

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

A csapadékhalmozállapot-típus valószínűségének becslése ECMWF ensemble előrejelzések alapján

Diplomamunka



Készítette:

Cséke Dóra Csilla

Meteorológus MSc

Időjárás előrejelző szakirány

Témavezető:

Ihász István

Országos Meteorológiai Szolgálat

Tanszéki konzulens:

dr. habil. Barcza Zoltán

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2018

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Az Európai Középtávú Előrejelző Központ determinisztikus és ensemble előrejelzési rendszere.....	5
2.1. Ensemble előrejelzések	5
2.1.1. Az ensemble előrejelzések clusterezése	6
2.2. Az ECMWF előrejelzési rendszere	6
3. A csapadékhalmazállapot-típusok keletkezési mechanizmusa	8
4. A csapadékhalmazállapot-típus előrejelzése	11
4.1. A csapadéktípus előrejelzése az ECMWF modellben.....	11
5. Az OMSZ veszélyjelző rendszere	14
6. Felhasznált adatok és alkalmazott módszerek.....	15
7. A megvalósított fejlesztések rövid összefoglalása	17
7.1. Tetszőleges égtájbeli metszet	17
7.2. Ensemble clusterenkénti megjelenítés grafikon formában.....	18
7.3. Csapadékintenzitás feltüntetése grafikonon	19
7.4. A csapadéktípusok valószínűségének együttes megjelenítése térképen	19
8. Esettanulmányok	20
8.1. A 2017. január 31-i ónos eső.....	20
8.2. A 2018. március 17-18-i ónos eső.....	26
9. Objektív verifikáció.....	31
9.1. Összegzett beválási diagram	31
9.2. Típusfüggő verifikáció	32
10. Összefoglalás.....	34
Köszönetnyilvánítás	35
Irodalomjegyzék.....	36
Függelékek	38
I. Függelék: Determinisztikus előrejelzési térképek 2017. január végére.....	38
II. Függelék: Ensemble vertikális profilok 2017. január végére	42
III. Függelék: A 2015/2016-os tél verifikációs eredményei.....	43

1. Bevezetés

Az időjárás nagymértékben befolyásolja mindennapjainkat. Jövőbeli alakulásának egyre pontosabb ismeretére vonatkozó igény hívta életre a számszerű előrejelzést előállító modelleket, amelyek napjainkban folyamatos fejlesztés alatt állnak az előrejelzések pontosságának javítása érdekében. A numerikus időjárás-előrejelzés nagy kihívást jelentő feladata a csapadéokra vonatkozó előrejelzések készítése. Ezen belül a csapadék halmazállapotának előrejelzése különösen nehéz feladat, mivel az térben és időben igen változékony. Minél pontosabb előrejelzése társadalmi, gazdasági és környezeti vonatkozásai miatt mégis rendkívül fontos (Call, 2010; Bonta, 2017).

2015 májusa óta (Gascón *et al.*, 2017) az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast - Európai Középtávú Előrejelző Központ) modellje hat különböző csapadékhalmazállapot-típust (eső, hó, ónos eső, jégdara, tapadó hó és havaseső) különböztet meg. A csapadék halmazállapotának előrejelzése során különösen fontos az ensemble technika alkalmazása, hiszen ezáltal egy – adott helyzetben veszélyes - időjárási jelenség bekövetkeztének valószínűségéről kapunk információt.

A munkám célja a csapadékhalmazállapot-típusra vonatkozó ECMWF determinisztikus és ensemble előrejelzések átfogó vizsgálata. Ennek keretében vizsgáltam a csapadék-halmazállapot és az egyéb meteorológiai paraméterek kapcsolatát, valamint azt, hogy az ensemble előrejelzések használata milyen többletet adhat a csapadék-halmazállapot előrejelzésében a determinisztikus modellek előrejelzéseikhez képest. Mivel 2015 óta áll rendelkezésre a csapadék-halmazállapot típusára vonatkozó produktum, ezért a munka során a 2015/2016-os, a 2016/2017-es, valamint a 2017/2018-as telet vizsgáltam.

A munka során olyan megjelenítési formákat fejlesztettem, amelyek nagyban segíthetik az előrejelző szakembereket az ensemble előrejelzések információinak értelmezésében és ezáltal a döntéshozatalban. Ezen megjelenítési formák felhasználhatóságát a 2017. január 31-i, valamint a 2018. március 17-18-i ónos esős helyzetet vizsgáló esettanulmányokon keresztül szemléltetem.

A munka részeként objektív determinisztikus verifikációt is végeztem a magyarországi, óránkénti csapadékmérést végző állomások rendelkezésre álló adatainak felhasználásával.

A dolgozatban elsőként bemutatom az ECMWF előrejelzési rendszerét, kitérve az ensemble előrejelzések szükségességére. Ezután bemutatom, hogy milyen légköri állapotok vezetnek az egyes csapadékhalmazállapot-típusok kialakulásához. Ezt követően

röviden ismertetem a csapadékhalmazállapot-típusra vonatkozó előrejelzési módszereket, kitérve az ECMWF csapadéktípus-előrejelzése során alkalmazott parametrizációkra. Ezután röviden bemutatom az Országos Meteorológiai Szolgálat veszélyjelző rendszerét, áttekintem a munka során felhasznált adatokat és az alkalmazott módszereket, majd bemutatom a munka során véghezvitt fejlesztéseket, amelyeknek operatív gyakorlatbeli alkalmazhatóságát két esettanulmányon keresztül mutatom be. Ezután kitérek az objektív verifikáció során kapott eredményekre. A dolgozatot rövid összefoglalással és kitekintéssel zárom.

2. Az Európai Középtávú Előrejelző Központ determinisztikus és ensemble előrejelzési rendszere

2.1. Ensemble előrejelzések

Az időjárás-előrejelzések soha nem lehetnek teljesen pontosak. A számszerű előrejelzések a légkörben végbemenő fizikai folyamatokat leíró hidro-termodinamikai egyenletrendszer matematikai megoldásán alapulnak. A hidro-termodinamikai egyenletrendszer egy parciális differenciálegyenletrendszer, amelynek megoldásához kezdeti- és peremfeltételekre van szükség. Mivel a légköri folyamatok a kezdeti feltételekre igen érzékenyek, ezért azok minél pontosabb meghatározása kiemelkedő fontosságú (*Palmer et al.*, 2006). Az adatasszimiláció során a légkör állapotát leíró megfigyelési információk (földfelszíni megfigyelések, magaslégköri mérések, műholdas mérések, stb.) valamint a háttér mező (a modell korábbi előrejelzése az adott kezdeti feltétel mező idejére vonatkozóan) figyelembe vételével előállított kezdeti feltétel mező a különféle közelítő eljárások alkalmazása miatt nem tükrözi híven a valóságot. Az adatasszimiláció után következik a modell integrálása, amelynek eredménye a kezdeti feltételek pontatlansága, valamint a megoldás során alkalmazott további közelítések miatt nem teljesen pontos.

Ezen probléma kezelésére fejlesztették ki az úgynevezett *ensemble* (együttes) technikát. Ensemble előrejelzés készítése esetén az adatasszimiláció során kapott kezdeti feltételek kis mértékű perturbációjával új kezdeti feltételeket állítanak elő és ezekkel is futtatják a modellt. Az egyes futtatások a modell integrálása során alkalmazott fizikai parametrizációkban is eltérnek egymástól. Ezáltal egy adott időpontra vonatkozóan nem egyetlen előrejelzést kapunk, hanem előrejelzések sokaságát, ebből pedig egy-egy időjárási esemény bekövetkezésének valószínűségéről nyerhetünk információt. A valószínűségi előrejelzés egy ún. kontroll tagból – amelynek kezdeti feltételei megegyeznek a determinisztikus előrejelzés kezdeti feltételeivel – és perturbált tagokból tevődik össze (*Andersson*, 2015).

Az ensemble modell felépítése megegyezik a determinisztikus modell felépítésével, csupán a térbeli felbontásban van eltérés a két modell között, az ensemble előrejelzés felbontása a futási idő csökkentése végett gyengébb (*Owens and Hewson*, 2018).

2.1.1. Az ensemble előrejelzések clusterezése

Annak érdekében, hogy egyetlen ensemble modellfuttatás során kapott többtagú előrejelzés könnyebben áttekinthető legyen, érdemes a tagokat csoportosítani, a hasonló tulajdonságokkal rendelkező tagokat egy csoportba rendezni és együttesen vizsgálni. Az ilyen csoportosításra szolgáló eljárást *clusterezésnek* nevezzük. A clusterezés lényege, hogy az egy csoportba tartozó elemek távolsága minimális, a különböző csoportba tartozó elemek távolsága pedig maximális legyen. A clusterezés különböző matematikai módszerek, algoritmusok alapján történhet, és az eljárás során kiemelkedő fontosságú, hogy az elemek távolságának meghatározására milyen metrikát alkalmazunk (*Szintai, 2006*). Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) 2003 óta operatíván alkalmaz saját fejlesztésű clusterező eljárást, amely Közép-Európát fedi le Kárpát-medencei középponttal (*Ihász, 2003*).

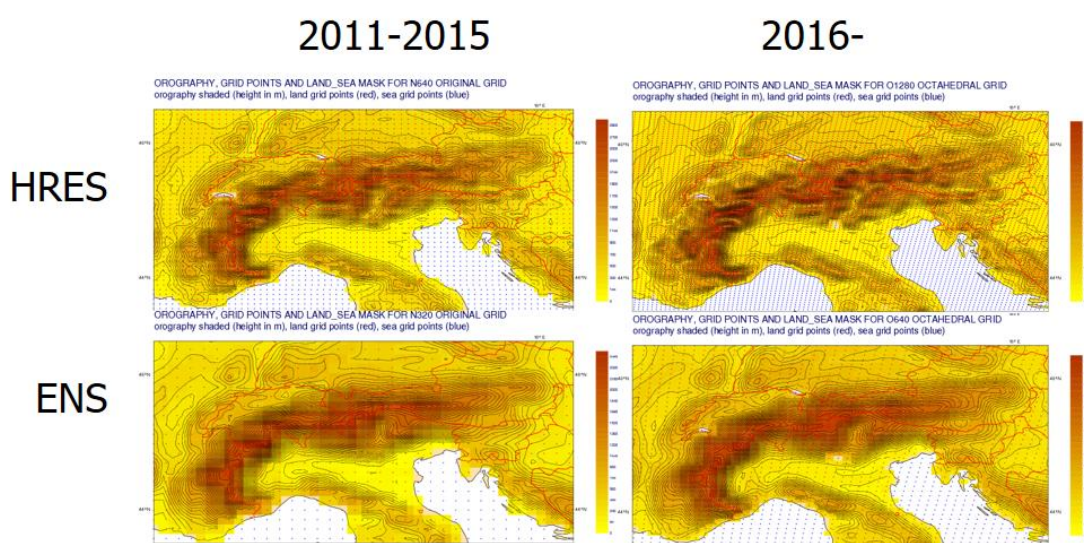
2.2. Az ECMWF előrejelzési rendszere

Az Európai Középtávú Előrejelző Központ 1975-ben jött létre 18 ország összefogásaként, readingi (Egyesült Királyság) központtal (*Woods, 2005*). Jelenleg 34 tagja van. Magyarország társult tagként 1994-ben csatlakozott a szervezethez, 2011-ben kormányhatározat született, amely lehetővé teszi az ország teljes jogú tagfelvételi kérelmének benyújtását.

A szervezet alapvető célja középtávú (2-10 napos) globális numerikus előrejelzések készítése, az előrejelzések minőségének javítása, valamint egy meteorológiai adatarchívum karbantartása. A központ 1979 óta állít elő determinisztikus, 1992 óta valószínűségi előrejelzéseket (*Molteni et al., 1996*). Jelenleg naponta kétszer (00 és 12 UTC-s kezdeti mezőkből) készül 10 napos determinisztikus és 15 napos, 51 tagú ensemble előrejelzés (*Buizza et al., 2006*). Emellett 06 és 18 UTC-s kezdeti állapotból determinisztikus és 7 napos, 51 tagú ensemble előrejelzést állítanak elő. Hetente kétszer 45 napos, 51 tagú ensemble (*Vitart et al., 2008*), valamint 20 évre visszamenőleg 45 napos, 11 tagú ensemble reforecast modellt futtatnak a szervezetnél (*Hagedorn, 2008*). Havonta egyszer 51 tagú ensemble évszakos előrejelzés és multimodell ensemble előrejelzés készül 7 hónapra vonatkozóan.

2015 óta a csapadék-halmazállapot típusára vonatkozó előrejelzést is tartalmaznak az ECMWF determinisztikus és az ensemble modellek (Gascón *et al.*, 2017; Gascón *et al.*, 2018).

2011 és 2015 között a nagyfelbontású (**H**igh **R**esolution – HRES) kategorikus ECMWF előrejelzés horizontális felbontása 16 km-es volt és 137 vertikális szintet tartalmazott. Az ensemble előrejelzés horizontális felbontása 32 km-es volt és 91 vertikális szintet tartalmazott. 2016 márciusában egy újfajta rács, az oktahedrális rács bevezetésével irányonként körülbelül 1,5-szeresére nőtt a modell horizontális felbontása (Hólm *et al.*, 2016). A determinisztikus előrejelzés jelenlegi horizontális felbontása 9 km-es és 137 vertikális szintet tartalmaz (Malardel *et al.*, 2016). Az ensemble előrejelzés horizontális felbontása 18 km-es és 91 vertikális szintet tartalmaz. A determinisztikus és ensemble ECMWF-előrejelzések horizontális felbontásváltozásának modelldomborzatra gyakorolt hatását szemlélteti az 1. ábra.



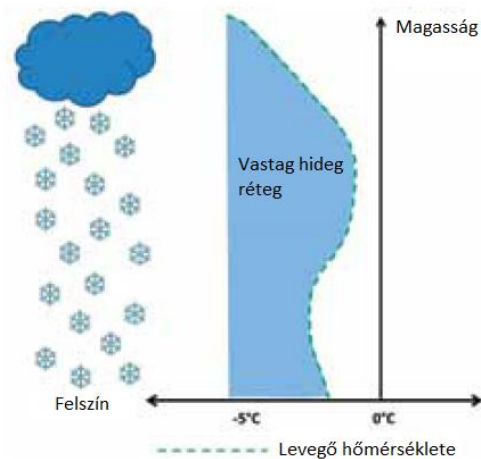
1. ábra: A horizontális felbontás változásának hatása a modelldomborzatra

3. A csapadékhalmozállapot-típusok keletkezési mechanizmusa

A csapadék halmazállapota elsősorban a vertikális hőmérsékleti profil függvénye (Forbes *et al.*, 2014), de ezen kívül számos egyéb tényező befolyásolja azt, mint például a nedvesség eloszlás, a vertikális mozgások, a csapadék intenzitása, a csapadékelemek méreteloszlása.

Ha az emelkedő, nagy nedvességtartalmú levegő hőmérséklete eléri a harmatpontot, megindul a kondenzáció, illetve a jégkristályok, majd hópehelyek képződése. Ha a kondenzáció fagypont feletti hőmérsékleten megy végbe, akkor vízcseppek, ellenkező esetben jégkristályok keletkeznek. Amikor a cseppek vagy hópehelyek eléri a kritikus méretet és a rájuk ható gravitációs erő legyőzi a felhajtóerőt, akkor megindul a csapadékhullás.

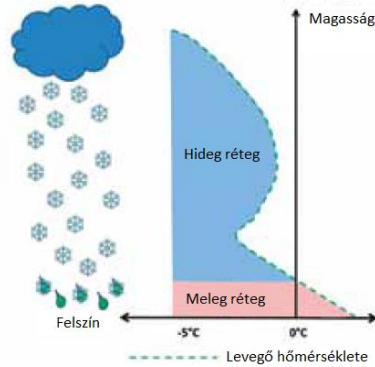
Ha a hópehelyek hullása során a vertikális profil a felszínig mindenhol 0°C alatt marad, akkor a csapadék hó formájában éri el a felszínt (2. ábra).



