

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Meteorológiai Tanszék

# **Időben eltérő AROME modellfutások ensemble rendszerként történő vizsgálata**

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

**Suga Réka**

Meteorológus mesterszak,  
Előrejelző szakirány

Témavezető:

**Szűcs Mihály**

Országos Meteorológiai Szolgálat

Külső konzulens:

**Simon André**

Országos Meteorológiai Szolgálat

Belső konzulens:

**dr. habil. Barcza Zoltán**

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2017

# Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	4
1. Numerikus modellezés .....	6
1.1. A modellezés célja és fejlesztése.....	6
1.2. Néhány korlátos tartományú numerikus modell európa térségében.....	9
1.3. ALADIN-AROME korlátos tartományú modellek .....	10
1.4. Bizonytalanságok a numerikus időjárás-előrejelző és az éghajlati modellekben	13
1.5. Az ensemble módszer.....	14
1.5.1. Az ensemble előrejelzés alkalmazási területei .....	15
1.5.2. Példák ensemble rendszerekre.....	15
2. Verifikáció, verifikációs indexek különböző csoportosítása és bemutatásuk.....	17
2.1. Bináris-determinisztikus előrejelzés.....	17
2.1.1. A bináris determinisztikus előrejelzéshez használt mérőszámok .....	18
2.2. Multikategóriás-determinisztikus előrejelzés.....	20
2.2.1. A multikategóriás-determinisztikus előrejelzéshez használt mérőszámok.....	20
2.3. Folytonos-determinisztikus előrejelzés .....	21
2.3.1. A folytonos-determinisztikus előrejelzéshez használt mérőszámok .....	21
2.4. Valószínűségi előrejelzés.....	22
2.4.1. Ensemble, mint valószínűségi előrejelzés .....	23
2.4.2. Alkalmazott valószínűségi („probabilistic skill”) mérőszámok az ensemble előrejelzésnél .....	23
2.4.3. Talagrand diagram .....	27
2.4.4. Spread-skill diagram.....	30
3. A kvázi-AROME-EPS.....	31
3.1. A feladat során elvégzett technikai munka leírása.....	31
3.2. A kvázi-AROME-EPS bemutatása esettanulmányokkal.....	34
3.2.1. Esettanulmány légzuhatagra (downburst) .....	34
3.2.2. Esettanulmány multicellás csoportra (cluster-re) .....	39
3.2.3. Esettanulmány szupercellára és légzuhatagra (downburst).....	43
3.2.4. Esettanulmány instabilitási vonalra (zivatarlánc).....	48
3.2.5. Esettanulmány viharos széllelkésre.....	51

3.2.6. Esettanulmány őszi szupercellás helyzetre.....	55
3.2.7. További felhasználási lehetőségek.....	60
3.3. A kvázi-AROME-EPS verifikációja.....	62
4. Összefoglalás .....	72
Köszönetnyilvánítás .....	74
Irodalomjegyzék .....	75
Függelék .....	80

## Bevezetés

A meteorológia egy dinamikusan fejlődő ága a numerikus modellezés, mely lehetőséget teremt az atmoszféra és a kapcsolódó szférák folyamatait leíró egyenletek halmazának számszerű megoldásain keresztül, meteorológiai előrejelzések készítésére (*Pieczka, 2007*). Napjainkban az időjárás-előrejelzés meghatározó részben a számítógépes előrejelző modellek eredményeinek alkalmazásán alapszik (*Horányi et al., 1998*). A rendelkezésünkre álló számítógépes kapacitás bővülése, a megfigyelések növekvő száma valamint az elméleti háttér jobb megértése járult hozzá az elmúlt néhány évtizedben a numerikus prognosztikában és a klímamodellezésben jelentkező fejlődéshez (*Szűcs et al., 2016*). Ennek ellenére a meteorológiai előrejelzések nem lehetnek tökéletesek, ami a légkör és az éghajlati rendszer karakterisztikáira vezethető vissza (*Vissy, 2004*). Az előrejelzés bizonytalansága fakadhat a kezdeti feltételekből és magából a modelltől is, mely bizonytalanságok gyorsan nőnek az idő előrehaladtával. Mivel ezek a bizonytalanságok nem kerülhetők ki, csak minimalizálhatóak, a reprezentációjuk és a számszerűsítésük elengedhetetlen mind a numerikus időjárás-előrejelzésben mind a klímakutatásban. Jelenleg az egyetlen megvalósítható módszer a probléma leküzdésére az ensemble közelítés, mely segítségével a numerikus időjárás-előrejelzések és klímaprojekciók bizonytalanságát tudjuk megbecsülni, valamint valószínűségi információt tudunk azokból kinyerni. A felhasználók számára a bizonytalanság becslése értékes információ lehet, mely megfelelő alkalmazás esetén eredményesen használható a döntéshozatalban (*Szűcs et al., 2016*).

Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) jelenlegi operatív ensemble előrejelző rendszere a hidrosztatikus Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International (ALADIN) modell futásaira épül, melyek horizontális felbontása 8 km (*Hágel, 2010*). A kis skálájú folyamatok (elsősorban a konvekció) jobb reprezentációja érdekében célszerű a nem-hidrosztatikus, 2,5 km-es felbontású Applications of Research to Operations at MEscale (AROME) modellre támaszkodni (*Szintai et al., 2015*). Az operatív gyakorlatban ezt a váltást a megnövekedő számítási igény akadályozza meg jelenleg.

E probléma áthidalása érdekében diplomamunkámban szeretném bemutatni, hogy miként lehet a már meglévő, napi 8 determinisztikus AROME futást egy ensemble rendszer tagjaiként kezelni, és az így létrehozott sokaságból valószínűségi információt kinyerni. Munkám során ezt a továbbiakban kvázi-AROME-EPS-ként nevezett rendszert tanulmányoztam. Esettanulmányok segítségével vizsgáltam, finomítottam az OMSZ vizualizációs rendszerében (HAWK-3: Hungarian Advanced Workstation (*Hágel, 2010*))



történő megjelenítést, hogy az előrejelzők számára minél informatívabb legyen. A rendszer bevalásának számszerű megjelenítéséhez verifikáltam az eredményeket, valamint összevettem az ALADIN ensemble előrejelző rendszer verifikációjával, hogy a kis skálájú folyamatok melyikben jelennek meg jobban.

A dolgozatban először áttekintem a numerikus modellezés fő lépéseit, a modellek különböző fajtáit, valamint az AROME nem-hidrosztatikus korlátos tartományú modell felépítését és az ensemble előrejelző rendszert (**1. fejezet**). Ezt követően az előrejelzések verifikációjára használt mérőszámok csoportosítását ismertetem (**2. fejezet**). A **3. fejezetben** bemutatom, miként lehet időben eltoltt AROME futásokból kvázi-ensemble rendszert létrehozni. Ismertetem a rendszer előállításának technikai hátterét, majd esettanulmányokon keresztül vizsgálom, végül verifikációs mérőszámokkal jellemzem azt. A **4. fejezetben** olvasható a dolgozat összefoglalása.

## 1. Numerikus modellezés

Az időjárás hatással van mindennapi életünkre, így annak előrejelzése az emberiség évezredek óta igénye. Azonban az időjárás előrejelzése csak az utóbbi százötven évben vált tudománnyá (*Vissy, 2004*).

Ezen időszakban beszélhetünk a numerikus időjárás-előrejelzés kezdetéről, mely az 1950-es évekre tehető (*Seity et al., 2010*), azonban már a XX. század első felében is születtek meghatározó kutatások, kísérletek. Ilyen volt Richardson kísérlete (1922), aki egy viszonylag egyszerű előrejelző modellt épített fel. A kísérlet sikertelensége ellenére (melynek okai ma már ismertek), a szakterület dinamikusan fejlődött, melyben nagy szerepe volt a számítógépek megjelenésének. Az ötvenes, hatvanas években az időjárás-előrejelzéséhez szűrt, majd a hetvenes évektől kezdve primitív egyenleteket alkalmazó modelleket hasznosítottak. A szűrt modellek esetén az alapegyenleteket úgy módosították, hogy ne tegyék lehetővé a gyors terjedésű hullámok kialakulását, azonban ezzel a valós légköri folyamatok is torzultak. Így a „teljes” alakú, primitív egyenletek használatára tértek vissza. A numerikus előrejelzés folyamatát három fő lépésre oszthatjuk, mégpedig az analízis készítésére, az inicializációra és a modell egyenleteinek megoldására. A modelleredmények felhasználásának szempontjából fontos megemlíteni továbbá az utófeldolgozási folyamatot (*Horányi et al., 1998*).

### 1.1. A modellezés célja és fejlesztése

A numerikus előrejelzésnél a modellalkotásnak gyakorlati célja van, hiszen a jövőbeli időjárás alakulásáról szeretnénk információt szerezni (*Práger, 1982*). A számszerű időjárás-előrejelzési modellek olyan matematikai algoritmusok és azok számítógépes programjai, amelyek alapvető fizikai törvényszerűségek alapján írják le a légkörben zajló áramlási és hőtan folyamatokat (*Pieczka, 2007*). Szinte minden előrejelzési modell ezeket a hidro- és termodinamikai folyamatokat leíró törvényszerűségeket alkalmazza, melyek az összenyomható gázok megmaradási törvényeit, az impulzus, a tömeg és az energia megmaradás törvényeit alkalmazzák, vagy használják fel kiindulásként. A már említett fizikai törvények matematikai formuláit – parciális differenciálegyenletek – együttesen a légkör hidro-termodinamikai egyenletrendszerének (a továbbiakban röviden HTER) nevezzük. A rendszer tagjai közé sorolható a kontinuitási egyenlet, az Euler-féle

mozgásegyenlet, a száraz levegő állapotegyenlete, a termodinamikai egyenlet, valamint a nedvesség kontinuitási egyenlete. A HTER egyenleteiben 5 különböző állapotváltozó van jelen: a sűrűség, a nyomás, az abszolút hőmérséklet, a specifikus nedvesség és az áramlási sebesség. Ezek közül csak a sebesség vektormennyiség, a többi skalár. Az öt változóhoz öt egyenlet tartozik (felbontott szélkomponensek esetén hét-hét), így zárt egyenletrendszer kapunk. A parciális differenciálegyenletekre vonatkozó, a kezdeti feltételek és a határfeltételek megadásával létrejövő feladat a vegyes feladat.

A prognózis készítése a HTER-re vonatkozó vegyes feladatnak tekinthető, tehát szükség van a kezdeti és peremfeltételek megadására. A hidro-termodinamikai egyenletrendszer numerikus előrejelzés céljára átalakított változatát prognosztikai vagy előrejelzési egyenletrendszernek nevezik (*Práger, 1982*). A HTER analitikus megoldása nem ismert, így az egyenletrendszert időben és térben diszkretizálni kell, míg a megoldásra numerikus módszereket alkalmazunk. A gyakorlatban az egyenleteket egy térképsíkra vetítjük le, a leképezésnek pedig folytonosan differenciálhatónak kell lennie. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál használt ALADIN és AROME modellek Lambert-féle kúpvetületet alkalmaznak, ami csak kis torzítást eredményez a közepes szélességeken, így hazánk területén is. A numerikus modellezési gyakorlatban a legelterjedtebb vertikális koordináta-rendszer a hibrid,  $\eta$ -rendszer, ami a felszínkövető és nyomási rendszert kombinálja oly módon, hogy a légkör talajhoz közeli részén felszínkövető, majd a magassággal emelkedve fokozatosan átmegy nyomási rendszerbe [1 - Alkalmazott számszerű előrejelzés].

A modell futtatása során első lépésként meg kell határozni a rendszer kezdeti állapotát. Ez döntően befolyásolja az előrejelzés minőségét, mivel a légköri folyamatok nemlineárisak, és ezért fejlődésük során rendkívüli érzékenységet mutatnak a kezdeti feltételekre.

A modellek a tartományuk szempontjából két nagy csoportra bonthatóak: globális és korlátos tartományú modellekre. A vizsgált tartományt egy háromdimenziós térbeli ráccsal kell lefednünk így a kezdeti állapotot leíró meteorológiai állapotváltozókat is a háromdimenziós térben szükséges ismernünk. A megfigyelések azonban nem egyenletesen helyezkednek el, gondoljunk csak az óceáni térségben vagy a sarkvidéken található állomáshálózat gyér sűrűségére (*Horányi et al., 1998*). Így a tér- és időbeli szabályosság elérése érdekében interpolációt kell végezni, valamint más információkat, elsősorban a modell korábbi futásainak eredményeit (modell háttérmezők), valamint a légköri folyamatokról alkotott ismereteinket is figyelembe kell venni [1 - Alkalmazott számszerű előrejelzés]. A numerikus előrejelzéshez szükséges kezdeti feltételek előállításának folyamatát adatasszimilációnak nevezzük (*Pieczka, 2007*). Az adatasszimiláció részének

szokták tekinteni az inicializációt, mely a nemkívánatos hullámjelenségek kiszűrésére alkalmazott módszerek gyűjtőneve. E lépés kihagyása volt az egyik fő oka Richardson kudarcának, mivel a gyorsan terjedő hullámokat (hanghullám) is figyelembe vette a kísérletében. Az előrejelzés első néhány órájában ezek a hullámtermészetű „zajok” olyan erősen eltorzíthatják a modelleredményt, hogy az használhatatlanná válik (*Horányi et al.*, 1998).

A kezdeti feltételeken túl a HTER egyértelmű megoldásához a légkör határán (a felszínnél valamint az atmoszféra tetejénél) szükségünk van a peremfeltételek megadására is (*Práger*, 1982). Ha az egész Föld helyett csak egy korlátos tartományú területre készítünk előrejelzést, akkor a számítási igények csökkennek, azonban az alsó és felső határfeltételek mellett meg kell adni az oldalsó peremfeltételeket is. Erre azért van szükség, hogy a tartományon kívül lezajló folyamatok hatásait is figyelembe vehessük. A gyakorlatban valamely globális modell előrejelzését, mint oldalsó peremfeltételt használjuk fel a tartomány határán, majd annak belsejében ehhez igazítjuk a meteorológiai változók értékeit. A korlátos tartományú modellek alkalmazásához tehát szükség van a globális modellek eredményeire is. Ennek kapcsán nem szabad megfeledkezni arról, hogy a globális modell térbeli felbontása gyengébb, mint az arra épülő korlátos tartományú modellé.

Végül a numerikus modell integrálásának eredményeként előállnak a prognosztikai változók jövőbeli becsült értékei, melyek az utófeldolgozást követően az előrejelző meteorológus szakemberek és felhasználók számára széleskörűen értelmezhetővé és alkalmazhatóvá válnak (*Horányi et al.*, 1998).

A különböző modelltermékeket a meteorológiai gyakorlat széles körében alkalmazzák (pl. rövidtávú előrejelzés, szennyezőanyag-terjedés). Ezért a felhasználói réteg számára nyújtott végtermékek még pontosabb előállítására a modellfejlesztés egyik fő célja. A fejlesztés területe lehet a pontosabb kezdeti feltétel előállítása, a modell térbeli felbontásának javítása, a HTER megoldásához használt numerikus módszerek fejlesztése (modell dinamika) vagy a kis skálájú folyamatok minél pontosabb paraméterezése (modell fizika) (*Pieczka*, 2007).

A meteorológiai előrejelzés mindig hibával terhelt, ezért csak úgy lehet teljes, ha számszerűsítjük az előrejelzésekben található bizonytalanságokat, illetve megadjuk az előrejelzett időjárási események valószínűségét. A modellezési folyamatban rejlő bizonytalanságokat az ensemble módszer segítségével írhatjuk le [1 - Alkalmazott számszerű előrejelzés], melyet bővebben az **1.5 fejezetben** fejtek ki.

## 1.2. Néhány korlátos tartományú numerikus modell Európa térségében

Ahogy a fentiekben láthattuk, megkülönböztethetünk globális és regionális (korlátos tartományú) modelleket. Az előbbi eredményei elengedhetetlenek a nagy skálájú szinoptikus helyzet analíziséhez és a regionális modellek peremfeltételeinek előállításához. Az utóbbi segítségével precízebb prognózisok készülhetnek a finomabb felbontásnak köszönhetően (Mile, 2008). A nemzeti meteorológiai szolgálatok által alkalmazott korlátos tartományú modellek felbontása a szuperszámítógépek kapacitásával együtt fejlődött. A 2000-es évektől a korlátos tartományú modellek többsége 10 km-es horizontális felbontással rendelkezett. Az operatív előrejelzés javításával a mezoskálájú modellek megmutatták a kilométeres felbontásban rejlő lehetőségeket az olyan speciális időjárási eseményekhez köthető jelenségeknél, mint például a villámárvíz azaz „flash flood” (Seity *et al.*, 2010). Ilyen villámárvíz fordult elő 2014. május 17-én a Börzsönyben, ahol 83,5 mm csapadékot mért a királyréti társadalmi csapadékmérő [2 - met.hu]. Ducrocq (2002) megmutatta, hogy a mezoskálájú analízis esetenként fontosabb lehet az oldalsó peremfeltételeknél a heves esőzések sikeres előrejelzésében (Seity *et al.*, 2010).

Fontos kiemelni, hogy a különböző modellek különböző méretskálájú légköri folyamatok leírására alkalmasak (Vissy, 2004). A numerikus modellek által alkalmazott háromdimenziós rácsfelbontás határozza meg azon folyamatok méretskáláját, melyeket az közvetlenül le tud írni. Léteznek azonban a rácsfelbontásnál kisebb (ún. szub-grid) skálájú légköri folyamatok, melyek visszahatnak a nagyobb skálájú folyamatokra. A meteorológia szempontjából ilyen lényeges folyamat a konvekció, a turbulencia, a mikrofizika, a sugárzás és a talaj-légkör kölcsönhatások. Ezek leírása parametrizációk útján történik a numerikus modellekben [1 - Alkalmazott számszerű előrejelzés]. Szürke zónának nevezzük azt a területet, ahol a légköri folyamat egy részét a modell már explicit módon leírja az adott rácsfelbontáson, a fennmaradó részét azonban parametrizálni kell [3 - met.hu]. A konvektív szürke zóna (körülbelül 3-6 km közötti felbontás esetén) átugorható a 2,5 km-es horizontális felbontás alkalmazásával. Ez vezetett az AROME – France koncepciójához Franciaországban, illetve több hasonló európai projekthez, mint például a 2,8 km-es felbontással rendelkező német Consortium for Small Scale Modelling-hez (COSMO) (Baldauf *et al.*, 2011), vagy az Egyesült Királyságban használt Unified Model 4 km-es felbontású változatához. Utóbbi két európai modell 2007 óta operatív (Seity *et al.*, 2010).

### 1.3. ALADIN-AROME korlátos tartományú modellek

Az Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle (ARPEGE)/ALADIN modellcsalád kifejlesztése a Météo-France által szorgalmazott nemzetközi együttműködés keretein belül valósult meg a 90-es évektől kezdve. Ezen időszakban, a Météo-France és a European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) által közösen megalkotott ARPEGE/Integrated Forecasting System (IFS) még a fejlesztés kezdeti állapotában járt. Az ARPEGE/IFS egy spektrális globális modell, 3D- és 4DVAR variációs adatasszimilációs rendszerrel. Az ALADIN projekt fő célja, hogy az ARPEGE/IFS keretrendszeret kiterjesztve, egy olyan korlátos tartományú modellcsaládot hozzon létre, mely alkalmas a globális modelleredmények dinamikus adaptációjára finomabb felbontás mellett.

