

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
METEOROLÓGIA TANSZÉK

Zúzmaraképződés előrejelezhetőségének vizsgálata numerikus modell outputok alapján



Készítette:
Tóth Katalin

Témavezetők:

Kolláth Kornél (Országos Meteorológiai Szolgálat)

Molnár László (Országos Meteorológiai Szolgálat)

Tanszéki konzulens:

Dr. Gyuró György (ELTE Meteorológia Tanszék)

Budapest, 2007.

Tartalomjegyzék

1. Bevezető	3
2. Szakirodalmi kitekintés	5
3. Zúzmaramérő műszerek	7
4. A zúzmaraképződés szinoptikus-klimatológiai feltételei hazánkban.....	9
5. Zúzmaralerakódás tömegének becslése.....	11
6. Az ECMWF által futtatott modell és parametrizációs eljárás	13
6.1 Az ECMWF parametrizációs eljárása	13
7. ERA40 adatbázis alapján készült vizsgálat	16
7.1. Adatok előkészítése	16
7.2 Szeged és Kékestető állomásokra vonatkozó eredmények összehasonlító elemzése	18
7.2.1 Szeged-Kékestető eredményeinek összehasonlítása relatív nedvesség küszöbértékek mellett.....	20
7.2.2 Szeged-Kékestető eredményeinek összehasonlítása 20 mg/kg CLWC küszöbértékek mellett.....	23
7.2.3 Szeged-Kékestető eredményeinek összehasonlítása 50 mg/kg CLWC küszöbérték mellett.....	26
9. MM5 időjárás előrejelző modell	29
10. 2006. december 27-28.-i események elemzése	31
11. 2003. január 13-23-i események elemzése	43
12. Összefoglalás	61
13. További terveink.....	63
Köszönetnyilvánítás	64
Irodalomjegyzék	65
Függelék	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
I.melléklet	68
II.melléklet.....	71

1. Bevezető

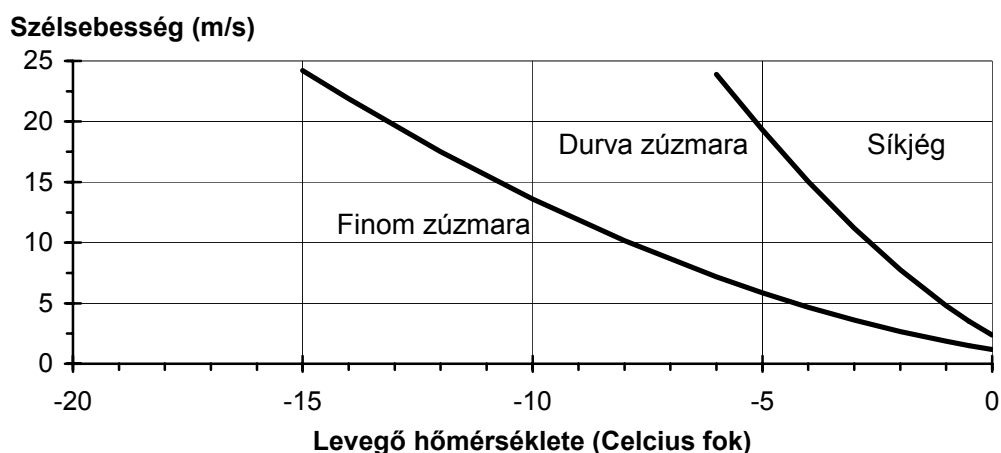
A légköri jegesedés megismerésének és előrejelzésének mind a felszínközeli rétegben, mind a magasabb légrétegekben nagy gyakorlati jelentősége van mindenekelőtt a közlekedés, főleg a légi közlekedés, a szélerőművek, az agrárkultúra és számos más terület számára. Ezen tény ellenére kis figyelmet fordítottak a légköri jegesedés megfigyelésére a múlt század 20-as éveinek végéig, az előrejelzést nem is említve. Azonban a légi közlekedés fejlődése magával hozta a kutatás szükségszerűségét és fontosságát. Mára széleskörű és nagy költségvetésű kutatások folynak ebben a témában, hiszen egyre több helyen épülnek több száz tagból álló szélerőműparkok, egyre több magaslaton láthatunk antennatornyokat, és egyre jobban befedik az országokat elektromos távvezeték-hálózatok. Ezen építmények megrongálódásáért gyakran felelős a téli félévben a lerakódott jég, tapadó hó vagy zúzmara óriási tömege.

Ahhoz, hogy a feladat fontosságát és aktualitását megvilágítsuk, először a felszíni jegesedést, és a mai szinoptikus gyakorlatban történő előrejelzési módszereket kell áttekinteni.

Felszíni jegesedés alatt értünk minden olyan esetet, amikor a felszín tereptárgyain mikro- vagy makrocseppek által jeges lerakódás képződik. Ide sorolhatjuk tehát a zúzmarát, ónos esőt, és a tapadó havat. A légköri jegesedést hagyományosan kétféle képződési folyamat alapján osztályozzák: 1. felhőn belüli jegesedés, 2. csapadékból származó jegesedés (1. táblázat).

Jegesedés típusa	Levegő hőmérséklet[C]	Szél-sebesség [m/s]	Csepp-méret	Víztartalom levegőben	Karakterisztikus idő	Sűrűség [kg/m ³]
Csapadékból származó jegesedés						
Ónos eső/szitalás	~ 0	nem játszik szerepet	nagy	közepes	pár óra	900
Tapadó hó	0<t<3	nem játszik szerepet	hópelyhek	nagyon magas	pár óra	300 - 600
Felhőn belüli jegesedés						
Síkjég	ld.1.ábra	ld.1.ábra	közepes	magas	pár óra	900
Durva zúzmara	ld. 1.ábra	ld. 1.ábra	közepes	közepes	napok	600 - 900
Finom zúzmara	ld.1.ábra	ld.1.ábra	kicsi	alacsony	napok	200 - 600

1. táblázat: A lerakódott jég tipikus fajtái és tulajdonságai



1. ábra: A lerakódott jég típusa a szélsebesség és levegőhőmérséklet függvényében

Ebben a dolgozatban a zúzmarás helyzetek előrejelezhetőségével fogunk foglalkozni numerikus modellek outputjai alapján.

A hazai gyakorlatban az előrejelző szakember számára ma még nem áll rendelkezésre olyan közvetlenül felhasználható információ, ami a zúzmara kialakulásának lehetőségét megadná és legfőképp a zúzmarateher nagyságát megbecsülné. Az előrejelző jelenleg inkább csak szakmai tudására és tapasztalatára támaszkodhat ebben az esetben. Új kihívást jelent tehát, hogy a jelenleg már részletes mikrofizikai leírást alkalmazó numerikus modellekből a felszíni jegesedés típusára és intenzitására vonatkozó produktumokat állítsunk elő.

A dolgozatban a jegesedés többféle formája közül kifejezetten a zúzmarára fókuszálva az ECMWF és az MM5 numerikus modellek előrejelzéseinek használhatóságát vizsgáljuk. Bevezető munkaként 4 év téli periódusa alapján két kiválasztott állomásra (esetünkben Szeged és Kékestető) összehasonlítjuk a túlhűlt felhőzet jelenlétére utaló paraméteregyüttest a valóságban és az ECMWF reanalízisében (ezt, mint jó minőségű előrejelzést tekintettük). Másrészt esettanulmányokon keresztül az ECMWF peremfeltételekkel futtatott MM5 modell eredményeit vizsgáljuk meg. Esetünkben tehát az egyébként igen finom térbeli felbontással futtatott MM5 eredményei az ECMWF dinamikus leskalázásának tekinthetők.

2. Szakirodalmi kitekintés

Széleskörű nemzetközi szakirodalom található a jegesedés témakörében, de nagyobb részük csak a repülőgépes veszélyeztetés oldaláról közelíti meg a problémát.

Több referenciát találhatunk a felszíni, határrétegbeni jeges lerakódások előrejelzésének gyakorlatáról. A mérési és előrejelzési módszereket, valamint a klimatológiát jól összegzi a COST 727-es akció kiadványa: Atmospheric Icing on Structures, Measurements and data collection on icing (Fikke et al., 2007.). Ebben tájékoztatást kapunk a programban részt vevő országok által kifejlesztett, illetve használt zúzomarmérő műszerekről, amelyek között találunk manuális és automata műszereket is. Részletes leírást találhatunk a műszerek kalibrálásáról, a leggyakrabban felmerülő műszaki problémákról és nem utolsósorban hatékonyságukról.

Számos mérnöki megközelítésű dokumentum, illetve könyv látott napvilágot. Meg kell említeni az „Atmospheric Icing of Structures” című ISO dokumentumot, illetve az „Ice and Snow Accretion on Structures” című, a szakirodalom talán legrészletesebb könyvét. Ezek segítséget nyújtanak különböző, az időjárásnak kitett eszközök (szélerőmű, távközlési tornyokra helyezett antennák, elektromos vezetékek stb.) tervezéséhez, karbantartásához. Sajnos ezek a modellek a szinoptikus gyakorlatban közvetlenül nem alkalmazhatóak.

Egy rendkívül széleskörű összefoglaló munka az Atmospheric Icing and Meteorological Variabls - Full scale experiment and testing of models (Magne A. Drage, PhD dolgozat, 2005.) MM5 modellel készített futtatások tesztelése, verifikációja található meg a munkában különböző földrajzi adottságokkal rendelkező területeken (pl. hegyvidéken, sarkvidék parti területén).

Jegesedés modellezéséről rövid, összefoglaló cikkeket Makkonen-től találunk (2000.: Models for growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures ; 2005.: Fifty Years of Progress in Modelling the Accumulation of Atmospheric Ice on Power Network Equipment). A 2005-ben megjelent, fent említett cikkében jól összegzi az író a jegesedés előrejelzésére tett kísérleteket az elmúlt 50 év során.

A 20. században két szakasz különíthető el a modellek fejlődésének történetében (Makkonen, 2005.). Az első szakasz analitikai modellekből állt, amit egyszerű egyenletek fejeztek ki. Ezeket kézzel vagy számológéppel is meg lehetett volna oldani. Ezen modellek erős feltételeket, egyszerűsítéseket alkalmaztak a jegesedés előrejelzésének természete

miatt. A cél az volt, hogy megjósolják a lerakódó jég tulajdonságait, úgymint a jég súlya, vagy sűrűsége. Ezek a modellek még nem tartalmazták a jegesedési folyamat részleteit. A második szakasz egyszerű numerikus modellek kifejlesztésével kezdődött 1980 körül. Az úttörő munka Dr. L. Makkonen és Prof. E. P. Lozowski nevéhez fűződik. Ők olyan új modelleket fejlesztettek ki, amelyekben már igyekeztek figyelembe venni a jegesedés folyamatának fizikai részleteit is.

Hazánkban már az 1950-es években foglalkoztak a jegesedés problémájával a villamos szabadvezetékek rongálódása és ennek következtében a már akkor is nélkülözhetetlen energiaszolgáltatás szünetelése miatt (Ronkay Ferenc, 1955.). Viszont az úttörői munka Csomor Mihály nevéhez köthető, aki munkatársaival létrehozta a ma is használatban lévő zúzmaramérő műszert és hálózatot 1966-ban. Az ő munkásságáról tesz tanúbizonyságot számos cikk, amelyek a Léggör illetve az Időjárás című folyóiratokban jelentek meg az 1960-as évek végétől az 1980-as évek közepéig. Több írásában a zúzmara megfigyelésének és mérésének fontosságára hívja fel a figyelmet (1966. Léggör, 1968. Léggör, 1972. Léggör, 1975. Léggör, 1979. Léggör). Kutatásai nem csak a zúzmara megfigyelésére és mérésére korlátozódtak. Vizsgálta a zúzmara képződése után kialakuló klimatikus viszonyokat (1982. Léggör), a lerakódások meteorológiai folyamatát és hatását a távvezetésekre (1983. Léggör). 1984-ben jelent meg a Léggörben a zúzmara akkumulált tömegének várható értékéről szóló cikke.

Csomor Mihály mellett meg kell említeni Otta Endréné munkásságát is. Kutatásai szerint a zúzmaraképződés annál erősebb, minél jelentősebb az előtte bekövetkezett lehülés, és ha az érkező levegő hőmérséklete fagypontra kerül, vagy az alatt van (1953.).

Lambert Károly végzett még ehhez a témához kapcsolódó kutatásokat. Megvizsgálta 20 zúzmaramérő állomás 10 éves adatsorát (1970/71-1979/80). Bevezette a „zúzmarás nap” fogalmát: azok a napok, amelyen valamely terület állomásainak legalább 50%-án észleltek zúzmarakerakódást. Munkája során meghatározta, hogy a zúzmarás napok milyen típusba sorolhatók a Péczely-féle makroszinoptikus helyzetek alapján (1983.).

Jelenleg a hazai gyakorlatban a túlhűlt köd előrejelzésére egy látástávolság algoritmust hívnak segítségül (Wantuch Ferenc, 1995). Az OMSZ-nál alkalmazott automatikus numerikus prognózisban „zúzmarás köd” jelenik meg, ha a látástávolság 1000m alatt, a hőmérséklet pedig 0°C alatt várható. De annak előrejelzésére, hogy ténylegesen lesz-e zúzmara, hol várható és mekkora a lerakódás mértéke, a program nem alkalmas.

3. Zúzmaramérő műszerek

A szárazföldi méréseknél a jeges lerakódások paramétereit kézzel regisztrálták (lerakódás tömege, vastagsága...stb.). A kisszámú megfigyelés és a bizonytalanság nagy foka nem volt kielégítő a megfelelő kutatásokhoz. Ennek köszönhetően a légköri jegesedés mérésének új technikáit fejlesztették ki (Poots, 2000.).

Az első műszerek hengeres tárgyak voltak, mint pl. az acélhenger vagy a horizontális vezetékek. Kutatók a volt Szovjetunióban egy horizontális vezetékekből álló rendszert hoztak létre (Nikforov, 1969.). Ezalatt Európában főleg az ún. „Grunow hálót” alkalmazták (Grunow és Toller, 1969.). A Grunow háló a vezetékek egy olyan elrendezése, amit gyakran a csapadékmérő műszer fölé telepítettek, hogy a vezetékről leolvadó jég mennyiségét regisztrálják. Eközben egy máig jól ismert módszert dolgoztak ki a folyékony felhővíz mennyiség és az átlagos csepp átmérő becslésére: ez a forgó multicilinderes módszer (Makkonen és Stallaabas, 1987, Finstad et al. 1988.).

A 2001-ben megjelent nemzetközi standard dokumentum (ISO 12494, Atmospheric Icing on Structures, 2001) ad először javaslatot a jeges lerakódások mérésének egységesítésére. A standard műszer egy 30 mm átmérőjű henger, ami lassan forog egy vertikális tengely körül. A rúd hossza 1 m, és a felszín felett 10 m magasságban kell elhelyezni.

Az egységesítés ellenére is sokféle módszert használnak Európa szerte. Ezért fontosnak találtam kitekintést adni néhány európai országra. A következőkben röviden bemutatjuk az egyes országokban használt műszerek, mérési módszerek néhány paraméterét (Fikke et al, 2007.):

1. Magyarország:

Állomások száma: 17 (2007)

Detektor: a magyarországi zúzmaramérés Csomor Mihály (1966.) nevéhez fűződik. Ő készítette el a ma is használatban lévő műszert: 4 db, közös állványon elhelyezett, 1 m hosszú távvezeték-darab. Átmérőjük **30** mm. A 4 mintavezeték közül kettő az észak-déli, kettő pedig a kelet-nyugati irányra áll merőlegesen a felszín felett 2 m magasságban (Kakas József, 1975.)

2. Finnország:

Állomások száma: 4

Detektor: Labko Ice Detektor 3200 és 3500 verzió

Mérőműszerek telepítése: 1998-1999.

Mérések 10 perces átlagolással történnek, minimumot, maximumot és eltérést regisztrálnak.

3. Németország:

Állomások száma: 5

Detektor: EAG 200

Mérőműszerek telepítése: 1991 után

Mérési eljárás: a műszereket minden reggel 8:30-kor kihelyezik 2 méteres magasságban, majd 24 óra elteltével kicserélik. Mérik a jég tömegét, átmérőjét, lerakódás irányát és típusát. Ma már csak 3 állomáson végzik ezt a standard eljárást, és már 10m, 50m, 90m magasságban mérnek.

4. Cseh Köztársaság:

Állomások száma: 15

Detektor: i. : vertikális rúd (hossza 0,5 m, átmérő 30mm, magasság: 5,10,20,30,40,50 m)

ii. : horizontális rúd (hossza 1 m, átmérő 30mm, magasság: 10,30 m)

iii. : Meteo Device (10 m magasságban)

Mérőműszerek telepítése: 1997-2001 között

A műszerek digitálisan működnek az állomásokon, a jég tömegét mérik.

5. Szlovák Köztársaság:

Állomások száma: 13

Detektor: 2 egymásra merőleges fa ruddal (É-D és K-Ny irányítottsággal)

Mérőműszerek telepítése: 1957-1976.

A farudak átmérője 32 mm, hossza 1 m. Naponta 3-szor mérnek: 7, 14 és 21 UTC-kor. A lerakódott jég mennyiségét mérik.

6. Norvégia:

Állomások száma: 16

Detektor: 5 méter magas oszlopok (manuális műszer)

Mérőműszerek telepítése: 1970-es évek után

A mérőműszereket a Statnet energiaszolgáltató cég telepítette és ők végzik a működtetésüket is, mivel távvezetékeik nagy része a tengerparti területekről a hegyvidéken átvezet, ahol gyakoriak a nagymértékű, veszélyes lerakódások.

7. Egyesült Királyság:

Állomások száma: 3 (csak a tesztállomások)

Detektor: Upas (átmérő 24,7 mm) Deadwater Fell

Lynx (átmérő 19,5 mm) Susseter Hill (Shetland) és Green Lowhter (Scotland)

A műszereket 550-750 m magasságban, hegyvidéki területen helyezték el. A felsővezetékek teszt feszítávolságai: 90-200m.

4. A zúzmaraképződés szinoptikus-klimatológiai feltételei hazánkban

Hazánk éghajlata alatt a zúzmaraképződés leggyakrabban december és január hónapban fordul elő (Otta Endréné, 1953.). Ahhoz, hogy zúzmaraképződés induljon meg, bizonyos feltételeknek teljesülnie kell. Ezek a következők:

1. 0°C alatti tárgyak jelenléte
2. köd/felhő kialakulása
3. szél

A téli időszakban hazánkba érkező hideg léghullámok, valamint az utána kialakuló anticiklonális helyzet a levegő, a talaj és a tereptárgyak hőmérsékletét is fagypontra alá

csökkenti. Ha az áramlás megfordulása után a hideg levegőt enyhébb, vízgőzben gazdag légtömegek váltják fel, és a lehűlt terület fölé érnek, elérve harmatpontjukat kicsapódnak. Túlhűlt felhő, köd képződik. A felszín tereptárgyaival érintkezésbe lépve a ködcseppek azokra kicsapódnak, és bevonatot képeznek. Kialakul a zúzmara (Otta Endréné, 1953.).

„Zúzmarás napnak” nevezzük azokat a napokat, amikor egy meghatározott terület állomásainak legalább 50%-án megfigyeltek lerakódást (Lambert Károly, 1983.).

A Péczely-féle makroszinoptikus helyzetek alapján is csoportosíthatók a zúzmaraképződésnek kedvező helyzetek (Lambert Károly, 1983.)

Országosan leggyakoribb az „Ae” helyzet. Ekkor a Kárpát-medencétől keletre, nagyrészt Ukrajna felett anticiklon helyezkedik el, így hazánk felett az izobárok közel meridionálisan futnak déli-délkeleti irányú szelet eredményezve.

Második leggyakoribb helyzet az „An”. Ekkor az anticiklon a Kárpátoktól északra kerül el. A keletről áramló hideg, száraz levegő keveredve a Kárpát-medencében lévő enyhébb, nedvesebb levegővel zúzmaraképződésre alkalmas feltételeket teremt. A Dunántúlon a zúzmarás napok 28%-a, a keleti országrészben 18%-a ebből a helyzetből adódik

Kedvező feltételeket biztosít az „A” helyzet is, amikor az anticiklon magja a Kárpát-medence felett van. Ebben az esetben nincs jellegzetes áramlási kép, a szél sebessége az ország egész területén csekély, vagy szélségsend uralkodik. Ekkor kisugárzási köd képződik, ami a finom zúzmara kialakulásának kedvez.

Vannak olyan szituációk is, amikor csak a magasabb dombvidékeken, hegyvidékeken alakul ki zúzmara. Ez legfőképpen a „CMw” helyzetben fordul elő. Ekkor a Földközi-tenger medencéjében képződött ciklon hazánkban déli-délnyugati áramlási mezőt hoz létre, ami enyhe, nedves levegőt szállít. A melegadvekciónak miatt a síkvidék felett a hőmérséklet fagypontra emelkedik, a 0 fokos izoterma a tengerszint feletti néhány 100 méteres magasságban található. Emiatt a magasabban fekvő területek az alacsonyan húzódó melegfronti felhőzetbe lógnak. A kedvező feltételek miatt durva zúzmara kialakulására van lehetőség.

5. Zúzmaralerekódás tömegének becslése

Azokon a területeken, ahol a durva légköri jegesedés gyakori, az építmények, távvezetékek megrongálódásának veszélye jelentős. A lerakódás tömege mellett az építmény megnövekedett légellenállása is veszélyforrás, mivel megnövekedett a szélnek kitett felülete.

A jegesedés mértéke azonban nem csak a meteorológiai paraméterek alakulásától függ, hanem a jegesedő tárgy tulajdonságaitól is, mint például az alakjától, méretétől, orientációjától,...stb. A lerakódás mértékének meghatározására a szakirodalomban több egyenletet is találhatunk, amelyek csak kis mértékben térnek el egymástól. A jegesedés folyamatait legrészletesebben magába foglaló képletet Makkonen (2000.) cikkében találhatjuk:

$$dM/dt = \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \omega * v * A$$

A: tárgy felülete (m²)

v: sebesség vektor (m/s)

ω : hidrometeorok tömegkoncentráció (kg/m³)

dM/dt: lerakódott jég tömegének időbeli változása (kg/s)

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: korrekciós együttható

α_1 : ütközési együttható: [0,1] közé eső arányszám, a cseppek teljes számának azon része, ami a tárgy útjába esik, és ténylegesen ütközik is vele

α_2 : tapadási együttható: [0,1] közé eső arányszám, az ütköző cseppek azon része, amelyek hozzá is tapadnak a tárgyhöz.

α_3 : növekedési együttható: [0,1] közé eső arányszám, a tapadó cseppek azon része, amelyek hozzáfagynak a tárgyhöz, a többi lefolyik.

Azonban ahhoz, hogy ezt a képletet fel tudjuk használni, tudni kell az egyes együtthatók értékeit, melyek becslése a gyakorlatban körülményes (az említett cikkben részletesen megtalálhatóak a különböző együtthatók becslésére vonatkozó képletek). Emiatt az egyenlet egyszerűsített változatai jelentek meg. A szakirodalomban említett képletek a következők:

1. $dM/dt = \alpha_1 * q_{clw} * A * v$ (Drage, 2005.)

q_{clw} : levegő folyékony víztartalma [kg/kg]

v : szélesség [m/s]

A : jegesedő tárgy szélnek kitett területe [m²]

α_1 : ütközési együttható. arányszám, a cseppek teljes számának azon része, ami a tárgy útjába esik, és ténylegesen ütközik is vele.

dM/dt : lerakódott jég tömegének időbeli változása [kg/s]

2. $M_z = 0,048 * a_z * v_z * t_z$ ha $T_z < 0$ °C (Tammelin, 1998.)

M_z : zúzmaralerakódás intenzitása z magasságban [kgm⁻²]

a_z : felhők relatív mennyisége z magasságban [%]

v_z : szélesség z magasságban [ms⁻¹]

T_z : levegő hőmérséklete [°C]

t_z : zúzmaralerakódás időtartama a felhőmegfigyelések alapján [óra]

0,048: empirikus konstans

3. $M_i = 0,11 * v * \tau_i$ (Ahti, 2005.)

v : átlagos szélesség 10 m magasságban [ms⁻¹]

τ_i : zúzmaralerakódás időtartama [óra]

0,11 : empirikus konstans

Az eredmény megadható kg/m –ben, ha az M_i –t megszorozzuk a tárgy átmérőjével (m-ben megadva).

6. Az ECMWF által futtatott modell és parametrizációs eljárás

Az ECMWF (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), vagyis az Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ egy független nemzetközi szervezet, 26 európai állam együttműködése, melyben Magyarország társult tag. Az ECMWF eredetileg egy COST (European Co-operation in Science and Technology) projekt volt. A Központot 1975-ben alapították, az első valós idejű, középtávú előrejelzéseket pedig 1979 júniusában készítették. 1979. augusztus 1-jétől állnak rendelkezésre a felhasználók számára operatív középtávú időjárás előrejelzések.

Felmerült annak az ötlete, hogy konzisztens analízisek sorozatait hozzák létre klimatológiai vizsgálatokhoz. Létrejött az ERA-40 adatbázis, ami az 1957 és 2002 közötti időszakra vonatkozó reanalízis.

6.1 Az ECMWF parametrizációs eljárása

A fizikai folyamatok, amelyek kapcsolatban vannak a sugárzásátvitellel, a turbulens keveredéssel, a ráctávolságnál kisebb méretű orografikus akadállyal, nedvességkonvekcióval, felhőfizikai és felszínközeli folyamatokkal, hatással vannak a légkör nagyskálájú áramlására. Azonban ezek a folyamatok gyakran a horizontális rácsnál kisebb skálájúak, és azért, hogy az atmoszféra áramlásaira kifejtett hatásaikat le lehessen írni, parametrizációs módszerekre van szükség. Más szóval e folyamatok együttes hatásának meg kell jelennie az adott rács változóinak tagjaiban.

Az előrejelezni kívánt időjárási paramétereket (2m-es hőmérséklet, csapadék, felhőborítottság) a modell fizikai parametrizációt elvégző része számolja ki. Ezután explicit dinamikai számításokat hajt végre minden időlépcsőre. A fizika számára bemenő információ tartalmazza a fő prognosztikai változók értékeit (szélkomponensek, hőmérséklet, specifikus nedvesség, folyékony víztartalom és felhőmennyiség), tartalmaz még ugyanezen változóra vonatkozóan dinamikai tendenciákat és különböző felszíni mezőket. A prognosztikai változók értékét korrigálni kell, és a következő időlépcsőben már ezzel a korrigált értékkel számol a modell. Ezt a műveletet minden lépésben megismétli.

A felhő és folyékony víztartalom parametrizációjához két prognosztikai egyenletet kell megoldani. A felhőséma a felhők kialakulását írja le cumulus konvekció és sztratiform felhők képződése által. A modell számításba vesz még számos fontos felhőfizikai folyamatot, mint például a felhőtetőn történő bekeveredés, a csapadék párolgása, valamint megkülönbözteti a szilárd és folyékony halmazállapotú csapadékot. Azokat a tagokat, amelyek lineárisan függnek a folyékony felhővíz-tartalomtól (CLWC-től) és a felhőborítottságtól, analitikusan integrálja a modell. A felhőséma minden prognosztikai változó tendenciáját megadja.