2. ábra: A havazás kialakulásához vezető vertikális rétegződés

A kép forrása: Forbes *et al.*, 2014

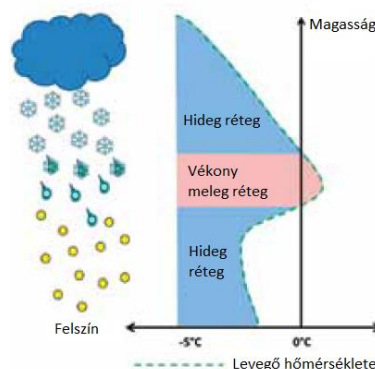
Ha a közvetlenül a felszín felett egy fagypont feletti hőmérsékletű vékony réteg található, amelyben a hópelyhek csak részlegesen olvadnak meg, havaseső keletkezik (3. ábra).



3. ábra: A havaseső kialakulásához vezető vertikális rétegződés

A kép forrása: Forbes et al., 2014

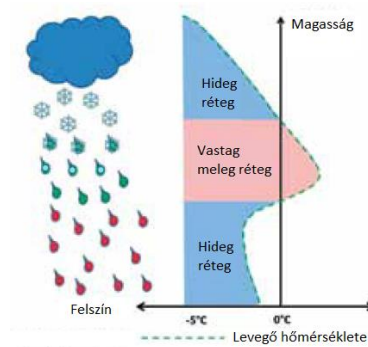
Az is előfordulhat, hogy inverzió miatt a magasban megjelenik egy olvadási réteg, amelynek hőmérséklete fagypont feletti. Ha ez az olvadási réteg nem elég vastag, vagy nem elég meleg, akkor a hópelyheknek nincs elég idejük megolvadni, ekkor a felszínre érő csapadék szintén hó lesz. Ha az olvadási réteg kellően vastag és meleg, akkor a hópelyhek a réteg vastagságának és átlaghőmérsékletének függvényében részlegesen vagy teljesen megolvadnak. Ekkor a csapadék fagyott eső, ónos eső vagy eső formájában éri el a felszínre. Ha az olvadási réteg alatt található egy felszín közeli fagypont alatti réteg és az kellően vastag ahhoz, hogy a cseppek újra megfagyjanak, akkor jégdara vagy fagyott eső keletkezik (4. ábra).



4. ábra: A fagyott eső kialakulásához vezető vertikális rétegződés

A kép forrása: Forbes et al., 2014

Ha ez a réteg nem elég vastag és a cseppeknek nincsen idejük megfagyni, akkor a túlhűlt vízcseppek a felszínre érkezve azonnal ráfagynak a talajra vagy a tereptárgyakra, ónos eső keletkezik (5. ábra).

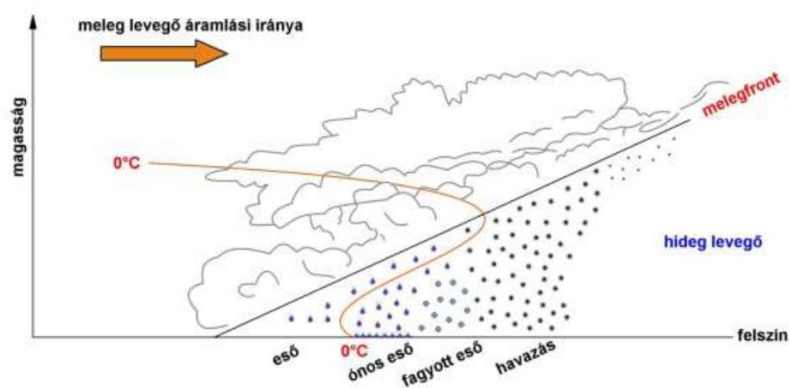


5. ábra: Az ónos eső kialakulásához vezető vertikális rétegződés

A kép forrása: Forbes et al., 2014

Ha a felszín közeli réteg hőmérséklete $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ fölötti, és ez a réteg kellően vastag és/vagy meleg, akkor a cseppek teljesen megolvadnak, a csapadék eső formájában éri el a felszínt. Ha a kondenzáció fagypont feletti hőmérsékleten ment végbe, szintén esőre számíthatunk.

Változatos halmazállapotú csapadék tipikusan téli melegfront átvonulásakor fordul elő, amikor a meleg levegő a fagypont alatti hőmérsékletű taljközeli réteg fölé kényszerül. Ekkor a csapadék halmazállapota néhány száz km-es régió belül a havazástól az ónos esőn és a fagyott esőn át az esőig változhat (6. ábra).



6. ábra: A csapadék halmazállapotának változásai melegfront átvonulásakor

Forrás: Tuba és Antal, 2012

4. A csapadékhalmozállapot-típus előrejelzése

A múltban csupán az előrejelző szakemberek tapasztalata, valamint helyben végezhető statisztikai utófeldolgozási módszerek alkalmazása alapján készültek a csapadékhalmozállapot típusára vonatkozó előrejelzések. A numerikus modellek nyers outputjai nem mindig alkalmasak arra, hogy azokat a felhasználók rendelkezésére bocsássuk. Ennek egyik oka, hogy a felhasználóknak olyan paraméterekre vonatkozó információra van szüksége, amelyeket a nyers modelleredmények nem tartalmaznak. Egy másik lehetséges ok, hogy a modell felbontása nem megfelelő, ezért azt tovább kell finomítani, valamint az is előfordulhat, hogy a nyers számítási eredmények szisztematikus hibával terheltek. Ezen problémák orvoslására fejlesztették ki a különböző utófeldolgozási módszereket, amelyek lényege adott területre vonatkozó előrejelzések készítése a nyers modelloutputokra, megfigyelési információkra, valamint klímaadatokra támaszkodva (Csima, 2003). A csapadékhalmozállapot-típusra vonatkozó statisztikai utófeldolgozási módszerek egyik legösszetettebb összefoglalója található Hirsch Tamás doktori értekezésében (Hirsch, 2008).

A numerikus előrejelző modellek intenzív fejlődése következtében az elmúlt évtizedben lehetővé vált a felhőzetbeli mikrofizikai folyamatok modellezése, ezáltal a csapadéktípusra vonatkozó számítások bekerülhettek a modellek fizikájába. Az ECMWF modelljébe 2010-ben az eső és a hó külön prognosztikai változóként került be, további fejlesztések révén pedig 2015 májusa óta (Gascón et al., 2017) további négy csapadékhalmozállapot-típust (ónos eső, jégdara, tapadó hó és havaseső) is megkülönböztet az ECMWF modell-előrejelzése.

4.1. A csapadéktípus előrejelzése az ECMWF modellben

A felszínre érkező csapadék halmozállapotának meghatározásához a modellnek a vertikális hőmérsékleti profilt és a csapadék mennyiségét kellő pontossággal kell előrejeleznie, de emellett tartalmaznia kell az olvadási és az újrafagyási folyamatok helyes fizikáját is. 2010 novemberében új felhősémát vezettek be az operatív modellbe, ezáltal az eső és a hó külön prognosztikai változóként került a modellbe. A hó olvadása $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os nedves hőmérséklet fölött, újrafagyása $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt, valamint a csapadék párolgása parametrizációként került a modellbe. Ezzel a modellfizikával az ónos esőt jellemző

hőmérsékleti profil esetén a hó elolvad a meleg levegőben, majd az alacsonyszintű fagypont alatti hőmérsékletű levegőben gyorsan újrafagyva hó formájában éri el a felszín. Ebben a modellváltozatban tehát az ónos eső kialakulásához vezető folyamatok még nem voltak megfelelően leírva.

A felhő- és csapadékparametrizáció új változatában (*Forbes et al.*, 2014) módosult az ónos eső keletkezési folyamatának leírása a megemelkedett meleg rétegben. Ez a verzió egy reprezentatívabb időskálát alkalmaz az esőcseppek újrafagyására vonatkozóan, amely függ a hőmérséklettől, de főként attól, hogy hópelyhek teljesen megolvadnak-e vagy sem. Ha az olvadási réteg aljára érve teljesen megolvadnak, az újrafagyás folyamata lassú és túlhűlt cseppek érik el a felszín. Ha a hópelyhek nem olvadnak meg teljesen, az újrafagyás gyors, fagyott eső keletkezik. Az, hogy a csapadék újrafagy-e az alsó hideg rétegben vagy sem, hatással van a hőmérsékleti profilra is. Ha a cseppek túlhűlve maradnak, a réteg hőmérséklete alacsonyabb lesz, mivel ebben az esetben nem szabadul fel az a hőmennyiség, amely a fagyás során felszabadulna, hanem ehelyett a túlhűlt cseppek becsapódása során szabadul fel, relatív melegedést okozva a felszínen és annak közelében.

A modell az olvadást és az újrafagyást a csapadékhalmazállapot-típusra vonatkozó prognosztikus változókból, a hóból és az esőből kiindulva parametrizálja. A csapadékhalmazállapot típusa a felszíni hó és eső arányából és az e felett lévő csapadék- és hőmérsékleti profilból kerül meghatározásra.

Az olvadási folyamat parametrizációja

A hó olvadásának sebessége a termikus egyensúly segítségével határozható meg, figyelembe véve a hópelyhek olvadása és a szublimációja során fellépő látens hőt. Ha ezt kiegészítjük a cseppek méretének feltételezett eloszlásával, akkor a kapott olvadási sebesség arányos a nedves hőmérséklet 0 °C-tól való eltéréssel. A mikroskálájú folyamatok összetettsége és a csapadékelemek méretének széles tartománybeli változékonysága egyszerűbben reprezentálható az effektív olvadási időskála segítségével.

A modellben az olvadási folyamatot a hulló havat tartalmazó grid box-ok 0 °C-os nedves hőmérsékletig való hűlésével parametrizálják, amelyet az olvadás során fellépő látens hő okoz a t időskála függvényében:

$$\text{olvadási sebesség} = -\frac{c_p}{L_{olv}} \left(\frac{T_w - T_0}{t} \right), \quad (1)$$

ahol c_p a víz fajhője, L_{olv} az olvadáshő, T_w a nedves hőmérséklet Celsius fokban, T_0 pedig 0 °C -al egyenlő.

Ez a parametrizáció magában foglalja az alapvető függést a 0 °C -os hőmérséklettől való eltéréstől, a nedves hőmérséklet használatán keresztül a párolgás hűtő hatását a telítetlen levegőben, valamint a relaxációs időn keresztül az olvadási réteg vastagságát.

Az újrafagyás folyamatának parametrizációja

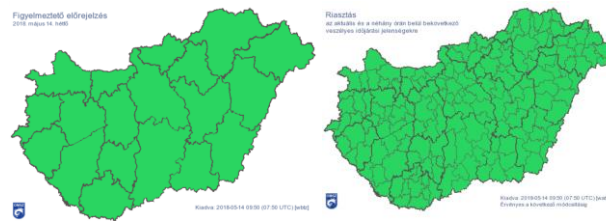
Ha a meleg réteg vékony és az esőcseppek nagy része rendelkezik fagyott állapotban lévő maggal, akkor azok a hideg rétegbe belépve hirtelen fagynak újra. Az újrafagyás sebessége bizonytalan, jelenleg ugyanazzal az összefüggéssel és időskálával parametrizálják, mint a fent leírt olvadási folyamatot. A parametrizáció során egy feltételezést alkalmaznak, miszerint ahhoz, hogy az újrafagyás gyorsan végbemenjen, a meleg réteg aljára érve a hulló csapadéktömeg legalább 20%-ának jégfázisban kell lennie. Ellenkező esetben az esőcseppek nagy része nem tartalmaz fagyott állapotú magot és az újrafagyás jóval lassabban megy végbe. Ez utóbbi esetben hosszabb időskála alkalmazásával írható le az újrafagyás sebessége. Ezen leírás alkalmazásával a túlhűlt vízcseppek megfagyhatnak mielőtt elérnék a felszínt, ha a talajközeli réteg nagyon hideg és/vagy vastag.

Amennyiben a 2 m-es hőmérséklet 0 °C alatti, a csapadék tömegének legalább 80%-a folyékony halmazállapotban van az olvadási réteg alján és ennek legalább 20 %-a túlhűlt vízcseppeként éri el a felszínt, a modell ónos esőt jelez. Ha a meleg réteg alján a jégfázisban lévő csapadék tömegaránya 20% és 80% közötti, az előrejelzett csapadéktípus fagyott eső, egyéb esetben hó. Az ónos esős régiókban a csökkent mértékű újrafagyás az új modellfizika szerint az alsó troposzféra relatív hűléséhez (nincs jelen a fagyás során felszabaduló látens hő), a talaj és a talajközeli réteg melegedéséhez vezet, mivel a látens hő, amely újrafagyás során szabadulna fel, a felszínre szállítódik.

Az olvadás és az újrafagyás sebességére felírt formulák és az alkalmazott küszöbértékek megválasztása összetett folyamatok jelentős egyszerűsítései, amelyek a jövőben fejlesztésre szorulnak, azonban a csapadék olvadásának és újrafagyásának legfontosabb karakterisztikáit tartalmazzák.

5. Az OMSZ veszélyjelző rendszere

Az OMSZ veszélyjelző rendszere két lépcsőből áll: a figyelmeztető előrejelzés az adott, valamint a következő napokon valószínűsíthető veszélyes időjárási jelenségekről nyújt tájékoztatást megyékre lebontva, a riasztás pedig az elkövetkezendő 3 órában várható veszélyes jelenségekre hívja fel a figyelmet az ország 174 járására (7. ábra) vonatkozóan (Bonta, 2017).



7. ábra: A figyelmeztető előrejelzések (balra) és a riasztások (jobbra) térbeli felbontása
A képek forrása: Országos Meteorológiai Szolgálat

Mind a figyelmeztető előrejelzés, mind a riasztás esetén három fokozatot különböztetünk meg. Ezek a veszélyesség szintje szerint növekvő sorrendben: sárga, narancs és piros. Az OMSZ figyelmeztető előrejelzést és riasztást is kiad heves zivatarra, felhőszakadásra, szélökésre, ónos esőre és hófúvásra; kizárólag figyelmeztető előrejelzést ad ki nagy mennyiségű eső, jelentős havazás, extrém hideg, hőség és tartós sűrű köd esetén.

A diplomamunka-téma szempontjából lényeges időjárási jelenségek, az ónos eső és a havazás esetén az egyes fokozatokat az 1. táblázatban feltüntetett küszöbök alapján határozzák meg.

1. táblázat: Veszélyjelzési fokozatok ónos eső és havazás esetén

Időjárási jelenség	Fokozat	Veszélyességi szint jelentése
Ónos eső	1	gyenge ónos eső, a várt csapadék mennyiség általában néhány tized mm (>0,1 mm)
	2	tartós (több órás) ónos eső, a várt csapadékmennyiség meghaladja az 1 mm-t
	3	tartós (több órás) ónos eső, a várt csapadékmennyiség meghaladja az 5 mm-t
Havazás	1	12 óra alatt 5 cm-t meghaladó friss hó hullhat
	2	24 óra alatt 20 cm-t meghaladó friss hó hullhat
	3	24 óra alatt 20 cm-t meghaladó friss hó hullhat

6. Felhasznált adatok és alkalmazott módszerek

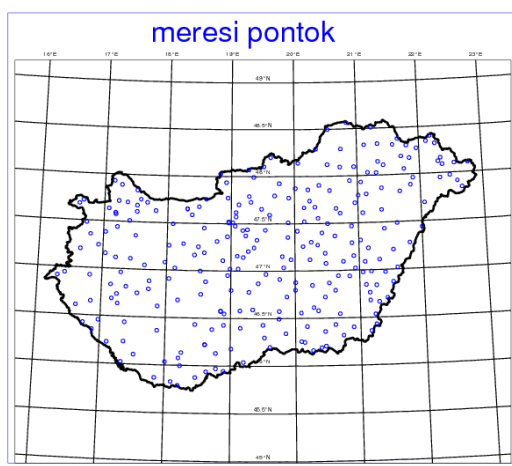
A munkám célja a csapadék-halmazállapot-típusra vonatkozó ECMWF determinisztikus és ensemble előrejelzések átfogó vizsgálata. Vizsgáltam, hogy az ensemble előrejelzéseknek milyen hozzáadott értéke van a determinisztikus modell-előrejelzéshez képest. A munka során a 2015/2016-os, a 2016/2017-es, valamint a 2017/2018-as telet vizsgáltam.

