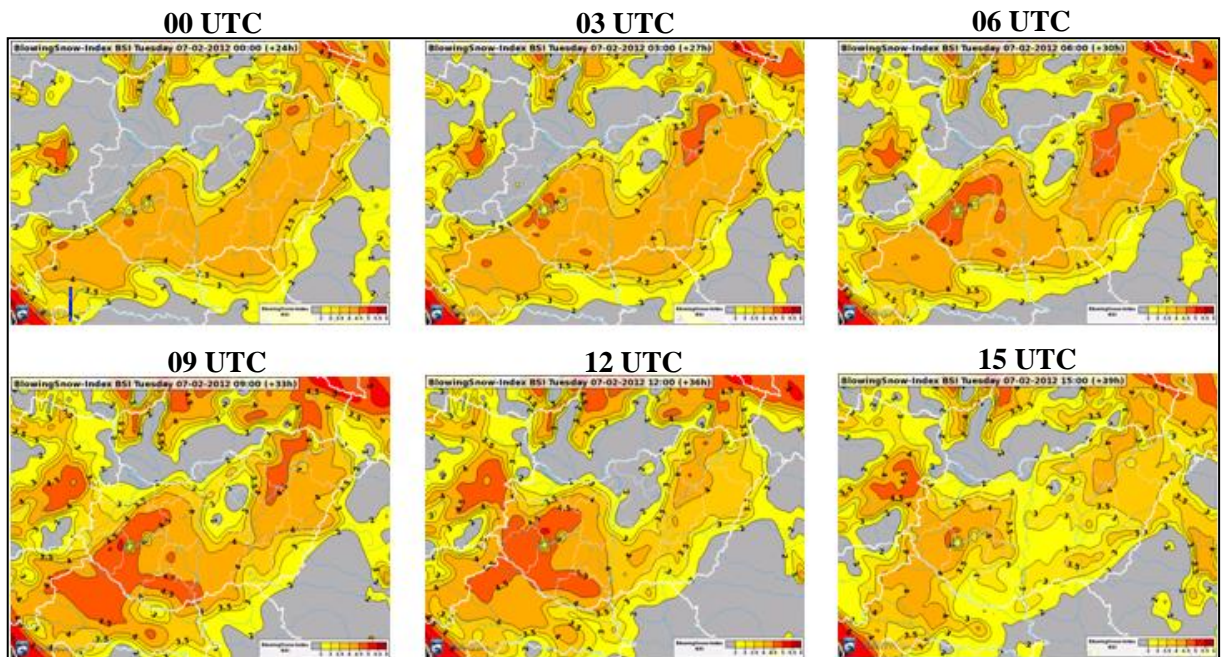
17. ábra: A hófúvás index térkép

A letöltött adatbázis alapján megvizsgáltuk, hogy a kiszámolt index egyes tartományai miképp valószínűsítik a hófúvás előfordulását. Látható, hogy a kapott függvény alakja hasonlít az egyes paraméterek kumulált relatív gyakoriságfüggvényeire. Ez nem véletlen, azzal, hogy azonos alakú függvényekből származó tagokat összegzünk, a kapott eloszlás sem változik jelentősen. A hófúvás-index értékeihez tartozó valószínűségek menete azt jelzi, hogy viszonylag éles átmenet van a hófúvás szempontjából kedvező és kedvezőtlen időjárási viszonyok között (18. ábra).



18. ábra: A hófúvás-index értékeihez tartozó hófúvás előfordulási valószínűségek az 1996-2011 közötti adatsor alapján.

A hófúvás kialakulása szempontjából veszélyeztetett területek időbeli változása is jól nyomon követhető az index segítségével, hiszen a számításhoz szükséges értékek minden időlépcsőben rendelkezésre állnak (19. ábra).



19. ábra: BSI térképek 3 órás időlépcsőben 2012.02.07. 00 UTC és 2012.02.07. 15 UTC között.

Az index összetettsége miatt érdemes megvizsgálni az egyes tagok viselkedését, hatásukat a hófűvés-index végső értékére (5. táblázat). Az összes esetszám, melyre minden tag értékét ki lehetett számítani, 14.000 körüli volt, ebből összesen 243 során fordult elő hófűvés, erős és/vagy magas hófűvés pedig 35 alkalommal.

	$f(T)$	$f(T_s)$	$f(U)$	$f(G)$	$f(H)$	$f(\rho_H)$
A: Hófűvés nélküli esetek	0,79	0,87	-1,33	-0,83	0,23	0,17
B: Hófűvésos esetek	0,76	0,81	0,52	0,58	0,72	0,56
C: Erős és/vagy magas hófűvésos esetek	0,68	0,84	0,82	0,80	0,83	0,73
B–A különbség	-0,03	-0,07	1,85	1,40	0,49	0,39
C–A különbség	-0,11	-0,03	2,15	1,63	0,60	0,56

5. táblázat: A BSI definíciójában szereplő egyes tagok átlagos értéke.

Látható, hogy a 2 méteren mért hőmérsékletre $f(T)$ adott pontszám hófűvésos és hófűvés nélküli esetek közötti különbsége a legalacsonyabb. Ez azt jelenti, e paraméter segítségével lehetetlen volna kiválogatni azokat az alkalmakat, amikor hófűvés előfordult, azaz ezen állapotátározó elhagyása okozná a legkisebb módosulást a hófűvés indexben. Hasonlóan kis hatása a felszíni hőmérséklet $f(T_s)$. A szélességre $f(U)$ és a maximális szellőkésre $f(G)$ kapott 1,85-os, illetve 1,4-es különbség azonban már számottevő, e két állapotátározó különíti el leginkább a hófűvésos és a hófűvés nélküli eseteket. A hófűvés nélküli alkalmakkor a szélességre rendkívül alacsony pontszám járt átlagosan, s bár a hófűvésos esetek során elért 0,52-es átlagos értéke a legalacsonyabb az összes közül, mégis itt a legnagyobb a különbség a két adatsor között.

A C-vel jelölt, erős és/vagy magas hófűvésra szűkített adathalmaz az összes hófűvésos esethez képest egy paraméter kivételével tovább növeli a különbséget. A hőmérsékleti tagok szerepe ezt követően is elhanyagolható marad, azonban érdemes megjegyezni, hogy erős és/vagy magas hófűvés esetén átlagosan magasabb volt a léghőmérséklet, mint az összes hófűvésos (B) eset során. A szél szerepe pedig tovább nő, 0,3-del, illetve 0,22-dal több pontot ér el átlagosan egy erős hófűvésos eset a szélesség és a maximális szellőkés tekintetében. A hóvastagság $f(H)$ és a hősűrűség $f(\rho_H)$ főként a hófűvés nélküli és az erős és/vagy magas hófűvésos esetekben különül el számottevően egymástól, mely tovább erősíti a hófűvés indexhez kiválasztott paraméterek hasznosságát.

4.3 A hósűrűsége vonatkozó vizsgálat eredményei

A hósűrűség több szempontból is kritikus fontosságú a hófúvásra nézve. Előfordulhat, hogy minden más paraméter (hőmérséklet, szélesség, hóvastagság) kedvez a hófúvás kialakulásának, azonban a hó állagának rövid idő alatt bekövetkező változása, romlása miatt mégsem alakul ki a várt esemény. Nagy eltérés van az egyes állapotjelzők mérési gyakorisága között, hiszen míg a hőmérsékletet percenként méri az automata, addig a hóvastagságot csupán naponta kétszer jegyzi fel. Még ennél is ritkábban, csupán napi egyszer kerül regisztrálásra a hó sűrűsége, éppen ezért kiemelten fontos megvizsgálni annak 24 órás becsült változékonyságát. A hósűrűség értékét az aznapi és a rákövetkező napi 6 UTC-s mérésekből számítottuk, a két időpont között lineáris interpolációt képeztünk, így óránkénti értékeket kaptunk. Az adatsorból az első közelítésben nincsenek kizárva azon periódusok, amikor folyékony csapadék hullott, vagy hullhatott. A csapadékhullás képes jelentős mértékben megváltoztatni a sűrűség értékét, azonban ettől függetlenül hasznosnak bizonyulhat vizsgálatunk, hiszen a hó sűrűségét minden esetben csak 24 óránként mérik, és a soron következő táblázatok is szemléltetik, hogy a mérés tér- és időbeli sűrűsége nem megfelelő a paraméter betöltött szerepéhez képest.

Esetszám (db)	ρ_{int} (kg/m³)	$\bar{\rho}$ (kg/m³)	$\Delta 24h \bar{\rho}_h$ (kg/m³/24h)	$\Delta 24h \bar{\rho}_h / \bar{\rho}$ (%)	max$\Delta 24h \rho_h$ (kg/m³)	max$\Delta 24h \rho_h / \bar{\rho}$
212	0-49	40,8	33,2	81,4	309,0	7,6
4634	50-100	83,3	25,3	30,4	506,0	6,1
13431	100-150	122,8	21,4	17,4	463,8	3,8
11685	150-200	172,9	26,3	15,2	421,7	2,4
8994	200-250	223,2	28,6	12,8	379,5	1,7
6035	250-300	271,9	33,5	12,3	277,1	1,0
3141	300-350	320,6	41,1	12,8	300,4	0,9
1348	350-400	371,0	51,8	14,0	337,0	0,9
684	400-450	421,3	55,3	13,1	350,9	0,8
320	450-500	472,0	80,2	17,0	406,2	0,9
234	500-550	517,7	98,2	19,0	443,0	0,9
317	550-600	573,9	80,5	14,0	380,0	0,7
38	600-650	617,7	66,7	10,8	166,0	0,3
16	650-700	674,8	123,3	18,3	167,0	0,2

6. táblázat: Az 1996-2011 közötti hósűrűség adatokból származó statisztikai jellemzők.

A 6. táblázat oszlopai az alábbi elemeket tartalmazzák: az adott sűrűségi intervallumba eső esetek száma, a hósűrűségi intervallumok (ρ_{int}), az adott intervallum elemeinek átlaga ($\bar{\rho}$), az átlagos 24 órás hósűrűség-változás abszolút értéke ($\Delta 24h \bar{\rho}_h$), ennek aránya az

intervallum átlagos hósűrűséghez ($\Delta 24h \bar{\rho}_h / \bar{\rho}$), az abszolút 24 órás hósűrűség-változás maximuma ($\max \Delta 24h \rho_h$) és végül a maximális 24 órás változás és az átlagos hósűrűség aránya ($\max \Delta 24h \rho_h / \bar{\rho}$). Látható, hogy az átlagos hósűrűség-változás és az átlagos hósűrűség arányának százalékban kifejezett értéke az alacsony sűrűségi kategóriákban a legmagasabb, azaz a friss, alacsony hó-víz egyenértékű hóréteg állapota romolhat a leghamarabb és a legnagyobb mértékben, a legjelentősebb változékonyság a 0–150 kg/m³-es kategóriákban alakult ki.

Ezt követően kizártam mind a szilárd, mind a folyékony csapadékhullásos eseteket, s az előzőek mintájára ezekkel az adatokkal is elvégeztem ugyanazon statisztikai vizsgálatokat (7. táblázat).

Esetszám (db)	ρ_{int} (kg/m³)	$\bar{\rho}$ (kg/m³)	$\Delta 24h \bar{\rho}_h$ (kg/m³/24h)	$\Delta 24h \bar{\rho}_h / \bar{\rho}$ (%)	$\max \Delta 24h \rho_h$ (kg/m³)	$\max \Delta 24h \rho_h / \bar{\rho}$
51	0-49	37,4	41,8	111,8	289,0	7,7
1268	50-100	82,9	19,9	24,0	506,0	6,1
3154	100-150	124,4	20,0	16,0	463,8	3,7
3568	150-200	172,8	24,9	14,4	350,0	2,0
2767	200-250	221,5	25,5	11,5	320,8	1,4
1510	250-300	270,3	31,5	11,6	277,1	1,0
1025	300-350	322,0	38,6	12,0	300,4	0,9
596	350-400	370,8	43,4	11,7	320,0	0,9
334	400-450	421,2	48,9	11,6	284,0	0,7
176	450-500	472,4	61,5	13,0	216,6	0,5
139	500-550	515,3	40,3	7,8	226,5	0,4
38	550-600	569,7	53,9	9,5	100,0	0,2
13	600-650	626,3	75,1	12,0	124,5	0,2
16	650-700	674,8	123,3	18,3	167,0	0,2

7. táblázat: Az 1996-2011 közötti hósűrűség adatokból származó statisztika, melyből kiszűrtük a csapadékos eseteket.

A csapadékos esetek kizárásával tovább nőtt a laza szerkezetű hótípus 24 óra alatt bekövetkező sűrűségváltozása. Igen alacsony hó-víz egyenértékű hó esetén extrém mértékű, akár 6-7-szeres tömörödés is bekövetkezik csapadékhullás nélkül is.