Az ALADIN egy spektrális, mezoskálájú, korlátos tartományú numerikus időjárás-előrejelző modell. A horizontális meteorológiai mezőket kétdimenziós Fourier-felbontásokkal adhatjuk meg, míg a HTER térbeli differenciáloperátorait a csonkolt Fourier-függvényeknek az analitikus deriváltjaival számítjuk ki. A fentiekben már említett, a numerikus modellezési gyakorlatban legelterjedtebb vertikális koordináta-rendszer a hibrid  $\eta$ -rendszer, ami a felszínkövető és nyomási rendszert kombinálja, ezek kapcsolatát pedig az alábbi [1] egyenlet írja le:

$$p(x, y, \eta, t) = A(\eta) + B(\eta) p_s(x, y, t), \quad [1]$$

ahol  $p_s(x, y, t)$  a felszíni nyomás és az  $A$  és  $B$  koefficiensek esetében az  $A(1) = 0$ ,  $B(1) = 1$ ,  $B(0) = 0$  határfeltételek érvényesek, továbbá  $\partial\eta / \partial p > 0$ .

Az ARPEGE/IFS rendszer és az ALADIN kódja együtt fejlődött, az utóbbi számítógépes kódja közel 90%-ig azonosságot mutat az ARPEGE-ével. A legfontosabb különbség e két kód között a spektrál transzformációs csomagban található (spektrális vagy Fourier és rácsponti terek közötti transzformáció). A korlátos tartományú modell tulajdonságának köszönhetően az ALADIN-nak szüksége van oldalsó peremfeltételekre is (Horányi *et al.*, 2006). Az OMSZ-nál alkalmazott ALADIN a peremfeltételeit jelenleg a globális ECMWF/IFS-ből nyeri [4 – umr-cnrm.fr], melynek 9 km-es a felbontása és 4DVAR-ral fut [5 – ecmwf.int].

A Météo-France ARPEGE-ből és ALADIN-ból álló időjárás-előrejelző rendszere 2008. december 18-ától bővült ki az operatív AROME–France-szal. Az AROME nagyobb rácsfelbontással rendelkezik kisebb terület felett, így mezoskálájú jelenségeket leíró regionális előrejelzések készítésére is alkalmas (*Bénard et al.*, 2010).

Az OMSZ-nál 2010 óta operatív AROME 2,5 km-es horizontális rácsfelbontással rendelkezik, és a Kárpát-medencénél némileg nagyobb tartományra fut (lásd **1.5.2. ábra**). A korábbi négy helyett a modellt napi nyolcszor futtatják: a főterminusokból (00, 06, 12 és 18 UTC-kor) 48 órára, a mellékterminusokból (03, 09, 15, 21 UTC) pedig 36 órára. A kezdeti feltételeket a légköri 3DVAR és a felszíni OI\_main (optimális interpoláció) adatasszimilációs rendszer segítségével állítja elő, míg az oldalsó peremfeltételeket az ECMWF/IFS modell biztosítja [4 – umr-cnrm.fr]. A csak hagyományos megfigyelést (felszíni, rádiószondás, repülőgépes mérések) alkalmazó adatasszimilációs rendszere 2013 óta operatív az OMSZ-nál (*Böloni*, 2005; *Szintai et al.*, 2015).

Az AROME modell az ALADIN dinamika nem-hidrosztatikus változatát használja (ALADIN-NH), mely SI-SL időbeli sémát használ, ami lehetővé teszi hosszabb időlépcső alkalmazását (*Szintai*, 2006). Az ALADIN-hoz hasonlóan spektrális modell és hibrid vertikális koordináta-rendszert használ (*Simmons et al.*, 1981).

A prognosztikus változóknak nincs vertikális kiterjedésük, aminek eredményeképpen minden változóra egy SL trajektória vonatkozik. Az operatív AROME jelenleg tizenkét darab háromdimenziós prognosztikus változót használ. Ide tartozik a horizontális szél két komponense és a hőmérséklet, a turbulens kinetikus energia valamint a nyomás és a vertikális divergencia nem-hidrosztatikus folyamatok általi megváltozása (*Bénard et al.*, 2010).

A mikrofizikai parametrizációhoz a Méso-NH mikrofizikai rendszerét, az ICE3 parametrizációt használja (three-class ice), melyben a specifikus vízgőztartalom, az eső, a hó, a graupel, a felhőcseppek és a jégkristályok szerepelnek. Az ICE3 megkülönbözteti a hulló (hó, eső, graupel) és a nem hulló csapadékot (jégkristály, felhőcsepp) egymástól. Az ICE3 sémánál fejlettebb séma lehet a jövőben az ICE4, melyben már a jégeső is megjelenik prognosztikus változóként (*Lascaux et al.*, 2006).

A 2,5 km-es felbontás lehetővé teszi a modelldinamika számára a mélykonvekció explicit leírását, míg a sekélykonvekció esetében parametrizációt kell alkalmazni (tömegfluxus séma). E tömegfluxus séma az Eddy Diffusivity Mass Flux (EDMF) sémáján alapszik.

A turbulencia reprezentációja a planetáris határrétegben a TKE egyenletén és a diagnosztikus keveredési rétegen alapszik. Az AROME által használt TKE módszer szintén a Méso-NH-ból lett átemelve.

A sugárzás modellezésére ECMWF parametrizációt használ. A rövidhullámú sugárzási séma hat spektrális csatornát alkalmaz.

Ahhoz, hogy a modellben a felszín és légkör közti kölcsönhatásokat korrekt módon tudjuk leírni, fejlett felszíni modell alkalmazására van szükségünk. Az AROME modellben ezt a szerepet a SURFEX tölti be, melyben a felszín leírására minden cella négy felszín típusra van osztva: természetes földfelszín, városra, tengerre és tavakra-folyókra. A talaj-bioszféra-atmoszféra kölcsönhatásokat az Interactions between Soil, Biosphere and Atmosphere (ISBA) míg a városi felszín hatását a Town Energy Balance (TEB) séma segítségével modellezzik.

Összefoglalva, a 2,5 km-es felbontású AROME három fő komponensből áll. Az ALADIN-ból örökölt nem-hidrosztatikus dinamikából, a mezoskálájú fizikából, ami főként a Méso-NH kutatási modellből származik, valamint a 3DVAR adatasszimilációs rendszerből. Az AROME és ALADIN összehasonlításakor az előbbi előrejelzése realisztikusabb eredményeket ad, ami a mezoskálájú fizikának és dinamikának tulajdonítható. Pontosabbnak tekinthető továbbá az alacsonyszintű nedvességi (köd) valamint a konvektív folyamatok előrejelzésénél (*Seity et al.*, 2010). Az AROME rövidtávú prognózisait a meteorológusok főként veszélyes időjárási jelenségek előrejelzésére használják (*Szintai et al.*, 2015).



## 1.4. Bizonytalanságok a numerikus időjárás-előrejelző és az éghajlati modellekben

A numerikus időjárás modellek mindig hibával terheltek, így a továbbiakban a bennük előforduló hibákat két csoportra bonthatjuk forrásuk alapján. Az első az úgynevezett „God-given error”, ami a légkör kaotikus viselkedését hivatott szemléltetni. Hasonlóan az egyszerű, nemlineáris egyenletekkel leírt alacsony dimenziójú rendszerekhez, a légkör is nagyon érzékeny a kezdeti feltételekre. A kezdeti állapot kis eltérései hatalmas különbségekhez vezethetnek a jövőben. Más szavakkal, még a kis bizonytalanságok is gyorsan növekedhetnek, és szignifikáns hatást gyakorolhatnak az időjárás-előrejelzés kimenetelére. Mivel tökéletes kezdeti feltétel nem adható, az előrejelezhetőség mindig korlátolt időtartamú marad a modellek folyamatos fejlődésének ellenére is. A hibák másik csoportja a „man-made errors”, mely az az emberi tudás adott rendszerrel kapcsolatos hiányosságaira, valamint a modellezés technikai hatáira utal. A numerikus modell nem tökéletes mása a földi rendszernek, ezenfelül számos közelítést tartalmaz; például a mögöttes matematikai egyenleteket numerikus megoldásai tér- és időbeli diszkrétizációval készülnek. A gyakorlatban a modellhibák e két típusa nem választható el élesen és együtt fejlődnek az előrejelzés során.

A numerikus modellek által használt kezdeti feltételek döntő többsége a komplex adatasszimilációs módszerből származik, mely megfigyeléseket és háttér-információkat használ. Ez a háttér-információ általában az analízis időpontjára számított rövidtávú előrejelzés (a már fent említett first guess), következésképpen nem tökéletes. A megfigyelések ugyancsak tartalmazhatnak hibákat, kezdve a műszerhibától a mérés környezetének nem megfelelő reprezentativitásáig. Emellett beszélhetünk a megfigyelések térbeli és időbeli inhomogenitásáról is. Egyéb hibaforrást jelentenek az asszimilációs módszer által használt közelítések.

A modell kormányzóegyenletei parciális differenciálegyenletek, melyeknek nincs analitikus végeredménye, következésképpen diszkrétizálás után numerikusan kell megoldani. A számítógépes lehetőségeket figyelembe véve a diszkrétizálás korlátozott, tehát a rácsfelbontás véges. Valamint azon tény ellenére, hogy a jelenlegi szuperszámítógépek igazán hatékonyak, a modell rács továbbra is képtelen leírni minden meteorológiai jelenséget, ezért parametrizációra van szükség. Azonban ezek a parametrizációk csak egy becslést adnak a szub-grid folyamatok átlagos hatásáról. A modell számára szükséges

továbbá az alsó és felső peremfeltételek megadása, melyek közül a felszín leírása bonyolultabb és ezáltal bizonytalanabb. Emellett a korlátos tartományú modellek oldalsó peremfeltételeket is használnak, melyek kapcsolatban állnak a tartományon kívüli folyamatokkal is. Az előrejelzés bizonytalansága függ továbbá a vizsgált paramétertől. Például az 500 hPa-os geopotenciálmező nagyobb, szinoptikus skálájú jelenségeket mutat meg, melyek könnyebben előrejelezhetők, mint például a csapadék, melyet befolyásolnak a lokális hatások és olyan kis skálájú folyamatok, mint a konvekció.

Mindezen bizonytalanságokat szem előtt tartva elmondható, hogy az egyszerű előrejelzéseket fontos lehet valószínűségi információval kiegészíteni. Mivel a kis skálájú folyamatok előrejelezhetősége kisebb, a valószínűségi előrejelzés fontossága növekszik a modelfelbontással és a folytonos modellfejlesztésekkel (*Szűcs et al.*, 2016).

## **1.5. Az ensemble módszer**

Napjainkban a valószínűségi előrejelzések készítésének egyetlen megvalósítható módja, ha modellintegrálások együttesét futtatjuk. Az „együttes” vagyis ensemble előrejelző rendszerben (angolul ensemble prediction system, továbbiakban EPS) nem csak egyetlen modellfutás készül, hanem az előrejelzések sokasága a légkör rendszerének számos lehetséges állapotáról ad információt. A tagok különbözhetnek egymástól a kezdeti feltételeikben vagy a modell formuláikban. Ezeket a kis eltéréseket perturbációknak nevezzük, melyek időben feltételezhetően elég gyorsan fejlődnek ahhoz, hogy reprezentálják a modellfutások növekvő hibáit (*Szűcs et al.*, 2016). Kezdeti feltétel perturbációknál beszélhetünk a szinguláris vektorok módszeréről, a „breeding” módszerről és az Ensemble adatasszimilációról (EDA). A modell hibák jellemzésénél a sztochasztikus fizika és a multi fizika módszereket érdemes megemlítenünk. Ezek mellett olyan pragmatikus megoldások is rendelkezésünkre állnak együttes előrejelzések készítésére, mint a multi-modell, multi-analízis vagy multi-LBC ensemble (LBC – Lateral Boundary Conditions) [1-Alkalmazott számszerű előrejelzés]. A különböző perturbációs módszerekről az Alkalmazott számszerű előrejelzés című jegyzetben található bővebb leírás, melyet itt nem tárgyalnék a továbbiakban.

Általában egy EPS 10-50 tagból áll, melyek hatalmas számításgéppel rendelkeznek, ha a nagyfelbontású operatív modellt használjuk az ensemble rendszerben. Hogy elkerüljék a

rendkívül nagy költségeket, az EPS tagjai általában durvább felbontással futnak (*Szűcs et al.*, 2016).

### **1.5.1. Az ensemble előrejelzés alkalmazási területei**

Az elmúlt 25 évben az ensemble megközelítés egyre népszerűbbé vált a valószínűségi előrejelzések készítésénél mind a numerikus időjárás-előrejelzés, mind a klimatológia területén. Kezdetben középtávú globális modellekben jelent meg az ensemble módszer majd, a későbbiekben számos nemzeti meteorológiai szolgálat elkezdett ensemble rendszereket futtatni a saját korlátos tartományára, hogy finomítsák a globális valószínűségi előrejelzéseket kisebb térbeli és időbeli skálán.

Az utóbbi időben a kutatások és fejlesztések főbb célja átirányult a konvekciót engedélyező (convection-permitting) ensemble rendszerek felé, melyek olyan, a mélykonvekciót explicit módon leíró, finom-felbontású, nem-hidrosztatikus modellekre épülnek, mint a korábban ismertetett AROME. A kis skálájú meteorológiai jelenségek leírása igen bizonytalan, ami motivációt ad a valószínűségi előrejelzések még finomabb rácsfelbontáson való használatához (*Szűcs et al.*, 2016).

### **1.5.2. Példák ensemble rendszerekre**

a.) Az ECMWF Ensemble Előrejelző rendszere (ENS):

Az ECMWF operatív ensemble rendszere 51 előrejelzést hoz létre, melyből 1 a kontroll tag, 50 pedig a perturbált.

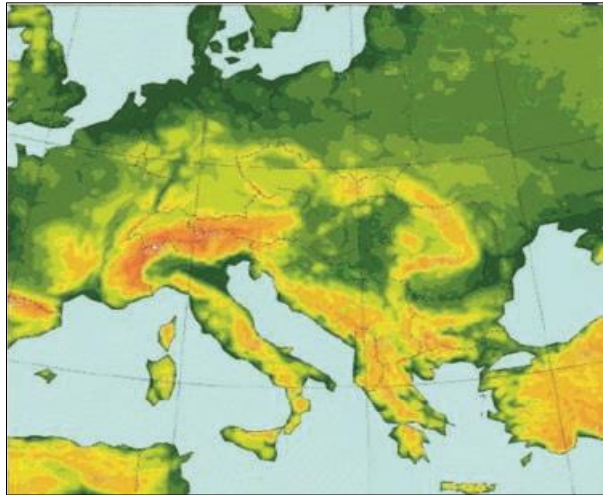
b.) Az OMSZ operatív korlátos tartományú EPS-e: ALADIN-EPS

c.) Az OMSZ kísérleti nem-hidrosztatikus EPS-e: AROME-EPS

d.) A regionális éghajlati modellszimulációk együttese.

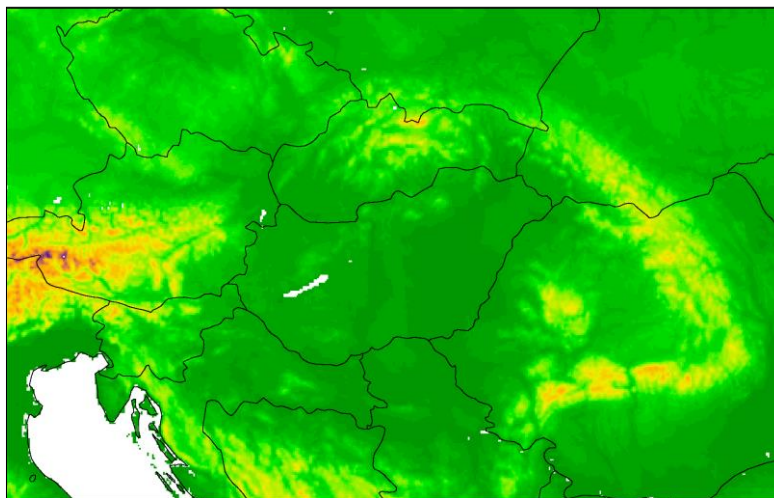
Bővebben az OMSZ tevékenységére térnek ki (*Szűcs et al.*, 2016).

Az OMSZ operatív ensemble rendszere a 8 km-es horizontális felbontású ALADIN modellen alapszik. A modell 60 órás integrálásait minden nap 18 UTC-kor indítják, és 49 vertikális szinten futnak egy közel Európa méretű tartományon (**1.5.1. ábra**). Az ensemble rendszer tagjai az ECMWF ENS kontrol tagjának és az első 10 perturbált tagjának dinamikus leskálázásaként állnak elő, egyelőre lokális perturbációk hozzáadása nélkül (*Hágel*, 2010; *Szűcs et al.*, 2016).



**1.5.1. ábra:** Az operatív ALADIN-EPS modell integrálási tartománya (*Horányi et al., 2011*).

Az operatív ALADIN-EPS hasznos valószínűségi információt nyújt az előrejelzőknek és a végfelhasználóknak. Az OMSZ emellett elkezdte a nem-hidrosztatikus AROME modellen alapuló „convection-permitting” ensemble kutatását, mely 2,5 km-es felbontást biztosít (**1.5.2. ábra**) a Kárpát-medence térségében (*Szintai et al., 2015; Szűcs et al., 2016*).



**1.5.2. ábra:** Az operatív AROME modell integrálási tartománya (*Szintai et al., 2015*).

A jobb térbeli felbontásnak köszönhetően, az AROME-EPS alkalmasabb lehet veszélyes időjárási jelenségek kockázatának megállapítására, ám ennek operatív megvalósítása a megfelelő számítógépes kapacitás hiányában még várat magára. Ezt a hiányt egyéb módszerekkel érdemes kiküszöbölni. Ilyen módszer lehet például a diplomamunkám **3. fejezetében** bemutatott kvázi-AROME-EPS, mely a meglévő napi nyolc determinisztikus AROME futás eredményeit kezeli egy sokasági előrejelzés tagjaiként.

## **2. Verifikáció, verifikációs indexek különböző csoportosítása és bemutatásuk**

Az előrejelzések az esetek jelentős hányadában anélkül készülnek el, hogy a jövőbeli állapottal tökéletesen tisztában lennének (*Jolliffe and Stephenson, 2012*).

Az előrejelzések bevalásának kiértékelésére, vagyis verifikációjára, az előrejelzések és megfigyelések értékeiből származtatott különböző mérőszámokat vizsgálunk (*Tajti, 2009*). A verifikációs eredmények vizsgálatával lehetőség nyílik a különböző előrejelzések összehasonlítására, továbbá az előrejelzés folyamatának fejlesztésére. Ezen mérőszámok információt adnak arról, hogy adott döntéshelyzetben mennyire lehet figyelembe venni egy modelleredményt.