Esettanulmányon keresztül vizsgáltam a csapadék-halmazállapot szempontjából érdekes 2017. január végi és a 2018. március közepi ónos esős helyzetet, valamint a rendelkezésre álló megfigyelési adatok alapján objektív determinisztikus verifikációt végeztem.

A munka során UNIX operációs rendszerben FORTRAN nyelvű programokat készítettem.

Az előrejelzési adatokat az ECMWF MARS (Meteorological Archival and Retrieval System) adatbázisából nyertem (Raoult, 2001), amely az ECMWF társult tagországai számára szabadon hozzáférhető. Az innen nyert GRIB fájlok kezeléséhez az ECMWF GRIB API szoftvercsomagot használtam, melynek segítségével a GRIB állományokból ASCII formátumú adatsort készítettem. Az előállított adatok megjelenítését az ECMWF MAGICS szoftver segítségével készítettem, amely az ECMWF által kifejlesztett grafikus megjelenítő programcsomag (Siemen and Lamy-Thépaut, 2010).

A verifikációhoz 265 magyarországi, a csapadék-halmazállapot típusáról is információt adó meteorológiai állomás óránkénti mérési és megfigyelési adatait használtam fel (8. ábra), amelyeket az Országos Meteorológiai Szolgálat bocsátott rendelkezésemre.



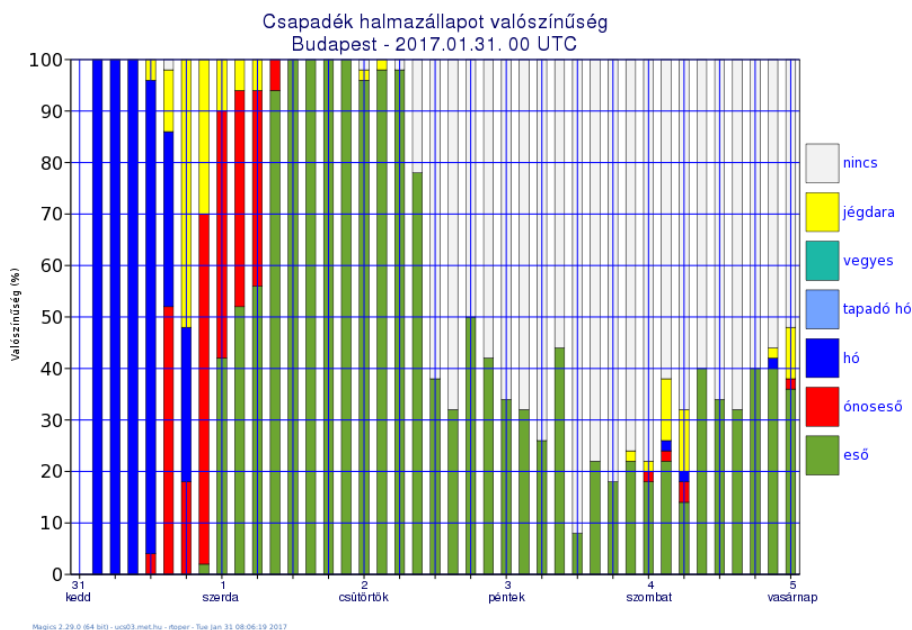
8. ábra: Az OMSZ óránkénti mérést végző csapadékhálózata

Ezekről az állomásokról a csapadékösszeg és a csapadékhalmazállapot-típus mellett 2 m-es- és talajhőmérsékleti adatok is rendelkezésemre álltak. A vizsgálatokba a téli hónapok mellet (december, január, február) bevontam a november és március hónapokat is, mivel sokéves megfigyelés szerint Magyarországon ezekben a hónapokban is előfordulhat változatos halmazállapotú csapadék (*Hirsch, 2008*).

7. A megvalósított fejlesztések rövid összefoglalása

A munka során a csapadékhalmozállapot-típusra vonatkozó ensemble előrejelzések feldolgozásának céljából különféle megjelenítési formákat fejlesztettem, amelyek nagyban segíthetik a szinoptikus szakembereket a döntéshozatalban. Ebben a fejezetben ezeket a fejlesztéseket mutatom be röviden.

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál 2015 óta operatíván alkalmaznak egy grafikus megjelenítési rendszert (9. ábra), amely adott földrajzi pontra vonatkozóan különböző időpontokban ábrázolja ensemble előrejelzések alapján az egyes csapadékhalmozállapot-típusok bekövetkezési valószínűségét.

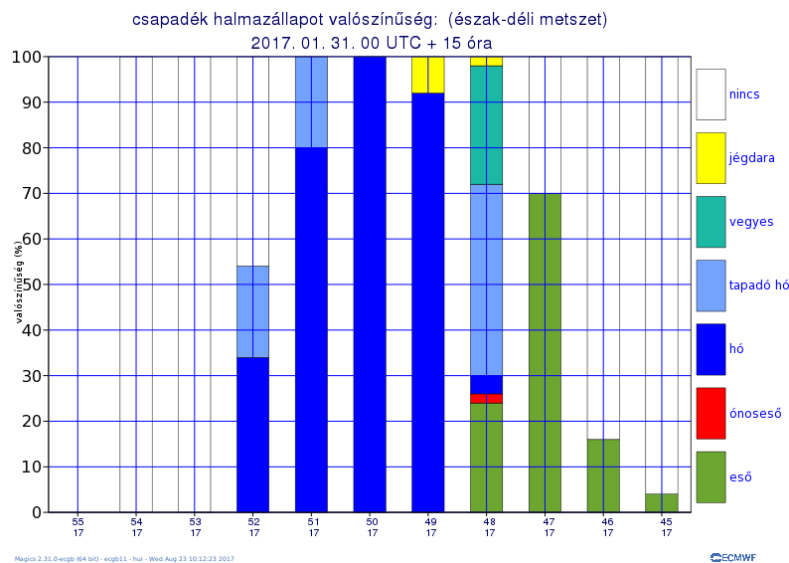


9. ábra: 2017. január 31. 00 UTC-es előrejelzésből készített csapadéktípus valószínűségi előrejelzés diagram Budapestre

7.1. Tetszőleges égtájbeli metszet

Ezt a fajta diagramot alapul véve fejlesztettem ki egy új megjelenítési formát, amely adott időpontra vonatkozóan, tetszőlegesen kiválasztott égtájbeli metszet mentén jeleníti meg az egyes csapadékhalmozállapot-típusok bekövetkezésének valószínűségét. A 10.

ábrán a 17. keleti hosszúsági körön, az országot észak-déli irányban átszelő metszet mentén az egyes csapadékhalmozállapot-típusok bekövetkezésének valószínűsége látható.

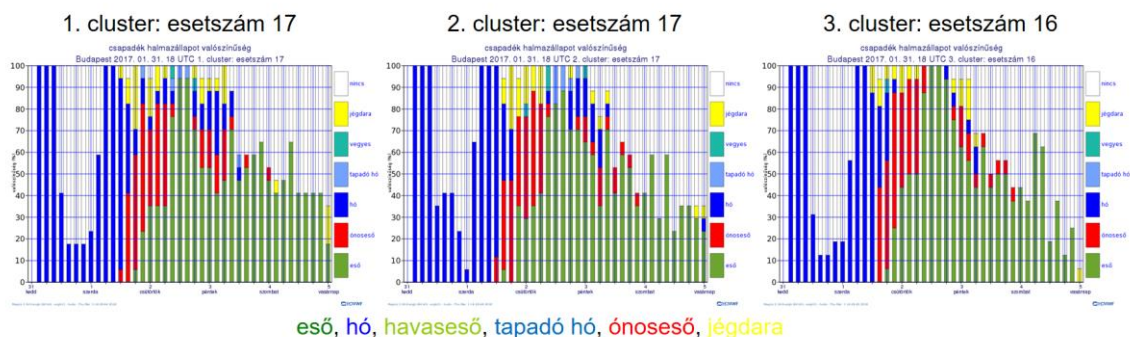


10. ábra: 2017. január 31. 00 UTC +15 órás előrejelzés:

észak-déli metszet (é. sz. 55°- é. sz. 45°, k. h. 17°) csapadéktípus valószínűségi előrejelzés

7.2. Ensemble clusterenkénti megjelenítés grafikon formában

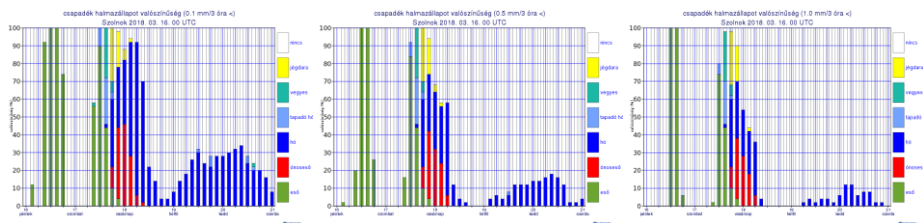
A csapadéktípus valószínűségek clusterenkénti vizsgálatának támogatására szintén készítettem egy megjelenítési produktumot, amely az OMSZ clusterezési eljárásának eredményeként létrejövő clusterenként jeleníti meg a valószínűségeket adott földrajzi pontban, különböző időpontokra vonatkozóan (11. ábra), ezáltal a lehetségesen fellépő időjárási rendszerek szerint elkülönítve vizsgálhatók a valószínűségek.



11. ábra: 2017. január 31. 18 UTC-es előrejelzésből készített clusterenkénti csapadéktípus valószínűségi diagram Budapestre

7.3. Csapadékintenzitás feltüntetése grafikonon

Az egyes csapadéktípus-valószínűségek adott pontra vonatkozó időbeli menetét megjelenítő grafikonok egy olyan változatát is elkészítettem, amelyen a csapadék intenzitására vonatkozóan tetszőleges küszöbérték állítható be, ezáltal információt kaphatunk arról, hogy melyik csapadéktípus várható kisebb, melyik nagyobb intenzitással (12. ábra).

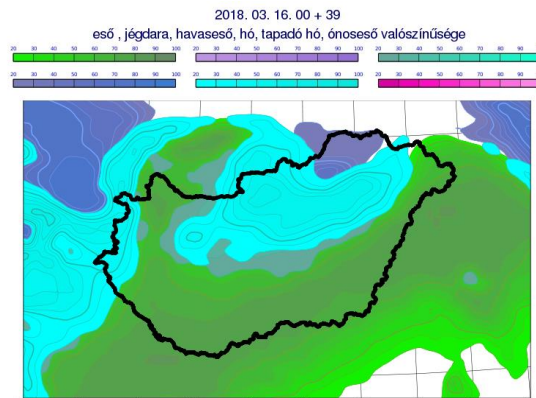


12. ábra: 2018. március 16. 00 UTC-es előrejelzésből készített 0,1, 0,5 és 1,0 mm/3 óra feletti csapadékintenzitáshoz tartozó csapadéktípus valószínűségi diagram Szolnokra

7.4. A csapadéktípusok valószínűségének együttes megjelenítése térképen

Az ensemble technikával előrejelzett csapadéktípusok valószínűségének együttes térképi megjelenítésére szintén kidolgoztam egy eljárást. Ezen az egyes halmazállapot-típusokat különböző színekkel jelenítettem meg, az adott színen belüli árnyalatok pedig az adott típus bekövetkezési valószínűségéről adnak információt. Az adott halmazállapot-típusra vonatkozó valószínűségi információk tetszőlegesen beállított küszöbérték felett jelennek meg.

A 13. ábrán az egyes csapadékhalmazállapot-típusok valószínűségének eloszlása látható 2018. március 17. 15 UTC-re vonatkozó ensemble előrejelzés alapján. A térképen csak 20%-nál nagyobb bekövetkezési valószínűség esetén jelennek meg a csapadéktípusok.



13. ábra: 2018. március 16. 00 UTC +39 órás előrejelzés: csapadékhalmazállapot-típus valószínűségi térkép

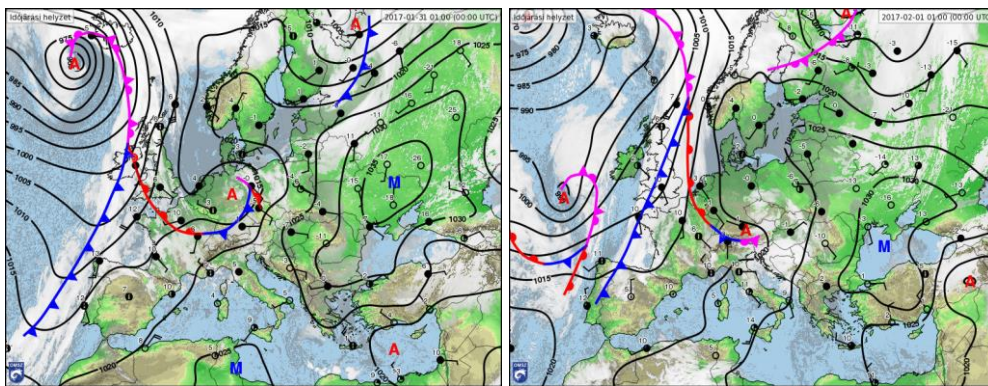
8. Esettanulmányok

Ebben a fejezetben két ónos esős helyzetet vizsgáló esettanulmányon keresztül mutatom be a csapadéktípusra vonatkozó modell-előrejelzés, valamint az általam fejlesztett grafikus produktumok felhasználhatóságát.

A két ónos esős szituáció gyökeresen eltérő időjárási helyzetben alakult ki, hiszen amíg 2017. január 31-én egy délnyugat felől érkező melegedés hatására alakult ki változatos halmazállapotú csapadék az ország területén, addig 2018. március 17-én az inverziós helyzetet az északkelet felől érkező sarkvidéki hideg légtömeg által okozott talajközei lehülés alakította ki.

8.1. A 2017. január 31-i ónoseső

2017. január 31-én délnyugat felől meleg, nedves levegő áramlott Magyarország területére (14. ábra).



14. ábra: Szinoptikus helyzet 2017. január 31-én és február 1-én 00 UTC-kor

Ennek hatására január 31-én és február elsején változatos halmazállapotú csapadék hullott az ország területén. 31-én napközben főként az ország középső részén volt csapadék, ami ónos eső, fagyott eső és havazás formájában hullott. Éjszaka északon havazás és havas eső, a déli országrészben ónos eső és eső fordult elő. Február 1-jén szintén többfelé fordult elő csapadék, nagyrészt eső formájában, de északon hó, havas eső és ónos eső is előfordult.