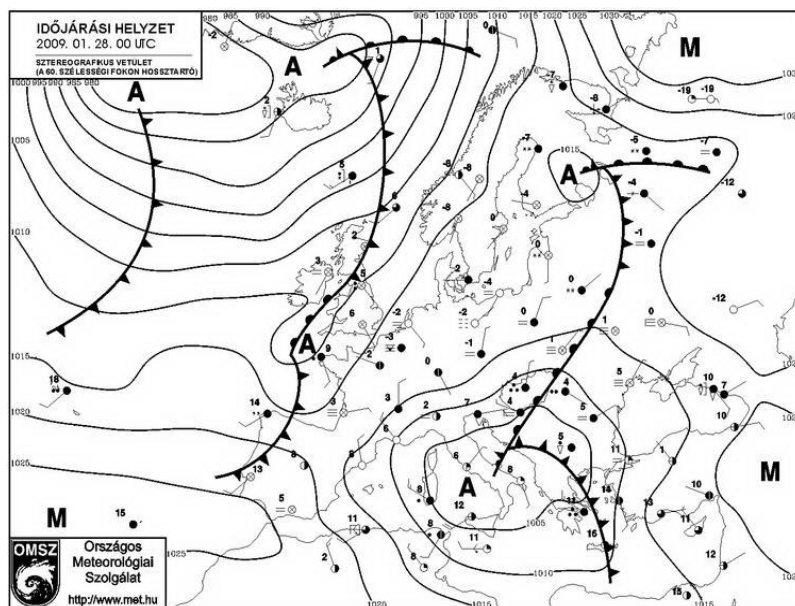
Mind a két táblázatból (6. és 7.) kitűnik, hogy a legjelentősebb tömörödéssre az igen kis sűrűségű hó képes, akár több mint 100%-os sűrűsége-növekedés is bekövetkezik. A kapott adatok szegedi méréseink megbízhatóságát is megerősítik. A csapadékhullás-mentes esetekre vonatkozó 7. táblázat 5. oszlopa összevethető a 2012. február 4-én 6 UTC és február 5-én szintén 6 UTC között mért hósűrűség-értékeinkkel (4.1-es fejezet). Szegeden 4-én reggel 99 kg/m³ hósűrűséget regisztráltunk, s a hótakaró 24 óra elteltével 26,3%-os tömörödést szenvedett, azaz sűrűsége 125 kg/m³-re emelkedett. Az 1996–2011-es időszak adataiból készült 7. táblázat alapján az 50–100 kg/m³-es sűrűségi kategóriába tartozó hó egy nap elteltével 24%-ot tömörödik, mely a mért 26,3%-os mértékhez elfogadhatóan közelíthető.

5. Esettanulmányok

5.1 Tapadó havas időjárási helyzet 2009.01.27–30. időszakban

Hófűvás számára alapvetően kedvezőtlen volt a 2009. január végi eset, azonban így kívánjuk demonstrálni, hogy a hófűvás index ehhez hasonló, hófűvás szempontjából bizonytalan helyzetekben is képes segíteni az előrejelző meteorológus munkáját. Elvárjuk, hogy a benne szereplő hősűrűségi tag kifejtse hatását, ugyanis az ilyenkor szokásos magasabb hősűrűségi értékek miatt összességében alacsony index értéket kell kapnunk.

Ebben az időszakban mozgalmasan alakult Európa időjárása, melyet döntően ciklonok és frontjaik határoztak meg. A Földközi-tengeren kialakult mediterrán ciklon melegfrontja január 27-én érte el a Kárpát-medencét, melynek hatására egyre többfelé kezdett csapadék hullani. Az eleinte még döntően esőt később a ciklon kelet felé haladásával a nyugati

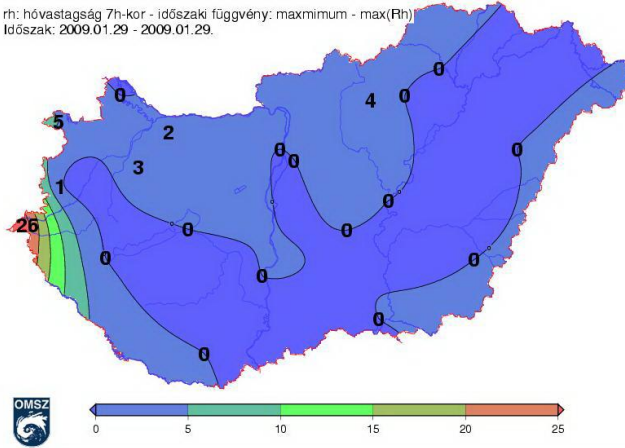


20. ábra: Az európai időjárási helyzet 2009. január 28-án 00 UTC-kor (forrás: OMSZ).

ati megyékben egyre inkább havazás váltotta fel. A hosszan elnyúló frontrendszer miatt keveredési zóna alakult ki a medencében, ez pedig kedvezett a magas hó-víz egyenértékű, ún. nedves vagy tapadó hó hullásának (20. ábra).

A tárgyalt napokban az ország legnagyobb részén a maximum-hőmérséklet minden nap elérte, vagy meghaladta a 0 °C-ot, s az éjszakai legalacsonyabb hőmérsékleti értékek is fagy-pont körül alakultak. 26-a és 28-a között a Dunántúlon átlagosan 10–50 mm csapadék hullott, melynek jelentős része azonban eső formájában történt. Csupán 27-én a késő délelőtti órákban kezdődött a halmazállapot-váltás, ekkor a Nyugat-Dunántúlon egyre többfelé észleltek havazást. Ehhez még fagypontra feletti hőmérséklet társult, így a hó folyamatosan olvadt, állaga nedves volt. Jelentős mennyiségű, körülbelül 20 cm-nyi friss hó hullott Szentgotthárd térségében, a hó vastagsága 29-én 26 cm-nek adódott, ezen kívül az Észak-Dunántúlon fordult elő 2–5 cm összefüggő hótakaró (21. ábra). A szentgotthárdi friss hóréteg sűrűsége 200 kg/m³ volt, ezen kívül ezen a napon csak Kékestetőn történt ilyen jellegű mérés (8. táblázat).

rh: hóvastagság 7h-kor - időszaki függvény: maximum - max(Rh)
 Időszak: 2009.01.29 - 2009.01.29.

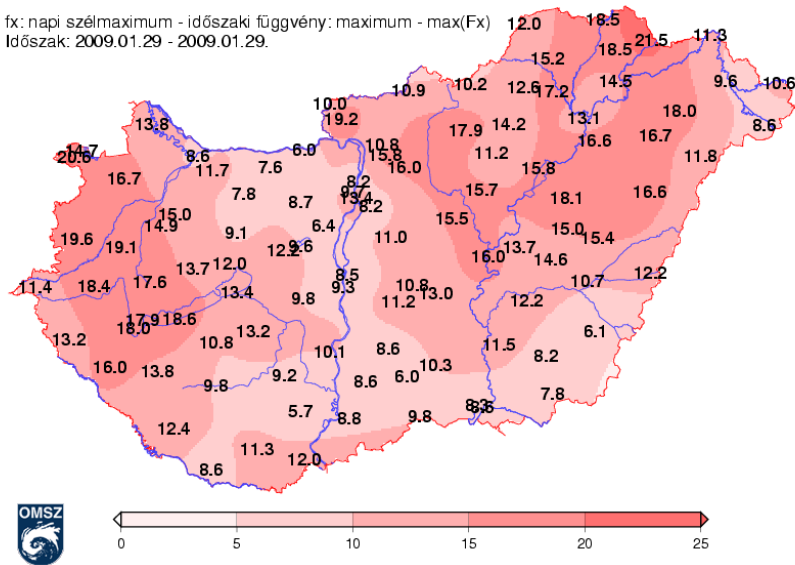


Állomásnév	Hósűrűség (kg/m ³)
Kékestető	250
Szentgotthárd	200

8. táblázat: 2009.01.29-én reggel 7 órakor mért hósűrűség-értékek (forrás: OMSZ).

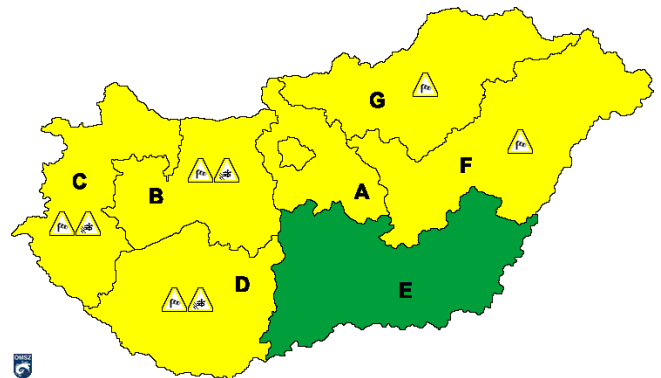
21. ábra: A 2009.01.29-én történt hóvastagság mérés eredménye (forrás: OMSZ).

fx: napi szélmaximum - időszaki függvény: maximum - max(Fx)
 Időszak: 2009.01.29 - 2009.01.29.



22. ábra: A napi maximális szélökés értéke 2009. január 29-én (forrás: OMSZ).

Január 29-én reggel az erős, elszórtan viharos szélökések miatt (22. ábra) a nyugat- és közép-dunántúli régiókra első fokú hófúvás riasztás lett kiadva. A veszélyjelző helyenként, főként a Bakonyba várt markáns előfordulást (23. ábra). Az ECMWF 29-i

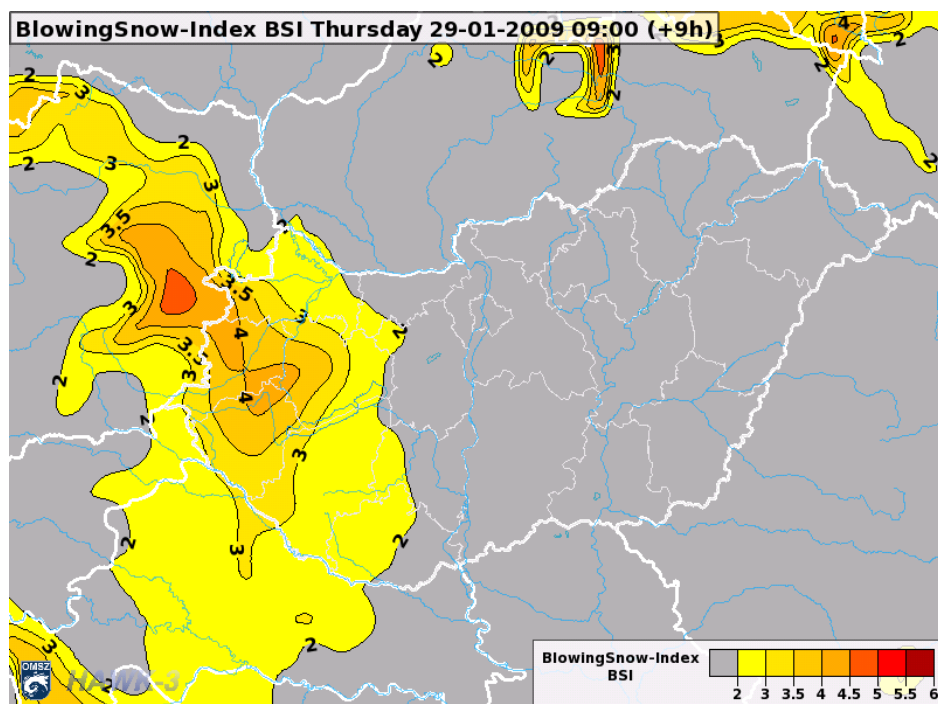


23. ábra 2009.01.29-én 08:55 UTC-kor kiadott riasztás (forrás: OMSZ).

00 UTC-s előrejelzése a nyugat-dunántúli megyékre átlagosan csupán 1 °C-kal becsülte alul az aktuális hőmérsékletet, a szélviszonyokat pedig pontosan prognosztizálta. A hóvastagság mezőben azonban jelentős eltérés mutatkozott, hiszen a Dunántúl teljes területére 2–10 cm közötti hóvastagságot jelzett. Ehhez képest csupán Szentgotthárd térségében, illetve a Bakonyban fordult elő 10 cm-t

meghaladó hóréteg, ezen kívül pedig még a Kisalföld déli részein 2–5 cm. A hósűrűség-előrejelzés sem mondható kielégítőnek, a modell 60–80 kg/m³-rel alulbecsülte annak mértékét.

A 24. ábrán látható a riasztás időpontjára számított hófúvás index térkép, mely a nem tökéletes előrejelzési mezőkből Szentgotthárdra 3-as értéket adott. A helyes adatok megadásával ismét kiszámítottuk a hófúvás indexet, s így az említett pontra ennél is alacsonyabbat, 2,3-et kaptunk. Amennyiben a modell előrejelzésében helyesen szerepelt volna a hóvastagság és hósűrűség mező, úgy jóval kisebb lett volna ki a 2-nél magasabb BSI index értékű területek kiterjedése, s az is főként a Balatontól északra korlátozódott volna.



24. ábra: 2009.01.29. 09 UTC-re vonatkozó hófúvás index térkép.

A fentiek eredményeképp ez az időszak nem a hófúvás okozta fennakadásokról volt híres, hanem arról, hogy a vezetékek a tapadó hó miatt rájuk rakódott jelentős súlyfelesleget nem bírták el (25. ábra). Ennek következtében még napokkal később is 94 nyugat-magyarországi település 14.000 háztartásában szünetelt az áramszolgáltatás. Több iskolában és óvodában szünetet rendeltek el, a legsúlyosabb helyzet Zala megyében állt elő.