A következő két egyenletet kell megoldani:

$$\frac{\partial l}{\partial t} = A(l) + S_{conv} + S_{bl} + S_{strat} - E_{cld} - G_{prec} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho \overline{w'l'})_{entr} \quad (1.)$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = A(a) + \delta a_{conv} + \delta a_{bl} + \delta a_{strat} - \delta a_{evap} \quad (2.)$$

l: egy rácstérfogatra átlagolt specifikus felhővíz és -jég tartalom. Definíciója:

$$l = \frac{1}{V} \int_V \frac{\rho_w}{\rho} dV \quad (3.)$$

a: egy rácstérfogat felhőborított része. Definíciója:

$$a = \frac{1}{V} \int_V \delta dV, \quad \delta = \begin{cases} 1, & \text{in clouds} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.)$$

A tagok jelentése az (1.) és (2.) egyenletben:

- A(l) és A(a): felhővíz/jég és felhőterület advektív transzportja a rácstérfogat határain keresztül
- S_{conv}, δa_{conv}: felhővíz/jég és felhővel borított terület kialakulása konvektív folyamatok során
- S_{bl}, δa_{bl}: felhővíz/jég és felhővel borított terület kialakulása határrétegbeli turbulencia által
- S_{strat}, δa_{strat}: felhővíz/jég és felhővel borított terület kialakulása sztratiform kondenzációs folyamatok során
- E_{cld}: felhővíz/jég párolgásának mértéke
- G_{prec}: csapadék képződése felhővíz/jégből. A modell szétválasztja tisztán jégfelhőkre, illetve kevert fázisú és tisztán vízfelhőkre a csapadék forrását.

- $(1/\rho)\partial(\rho\overline{w'T'})_{\text{conv}}/\partial z$: felhővíz/jég disszipációja a felhőtetőn történő bekeveredés miatt. Ezt a parametrizációt csak akkor használják, ha a felhővel borított szint feletti szint teljesen felhőmentes, vagy stabil légrétegződés esetén
- δa_{evap} : a felhőterület csökkenésének mértéke párolgás miatt. Két tag összegeként áll elő: {felhőlevegő turbulens keveredése telítetlen környezeti levegővel} + {diabatikus hűlés}

A tagok jelentése a (3.) és (4.) egyenletben:

- ζ_w : felhővíz sűrűsége
- ζ : nedves levegő sűrűsége
- V : egy rácscella térfogata

A számítások elvégzéséhez a következő lépéseket kell megtenni:

1. szakasz: kezdeti input értékek számolása
2. szakasz: setup – a kezdeti beállítások a következők megadásával:
 - q_{sat} : telítési specifikus nedvesség
 - tropopauza magassága (egy kritikus relatív nedvességből határozva meg)
3. szakasz: források és nyelők
 - konvektív forrás tagok (S_{conv} , δa_{conv} kiszámolása)
 - felhők képződése a konvektív határréteg tetején (S_{bl} , δa_{bl} kiszámolása)
 - felhők leépülése a turbulens átkeveredés miatt (δa_{evap} kiszámolása)
 - nagytérségű párolgás (E_{old} kiszámolása)
 - nagytérségű felhőképződés
4. szakasz: csapadékképződés
 - csapadékhullás problémája egyik modellszintből a másikba
 - hó/jég kihullása/ülepedése
 - eső és kevert fázisú folyamatok
5. szakasz: megoldások a CLWC-re és felhőborítottságra
 - (1.) egyenlet analitikus megoldása (l: egy rácstérfogatra átlagolt specifikus felhővíz és -jég tartalom)
 - (2.) egyenlet analitikus megoldása (a: rác felhőborított része)
6. szakasz: megoldásfüggő folyamatok (hó olvadása, csapadék párolgása... stb.)

7. szakasz: korrekciók, minden termodinamikai mennyiség utolsó, ellenőrző számolása

8. szakasz: fluxusszámolás a diagnosztikához

Ezekon a lépéseken halad keresztül a modell a felhőfizikai és határréteg parametrizáció elvégzése során. Részletesebben, az egyenleteket is feltüntetve nem kívántuk bemutatni a parametrizációt, ez csak egy rövid vázlat a modell elvi működéséről.

7. ERA40 adatbázis alapján készült vizsgálat

7.1. Adatok előkészítése

Két állomást választottunk ki vizsgálatunkhoz: Szegedet és Kékestetőt. Az állomások 84 és 1010 méter magasan helyezkednek el az Alföldön illetve az Északi-középhegységben. A megfigyeléseket, így a zúzmarás esetek bejegyzését is szakképzett észlelő végzi el, ami miatt feltételezhetően megbízható és pontos adatok állnak rendelkezésünkre.

ECMWF ERA-40 adatbázisból a zúzmaraképződés szempontjából fontos meteorológiai paramétereket kellett lekérni. Ezek, mint már említettük a hőmérséklet, specifikus nedvesség, felhőborítottság, folyékony felhővíz-tartalom (CLWC), szélesebesség. Az adatokat mind a 60, a modellben megtalálható vertikális szintre lekértük. A vizsgált időszak 1998-2002 közötti téli félévek, vagyis október 1.-től április 1.-ig tartó szakaszok.

Az ECMWF adatbázis használatakor felmerült problémák:

- A modellben szereplő szintekhez nem lehet egyértelműen egy nyomási szintet hozzárendelni, vagyis adott modellszinthez az időben változó nyomási értékek tartoznak. Ezáltal a magasság is folyamatosan változik.
- A nyert GRIB alakú fájlok kezelésének megoldása
- Az ERA-40 adatbázisban csak specifikus nedvesség található, relatív nedvesség értékek nem szerepelnek, ezért ki kellett számolni a számunkra szükséges relatív nedvességet egy Fortran program segítségével. A gondolatmenet a következő:

$$\mathbf{rh = sh(e,t) / ssh(p,t) \quad (5.)}$$

A relatív nedvesség kiszámolásához a telítési specifikus nedvességet (ssh) is ki kell számolni. A specifikus nedvesség (sh) a rendelkezésünkre állt. A dimenziók a következők:

$$\text{ssh} = [\text{g vízgőz}] / [\text{kg nedves levegő}] \quad p = [\text{mbar}] \quad t = [^\circ\text{C}]$$

$$\mathbf{ssh_1 = w / (1+w) \quad (6.)}$$

w: keverési arány

ssh₁: telítési specifikus nedvesség

$$\text{ssh}_1 = [\text{kg vízgőz}] / [\text{kg nedves levegő}]$$

$$\mathbf{w = 0.001 * wmr(p,t) \quad (7.)}$$

wmr: keverési arány

$$\text{wmr} = [\text{g vízgőz}] / [\text{kg száraz levegő}]$$

A wmr keverési arány ismeretlen. Ennek kiszámolására Herman Wobus által írt sémát használtuk fel. Először be kell vezetni az eps konstans mennyiséget. Ez a víz átlagos molekulatömegének (18.016 g/mol) és a száraz levegő átlagos molekulatömegének (28.966 g/mol) a hányadosa.

$$\text{eps} = 0,62197$$

Az x egy hőmérséklettől és a levegő nyomásától függő változó, ami a wfw korrekciós faktor kiszámolásához szükséges. Ez a faktor tartalmazza a levegő és vízgőz keverékének az eltérését az ideális gáztól:

$$\mathbf{x = 0.02*(t-12.5+7500./p) \quad (8.)}$$

$$\mathbf{wfw = 1 + 4.5e-06 * p + 1.4e-03*x^2 \quad (9.)}$$

A telítési vízgőznyomást (esw(t)) megszorozva a korrekciós faktoral megkapjuk a korrigált telítési vízgőznyomást:

$$\mathbf{fwesw = wfw * esw(t) , \quad (10.)}$$

ahol esw(t) = [mbar], t = [°C], fwesw = [mbar]. Az esw(t) értékét a gyakorlatban a Magnus-Tetens formulával számolhatjuk ki, amely csak a t hőmérséklettől függ. Ekkor a telítési keverési arány már könnyen számolható:

$$\mathbf{r = eps * fwesw / (p-fwesw) \quad (11.)}$$

Az r telítési keverési arány egy dimenzió nélküli mennyiség. [g vízgőz / kg száraz levegő] mértékegységre átszámolva:

$$\mathbf{wmr = 1000 * r \quad (12.)}$$

A (12.) egyenletet visszahelyettesítjük (7)-be, majd azt a (6.) egyenletbe. Ekkor megkapjuk a telítési specifikus nedvességet, aminek dimenziója [kg vízgőz] / [kg nedves levegő]. Ahhoz, hogy [g] / [kg] mértékegységre átváltsuk, a következő műveletet kell elvégezni:

$$\text{ssh} = 1000 * \text{ssh}_1 \quad (13.)$$

Majd a (13.) egyenletet visszahelyettesítve (5.) egyenletbe megkapjuk a relatív nedvességet, ami a verifikációhoz szükséges mennyiség.

7.2 Szeged és Kékestető állomásokra vonatkozó eredmények összehasonlító elemzése

Munkánkat 3 lépésre bontottuk fel:

- i. Megvizsgáltuk, és összehasonlítottuk a modell előrejelzéseit és a valós, mért értékeket, amelyek kedveznek a felhőn belüli jegesedés számára: a hőmérséklet negatív voltát, illetve a relatív nedvességet. A relatív nedvesség különböző küszöbértékei mellett (70%, 75%...stb.) vizsgáltuk meg az előrejelzések pontosságát a verifikációs mutatók segítségével.
- ii. Megvizsgáltuk, és összehasonlítottuk a modell eredményeit és a valós értékeket, amikor az előrejelzett folyékony felhővíztartalom (CLWC) nem nulla (különböző küszöbértékeket választva), a hőmérséklet pedig negatív. A valós, mért értékeknél szintén a negatív hőmérsékletet vesszük figyelembe, valamint a látástávolságot különböző küszöbértékek mellett. Mivel a szinoptikus gyakorlatban nem mérnek folyékony felhővíz-tartalmat, ezért azzal a feltevessel élünk, hogyha a látástávolság 50m, 100m... stb. alatt van, akkor jelen van folyékony felhővíz a levegőben.
- iii. Az általunk kiválasztott két állomásra, Szegedre és Kékestetőre kapott eredményeket összehasonlítottuk az előző két pontban említett küszöbértékek és verifikációs mutatók segítségével. Ezt a pontot fejtjük ki dolgozatunkban részletesen.

A 2. táblázatban vázolt elvet felhasználva vizsgáltuk meg az előrejelzések megbízhatóságát.

Előrejelzés alapján	Mérések alapján	
	igen	Nem
igen	talált	téves riasztás
Nem	elmulasztott riasztás	korrekt elvetés

Előrejelzés alapján	Mérések alapján		
	igen	nem	
igen	a	b	a+b
nem	c	d	c+d
	a+c	b+d	a+b+c+d=n

2. táblázat: az „igen”/„nem” előrejelzések és mérések gyakorisága

Az általunk használt verifikációs mutatók definíciói:

1. $PC = (a+d) / (a+b+c+d)$
2. $CSI = a / (a+b+c)$
3. $FAR = b / (a+b)$
4. $POD = a / (a+c)$
5. $F = b / (b+d)$
6. $B = (a+b) / (a+c)$

PC (Proportion Correct): 0 és 1 közé eső viszonyszám. Megmutatja, hogy az esetek hányad részében sikerült az előrejelzés. Figyelembe veszi azokat az eseteket is, amikor sem a valóságban, sem a modellben nem következtek be a megadott feltételek, vagyis helyesen vetette el a modell a jegesedés lehetőségét.

CSI (Critical Success Index): a számításból kihagyjuk a nagy biztonsággal előrejelzett „korrekt elvetés”-t („d”-t), ahova az előrejelzések nagy hányada esik. Sokkal reprezentatívabb jellemzése az előrejelzéseknek, mint a PC.

POD (Probability of Detection) és a **FAR** (False Alarm Ratio): nem függetlenek egymástól. Mindkettő egy 0 és 1 között változó szám, azzal a különbséggel, hogy egy feltételezett tökéletes előrejelzésnél a $POD = 1$, míg a $FAR = 0$ értéket veszi fel. A POD annak az arányát adja meg, hogy a ténylegesen bekövetkezett jegesedés hányad részét tudta jól előrejelezni a modell. A FAR pedig azt mutatja meg, hogy az előrejelzés alapján várható jegesedésből hányszor riasztott a modell tévesen. Ebből következik, hogy ha POD értéke növekszik, akkor FAR csökken, mert ha maximalizáljuk a helyes előrejelzések számát, akkor feltehetően minimalizáljuk a téves riasztások számát.

A következő mutató a **B** (Bias), vagyis az eltérés. Értéke 0 vagy a fölötti lehet. Ha értéke 1, nincs eltérés a modell eredménye és a valóságban bekövetkezett jegesedés ténye

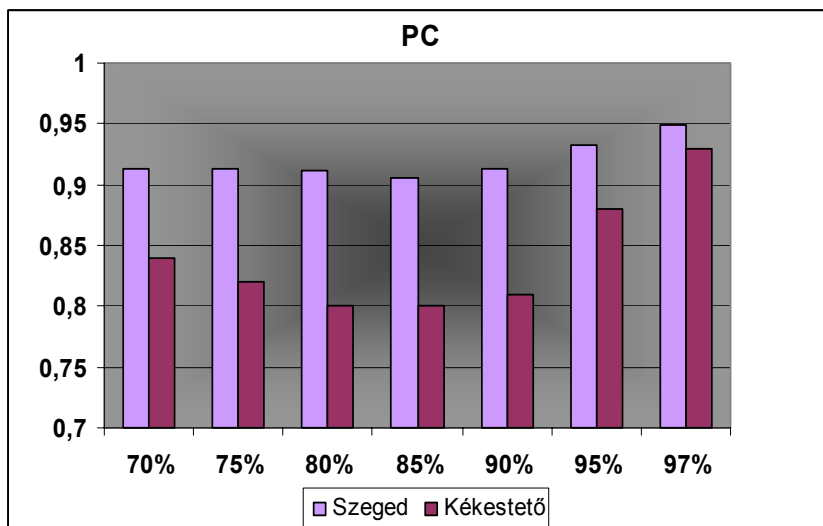
között. Ha értéke nagyobb 1-nél (kisebb 1-nél), akkor a modell többször (kevesebbszer) jelez jegesedést, mint ahogy az a valóságban megtörténik. Ekkor a modellt túlbiztosítottnak (alulbiztosított) nevezzük.

F (False Alarm Rate): egy 0 és 1 között változó szám, ami megmutatja, hogy hányszor jelzett a modell jegesedést, miközben a valóságban nem történt. Ennek értéke akkor a legjobb, amikor nincs téves riasztás, vagyis $F = 0$.

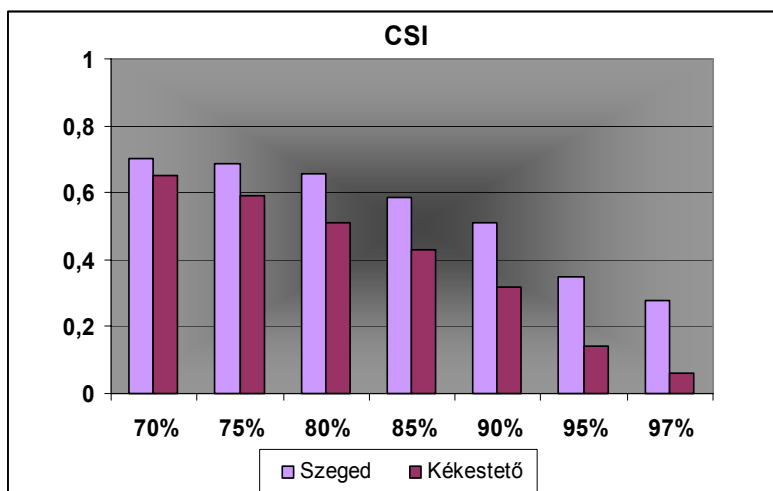
A Kékestető és Szeged állomásokra vonatkozó eredmények (táblázatok és diagramok) külön-külön az I. mellékletben és II. mellékletben találhatóak. A dolgozatban részletesebben a két állomásra vonatkozó eredmények összehasonlítását végeztük el.

7.2.1 Szeged-Kékestető eredményeinek összehasonlítása relatív nedvesség küszöbértékek mellett

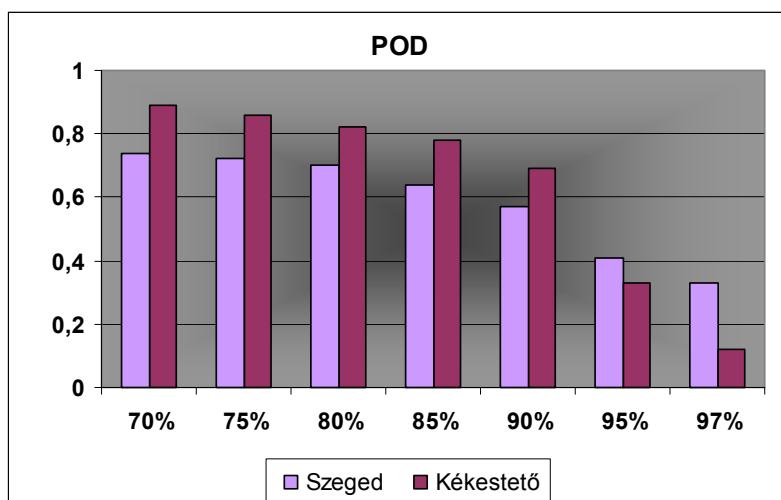
Először a relatív nedvesség küszöbértékeire vizsgáltuk meg a különböző mutatókat. A **PC** index esetében (1. diagram) Szeged kiegyenlített eredményt mutat, mint Kékestető. A legkisebb eltérés a magas küszöbértékek mellett adódott, míg legnagyobb a különbség a 80% és 85% küszöbértékek mellett. Viszont ha a **CSI** indexet nézzük (2. diagram), akkor már sokkal kisebb eltéréseket kapunk a két állomás eredményeit megvizsgálva. A két állomás eredményeiben látható eltérés a küszöbértékek szigorításával nő, legkisebb a 70%-os relatív nedvesség mellett. A **POD** és **FAR** mutatókat a 3. és 4. diagramon láthatjuk. Az első esetben Kékestető mutat jobb eredményt, kivéve a 95% és 97%-os küszöbértékek mellett. A FAR mutatónál pedig egyértelműen Szegedre kaptunk jobb eredményeket.



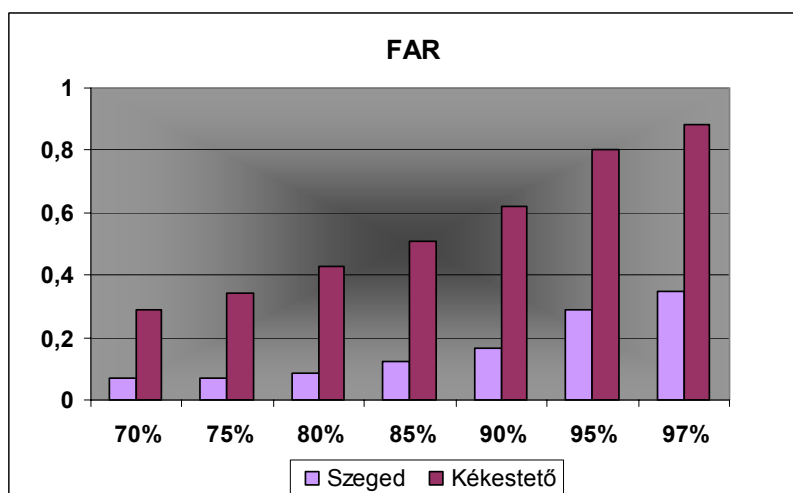
1. diagram: PC verifikációs mutató különböző relatív nedvesség küszöbértékek mellett Szeged és Kékestető állomásra



2. diagram: CSI verifikációs mutató különböző relatív nedvesség küszöbértékek mellett Szeged és Kékestető állomásra

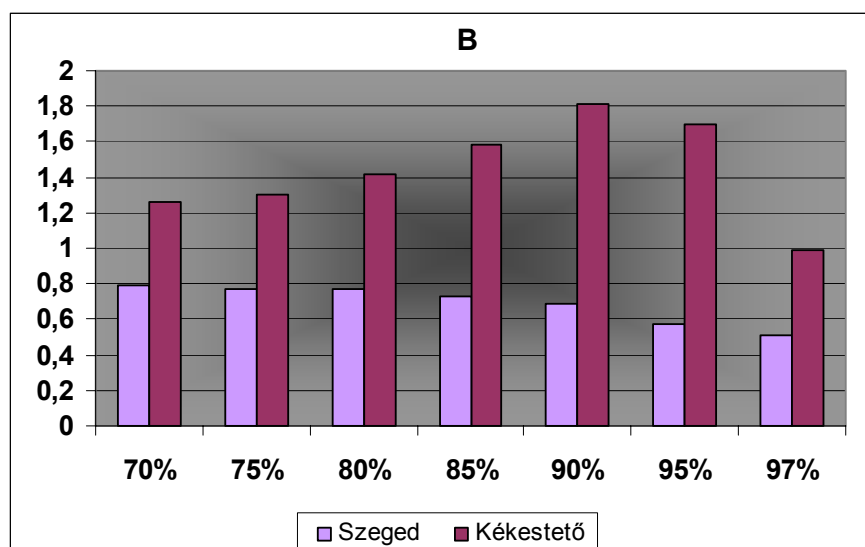


3. diagram: POD verifikációs mutató különböző relatív nedvesség küszöbértékek mellett Szeged és Kékestető állomásra



4. diagram: FAR verifikációs mutató különböző relatív nedvesség küszöbértékek mellett Szeged és Kékestető állomásra

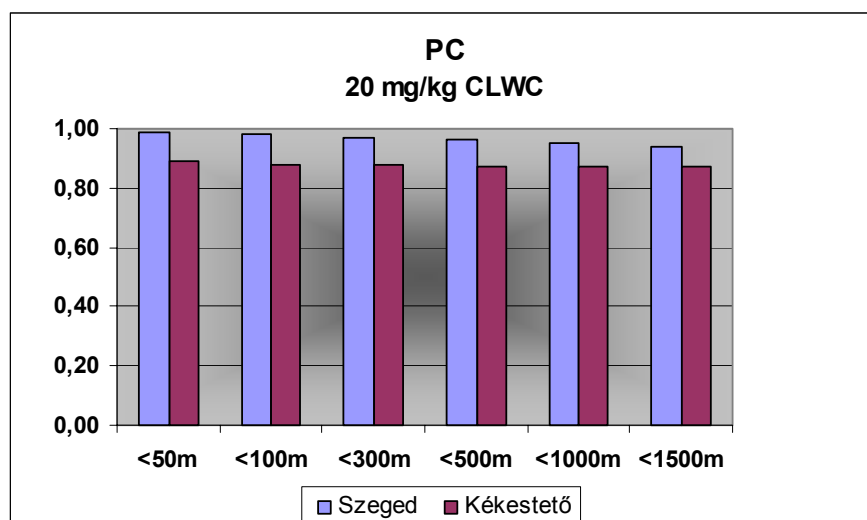
A **eltérés (B)** mutató (5. diagram) összehasonlításából kiderül, hogy Szegedre minden küszöbérték esetében alulbiztosított a modell, míg Kékestető esetében túlbiztosított. A menet sem egyezik meg. Kékestető esetében folyamatosan nő B értéke, legnagyobb 90%-nál, majd csökken. Szeged esetében a szigorúbb feltételek felé csökken az értéke.



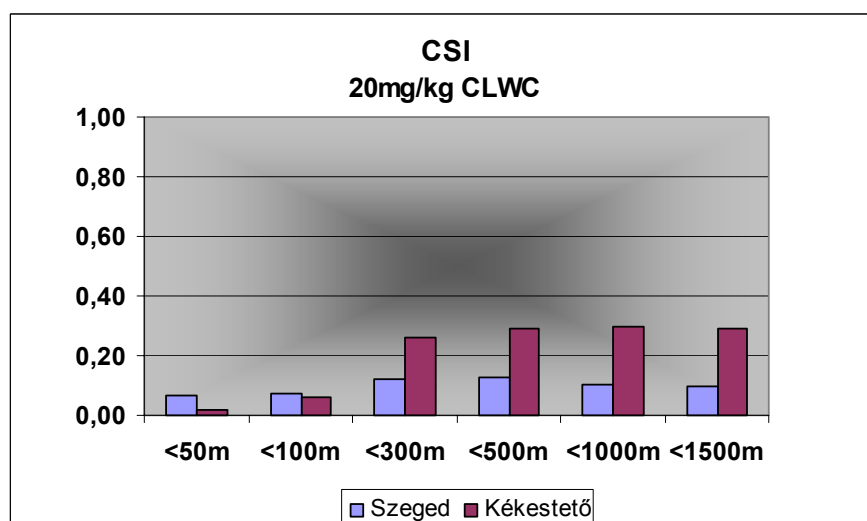
5. diagram: B verifikációs mutató különböző relatív nedvesség küszöbértékek mellett Szeged és Kékestető állomásra

7.2.2 Szeged-Kékestető eredményeinek összehasonlítása 20 mg/kg CLWC küszöbértékek mellett

A PC mutató (6. diagram) a 20 mg/kg feltétel mellett minden látástávolság küszöbértékre 80% feletti eredményt ad. Ha azonban a „korrekt elvetés” kategóriát nem vesszük figyelembe, akkor kevésbé jó eredményekhez jutunk. A 7. diagramon látható a CSI mutató, ami a legjobb esetben is csak 38% Kékestető, 19% Szeged esetében. A két legszigorúbb kritériumnál, vagyis 50 és 100 méter látástávolságnál Szegedre kaptunk jobb eredményt, az összes többi esetben Kékestetőre.