Január 31-én az Országos Meteorológiai Szolgálat több ízben adott ki az ország területére riasztást az ónos esőre vonatkozóan. A délutáni órákban az ország középső és

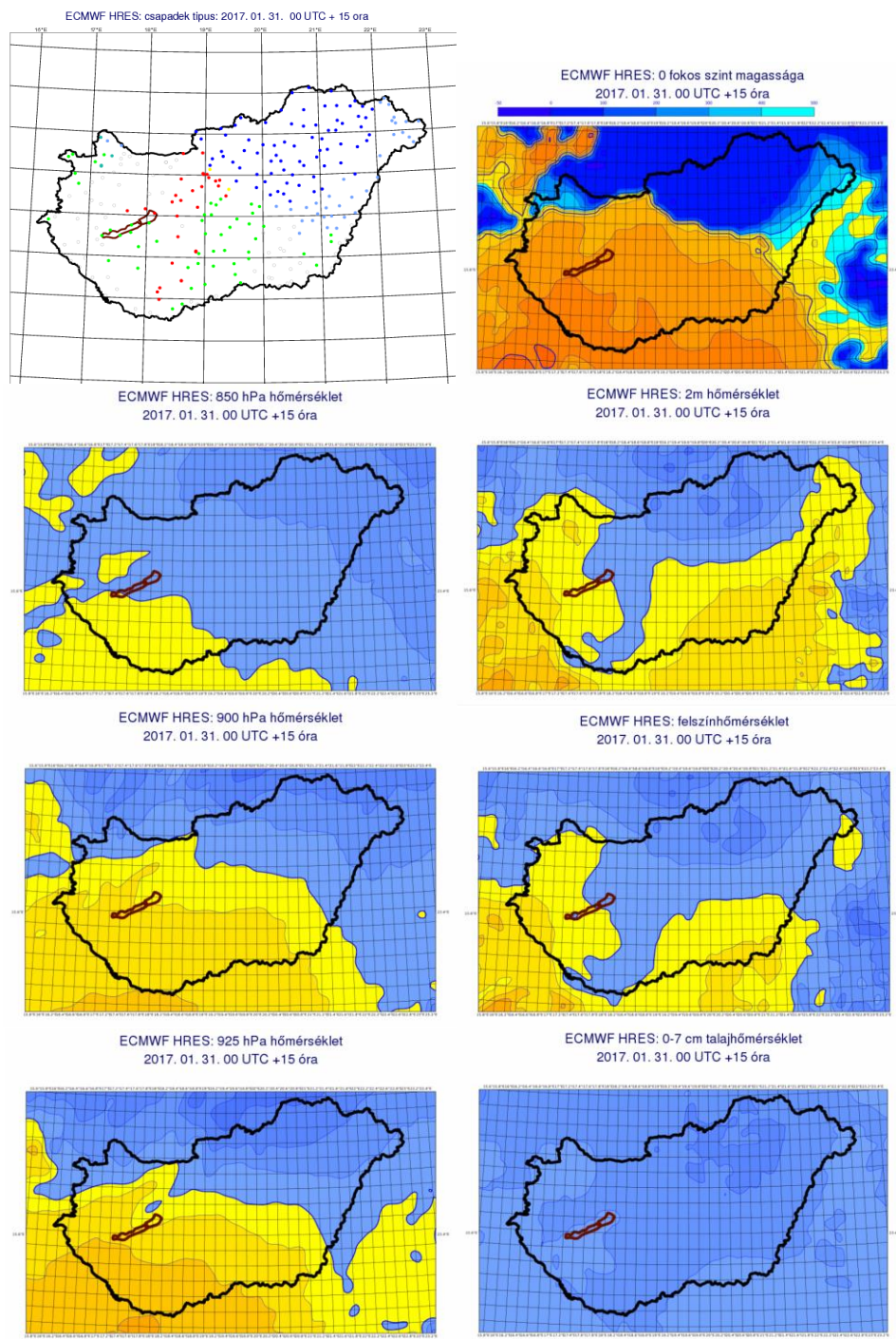
nyugati részén volt érvényben egyes és kettős fokozatú riasztás, majd a későbbiekben megjelentek olyan területek, amelyekre hármas fokozatú riasztás lépett életbe és a riasztási terület is egyre inkább kiterjedt északkelet felé. A legnagyobb mennyiségű ónos esőre az ország középső részén számítottak a veszélyjelzők (15. ábra).



15. ábra: Az OMSZ által az ónos esőre kiadott riasztási térképek
2017. jan. 31. 14:07, 17:35 és 22:41 UTC
A képek forrása: Országos Meteorológiai Szolgálat

A 16. ábrán a január 31. 00 UTC +15 órás determinisztikus előrejelzés láthatók a következő paraméterekre vonatkozóan: csapadékhalmazállapot-típus, 0 °C-os hőmérsékleti szint magassága, hőmérséklet a különböző nyomási szinteken (850, 900 és 925 hPa), valamint felszín-közeli hőmérsékletek (2 m-es hőmérséklet, a talajfelszín hőmérséklete és a talaj felső rétegének hőmérséklete). A január 31. 00 UTC-s analízisből készült további előrejelzések ugyanezen változókra megtekinthetők az I. Függelékben. Ezeket a paramétereket a szinoptikus felhasználhatja a döntéshozatala során. Mind a csapadéktípusra, mind a hőmérsékleti adatokra vonatkozó előrejelzésekből kivehető, hogy északkelet felé mozgott a meleg légtömeg, és így a csapadéktípus délről észak felé fokozatosan váltott át hóból ónos esőbe, majd esőbe. Az izobárszinti hőmérsékletek alakulását szemlélve megállapítható, hogy a különböző szinteken nem egyforma mértékben történt a felmelegedés. A 0 °C-os hőmérsékleti szint magasságát célszerű vizsgálni, hiszen ha ez alacsonyan van, akkor vékony az a réteg, amelyben a lehulló jégkristály el tud olvadni. Az ábrákon jól látszik, hogy ahogy húzódik északkelet felé az a terület, ahol a 0 °C-os szint magassága 500 méter alatt van, úgy változik a csapadék halmazállapota is az előrejelzés szerint. A felszínközeli hőmérsékletek vizsgálata szintén elengedhetetlen a csapadék halmazállapotának meghatározásához. A vizsgált esetben a talaj felső rétegének hőmérséklete a vizsgált időszakot megelőző, heteken keresztül tartó hideg miatt február elsején se került fagypont fölé. Ennek következtében fordulhatott elő, hogy a hajnali órákban az eső formájában hulló csapadék a talajhoz fagyhatott. A

döntéshozatal során hasznos lehet tehát a csapadék-halmazállapotra vonatkozó előrejelzés használata, de ezzel együtt érdemes egyéb paramétereket is figyelembe venni.



16. ábra: Különböző változókra vonatkozó determinisztikus előrejelzés

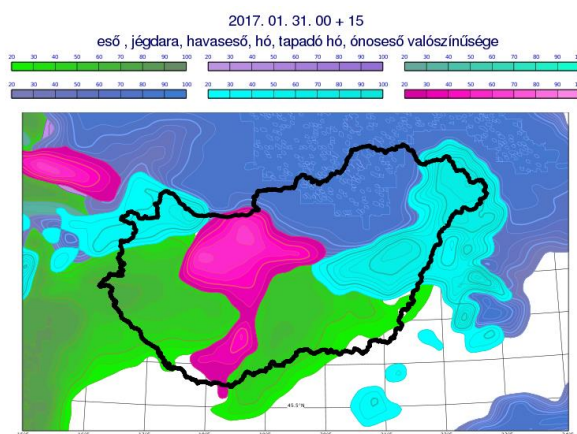
2017. január 31. 00 UTC +15 óra

Csapadéktípus: *eső*, *hó*, *havaseső*, *tapadó hó*, *ónoseső*, *jégdara*

Hőmérsékletek: *kék*: 0°C alatt, *sárga*: 0°C felett, izotermák 2°C-onként

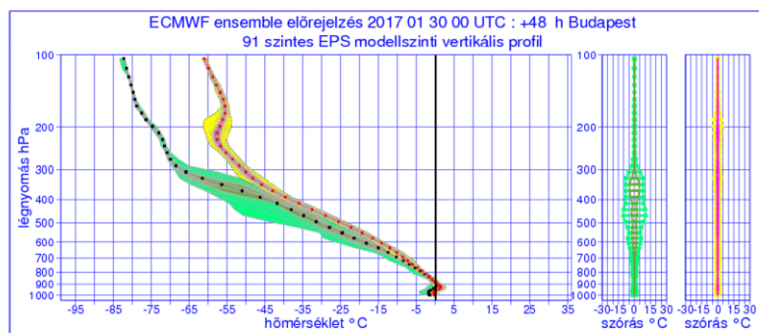
0°C-os szint magassága: *kék*: 0-500 m, *sárga*: 500 m fölött

A determinisztikus előrejelzés mellett az ensemble előrejelzések használata sokat segíthet a döntéshozatalban. A január 31. 00 UTC +15 órás ensemble előrejelzésből készített csapadékhalmozállapot-típusra vonatkozó valószínűségi térképen látható, hogy ebben az időpontban az ország középső részén volt a legnagyobb az ónos eső valószínűsége, északon pedig a hó volt a legnagyobb valószínűsége (17. ábra). Ez az elrendeződés és a determinisztikus modell által előrejelzett területi eloszlás nagyon hasonlít az OMSZ által kiadott riasztás elrendeződéséhez.



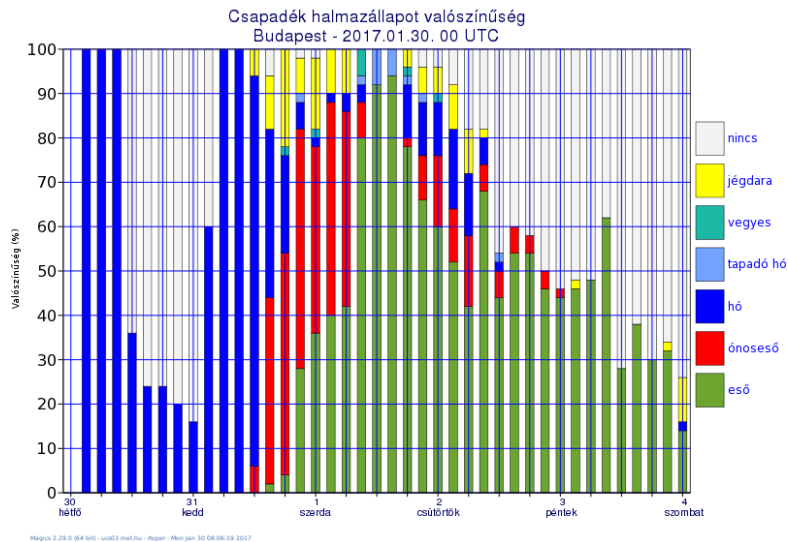
17. ábra: Csapadék halmozállapot-típus valószínűségi térkép 2017. január 31. 00 UTC +15 órás előrejelzés

A különböző nyomásszinti hőmérsékletek mellett célravezető lehet adott pontbeli ensemble vertikális metszet vizsgálata is, hiszen így nem csupán a fő izobárszintekről kapunk információt, hanem a finomabb struktúrák is jól kivehetők rajta. A II. Függelékben, a vizsgált helyzet budapesti ensemble vertikális metszetein jól kivehető az inverzió, amelynek legmagasabb hőmérsékleti értékei kezdetben fagypont alatt vannak, majd az idő előrehaladtával 0 °C-hoz közeli értékeket vesznek fel (18. ábra), amely az ónos eső kialakulásának kedvez.



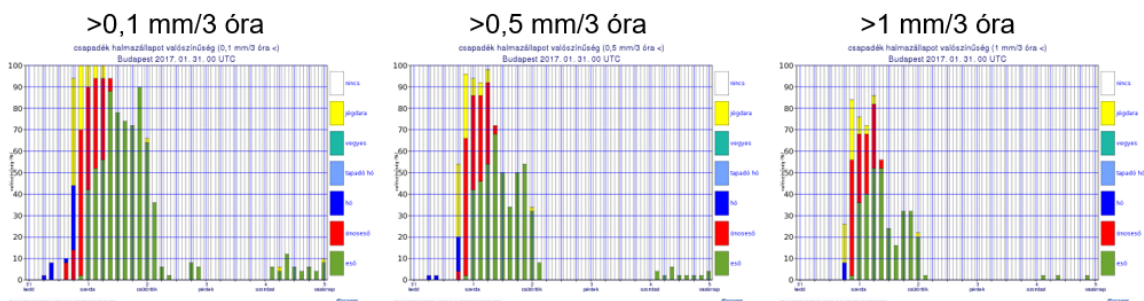
18. ábra: 2017. január 30. 00 UTC +48 órás előrejelzésből készített ensemble vertikális profil
 zöld: harmatpont, sárga: hőmérséklet, pontok: ensemble átlag az egyes modellszinteken

Az ensemble előrejelzésből készített, Budapestre vonatkozó meteogramon (19. ábra) másfél-két nappal annak bekövetkezése előtt jól kivehető az érkező meleg légtömeg hatása, ahogy a kezdeti havazás után megnő az ónos eső valószínűsége, majd ezt eső váltja fel.



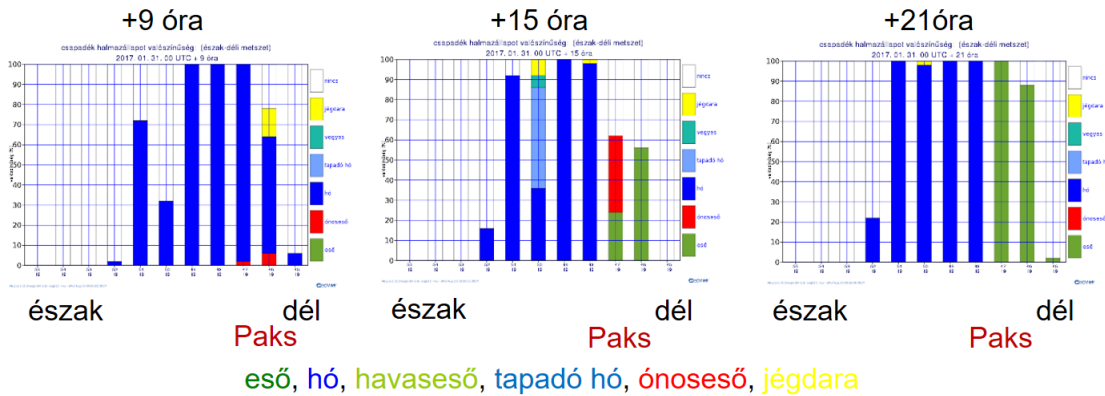
19. ábra: Csapadéktípus valószínűségi előrejelzés diagram Budapestre

Az ilyen típusú meteogram mellett érdemes vizsgálni az ezzel megegyező szerkezettel rendelkező, de csapadékintenzitás-küszöb szerint bontott grafikonokat is, hiszen ezáltal információt nyerhetünk a várható csapadékhalmazállapot-típusok várható intenzitásáról is (20. ábra). A 2017. január végi esetben a különböző csapadékintenzitás-küszöbvel rendelkező diagramokat együtt tekintve látható, hogy az előrejelzés szerint intenzív ónos esőnek és gyenge havazásnak volt nagy a valószínűsége.



20. ábra: Csapadékintenzitás-küszöb szerint bontott valószínűségi diagramok Budapestre 2017. január 31. 00 UTC-s előrejelzési

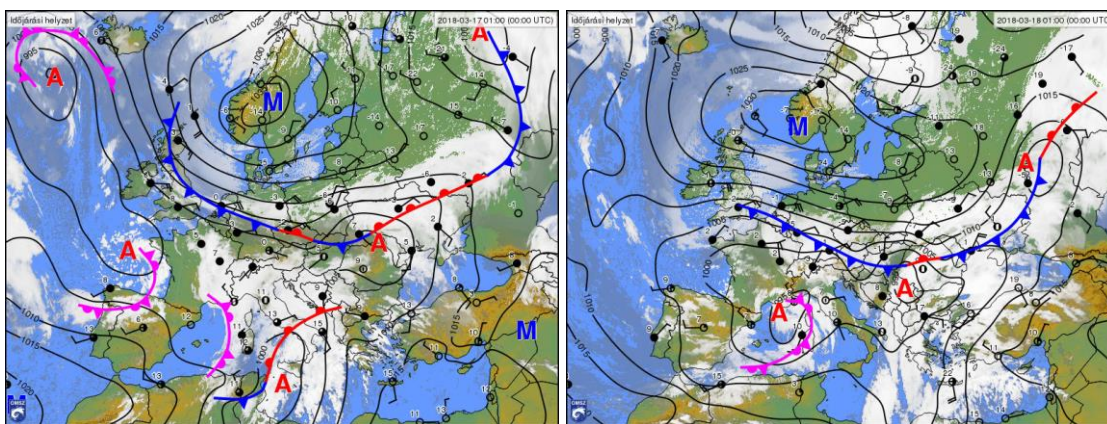
A budapesti hosszúsági kör mentén, különböző időpontokra készített metszeten (21. ábra) kivehető, hogy a meleg levegő délies irányból érkezett az ország területére, emiatt az ország déli részén nagyobb volt az ónos eső valószínűsége, majd az eső valószínűsége nőtt, miközben északon a hó volt a legvalószínűbb csapadéktípus.