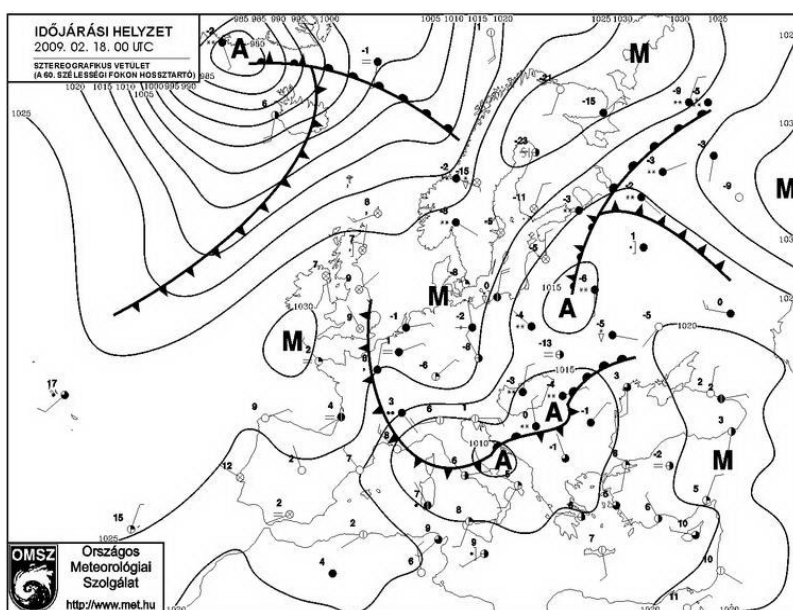


25. ábra: A vezetékekre lerakódó vastag, tömör hó- és jégréteg miatt villanyoszlopok dőltek ki (forrás: Kolláth és Tóth, 2009).

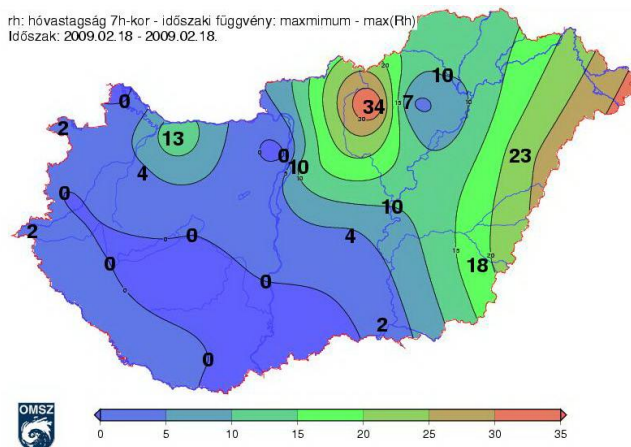
5.2 Hófúvás 2009.02.16–20. időszakban

Hatalmas kiterjedésű, többközéppontú ciklonrendszer alakította kontinensünk időjárását 2009. február közepén, a Kárpát-medencében egymást követték a frontok. Több ízben is kialakult nagyobb országrészt lefedő havazás, ennek következtében február 16-án reggelig 5–15 cm friss hó hullott a déli és a keleti megyékben, azonban a 0 °C körüli hőmérsékletnek köszönhetően folyamatos olvadásnak volt kitéve a hótakaró. Az OMSZ február 16-ig több

napra is elsőfokú riasztást adott ki hófúvásra, ám érdemleges eset eddig a napig nem alakult ki. Az észak-európai cikloncsaládról lefűződő peremciklon 17-én érte el, majd 18-ra már el is hagyta hazánkat (26. ábra). Ennek melegfrontjából az Észak-Dunántúlon és a Tiszántúlon 10–15 cm-t gyarapodott a hórétég vastagsága (27. ábra), a hó sűrűsége pedig a 9. táblázat szerint alakult.



26. ábra: Az európai időjárési helyzet 2009. február 18-án 00 UTC-kor (forrás: OMSZ).

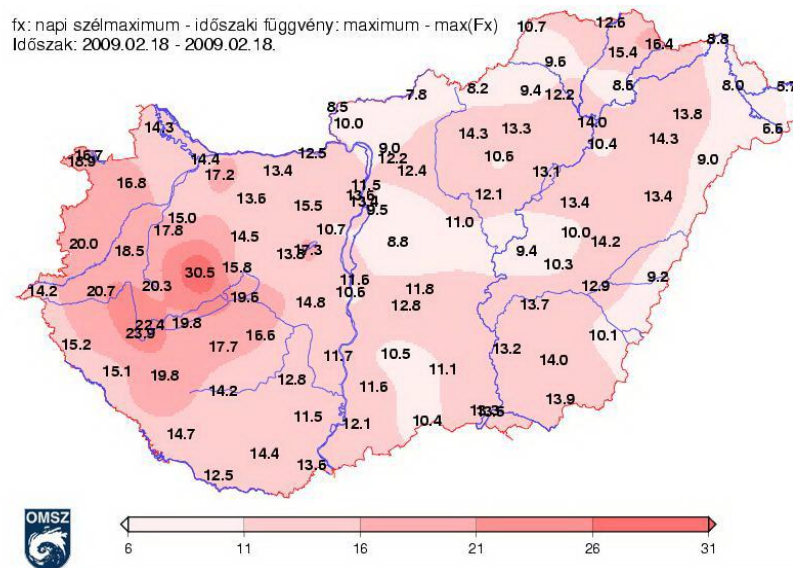


27. ábra: A hórétég vastagságra 2009. február 18-án reggel 7 órakor (forrás: OMSZ).

Állomásnév	Hósűrűség (kg/m ³)
Békéscsaba	228
Budapest-Lőrinc	110
Debrecen	191
Győr-Pér	108
Kékestető	250
Miskolc	90

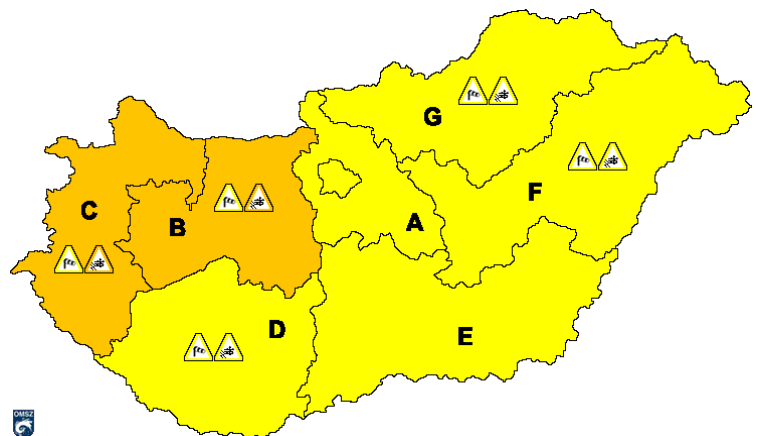
9. táblázat: 2009.02.18-án reggel 7 órakor mért hósűrűség-értékek (forrás: OMSZ).

A ciklon hátoldalán szárazabb és több °C-kal hidegebb levegő áramlott a medencébe, 18-án a legerősebb szellőkések értéke a Dunántúlon kisebb körzetekben elérte a viharos, a Tiszántúlon pedig az erős kategóriát (28. ábra).



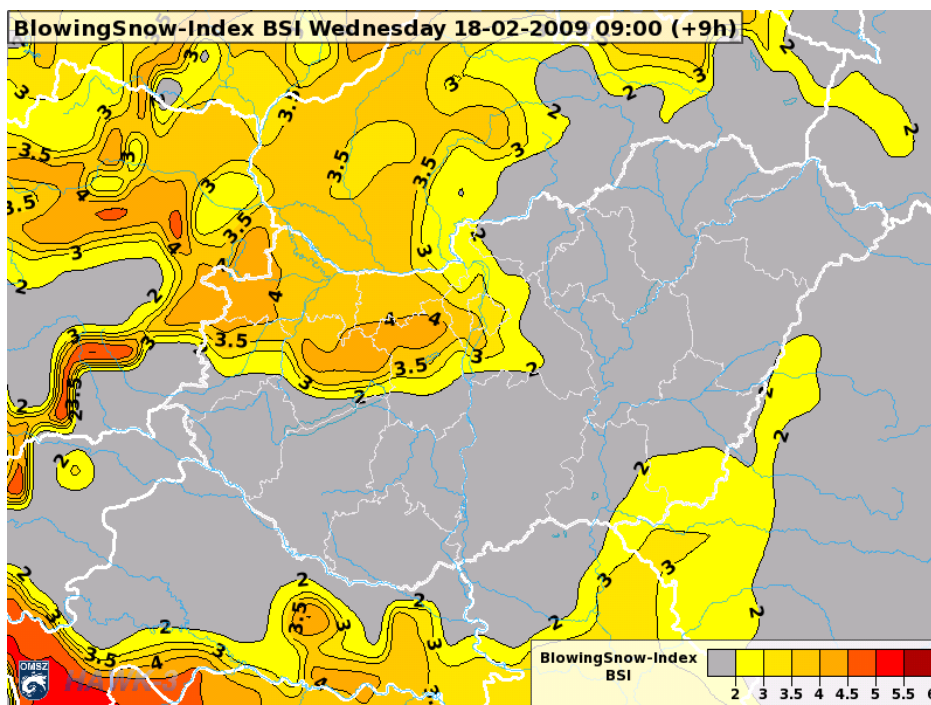
28. ábra: A napi legnagyobb szellőkés értéke 2009. február 18-án (forrás: OMSZ).

Hajnalban a B és F régiókra, a délelőtt második felétől azonban már a C és B területekre szólt a másodfokú hófúvás-riasztás, a D és G régiókra végig elsőfokú riasztás volt érvényben (29. ábra).



29. ábra: A 2009.02.18-án 09:19 UTC-kor kiadott riasztási térkép (forrás: OMSZ).

Az ECMWF modell kezdeti mezőiben ismét eltérés adódott, ugyanis a Tiszántúlon kialakult 5–25 cm-es hórétegből csak 2–5 cm-t mutatott a modell, ami alapvetően befolyásolta a belőle származtatott index értékét és a levonható következtetéseket. A hósrűség eloszlását sem jelezte előre pontosan, a keleti országrész mintegy kétharmadán 30–50 kg/m³-rel, a Dunántúlon pedig 70–80 kg/m³-rel magasabb értéket jelzett. Az aktuális hőmérséklet ezeken a területeken 0 és –2 °C között szóródott, ebben kisebb mértékű, mintegy 1 °C-os felülbecslés történt, ugyanakkor a szélmező előrejelzése pontos volt.



30. ábra: 2009. február 18-án reggel 09 UTC-re szóló hófúvás index előrejelzési térkép.

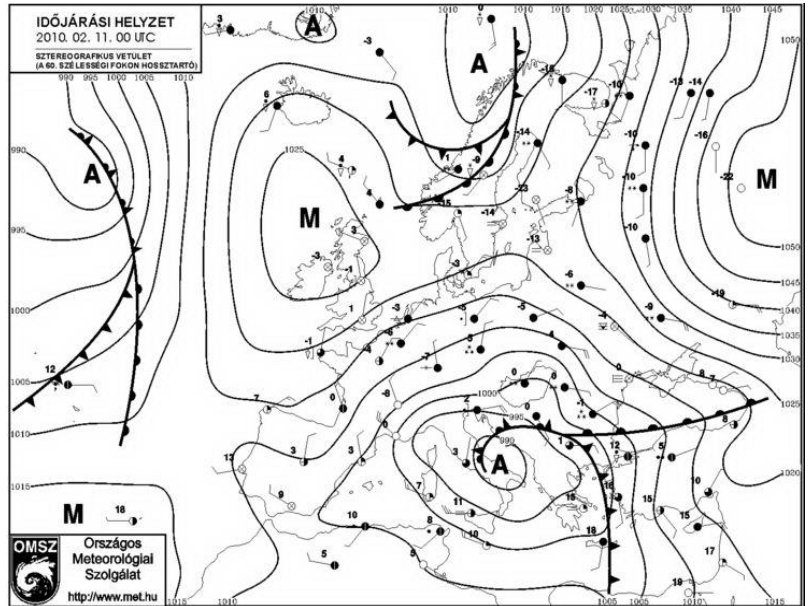
A 30. ábrán látható, hogy a rossz kezdeti feltételek miatt nem volt tökéletes a hófúvás előrejelzése az index segítségével, a legjelentősebb problémát a tiszántúli téves hóvastagság értékek jelentik. Az észlelési adatok segítségével újraszámoltuk az index-térképet, s Debrecenre 6 UTC-kor 3,86 adódott, valamint összességében is jóval nagyobb lett volna a 3,5-nél magasabb értékkel rendelkező helyek területe. A Dunántúlra előrejelzett index értéke a mérési adatok ismeretében helytálló és a riasztással is egybevág. Jelentősebb hófúvás a Nyírségben, a Tisza középső és felső szakasza mentén, a Kisalföldön, valamint a Közép-Dunántúlon fordult elő (31. ábra).



31. ábra: Hófúvás által betemetett nyírségi útszakasz (forrás: Baracsi Enikő).

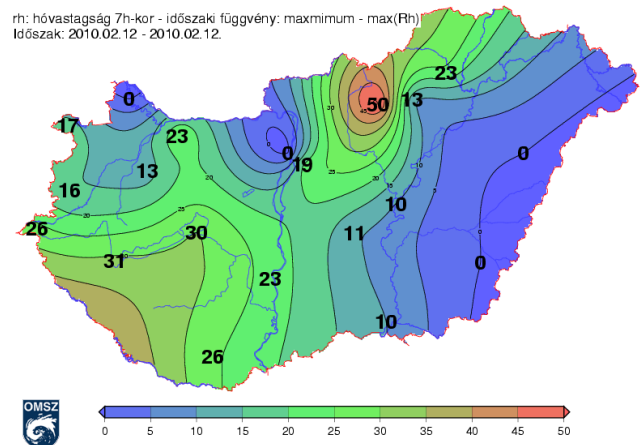
5.3 Hófúvás 2010.02.11–14. időszakban

Az átlagnál hidegebb és csapadékosabb január megfelelő táptalajként szolgált az utóbbi évek egyik legsúlyosabb, hófúvással kapcsolatos időjárási eseményéhez. Február 6-án a Dunántúl jelentős részén egy sekély mediterrán ciklon meleg-, majd okklúziós frontjából 5–8 cm hó hullott. Ezt követően napközben is 0 °C körül alakult a maximum-hőmérséklet a nyugati országrészben, így a hófelszín felső része kissé megolvadt, tömörödött. A következő napokban egy magassági hidegörvény szakadt le az egészen Afrika északi partjáiig leérő hosszúhullámú teknőről.