A verifikációnak összefoglalóan három fő célja van. Az adminisztratív célja a monitorozás, előrejelzések összehasonlítása, kiválasztása. A tudományos célja a modell hibáinak feltárása és kijavítása, az előrejelzési folyamat fejlesztése. A harmadik célja e csoportosítás alapján a gazdasági, mely a jobb döntéshozatalt, automatikus döntéshozó rendszerek támogatását foglalja magában.

A verifikációs módszerek csoportosíthatók az előrejelzés természete alapján is, így beszélhetünk determinisztikus (5 °C-os minimum várható), valószínűségi (70%-os eséllyel várható csapadék) és kvalitatív (szavakkal leírható pl. szép idő) előrejelzésről (*Jolliffe and Stephenson, 2012*).

Diplomamunkámban a verifikáció csoportosításánál azonban az alábbi négy csoportra fektetném a hangsúlyt: bináris-determinisztikus, multikategóriás-determinisztikus, folytonos-determinisztikus valamint valószínűségi előrejelzés.

### **2.1. Bináris-determinisztikus előrejelzés**

Számos meteorológiai jelenség kezelhető egyszerű bináris eseményként, így az előrejelzések, adott esetben riasztások is inkább úgy kezelik őket, mint egy kettős eseményt (bekövetkezett-e vagy sem). Ilyen eseménynek tekinthető az esőzés, áradás, tornádó, fagy, köd. Amikor az előrejelzés és megfigyelés 2-2 kimenetelű lehet, akkor célszerű egy kontingencia-táblázatban ábrázolni a lehetséges kimeneteket (**1. táblázat**). Négy

lehetséges eset van aszerint, hogy előrejeleztük-e az adott eseményt vagy sem, valamint bekövetkezett-e vagy sem.

**1. táblázat: Sematikus 2x2-es kontingencia-táblázat a bináris determinisztikus előrejelzéshez (Jolliffe and Stephenson, 2012).**

	Megfigyelés		
Előrejelzés	Igen	Nem	Összes
Igen	$a$	$b$	$a + b$
Nem	$c$	$d$	$c + d$
Összes	$a + c$	$b + d$	$a + b + c + d = n$

A fentiek alapján  $a$  jelöli a találatok („hits”),  $b$  a téves riasztások („false alarm”),  $c$  az elmulasztott események („misses”),  $d$  pedig a helyes negatív előrejelzések számát („correct rejections”) (Jolliffe and Stephenson, 2012).

### 2.1.1. A bináris determinisztikus előrejelzéshez használt mérőszámok

Tökéletesen pontos előrejelzést akkor kapunk, ha az **1. táblázat**ban használt  $b$  és  $c$  értékek nullával egyenlők. A verifikációs score-ok számításánál viszont szükség van a téves előrejelzésekre is. Talán a legdirektebb és intuitívabb mérőszám a pontosság becslésére a kategorikus előrejelzések esetében a találati arány (Hit rate -  $H$ ). Ez mérőszám egyszerűen megadja, hogy az összes eset közül mekkora rész lett helyesen előrejelezve, lásd [2] egyenlet:

$$H = \frac{a + d}{n} . \quad [2]$$

Tökéletes előrejelzés esetén  $H$  értéke 1, míg a legrosszabb esetben 0. Bizonyos esetekben a  $H$  kap egy 100%-os szorzót, amivel megkapjuk az előrejelzés százalékos pontosságát (Percentage of Forecast Correct -  $PFC$ ).

Gyakran használt index a találati arány helyett a Threat Score ( $TS$ ) vagy Critical Success Index ( $CSI$ ). Azt írja le, hogy arányaiban mennyire lett jól előrejelezve az esemény azokban az esetekben, amikor bekövetkezett az esemény, vagy amikor előre volt jelezve. A  $TS/CSI$  mérőszám a következőképpen áll elő, [3] egyenlet:

$$TS = CSI = \frac{a}{a + b + c}. \quad [3]$$

Itt a helyesen jelzett és észlelt eseményt osztjuk az összes olyan eset összegével, ahol a meteorológiai jelenséget észlelték, vagy előre volt jelezve. A legrosszabb lehetséges érték a 0, míg a legjobb az 1.

A további két mérőszám szintén a 2×2-es kontingencia-táblázat értékeiből áll elő ([4] egyenlet). Ezek közül az első a Probability Of Detection (**POD**):

$$POD = \frac{a}{a + c}, \quad [4]$$

ahol a tökéletes előrejelzés esetén **POD** = 1, míg a legrosszabb esetben **POD** = 0.

A második pedig az úgynevezett téves riasztás aránya (False-Alarm Rate - **FAR**), ami megmondja, hogy az előrejelzések mekkora hányada téves riasztás, lásd [5] egyenlet:

$$FAR = \frac{b}{a + b}. \quad [5]$$

A **FAR** negatív orientációval rendelkezik, ami annyit tesz, hogy az alacsonyabb **FAR** értékeket részesítik előnyben. A lehetséges legjobb eset **FAR** = 0, míg a legrosszabb **FAR** = 1.

Végezetül megemlíteném még ebben a kategóriában a bias (torzítás - **B**) mérőszámot, ami azt hivatott mutatni, hogy mennyivel többször jeleztük előre az eseményt, mint ahogy az bekövetkezett ([6] egyenlet):

$$B = \frac{a + b}{a + c}. \quad [6]$$

Fontos megjegyezni, hogy a bias nem a pontosság becslésére alkalmas mérőszám. A torzítatlan előrejelzés értéke esetén **B** = 0 (Tajti, 2009). Jelzi, hogy alul vagy felülbecsültük az esemény bekövetkezési előfordulását. Arról viszont nem nyújt információt, hogy az egyes előrejelzések, mennyire felelnek meg a valós bekövetkezett eseményeknek (Wilks, 1995).

## 2.2. Multikategóriás-determinisztikus előrejelzés

A kategorikus előrejelzés nincs a  $2 \times 2$ -es kontingencia-táblázat keretei közé szorítva, tehát előfordulhat nem csak két lehetséges kimenetellel jellemzett meteorológiai jelenség. Azonban szintén ábrázolhatjuk kontingencia-táblázat segítségével.

### 2.2.1. A multikategóriás-determinisztikus előrejelzéshez használt mérőszámok

A legáltalánosabban használt skill score-t (előrejelzési készség) jellemző mérőszám, melyet a négyzetes kontingencia-táblázat összegzésére használnak, a Heidke Skill Score (*HSS*). A *HSS* a találati arányon (mint alapvető pontosság becslés) alapul, lásd [7] egyenlet. Így ideális esetben a Heidke Score 1 értéket ad vissza, ha a score értéke nulla, akkor megegyezik a referencia előrejelzéssel. Viszont, ha negatív értéket ad, akkor az előrejelzés rosszabb, mint a referencia:

$$HSS = \frac{(a+d)/n - [(a+b)(a+c) + (b+d)(c+d)]/n^2}{1 - [(a+b)(a+c) + (b+d)(c+d)]/n^2} = \frac{2(ad-bc)}{(a+c)(c+d) + (a+b)(b+d)}. \quad [7]$$

Ha kiterjesztjük ezt a képletet multikategóriás esetre, akkor a következőképpen fejezhető ki, a [8] egyenlet alapján:

$$HSS = \frac{\sum_{i=1}^I p(y_i, o_i) - \sum_{i=1}^I p(y_i)p(o_i)}{1 - \sum_{i=1}^I p(y_i)p(o_i)}, \quad [8]$$

ahol az  $i$  index a kontingencia-tábla dimenziója,  $p(y_i)p(o_i)$  az előrejelzés és a megfigyelés együttes eloszlása,  $p(y_i)$  és  $p(o_i)$  az előrejelzés és a megfigyelés határeloszlásának valószínűsége (*Wilks*, 1995).



## 2.3. Folytonos-determinisztikus előrejelzés

Az előrejelzés neve is mutatja, hogy ebben az esetben nem diszkrét léggöri változókkal van dolgunk, hanem folytonossal, ami bármilyen valós értéket felvehet. A folytonos változók előrejelzésére jó példa a hőmérséklet előrejelzése.

### 2.3.1. A folytonos-determinisztikus előrejelzéshez használt mérőszámok

Elsőként az átlagos abszolút hibát (Mean Absolute Error - **MAE**) említeném, mely a következőképpen áll elő, lásd [9] egyenlet:

$$\mathbf{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |y_k - o_k|. \quad [9]$$

Itt az  $(y_k, o_k)$  pár a  $k$ -adik előrejelzés és megfigyelés párt jelenti, így a **MAE** az abszolút különbségek számtani közepét adja meg a párok tagjai között. Nyilvánvalóan tökéletes előrejelzés esetén a **MAE** = 0,  $(y_k = o_k)$ .

A következő közismert mérőszám az átlagos négyzetes hiba (Mean Square Error - **MSE**):

$$\mathbf{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2. \quad [10]$$

A négyzetre emelésnek köszönhetően nagyobb érzékenységet mutat a nagyobb hibákra (lásd [10] egyenlet), mint a **MAE**. Gyakran az **MSE** négyzetgyök alatt van kifejezve (**RMSE** =  $\sqrt{\mathbf{MSE}}$ ), ami ugyanolyan dimenzióval rendelkezik, mint a megfigyelés és az előrejelzés.

Az átlagos hibát, más néven szisztematikus hibát jelöli a Mean Error (**ME**), mely a mért és az előrejelzett értékpárok különbségének átlagát hivatott számítani, melyet a [11] egyenlet alapján számolhatunk ki:

$$\mathbf{ME} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k) = \bar{y} - \bar{o}. \quad [11]$$

A folytonos determinisztikus előrejelzés témaköréből, még az előrejelző készséget (skill score) emelném ki, ami az előrejelzések halmazának relatív pontosságát hivatott tükrözni a kontroll, referencia, vagy előrejelzések függvényében. Az előrejelzési készséget általában az eredményességi vagy beválási tényezővel fejezzük ki, mely a referencia szinthez képest

az előrejelzés javulását jelzi. A referencia szint általában az éghajlati állapot (*Tajti*, 2009). Általánosságban a beválási tényező a következőképpen áll elő ([12] egyenlet):

$$SS_{ref} = \frac{A - A_{ref}}{A_{perf} - A_{ref}} \times 100\%, \quad [12]$$

ahol  $A$  az aktuális pontosságbecslés/ hibabecslés,  $A_{ref}$  a referencia előrejelzés pontossága,  $A_{perf}$  pedig a tökéletes előrejelzéskor elérhető pontosság. Ha  $A = A_{perf}$ , akkor a beválási tényező eléri a 100%-ot. Ha  $A = A_{ref}$ , akkor a  $SS_{ref} = 0$ , tehát nem látható javulás a referenciához képest. Ha az előrejelzést rosszabbnak minősítették a referenciánál, az  $SS_{ref} < 0\%$  értéket kap. Skill score nem csak a folytonos determinisztikus előrejelzésnél képezhető, hanem bármilyen score-ból (*Wilks*, 1995).

## 2.4. Valószínűségi előrejelzés

Ha az ensemble-t, mint diszkrét mintát tekintjük, a következők mondhatóak el. A valószínűségi előrejelzés egyik legfontosabb tulajdonsága a megbízhatóság („reliability”), ami jellemzi az adott valószínűségi előrejelzés és a megfigyelések előfordulásának kapcsolatát. Az ensemble előrejelzések keretei közt a megbízhatóság azt is jelenti, hogy az ensemble tagok és a megfigyelt eredmény azonos mintái legyenek a mögöttes valószínűségi eloszlásnak, azaz például statisztikailag megkülönböztethetetlenek legyenek egymástól. Ezt a tulajdonságot gyakran ensemble konzisztenciának nevezik.

A felbontás („resolution”) és diszkrimináció („discrimination”) további két fontos tulajdonsága a valószínűségi előrejelzésnek. A felbontást az előrejelzés szemszögéből vizsgálhatjuk, hogy melyik megfigyelés változott, amikor az előrejelzés megváltozott, míg a diszkrimináció a megfigyelés szemszögéből vizsgálódik. Az ensemble előrejelzéshez tartozó felbontást és diszkriminációt az átlagos standard valószínűségi közelítéssel becsüljük, mely megköveteli, hogy a verifikáció előtt az ensemble legyen átkonvertálva valószínűségi előrejelzésekké (*Jolliffe and Stephenson*, 2012).

### 2.4.1. Ensemble, mint valószínűségi előrejelzés

Igen általános az ensemble előrejelzésekre úgy tekinteni, mint bináris vagy kategorikus esemény valószínűségére. Ezek a valószínűségek gyakran az alapján készülnek, hogy az ensemble tagok közül mennyi jelezte az adott eseményt (a leggyakoribb interpretáció).

Ennek ellenére, csak akkor beszélhetünk megbízható valószínűségi becslésről, ha számos ensemble tag elérhető és a megfigyelés nem tartozik az éghajlati szempontból ritka események közé. Tehát nem elég, hogy egy ensemble megbízható és a valószínűség a leggyakoribb értékből származik. Jobb valószínűségi előrejelzés állítható elő, ha az ensemble tagokat felöltöztetjük („dressing”) egy úgynevezett kernel függvénnyel; például a diszkrét delta-eloszlás helyett alkalmas folytonos valószínűségi eloszlást választunk, mely leírja minden egyes ensemble tag bizonytalanságát. A kernel kiválasztása nagyban függ az előrejelzendő paramétertől, hiszen hőmérséklet esetén Gauss kernelt, míg csapadéknál Gamma kernelt alkalmaznak. A kernel mellett még alkalmazható, eloszlás közelítő eljárás is, melyet bővebben itt nem fejtenék ki.

A valószínűségi előrejelzés nem lehet tökéletes annak ellenére, hogy ensemble tagokból származtatjuk, kernelt vagy eloszlás követő eljárást alkalmazunk, hiszen a modell hiba hatása általában nem egyezik meg a lehetséges eredmények valós eloszlásával. Az ensemble megjelenítésbe beleépített múltbéli hibastatisztikával azonban az előrejelző készség fejleszthető. Ezen megközelítésekre gyakran hivatkoznak úgy, mint statisztikus utófeldolgozás, újrakalibrálás vagy ensemble MOS (Model Output Statistics) (*Jolliffe and Stephenson, 2012*).

### 2.4.2. Alkalmazott valószínűségi („probabilistic skill”) mérőszámok az ensemble előrejelzésnél

Ha valamilyen módon elkészítettük a valószínűségi előrejelzést az ensemble sokaságból, akkor kiszámolhatjuk az általános valószínűségi eredményességi tényezőket („standard probabilistic skill score”). A score kiválasztása szintén függ az előrejelzendő paramétertől (bináris, kategorikus vagy folytonos eredményekről beszélünk), továbbá az érdekelt skill-től (megbízhatóság, felbontás). Ha az ensemble előrejelzések egy bináris esemény diszkrét valószínűségeiként állnak elő, a megbízhatóság és felbontás gyakran a Brier Score (**BS**)

szétbontásából származó megbízhatósággal és felbontással fejezhető ki, vagy megbízhatósági diagrammal.

Az ensemble előrejelző képességének becslésére a következő mérőszámok alkalmazhatóak. **BS**a bináris eseményekre, a Ranked Probability Score (**RPS**), az Ignorance Score (**IS**) a kategorikus eseményekre, Continuous Ranked Probability Score (**CRPS**) valamint Proper Linear Score (**PLS**) azon eredmények becslésére melyeket folytonos skálán vizsgálunk, értelmezünk.

### Brier Score:

A **BS**-t abban az esetben használjuk, ha diszkrét valószínűségi előrejelzést vizsgálunk bináris végkimenetellel (megtörtént az esemény, nem történt meg az esemény). Jelölje  $\hat{p}_t$  adott esemény előrejelzett valószínűségét a  $t$ -edik időpontban, és  $y_t = 1$  ( $y_t = 0$ ), ha a  $t$ -edik észlelés megfelel az eseménynek (nem felel meg az eseménynek). Ebben az esetben a Brier Score a [13] egyenlet alapján áll elő:

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (\hat{p}_t - y_t)^2 . \quad [13]$$

A **BS** gyakran átalakítható a referencia előrejelzés figyelembevételével.

$$BSS = 1 - \frac{BS}{BS_{CI}} , \quad [14]$$

ahol a  $BS_{CI} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (t - y_t)^2$ .

### Ranked probability score:

A **RPS**-t úgy is tekinthetjük, mint egy multikategóriás általánosítása a **BS**-nak. Diszkrét valószínűségi előrejelzések esetén használjuk, mikor kategorikus eseményekről van szó. A következőkben jelölje  $k$  a kategóriák számát, és  $c_k$  a klimatológiai valószínűségét annak, hogy a vizsgált jelenség az adott kategóriába sorolható. Az  $n$  darab előrejelzés-megfigyelés pár halmazra, a  $t$ -edik előrejelzés  $k$ -adik kategóriába való esésének valószínűsége pedig  $\hat{p}_{t,k}$ . Továbbá legyen  $y_{t,k} = 1$ , ha a  $t$ -edik megfigyelés a  $k$  kategóriába esik, más esetben  $y_{t,k} = 0$ . Végül legyen  $\hat{P}_{t,k}$  és  $Y_{t,k}$  a  $k$ -adik komponense a  $t$ -edik kumulált előrejelzés és

megfigyelés vektoroknak, és  $C_k$  a  $k$ -adik kategóriája a kumulált éghajlati eloszlásnak. Például [15], [16] és [17] egyenlet:

$$\hat{P}_{t,k} = \sum_{l=1}^k \hat{p}_{t,l}, \quad [15]$$

$$Y_{t,k} = \sum_{l=1}^k y_{t,l}, \quad [16]$$

$$C_k = \sum_{l=1}^k c_l. \quad [17]$$

Ezen jelölésrendszert használva az **RPS**a következőképpen fejezhető ki [18] egyenlet alapján:

$$\mathbf{RPS} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \sum_{k=1}^K (\hat{P}_{t,k} - Y_{t,k})^2. \quad [18]$$

Ahogy a **BS**, a **RPS** is átalakítható az előrejelzés hasznának megfelelően. Ha referenciaként a klimatológiát használjuk a Ranked Probability Skill Score (**RPSS**) a következőképpen adható meg ([19] egyenlet):

$$\mathbf{RPSS} = 1 - \frac{\mathbf{RPS}}{\mathbf{RPS}_{CI}}, \quad [19]$$

ahol az **RPS<sub>CI</sub>** kifejezhető a [20] összefüggéssel:

$$\mathbf{RPS}_{CI} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \sum_{k=1}^K (C_k - Y_{t,k})^2. \quad [20]$$

### Continuous ranked probability score:

A **CRPS** úgy definiálható, mint integrált négyzetes különbség a kumulált előrejelzés és megfigyelés eloszlások között. Számos tetszetős tulajdonsága van, azzal kezdve, hogy pontos. Először is folytonos skálán van definiálva, ezért nem követeli meg az ensemble előrejelzés diszkrét valószínűségi értékekké való redukálását (bináris vagy kategorikus eseményekké) úgy, mint a **BS** vagy az **RPS**. Másodsorban az összes lehetséges **BS** érték feletti integrálként is értelmezhető, és lehetővé teszi a **BS** analógiájára, a három részre való bontást (megbízhatóság, felbontás, bizonytalanság). Harmadsorban a **CRPS** determinisztikus határa azonos a **MAE**-ral így világos értelmezése van.