21. ábra: Térbeli metszet budapesti hosszúsági kör mentén: é.sz. 55 – é.sz. 45 fok
2017. január 31. 00 UTC + 9, +15 és +21 órás előrejelzés

8.2. A 2018. március 17-18-i ónos eső

Március 17-én északkelet felől hideg sarkvidéki levegő zúdult Magyarország területére. Ez a hideg légtömeg és egy mediterrán ciklon enyhe, nagy nedvességtartalmú levegője együttesen alakította az ország időjárását (22. ábra). 17-én délnyugat felől egyre több helyen eleredt az eső, majd az északi országrészben az eső egyre inkább átváltott havazásba. Éjszaka egyre északabbra húzódott a csapadékzóna, amelyből zömmel hó esett, de az alföldi területeken átmenetileg ónos eső is előfordult. Dél előtt lassan vékonyodott a felhőzet, és már csak az északi, északkeleti tájakon esett néhol a hó.

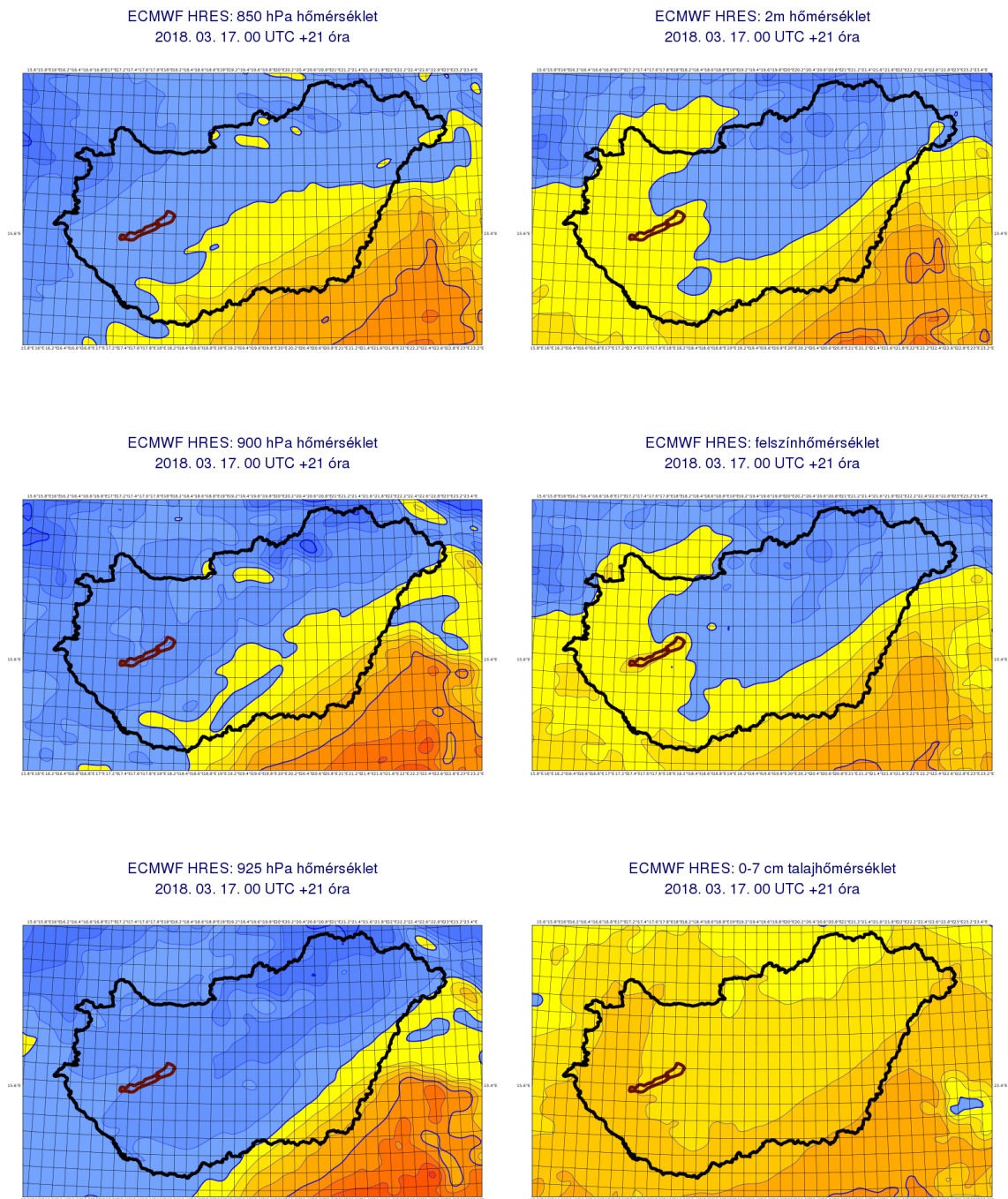


22. ábra: Szinoptikus helyzet 2018. március 17-én és 18-án 00 UTC-kor

Az ónos eső kialakulása ebben a helyzetben szokatlan módon történt. Általában a hideg levegő fölé sikló meleg levegő okozza a jégkristályok megolvadását a magasabb légrétegben és újrafagyását vagy túlhűlését az alacsonyabb szinteken, ezzel szemben ebben esetben a korábban pozitív hőmérsékletű területet a felszín közelében kezdte hűteni a beáramló hideg levegő, ez vezetett az inverzió kialakulásához és ez okozta a hideg rétegbe érkező cseppek túlhűlését. Mivel a kezdetben pozitív hőmérsékletű talaj csak hosszabb idő alatt hűlt $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alá, ezért az ónos eső nem volt kritikus mértékű. Mire a talaj fagypontra alá hűlt, addigra a hideg levegő kellő magasságig kitöltötte a légkört, így a kialakult jégkristályok nem kerültek $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ fölötti hőmérsékletű rétegbe, hó formájában értek a felszínre.

A determinisztikus modell különböző szintek hőmérsékletére vonatkozó előrejelzésén jól kivehető a hideg levegő érkezése északkelet felől, a kezdeti felszínközeli hűlés, majd a hideg levegő kiterjedése egyre vastagabb rétegekbe (23. ábra). Emellett kirajzolódik az is, hogy a talaj lehűlése az előrejelzés szerint lassabban ment végbe, hiszen amikor levegő

hőmérséklete már nagy vertikális kiterjedésben 0 °C alatt volt, a talaj felső rétegének hőmérséklete még mindig fagypont felett alakult.

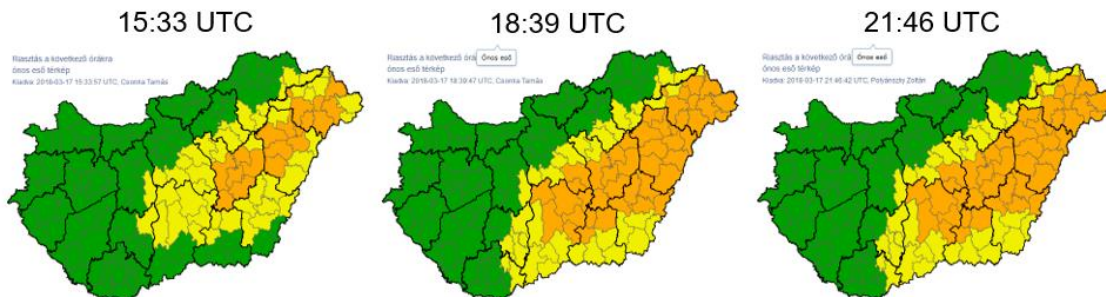


23. ábra: Különböző szintek hőmérsékletére vonatkozó determinisztikus előrejelzés

2018. március 17. 00 UTC +21 óra

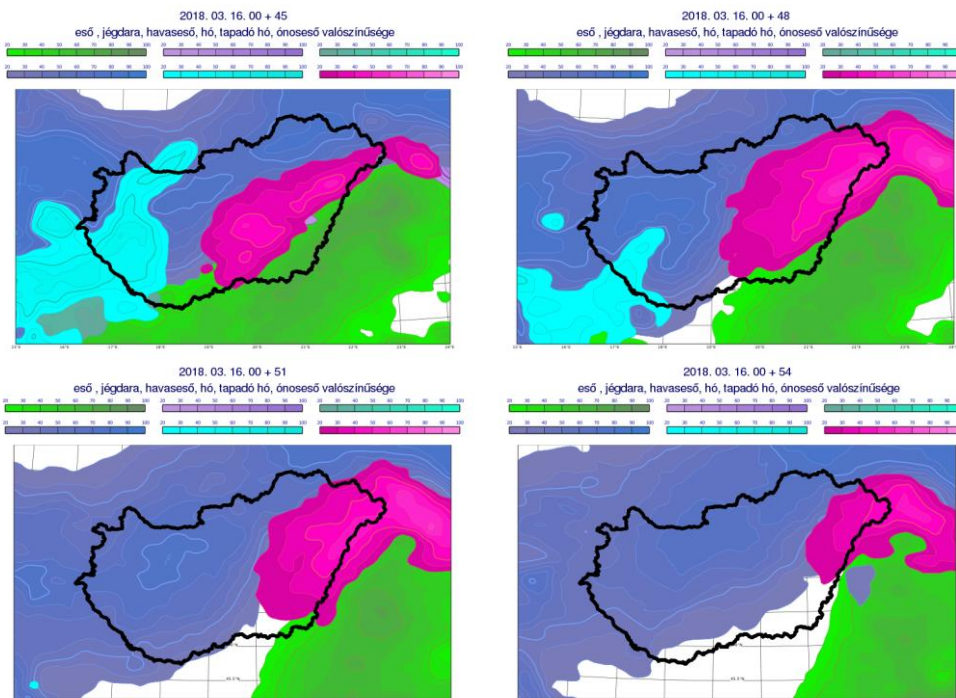
Hőmérsékletek: kék: 0 °C alatt, sárga: 0°C felett, izotermák 2 °C-onként

Az Országos Meteorológiai Szolgálat március 17-én délután és éjszaka az Alföld nagy részére első vagy második szintű riasztást adott ki az ónos esőre vonatkozóan (24. ábra). A riasztási terület az idő előrehaladtával észak-déli irányban kiterjedt.



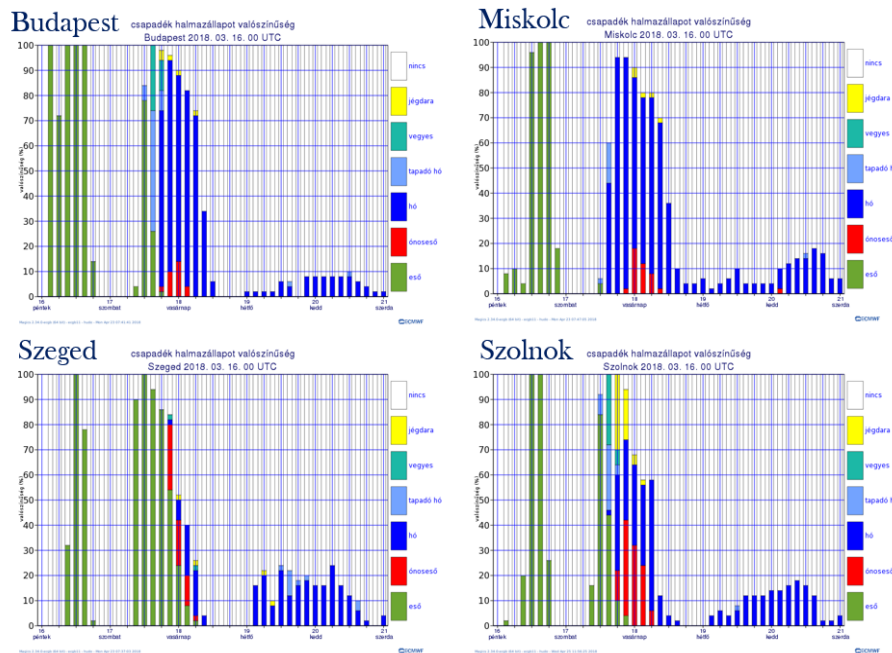
24. ábra: Az OMSZ által az ónos esőre kiadott riasztási térképek
2018. március 17. 15:33, 18:39 és 21:46 UTC
A képek forrása: Országos Meteorológiai Szolgálat

Az ECMWF modell csapadékhalmazállapot-előrejelzéséből készített valószínűségi térképeken jól kivehető az ónos eső magas valószínűsége a keleti országrészben, az északi havazás, valamint az, hogy a hideg levegő egyre vastagabb rétegben töltötte ki a légkört, ezáltal egyre nagyobb területen nőtt meg a hó és csökkent az ónos eső valószínűsége (25. ábra).



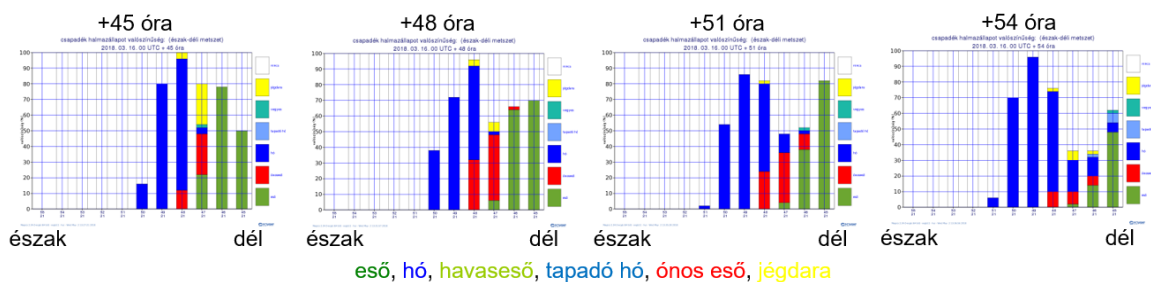
25. ábra: Csapadékhalmazállapot típus valószínűségi térkép
2018. március 16. 00 UTC +45, +48, +51, +54 órás előrejelzés

Ez a térbeli eloszlás a különböző városokra vonatkozó meteogramok együttes szemlélése során szintén felfedezhető (26. ábra). Ezen grafikonok alapján elmondható, hogy a modell-előrejelzésben jó előre nagy valószínűséggel jelent meg az ónos eső lehetősége az alföldi területeken, míg az északi országrészben az eső rögtön havazásba váltott át.



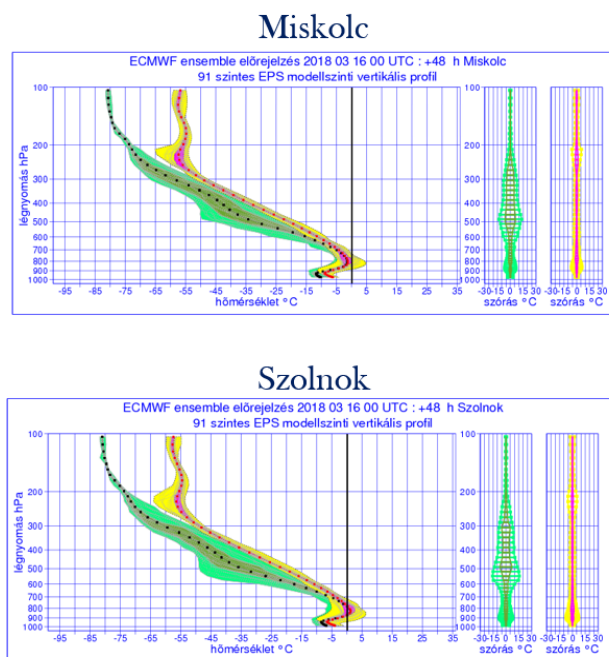
26. ábra: Csapadéktípus valószínűségi előrejelzések különböző városokra 2018. március 16. 00 UTC-s előrejelzés

Az Alföld keleti részén áthaladó (k. h. 21 fok) észak-déli metszet mentén, különböző időpontokra készített valószínűségi grafikonok vizsgálatával észrevehető az északkelet felől érkező hideg levegő által okozott hűlés következtében kialakuló havazás északon, a várható ónos esős terület átmeneti kiterjedése észak-déli irányba, majd ennek csökkenése egyre növekvő hó-valószínűséggel (27. ábra).