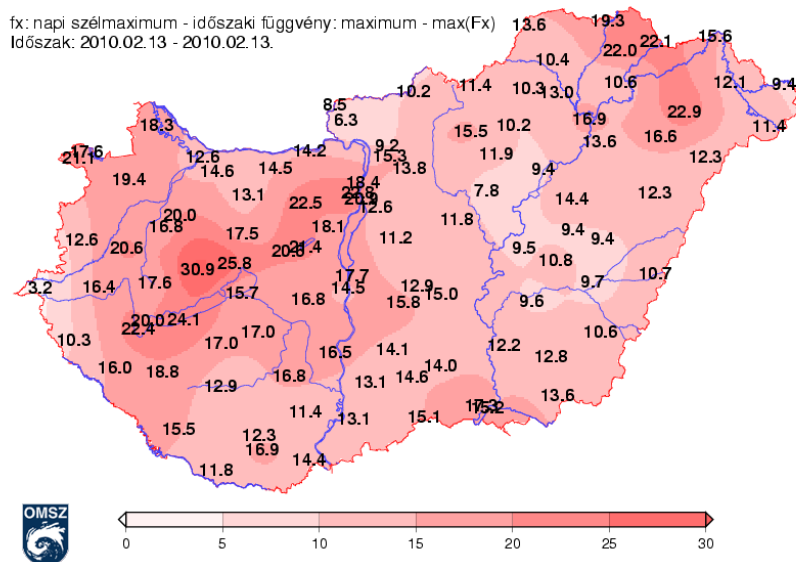


32. ábra: Az európai időjárási helyzet 2010. február 11-én 00 UTC-kor (forrás: OMSZ).

E hidegleszakadás több alkalommal is ciklogenezist (32. ábra) indított be a Földközi-tenger térségében, mely ciklonok eredményeképp február 12-re átlagosan 20–30 cm hó borította a Dunától nyugatra eső országrészt (33. ábra). A ciklon és vele együtt a csapadékmező keletebbre való áthelyeződésével hátoldali helyzetbe került a Dunántúl. A nagy nyomási gradiensnek köszönhetően február 13-án a maximális szélökés értéke sok helyen haladta meg az erős kategóriát, s nem voltak ritkák a viharos, sőt, néhol az erősen viharos erejű szélökések sem (34. ábra).

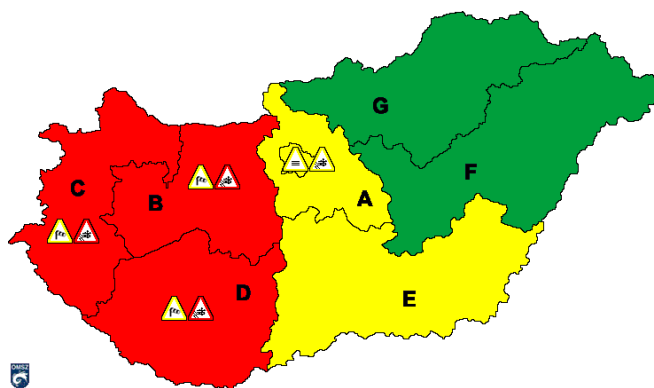


33. ábra: A 2010. február 12-én reggel 7 órakor mért hóvastagság adatok (forrás: OMSZ).



34. ábra: A napi legnagyobb szélökés értéke 2010. február 13-án (forrás: OMSZ).

A helyzet súlyosságát jelzi, hogy ez volt az első eset a veszélyjelző rendszer 2006-os kiépítése óta, amikor harmadfokú, piros figyelmeztető előrejelzést, majd később, 13-án reggel 05:36 UTC-kor riasztást adtak ki az előrejelző szakemberek hófúvás miatt (36. ábra). Ilyen szintű veszélyhelyzet esetén a kérdéses régióban többfelé várható erős hófúvás, melyet viharos (60–70 km/h-s) szellőkés kísérnek.



36. ábra: 2010. február 13-án 05:36 UTC-kor kiadott harmadfokú riasztás hófúvásra (forrás: OMSZ).

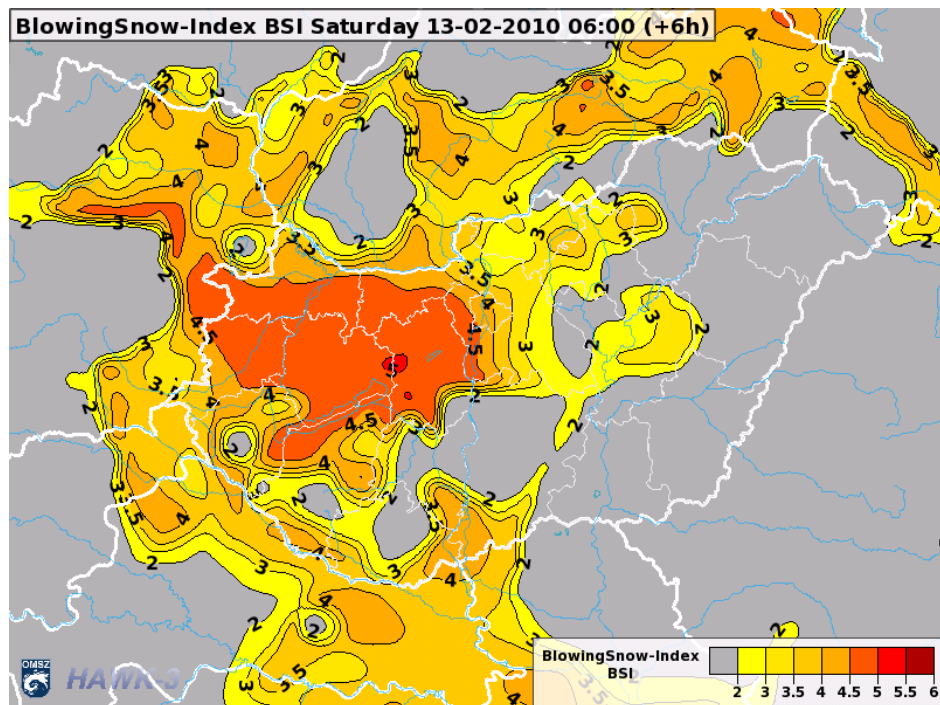
Az ECMWF modell február 11-i 00 UTC-s előrejelzésében igen pontosan jelezte a másnapi hóvastagság-eloszlását, egyedül Fejér megye területére jelzett a valóságnál mintegy 10 cm-rel vastagabb hótakarót. Ez az index szempontjából gyakorlatilag lényegtelen volt, hiszen a hóvastagságra vonatkozó tag 31 cm felett már a maximális 1 értéket veszi fel. Hósűrűség tekintetében sikerült a modellnek előrejeleznie, hogy a Dunántúl északi részén lazább szerkezetű, míg déli részén tömörebb lesz a hóréteg, azonban a számszerű értékekben az ECMWF a tel-

Állomásnév	Hósűrűség (kg/m ³)
Budapest-Lőrinc	203
Győr-Pér	110
Kékestető	236
Miskolc	214
Pécs-Pogány	167
Sármellék	206
Siófok	184
Szeged	338
Szentgotthárd	188
Szombathely	136

10. táblázat: 2010.02.13-án mért hósűrűség-értékek (forrás: OMSZ).

jes területre 40–80 kg/m³-es felülbecslést eredményezett a mérésekhez képest (10. táblázat). A szélsébség és a széllokések előrejelzése jónak mondható, így hófúvás szempontjából mindegyik fontos paraméter prognosztikai mezője alkalmas lett volna a hófúvás indexből történő területi becslésre, a jelenség hevességének előrejelzése pedig a hósűrűség mező pontosabb ismeretében tovább javítható lett volna.

A 37. ábrán jól látható, hogy a dél-dunántúli régió kivételével tökéletes az átfedés a magas, 4,5 feletti hófúvás index értékű és a harmadfokú riasztásban részesült területek között. Baranya és Tolna megyében, valamint Somogy megye déli részén jobbra csak 12-én éjszakáig fordult elő hófúvás. Másnap hajnalra azonban ezeken a területeken alábbhagyott, mely együttes következménye volt az enyhébb levegőnek, s ezáltal a hó jelentősebb tömörödésének, hiszen a szélviszonyokban nem történt számottevő változás.



37. ábra: 2010. február 13-án reggel 06 UTC-re szóló hófúvás index előrejelzési térkép.

Az említett régiók hófúvás indexének alacsony értéke két paraméter eredménye, melyek közül az egyik a valóságban és a modellben is szereplő 4–6 m/s-mal gyengébb szélsébség és széllokés értéke, valamint a déli megyék magasabb, 240–280 kg/m³-es hósűrűség-értéke. Baranya megyében nem volt jellemző erős hófúvás a riasztott időszakban. Somogy, illetve Tolna megye északi részén azonban előfordult a jelenség. Így mindezek ismeretében a hófúvás indexből készült térkép a kezdeti feltételekhez képest jól reprezentálta a hófúvás által sújtott területeket.

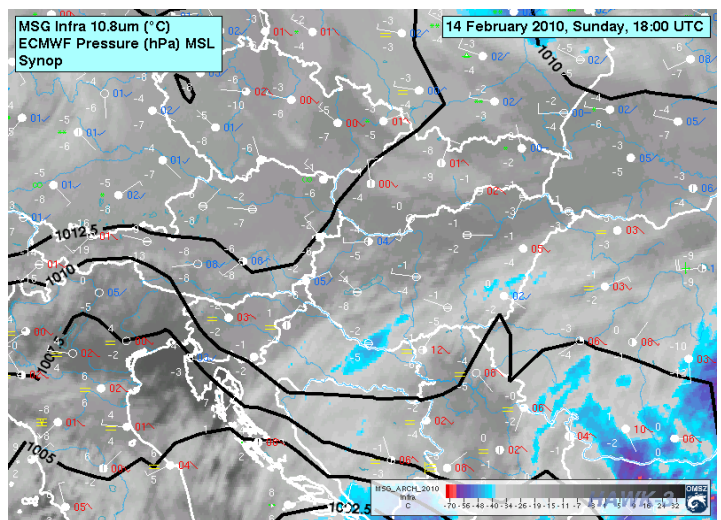
A közép-dunántúli megyékben kritikus helyzet alakult ki, több helyen járhatatlan utakkal, melyek megtisztítása a folyamatos erős, gyakran viharos erejű szél miatt reménytelen volt. Délutánra 103 úton nehezen vagy teljes elzárás miatt egyáltalán nem lehetett közlekedni.

„Fejér megyében is katasztrofális a helyzet, itt is több főút járhatatlan, négy települést, Iszkaszentgyörgyöt, Zámolyt, Nagyveleget és Magyaralmást pedig elzárta a hó. Reggel egy vonat is elakadt a hóban Csajág és Polgárdi között (38. ábra), mostanra már sikerült kiszabadítani az utasokat. Járhatatlan a 7-es főút Polgárdinál, a 63-as Abánál, a 62-es főút Seregélyes-Szőlőhegynél. (...) Veszprém megyében is hasonló a helyzet, lezárták a Veszprém és Tapolca között vezető főutat, emellett több útszakasz is járhatatlan. (...)” – írta az origo.hu portálon Seres (2010).



38. ábra: Elakadt vonatok mentése 2010.02.13-án, Fejér megyében (forrás: MÁV Zrt. PTK Bp. Pályafenntartási Alosztály, Székesfehérvár).

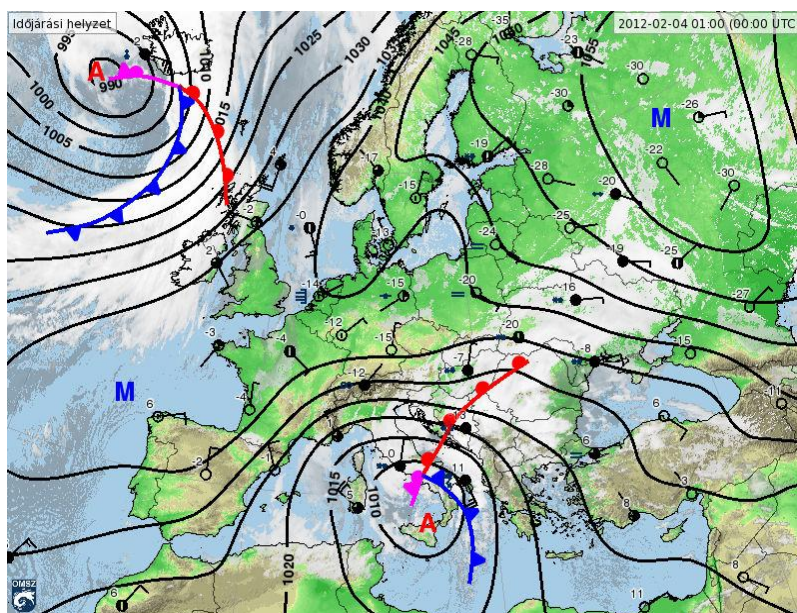
Vasárnap délutánra a ciklon elhagyta Magyarország térségét, így jelentősen csökkent a nyomáskülönbség hazánk területén belül, emiatt a szél is csillapodott (39. ábra). Február 15-ére, két nappal később, végül sikerült minden utat megtisztítani, így az addig megközelíthetetlen települések ismét elérhetővé váltak.