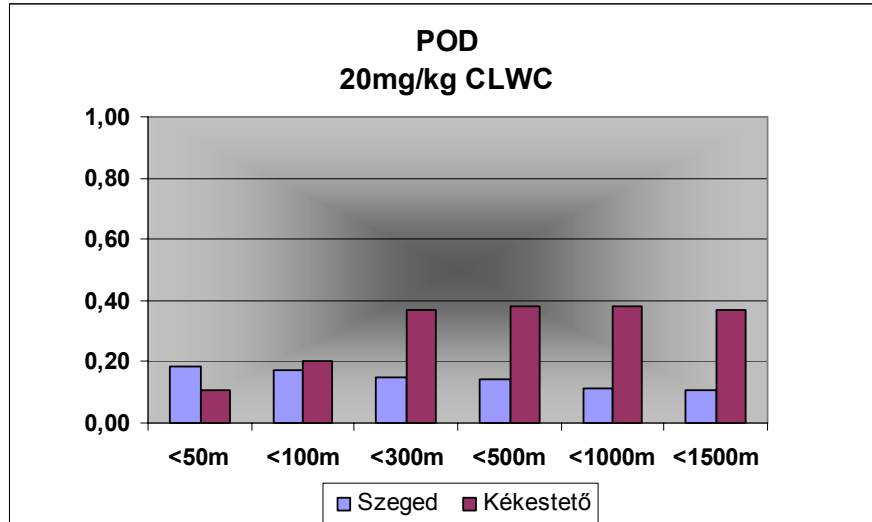
6. diagram: PC verifikációs mutató összehasonlítása 20 mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Szeged és Kékestető állomásra



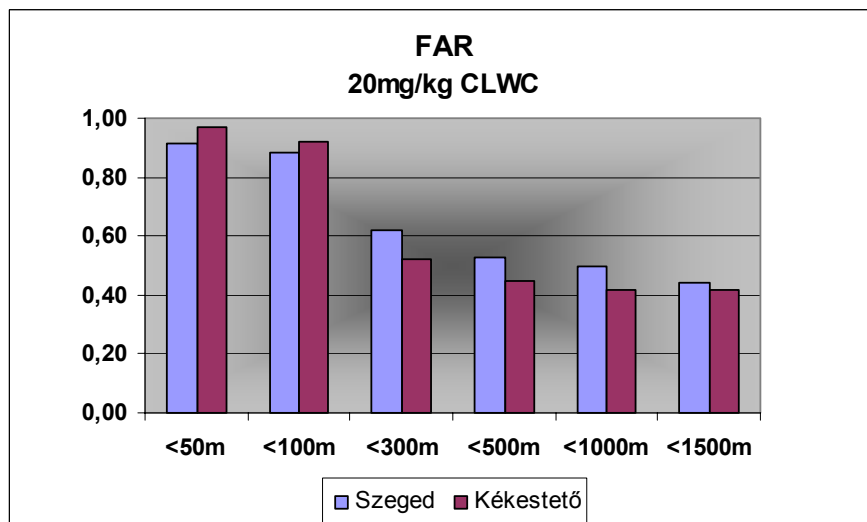
7. diagram: CSI verifikációs mutató összehasonlítása 20 mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Szeged és Kékestető állomásra

A POD és FAR (8.-9. diagram) mutatók változatos képet mutatnak. POD értéke az 50 m látástávolság küszöb mellett Szegedre adódott jobbnak, a többi esetben Kékestetőre. Ezzel összhangban a FAR mutatónál a szigorúbb feltételek mellett szintén Szeged jobb eredményt mutat, míg a 300 m látástávolság küszöbtől kezdve Kékestetőre kaptunk jobb eredményt. A B (10. diagram) a két legszigorúbb küszöbérték mellett mindkét állomás

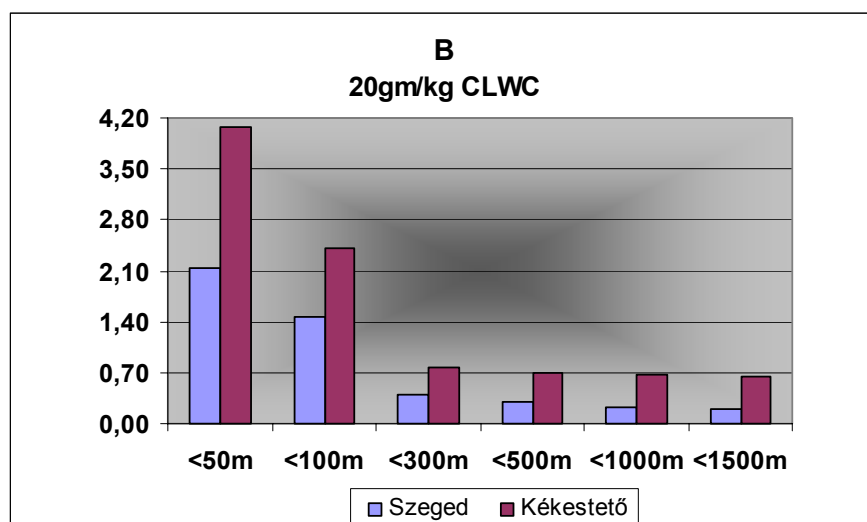
esetében 1-nél nagyobb, vagyis a modell túlbiztosított. A többi küszöbértékre ez megváltozik, és alubiztosított lesz a modell.



8. diagram: POD verifikációs mutató összehasonlítása 20 mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Szeged és Kékestető állomásra



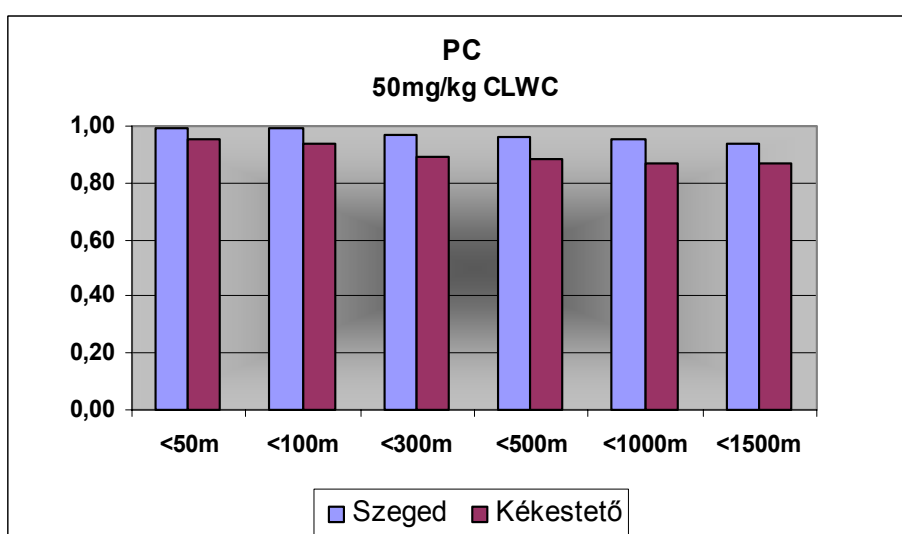
9. diagram: FAR verifikációs mutató összehasonlítása 20 mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Szeged és Kékestető állomásra



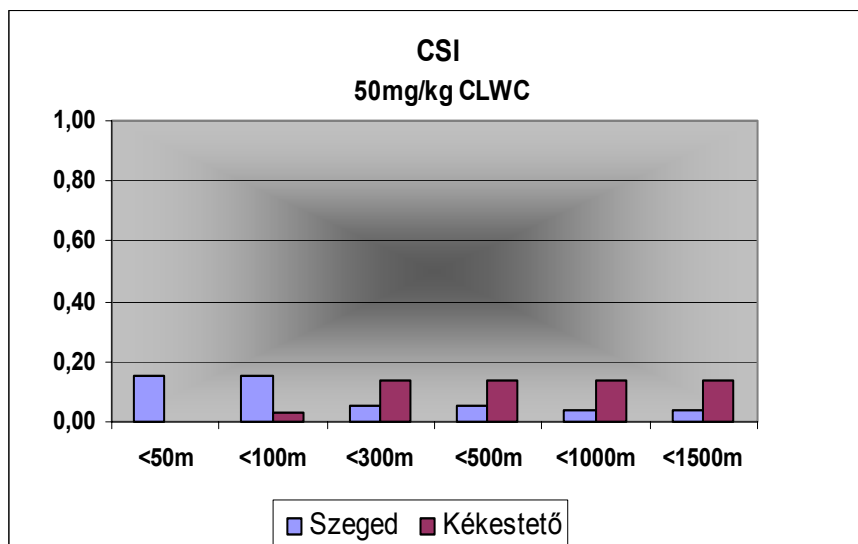
10. diagram: B verifikációs mutató összehasonlítása 20 mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Szeged és Kékestető állomásra

7.2.3 Szeged-Kékestető eredményeinek összehasonlítása 50 mg/kg CLWC küszöbérték mellett

A PC mutató ismételen nagyon jó eredményekre enged következtetni, amit a 11. diagramon láthatunk. Ha azonban megvizsgáljuk a CSI mutatót a 12. diagramon, akkor láthatjuk, hogy ez nem így van. A legszigorúbb kritériumnál, vagyis az 50 m látástávolság mellett Kékestető esetében annyira kicsi értéket kaptunk, ami már meg sem jelenik a diagramon. A többi küszöbnél sem mondhatunk sokkal jobb eredményeket. A legjobb esetben sem éri el a 20%-ot az eredmény.

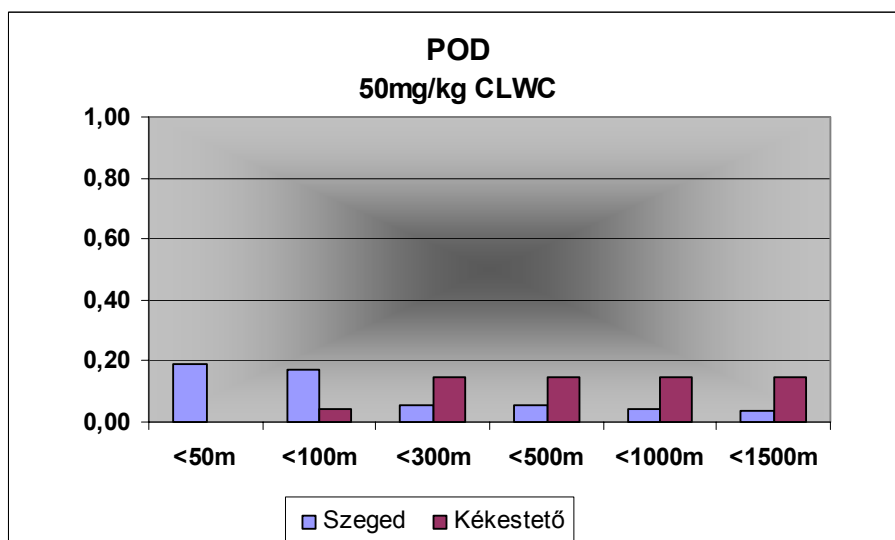


11. diagram: PC verifikációs mutató összehasonlítása 50 mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Szeged és Kékestető állomásra

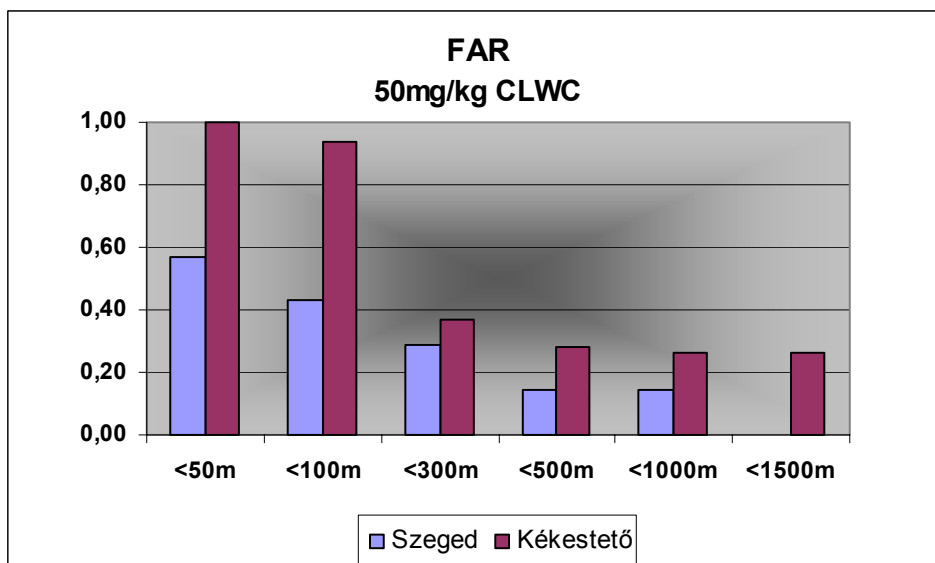


12. diagram: CSI verifikációs mutató összehasonlítása 50 mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Szeged és Kékestető állomásra

POD akkor a legjobb, amikor értéke közel 1, a FAR pedig akkor, amikor 0. Láthatjuk, hogy az állomások eredményeinek egymáshoz képest való alakulása hasonló a 20 mg/kg küszöbértéknél kapottakkal, azzal a különbséggel, hogy most rosszabb eredményeket olvashatunk le a diagramokról (13. és 14. diagram). Ez várható volt, hiszen az 50 mg/kg küszöbérték egy szigorúbb feltétel, mint a 20 mg/kg.



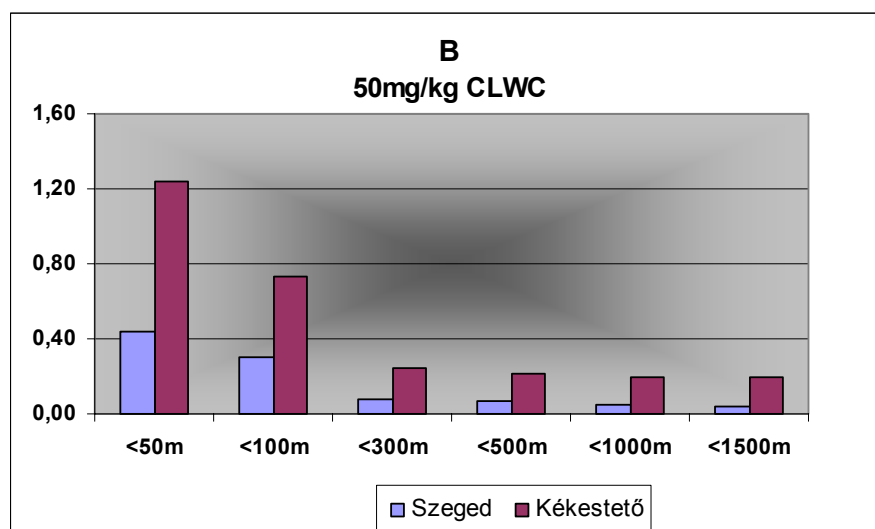
13. diagram: POD verifikációs mutató összehasonlítása 50 mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Szeged és Kékestető állomásra



14. diagram: FAR verifikációs mutató összehasonlítása 50 mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Szeged és Kékestető állomásra

A B mutató egy esetben túlbiztosított: Kékestető esetében 50 m látástávolság küszöbérték mellett. A többi feltétel mellett alulbiztosított. Akkor optimális az eredmény, ha $B=1$. Szeged esetében tehát rosszabb eredményeket kapunk, mint Kékestetőre (15. diagram).

A verifikációs mutatók segítségével arra az eredményre jutottunk, hogy többségében Szeged állomásra kaptunk jobb előrejelzéseket azon paraméterekre, amelyek együttesen okozhatják felhőn belüli jegesedés kialakulását. A modell azonban az esetek nagy részében nem találja el ezt a meteorológiai paraméter-együttest egyik állomás esetében sem. Ezt annak tulajdoníthatjuk, hogy viszonylag nagy az olyan esetek száma, amikor az orografikus emelésnek köszönhető a felhőképződés. Ezzel magyarázható, hogy az alföldi állomás esetében jobb eredményeket kaptunk. Másrészt az ERA40 reanalízisek térbeli felbontása miatt nem várhatóak el ennél jobb eredmények.



15. diagram: B verifikációs mutató összehasonlítása 50 mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Szeged és Kékestető állomásra

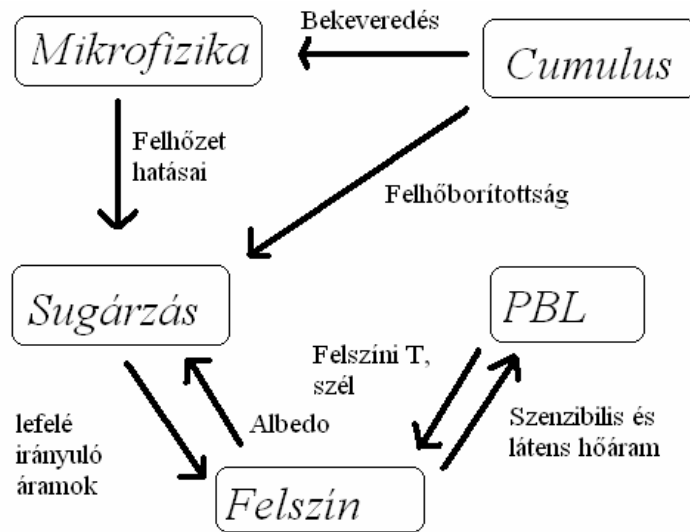
9. MM5 időjárás előrejelző modell

Az MM5 nagyfelbontású, speciális, korlátos tartományú modell a Pennsylvanai Egyetem és az NCAR (National Centre for Atmospheric Research) közreműködésével született meg. Széles körben elterjedt a real-time előrejelzésekben, a levegő minőségének kutatásában és alkalmazzák a hidrológia tárgykörében is. Az MM5 az összennyomható és nem-hidrosztatikus légkör egyenletein alapul. Emiatt lehetséges olyan finom horizontális és vertikális skálán futtatni a modellt, hogy megfeleljen a mezo- γ skálának (O(1) km) (MM5 időjárás előrejelző modell honlapja)

Hazánkban az Országos Meteorológiai Szolgálat egyik nagyteljesítményű számítógépén naponta többször fut. A modell 2,5 kilométeres rácsfelbontásra készít előrejelzést. A modell a legfrissebb méréseket és az ECMWF előrejelzéseket használja fel számításaihoz. A kezdeti és peremfeltételek az ECMWF -től származnak 0,5 km-es felbontással és 38 vertikális szintre, amelyek nem azonos távolságokban helyezkednek el teljes-sigma szinteken. Az alsó 1500 méteren sűrűbbek a szintek, ami lehetővé teszi a planetáris határreteg pontosabb reprezentálását a modellben.

A hidro-termodinamikai egyenletrendszer σ - koordináta-rendszerbeli alakját használja és számítja ki a modell (Horváth, 2005.).

Az MM5-ben a különböző opciók széles választéka áll rendelkezésre a parametrizációs eljárásokhoz. Az MM5 modellben található parametrizációk közötti összefüggések a 2. ábrán láthatóak.



2. ábra: az MM5 modell által alkalmazott parametrizációs sémák közötti összefüggések ábrája

A következő parametrizációs eljárásokat használtuk fel a modell futtatásakor:

1. Cumulus parametrizációhoz az Arakawa-Schubert sémát, ami lehetővé teszi a bekeveredést a feláramlási és leáramlási zónába.
2. A nedvességi parametrizációk közül a Reisner2 sémát, amelyben már a vízgőzön kívül a hidrometeorok 5 formája jelenik meg: felhővíz, jég, graupel, eső, hó.
3. Határréteg parametrizációhoz a Mellor-Yamada sémát alkalmaztuk, amit az Eta modellben használtak fel először (Janjic, 1990.). Előrejelzi a turbulens kinetikus energiát, a keveredési együtthatót és a vertikális fluxust.
4. A légköri sugárzás parametrizációjához az RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) hosszuhullámú sémát használtuk fel. Ez egy nagyon pontos új módszer, amit a rövidhullámú sugárzási sémával kombináltak. Figyelembe veszi a vízgőz, a CO_x és ózon hatásait.
5. A talaj folyamatainak parametrizációját a Noah Land-Surface többrétegű talaj modellel vettük figyelembe. Talajnedvességet és talajhőmérsékletet jelez előre 4 rétegre: 10, 30, 60, 100 cm mélyen.

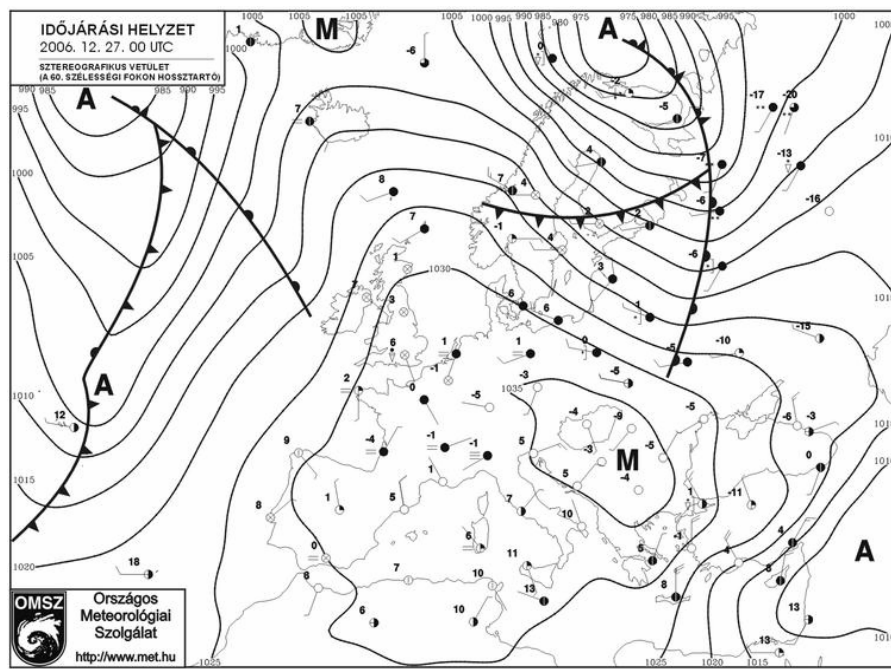
Az egyes parametrizációk részletesebb leírása megtalálható az MM5 honlapján.

10. 2006. december 27-28.-i események elemzése

Terveink között szerepelt, hogy az Országos Meteorológiai Szolgálatnál operatíván futtatott MM5 modell eredményeit, mint az ECMWF dinamikus leskalázását használjuk fel a felhőn belüli jegesedés előrejelzési lehetőségének vizsgálatához. A Meteorológiai Szolgálatnál az MM5 modellt ECMWF peremfeltételekkel futtatják.

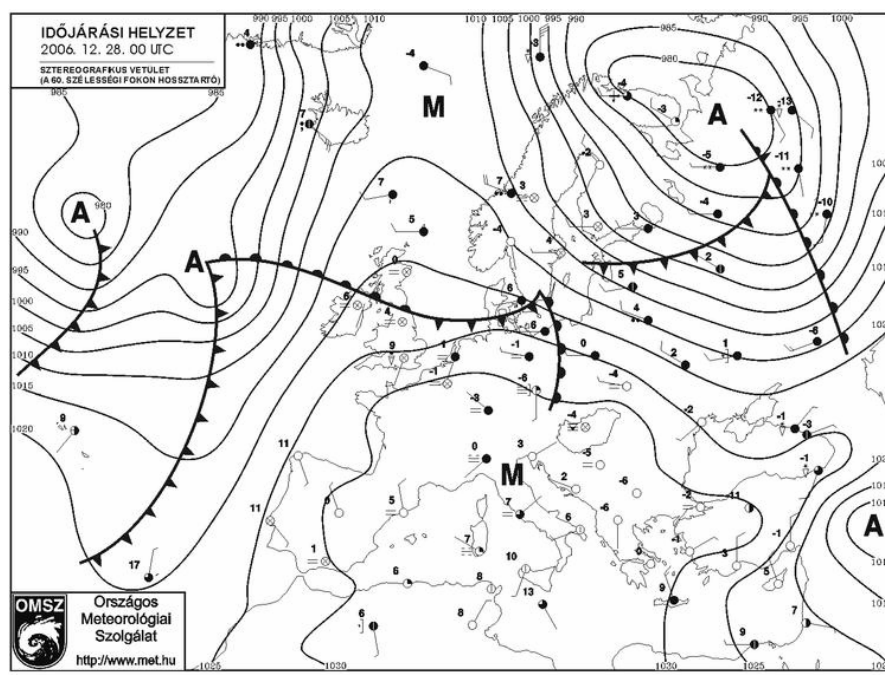
Szeretnénk bemutatni egy, az MM5 modellel készült előrejelzést a 2006. december 27-ről 28-ára virradó éjjel bekövetkezett felhőn belüli jegesedésről, ami Magyarország nagy területein zúzmaraképződéssel járt együtt.

27-én Európa felett egy markáns anticiklon helyezkedett el, ami hazánk időjárását is befolyásolta (3-4. ábra). A Kárpát-medencében hideg léppárnás helyzet alakult ki, ami a téli félévben gyakori jelenség hazánkban. Ekkor a határrétegben inverzió alakul ki, aminek hatására köd képződik, majd tartósan megmaradva sztrátusszá alakul. A 26.-i gyenge hidegfront mögött, a magasabb légrétegekben száraz levegő áramlott a térség fölé. A hidegfront a felszín közelében lévő levegőt nem tudta átkeverni, ott továbbra is megfelelő mennyiségű nedvesség maradt, amiből köd képződhetett.



3. ábra: Európa időjárási helyzetképe, 2006. december 27. 00UTC

27-én a késő esti óráktól a magasban melegadvekciónak indult meg Magyarországon felett, ami a felszín éjszakai órákban történő lehülésével együtt az eleinte még csak helyenként előforduló köd és az alacsonyszintű sztratusz felhőzet kiterjedését okozta. Ezzel egyidőben főleg a magasabb rétegekben, de már a néhány 100 m magas hegyvidéki területeink szintjén is fokozatosan élénkült a délnyugati szél. Ezt az időjárási helyzetet vizsgáljuk meg az MM5 numerikus modell előrejelzései alapján.



4. ábra: Európa időjárási helyzetképe, 2006. december 28. 00UTC

Ezzel a modellel kapott előrejelzéseket az 5., 7., 9. és 11. ábrán követhetjük nyomon, míg a valóságban bekövetkezett eseményeket a 6., 8., 10. és 12. ábrákon láthatjuk, amelyek MSG- RGB műholdképek. (MSG InterpretationGuide http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/index.html)

Az előrejelzéseket tartalmazó képeken a színezés:

Piros: 20 m magasságban a folyékony felhővíz-tartalom mennyisége (g/kg)

Fekete: 100 m magasságban a folyékony felhővíz-tartalom mennyisége (g/kg)

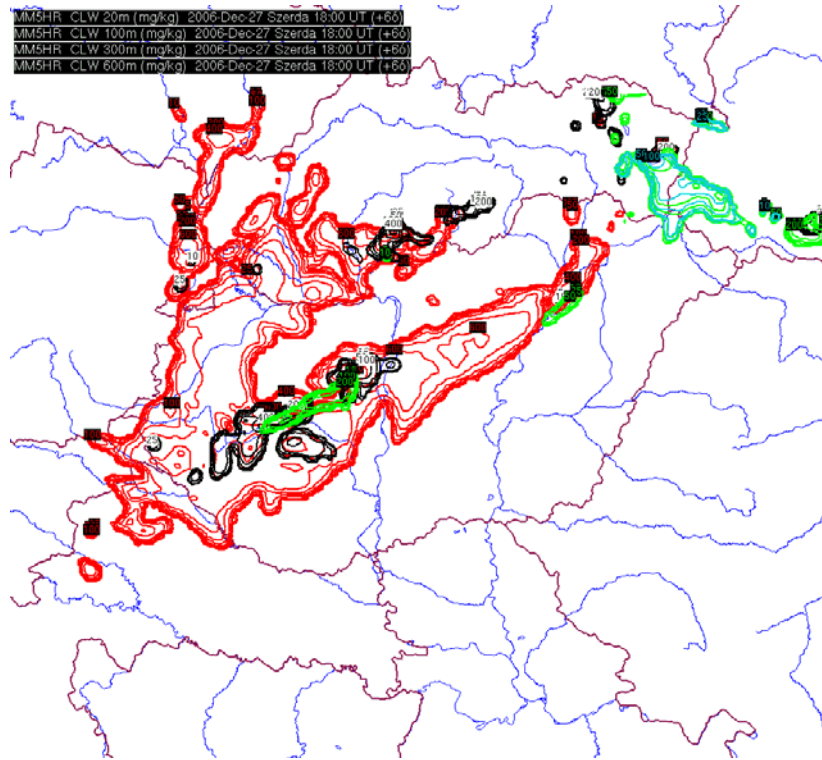
Zöld: 300 m magasságban a folyékony felhővíz-tartalom mennyisége (g/kg)

Cián: 600 m magasságban a folyékony felhővíz-tartalom mennyisége (g/kg)

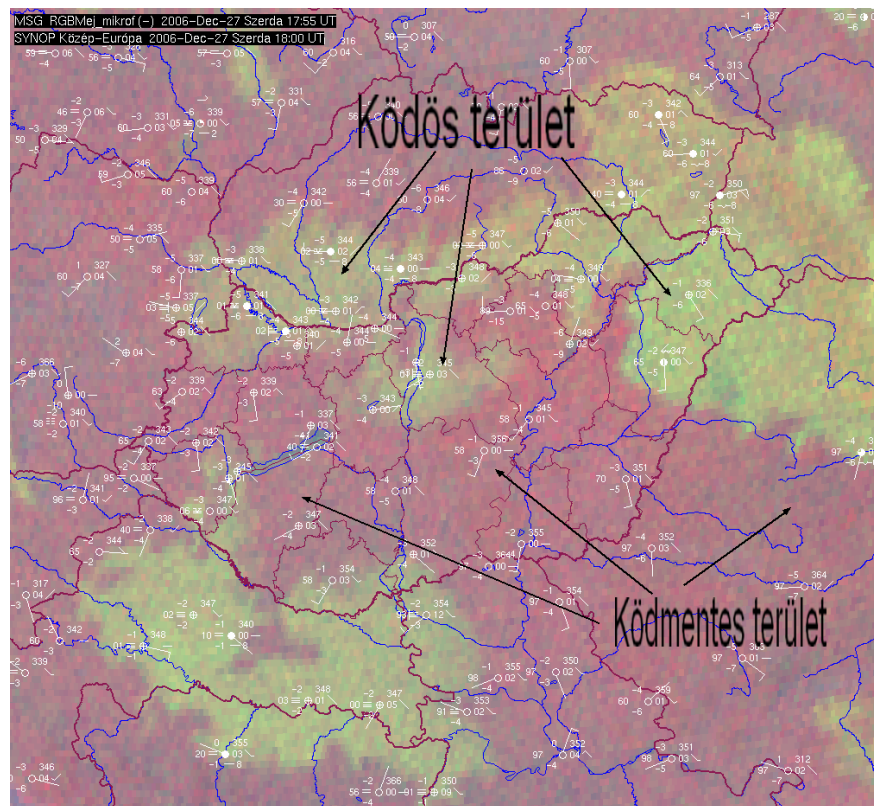
Az éjszakai kompozitképeken a sárgás-zöldes területek jelzik az sztrátusz-felhőzetet, illetve a köd jelenlétét. A lilás terület a földfelszín. A térképeken ábrázoltuk a szinoptikus állomások által jelentett pillanatnyi időjárást is.