Jelölje  $n$  ensemble előrejelzés halmazát  $\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n$  és a hozzá kapcsolódó megfigyelések  $x_1, \dots, x_n$ . Legyen  $m$  darab ensemble tag, jelölje  $\hat{x}_{t,(i)}$  az  $i$ -edik ensemble tagját a  $t$ -edik

előrejelzésnek, ahol  $m$  ensemble tag emelkedő sorrendbe van rendezve. Továbbá kikötjük, hogy  $\hat{x}_{t,(0)} = -\infty$  és  $\hat{x}_{t,(m+1)} = \infty$ . Ekkor a **CRPS**-t a [21] egyenlet alapján úgy kapjuk meg, hogy:

$$CRPS = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left[ \sum_{i=1}^m \alpha_{t,i} \left(\frac{i}{m}\right)^2 + \sum_{i=0}^{m-1} \beta_{t,i} \left(1 - \frac{i}{m}\right)^2 \right], \quad [21]$$

ahol

$$\alpha_{t,i} = \begin{cases} 0 & \text{ha } x_t \leq \hat{x}_{t,(i)} \\ x_t - \hat{x}_{t,(i)} & \text{ha } \hat{x}_{t,(i)} < x_t \leq \hat{x}_{t,(i+1)} \\ \hat{x}_{t,(i+1)} - \hat{x}_{t,(i)} & \text{ha } \hat{x}_{t,(i+1)} < x_t \end{cases}, \quad [22]$$

és

$$\beta_{t,i} = \begin{cases} \hat{x}_{t,(i+1)} - \hat{x}_{t,(i)} & \text{ha } x_t \leq \hat{x}_{t,(i)} \\ \hat{x}_{t,(i)} - x_t & \text{ha } \hat{x}_{t,(i)} < x_t \leq \hat{x}_{t,(i+1)} \\ 0 & \text{ha } \hat{x}_{t,(i+1)} < x_t \end{cases}. \quad [23]$$

Például egy évszakos előrejelzésnél egy nyers ensemble előrejelzésből származtatott **CRPS** = 0,26 °C, a bias korrekciós előrejelzésnél 0,23 °C, míg az újrakalibrált előrejelzésnél 0,17 °C. Megjegyzendő, hogy a **CRPS** ugyanolyan egységben van, mint az előrejelzés, megfigyelés, kihangsúlyozva a kiértékelhetőségét, mint a **MAE** valószínűségi általánosítása.

### Ignorance score:

A gyakran logarithmic score-ként emlegetett **IS**, csak úgy, mint az **RPS** diszkrét valószínűségi előrejelzések készítésére alkalmas kategorikus eseményeknél. Ismételten,  $k$  jelölje a kategóriák számát, és a  $t$ -edik előrejelzés  $k$ -adik kategóriába való esésének valószínűsége pedig  $\hat{p}_{t,k}$ . A  $k^*(t)$ -vel jelöljük az a kategóriát, amibe a  $t$ -edik megfigyelés esik. Az **IS** ilyenkor a [24] alakban áll elő:

$$IS = -\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \log_2 (\hat{p}_{t,k^*(t)}). \quad [24]$$

Mint a korábban leírt metrikák, az **IS** is meglehetősen pontos, ezért szétbontható megbízhatósági, felbontási és bizonytalansági tagra. Innentől kezdve az **IS**-nak van néhány érdekes tulajdonsága. Elsősorban, elméleti szempontból információt szolgáltat olyan

értelemben, hogy olyan felhasználó átlagos információhiányát adja meg bitekben, aki rendelkezik előrejelzéssel, de nincs tisztában a ténylegesen bekövetkező, valós állapottal. Másodsorban ez egy lokális score, ami annyit tesz, hogy csak a megfigyelt kategóriába esés valószínűségét vizsgálja, a többi kategóriába esését nem. Harmadsorban, ha az eset valószínűsége 0, akkor az *IS* értéke átvált végtelenre. Ez talán egy nem kívánt tulajdonsága az *IS*-nak, különösen azon ensemble előrejelzések esetében, ahol valószínűség 0 az ensemble méretének kicsinysége miatt, vagy ha a valószínűség az ensemble csak bizonyos hányada alapján van becsülve, ahol az esemény előre van jelezve. Másrészt konstruktív a  $\infty$  büntetésként való használata azoknak az előrejelzőknek, akik a rossz előrejelzést okolják melynek bizonyosnak kellett volna lennie (Jolliffe and Stephenson, 2012).

### 2.4.3. Talagrand diagram

A Talagrand diagram (másnéven: „rank histogram”, „analysis rank histogram” vagy „binned probability ensemble”) egy olyan hisztogram, melyet Anderson (1996), Hamill és Colucci (1997) és Talagrand et al. (1998), egymástól függetlenül alkotott meg. A Talagrand diagram az egyik legszeleesebb körben használt teszt az ensemble megbízhatóságára. Azon alapul, hogy a megfigyelt eredményeket rendezik a megfelelő ensemble tag függvényében. Ezáltal betekintést nyerhetünk az előrejelzések átlagos szórási karakterisztikáiba. A Talagrand diagram előállításának módja a következő.

Legyen egy  $m$  tagú ensemble előrejelzése  $\hat{x}_t = (\hat{x}_{t,1}, \dots, \hat{x}_{t,m})$  és a hozzá tartozó megfigyelés  $x_t$ . Tegyük fel, hogy  $x_t$  nagyobb az  $m$  tagú ensemble  $M$  tagjánál ( $M \leq m$ ), és a maradéktag ( $m - M$ ) pedig a  $x_t$ -t múlja felül. Az  $x_t$  osztályozása az ensemble tagok ( $\hat{x}_t$ ) függvényében történik, melyet az alábbi egyenlettel adhatunk meg:

$$r_t = M + 1, \quad [25]$$

ahol ha  $x_t$  az összes EPS tagnál kisebb, akkor a megfigyelés az  $r_t = 1$  csoportba tartozik, míg abban az esetben, ha  $x_t$  az összes tagot meghaladja, akkor  $r_t = m + 1$ . Az előrejelzés-megfigyelés párok  $n$  elemű halmazára a Talagrand diagram úgy áll elő, hogy vesszük az összes megfigyelést és diagramon ábrázoljuk, hogy hányszor esnek az egyes ensemble tagok által meghatározott intervallumokba ( $m + 1$  darab intervallum). Végül tehát látjuk, hogy a

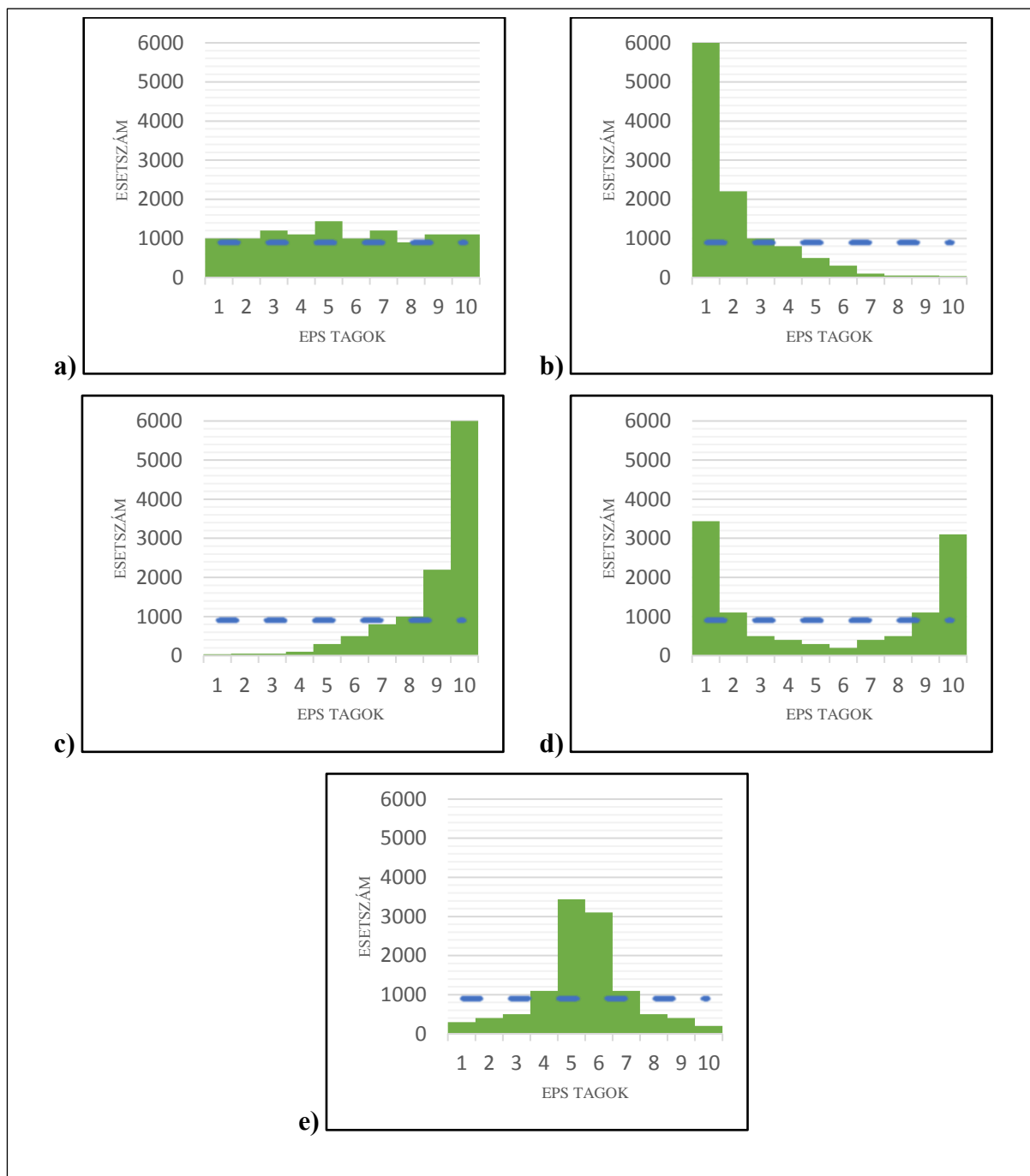
megfigyelt értékek milyen valószínűséggel esnek az egyes ensemble tagok által meghatározott intervallumokba.

Akkor megbízható egy ensemble előrejelző rendszer, ha a megfigyelt értékek és az ensemble tagok statisztikailag megkülönböztethetetlenek. Ekkor ugyanolyan valószínűséggel esik a megfigyelés az egyes intervallumokba. Következésképpen, egy megbízható ensemble előrejelző rendszer - a változó mintavételezés okozta szórástól eltekintve - egy sík hisztogramot eredményez adott  $n / (m + 1)$  várható darabszámmal osztályonként.

A következő ábrán különböző minőségű előrejelzéshez tartozó Talagrand diagramok láthatók. Az előbb vázolt egyenletes eloszlású előrejelzést jelöli az **2.4.1. a) ábra**. Ha nem ilyen eloszlásunk van, akkor az előrejelzés megbízhatatlan. Ilyen esetben a hisztogram alakja utalhat az előrejelzés hibájának természetére. Például, ha túl sok érték esik az első intervallumba, az utolsóba pedig alig, akkor L alakról beszélhetünk. Az L alakú **2.4.1. b) ábra** azt jelzi, hogy felülbecslés történt, míg a J alak (**2.4.1. c) ábra**) az alulbecslésre utal. J alak esetén az első intervallumba esik kevés, míg az utolsóba túl sok érték. U alakot kapunk, ha a legalacsonyabb és legmagasabb intervallumokba sok érték esik, a középső osztályokba pedig alig. Továbbá  $\cap$  alakot kapunk, ha szélső intervallumokba kevés a középsőbe pedig sok érték esik. Az U alak arra utal, hogy az ensemble tagok szórása nem elég nagy, ezzel szemben az  $\cap$  alak a túl nagy szórást jelenti.

Fontos megjegyezni, hogy amikor az eloszlás egyenletes, az nem jelenti törvényszerűen, hogy jó az ensemble rendszer, csak azt, hogy a tagok szórása megfelelő (*Jolliffe and Stephenson, 2012*).





**2.4.1. ábra: Szintetikus játék előrejelző modellekhez tartozó Talagrand diagramok, Jolliffe and Stephenson (2012) alapján.**

Ha a verifikáció során az összes ensemble tag különbözik, akkor egyszerűen eldönthető, hogy melyik oszlopba kerül az adott érték. Például a megfigyelt csapadék 0,08 mm, az ensemble tagok által szolgáltatott előrejelzések (például egy 5 tagú EPS esetén) pedig 0,0; 0,01; 0,03; 0,07 illetve 0,09 értékek. Ekkor a 6 oszlop közül az 5-ben helyezkedik el az adott előrejelzés. Vannak azonban olyan esetek, amikor a megfigyelt érték és az összes EPS tag egyenlő (nem hullott csapadék, és a tagok sem jeleztek előre csapadékot). Ilyenkor nem lehet eldönteni, melyik oszlopba kerüljön a megfigyelés, így kiegészítő szabályra van szükség.

Ezen esetekben a megfigyeléshez valamint az összes ensemble taghoz érdemes hozzáadni egy elhanyagolhatóan kicsi véletlen számot (például egyenletes eloszlás szerint a  $[-0,00001;0,00001]$  intervallumból). Így a fent említett csapadékmentes esetekben egyforma valószínűséggel esik a megfigyelés a különböző kategóriákba, míg csapadékos helyzetekben a véletlen szám hozzáadása nem eredményez érdemi változást (*Hamill and Colucci, 1998*).

#### **2.4.4. Spread-skill diagram**

A Spread-skill kapcsolat (melyet esetenként „spread-error” vagy „accuracy-spread” kapcsolatnak is neveznek) arra a kérdésre keresi a választ, hogy van-e kapcsolat az előrejelzés várható bizonytalansága és az előrejelzés pontossága között. Ezáltal a várható bizonytalanság az ensemble sokaság szórásával jellemezhető jól, míg az előrejelzés pontossága az ensemble átlag abszolút vagy négyzetes hibájával (RMSE). Általánosan elfogadott, hogy beszélhetünk spread-skill kapcsolatról abban az esetben, ha az ensemble előrejelzések megbízhatóak és jól mintavételezik a lehetséges kimenetek áramlásfüggő valószínűségi eloszlását. Ha az ensemble előrejelzés megbízható, akkor a spread nem a várható hibát, hanem a hiba bizonytalanságát, vagyis varianciáját számszerűsíti (*Jolliffe and Stephenson, 2012*).

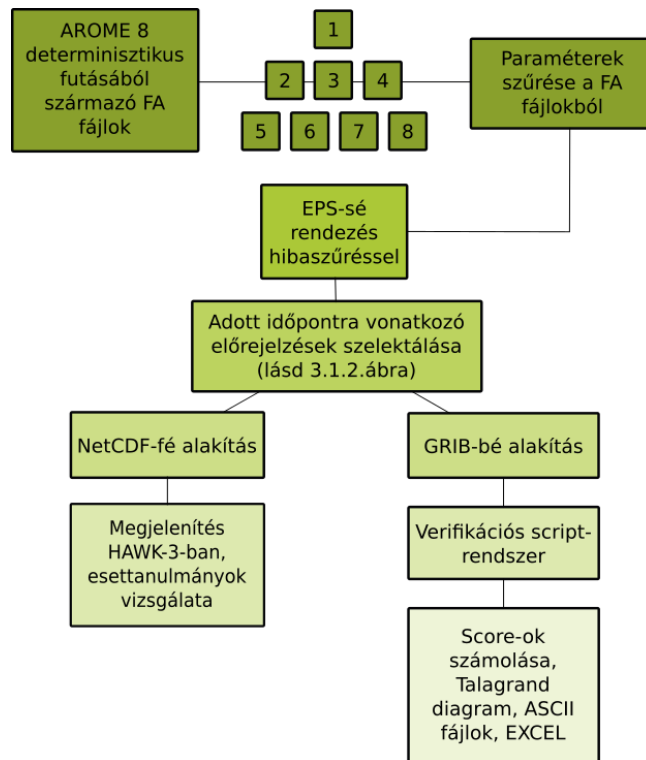
### 3. A kvázi-AROME-EPS

A korábbiakban leírtak alapján, az előrejelzések bizonytalanságainak reprezentációja és számszerűsítése elengedhetetlen a numerikus időjárás-előrejelzésben. A probléma leküzdésére használható módszer az ensemble közelítés, mely valószínűségi információt hordoz magában. A bizonytalanság becslése értékes információ a felhasználók számára és eredményesen alkalmazható a döntéshozatalban (Szűcs *et al.*, 2016). Az OMSZ jelenlegi operatív ensemble rendszere a hidrosztatikus ALADIN futásokra épül, melyek felbontása 8 km-es. A kis skálájú folyamatok (például konvekció) jobb reprezentációja érdekében célszerű a 2,5 km-es felbontású AROME-ra támaszkodni. A megnövekedő számítógépes igény kikerülése érdekében munkám során a már meglévő, napi 8 determinisztikus AROME futásokat kezeljük egy EPS rendszer tagjaiként, és az így létrehozott sokaságból valószínűségi információt nyerünk ki.

Munkám céljaként a szóban forgó ún. kvázi-AROME-EPS létrehozását tűztem ki, mely a fent említett 8 AROME futás eredményeit használja fel. A minél nagyobb 'EPS' tagszám elérése érdekében adott időponttól számított 24 órás időablakra készítettem előrejelzést, melyben azokat a futásokat vettem figyelembe, amik lefedik az adott időablakot. A rendszer hatékonyságának vizsgálata során a konvektív jelenségekre fektettem a hangsúlyt (csapadéokra, széllelkésre).