39. ábra: Közép-európai mezoanalízis-térkép, 2010. február 14. 18 UTC (forrás: OMSZ).

5.4 Hófúvás 2012.02.03–07. időszakban

A 2011/2012-es tél január utolsó napjaiig országos viszonylatban az átlagosnál enyhébb és hóban szegényebb volt. A hónap végére azonban a kelet-európai kontinentális területen megerősödő anticiklon áramlási rendszerében szibériai eredetű száraz, igen hideg léghullámok érték el a Kárpát-medencét. A Földközi-tenger térségében ennek a folyamatnak a következményeként mediterrán ciklonok keletkeztek, melyek közül több is érintette csapadékmezejével hazánkat (40. ábra).



40. ábra: Az európai időjárási helyzet
2012. február 4-én 00 UTC-kor (forrás: OMSZ).

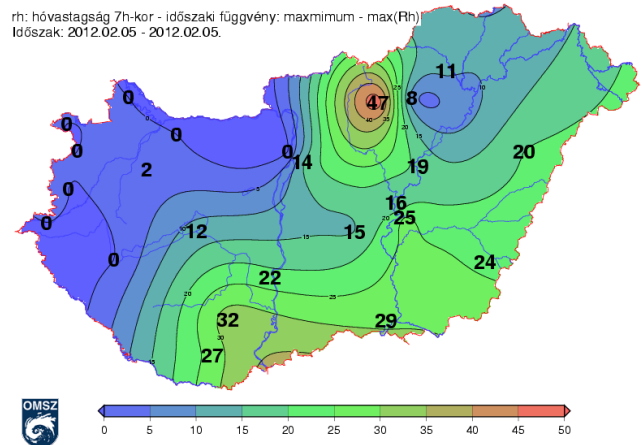
Február 3-án hajnalban a déli megyékben megkezdődött az előrejelzett havazás, melyet a Júlia ciklon melegfront-

ja, valamint a keleti áramlás Alpok előterében kialakuló torlasztó hatása okozott. A csapadékhullás folyamatosan terjedt észak felé, s a -10 °C körüli hőmérséklet miatt mindenütt igen kis sűrűségű, azaz alacsony hó-víz egyenértékű porhó hullott. Ezt az ECMWF modell február 3-i 00 UTC előrejelzése is alátámasztotta, hiszen erre a napra általában 2 méteres magasságra -7 °C és -11 °C közötti maximum-hőmérsékletet prognosztizált, valamint a lehulló hó sűrűségét 100 kg/m^3 körülre számította. A déli országrészre másnap reggel 06 UTC-ig 24 óra alatt 2–12 mm közötti csapadékot jelzett előre, kevesebbet csak az Észak-Dunántúlra és az Északi-középhegységre. A mérések alapján a csapadék területi és mennyiségi előrejelzése igen pontos volt.

A meteorológusok körében elterjedt, tapasztalaton alapuló becslés, miszerint porhó esetén a lehulló csapadék mennyiségét kétszöröseztve megkapható a hóvastagság várható értéke (Roebber *et al.*, 2003). Ez ebben az esetben is megfelelő pontosságúnak bizonyult, hiszen míg például Pakson és Pécsen a 4 mm csapadékból 10 cm, Szegeden 9 mm-ből 20 cm vastag hótakaró alakult ki. Fontos megjegyezni, hogy igen alacsony sűrűségű hó hullása esetén a csapadék mérésében jelentős szerepet játszik a szél, hiszen a csapadékmérőben alkalmazott hókereszt ellenére is előfordul, hogy a ténylegesen lehulló hónak csak töredékét lehet-

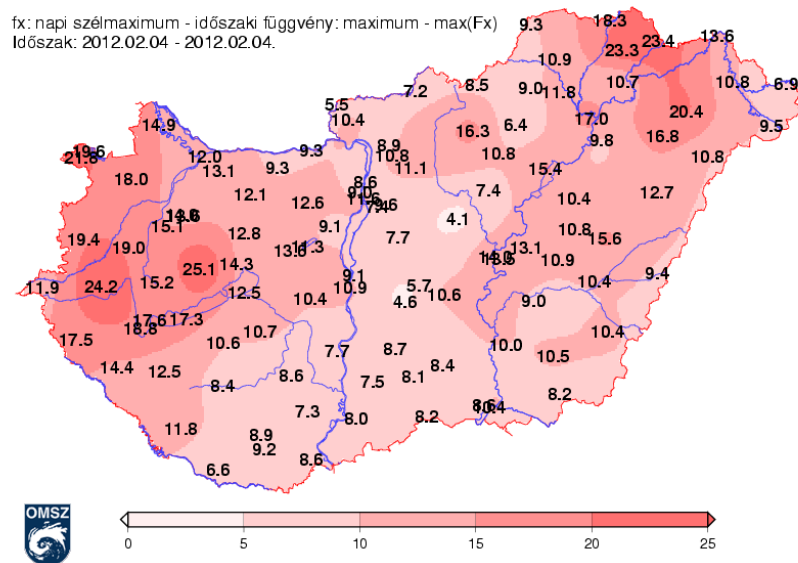
séges ily módon megmérni. Ebben az esetben pedig az európai modell 8 és 18 m/s közötti legerősebb szellőkéseket jelzett előre a hófűvás szempontjából veszélyeztetett területekre.

Szombaton 12 UTC-kor jellemzően folt és 22 cm között alakult a friss hó átlagos vastagsága az érintett térségben. Estére tovább gyarapodott a hóréteg, s vele együtt a hóval borított területek kiterjedése is, a február 5-i 06 UTC-s méréskor az ország kétharmadán 10–32 cm volt jellemző (41. ábra).

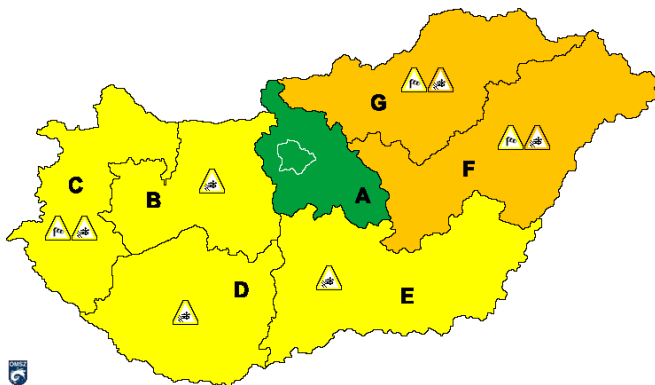


41. ábra: A 2012. február 5-én reggel 7 órakor mért hóvastagság adatok (forrás: OMSZ).

Az erős, időnként viharos szellőkések (42. ábra) hatására főként a Tiszántúlon, Borsod megye keleti részén, illetve a Balaton térségében fordult elő hófűvás.

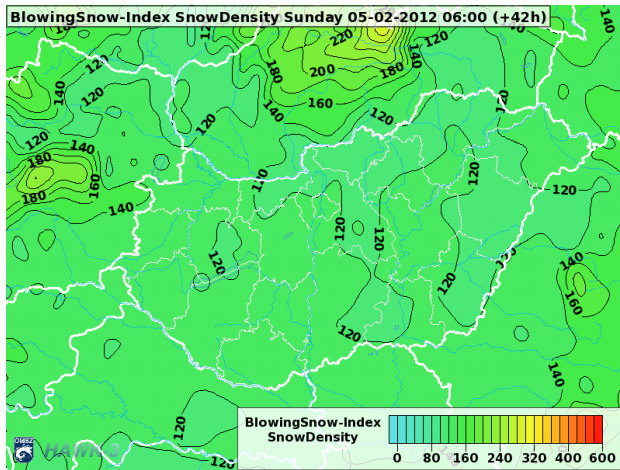


42. ábra: A napi legnagyobb szellőkés értéke 2012. február 4-én (forrás: OMSZ).



43. ábra: 2012. február 4-én 21:58 UTC-kor kiadott riasztás hófűvásra (forrás: OMSZ).

Az OMSZ február 4-én 21:58 UTC-kor az F és G régióra másod-, a C, B, D és E régióra pedig elsőfokú riasztást adott ki (43. ábra). A kiemelt területeken a viharos szél miatt erős hófűvásra és magas hótorlaszokra kellett számítani.

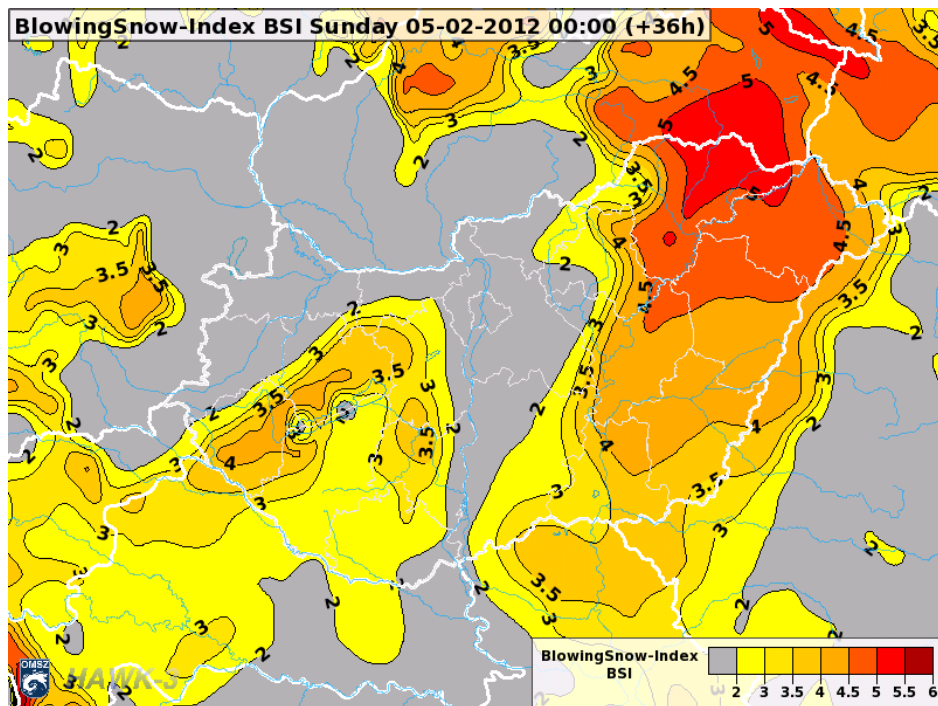


44. ábra: Az ECMWF modell hósűrűség-előrejelzése 2012. február 5-én 06 UTC-re.

Állomásnév	Hósűrűség (kg/m ³)
Békéscsaba	147
Budapest-Lőrinc	129
Debrecen	73
Kékestető	223
Miskolc	72
Pécs-Pogány	112
Siófok	128
Szeged	125

11. táblázat: 2012.02.05-én mért hósűrűség-értékek (forrás: OMSZ).

Az ECMWF modell hőmérséklet-, szél- és széllokés-előrejelzése rendkívül pontos volt, a hóvastagság mértékében azonban 5–10 cm-es eltérés mutatkozott a déli országrészben, de a területi eloszlást ennek ellenére is jól reprezentálta. Ezúttal a hósűrűség mező is teljesen alkalmas volt a prognózis elkészítésére, csupán az extrém alacsony, 100 kg/m³ alatti hósűrűség-értékek esetén (11. táblázat) történt felülbecslés a modellben (44. ábra), mely azonban minimális, legfeljebb 0,1–0,2-nyi eltérést okozott a hósűrűség tag értékében. Mindezek következtében feltételezzük, hogy a BSI az erős hófúvás által a valóságban is leginkább érintett területekre várta a magasabb index-értékeket (45. ábra).



45. ábra: 2012. február 5-én 00 UTC-re szóló hófúvás index előrejelzési térkép.