Jól látható az előrejelzésekben is és a műholdképeken is, hogy hogyan növekszik, hogyan terjed ki a köd a Kárpát-medencében. Ha összehasonlítjuk az adott időpontra vonatkozó képeket, megfigyelhetjük a különbségeket.

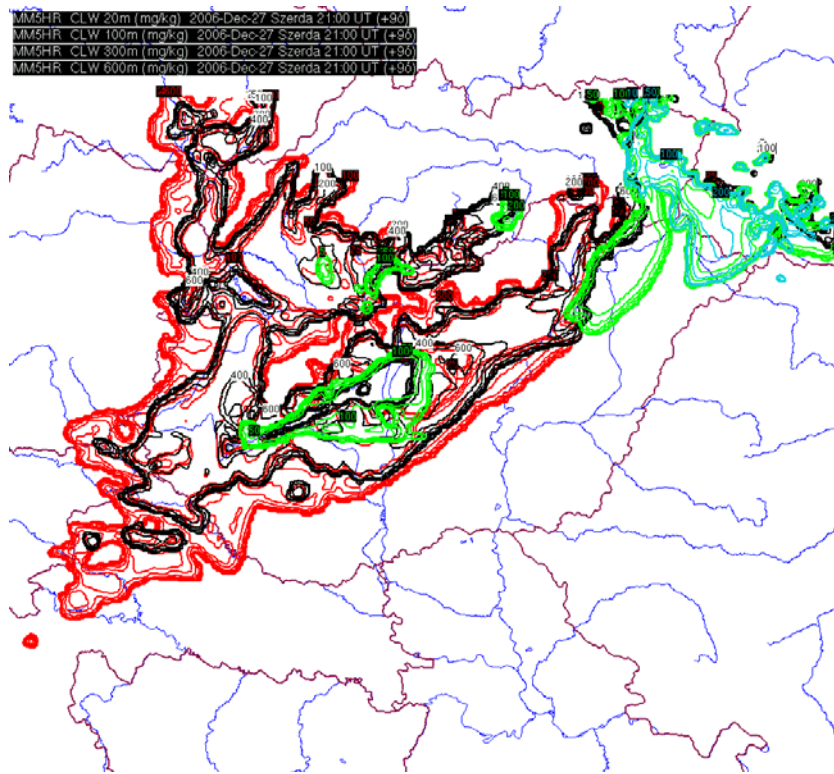
2006. december 27. 18 UTC-re vonatkozó előrejelzés szerint a Nagykanizsa-Dunaújváros-Tiszaújváros vonalban és a Nagykanizsa-Győr vonalban jelenik meg az alsó légrétegben a folyékony felhővíz-tartalom, majd a többi időpontot is megvizsgálva megállapítható, hogy a köd folyamatosan kiterjedt a magasabb rétegekbe is.



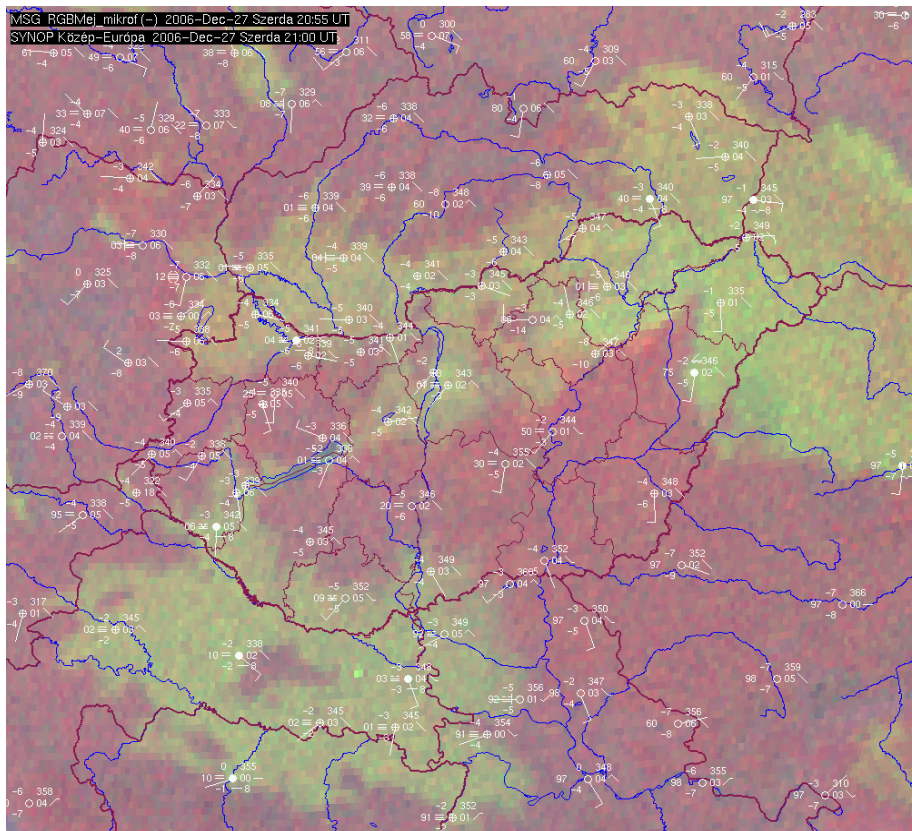
5. ábra: MM5-HR modellel készített előrejelzés a folyékony felhővíz-tartalom alakulására, 2006.december 27. 18UTC-re



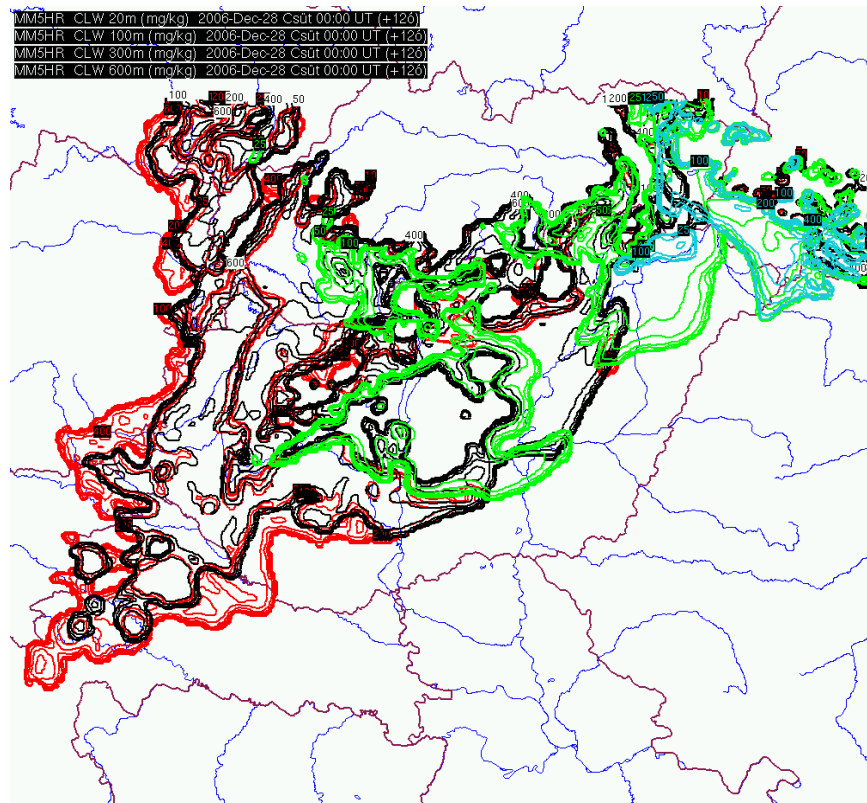
6. ábra: MSG- RGB műholdkép, 2006. december 27. 17:55 UTC és a Szinoptikus állomások jelentései (18UTC)



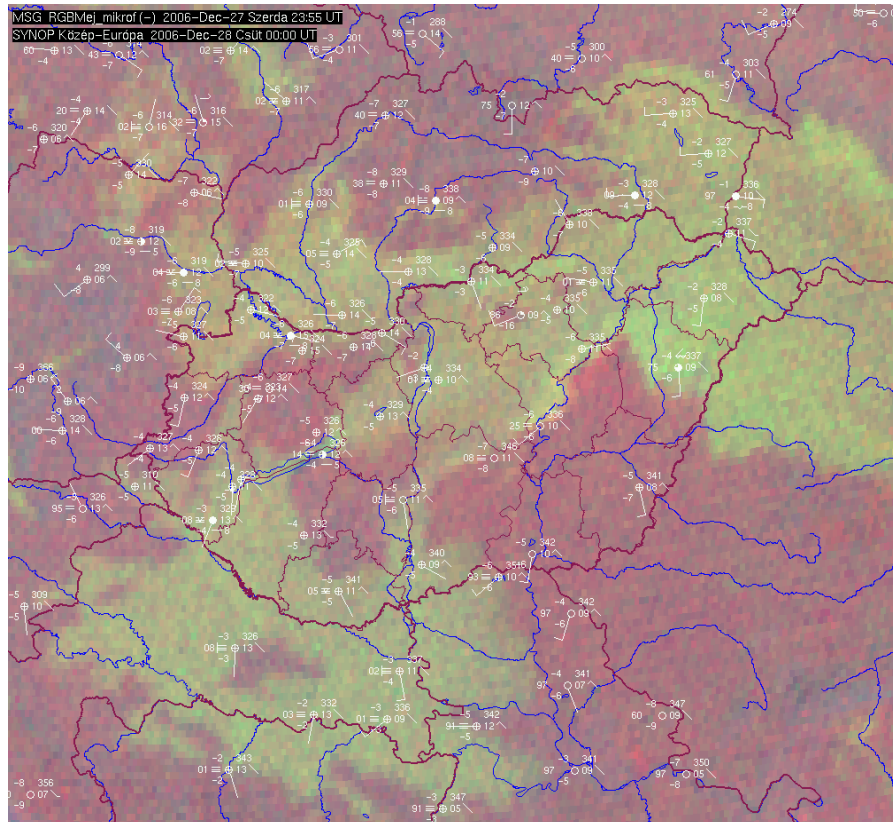
7. ábra: MM5-HR modellel készített előrejelzés a folyékony felhővíz-tartalom alakulására, 2006.december 27. 21UTC-re



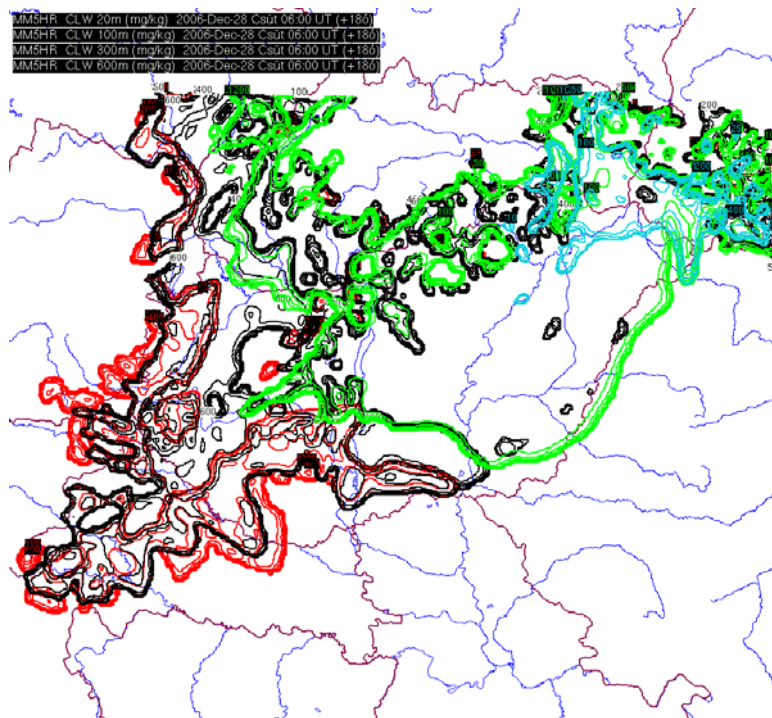
8. ábra: MSG- RGB műholdkép, 2006. december 27. 20:55 UTC és a Szinoptikus állomások jelentései (21UTC)



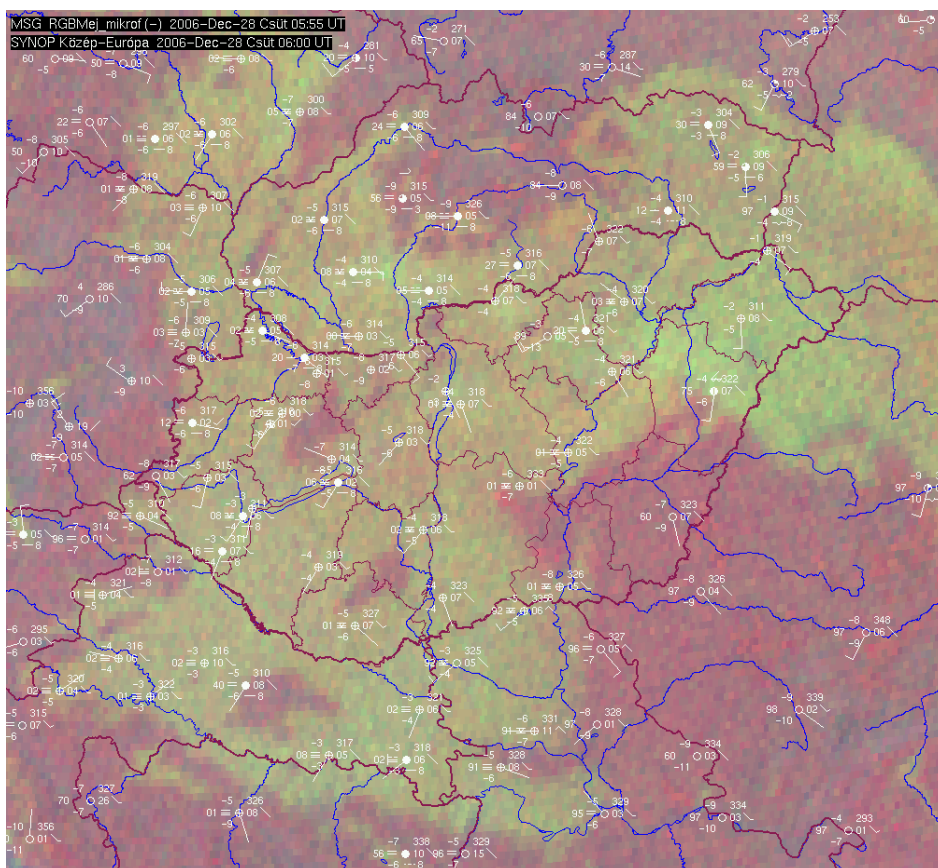
9. ábra: MM5-HR modellel készített előrejelzés a folyékony felhővíz-tartalom alakulására, 2006.december 28. 00UTC-re



10. ábra: MSG- RGB műholdkép, 2006. december 27. 23:55 UTC és a Szinoptikus állomások jelentései (00UTC)

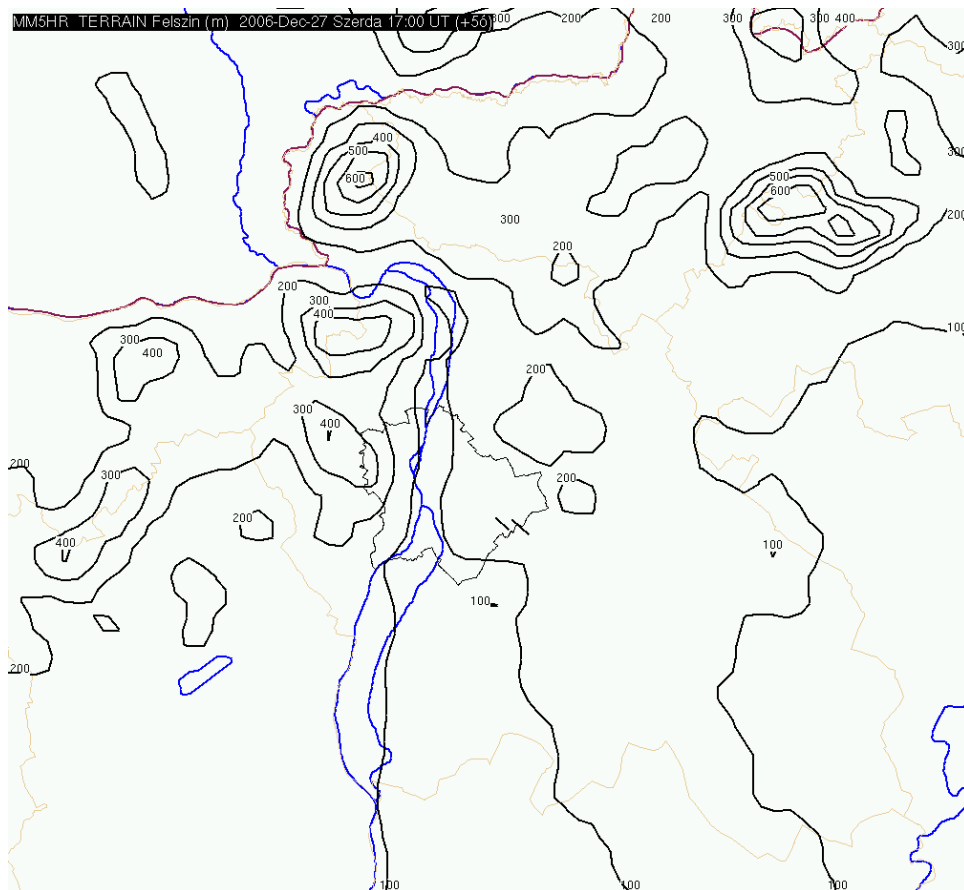


11. ábra: MM5-HR modellel készített előrejelzés a folyékony felhővíz-tartalom alakulására, 2006.december 28. 06UTC-re

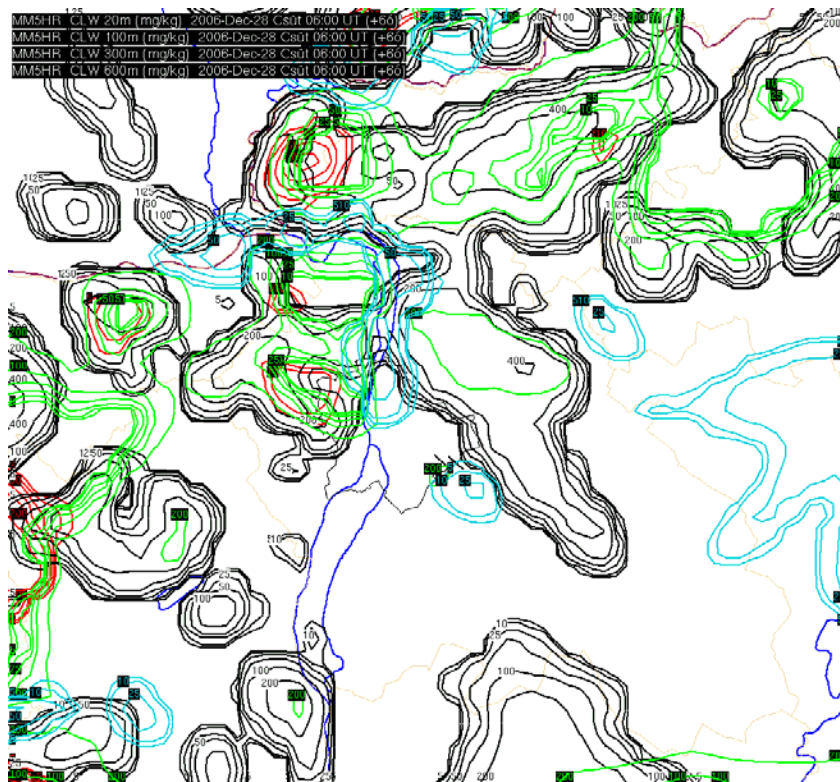


12. ábra: MSG- RGB műholdkép, 2006. december 28. 05:55 UTC és a Szinoptikus állomások jelentései (06UTC)

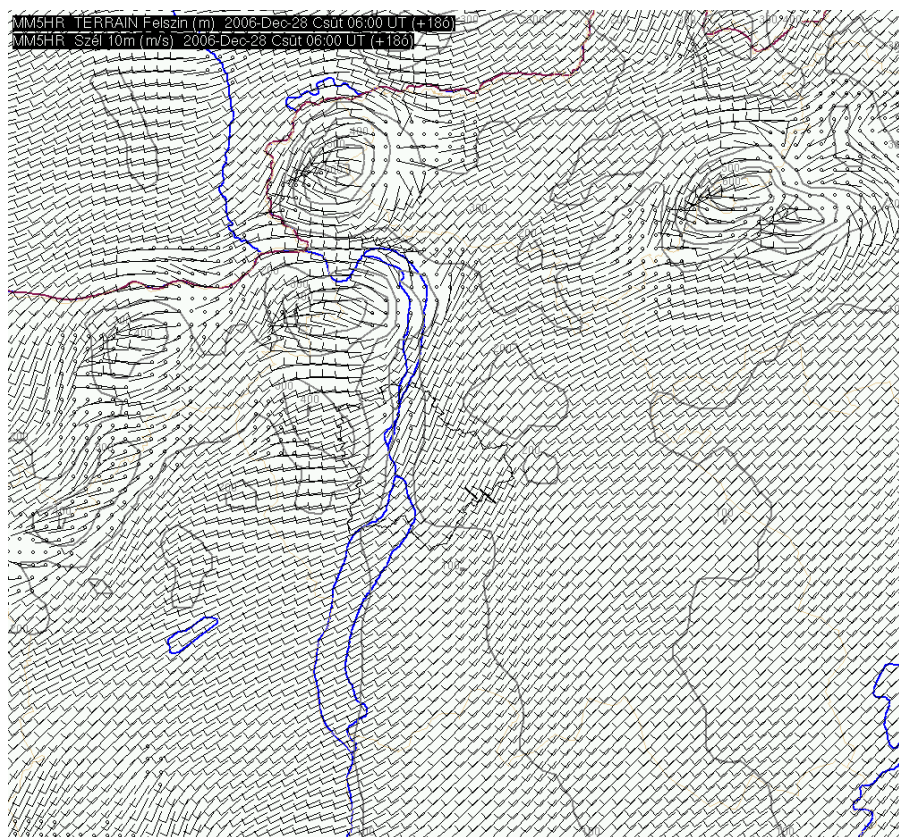
Az MM5-HR orográfiáját láthatjuk a 13. ábrán egy Budapest környékére vett metszeten. A 14. ábrán a 2006. december 28. 6 UTC-re vonatkozó előrejelzést láthatjuk, a 15. ábrán pedig erre a metszetre vonatkozó szélmező előrejelzését. Ezzel szeretnénk kihangsúlyozni, hogy a 2,5 km-es felbontású előrejelzésekben már kirajzolódik a domborzat is. A legintenzívebb zúzmaraképződés az előrejelzésnek megfelelően a dombok nyugati-délnyugati oldalán volt.



13. ábra: az MM5 modell orográfiája (2,5 km-es felbontással). A Pilis-Visegrádi hegység pár méterrel alacsonyabb, mint 500m

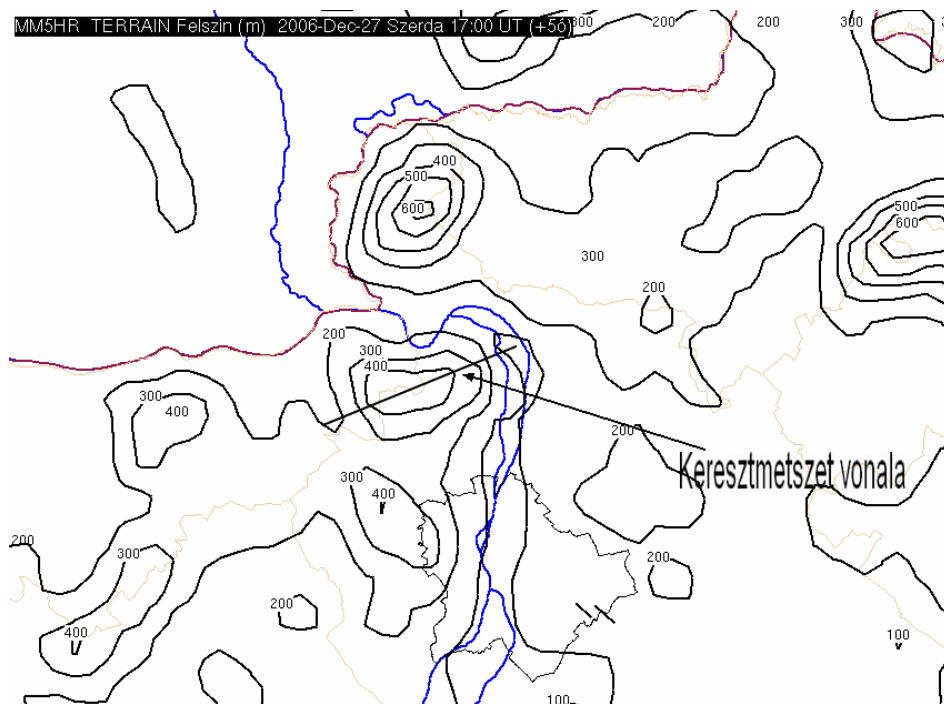


14. ábra: Budapest környékére vonatkozó kivágtat, 2006. december 28. 06 UTC-re



15. ábra: Szélmező előrejelzése az MM5-HR modellel Budapest környékére, 2006. december 28. 06 UTC-re

Elkészítettük a Pilis egy keresztmetszeti képét. A modellben megjelenő Pilis -t társíthatjuk a Nagy-Kevélyhez, ahol a dolgozatban bemutatott kép készült. A Pilis-Visegrádi hegység legmagasabb pontja a modellben megközelítőleg 500m. A két hegy (Pilis és Nagy-Kevély) közel azonos magasságúak és a modellben közel fekszenek egymáshoz. A Nagy-Kevélyen történt felhőn belüli jegesedés folyamata reprezentatív a 28-ai eseményekre, jól illusztrálja a közeli hegyvidéken végbemenő eseményeket. A 16. ábra mutatja annak a vonalnak a helyzetét, amelynek keresztmetszeti képe a 17. ábra. A 17. ábrán jól látható, hogy a valóságnak megfelelően, a hegyek nyugati, délnyugati oldalán volt legnagyobb a lerakódás mértéke.