#### 3.1. A feladat során elvégzett technikai munka leírása

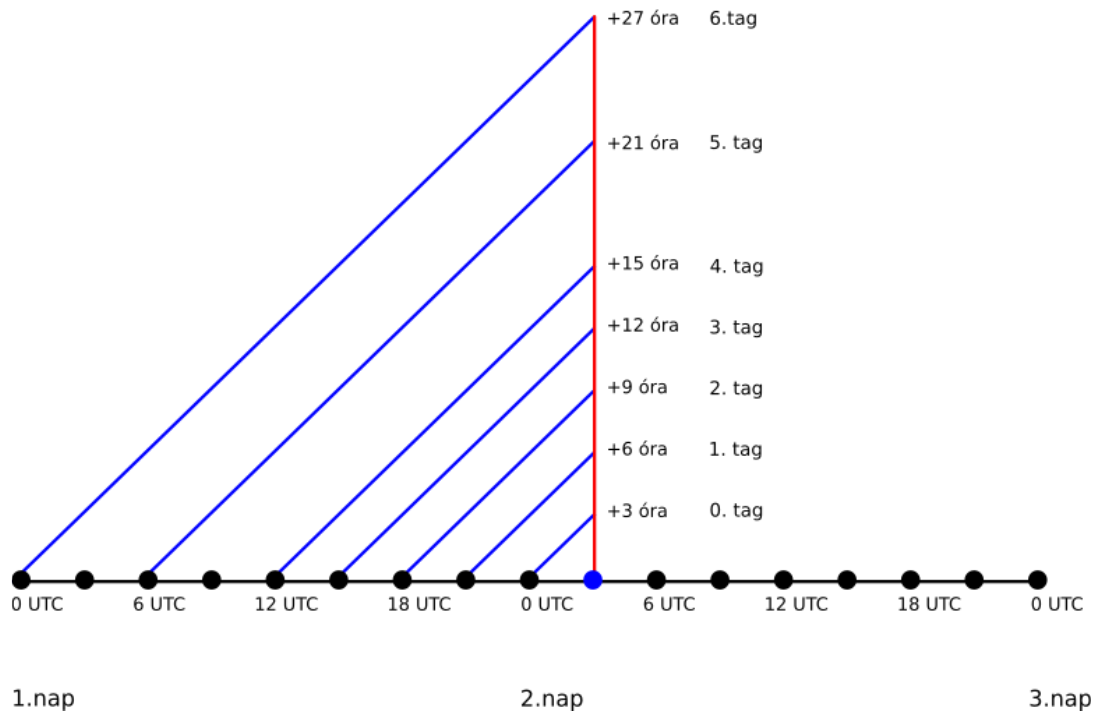
A rendszer előállítása és vizsgálata a következőképpen valósult meg (**3.1.1. ábra**). A rendszer egymáshoz kapcsolódó scriptek láncolatából áll (bash, Metview), melyben a kiinduló fájlformátum az ARPEGE/ALADIN/AROME által használt úgynevezett FA formátum (Horányi *et al.*, 2006). Az AROME modell utófeldolgozott FA fájljaiban a modellváltozók már nyomási szinteken helyezkednek el [6 – umr-cnrm.fr]. A nagy tárhelyet igénylő FA fájlok méretét átalakító scriptek segítségével csökkentettem le úgy, hogy csak az általam vizsgálni kívánt mezőket tartalmazza. Az így létrejött AROME futásokat külön könyvtárstruktúrába kellett átmásolni. Itt a kiküszöbölendő probléma a dátumbeállítás volt, mivel a 21 UTC-s futás csak másnap a kora hajnali órákban készül el, mégis az előző napra vonatkozik.



**3.1.1. ábra: A kvázi-AROME-EPS létrehozásának, vizsgálatának és verifikációjának folyamata.**

Miután a megfelelő FA fájlok a megfelelő könyvtárba kerültek, egy következő program létrehozza belőlük a kvázi-AROME-EPS fájlokat a megfelelő struktúrába rendezve (3.1.2. ábra). Ez a program képezi a scriptrendszer gerincét, és tartalmaz egy hibaszűrési lépést is, mely az időben nem megfelelő hosszúságú futások szelektálására való. A struktúrába rendezés menete az indító dátum és óra meghatározásával kezdődik, melyet egy külön program végez meghatározott UTC-ben. A már automatikus 3 óránként lefutó program arra törekszik, hogy az indítástól számított 24 óra minden egyes futás által teljesen leírható legyen, tehát az előző 24 órát kell vizsgálni. Annak megfelelően, hogy főterminusbeli vagy mellékterminusbeli futásról beszélünk, úgy választjuk ki, hogy melyik futást vehetjük figyelembe. Maximum 7 ilyen futás lehet, esetenként ennél kevesebb, ha valamilyen technikai probléma miatt adott modellfutás hiányzik, így a program képes ezt is kezelni.

A kiválasztott modell kimenetek után elkezdődik a megfelelő időpontra vonatkozó eredmények kiválasztása és rendezése. Ezt a folyamatot a 3.1.2. ábra mutatja be egy példán keresztül.



**3.1.2. ábra: A kvázi-AROME-EPS tagjainak előállási folyamata adott időpontra**

Ha a **3.1.2. ábrán** látható példát tekintjük, elmondható, hogy a 03 és 09 UTC-s futást figyelmen kívül hagyjuk, mert nem fedik le az időablak teljes egészét. Ennek oka abban keresendő, hogy a főterminusban indított előrejelzések 48 órás időtartamra, míg a mellékterminusban indított előrejelzések csupán 36 órás időtartamra jeleznek előre. Amikor EPS-ről beszélünk, taggal jelöljük a különböző előrejelzési eredményeket, így a bemutatott térképeken, valamint **3.1.2. ábrán** én is így teszek. Fontos megjegyezni, hogy jelen esetben a 0. tag nem a kontrollt jelöli, hanem a legfrissebb futási eredményt. Ezt a kvázi-AROME-EPS-t time-lagged EPS-nek is hívják a gyakorlatban.

A létrehozott új FA fájlokat egy programcsomag segítségével NetCDF-ekké illetve GRIB-ekké alakítottam át (lásd **3.1.1. ábra**), melyekben az ensemble tagszám egy külön dimenzió.

Az esettanulmányok vizsgálatára a létrehozott NetCDF fájlokat a HAWK-3-ban használtam fel, mely megjelenítő program speciális függvényeit használva, maximum/átlag térképek, meteogramok készíthetők, melyeket a **3.2. fejezetben** fogok bemutatni. A fájlok felhasználásához továbbá létre kellett hoznom egy HAWK konfigurációs fájlt, mely lehetővé teszi a HAWK-3-ban való megjelenítést.

A GRIB fájlokból egy verifikációs programcsomag segítségével nyertem ki információkat, melyeket a **3.3. fejezetben** részletezek. A már meglévő programcsomagot - melyben megtalálható volt a Spread-Skill, CRPS, Brier Score, ME számítása és az ASCII

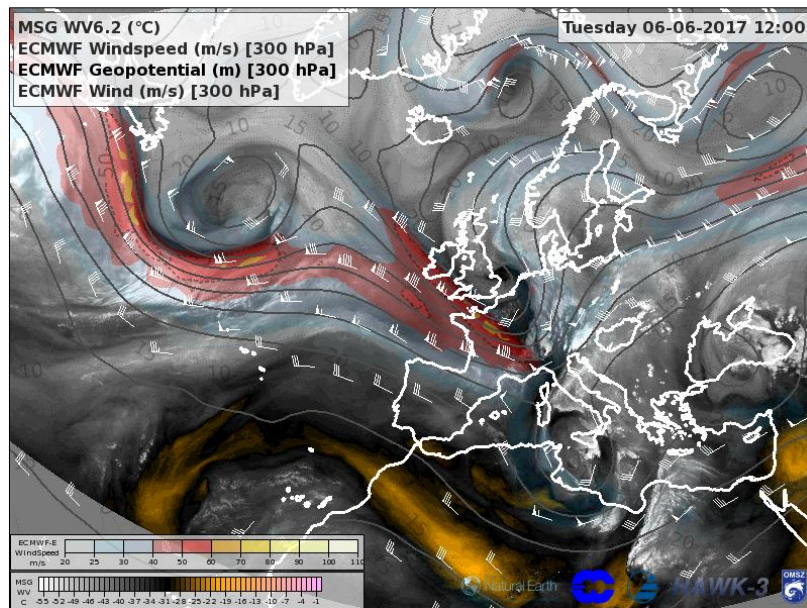
fájlok létrehozása – tovább fejlesztettem, így kiegészült a Talagrand diagram számításával, valamint annak fejlesztett, random számmal ellátott verziójával. Az elkészült ASCII ábrákat Excel segítségével jelenítettem meg. A jelen munka folyamatábráinak szerkesztését az INKSCAPE nevű programmal végeztem.

### **3.2. A kvázi-AROME-EPS bemutatása esettanulmányokkal**

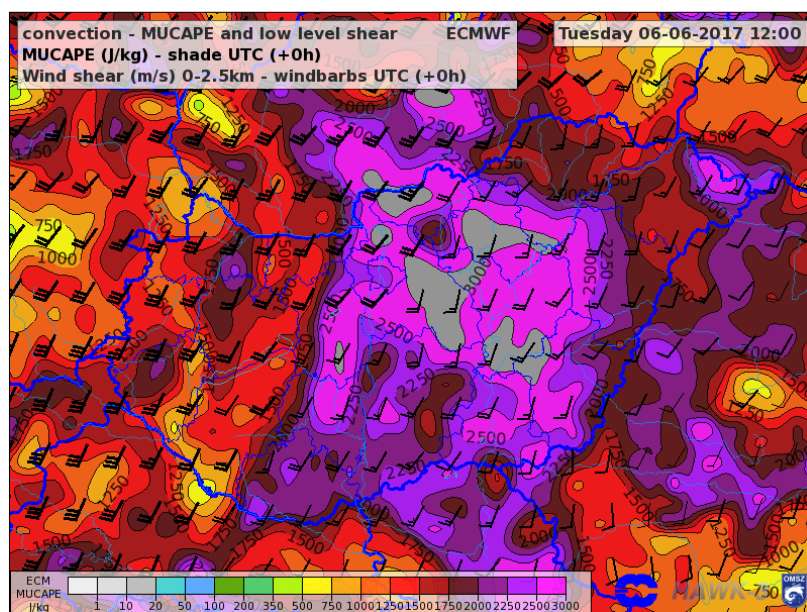
A **3.2. fejezet** alfejezeteiben különböző meteorológiai helyzetekben vizsgáltam a kvázi-AROME-EPS eredményességét [konzultációs megbeszélés alapján – Simon André]. Láthatunk példát légzuhatagra (downburst), multicellás csoportra (cluster), szupercellára, zivatarláncra (squall line), valamint zivatarrendszerhez köthető heves széllokésre. A szinoptikus helyzet leírására magassági térképeket használtam, mivel ezeken gyakran jobban látszódnak azok a ciklonok és anticiklonok, illetve áramlások, melyek a heves konvekció valódi meghajtói. Az esettanulmányok bemutatásánál használt nagymennyiségű térkép egy része a függelékben található meg (szövegben F jelzéssel). A meghivatkozott ábrák az OMSZ belső oldalairól érhetőek el, melyeket következetesen O-val jelölök. A továbbiakban ezeket ismertetném.

#### **3.2.1. Esettanulmány légzuhatagra (downburst)**

A szinoptikus helyzetről az alábbiak mondhatók el. 2017. június 6-án hazánk egy hosszúhullámú teknő előoldalán helyezkedett el, mely nyugati irányból keletre haladt. A hullámzó frontálzóna hidegfronti szakasza érte el Magyarországot területét a délutáni órákban (**F1. ábra**). A 12 UTC-re előrejelzett szélmezőn a 300 hPa-os nyomási szinten, megfigyelhető a jet mag bal kilépő ága, mely magas szinteken (300-500 hPa) divergenciát, alacsony szinteken (925-850 hPa) konvergenciát generált (**3.2.1.1. ábra**). Délutánra pedig nagyobb mennyiségű labilitási energia halmozódott fel (**3.2.1.2. ábra**). Labilitási energia alatt ebben az esetben a MUCAPE paramétert értem, mely a Convective Available Potential Energy - Hozzáférhető konvektív potenciális energia (CAPE) egy származtatott mennyisége, a legnagyobb hozzáférhető potenciális energia (*Hegedűs, 2014*). A teknő közeledése nagytérségű feláramlást, míg a fölénk húzódó futóáramlás erős szélnyírást biztosított, ami a **3.2.1.1. és a 3.2.1.2. ábrán** látható.



3.2.1.1. ábra: 2017. június 6-án 12 UTC időpontban MSG vízgömp [6.2 csatorna, °C] Európa fölött, ECMWF által 00 UTC-s futás által előrejelzett szélsébség 300 hPa-on [m/s], geopotenciál 300 hPa-on [m], valamint szélzászló 300 hPa-on [m/s] [O2].



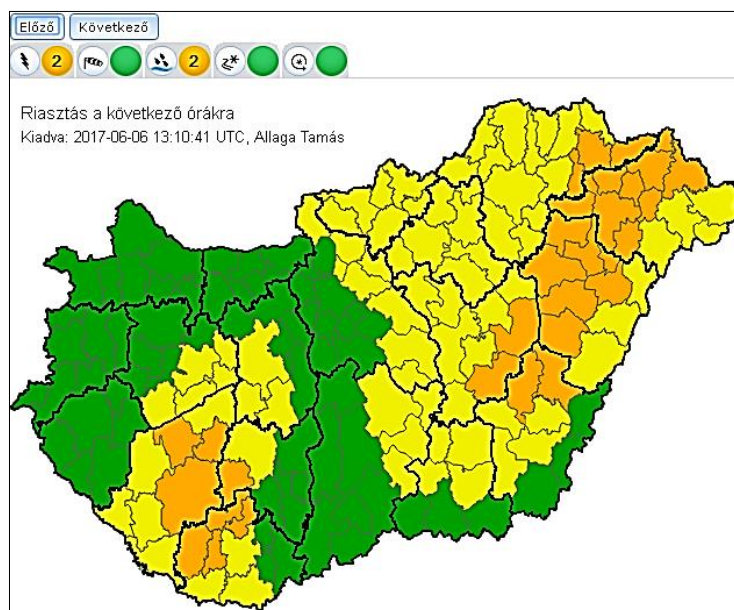
3.2.1.2. ábra: 2017. június 6-án az ECMWF 00 UTC-s futása által 12 UTC-s időpontra jelzett MUCAPE [J/kg], szélnyírás 0-2,5 km között [m/s] [O3].

A már kora délután beinduló erős konvekció hatására egy multicellás vonal fejlődött ki Somogy-megyében, a Balaton térségében több helyen viharos szellőkessel (örvényesen 95 km/h lökessel), ezzel sok kárt okozva [7 - met.hu]. A reggeli órákban kiadott figyelmeztető előrejelzés fel is hívta a figyelmet a konvektív helyzetre (F2. ábra). A zivatarok rendkívül gyorsan fejlődtek ki (F3. ábra, F4. ábra), ami az egyik legnehezebb helyzet nowcasting szempontjából (a nowcasting meteorológiai szakszó, melynek jelentése az időjárási helyzet



elemzése és nagyon rövid távú (0-6 órás) előrejelzése [8 – met.hu]). A riasztást közvetlenül a zivatar létrejötte után lehetett csak kiadni (**3.2.1.3. ábra**).

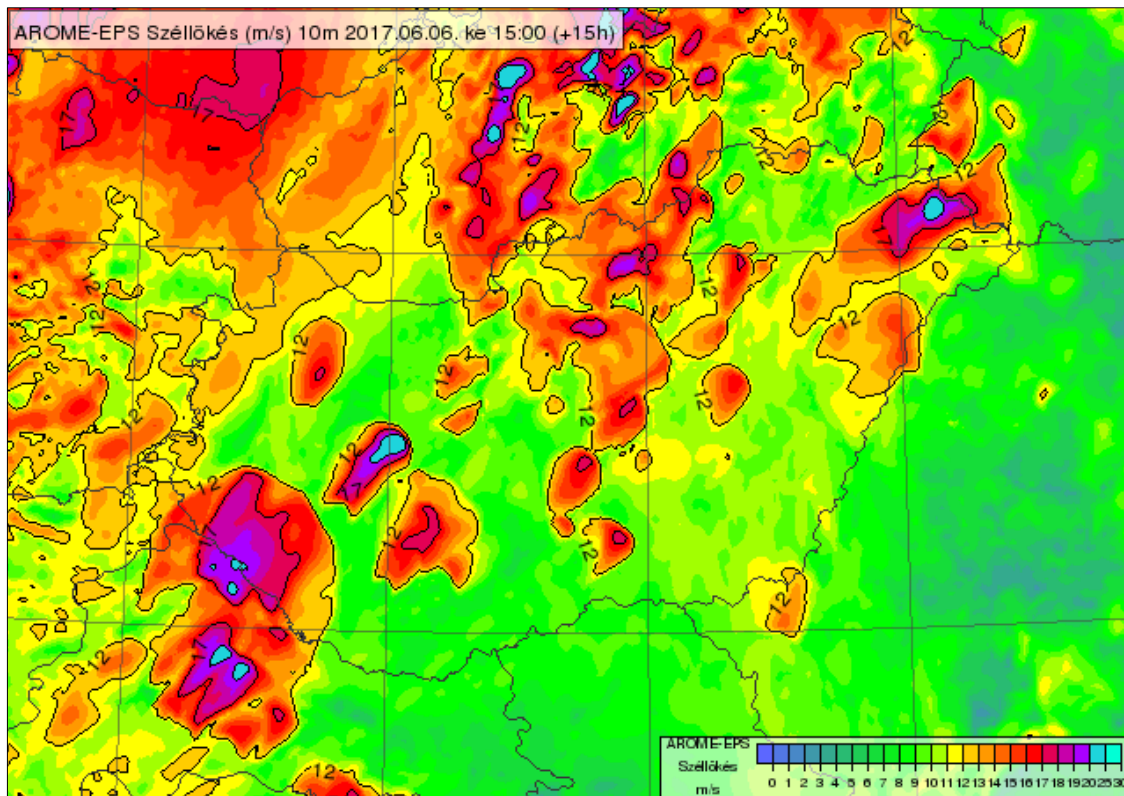
2017. június 6-án a 00 UTC-s kvázi-AROME-EPS futásból a délutáni órákra 20 m/s-nál nagyobb szellökést lehetett előrejelezni, ezért számítani lehetett az esetleges szélvihar károokra. Így hasonló időjárási helyzetekben a kvázi-AROME-EPS hasznos lehet a nowcasting döntések meghozatalában, támogatásában. A kvázi-EPS hozzáadott értéke abban látszódik meg, hogy az adott napi legfrissebb futásokhoz (például 09 UTC-s) képest a korábbi futások pontosabb előrejelzést biztosítottak. Ugyanis a nowcasting rendszerek is gyakran csak a legfrissebb modellfutásokkal dolgoznak, így nem biztos, hogy hosszabb időre előre tudják jelezni ezt az esetet (csak akkor, mikor már megvolt a zivatar). A frissebb futásokban a legmagasabb labilitás el volt csúszva 50 km-rel keletre, amint ez a **3.2.1.2. ábrán** látható (magas MUCAPE a Velencei-tó alatt). A korábbi, pontosabb előrejelzések nyugatabbra jelezték előre ezt a zónát.