27. ábra: Térbeli metszet a k.h. 21 fokos hosszúsági kör mentén: é.sz. 55 – é.sz. 45 fok 2018. március 16. 00 UTC + 45, +48, +51 és +54 órás előrejelzés

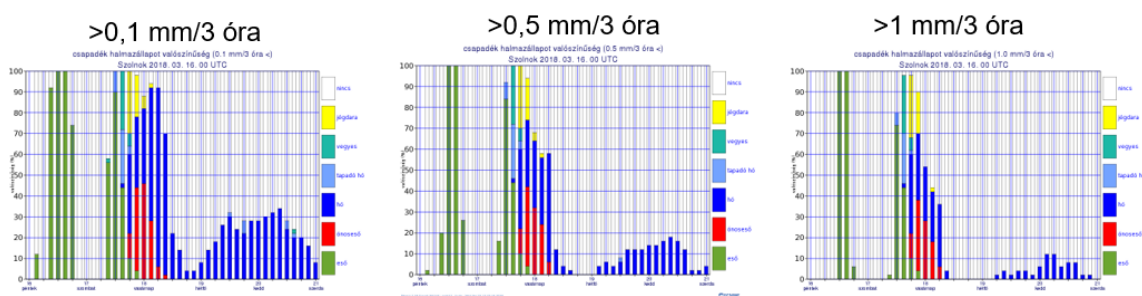
Észrevehető az is, hogy csapadék-halmazállapotra vonatkozó valószínűségi térképek összhangban vannak az ensemble vertikális profilokkal, hiszen Miskolcon, ahol az előrejelzés szerint hónak a legnagyobb a valószínűsége, a hőmérséklet jellemzően minden magassági szinten 0 °C alatti, ezzel szemben Szolnokon, ahol ónos eső is valószínűsíthető, a vertikális profilon megjelenik az ónos eső kialakulásának kedvező inverzió 0 °C-hoz közeli hőmérsékleti értékekkel (28. ábra).



28. ábra: Ensemble vertikális profil Miskolcra és Szolnokra
2018. március 16. 00 UTC +48 óra

zöld: harmatpont, sárga: hőmérséklet, pontok: ensemble átlag az egyes modellszinteken

A Szolnokra vonatkozó, különböző csapadékinzintás-küszöbértékek szerint bontott diagramok (29. ábra) alapján elmondható, hogy Szolnok térségében intenzív ónos eső és gyenge havazás volt várható a vizsgált időszakban.



29. ábra: Csapadékinzintás-küszöbök szerint bontott valószínűségi diagramok Budapestre
2018. március 16. 00 UTC-s előrejelzés

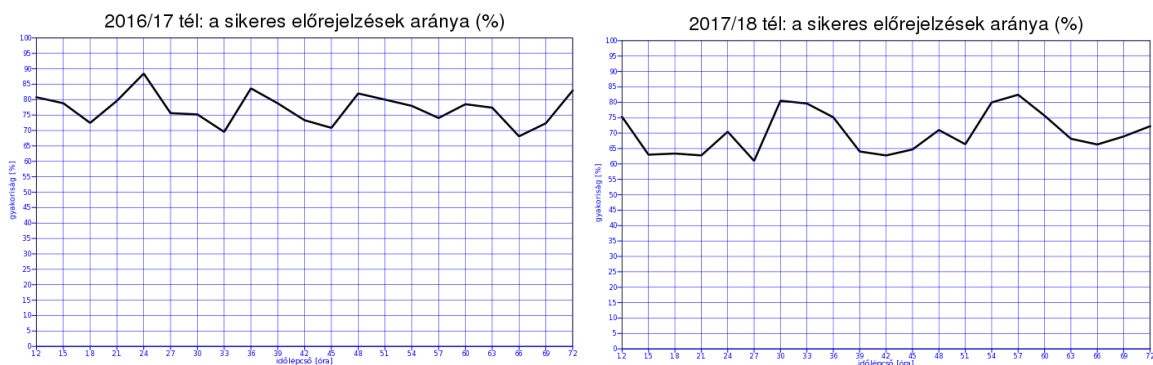
9. Objektív verifikáció

A csapadékra vonatkozó verifikációs technikák iránti érdeklődés az utóbbi évtizedekben növekvő tendenciát mutat (Jolliffe, Stephenson, 2011). A számszerű verifikációs módszereket két különböző csoportba sorolhatjuk, a folytonos statisztikák alkotják az első csoportot, míg a kontingencia táblázat segítségével kiszámolható kategorikus statisztikák tartoznak a másik csoportba (Nurmi, 2003).

Az esettanulmányon keresztül történő szubjektív verifikáció mellett a csapadék-halmazállapotra vonatkozó determinisztikus előrejelzés objektív verifikációját is elvégeztem a rendelkezésre álló három télre vonatkozóan. Mivel 2016 márciusában jelentősen megnövekedett a modell horizontális felbontása, ezért részletesen a 2016/2017-es, valamint a 2017/2018-as téllal foglalkozunk. A 2015/2016 telére kapott verifikációs eredmények megtekinthetők a III. Függelékben.

9.1. Összegzett beválási diagram

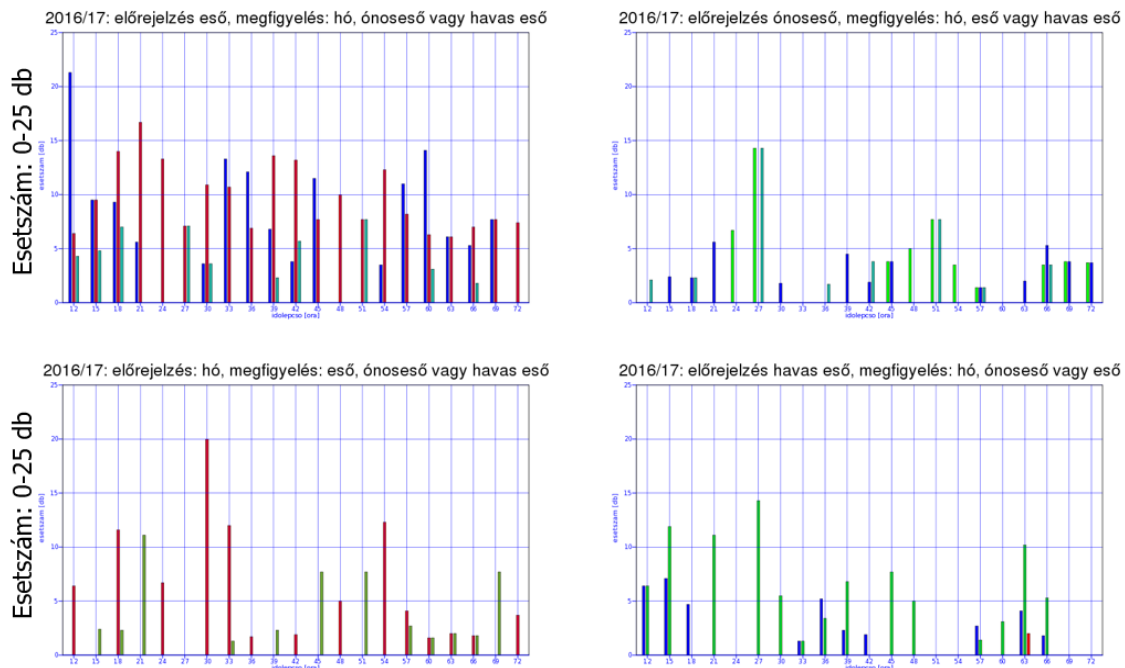
Elsőként az összes rendelkezésre álló állomás összes megfigyelési adatának felhasználásával megvizsgáltam, hogy az előrejelzési időtáv növekedésével hogyan változott a sikeres halmazállapot-típus előrejelzések aránya. A 30. ábrán ez az arány látható a 00 UTC-s analízisből készült előrejelzésekre vonatkozóan. A +12 és +72 órás időlépcsők között az előrejelzés beválásában mindkét tél esetén jelentkezik bizonyos fokú hullámváz, de erős tendenciózus romlás az idő előrehaladtával egyik esetben sem figyelhető meg. A 2016/2017-es tél esetén a sikeres előrejelzések aránya 70 és 90% között, 2017/2018 telén pedig 60 és 85% között ingadozott. 2017/2018 telén nagyobb amplitúdójú hullámváz figyelhető meg.



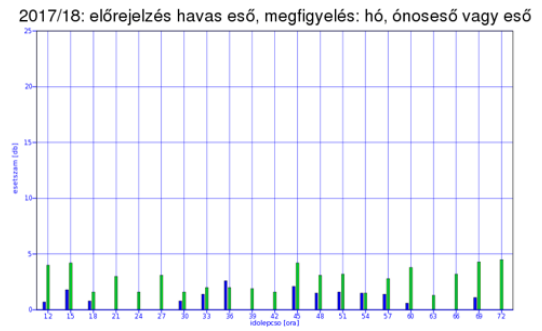
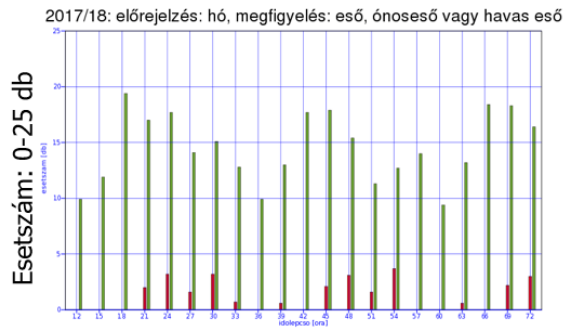
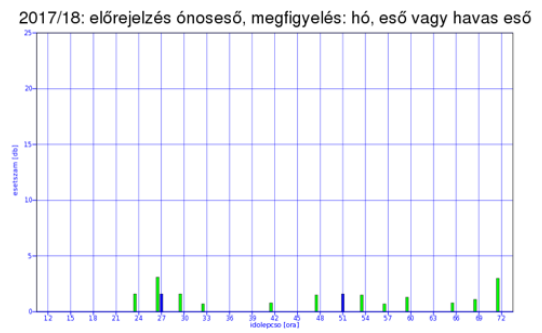
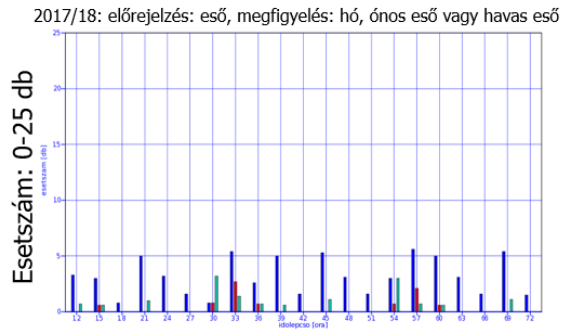
30. ábra: Sikeres előrejelzések aránya az előrejelzési időtáv függvényében
00 UTC +12, +15, ..., +72 óra

9.2. Típusfüggő verifikáció

Emellett a determinisztikus csapadékhalmazállapot-előrejelzés egy újfajta, típusfüggő verifikációját is elkészítettem, amely során azt vizsgáltam, hogy a modell sikertelen csapadéktípus-előrejelzése esetén a valóságban milyen halmazállapotú csapadék hullott. A 31. és 32. ábra alapján elmondható, hogy az előrejelzett eső és hó helyett is sok esetben ónos eső hullott a valóságban, prognosztizált eső esetén az ónos eső mellett havazás is gyakran előfordult. Amikor a modell helytelenül ónos esőt vagy havasesőt jelzett előre, akkor ezek helyett jellemzően hó vagy eső hullott, e kettő közül pedig eső fordult elő gyakrabban. Eltérés a két tél között, hogy a tévesen előrejelzett hó helyett 2016/2017 esetén legtöbbször ónos eső következett be a valóságban, 2017/2018 esetén azonban leggyakrabban havas eső fordult elő ilyen esetben. A két tél közti különbség oka valószínűleg az eltérő hőmérsékleti- és csapadékviszonyokban rejlik (Bíróné, 2017; 2018). Az előrejelzési időtáv növekedésének függvényében egyik tél esetén sem figyelhető meg tendencia az előrejelzés bevalásában.



31. ábra: A valóságban bekövetkező halmazállapot típusok téves előrejelzések esetén 2016/17 telén (zöld: eső, sötétkék: hó, piros: ónoseső, zöldeskék és barna: havaseső) 00 UTC +12, +15, ..., +72 óra



32. ábra: A valóságban bekövetkező halmazállapot típusok téves előrejelzések esetén 2017/18 telén
 (zöld: eső, sötétkék: hó, piros: ónoseső, zöldeskék és barna: havaseső)
 00 UTC +12, +15, ..., +72 óra

10. Összefoglalás

A munka során az ECMWF új, csapadék-halmazállapot-típusra vonatkozó előrejelzését vizsgáltam. Ezen változóra készített ensemble előrejelzések operatív használatát elősegítő, új megjelenítési módszereket dolgoztam ki, majd ezek felhasználhatóságát és többlet információ-tartalmát két esettanulmányon keresztül mutattam be a 2017. január 31-i és a 2018. március 17-18-i ónos esős helyzetet vizsgálva. A magyar fejlesztési eredmények hasznosságát mutatja, hogy 2017 végén az ECMWF ecCharts megjelenítő rendszerében szintén operatív bevezetésre került a csapadéktípusra vonatkozó pontbeli és térképes valószínűségi megjelenítési mód. Az új produktumokat bemutató cikkben kiemelik, hogy a munkájukat inspirálták az magyar nemzeti meteorológiai szolgálatnál megvalósult hasonló fejlesztések (*Gascón et al.*, 2018).

Ezután az elmúlt három télre objektív verifikációt végeztem el a determinisztikus előrejelzésekre alapozottan. 2018. januárban megjelent ECMWF cikkben (*Gascón et al.*, 2018) az európai térségben a 2016/2017-os télre vonatkozó az ensemble verifikációja alapján az első három napban alig csökken a beválás, s az eső és hó előrejelezhetősége egyaránt jó, az ónos esős helyzetek előrejelezhetősége valamivel gyengébb. Magyarország területére a determinisztikus előrejelzésekre vonatkozó eredmények hasonló következtetést alapoznak meg. 2018 második felében – a tervezett Időjárás cikk elkészítése előtt – tervezem a determinisztikus előrejelzések mellett az ensemble előrejelzések objektív verifikációjának elvégzését is. Munkámat 2018. áprilisban a bécsi EGU konferencia poszterszekciójában mutattam be (*Cséke és Ihász*, 2018).

Mind az esettanulmányokon keresztüli szubjektív, mind az objektív verifikáció alapján kijelenthetjük, hogy a csapadék-halmazállapotra vonatkozó előrejelzés jól használható produktum, veszélyes időjárási helyzetekben nagy segítséget jelenthet az előrejelző szakemberek számára. A döntéshozatal során célszerű a determinisztikus és az ensemble produktumokat együttesen alkalmazni. Mindemellett nem célravezető csupán ezen változóra hagyatkozni a döntéshozatal során. Érdekes más paramétereket, mint a felszínközeli hőmérsékleti térképeket, a 0 fokos szint magasságára vonatkozó térképeket, valamint az ensemble vertikális profilt is figyelembe véve komplex módon vizsgálandni.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőmnek, Ihász Istvánnak, hogy áldozatos munkájával segítette e dolgozat elkészítését. Köszönöm a felém irányuló bizalmat, a sok szakmai segítséget, türelmet és biztatást.