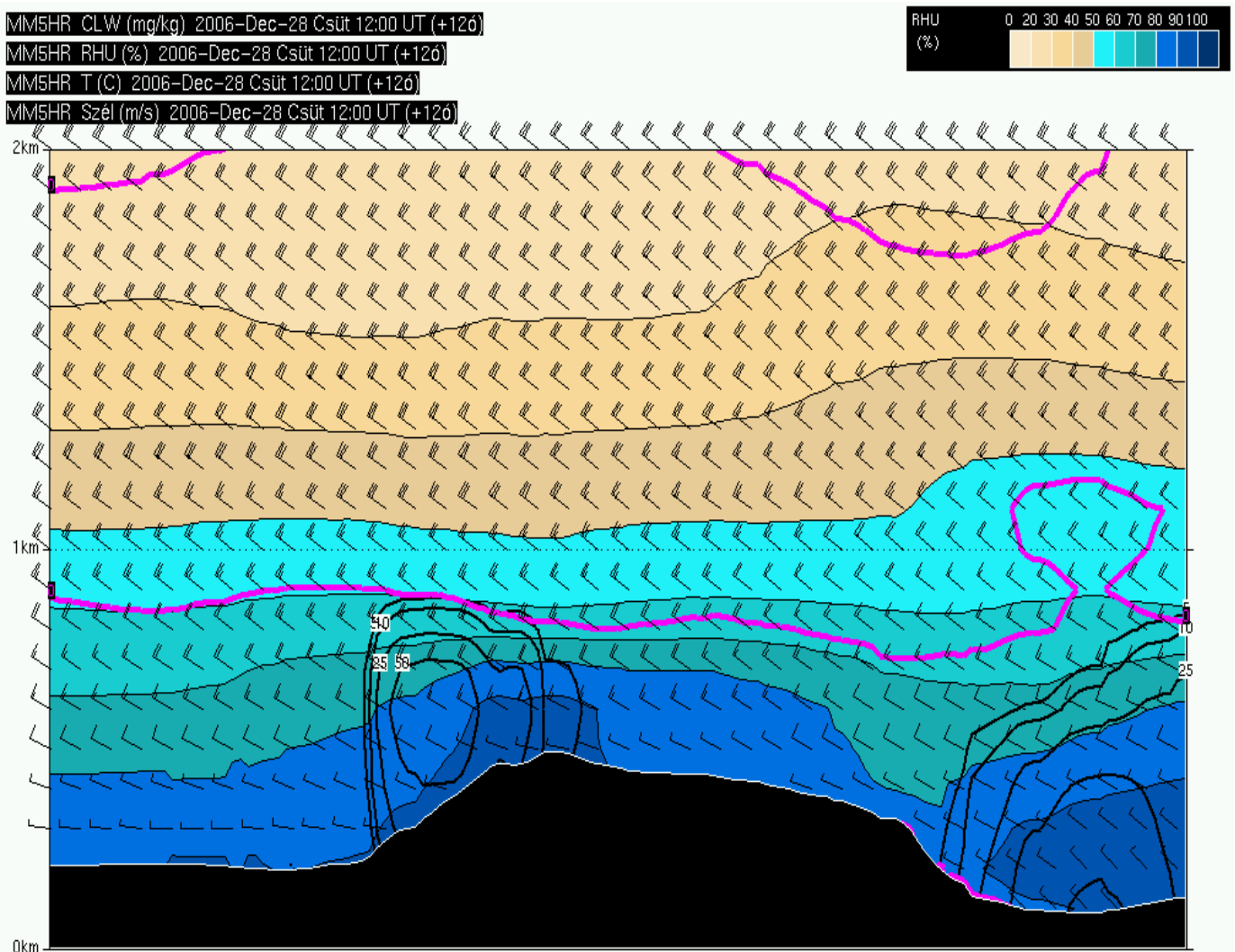


16. ábra: az MM5 modell orográfiája 2,5 km-es felbontással, és a megrajzolt keresztmetszet

Az ábrán feltüntettük a 2006. december 28. 12 UTC-re vonatkozó előrejelzéseket: folyékony felhővíztartalom (CLWC), a relatív nedvesség (RH), hőmérséklet (T) és szél. A fekete vonalak jelzik a CLWC értékeket, a lila vonalak a 0°C -os izotermát, a sávok a relatív nedvesség értékeit, míg a szélzászlók a szél irányát és nagyságát. Jól látható az ábrán, hogy a hegyek nyugati oldalán az orográfia emelkedésre kényszerítette az áramló levegőt. Az alsó 0°C -os izoterma alatt a hőmérséklet negatív, majd a kb. 1 és 2 km közötti sávban pozitívvá válik. E felett ismét átvált negatívvá. Érdekességképp megfigyelhető, hogy a modell előrejelzése szerint a hegy szélárnýékos oldalán egy kis főn jellegű kiszáradás alakul ki. A hegy ezen oldalán a lebukó szél hőmérséklete a száraz adiabata

mentén melegszik, ennek hatására a talaj közelében, a hegy lábánál egy kis területen a hőmérséklet pozitívvá válhatott (17. ábra). Az ábrán megjelenő időjárási kép a valóságnak megfelelő volt az adott napon.

Az esettanulmányhoz fénykép is készült. A fotó 2006. december 28-án készült a Nagy-Kevélyen. Budapesttől észak-nyugatra helyezkedik el, 534 méter magas hegycsúcs. A fényképen látható zúzmara az ágakra délnyugati irányból rakódott le. Vastagsága kb. 1.5 cm körül volt. A zúzmara a 27-ről 28-ára virradó éjszaka rakódott le, előtte a hegycsúcs kilógott a sztrátusz felhőzet fölé. Az éjszakai órákban borította csak be teljesen a hegycsúcsot is. A lerakódás ezen időperiódus alatt képződött.



17. ábra: az MM5-HR modellel készített előrejelzés (CLWC, relatív nedvesség, hőmérséklet, szél) a Pilis megadott keresztmetszetében 2006. december 28. 12 UTC-re



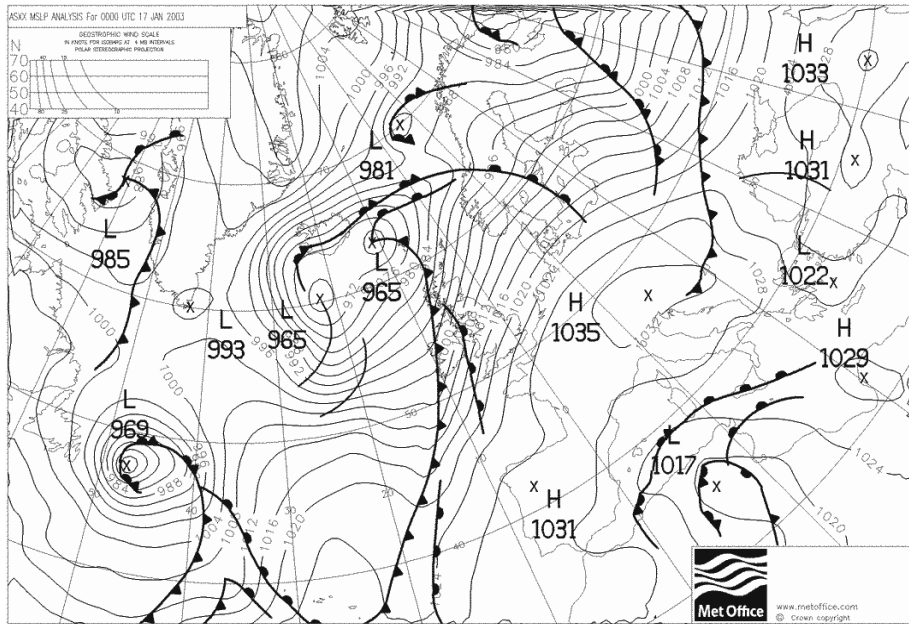
1. kép: zúsmarakerakódás a Nagy-Kevélyen , 2006.december 28. A zúsmara vastagsága: 1,5 cm, iránya megfelel az MM5 által szimulált nyugatias áramlásnak.

11. 2003. január 13-23-i események elemzése

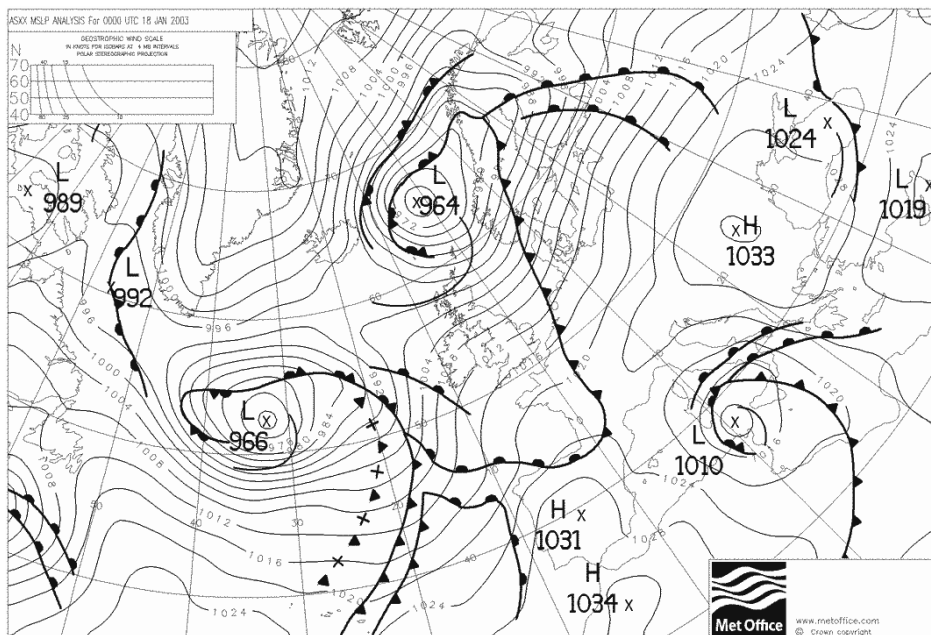
Mivel a 2006/2007-es téli időszak időjárása nem tette lehetővé, hogy tartósan olyan helyzet alakuljon ki hazánkban, ami kedvez a zúzmara lerakódásának, ezért egy régebbi szituációt kellett kiválasztottunk vizsgálatainkhoz.

A 2003. január 13-23. közötti időszakban Európa nagy részének időjárását egy markáns anticiklon uralta, ami fokozatosan kelet felé húzódott. A Kárpát-medence időjárását is ez az anticiklon befolyásolta. (18-20. ábra) Ennek következtében kialakult a hideg légpárna, amit két esetben is egy-egy hidegfront zavart meg (január 16-án és 19-én). Ezek hatására a középső és délnyugati országrészben felszakadozott a felhőzet, a köd feloszlott, és több órára kisütött a nap. A hőmérséklet 5 és 7 °C közé emelkedett. Ezzel ellentétben az északkeleti területeken a hidegfront nem éreztette jelentősen hatását, nem tudta a hideg légpárnát felszakítani. Itt továbbra is borult maradt az idő, a köd tartósan megmaradt. A hőmérséklet emiatt jelentősen nem változott, mindvégig 0 °C alatti értékeket figyeltek meg. A nedves, ködös idő, a fagypont alatti hőmérséklet, és a légmozgás tartósan jó feltételeket biztosított a zúzmara képződéséhez.

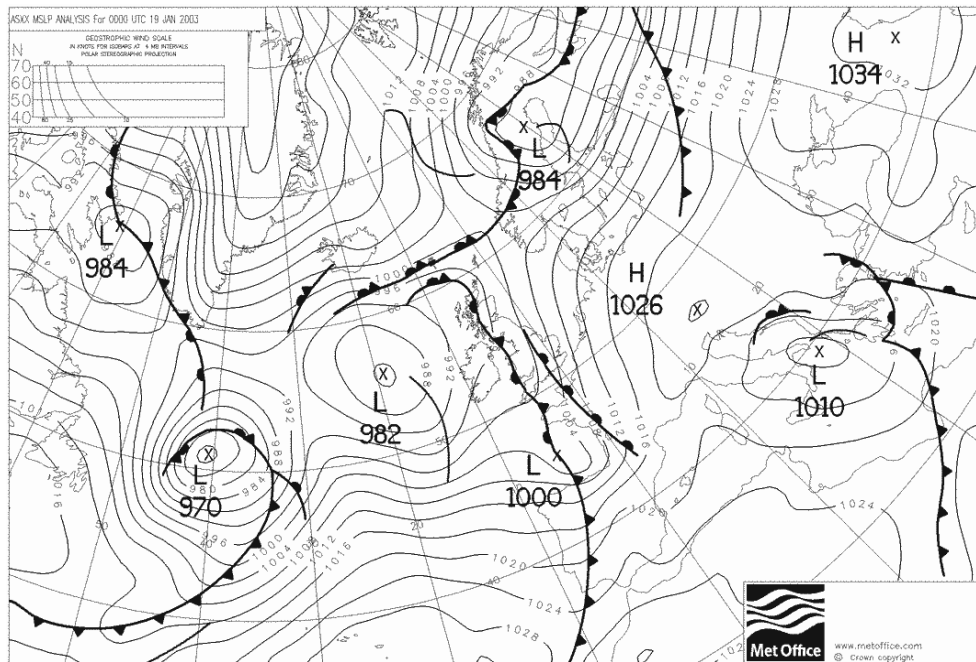
Munkánk célja ebben a fejezetben, hogy megvizsgáljuk, hogy az MM5 modell (6km-es felbontással, 24 vertikális σ -szintre (Horváth, 2005.)) milyen pontossággal tudja előrejelezni a felhőn belüli jegesedés kialakulásához szükséges feltételeket. Mivel 2003 elejéről nem állt rendelkezésre operatív futtatás, ezért erre az időintervallumra a megfelelő kezdeti- és peremfeltételekkel újra kellett futtatni a modellt. Az előző esettanulmányban említett parametrizációs beállítások annyiban különböznek a mostanitól, hogy ebben az esetben egy másik talaj parametrizációt alkalmaztunk. A Noah Land-Surface többrétegű parametrizáció helyett egy olyan parametrizációt alkalmaztunk, ami 5 rétegű talajt feltételez (1,2,4,8,16 cm mélyen vannak a rétegek). Ezek alatt a hőmérséklet állandónak tekinthető. A különböző rétegek hőmérsékletét a modell számolja ki, nem input adatként szerepelnek. További különbség, hogy ebben az esetben 2,5 km-es és 6 km-es rácsfelbontással is dolgoztunk az előző 2,5 km-es helyett.



18. ábra: Európa időjárás helyzetképe, 2003. január 17. 00 UTC



19. ábra: Európa időjárás helyzetképe, 2003. január 17. 00 UTC



20. ábra: Európa időjárás helyzetképe, 2003. január 17. 00 UTC

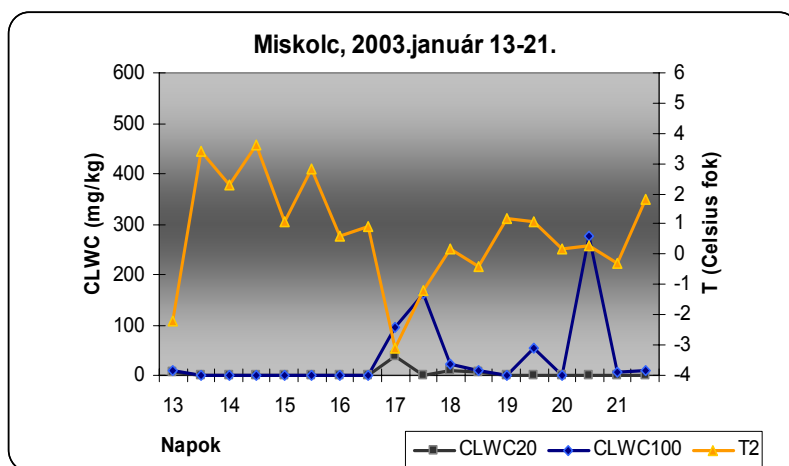
A modellfutattásokból kapott eredményeket diagramokon ábrázoltuk, amelyeken feltüntettük a folyékony felhővíz mennyiségét 20 méteres, illetve 100 méteres magasságban, valamint a 2 méteres hőmérsékletet. Ezeket a 16., 17., 18., 20., 22. és 24. diagramokon láthatjuk Miskolc és Szeged állomásokra. Ahhoz, hogy meg tudjuk mondani mennyire pontosan jelezte előre a modell az eseményeket, az egyes állomások megfigyeléseit is ábrázoltuk (19., 21., 23. és 25. diagram). A 2 méteres hőmérsékletet, a 10 méteres szélsőséget és a látástávolságot használtuk fel vizsgálatunkhoz. Két napot választottunk ki az említett hosszabb időintervallumból, mert jelentősebb zúzmarakerakódás ekkor történt (Molnár, 2003.), amit a modell előrejelzései is alátámasztottak. Az egész időszakra vonatkozó CLWC és hőmérséklet előrejelzések a 16. és 17. diagramokon láthatóak. A kiválasztott két nap 2003. január 17-18. A 3. és 4. táblázatban a mért zúzmaravastagság, akkumulált zúzmaravastagság és annak tömege látható. A mérések alátámasztják, hogy valóban ekkor rakódott le a legtöbb zúzmar.

Miskolc			
Nap	Vastagság	Akkumulált vastagság	Akkumulált tömeg (g/m)
2003.január 15.	44	44	10
2003.január 17.	34	34	10
2003.január 18.	36	38	16

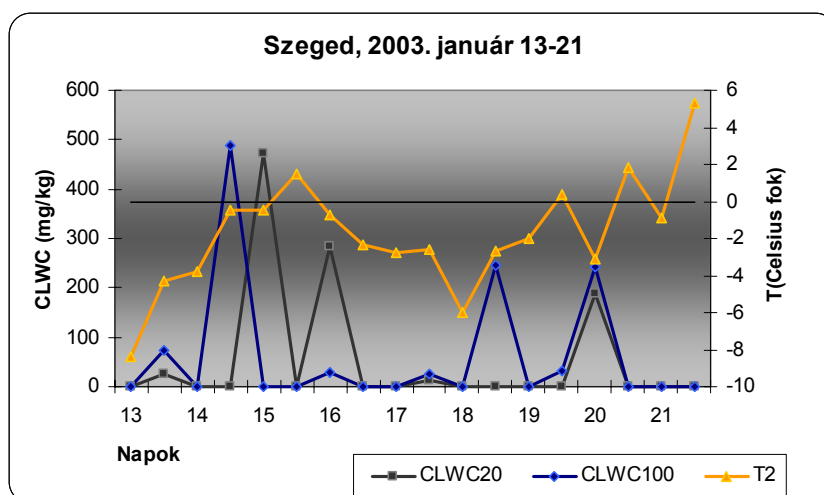
3. táblázat: 2003. január 13.-23. között mért zúzmaravastagsága, akkumulált zúzmaravastagsága és annak tömege (g/m) Miskolcon (nem szereplő napokról nincs adat)

Szeged			
Nap	Vastagság	Akkumulált vastagság	Akkumulált tömeg (g/m)
2003.január 17.	34	39	12
2003.január 18.	36	40	18
2003.január 19.	34	36	6
2003.január 20.	34	34	6
2003.január 21.	37	38	10
2003.január 22.	37	38	10

4. táblázat: 2003. január 13.-23. között mért zúzmara vastagsága, akkumulált zúzmara és annak tömege (g/m) Szegeden (nem szereplő napokról nincs adat)



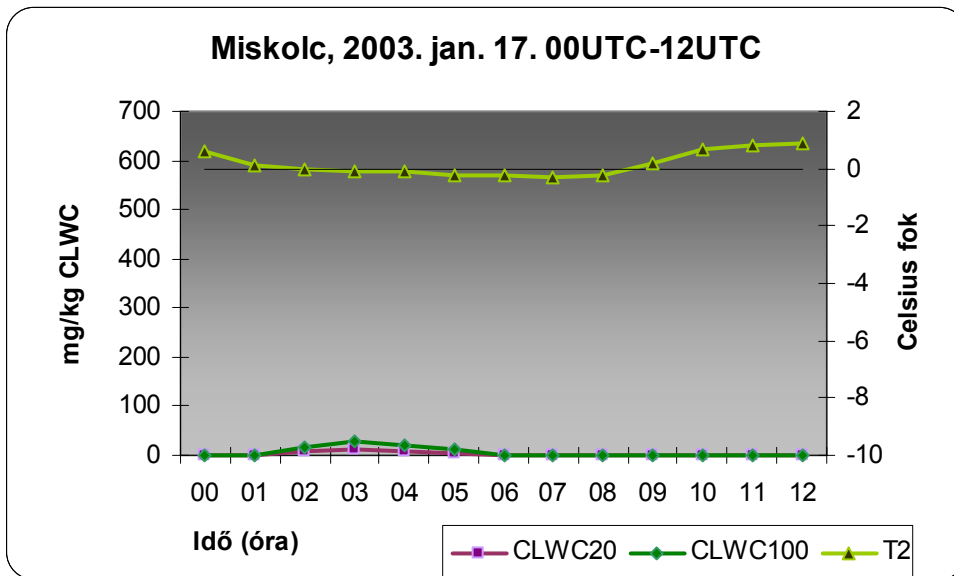
16. diagram: MM5 modell által készített folyékony felhővíz-mennyiség és 2 méteres hőmérséklet előrejelzés Miskolcra, 2003. január 13-22. közötti időszakra



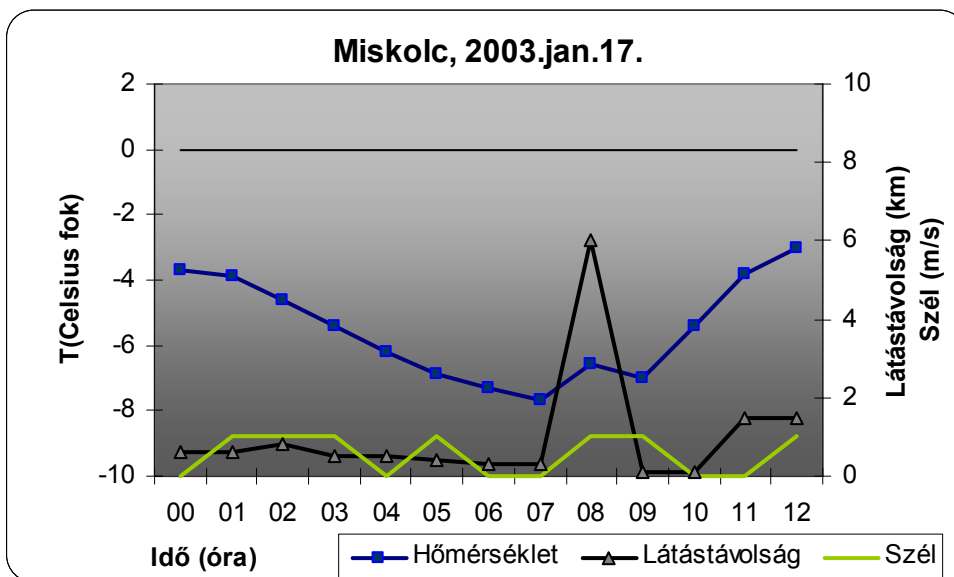
17. diagram: MM5 modell által készített folyékony felhővíz-mennyiség és 2 méteres hőmérséklet előrejelzés Szegedre, 2003. január 13-22. közötti időszakra

17-én Miskolcon a modell szerint zúzmaraképződéshez megfelelő körülmények alakultak ki kb. 1 UTC és 6 UTC között. A megfigyelések ezt az előrejelzést támasztották alá, mivel kb. 7 UTC-ig a látástávolság 50 méter, a hőmérséklet pedig 0 °C alatt volt. (18. és 19. diagram). 18-ára vonatkozó előrejelzések (20. diagram) is megközelítőleg egyeztek a valóságban bekövetkezett eseményekkel (21. diagram). A 12 órás időszak alatt megfelelőek voltak a körülmények zúzmara képződéséhez Miskolcon.

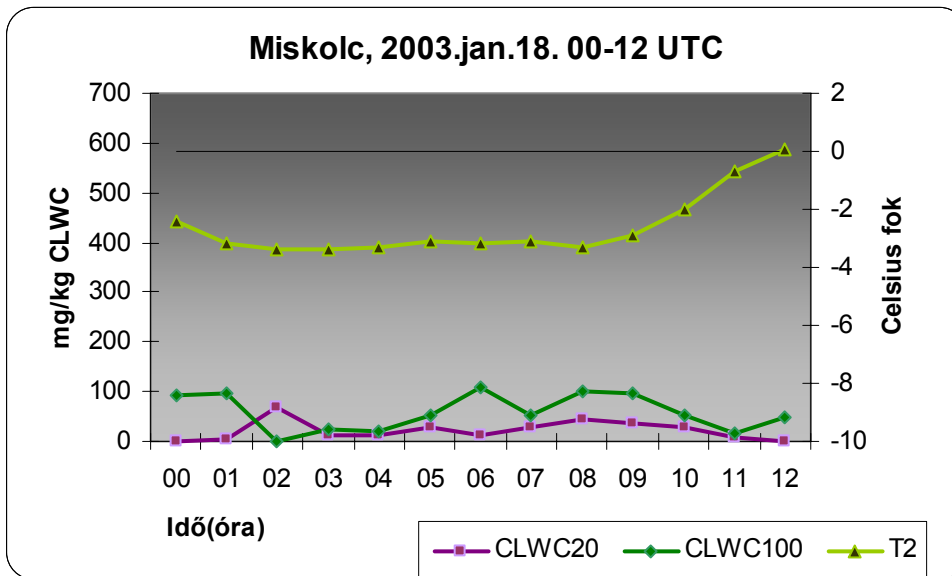
Szeged esetében 17-én a modell szerint két rövidebb, pár órás intervallumban (0–2 UTC és 3–5 UTC) alakultak ki megfelelő körülmények zúzmara képződéséhez, amit a 22. diagram mutat. A megfigyelések ebben az esetben nem ezt támasztották alá (23. diagram). A látástávolság 0 UTC-től hirtelen leromlott és az időszak végéig (12 UTC-ig) 1 km alatt maradt. Emellett a hőmérséklet jóval 0 °C alatt alakult, ami megfelelő körülményeket biztosított a zúzmara lerakódásához. 18-ára azonban az előrejelzés jónak bizonyult kivéve a 00 és 02 UTC közötti rövid időszakot (24. diagram). Ekkorra a modell sem 20 méteren, sem 100 méteren nem jelzett folyékony felhővíz mennyiséget, ugyanakkor a megfigyelések alapján a látástávolság 50-100 méter között változott, ami alapján köd jelenlétére következtethetünk. (25. diagram). Összefoglalásként elmondhatjuk, hogy a modellnek sikerült, néhány rövidebb intervallumtól eltekintve, előrejelezni túlhűlt köd kialakulását és fennmaradását.