**3.2.1.3. ábra: 2017. június 6-án, 13:10 UTC-kor kiadott riasztás Magyarország térségére [O4].**

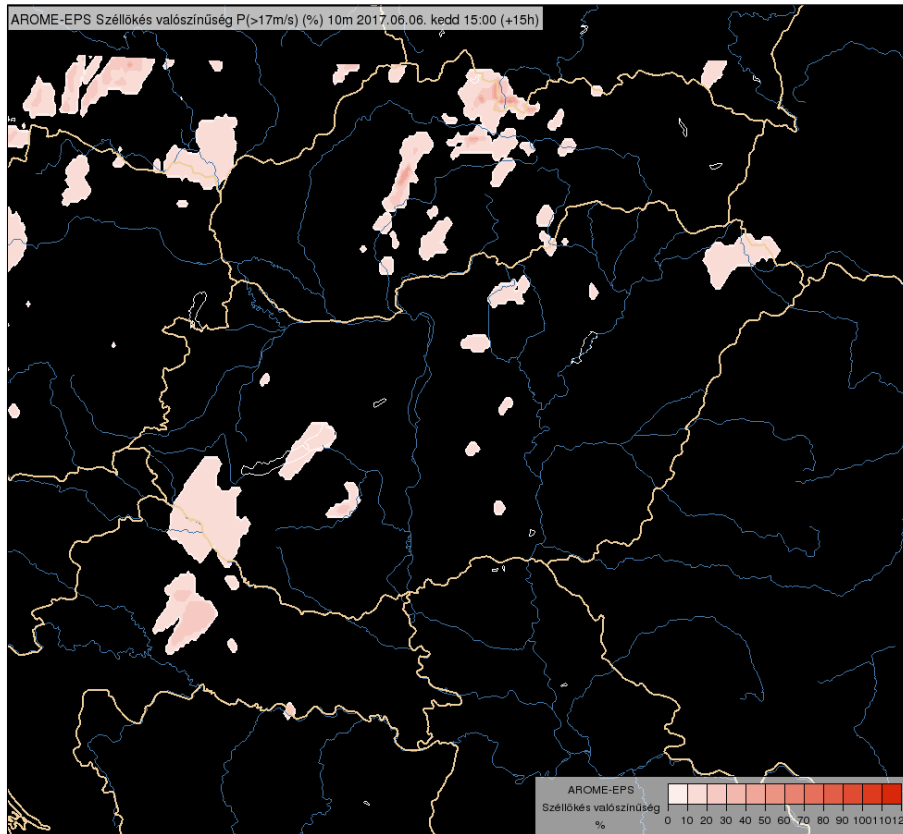
A **3.2.1.4. ábrán** kvázi-AROME-EPS képet láthatunk, mely a modellfutást megelőző 24 óras időablakban található AROME előrejelzésekből származó szellökés értékeket használja fel. Az ábrán az összes futásból számított maximális szellökés értékek jelennek meg. A modell a cellák gyors fejlődése miatt 2 órával későbbre jelezte a hajnali futásból a kora délutáni zivatarokat, az előrejelzők figyelmét azonban felhívta a potenciális viharos szellökésre.



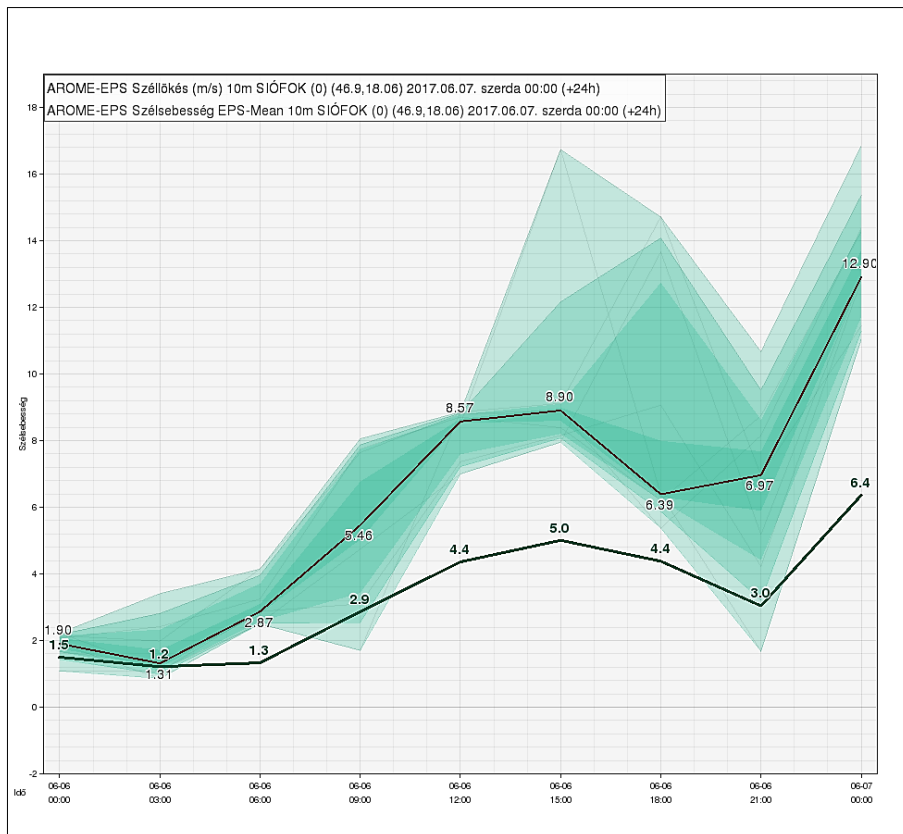


**3.2.1.4. ábra: 00 UTC-s kvázi-AROME-EPS futásból számított maximális 10 méteres széllökés [m/s] 2017. június 6-án 15 UTC-re.**

A bizonytalanságot szemléltetném továbbá a következő két ábrával. A **3.2.1.5. ábrán** a kvázi-AROME-EPS 00 UTC-s indításából annak valószínűsége látszódik, hogy a tagok alapján a széllökés átlépi-e a 17 m/s-os küszöbértéket. E küszöbértéknek a tavi viharjelzésnél van nagy jelentősége, mivel a másodfokú viharjelzést 60 km/h-nál nagyobb szélsőségek esetén adják ki [9 – met.hu]. A **3.2.1.6. ábrán** egy Siófokra, június 6-ra vonatkozó széllökés, szélsőségek meteogram látható, szintén a kvázi-AROME-EPS 00 UTC-s futásából.



3.2.1.5. ábra: 00 UTC-s kvázi-AROME-EPS futásból számított 10 méteres széllökés valószínűség [%], 17 m/s-os küszöbértékkel, 2017. június 6-án 15 UTC-re.

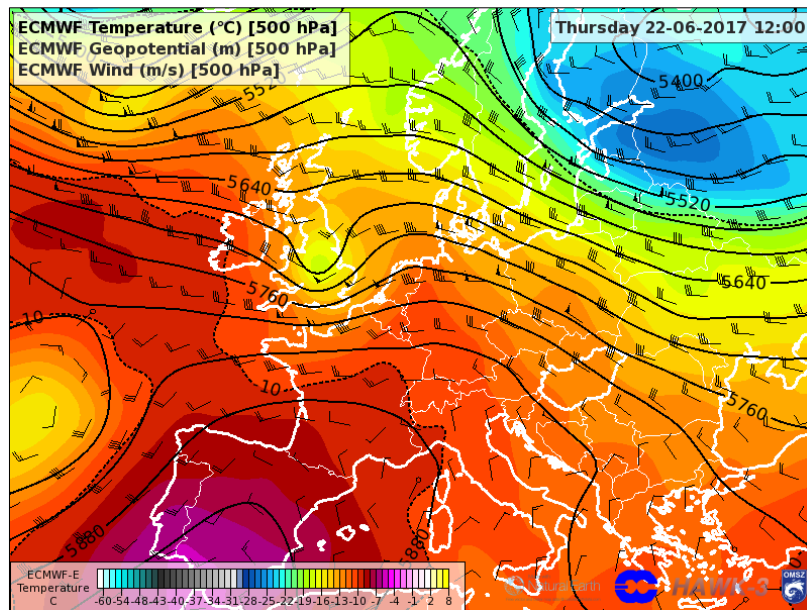


3.2.1.6. ábra: 00 UTC-s kvázi-AROME-EPS futásból számított meteogram 10 méteres széllökésre [m/s] és átlagos szélsőességre [m/s], 2017. június 6-án.

A napi meneten az összes kvázi-AROME-EPS tagból számított széllokés mellett az előrejelzés bizonytalansága is jól látható. Fáklyadiagram szerú ábrázolásmódjából fakad, hogy minél jobban széttartanak a tagok, annál nagyobb az előrejelzés bizonytalansága. A fáklya közepén sötét bordó színnel látható a kvázi-AROME-EPS átlaga (eps-mean). Az alatta levő egyedülálló sötétzöld vonalon pedig az EPS tagokból számított átlagos szélsébsesség figyelhető meg. A számszerú valószínűségi értékhez azonban tudni kell, hogy az adott kvázi-AROME-EPS hány tagból áll (volt-e olyan futás, ami kimaradt). Jelen esetben 7 tagú kvázi-AROME-EPS látható, tehát 7 / 7 tag esetén 100%-os az adott jelenség bekövetkezése a modell alapján. A leghalványabb zöld jelöli jelen esetben az 1 / 7 valószínűséget. Látható tehát, hogy a 17 m/s-ot elérő szélsébségre a modell ~14,3% valószínűséget adott (1 tag jelezte csak előre), azonban a 12 m/s-os széllokést már több tag is jelezte.

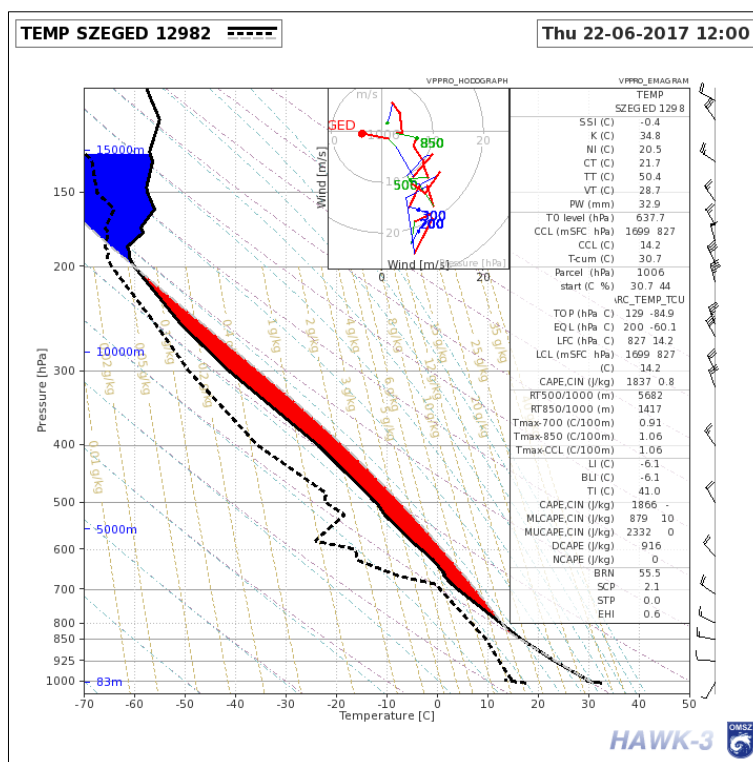
### **3.2.2. Esettanulmány multicellás csoportra (cluster-re)**

A 2017. június 22-re vonatkozó esettanulmány vizsgálatához először tisztában kell lennünk a nagy skálájú folyamatokkal, így érdemes megemlíteni, hogy az időpontot megelőző és követő napokon milyen jelenségek zajlottak Magyarország területén. 21-én egy magassági teknő hátoldal, gerinc előoldal haladt végig hazánk térsége felett nyugatról keletre, majd 23-án ismét egy teknő előoldal, gerinc hátoldal volt hatással térségünk időjárására. Tehát a 22-i napon két teknő között egy gerinc helyezkedett el felettünk az 500 hPa-os nyomási szinten (**3.2.2.1. ábra**).



**3.2.2.1. ábra: Az ECMWF által előrejelzett hőmérséklet [°C], geopotenciál [m], szél [m/s] az 500 hPa-os szinten, európai kivágatra, 2017. június 22-én 12 UTC-re az 00 UTC-s futásból [O7].**

A június 21-én átvonult hidegfront mögött részben (csak átmenetileg) stabilizálódott a légkör. Június 23-án a nyugat felől érkező újabb hidegfront előtt Magyarország térsége melegszeletorban helyezkedett el, ahol a légtömeg feltételesen labilis volt. A körülbelül 600 hPa nyomási szint magasságban zajló melegadvekciónak (és az ezzel összefüggő stabilabb hőmérsékleti rétegződés), valamint az alsó és középső szinteken levő (925-600 hPa nyomási szinten) kevés relatív nedvesség miatt, csak erős nagytérségű emelési kényszerek mellett alakulhatott volna ki mélykonvekció (3.2.2.2. ábra).



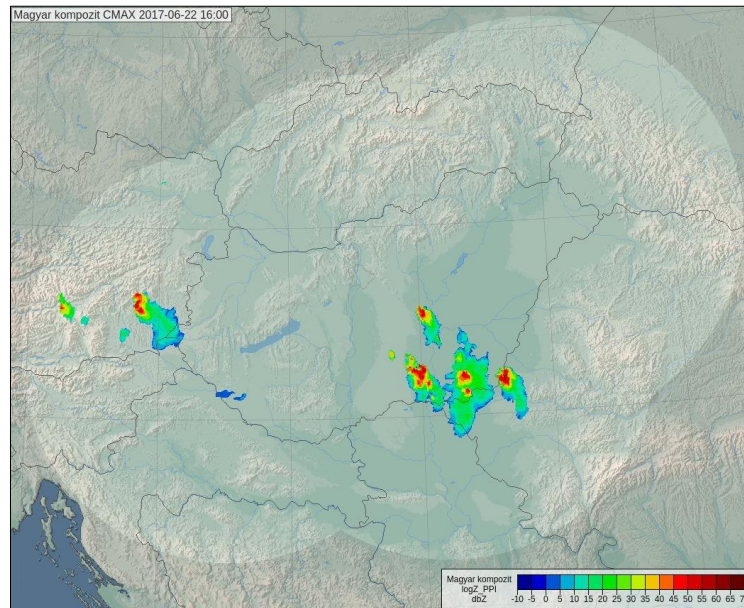
3.2.2.2. ábra: A szegedi TEMP felszállás, 2017. június 22-én 12 UTC-kor [O8].

A nyugati tájakon volt a várt legnagyobb CAPE (1299 J/kg, Sopron) (F5. ábra), talajközeli konvergencia inkább a Dunántúl közepső, majd az ország északkeleti felén és a közepső tájakon volt jelen (lásd F6. ábra). Az előrejelzők túlnyomóan napos időre számítottak, időnként több felhővel. Helyenként, elsősorban a Dunántúlon zápor, zivatar előfordulását jelezték [10 - met.hu].

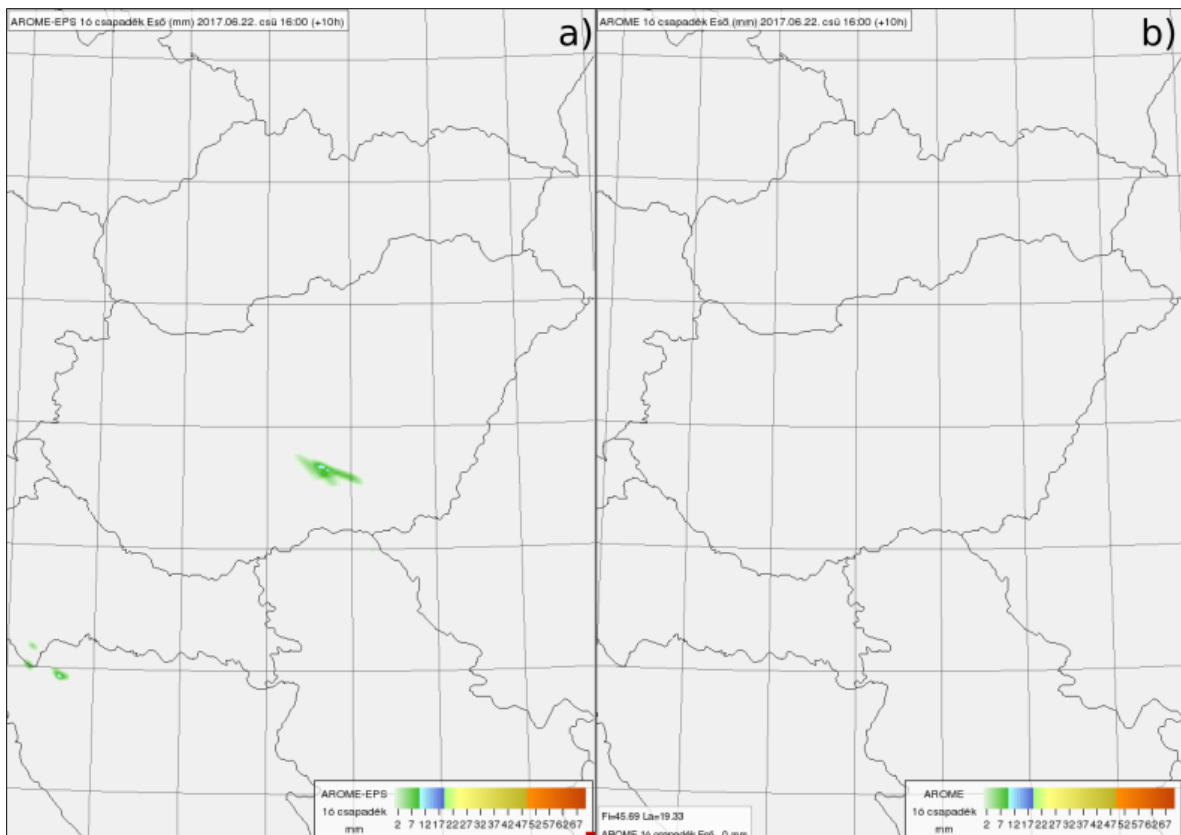
Elmondható, hogy a nap első felében a Kisalföld térségében fordultak elő kisebb záporok, majd a délután folyamán a Dunaújvárostól nyugatra kipattanó cellák délkeleti irányba haladtak, végül egy multicellás csoport alakult ki az ország délkeleti szegletében, mely délkeleti irányba haladt. Ebben a térségben a relatív nedvesség (925-600 hPa között) 60%-os volt, mely általában elegendő ahhoz, hogy zivatarok fejlődjenek, viszonylag száraz környezet mellett is (F7. ábra). Szintén ezen a területen a kihullható vízmennyiség  $35 \text{ kg/m}^2$  volt (F8. ábra), körülbelül 1866 J/kg-os CAPE értékkel (3.2.2.2. ábra), valamint a 0-6 km közötti szélnyírás és alacsonyszintű konvergencia jelenléte is kedvezőnek bizonyult (F6. ábra) zivatarok kialakulásához.

A helyzet bemutatása után röviden ismertetném a kvázi-AROME-EPS-ből (mely 7 tagból készült) származó előrejelzést, valamint ennek előnyeit. A 3.2.2.3. ábrán a kompozit radar kompozit képet láthatjuk, mely 16 UTC-re vonatkozik. Ezt az ábrát összevetném a 3.2.2.4.

ábrával, amin a 06 UTC-s AROME (operatív) és szintén 06 UTC-s kvázi-AROME-EPS futást láthatjuk – melyek 2017. június 22-re 16 UTC-re jeleztek előre.