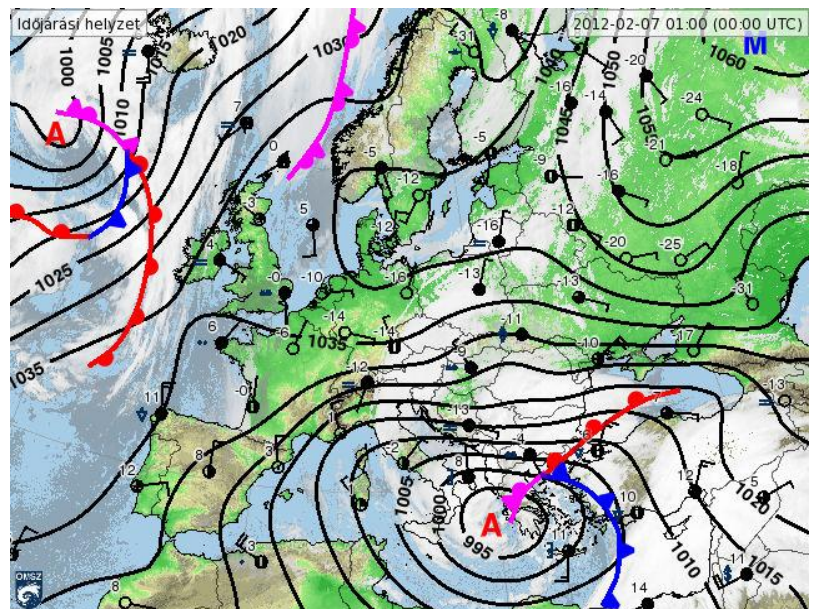
Egyre több útszakasz vált nehezen járhatóvá, vagy megközelíthetetlené Szabolcs-Szatmár-Bereg és Borsod megyében (46. ábra). Ugyanis ebben az időszakban e térségben fordultak elő a legerősebb szellőkések amellet, hogy már 15–20 cm friss porhó fedte a tájat. Ezt követően február 5-én a déli, délutáni órákra már a legtöbb helyen alábbhagyott a szél és átmeneti csapadék-



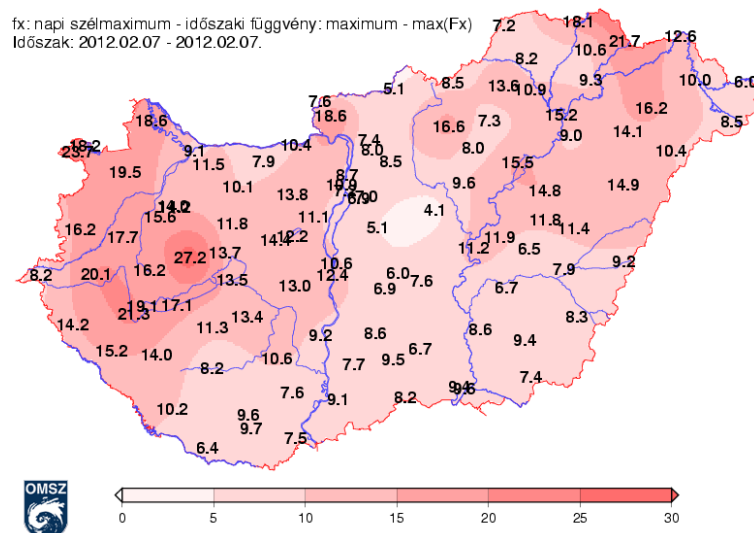
46. ábra: Girincs települést több alkalommal is elzárta a küvilágtól a hófúvás (forrás: MTI).

szünet következett. Február 6-án, hétfő hajnalban egy újabb ciklon érte el Magyarországot, melynek hatására egészen másnap estig folytatódott a zord téli idő (47. ábra).

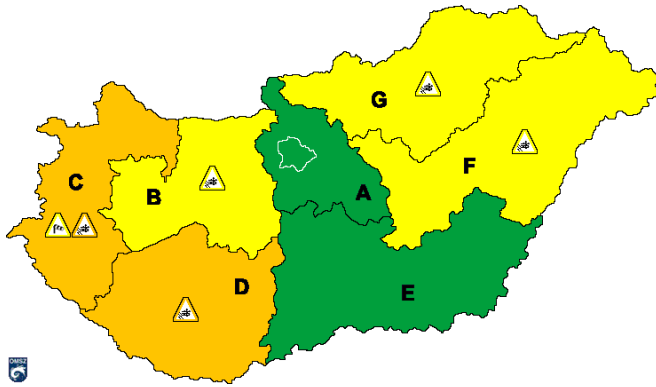
A második mediterrán ciklon csapadékmezeje főként a Dunántúl déli és középső területeit érintette, s ezzel általában 1–10 cm vastag friss hótakaró-többletet okozott. A nyomási eloszlás miatt jobbra a Dunától nyugatra fordultak elő erős, néhol viharos szellőkések (48. ábra).



47. ábra: A 2012. február 7-én 00 UTC-kor jellemző talajszinoptikus állapot (forrás: OMSZ).

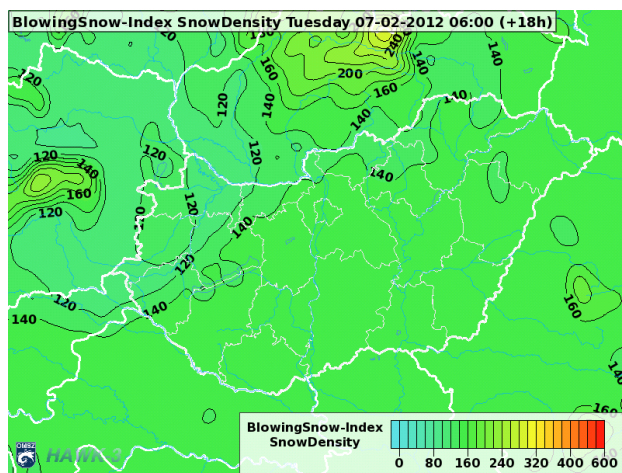


48. ábra: A napi legnagyobb szellőkés értéke 2012. február 7-én (forrás: OMSZ).



49. ábra: 2012. február 7-én 06:02 UTC-kor kiadott riasztás hófúvásra (forrás: OMSZ).

Ezúttal a C és D régiókra került kiadásra a másodfokú, a B, G és F régiókra pedig az elsőfokú riasztás (49. ábra). Az A és E területeken az összeáramlás miatt gyengébb szélsébség volt várható. Erős hófúvás szempontjából viszonylag kis területen voltak optimálisak a feltételek, melyek a Balaton térségére korlátozódtak.

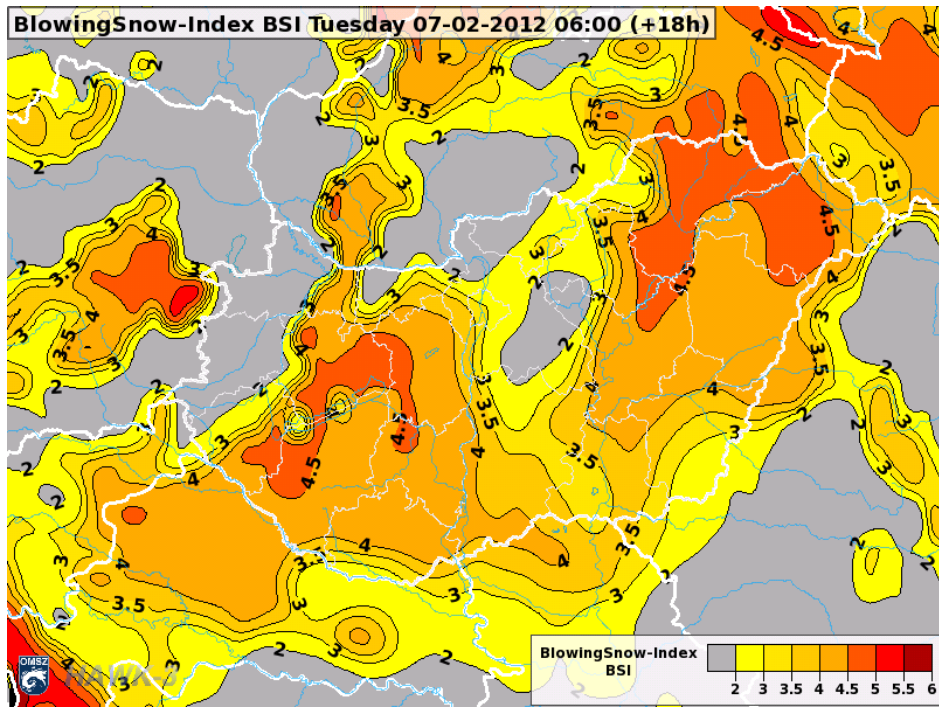


50. ábra: Az ECMWF modell hófúvás-előrejelzése 2012. február 7-én 06 UTC-re.

Állomásnév	Hósűrűség (kg/m ³)
Békéscsaba	182
Budapest-Lőrinc	118
Debrecen	139
Győr-Pér	164
Kékestető	224
Miskolc	43
Pécs-Pogány	95
Sármellék	58
Siófok	182
Szeged	158

12. táblázat: 2012.02.7-én mért hófúvás-értékek (forrás: OMSZ).

Az ECMWF előrejelzése a néhány nappal ezelőttihez képest is pontosabb volt, ezúttal csupán az Alpokalja térségében volt 2–5 cm-es alulbecslés a hóvastagság tekintetében, azonban ez elegendő volt ahhoz, hogy emiatt erre a térségre jóval alacsonyabb értéket adjon a hófúvás index. A hófúvást ezúttal is kielégítő pontossággal jelezte előre a modell (50. ábra), a mérésekhez képest (12. táblázat) általában 0–40 kg/m³-es felülbecslés történt, mely maximum 0,1-es hibát jelent az index értékében. Az index jól jelezte, hogy a legveszélyeztetettebb a Balaton térsége, illetve Magyarország északkeleti része lesz (51. ábra), mely területeken a 10–15 cm-es órétéget időnként viharos széllesek is érték. Az ország középső és délkeleti megyéiben pedig a szélsébség és széllesek alacsony értékei miatt maradt alacsony az index, mely a valóságnak is megfelelt, ugyanis ezen térségekben csupán néhol alakult ki gyenge hófúvás.



51. ábra: 2012. február 7-én 06 UTC-re szóló hófúvás index előrejelzési térkép.

A Magyarországot érintő két mediterrán ciklon főképp a déli, délnyugati országrészben okozott kiadós havazást, valamint az erős, helyenként viharos szellőkések miatt hófúvást. Ezen időszak alatt a zord időjárás és a megnehezedett közlekedési viszonyok miatt Baranya, Békés, Csongrád, Hajdú-Bihar, Jász-Nagykun-Szolnok és Somogy megyében is több oktatási intézményben rendelték el tanítási szünetet. Több tucat út vált járhatatlanná, gépkocsik akadtak el a hóban (52. ábra), vagy csúsztak árokba, összesen pedig 170 baleset történt az utakon, melyből 1 halálos, 7 pedig súlyos kimenetelű volt.

A rossz útviszonyok miatt több települést is elzárt a hófúvás, február 4-én megközelíthetetlené vált Tiszatarján, Hejce, Tiszakeszi, valamint Girincs – utóbbi két alkalommal is, mert a folyamatos élénk, időnként erős szellőkések újból visszahordták az eltakarított havat az úttestre. Jelentős késések alakultak ki a vasúti közlekedésben is, a két évvel ezelőttihez hasonlóan ismét nem jártak a vonatok a Székesfehérvár-Sárbogárd vonalon, ugyanis a szél 1-1,5 méteres hótorlaszokat alakított ki.

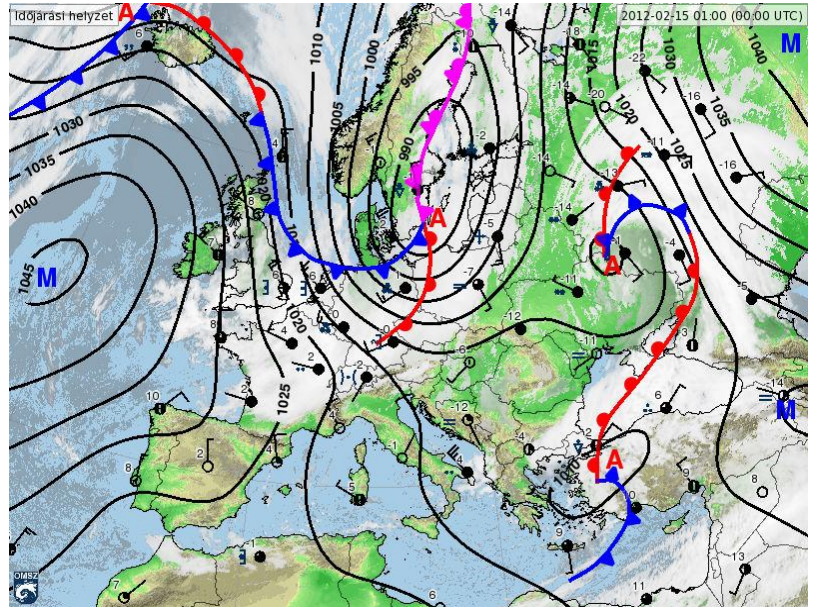


52. ábra: Kamion küzdelme a hófúvással Somogy megyében (forrás: MTI).

5.5 Hófúvás 2012.02.15–16. időszakban

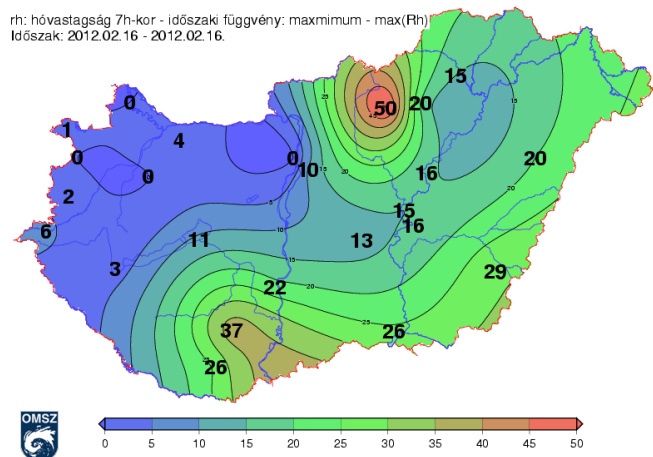
A vizsgált időszakot megelőzően az Európa időjárását meghatározó anticiklon kelet felé húzódott vissza, így az addig Észak-Európa térségéért felelős többközéppontú ciklon kelet felé mozdult el. Az Izlandtól Égei-tengerig húzódó alacsonynyomású zóna hatására északnyugat felől több hullámban nedves és kissé enyhébb levegő érte el a Kárpát-medencét (53. ábra).