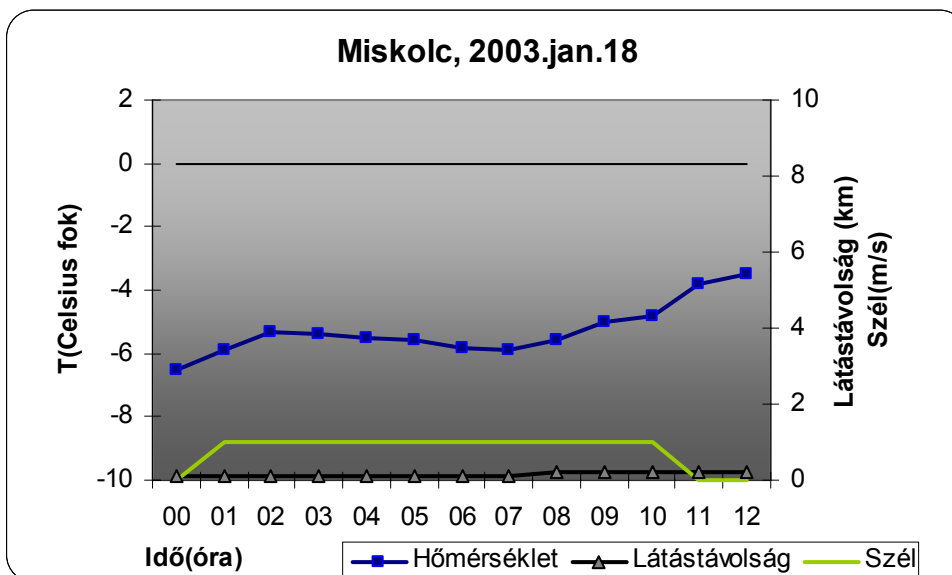
18. diagram: MM5 modell által készített folyékony felhővíz-mennyiség és 2 méteres hőmérséklet előrejelzés Miskolcra, 2003. január 17.-re 00-12 UTC közötti időszakra



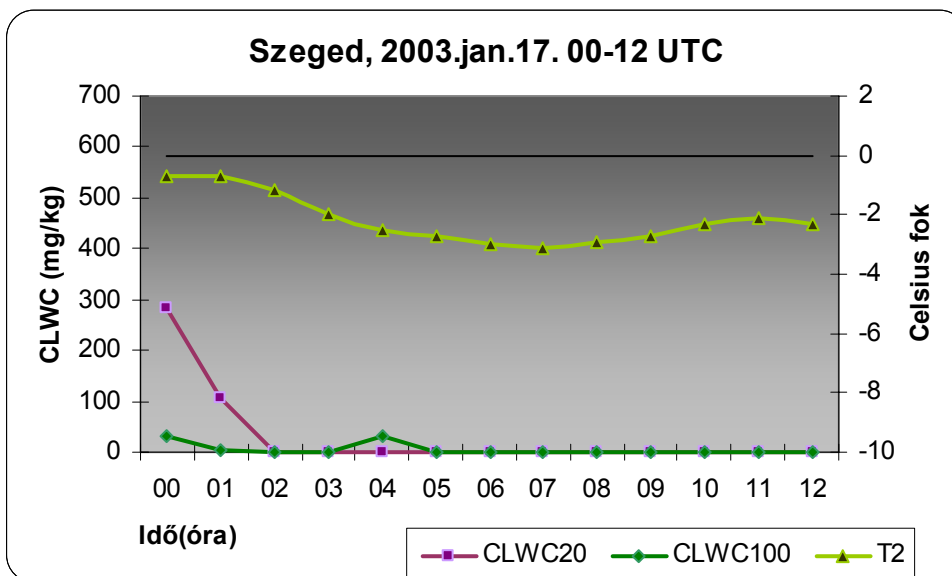
19. diagram: 2003.január 17. 00 és 12 UTC közötti észlelések Miskolcon (2 méteres hőmérséklet, látástávolság, szélsebesség)



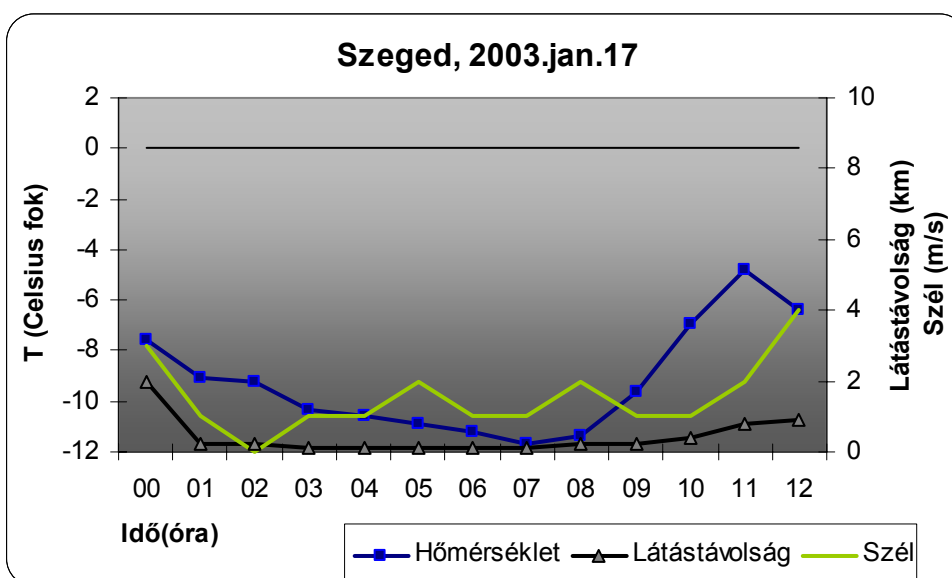
20. diagram: MM5 modell által készített folyékony felhővíz-mennyiség és 2 méteres hőmérséklet előrejelzés Miskolcra, 2003. január 18.-ra 00-12 UTC közötti időszakra



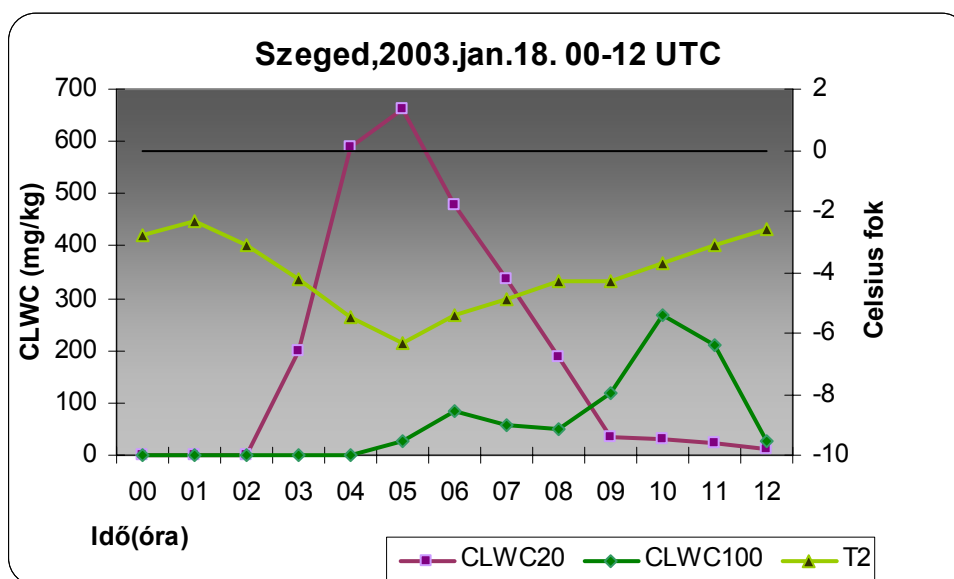
21. digram: 2003. január 18. 00 és 12 UTC közötti észlelések Miskolcon (2 méteres hőmérséklet, látástávolság, szélsebesség)



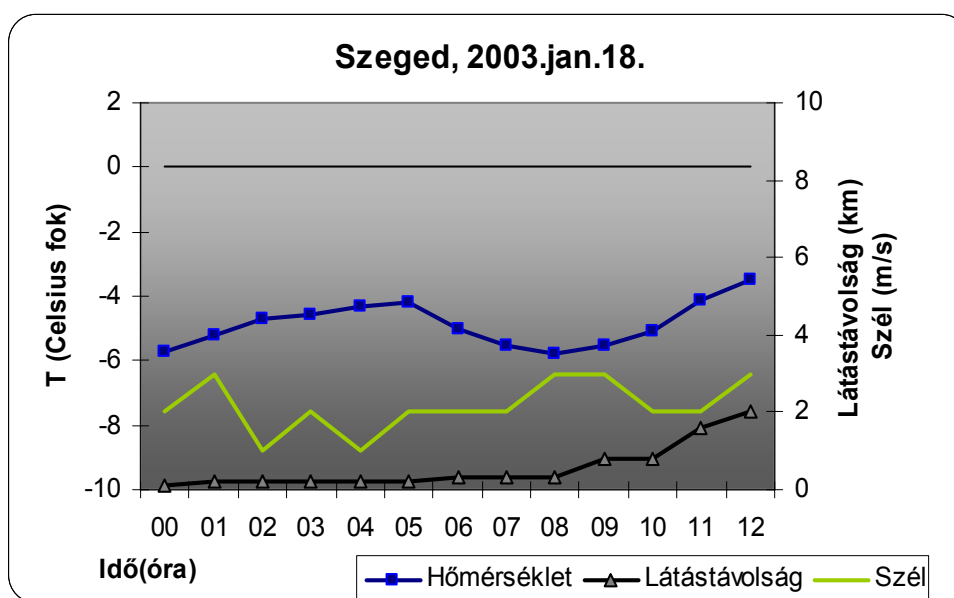
22. diagram: MM5 modell által készített folyékony felhővíz-mennyiség és 2 méteres hőmérséklet előrejelzés Szegedre, 2003. január 17.-re 00-12 UTC közötti időszakra



23. diagram: 2003. január 17. 00 és 12 UTC közötti észlelések Szegeden (2 méteres hőmérséklet, látástávolság, szélsebesség)



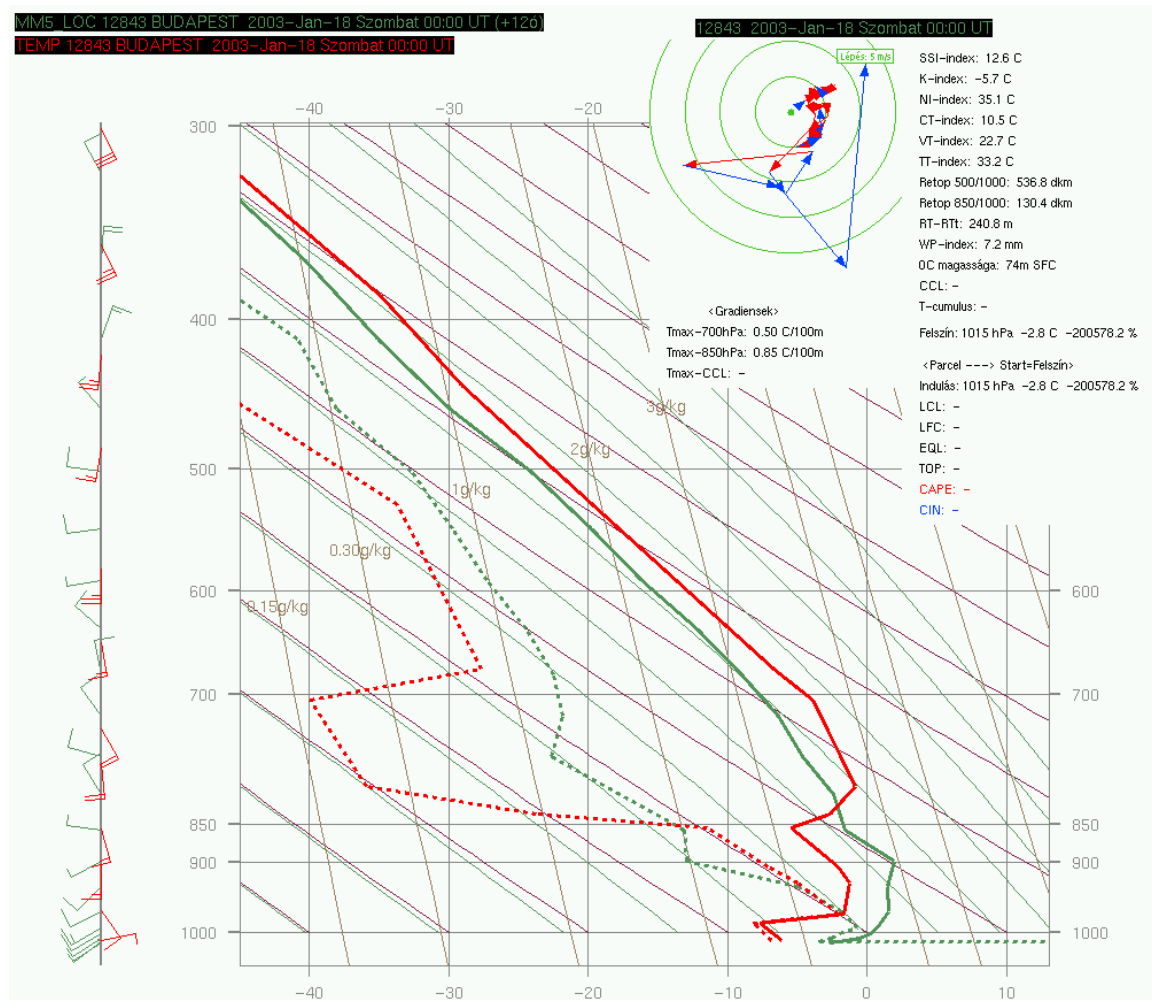
24. diagram: MM5 modell által készített folyékony felhővíz-mennyiség és 2 méteres hőmérséklet előrejelzés Szegedre, 2003. január 18.-re 00-12 UTC közötti időszakra



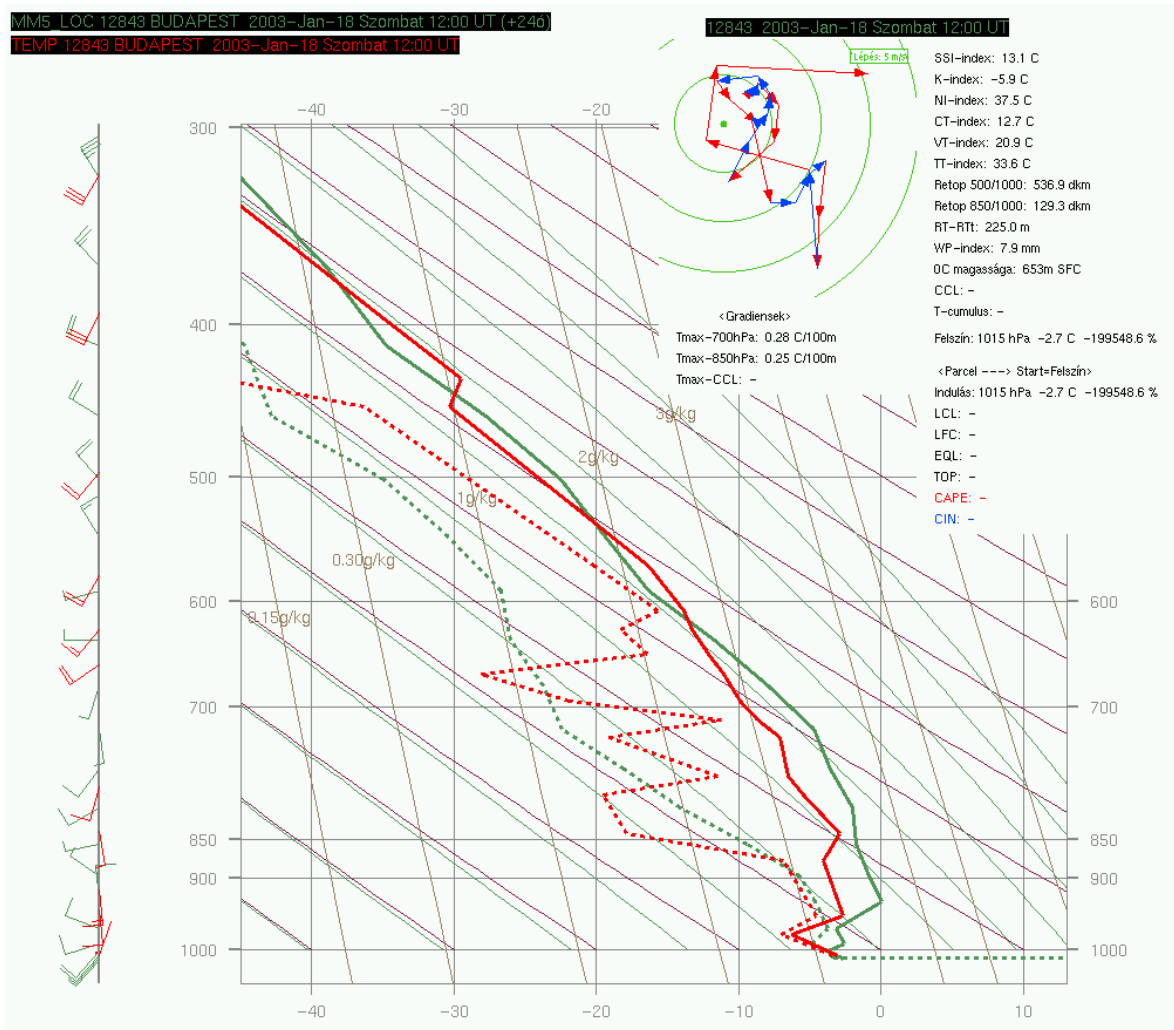
25. diagram: 2003. január 18. 00 és 12 UTC közötti észlelések Szegeden (2 méteres hőmérséklet, látástávolság, szélsebesség)

A következőkben szeretnénk bemutatni, hogy az MM5 által előrejelzett vertikális profil mennyire egyezik meg a valóságban mért rádiószondás értékekkel. A modell és a felszállás adatai egyaránt Budapestre vonatkoznak. A 23-25. ábrákon a piros vonalak jelzik a valós rádiószondás méréseket, a zöld vonalak az MM5 által készített előrejelzést. A szaggatott vonal a harmatpont görbét, míg a folytonos a hőmérsékleti görbét jelenti.

Az ábrákon jól látható, hogy az MM5 által készített előrejelzés megegyezik a valóságban bekövetkezett eseményekkel. Igaz, hogy a 21. ábrán a modellben magasabb hőmérsékletek jelennek meg, de még így is a 0 fokos izoterma alatt van a görbe a talaj közelében. A 22. ábrán pedig már sehol sem válik pozitívvá a hőmérséklet a légeoszlopban. Inverzió kialakulását jelezte a modell mindkét vizsgált időpontban, amit a valós felszállások alátámasztottak. Az inverziós réteg vastagsága kb. 300-400 m volt. A hőmérsékleti és harmatponti görbe alapján megállapítható, hogy túlhűlt köd alakult ki.



21. ábra: Rádiószondás felszállás (piros) és MM5 által készített előrejelzés (zöld), 2003. január 18. 00 UTC, túlhűlt köd jelenlétére utal mindkét felszállás



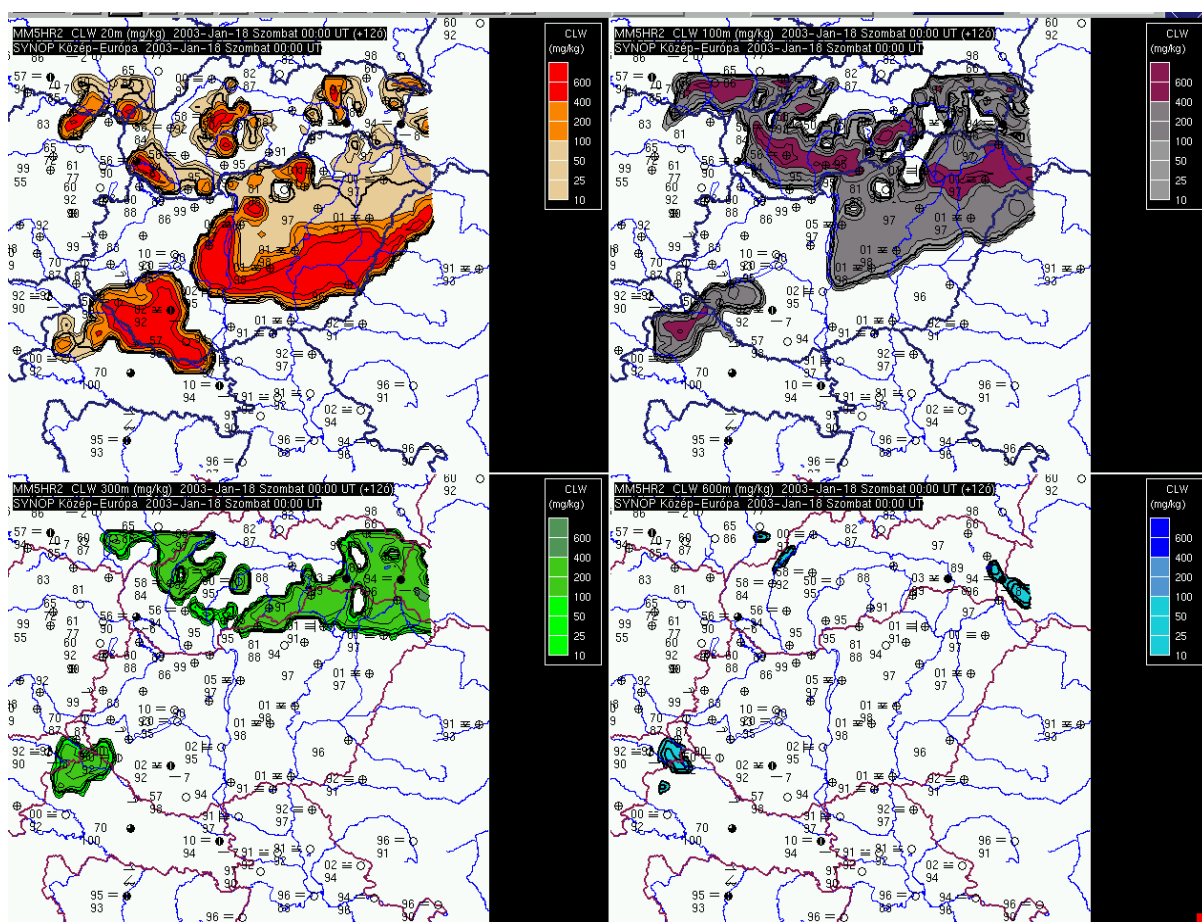
22. ábra: Rádiószondás felszállás (piros) és MM5 által készített előrejelzés (zöld)
2003. január 18. 12 UTC, túlhűlt köd jelenlétére utal mindkét felszállás

Szeretnénk bemutatni, hogy a folyékony felhővíz-mennyiség hogyan alakult 2003. január 18-án. A 23-25. ábrák 1. képén a 20 méteres CLWC-t ábrázoltuk (piros), 2. képen a 100 méteres (lila), 3. képen a 300 méteres (zöld), 4. képen pedig a 600 méter (kék) magasságban lévő folyékony felhővíz-mennyiséget ábrázoltuk. Ezek a modell előrejelzései. Az ábrákon feltüntettük az állomások által készített, adott időpontra vonatkozó SYNOP jelentéseket is. A 23. ábrán láthatjuk, hogy a CLWC nagy koncentrációban az alsó 100 méteres légrétegben az ország északkeleti részében található. A nap folyamán azonban a köd megemelkedett, és a magasabb rétegekbe helyeződött át a maximális koncentráció (24. és 25. ábra). A jelentések alapján azt mondhatjuk, hogy a modell 00 UTC-kor jól jelezte, hogy az ország északkeleti részében túlhűlt köd található, azonban az észlelések alapján kiderül, hogy a déli országrészben is kialakult zúzmarás köd. 06 UTC-s előrejelzés azt mutatja, hogy a köd délkelet felé húzódik, és az északkeleti

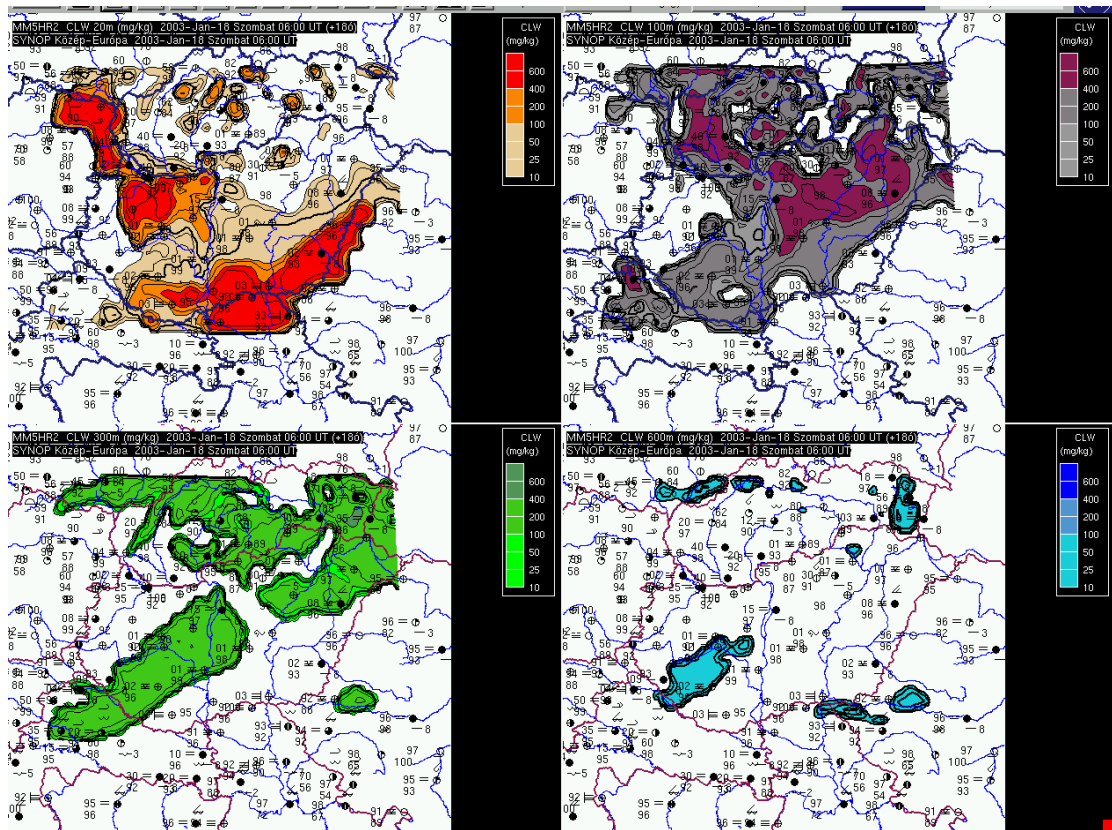
területeken megemelkedik. A jelentések szerint viszont ott megmaradt a túlhűlt köd továbbra is, amiből zúzmara is képződött.