**3.2.2.3. ábra: A zivatar kompozit radarképe (radar reflektivitás értékek dBz-ben megadva) 2017. június 22-én 16 UTC-kor, ahol a reflektivitási oszlopmaximum értékeket láthatjuk [O13].**



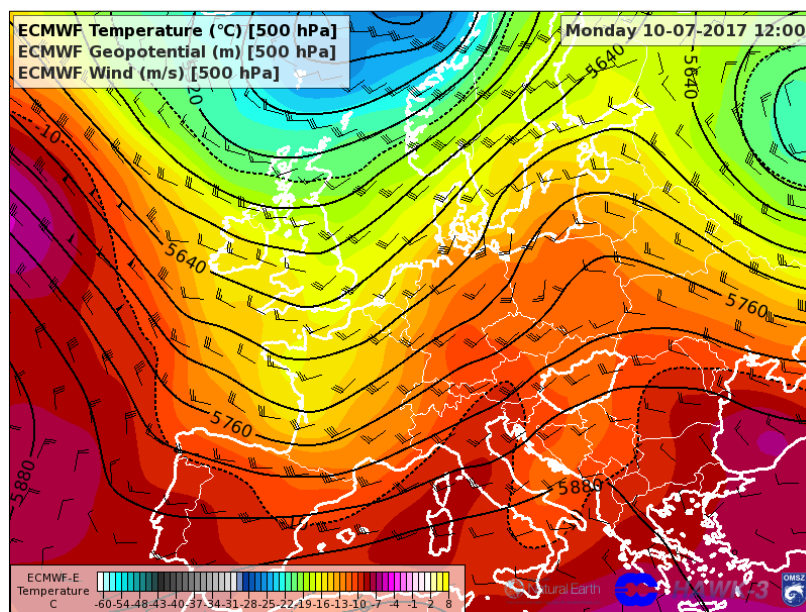
**3.2.2.4. ábra: a) kvázi-AROME-EPS 06 UTC-s futásának maximális csapadékösszeg előrejelzése összevetve a b) 06 UTC-s AROME futás 1 órás csapadékösszeg térképével, 2017. június 22-én 16-án UTC-re.**



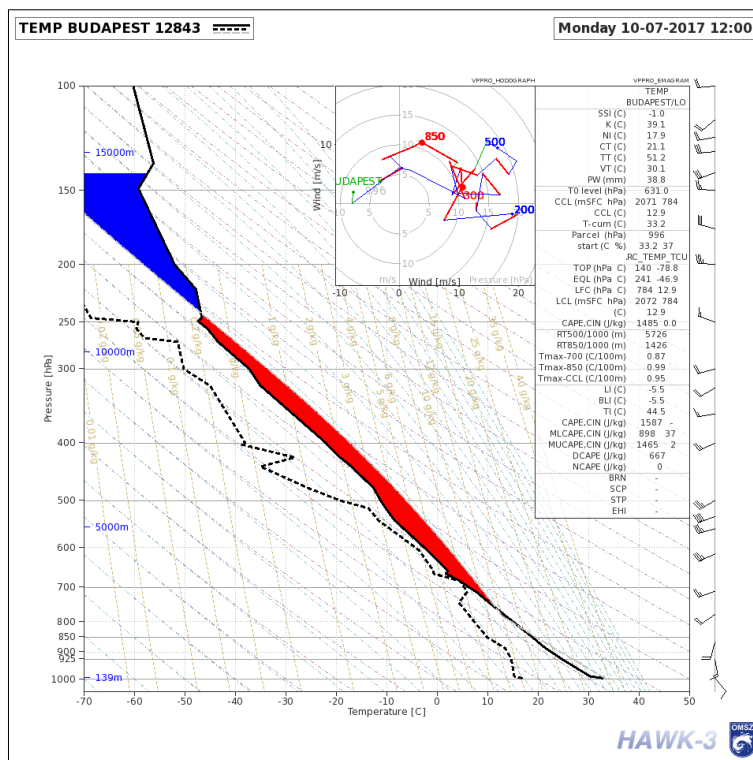
Az **a)** mezőben a kvázi-AROME-EPS 7 tagjának futásából származó maximális egy órás csapadékösszeg térképe látható (mm-ben), a **b)** ábrán pedig az AROME modell által előrejelzett egy órás csapadékösszeg jelenik meg (mm-ben). A nagy felbontású radar kompozit képpel (**3.2.2.3. ábra**) összevetve a **3.2.2.4. ábrát**, látható, hogy míg az AROME csapadéktérképe nem jelezte a konvektív vihart 16 UTC-re, addig a kvázi-AROME-EPS térképe felhívta a figyelmet a Délkelet-Magyarország felé tartó zivatarra. A kvázi-EPS használatát tehát az indokolja, hogy bizonyos esetekben nem elegendő egyetlen futást vizsgálnunk, hasznos lehet a futások sorozatát egy ábrán látnunk az adott időpontra.

### 3.2.3. Esettanulmány szupercellára és légzuhatra (downburst)

A harmadik kiemelkedő eset 2017. július 10-re vonatkozik. Hazánk területét északról egy hullámzó frontrendszer súrolta, amelytől délre forró légtömeg helyezkedett el (**3.2.3.1. ábra**). Az északról benyúló nedvesebb, hidegebb légtömeg (**F9. ábra**) nagy labilitást eredményezett, ami kedvezett az emelt konvekciónak és a heves időjárási jelenségek kialakulásának (jégesőnek, szélviharnak) (**3.2.3.2. ábra**).



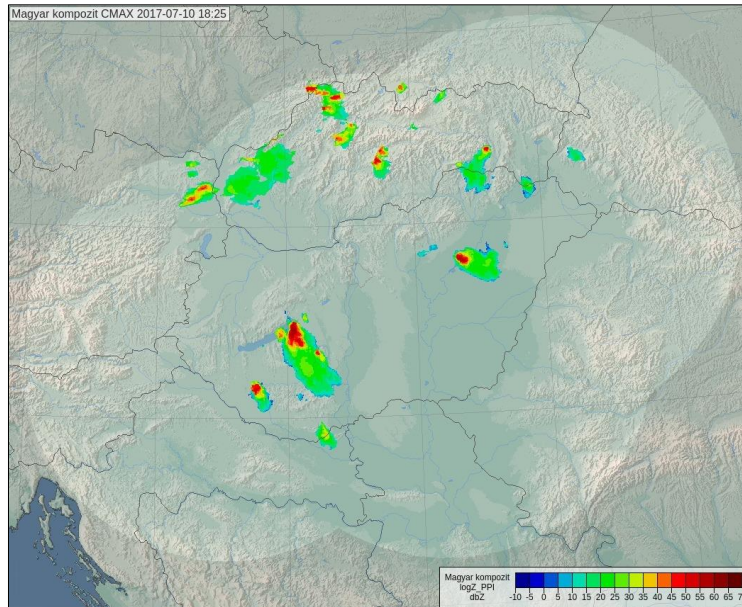
**3.2.3.1. ábra:** Az ECMWF által előrejelzett hőmérséklet [°C], geopotenciál [m], szél [m/s] az 500 hPa-os szinten, európai kivágatra, 2017. július 10-én 12 UTC-re az 00 UTC-s futásból [O14].



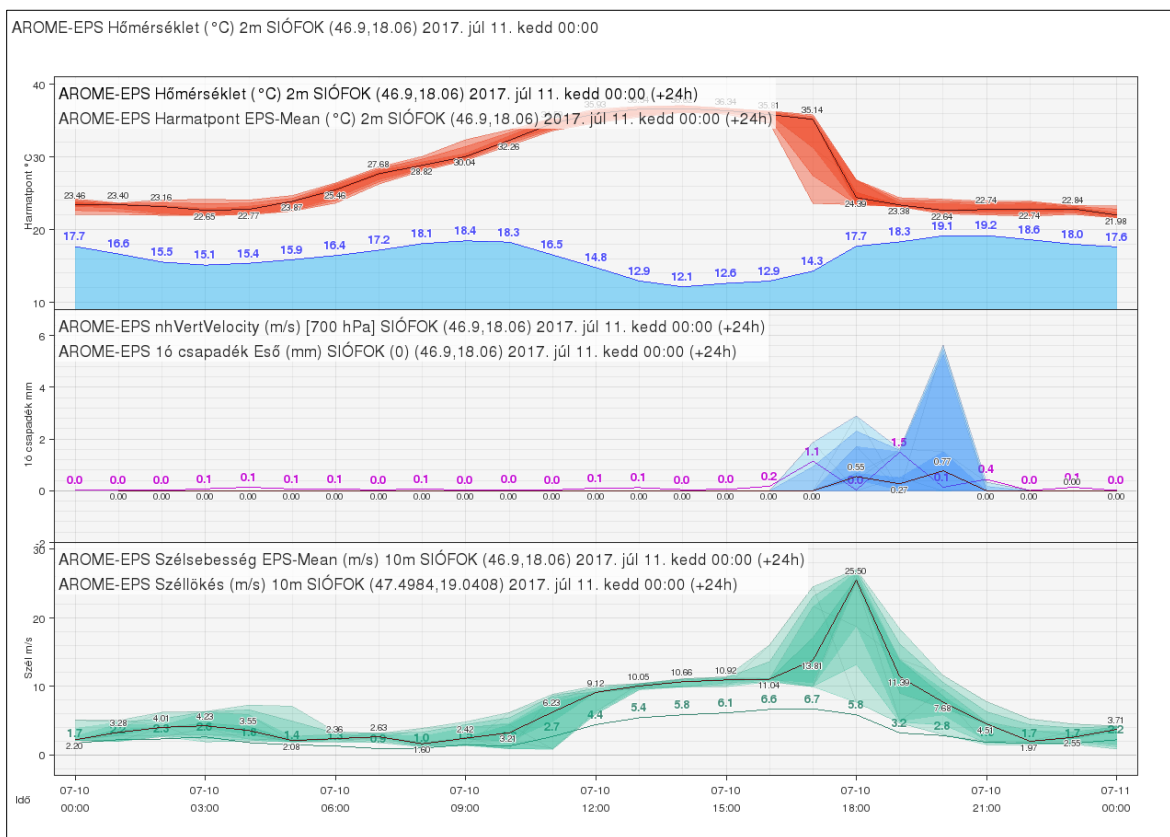
3.2.3.2. ábra: A budapesti TEMP felszállás, 2017. július 10-én 12 UTC-kor [O16].

Az első markáns cellák 18 óra körül jelentek meg a horvát-magyar határ közelében és északkeletre mozdultak a Balaton felé. A meleg talajközeli és a magasban levő nedvesebb rétegek hatására tovább fejlődtek (ahogyan az a 3.2.3.3. ábrán is látható), majd a konvektív energia és szélnyírás hatására egyesek szupercellává alakultak. Az elsőként Karád településre lecsapó vihar háztetőket rongált meg és fákat döntött ki. A Balaton térségét elérve már légzuhatagot figyelhettek meg (downburst), mely Balatonaligánál 157 km/h szélökést produkált az Országos Meteorológiai Szolgálat műszere alapján. A downburst nyomát jégkárok és kidőlt fák jelezték a térségben. A „magyar tengernél” ez a vihar okozta a valaha mért legnagyobb szélsébséget [11 – met.hu].





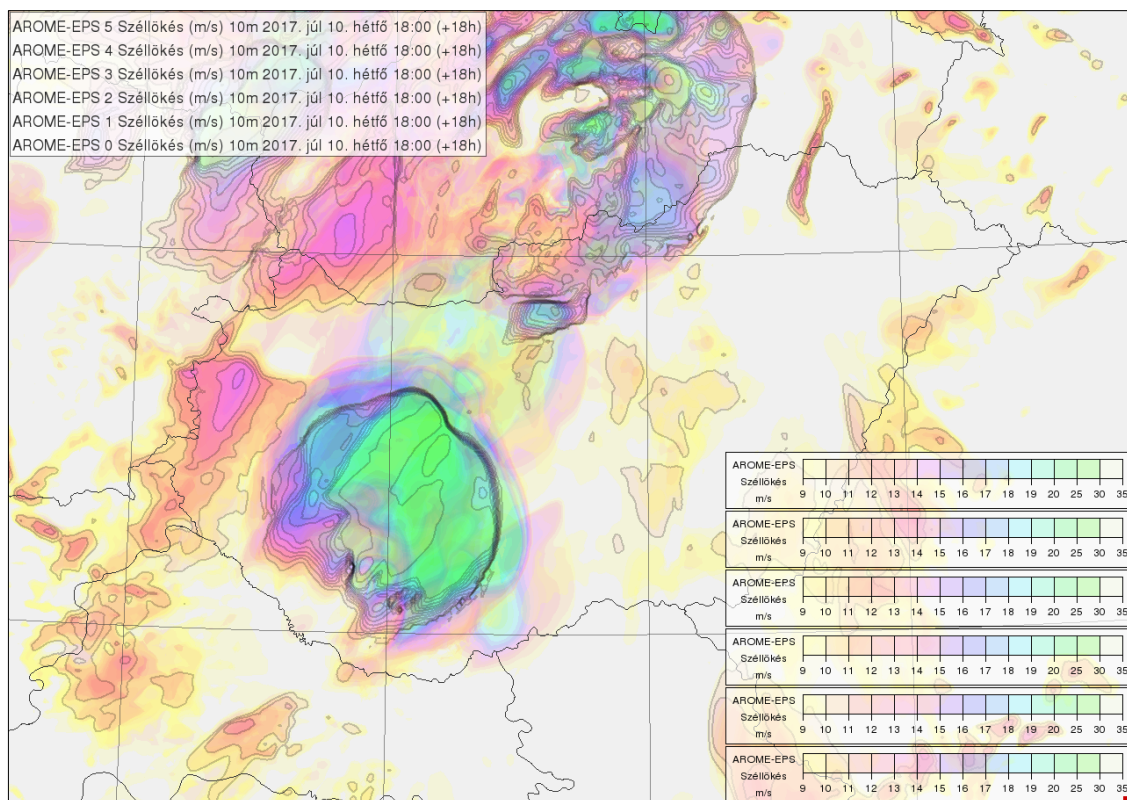
**3.2.3.3. ábra: A zivatar kompozit radarképe (radar reflektivitás értékek dBz-ben megadva) 2017. július 10-én 18:25 UTC-kor, ahol a reflektivitási oszlopmaximum értékeket láthatjuk [O17].**



**3.2.3.4. ábra: A kvázi-AROME-EPS 2017. július 10-i 00 UTC-s futása alapján készült Siófokra vonatkozó meteogram.**

A 3.2.3.4. ábrán egy kvázi-AROME-EPS alapján készült meteogramot láthatunk, mely három részre bontható. A felső y-tengelyen a hőmérséklet és a harmatpont látható (2 méteres, °C-ban), előbbi EPS-ként, ahol az aktuálisan hat tag egyszerre látható az adott pont

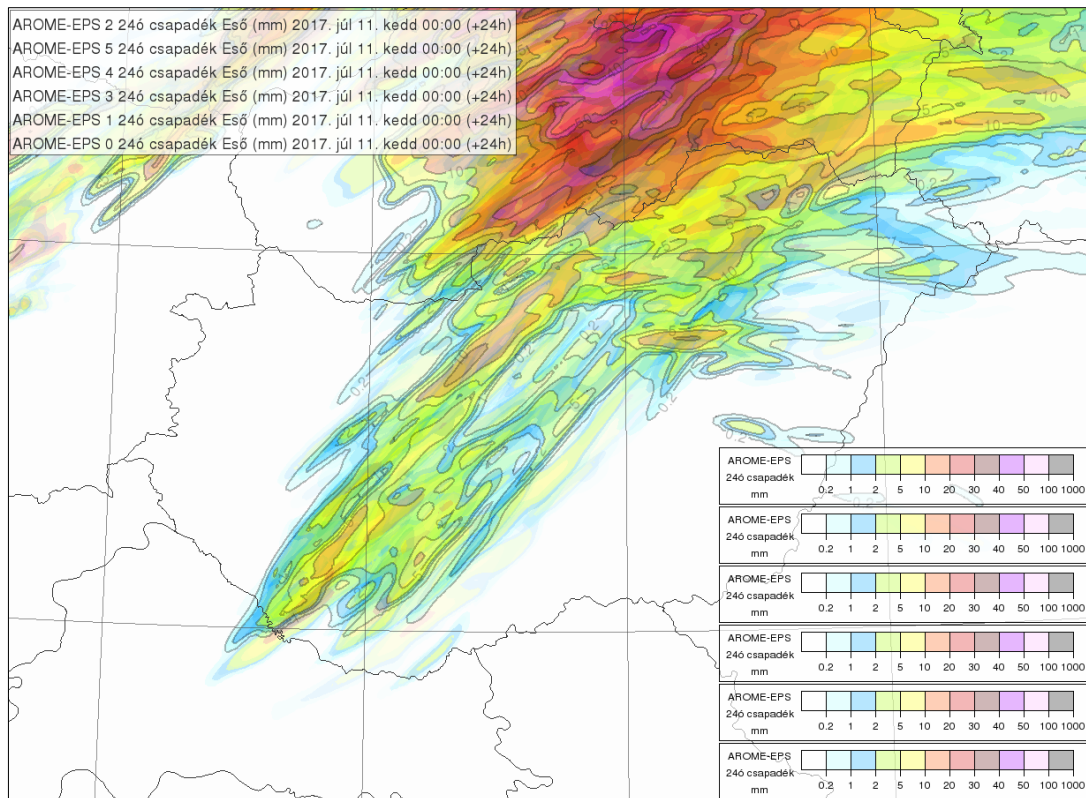
felett, míg utóbbi a hat tag átlagos értékét mutatja. A középső y-tengelyen a 700 hPa-os vertikális feláramlás m/s-ban (rózsaszín vonalak) valamint az egy órás csapadék mm-ben (kék árnyalatok). Végül az alsó y-tengelyen a 10 méteres átlagos szélsősebességet (zöld vonal) és a kvázi-AROME\_EPS által előrejelzett szélökés EPS-t láthatjuk m/s-ban (zöld árnyalatok). A három ábra azonos x-tengellyel rendelkezik, melyen a 24 órás időablakot figyelhetjük meg. A kvázi-AROME\_EPS ennél az esettanulmánynál 6 tagból állt a 9-i nap 00 UTC-s futásának hiányában. Ezen ábrákból kiemelném a szélökésre vonatkozót, melyen már a 00 UTC-s futás alapján látszódott, hogy körülbelül 100 km/h-s szélökésre lehet számítani a térségben. Érdeemes megjegyezni, hogy lokális konvektív jelenség esetén, ahová a légzuhatag tartozik, ez jelenleg egy nagyon jó eredmény a 2,5 km-es horizontális felbontású modellnél. Realisabb (kisebb kiterjedésű, de akár erősebb széllel) kimenetekhez finomabb felbontású (1 km alatti) modellekre lenne szükség. Így egy ilyen vagy ehhez hasonló meteogram felhívhatja az előrejelzők figyelmét a potenciálisan előforduló legnagyobb szélökésre az AROME modell alapján.