Magyarország időjárását egy északnyugat felől fölének helyeződő ciklon és annak frontjai alakították. Február 15-én a közeledő melegfront hatására beborult az ég és eleinte többfelé fordult elő havazás. A jelentősen megnövekvő nyomási gradiens mi-



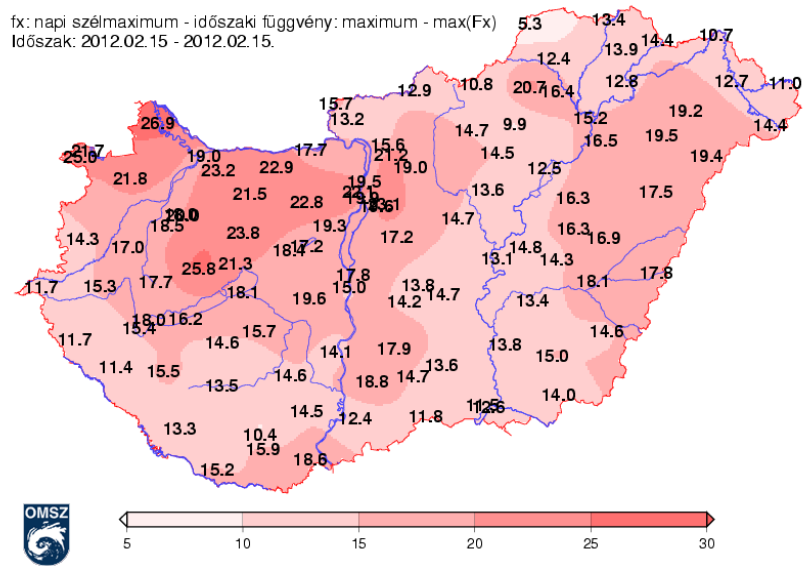
53. ábra: Az európai időjárési helyzet 2012. február 15-én 00 UTC-kor jellemző (forrás: OMSZ).

att feltámadt a szél, így napközben élénk alapszél mellett erős, néhol viharos szellőkések is várhatók voltak. Ezen eset különlegességét jelenti a szélirány, hiszen az előzőleg vizsgált négy időszak mindegyikében északi, északnyugati légmozgás volt jellemző, míg ezúttal az előoldali helyzetnek köszönhetően délnyugati szél fújt. A Tiszántúl kivételével mindenütt fagypont fölötti maximum-hőmérsékletre volt kilátás, mely a frontból hulló és a már meglévő hóra (54. ábra) jelentős hatással volt, így a hó állapota jelentette a legnagyobb bizonytalanságot az előrejelzés során.



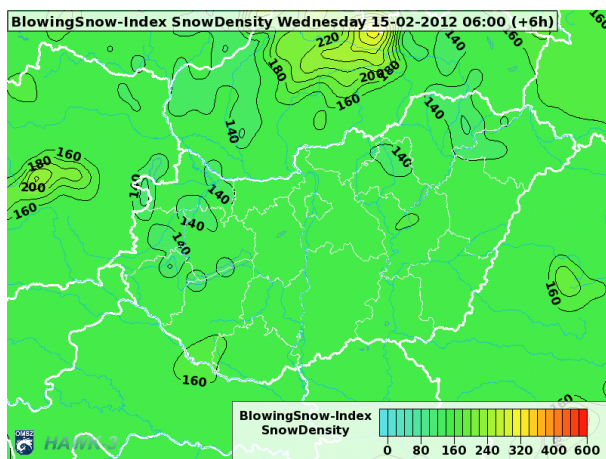
54. ábra: Hóvastagság február 16-án reggel 7 órakor (forrás: OMSZ).

A Dunántúl északi részén 20–25 m/s-os, a Tiszától keletre 15–20 m/s-os szellőkések is előfordultak (55. ábra).



55. ábra: A napi legnagyobb szellőkés értéke 2012. február 15-én (forrás: OMSZ).

Az európai modell jelezte, hogy február 15-én a déli órákig az egész ország területére kiterjedő erős szellőkések délutánra Somogy, Zala és Borsod-Abaúj-Zemplén megyében mérséklődnek. A délnyugat felől beáramló enyhébb levegő miatt Zala és Vas megyében 3–5 °C-ig melegedett a levegő, a maximum-hőmérsékletet az ECMWF előrejelzése ezeken a területeken átlagosan 2 °C-kal alulbecsülte. Hóvastagság szempontjából csupán a Zemplén térségében fordult elő 5 cm körüli negatív eltérés. A hősűrűség (13. táblázat) eltérése pedig egyedül Debrecenre jelentős, 70 kg/m³, mely 0,3-es pozitív eltérést eredményezett az index értékében.

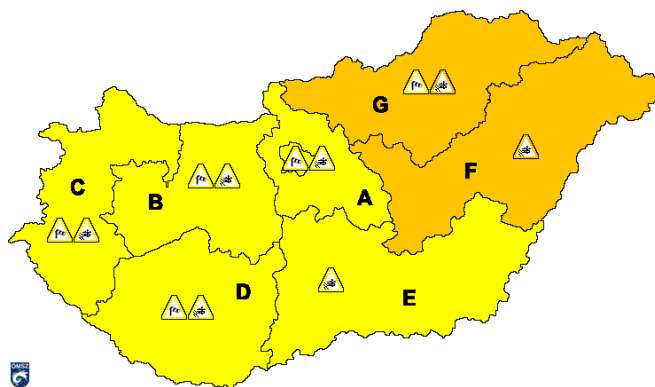


56. ábra: Az ECMWF modell hősűrűség-előrejelzése 2012. február 15-én 06 UTC-re.

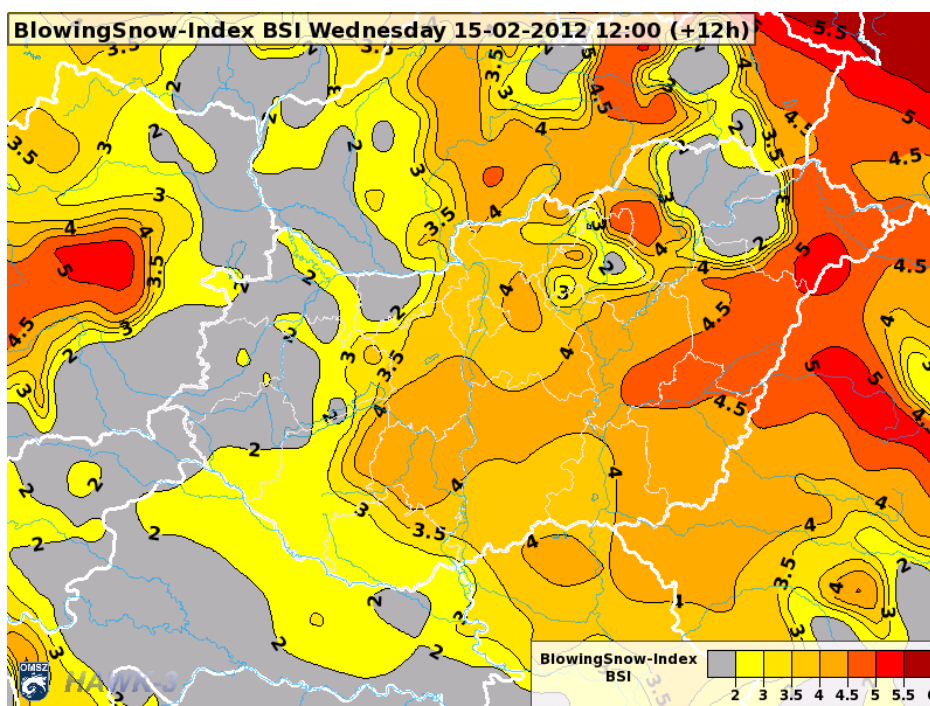
Állomásnév	Hősűrűség (kg/m ³)
Békéscsaba	220
Budapest-Lőrinc	173
Debrecen	226
Kékestető	239
Miskolc	47
Pécs-Pogány	185
Siófok	172
Szeged	176

13. táblázat: 2012.02.15-én mért hősűrűség-értékek (forrás: OMSZ).

Az erős, helyenként viharos nyugati, délnyugati szél főként az Észak-Alföldön és északkeleten okozott hófúvást. Az Országos Meteorológiai Szolgálat február 14-én, 24 órával a legkritikusabb időszak előtt másodfokú figyelmeztető előrejelzést adott ki hófúvásra, melyet 15-én ugyanilyen fokozatú riasztás követett (57. ábra).



57. ábra: Február 15-én 12:27 UTC-kor kiadott riasztási térkép (forrás: OMSZ).



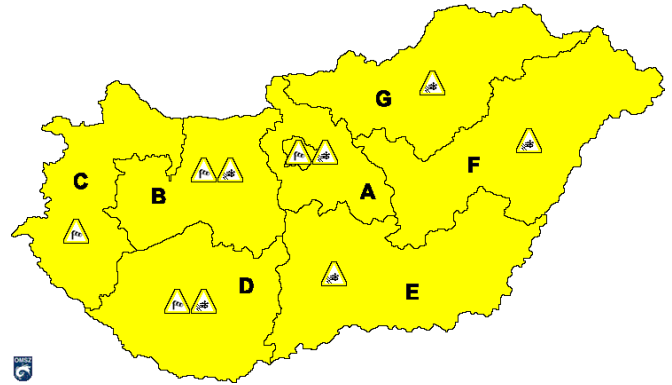
58. ábra: 2012. február 15-én 12 UTC-re szóló hófúvás index előrejelzési térkép.

Az megfigyelések alapján elmondható, hogy a legerősebb hófúvásos észlelések Bács-Kiskun megyéből, a Tiszántúlról, illetve az Északi-középhegység keleti részéről érkeztek. A hófúvás indexhez felhasznált alapmezők közül csupán az említett hóvastagságbeli eltérés okozott hibát, emiatt látható egy 2-es alatti értékekkel rendelkező szürke folt északkeleten. Amennyiben ide is helyes lett volna az előrejelzés, akkor a hófúvás index értéke abban a térségben is 4,3–4,6 közöttinek adódott volna, s még nagyobb egyezés alakult volna ki a riasztott és a magas hófúvás index értékű területek között (58. ábra).

A február 15-i havazás és hófúvás elsősorban a keleti országrészben okozott gondokat az utakon, Debrecen és Tiszalök között fél–másfél méteres hófalakat alakított ki a szél, emiatt hókéket vetettek be a vasúti sínek megtisztításához. Ezúttal nem zárt el egyetlen települést

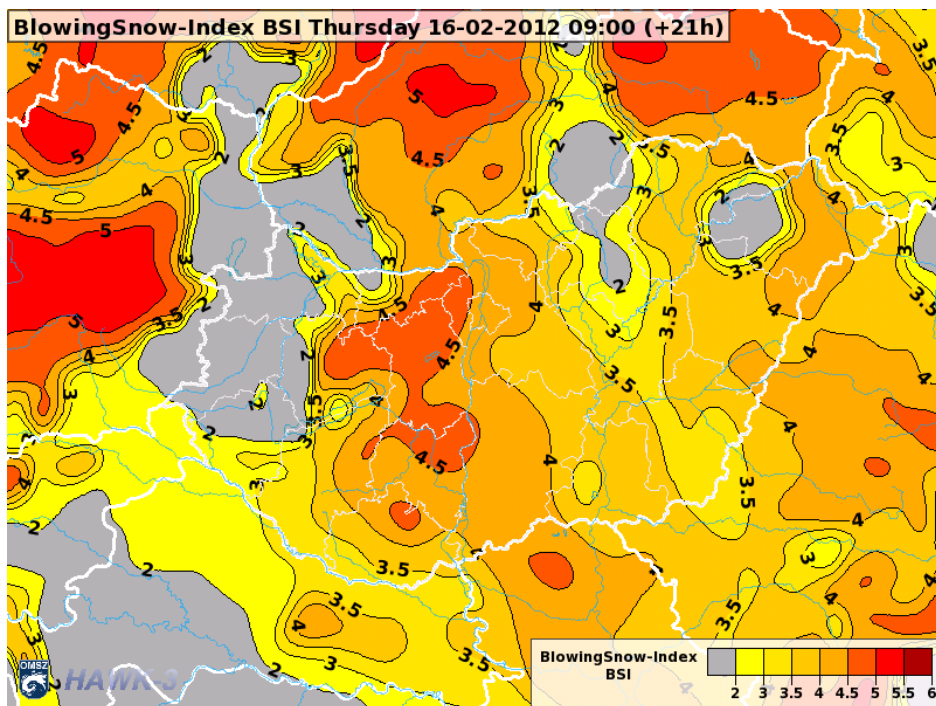
sem a hó a külvilágtól, de nehéz volt a közlekedés Veszprém, Komárom-Esztergom, Heves, Borsod-Abaúj-Zemplén, Szabolcs-Szatmár-Bereg, Hajdú-Bihar és Pest megyében. Székesfehérvár térségében, a Hernád völgyében és a Bodroghözben voltak a legkritikusabb útszakaszok.

Február 15-én délután zivatarok kíséretében áthaladt hazánkon a hidegfront is, így az addig délnyugati irányú szél északnyugatra fordult, a Dunántúlon viharossá fokozódott. Az OMSZ a C régió kivételével elsőfokú riasztást adott ki hófúvásra 03:44 UTC-kor (59. ábra), mely egészen az esti órákig érvényben maradt.



59. ábra: Február 16-án 03:44 UTC-kor szélre és hófúvásra kiadott riasztás (forrás: OMSZ).

Kérdéses volt, hogy a viharos szél képes lehet-e megbontani és hordani a meglévő tömörödött hóréteget, hiszen a Dunántúlon előző napon is történt már olvadás. A február 16-i hósűrűség-mérés eredménye azonban nem mutatta, hogy a meglévő hófelszín túlságosan tömör volna, illetve feltételezhető, hogy csupán a hótakaró legfelső 1–2 cm-es rétegét érte olvadás és újrafagyás. A hófúvás index térkép az előző naphoz képest kisebb hibával volt terhelve, mert bár az északkeleti, hóban szegényebb folt továbbra is megmaradt, ez nem befolyásolta a Dunántúlra vonatkozó mezőt (60. ábra).