Köszönöm tanszéki konzulensemnek, dr. habil. Barcza Zoltánnak a dolgozattal kapcsolatos hasznos észrevételeit.

Köszönöm családomnak és barátaimnak, hogy támogattak ezen dolgozat megírásában.

Irodalomjegyzék

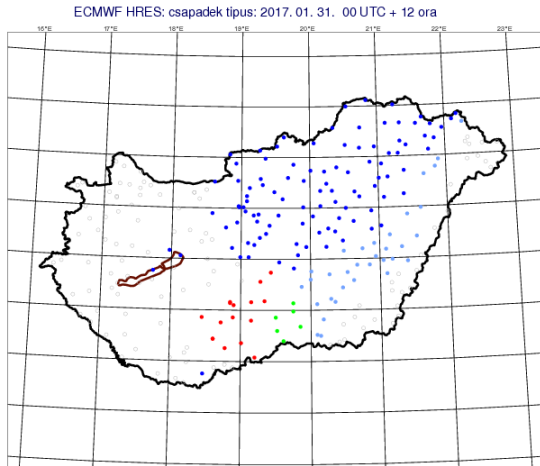
- Andersson, E., 2015: User guide to ECMWF forecast products. pp 121.
- Bíróné Kircsi, A., 2017: 2016/17 telének időjárása, *Léggör*, 61, 53-54.
- Bíróné Kircsi, A., 2018: 2017/18 telének időjárása, *Léggör*, 62, 62-63.
- Bonta, I., 2017: Több, mint 10 éves az OMSZ veszélyjelző rendszere. *Léggör*, Vol. 62 No. 3., 107-113.
- Buizza, R., Bidlot, J.R., Wedi, N., Fuentes, M., Holt, G., Palmer, T., Vitart, R., 2006: The ECMWF variable Resolution Ensemble System (VAREPS). *ECMWF Newsletter*, 108, 14-20.
- Call, D. A., 2010: Changes in ice storm impacts over time: 1886–2000. *Wea. Climate Soc.*, 2, 23–35.
- Cséke, D., Ihász I., 2018: Predictability of precipitation type based on ECMWF ensemble forecasts. EGU General Assembly, Session HS7.2/AS1.17/CL2.06/NH1.17/NP5.4 “Precipitation Modelling: uncertainty, variability, assimilation, ensemble simulation and downscaling”
- Csima G., 2003: A numerikus előrejelzés során alkalmazott utófeldolgozási és verifikációs eljárások. 29. Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa, Budapest, 89-97.
- Forbes, R., Tsonevsky, I., Hewson, T., Leutbecher, M., 2014: Towards predicting high-impact freezing rain events. *ECMWF Newsletter*, 141, 15-21.
- Gascón, E., Hewson, T., Haiden, T., 2017: Improving predictions of precipitation type at the surface: Description and verification of two new products from the ECMWF ensemble. *Weather and Forecasting*. DOI: 10.1175/WAF-D-17-0114.1.
- Gascón, E., Hewson, T., Sahin, C., 2018: New meteogram and map ecCharts products for precipitation type probabilities. *ECMWF Newsletter*, 154, 2-3.
- Hagedorn R., 2008: Using the ECMWF reforecast datasets to calibrate EPS reforecasts, *ECMWF Newsletter*, 117, 8-12.
- Hirsch, T., 2008: Téli magyarországi nagy csapadékos helyzetek vizsgálata és előrejelzése. Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Dr. Iványi Zsuzsa). 86 p.
- Hólm, E., Forves, E., Lang, S., Magnusson, L., Malardel, S., 2016: New model cycle brings higher resolution. *ECMWF Newsletter*, 147, 14-19.
- Ihász, I., 2003: Experiments of clustering for central European area especially in extreme weather situations. *Proceedings of Ninth ECMWF Workshop on Meteorological Systems*, Reading UK, 10-14 November 2003, 112-116.
- Jolliffe, I. T., Stephenson, D. B., 2011: *Forecast Verification: A Practitioners Guide in Atmospheric Science*, Wiley, 240 p.
- Malardel, S., Wedi, N., Deconick, W., Diamantakis, M., Kühlein, Mozdynski, G., Hamrud, M., Smolarkiewicz, P., 2016: A new grid for the IFS. *ECMWF Newsletter*, 146, 23-27.
- Molteni, F. R., Buizza, T. N., Palmer, T. N., Petroliagis, 1996: The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 122, 37-119.
- Nurmi, P., 2003: Recommendations on the verification of local weather forecasts. *ECMWF Technical Memorandum*, 430, 18 p.

- Owens, R. G., Hewson, T. D., 2018. ECMWF Forecast User Guide. Reading: ECMWF. doi: 10.21957/m1cs7h
- Palmer, T., Buizza, R., Hagedorn, R., Lawrence, A., Leutbecher, M., Smith, L., 2006: Ensemble prediction: A pedagogical perspective. ECMWF Newsletter, 106, 10-17.
- Raoult, B., 2001: MARS on the Web: a virtual tour. ECMWF Newsletter, 90, 9-17.
- Siemen, S. and Lamy-Thépaut, S., 2010: MAGICs++ 2-8 – New developments in ECMWF’s meteorological graphics library. ECMWF Newsletter, 122, 32-33.
- Szintai, B., 2006: Rövidtávú ensemble előrejelzések készítése az ALADIN modellel. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Ihász István). 55 p.
- Tuba, Z., Antal, K., 2012: A csapadék halmazállapot változás és a repülésre veszélyes jelenségek kapcsolódási pontjainak bemutatása egy esettanulmányon keresztül. Repüléstudományi közlemények, Vol. 24 No. 2., pp. 357-369.
- Vitart, F., Bonet, A., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bidlot, J. R., Buizza, R., Fuentes, M., Hofstadler, A., Molteni, F., Palmert, T., 2008: Merging VarEPS with the monthly forecasting system: a first step towards seamless prediction. ECMWF Newsletter, 115, 35-44.
- Woods, A., 2005: Medium-Range Weather Prediction – The European Approach. Springer, 270 p.

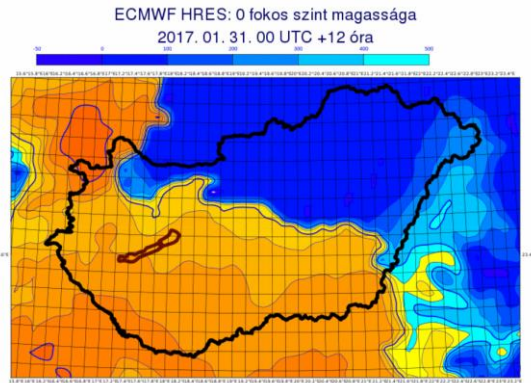
Függelék

I. Függelék: Determinisztikus előrejelzési térképek 2017. január végére

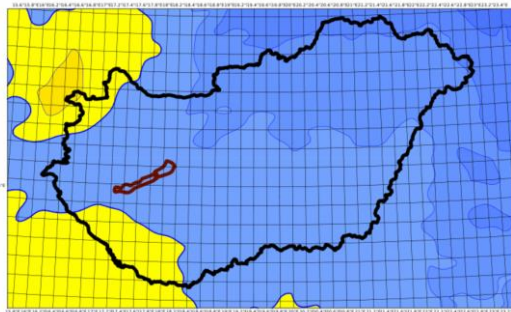
2017. január 31. 12 UTC



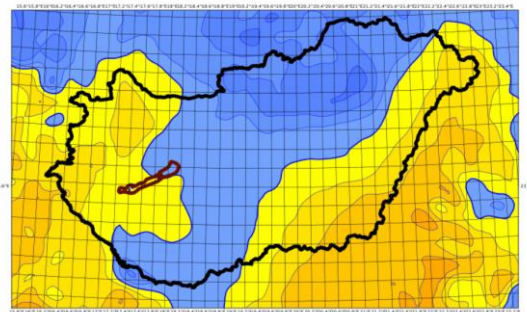
ECMWF HRES: 850 hPa hőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +12 óra



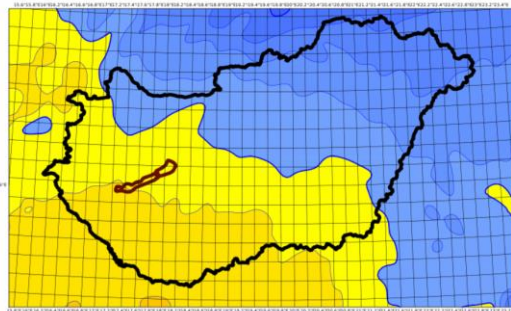
ECMWF HRES: 2m hőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +12 óra



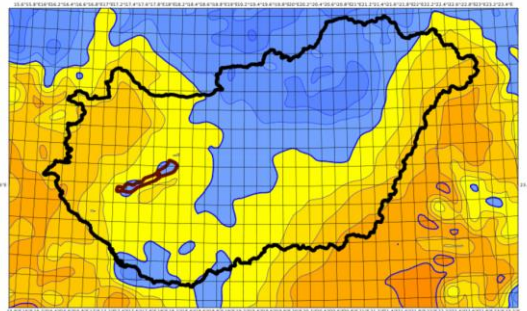
ECMWF HRES: 900 hPa hőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +12 óra



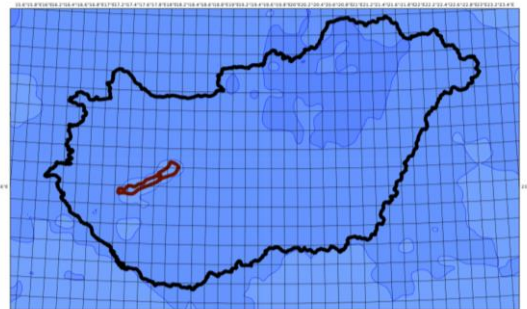
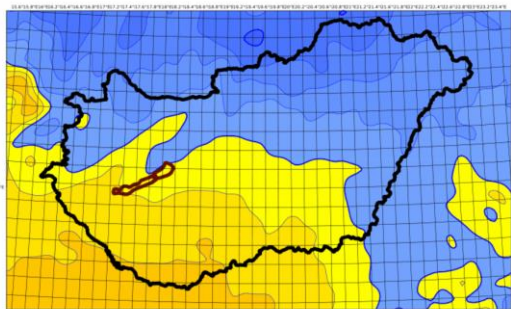
ECMWF HRES: felszínhőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +12 óra



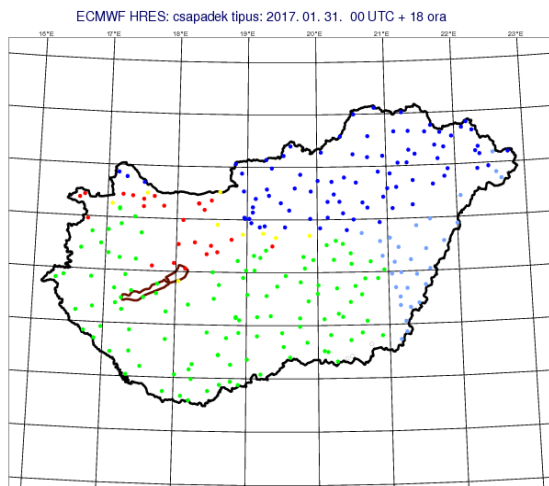
ECMWF HRES: 925 hPa hőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +12 óra



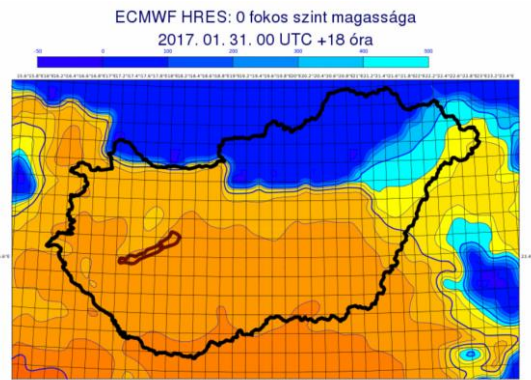
ECMWF HRES: 0-7 cm talajhőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +12 óra



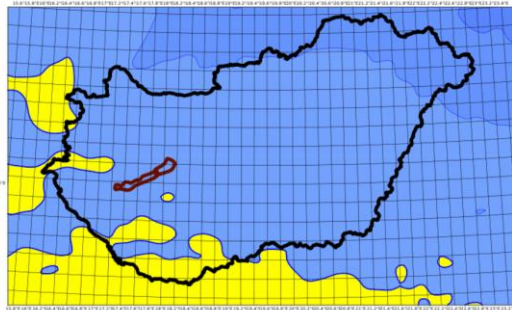
2017. január 31. 18 UTC



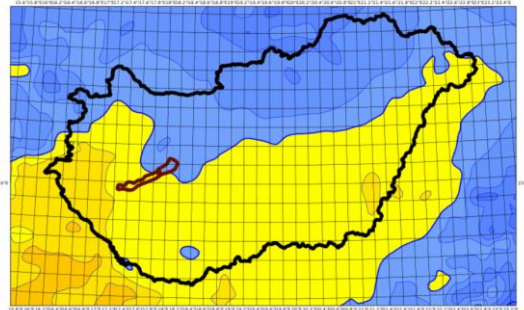
ECMWF HRES: 850 hPa hőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +18 óra



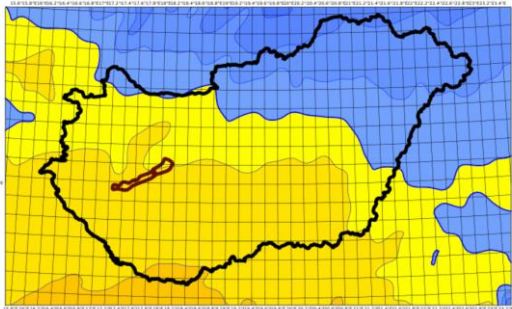
ECMWF HRES: 2m hőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +18 óra



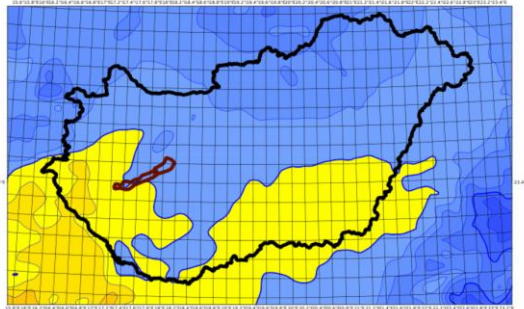
ECMWF HRES: 900 hPa hőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +18 óra



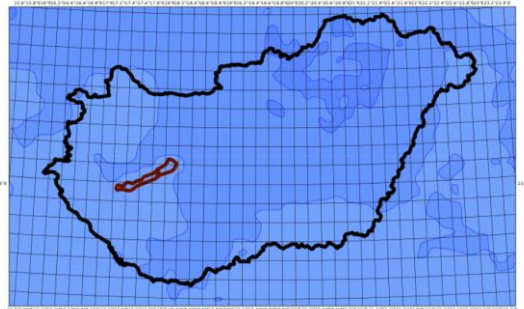
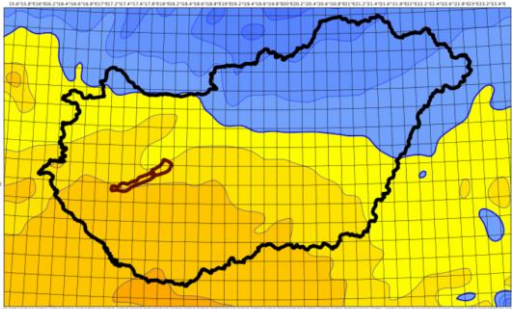
ECMWF HRES: felszínhőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +18 óra