12 UTC-re a modellben felemelkedik a köd, és a legnagyobb koncentrációk a 100 és 300 méteres magasságban találhatók meg. A megfigyelések alapján azonban az országban ködös maradt az idő, a középső, déli és délnyugati részében zúzmaralerakódás is történt.

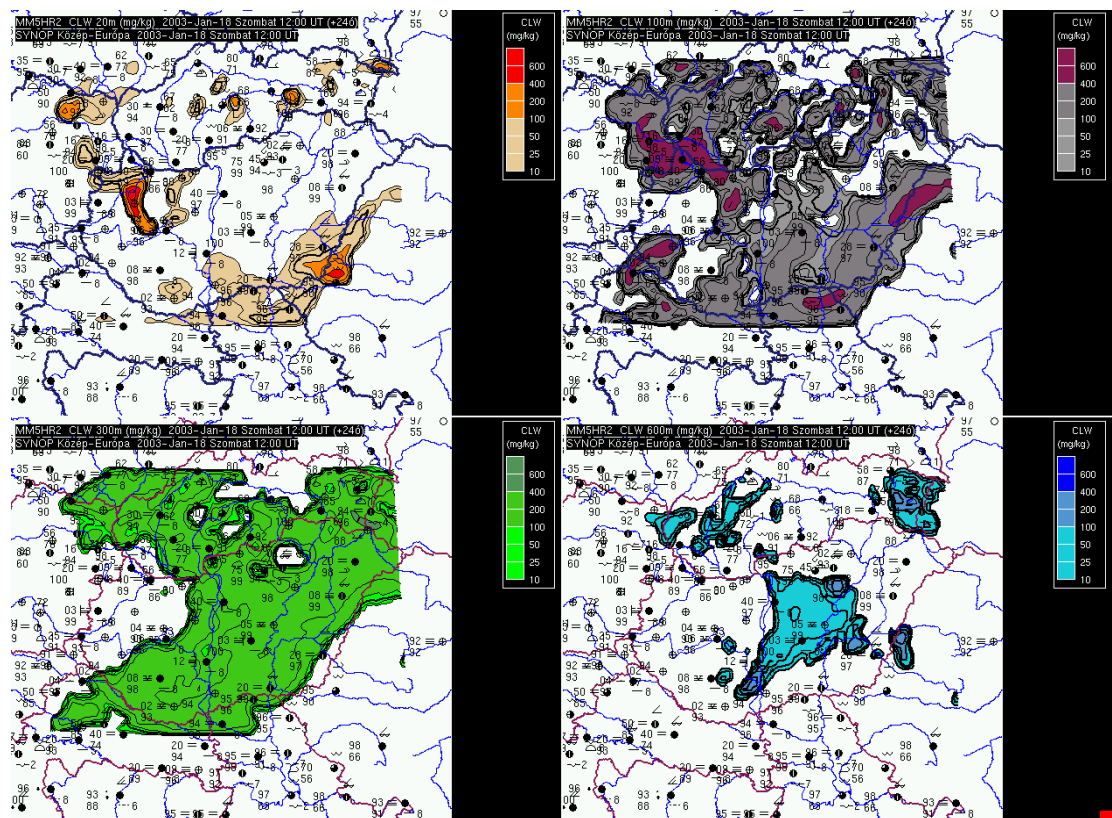
Összességében elmondhatjuk, hogy a modell a nap első részére nagy pontossággal jelezte előre a köd területi eloszlását, a későbbiekben azonban a köd megemelkedését prognosztizálta, amit az észlelések nem támasztottak alá.



23. ábra: Az MM5 modell által készített folyékony felhővíz-mennyiség előrejelzése 20m, 100m, 300m és 600 m magasságban, 6 km-es felbontással, 2003. január 18. 00 UTC-re

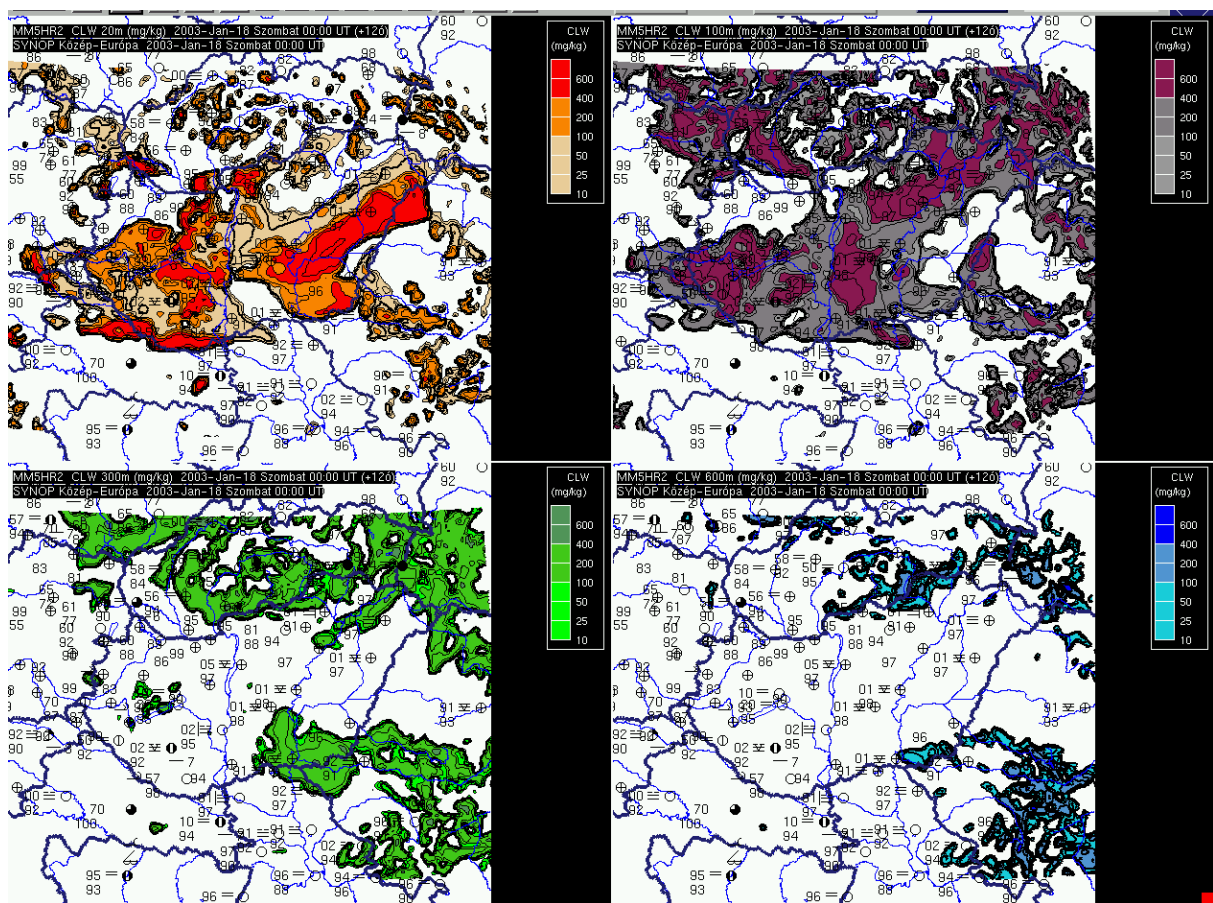


24. ábra: Az MM5 modell által készített folyékony felhővíz-mennyiség előrejelzése 20m, 100m, 300m és 600 m magasságban, 6 km felbontással, 2003. január 18. 06 UTC-re



25. ábra: Az MM5 modell által készített folyékony felhővíz-mennyiség előrejelzése 20m, 100m, 300m és 600 m magasságban, 6 km felbontással, 2003. január 18. 12 UTC-re

Érdekesnek találtuk megvizsgálni, hogy 2006. január 17-18.-ra vonatkozó futtatások milyen eredménnyel szolgálnak, ha a felbontást 2,5 km-re finomítjuk. A parametrizáció korábban említett beállításain nem változtattunk. Az eredményektől azt várjuk, hogy a finomabb felbontás miatt a domborzat hatása jobban érvényesül, illetve az előrejelzések területi eloszlása pontosabb lesz. A 26. ábrán a 2003. január 18. 00UTC-re vonatkozó folyékony felhővíz-tartalom előrejelzését láthatjuk 20 m (piros), 100 m (lila), 300 m (zöld) és 600 m (kék) magasságban. Összevetve a 23. ábrával azt tapasztalhatjuk, hogy a finomabb felbontás a CLWC területi eloszlását változtatta meg, a mennyiségében nincs szignifikáns különbség a 20 méterre vonatkozó ábrán. A 300 és 600 méteres magasságban azonban a 2,5 km-es esetben nagyobb mennyiségben található meg a CLWC az adott időpontra vonatkozó előrejelzésben.

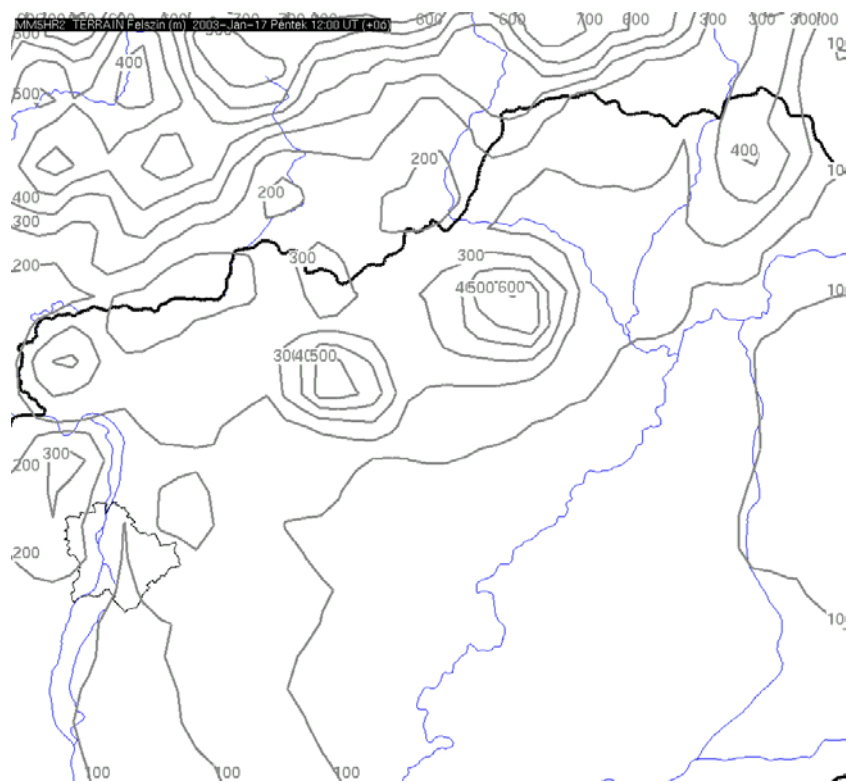


26. ábra: Az MM5-HR modell által készített folyékony felhővíz-mennyiség előrejelzése 20m, 100m, 300m és 600 m magasságban, 2,5 km-es felbontással, 2003. január 18. 00 UTC

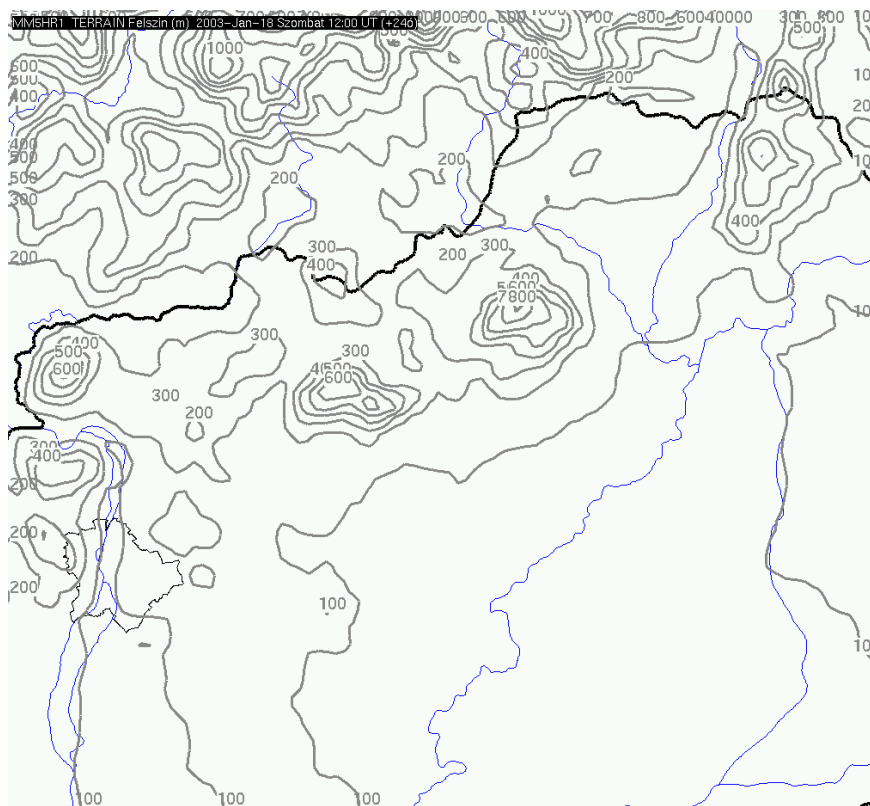
Mivel a négyablakos ábrákon, amelyek a CLWC-t és a megfigyeléseket ábrázolják, nem látható jól, hogy a finomabb felbontás (2,5 km-es) megjelenése hogyan befolyásolja a

köd, illetve a CLWC eloszlását, ezért elkészítettünk egy, az Északi- középhegységre vonatkozó kivágatot, ahol jól érzékelhető a két futtatás közötti különbség. A 27.-28. ábrán a 6 km-es, illetve 2,5 km-es futtatáshoz tartozó orográfiaát mutatjuk be. A finomabb felbontás miatt a második esetben a hegységek magassága jobban reprezentálja a tényleges domborzatot. Ugyanerre a kivágatra ábrázoltuk a 2003. január 18. 00UTC-re vonatkozó folyékony felhővíz-mennyiség és szélmező előrejelzéseket (29-30. ábra).

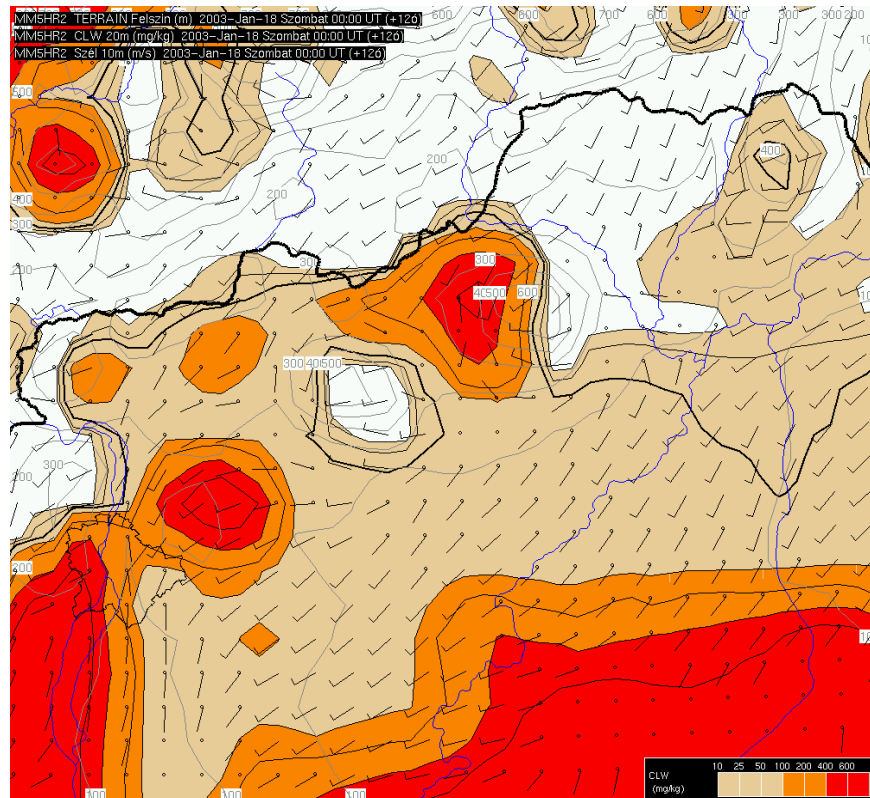
A 2003. január 18. 00UTC-re vonatkozó előrejelzések keresztmetszeti képét is elkészítettük. A 31. ábrát a 6 km-es futtatás eredményei alapján rajzoltuk meg, míg a 32. ábrát a 2,5 km-es eredmények alapján. Szembetűnő különbség van az egyes modellekben alkalmazott orográfia között, ami miatt a CLWC előrejelzésekben is különbségek adódtak a hegyvidéki területeken. A 32. ábrán láthatjuk, hogy a Bükk hatására megemelkedő levegőben felhalmozódott a hegy csúcsának közelében a folyékony felhővíz-mennyiség, valamint az is észrevehető, hogy a hegyek jelenléte miatt a 31. ábrán még összefüggő köd szétdarabolódott az orográfia hatására. A körülmények (negatív hőmérséklet, köd és enyhe légáramlás) azonban mindkét esetben kedveztek felhőn belüli jegesedés kialakulásához. Sajnos a modellfuttatások eredményeit nem tudjuk leellenőrizni, mivel nem áll rendelkezésre az adott területről megfelelő mennyiségű mérés, megfigyelés.



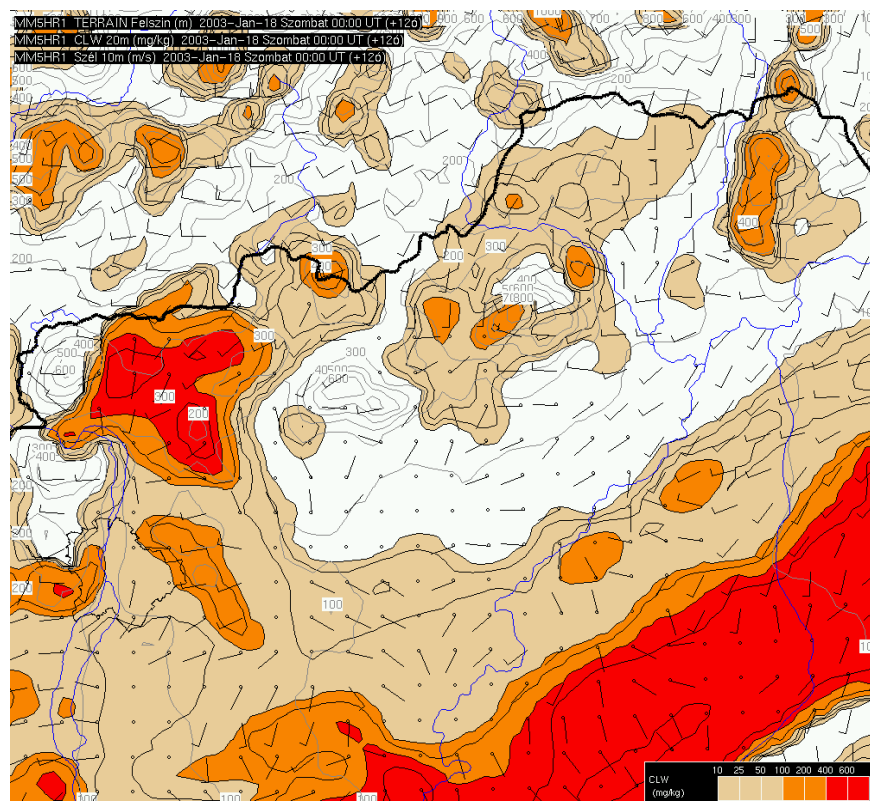
27. ábra: az MM5 modell orográfiája 6 km-es felbontással



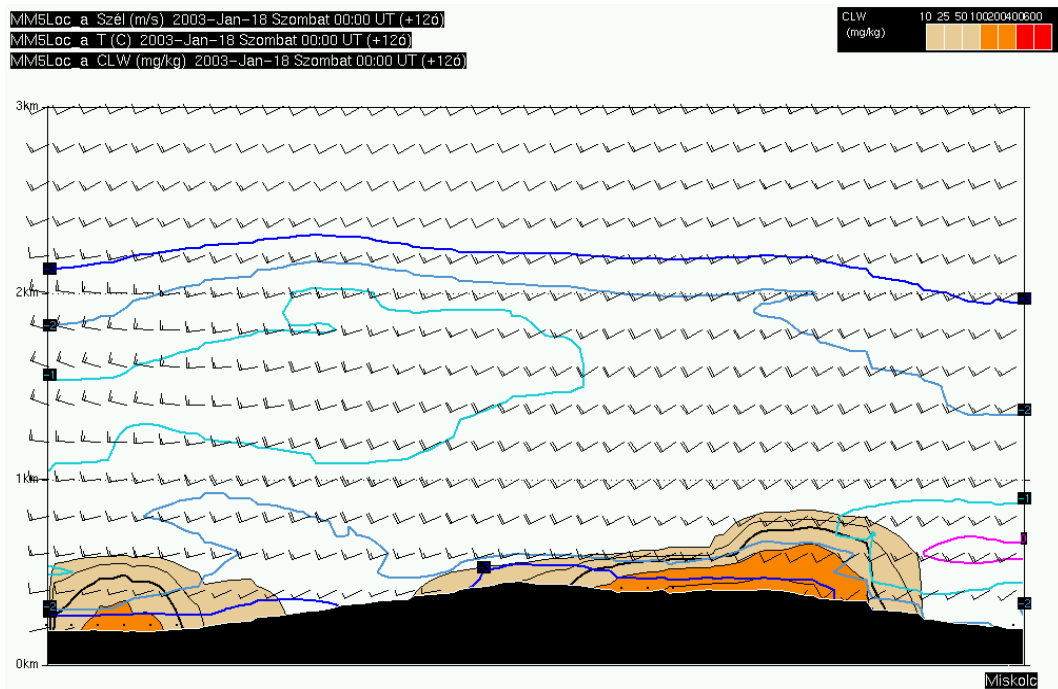
28. ábra: az MM5 modell orográfiája 2,5 km-es felbontással



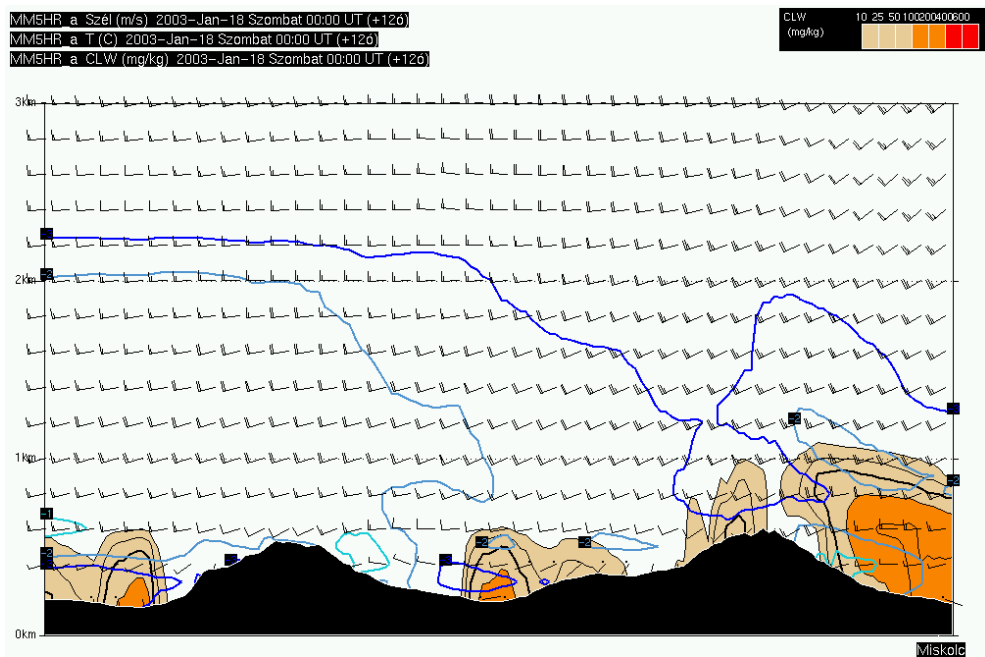
29. ábra: MM5 modell által készített folyékony felhővíz-mennyiség és szélmező előrejelzés (6 km-es felbontással) Mátra- Bükk kivágatra, 2003.január 18. 00UTC-re



30. ábra: MM5 modell által készített folyékony felhővíz-mennyiség és szélmező előrejelzés (2,5 km-es felbontással) Mátra- Bükk kivágatra, 2003.január 18. 00UTC-re



31. ábra: az MM5 modellel készített előrejelzés (CLWC, hőmérséklet, szél) a Mátra-Bükk megadott keresztmetszetében 2003. január 18. 00 UTC-re



32. ábra: az MM5-HR modellel készített előrejelzés (CLWC, hőmérséklet, szél) a Mátra-Bükk megadott keresztmetszetében 2003. január 18. 00 UTC-re

12. Összefoglalás

Dolgozatunkban célul tűztük ki, hogy a jegesedés többféle formája közül kifejezetten a zúzmarára fókuszálva az ECMWF és az MM5 numerikus modellek előrejelezhetőségét megvizsgáljuk. Munkánkban röviden összefoglaltuk a numerikus modellek fejlődésének történetét, az ECMWF numerikus modell parametrizációs eljárását a folyékony felhővíz-tartalomra és felhőborítottságra nézve. Bemutatásra kerültek a munkánk során felmerült problémák, megoldásuk, majd eredményeink.

Két állomást, Szegedet és Kékestetőt választottuk ki a felhőn belüli jegesedés vizsgálatához az ERA40 adatbázis alapján. Az eredmények elemzésekor feladatunkat három részre bontottuk. Az első részben azzal a feltételezéssel éltünk, hogy ha a hőmérséklet negatív és a relatív nedvesség 70%, 75%...stb. küszöbérték felett van, akkor jegesedés következik be. A második részben a relatív nedvesség helyett a folyékony felhővíz- tartalmat adtuk meg küszöbértékként. Ha a modellben 20mg/kg vagy 50mg/kg felett volt a CLWC és negatív volt a hőmérséklet, akkor jegesedést feltételeztünk. E két pont eredményei táblázatok és diagramok formájában az I. és II. mellékletben találhatóak. Munkánkban 4 év téli periódusai alapján, a két kiválasztott állomásra kapott eredmények összehasonlítását mutattuk be. A verifikációs mutatók segítségével arra az eredményre jutottunk, hogy a modell az esetek nagy részében nem találja el azt a meteorológiai paraméter-együttest egyik állomás esetében sem, amelyek együttesen okozhatják zúzmarák kialakulását. Ezt annak tulajdoníthatjuk, hogy viszonylag nagy az olyan esetek száma, amikor az orografikus emelésnek köszönhető a felhőképződés. Ezzel magyarázható, hogy az alföldi állomás esetében jobb eredményeket kaptunk. Másrészt az ERA40 reanalízisek térbeli felbontása miatt nem várhatóak el ennél jobb eredmények.