60. ábra: 2012. február 16-én 09 UTC-re szóló hófúvás index előrejelzési térkép.

A nap folyamán azonban egyértelműen megmutatkozott, hogy a 20 m/s-os sebességű szellőkéseknek a kismértékű hóállapot-módosulás nem tud akadályt képezni. Bács-Kiskun, Békés, Fejér, Komárom-Esztergom, valamint Tolna megyében több utat le kellett zárni a hófúvás miatt. A 61-es úton árokba borult a Kapos Volán egyik menetrendszerű járata, itt egy ember sérült meg könnyebben. Főként a Duna-Tisza-közének és Baranya megye délkeleti részén épített magas hóakadályokat a szél, de a Fejér megyében szintén 20-nál is több útszakasz volt nehezen járható, illetve 7-et teljesen le is zártak (61. ábra).



61. ábra: Perbálnál (Pest megye) is kritikus időjárási- és útviszonyok uralkodtak (forrás: MTI).

Tucatnyinál is több autó szenvedett balesetet az M7-es autópálya Balaton felé vezető sávjában, itt egy embert kellett kórházba szállítani. Mindezek ismeretében célszerű lett volna a másodfokú riasztás kiadása a közép-dunántúli régióra, hiszen itt nagy területen fordult elő erős hófúvás, mely a közlekedésre is komoly hatással volt. A dél-alföldi, illetve a keleti- és dél-tolnai térségekben is komoly gondokat okozott a szél által szállított hó, itt azonban nem terjedt ki akkora területre a jelenség, így az elsőfokú riasztás helytállónak bizonyult. A hófúvás index segítségével jól körvonalazhatók lettek volna a legkritikusabb területek, melyek a térképen a 4, de főleg a 4,5 feletti tartományba estek.

6. Összefoglalás

A hazánkban előforduló hófúvásos esetek vizsgálatát azért tűztük ki célunknak, mert mindezidáig egyetlen jelentősebb, a témával foglalkozó tanulmány vagy dolgozat sem született. A jelenség kialakulási feltételeinek kritikus tartományáról, prognosztizálási lehetőségeiről kevés ismeretünk van, ezért megköveteli az alapos tudományos elemzést. Az eddigi, tapasztalatok alapján történő előrejelzést reményeink szerint sikerült eredményeinkkel alátámasztani, illetve tovább javítani.

Szegedi expedíciónk során sikerült mérésekkel is alátámasztani azt a tényt, hogy a hófúvás és a hó sűrűsége között igen szoros kapcsolat van. A frissen lehullott, kb. 100 kg/m^3 sűrűségű havat már az 5 m/s -os sebességű szél is könnyen mozgatja, kisebb hóakadályokat is kialakít, nehezítve ezáltal például az utak megtisztítását. Méréseinkből kiderült, hogy változatlan hőmérsékleti körülmények között, csupán a hó súlya miatti tömörödés következményeként is akár 20%-os hósűrűség-növekedés következhet be 24 óra alatt, s ez egybevág azokkal a statisztikai számításokkal is, melyeket az 1996 és 2011 közötti adatbázison elvégeztünk.

Megmutattuk, hogy érdemes volna az észlelővel ellátott állomásokon a jelenleginél gyakrabban, legalább 12 óránként megmérni a hótakaró sűrűségét, hiszen a naponkénti egyszeri mérés túl ritka ahhoz, hogy az előrejelző a reggeli mérésből másnapra vonatkozóan helyes következtetéseket vonhasson le. Ezen kívül segítené az előrejelzést az is, ha a hósűrűség-mérést nem csupán az észlelővel ellátott állomások egy részén végeznék el, hanem az összes főállomáson és a katonai állomásokon is. Erre azért van szükség, mivel például a Duna-Tisza-köze hóállapotának becsléséhez nem áll rendelkezésre közelebbi adat a pécs-pogányi, szegedi vagy budapest-lőrinci megfigyelésnél.

Új paramétereket vontunk be vizsgálatainkba, nevezetesen a felszíni hőmérsékletet, a 10 méteren mért maximális szállókést és a hósűrűséget, s ezeket sikeresen beépítettük a hófúvás előrejelző algoritmusba. A paraméterek sűrűségfüggvénye egy kivétellel normális eloszlású, eloszlásfüggvényük intervallumokra való felosztásával könnyen közelíthetők egyszerű függvények segítségével. A kapott egyenletek jól leírják az adott paraméter hófúvásra gyakorolt hatásának változását, valamint magukban hordozzák a Kárpát-medence klimatológiai sajátosságait. A hófúvás index más országokban való felhasználhatósága elviekben nem ütközik korlátokba, az egyenletekben szereplő együtthatók megalkotásához azonban szükséges az adott térség adatsorának statisztikai feldolgozása.

A hófűvás index hasznossága jelentős mértékben függ a felhasznált előrejelzési modell kezdeti mezőitől, így amennyiben a szél-, valamint a hőmérsékleti értékekhez képest gyengébb megbízhatóságú hóvastagság és hósűrűség jelentősen eltér a valóságban mérttől, akkor a hófűvás index felhasználhatósága korlátozódik, illetve nagyobb figyelmet igényel. Ilyen esetben a kérdéses területekre érdemes kézzel újraszámolni az index értékét, melyhez segítséget nyújt egy erre a célra készített Excel-táblázat, melyben csupán a hat alapvető állapothatározó megadása szükséges. Alkalmazásával megtudhatjuk, hogy jelentős szerepet játszik-e a modell téves előrejelzése az index számítása során.

A dolgozatban részletesen bemutatott öt esettanulmány képet ad a hófűvás index felhasználási lehetőségeiről. Ezek során vizsgáltunk hófűvás szempontjából kedvezőtlen, tapadó havas időjárási helyzetet, egyértelműen kedvezőnek ígérkező porhavas időszakot és bizonytalan kimenetelű, tömörödött hóréteggel fedett, ám viharos szellőkésekkel járó dunántúli esetet is. A vizsgált esetek alapján leszűrhető, hogy a hőmérsékleti és a felszíni hőmérsékleti tag segíti a hófűvás index bevalásának javítását. Ugyanis míg a korábbi években jóval gyengébb minőségű hósűrűség-mezők esélyt adtak volna magas index értékekre, addig az említett két tag jóval pontosabban előrejelzett értékei ellensúlyozták a hóállapot miatti bizonytalanságot. Következésképpen az is látható, hogy amennyiben a hórétegre vonatkozó paraméterek az évek során további javulást mutatnak, akkor a felszíni hőmérsékleti tagot nélkülözni lehet majd. Ettől függetlenül érdemes megvizsgálni a jövőben, hogy mekkora a korreláció mértéke a két hőmérsékleti tag között.

Végezetül a hófűvás index operatív használatához teszünk ajánlást, melyben a riasztási fokozatokat az adott index-értékek területi kiterjedéséhez kötjük. Amennyiben a veszélyeztetett térségben az index értéke meghaladja az ajánlott küszöbértékeket, akkor a riasztást mindenképpen érdemes kiadni:

- *elsőfokú riasztás:* A hófűvás index értéke a vizsgált terület legalább 60%-án 3,5 feletti, valamint minimum 30%-án 4-nél magasabb.
- *másodfokú riasztás:* A hófűvás index értéke a vizsgált terület legalább 60%-án 4 feletti, valamint minimum 20%-án 4,5-nél magasabb.
- *harmadfokú riasztás:* A hófűvás index a vizsgált terület legalább 60%-án 4,5 feletti, valamint minimum 10%-án 5-nél magasabb.

Az ajánlást a vizsgált öt esettanulmány alapján alkottuk meg, ezt később, az esetleges gyakorlati alkalmazás során célszerű ismét megvizsgálni és szükség esetén felülbírálni.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőimnek, Kolláth Kornélnak és Tóth Tamásnak, hogy hasznos tanácsaikkal, türelmükkel és szakértelmükkel az első alkalomtól kezdve a dolgozat leadásáig segítettek munkámat.

Köszönöm belsős konzulensemnek, dr. Pongrácz Ritának, hogy segített a dolgozatom formai követelményeinek elsajátításában és véglegesítésében.

Köszönetet mondok Tóth Jánosnak és Hercsényi Lászlónak, az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársainak az adatbázis összeállításában és lekérésében nyújtott segítségükért.

Köszönöm Ihász Istvánnak, hogy az ECMWF MARS adatbázisból lekérte az esettanulmányokhoz szükséges numerikus időjárás előrejelzési mezőket és rendelkezésemre bocsátotta azokat.

Segítségükért köszönet illeti Breuer Hajnalkát, Gulyás Krisztinát, Gombár Tamást, Havasi Ágneszt, Rajnai Márkot, Sarkadi Norbertet és Szintai Balázst.

Köszönetet mondok a MetNet.hu-nak, Magyarország legnagyobb nonprofit meteorológiai internetes oldalának, hiszen meteorológiai alapismereteim jelentős részét ezen közösség tagjaként szereztem.

Köszönet Szüleimnek és Páromnak türelmükért, bátorításukért és támogatásukért.

Irodalomjegyzék

- Baggaley, D. G., Hanesiak, J. M., 2004: An Empirical Blowing Snow Forecast Technique for the Canadian Arctic and the Prairie Provinces. *Weather & Forecasting*, Vol. 20, pp. 51–62.
- Brandle, J. R., Hodges, L., Zhou, X. H., 2004: Windbreaks in North American Agricultural Systems. *Agroforestry Systems*, 61, pp. 65–78.
- Brandle, J. R., Nickerson, H. D., 1996: Windbreaks for snow management. *University of Nebraska Cooperative Extension*, EC 96-1770-X.
- Déry, S. J., Yau, M. K., 2007: Recent Studies on the Climatology and Modeling of Blowing Snow in the Mackenzie River Basin. *Cold Region Atmospheric and Hydrologic Studies. The Mackenzie GEWEX Experience, Volume 1: Atmospheric Dynamics*, pp. 241–257.
- Dewalle, D. R., Rango, A., 2008: Principles of snow hydrology. *Cambridge University Press*, England, 428 p.
- Domonkos, P., (átdolgozta: Szudár, B.), 1997: Előírás földfelszíni meteorológiai megfigyelésekre. *Országos Meteorológiai Szolgálat kiadványa*. 164 p.
- Goree, P. A., Younkin, R. J., 1966: Synoptic climatology of heavy snowfall over the central and eastern United States. *Monthly Weather Review*, Vol. 94, pp. 663–668.
- Guyomarc'h, G. et al., 2008: Toward an integration of a snowdrift modelling in the operational avalanche forecast. *International Snow Science Workshop*, Centre d' Etudes de la Neige – Meteo-France CNRM. Grenoble, Franciaország, pp. 642–648.
- Hirsch, T., 2000: Synoptic climatological investigation of weather systems causing heavy precipitation in winter in Hungary. *Időjárás*, Vol. 104, pp. 173–196.
- Höller, P., Fromm, R., 2008: Investigations on Snow Hardness as a Measure to Determine Shear Strength. *International Snow Science Workshop 2008, Kanada*, pp. 437–440
- Judson, A., Doesken, N., 2000: Density of Freshly Fallen Snow in the Central Rocky Mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 81, pp. 1577–1587.
- Li, L., Pomeroy J. W., 1996: Estimates of Threshold Wind Speeds for Snow Transport Using Meteorological Data. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 36, pp. 205–213.

- Li, L., Pomeroy J. W., 1997: Probability of occurrence of blowing snow. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, pp. 21955–21964.
- Persson, A., 2011: User guide to ECMWF forecast products. *Meteorological Bulletin M3.2*, ECMWF, 127 p.
- Pomeroy, J. W., Male, D. H., 1988: Optical properties of blowing snow. *Journal of Glaciology*, Vol. 34, pp. 3–10.
- Pomeroy, J. W., 1989: A process-based model of snow drifting. *Annals of Glaciology*, Vol. 13, pp. 237–240.
- Reisz, A., 2005: Magyarországi extrém hideg időszakok szinoptikus meteorológiai feltételei és kapcsolatuk a hótakaróval (1975-2004). Diplomamunka, ELTE TTK
- Roebber, P. J., Bruening, S. L., Schultz, D. M., Cortinas Jr., J. V., 2002: Improving Snowfall Forecasting by Diagnosing Snow Density. *Weather and Forecasting*, Vol. 18, pp. 264–287.
- Scarchilli, C., Frezzotti, M., Grigoni, P., De Silvestri, L., Agnoletto, L., Dolci, S., 2010: Extraordinary blowing snow transport events in East Antarctica. *Climate Dynamics*, Vol. 34, pp. 1195–1206.
- Shea, T., 2008: Blowing Snow Climatology Study. Továbbképző előadás, NWS, La Crosse Weather Forecast Office
- Seres, B. 2010: Narancs riasztás: még lehetnek hófúvások. (<http://www.origo.hu/idojaras/20100213-piros-riasztas-ujabb-meteres-hoakadalyok-varhatok.html>)
- Tabler, R. D., 2003: Controlling Blowing and Drifting Snow with Snow Fences and Road Design. *National Cooperative Highway Research Program, végső jelentés*, 307 p.
- Tóth, K., Kolláth, K., 2009: Wet snow cases 2009, Hungary. *IWAIS konferencia előadás 2009*