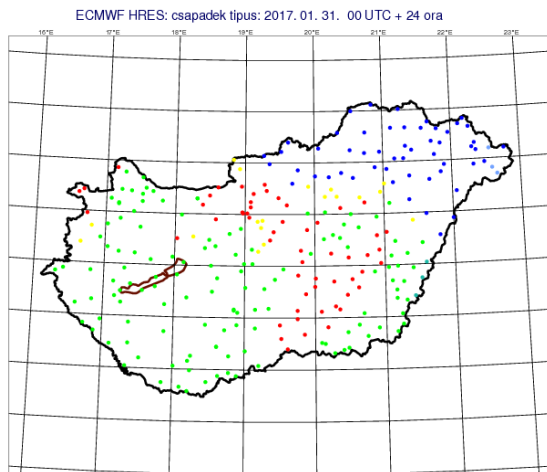
ECMWF HRES: 925 hPa hőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +18 óra



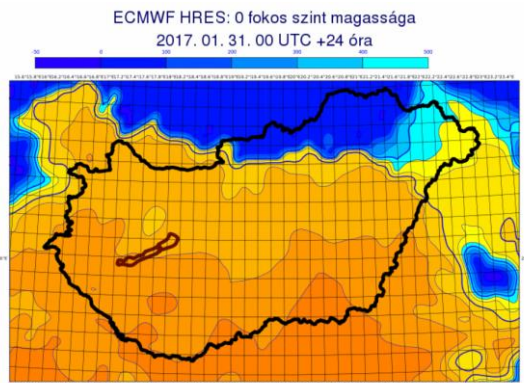
ECMWF HRES: 0-7 cm talajhőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +18 óra



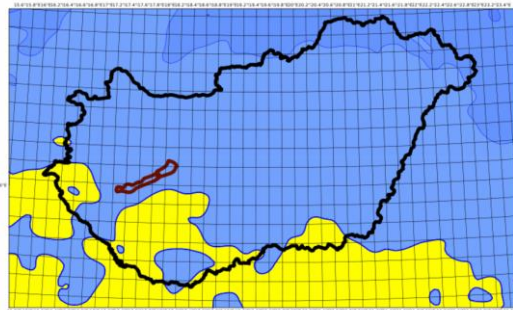
2017. február 1. 00 UTC



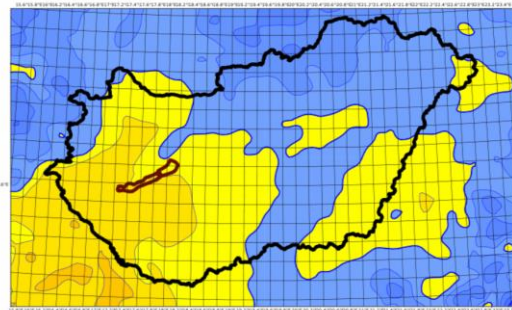
ECMWF HRES: 850 hPa hőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +24 óra



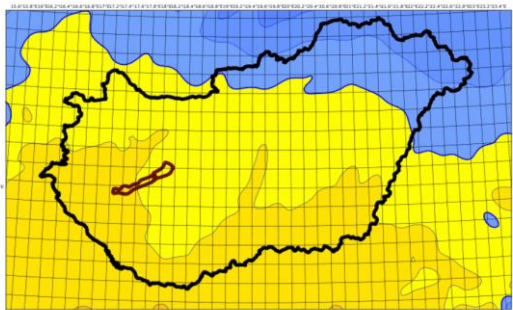
ECMWF HRES: 2m hőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +24 óra



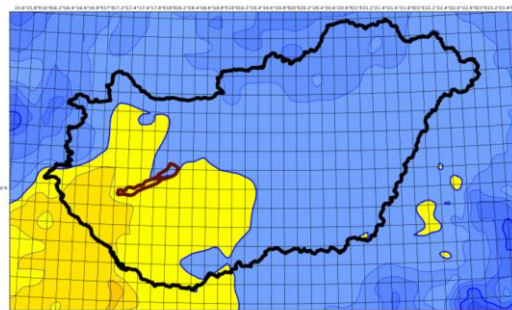
ECMWF HRES: 900 hPa hőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +24 óra



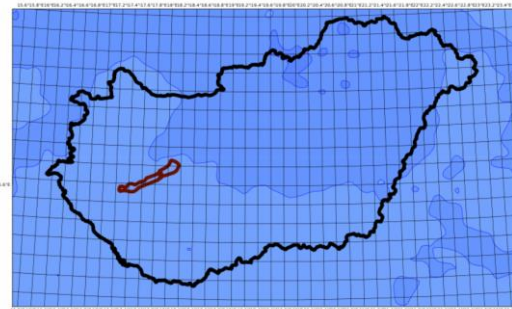
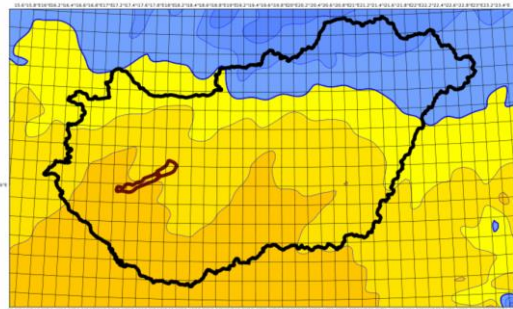
ECMWF HRES: felszínhőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +24 óra



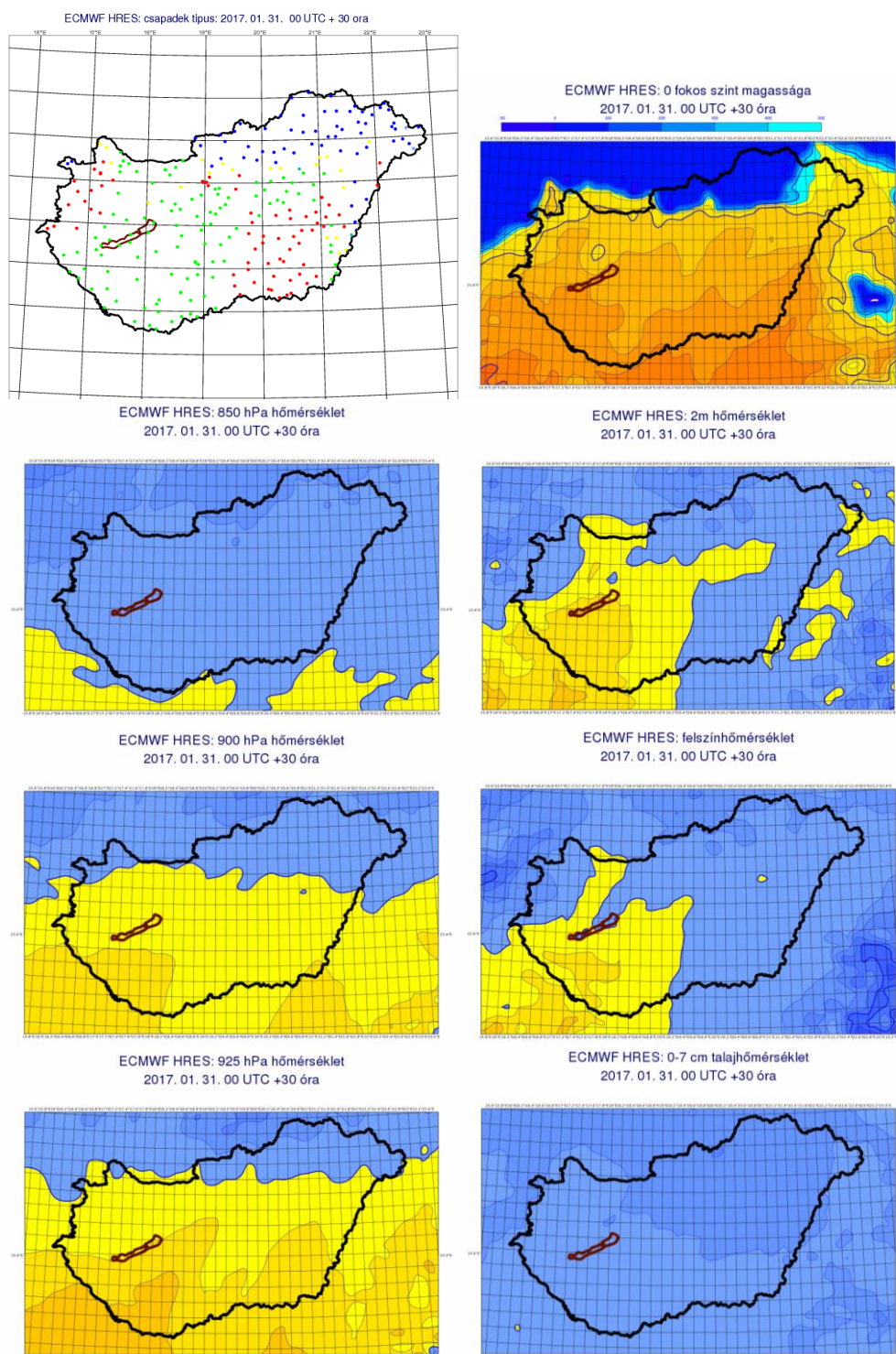
ECMWF HRES: 925 hPa hőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +24 óra



ECMWF HRES: 0-7 cm talajhőmérséklet
2017. 01. 31. 00 UTC +24 óra

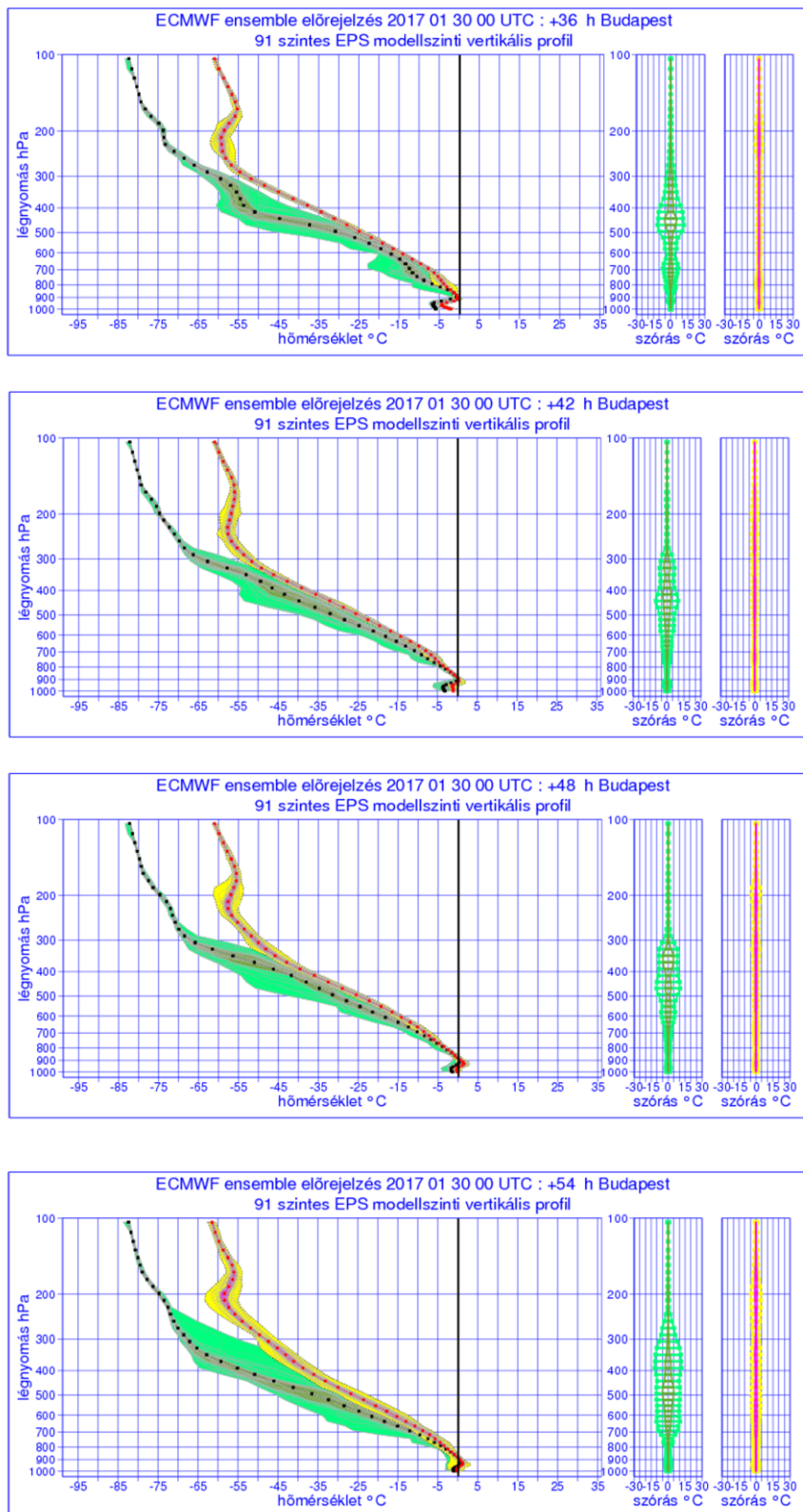


2017. február 1. 06 UTC



FI-1. ábra: Különböző változókra vonatkozó determinisztikus előrejelzés a január 31. 12 UTC és február 1. 06 UTC közötti időszakra, 6 óránként
Csapadéktípus: *eső, hó, havaseső, tapadó hó, ónoseső, jégdara*
Hőmérsékletek: *kék: 0 °C alatt, sárga 0°C felett, izotermák 2 °C-onként*
0 °C-os szint magassága: *kék: 0-500 m, sárga: 500 m fölött*

II. Függelék: Ensemble vertikális profilok 2017. január végére

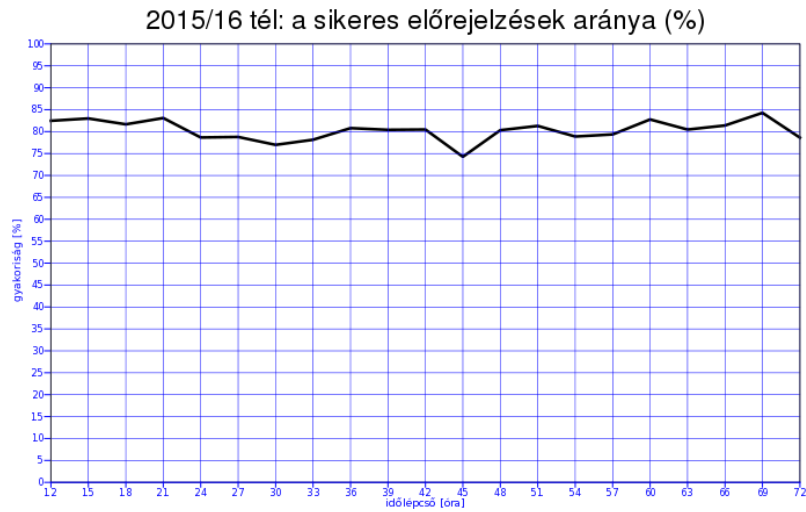


FII-1. ábra: Budapest feletti ensemble vertikális profil előrejelzés a január 31. 12 UTC és február

1. 06 UTC közötti időszakra, 6 óránként

zöld: harmatpont, sárga: hőmérséklet, pontok: ensemble átlag az egyes modellszinteken

III. Függelék: A 2015/2016-os tél verifikációs eredményei



FIII-1. ábra: Sikeres előrejelzések aránya az előrejelzési időtáv függvényében



FIII-2. ábra: A valóságban bekövetkező halmazállapot típusok téves előrejelzések esetén
(zöld: eső, sötétkék: hó, piros: ónosó, zöldeskék és barna: havasesó)
00 UTC +12, +15, ..., +72 óra