Megvizsgáltuk két esettanulmány segítségével (2003. január 13-23. és 2006. december 27-28.), hogy az MM5 modell előrejelzései mennyire reprezentatívak a felhőn belüli jegesedés előrejelezhetőségére. A 2006. decemberi szituációt 2,5 km-es felbontással, míg a 2003. januári esetre vonatkozó esettanulmányt 2,5 illetve 6 km-es felbontással is megvizsgáltuk. Ebben az esetben össze is hasonlítottuk az eredményeket. Ezekkel az esettanulmányokkal bizonyossá vált előttünk, hogy a modell potenciálisan alkalmas lehet zúzmarák előrejelzésére. A nagyon finom felbontásnak köszönhetően megjelennek a domborzati hatások is, ami szintén egy fontos befolyásoló tényezője zúzmarák

kialakulásának. Az esettanulmányokban kapott eredmények meggyőztek bennünket arról, hogy a zúzmarára vonatkozó előrejelzések fejlesztését érdemes ez utóbbi eszközre alapozni.

13. További terveink

Szeretnénk az MM5 modell rácsfelbontásán finomítani (1 km-es felbontásra), és az eddigi eredményeinket ennek tükrében is megvizsgálni.

Céljaink között szerepel egy olyan séma konstruálása vagy adaptálása, ami lehetővé teszi, hogy az operatív gyakorlatban az előrejelző közvetlenül információt kaphasson a zúzmaraképződés mennyiségéről és intenzitásáról. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál a végfelhasználói produktumok (előrejelzések, riasztások) elkészítésének láncába beépíthető eljárásokat szeretnénk létrehozni.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Kolláth Kornélnak és Molnár Lászlónak, valamint tanszéki konzulensemnek, Dr. Gyuró Györgynek ötleteikért és építő hozzászólásaikért. Köszönettel tartozom Horváth Ákosnak az MM5 modell futtatásában nyújtott segítségéért, valamint Kövér Zsuzsának az adatokhoz való hozzáféréért. Meg szeretném köszönni Hirsch Tamásnak programozásban nyújtott segítségét. Továbbá köszönet az Országos Meteorológiai Szolgálat minden munkatársának, akik észrevételeikkel, és technikai segítséggel hozzájárultak diplomamunkám elkészítéséhez.

Meg szeretném köszönni Dr. Ács Ferencnek hasznos tanácsait.

Irodalomjegyzék

Ahti K.: Icing Forecasts (COST 727, Sofia, 2005.)

Ahti K., Makkonen L.: Observation on rime formation in relation to routinely measured meteorological parameters (Geophysica, 19(1): 75-85, 1982.)

Csomor Mihály: A hazai zúzmaramérések eredményei. (Léggör, 1979. 4.sz. 10-14.)

Csomor Mihály: A magyarországi zúzmaramérések első eredményei. (Időjárás, 1972. 3. sz. 151-159.)

Csomor Mihály: A zúzmara megfigyelése. (Léggör, 1975. 3. sz. 70-71.)

Csomor Mihály: Klimatikus viszonyok a zúzmara képződése után. (Léggör, 1982. 3. sz. 90-95.)

Csomor Mihály, Friedrich János, Rezsőfi Ferenc: A zúzmaralakerakódások meteorológiai folyamata és hatása a távvezetésekre. (Léggör, 1983. 4. sz. 6-13.)

Csomor Mihály, Kissné Tóth Erzsébet: A zúzmara megfigyelésének fontosságáról. (Léggör, 1966. 3. sz. 63-64.)

Csomor Mihály, Zárbok Zsolt: A zúzmara akkumulált tömegének várható értéke. (Léggör, 1984. 4. sz. 20-21.)

Dobesch H., Nikolov D., Makkonen L.: Physical Processes, Modelling and Measuring of Icing Effects in Europe (Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Bécs, 2005.augusztus)

Draft Report COST 727 Work Group 2 (2005.)

Drage M.A., Hauge G.: Calculation of Clod Water Content in a Coastal Mountainous Terrain-Measurements and Numerical Simulations, a Case Study (Geophysical Research Abstracts, 2004.)

EUMETSAT MSG Interpretation Guide honlapja:
oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/index.html

Fikke S. et al.: COST 727: Atmospheric Icing on Structures Measurements and data collection in icing: State of the Art (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, 2007.)

Geresdi István: Felhőfizika (Dialóg Campus Kiadó, Budapest-Pécs, 2004.)

Götz G., Rákóczi F.: Dinamikus meteorológia (Tankönyvkiadó, Budapest, 1981.)

Hajósy F.: A zúzmaráról. (Légkör, 1965. 4. sz. 89-91.)

Horváth Á.: Az MM5 modell és alkalmazása az ultrarövidtávú előrejelzésekben (Országos Meteorológiai Szolgálat kiadványa, 2005.

ISO 12494 (ISO: the International Organization for Standardization 12494- Atmospheric Icing of Structures, 2001.)

Jolliffe I.T., Stephenson D. B.: Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Sciences (Wiley, 2003.)

Lambert K.: A zúzmaraképződés szinoptikus klimatológiai feltételei. (Légkör, 1983. 1. sz. 17-19.)

Lozowski E.P., Makkonen L.: Fifty Years of Progress in Modelling the Accumulation of Atmospheric Ice on Power Network Equipment (the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWAIS XI., Montreal, 2005.)

Makkonen L.: Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures (Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 358. 2913-2939, 2000.)

MM5 időjárás előrejelző modell honlapja: www.mmm.ucar.edu/mm5

Molnár László: A zúzmaraképződés szinoptikus klimatológiája és környezeti hatásai Magyarországon (szakdolgozat, ELTE TTK Meteorológia Tanszék, 2003.)

Nurmi P.: Recommendations on the verification of the local weather forecasts (Consultancy Report, ECMWF Operations Department, October 2003.)

Olafsson H., Eliasson A.J., Thorsteins E.: Orographic Influence on Wet Snow Icing (the 10th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWAIS 2002.)

Otta Endréné: A zúzmara előrejelzése. (Időjárás, 1953. 1. sz. 8-19.)

Poots G.: Ice and Snow Accretion on Structures (Research Studies Press LTD., Tauton, England, 1996.)

Tammelin B., Santti K.: Icing in Europe (BOREAS IV, Finnish Meteorological Institute, Hetta, 1998.)

Tóth K.: Zúzmaraképződés előrejelezhetősége numerikus modell outputok alapján (TDK dolgozat, 2007.)

Wantuch F.: Visibility and fog forecasting based on decision tree method (Időjárás, 2001, Vol. 105, 29-38)

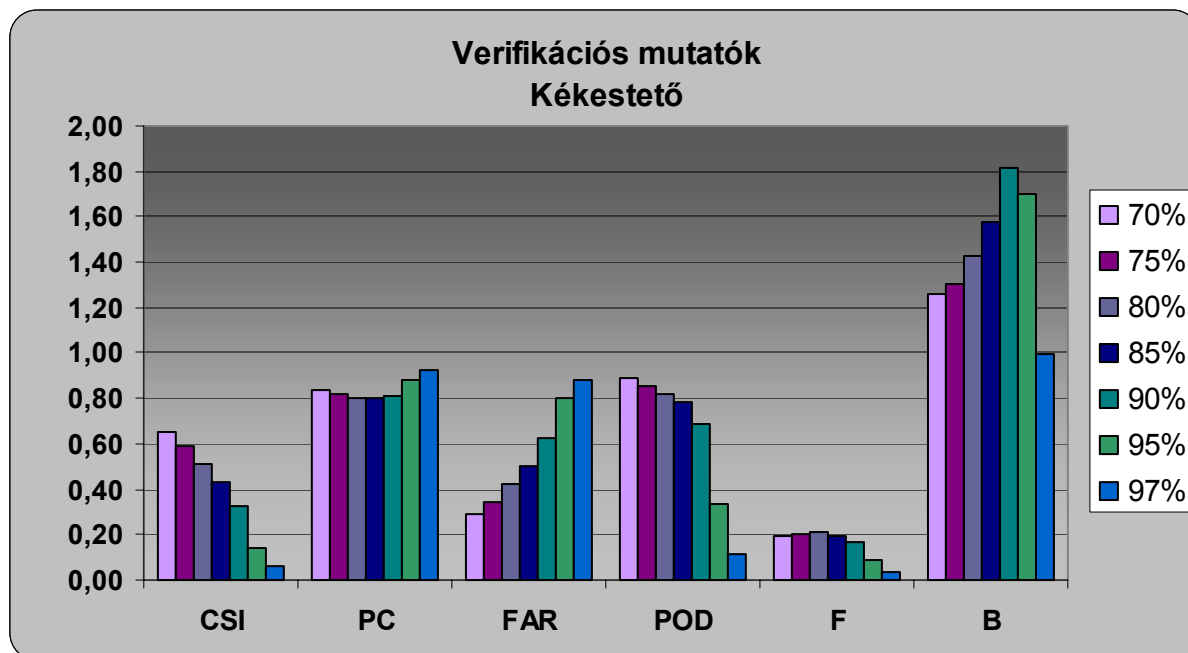
Wright B.J., Thomas N.: An objective visibility analysis and very-short-range forecasting system, Meteorol. Appl. 5, 157-182, 1998.)

I. melléklet

Kékestető állomásra végzett vizsgálat az ERA40 adatbázis alapján

Relatív nedvesség	PC	CSI	POD	FAR	F	B
>70%	0,84	0,65	0,89	0,29	0,20	1,26
>75%	0,82	0,59	0,86	0,34	0,20	1,30
>80%	0,80	0,51	0,82	0,43	0,21	1,42
>85%	0,80	0,43	0,78	0,51	0,19	1,58
>90%	0,81	0,32	0,69	0,62	0,17	1,81
>95%	0,88	0,14	0,33	0,80	0,09	1,70
>97%	0,93	0,06	0,12	0,88	0,04	0,99

I/1. táblázat: verifikációs mutatók értékei különböző relatív nedvesség küszöbértékek mellett Kékestető állomásra

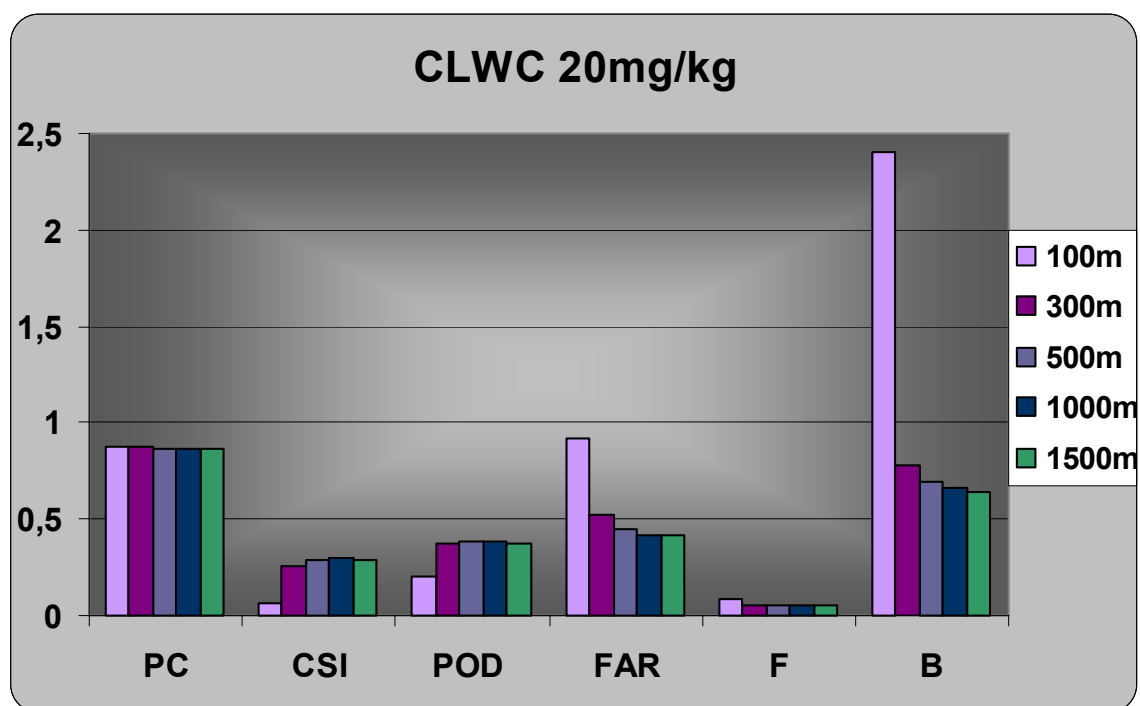


I/1. diagram: Verifikációs mutatók különböző relatív nedvesség küszöbértékek mellett Kékestető állomásra

CLWC 20 mg/kg

	PC	CSI	POD	FAR	F	B
<50m	0,89	0,02	0,11	0,97	0,09	4,08
<100m	0,88	0,06	0,2	0,92	0,09	2,4
<300m	0,88	0,26	0,37	0,52	0,05	0,78
<500m	0,87	0,29	0,38	0,45	0,05	0,69
<1000m	0,87	0,3	0,38	0,42	0,05	0,66
<1500m	0,87	0,29	0,37	0,42	0,05	0,64

I/2. táblázat: verifikációs mutatók értékei a 20mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Kékestető állomásra

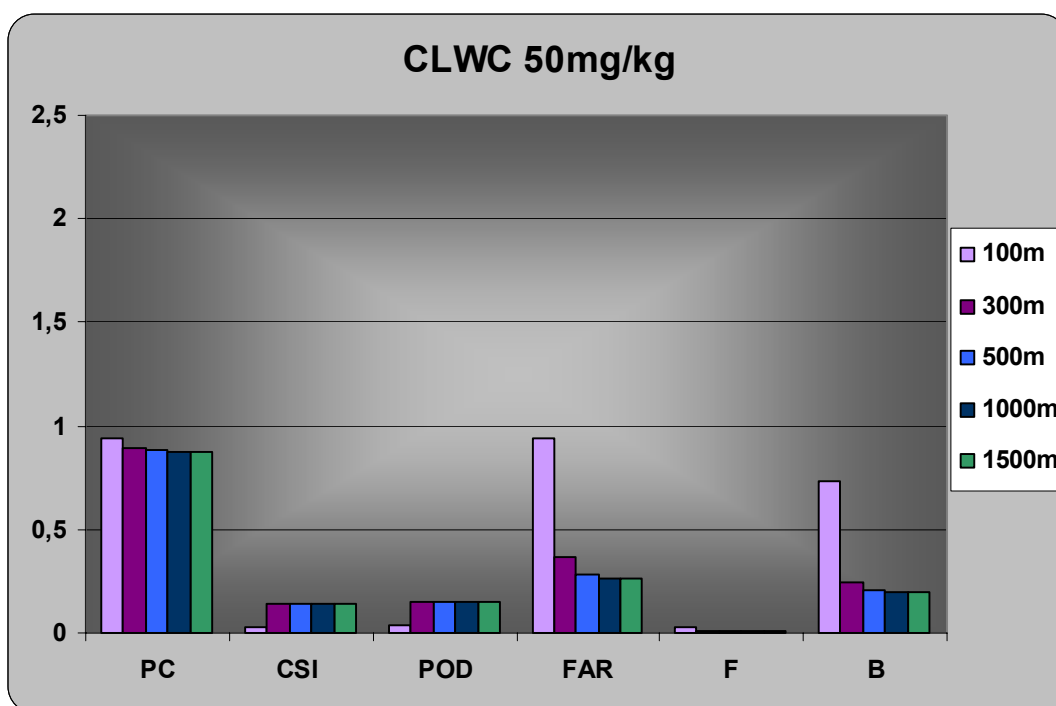


I/2. diagram: a verifikációs mutatók értékei 20mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Kékestető állomásra

CLWC 50 mg/kg

	PC	CSI	POD	FAR	F	B
<50m	0,95	0	0	1	0,03	1,24
<100m	0,94	0,03	0,04	0,94	0,03	0,73
<300m	0,89	0,14	0,15	0,37	0,01	0,24
<500m	0,88	0,14	0,15	0,28	0,01	0,21
<1000m	0,87	0,14	0,15	0,26	0,01	0,2
<1500m	0,87	0,14	0,15	0,26	0,01	0,2

I/3. táblázat: verifikációs mutatók értékei a 50mg/kg CLWC küszöbérték mellett Kékestető állomásra



I/3. diagram: verifikációs mutatók értékei 50mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Kékestető állomásra

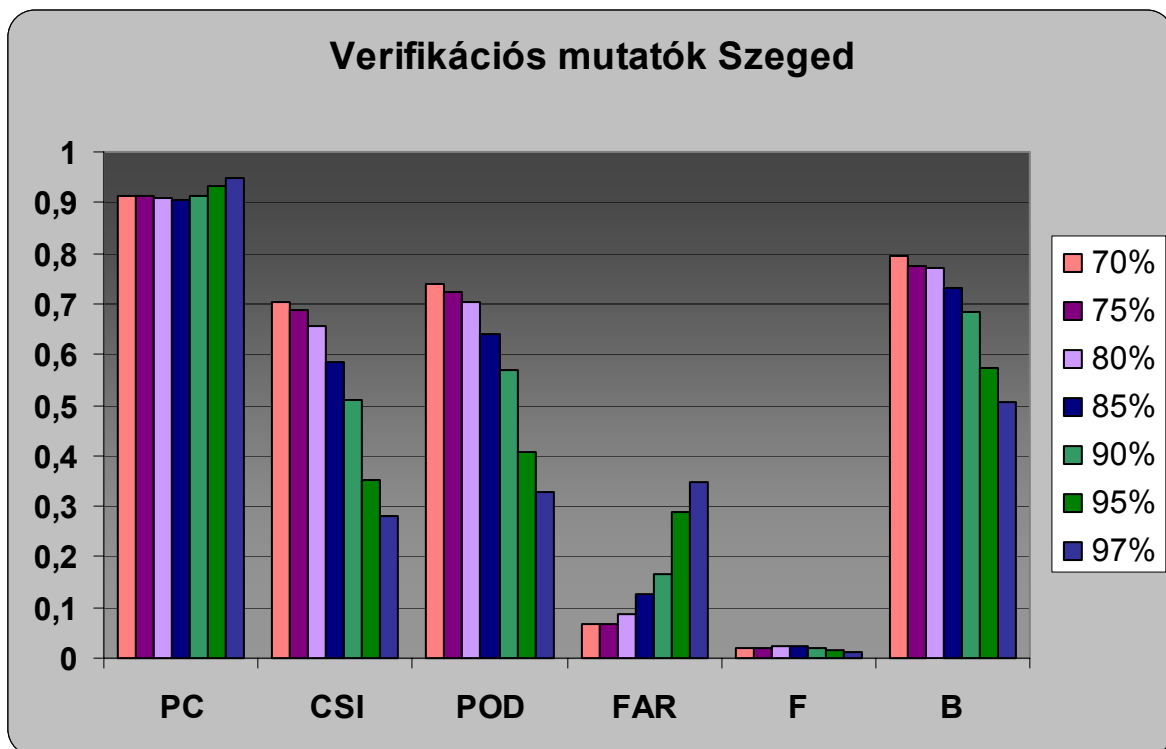
II. melléklet

Szegedi állomásra végzett vizsgálat az ERA40 adatbázis alapján

RH küszöbértékei	PC	CSI	POD	FAR	F	B
>70%	0,91	0,70	0,74	0,07	0,02	0,79
>75%	0,91	0,68	0,72	0,07	0,02	0,77
>80%	0,91	0,66	0,70	0,09	0,02	0,76
>85%	0,90	0,59	0,64	0,13	0,02	0,73
>90%	0,91	0,51	0,57	0,17	0,02	0,68
>95%	0,93	0,35	0,41	0,29	0,02	0,57
>97%	0,95	0,28	0,33	0,35	0,01	0,51

II/1. táblázat: verifikációs mutatók értékei relatív nedvesség küszöbértékek mellett

Szeged állomásra



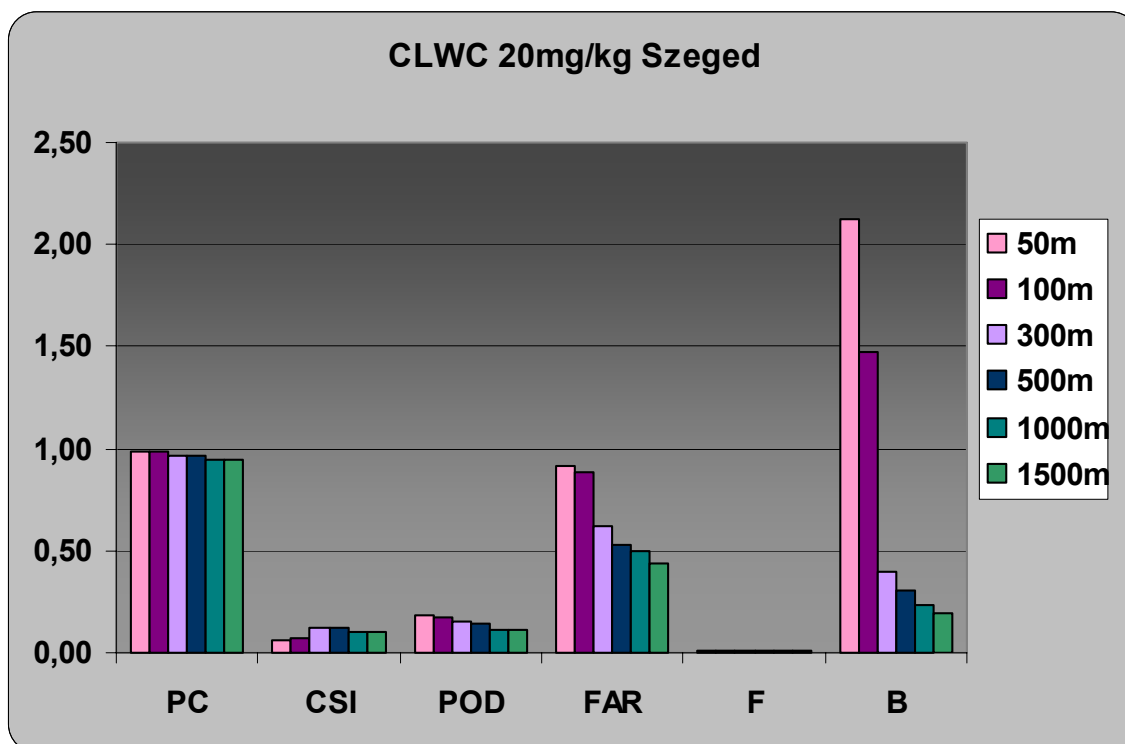
II/1. diagram: Verifikációs mutatók különböző relatív nedvesség küszöbértékek mellett

Szeged állomásra

CLWC 20mg/kg

Látástávolság	PC	CSI	POD	FAR	F	B
<50m	0,98	0,06	0,19	0,91	0,01	2,13
<100m	0,98	0,08	0,17	0,88	0,01	1,48
<300m	0,97	0,12	0,15	0,62	0,01	0,40
<500m	0,96	0,13	0,15	0,53	0,01	0,31
<1000m	0,95	0,10	0,12	0,50	0,01	0,23
<1500m	0,94	0,10	0,11	0,44	0,01	0,19

II/2. táblázat: verifikációs mutatók értékei a 20mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Szeged állomásra

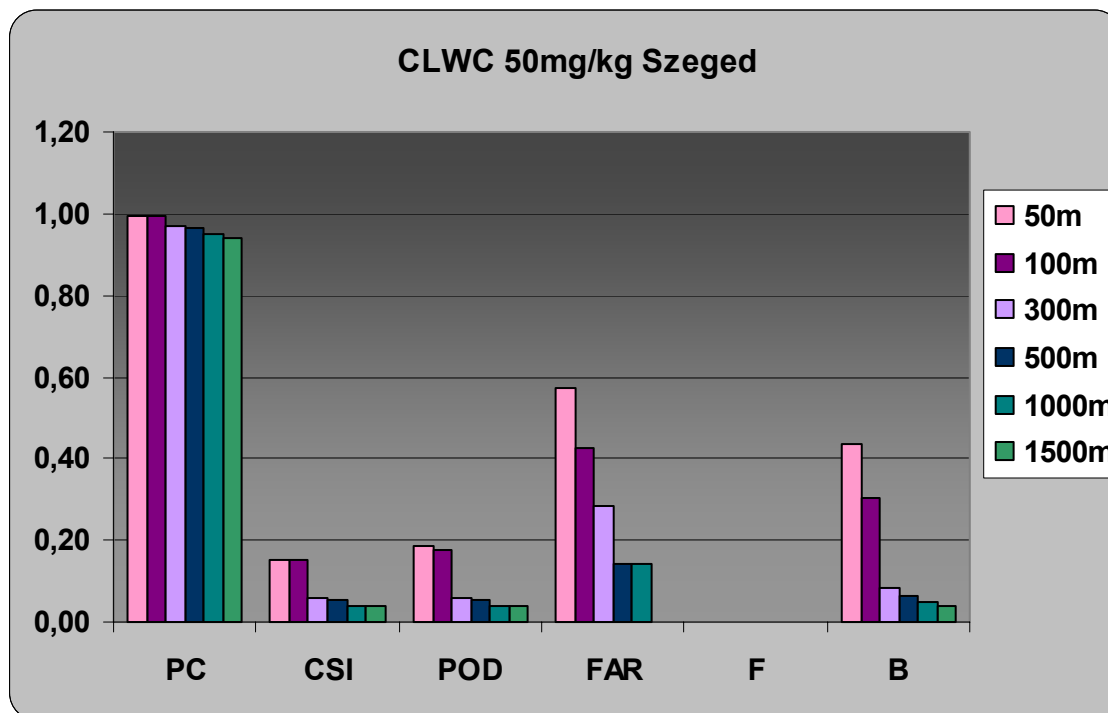


II/2. diagram: verifikációs mutatók értékei 20 mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Szeged állomásra

CLWC 50mg/kg

Látástávolság	PC	CSI	POD	FAR	F	B
<50m	0,99	0,15	0,19	0,57	0,00	0,44
<100m	0,99	0,15	0,17	0,43	0,00	0,30
<300m	0,97	0,06	0,06	0,29	0,00	0,08
<500m	0,96	0,05	0,05	0,14	0,00	0,06
<1000m	0,95	0,04	0,04	0,14	0,00	0,05
<1500m	0,94	0,04	0,04	0,00	0,00	0,04

II/3. táblázat: verifikációs mutatók értékei a 50mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Szeged állomásra



II/3. diagram: verifikációs mutatók értékei 50 mg/kg CLWC és a látástávolság különböző küszöbértékei mellett Szeged állomásra