**3.2.3.5. ábra: A kvázi-AROME-EPS alapján készült EPS térkép a 2017. július 10-én 18 UTC-re vonatkozó 10 méteres szélökésre [m/s].**

Ugyancsak a szélökésre vonatkozik a **3.2.3.5. ábra**, melyet a következőképpen kell értelmezni. A kvázi-EPS tagjait nézzük egymásra helyezve, ahol az időben tőlünk

legtávolabb levő a leghalványabb, míg az aktuális futásból (jelen esetben 00 UTC-s) származó 10 m-re vonatkozó szélökés fekete kontúrral jelenik meg. Ez a fajta ábrázolás lehetővé teszi a felhasználó számára, hogy láthassa a modellkimenet területi változékonyságát futásról futásra. A 2017. július 10-i esettel kapcsolatban ezen az ábrán is jól megfigyelhető, hogy hol lehetett számítani 25 m/s-os vagy annál nagyobb szélökésre.



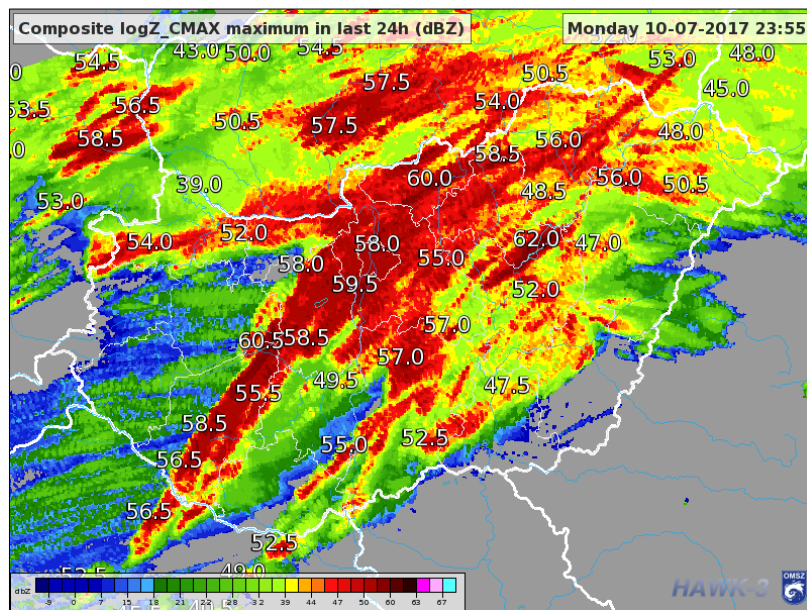
**3.2.3.6. ábra: A kvázi-AROME-EPS alapján 2017. július 10-re készült EPS-térkép, 24 óras csapadékösszege [mm].**

A szélökés mellett a június 10-i napon a csapadék is jelentős volt így egy 24 óras csapadékösszeg előrejelzést is bemutatnék, mely a kvázi-AROME-EPS alapján készült. A **3.2.3.6. ábra** ugyanolyan módon készült, mint a szélökésre vonatkozó (**3.2.3.5. ábra**). A kvázi-AROME-EPS tagjait nézzük egymásra helyezve, az időben tőlünk legtávolabb levő a leghalványabb, míg az aktuális futásból (jelen esetben 00 UTC-ből) származó 24 óras időintervallumra vonatkozó csapadék fekete kontúrral jelenik meg. Ez a térkép szintén lehetőséget ad arra, hogy a felhasználó érzékelhesse a modellkimenet területi változékonyságát futásról futásra.

Az előrejelzés mellett a **3.2.3.7. ábrán** láthatjuk az adott 24 óra alatt észlelt csapadékintenzitást. A **3.2.3.6.** és a **3.2.3.7. ábra** összehasonlításakor megállapíthatjuk, hogy



a modellezett csapadék területi eloszlása és a mért radar reflektivitás területi eloszlása hasonló képet mutat.



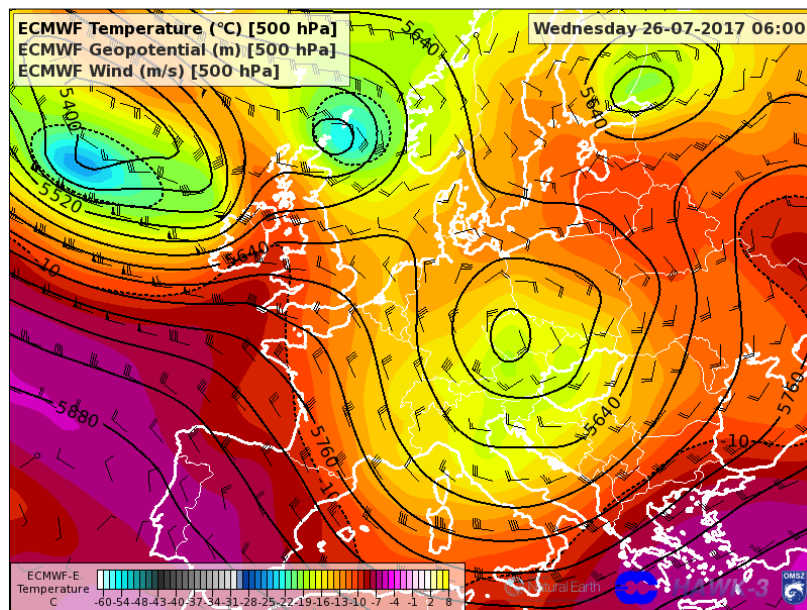
**3.2.3.7. ábra: 2017. július 10-re vonatkozó 24 órás radarkép (radar reflektivitás értékek dBz-ben megadva), ahol a reflektivitási értékek oszlopmaximumait láthatjuk [O18].**

Ebben az időjárási helyzetben megfigyelhető, hogy a **3.2.3.4. ábrán** a tagok eléggé egyetértettek abban, hogy nagyon erős szellőkések lesznek július 10-én, valamint a **3.2.3.6** és **3.2.3.7 ábrákon** sem volt akkora a térbeli bizonytalanság, ami szintén fontos információt nyújthat az előrejelzőknek a „legveszélyeztetettebb” területek behatárolásához.

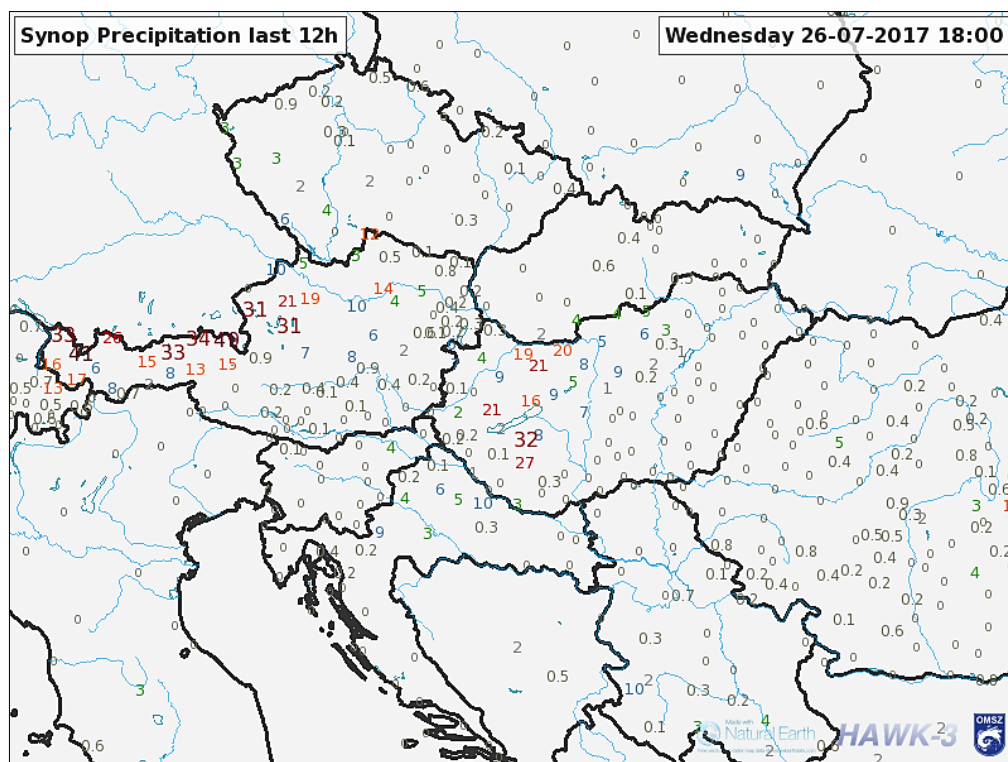
### **3.2.4. Esettanulmány instabilitási vonalra (zivatarlánc)**

2017. július 26-án Magyarország felett magassági hidegörvény helyezkedett el, mely labilis légréteget eredményezett (**3.2.4.1. ábra**). Hazánktól északnyugatra, Csehország felett az alacsonyabb nyomási szinteken egy ciklon örvénylett. Ebből kiindulva, az előrejelzők a Dunántúl térségében számítottak heves események kialakulására, melyet egy gyenge jet balkilépő zóna is támogatott a 300 hPa-os szélmező alapján (**F10. ábra**). Végül az előrejelzéssel összhangban – a 25-i hidegfronti felhőzet érkezése után – 26-án a kora hajnali- reggeli órákban gyenge csapadék hullott a Dunántúl térségében, majd a kora délutáni órákban északnyugatról betört hazánk területére a „másodlagos hidegfront” egy „frontális” zivatarlánccal (**F11. ábra**), mely délkeleti irányba haladt. A **3.2.4.2. ábrán** látható

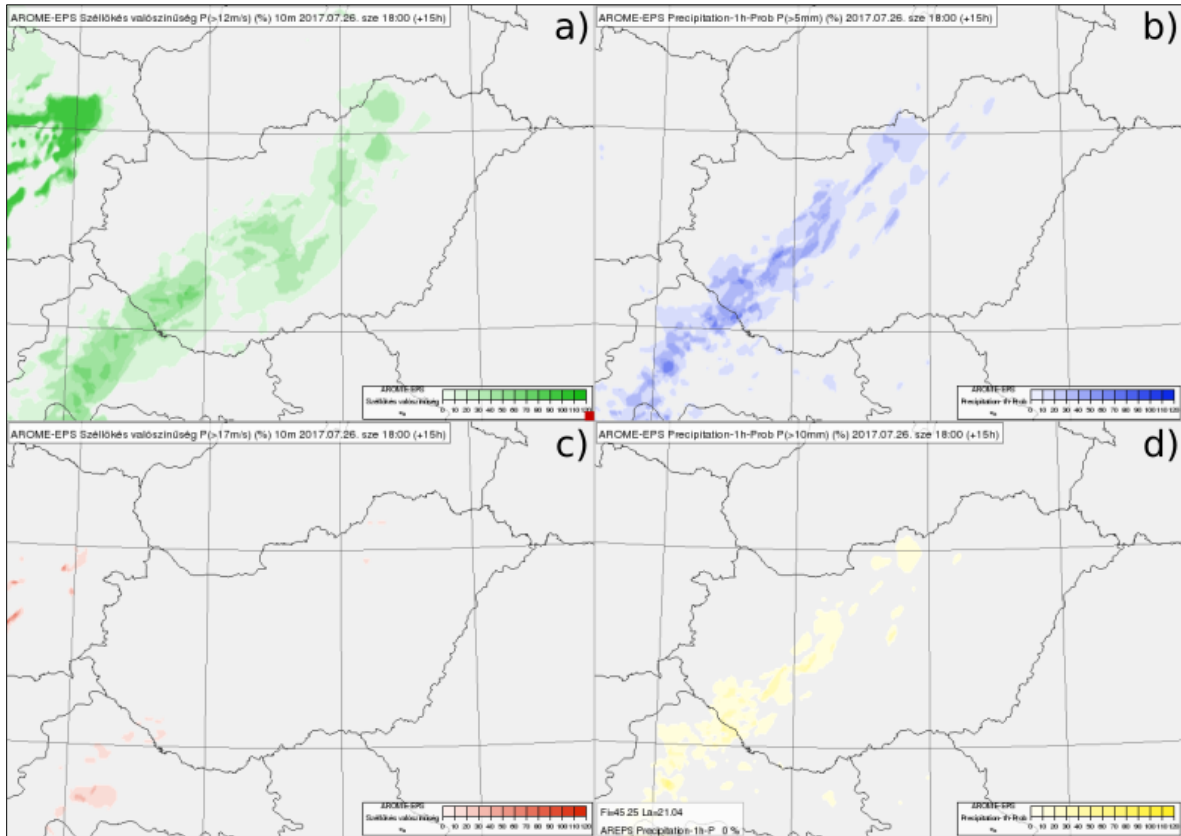
2017. július 26-án 18 UTC-t megelőző 12 órában lehullott csapadék mennyisége Közép-Európa térségében.



3.2.4.1. ábra: Az ECMWF által előrejelzett hőmérséklet [°C], geopotenciál [m], szél [m/s] az 500 hPa-os szinten, európai kivágtatra, 2017. július 26-án 06 UTC-re az 00 UTC-s futásból [O19].

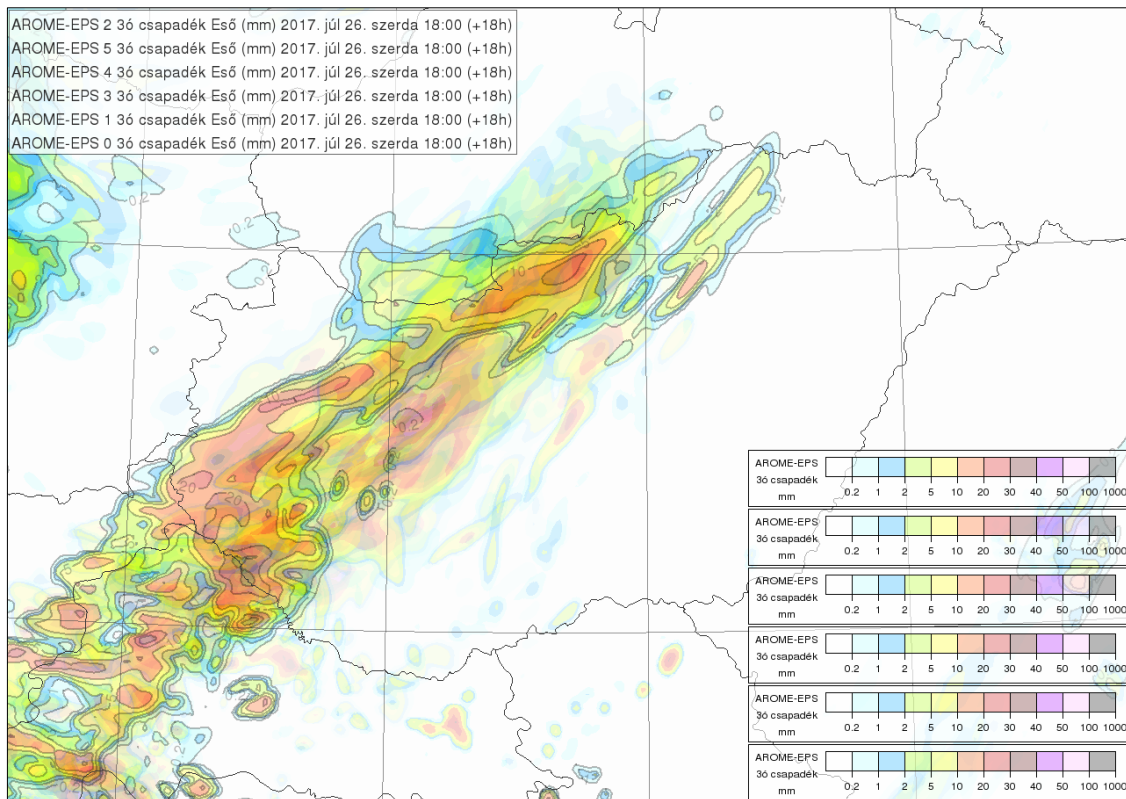


3.2.4.2. ábra: Az elmúlt 12 órában lehullott csapadék mennyiség Közép-Európában 2017. július 26-án 18 UTC időpontban [O22].



**3.2.4.3. ábra: Kvázi-AROME-EPS valószínűségi ábrák 10 méteres széllökésre és csapadékra különböző küszöbértékekkel, 2017. július 26-án 18 UTC-re.**

A 3.2.4.3. ábrán kvázi-AROME-EPS valószínűségi térképek láthatók széllökésre és csapadékra különböző küszöbértékekkel. Az a) jelöli a 12 m/s-nál míg a c) a 17 m/s-nál nagyobb széllökés valószínűségét. A b) térképen az 1 órás csapadék valószínűséget látjuk, hogy meghaladja-e az 5 mm-t, a d) térkép esetében pedig a 10 mm-t. Látható, hogy a zivatarlánc struktúráját a valószínűségi térképek kirajzolják, valamint felhívják a figyelmet az erős szélesebességre és csapadékra. Az előrejelzés ebben az esetben csak 6 kvázi-AROME-EPS tagra támaszkodhatott a 18 UTC-s futás hiányában.



**3.2.4.4. ábra: A kvázi-AROME-EPS alapján 2017. július 26-án 18 UTC-re készült EPS-térkép, 3 órás csapadékösszegre [mm].**

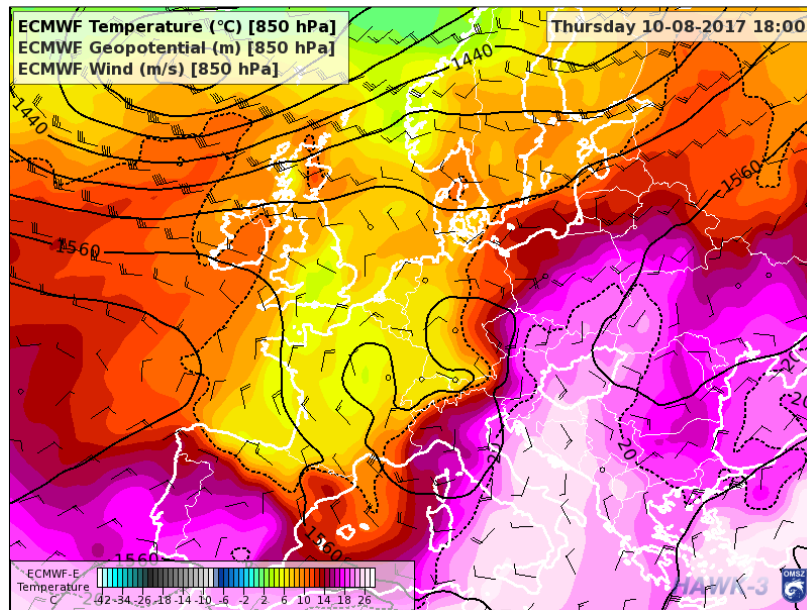
A kvázi-AROME-EPS ebben az esetben a zivatarlánc haladási sebességénél nyújtott további információt (lásd **3.2.4.4. ábrán** a 3 órás származtatott csapadékösszeg területi eloszlását). Ugyanis a 18 UTC-s kompozit radarkép (**F12. ábra**) állapotát a korábbi futások alapján a jobban előre lehetett jelezni, mint a legfrissebb alapján (**3.2.4.4. ábrán** a kontúrral jelölt terület a legfrissebb modellfutás eredményéből származtatott csapadék mennyiség).

### 3.2.5. Esettanulmány viharos szellőkésre

A következő esettanulmány 2017. augusztus 10-re vonatkozik. Az európai térség időjárását egy több középpontú ciklonrendszer határozta meg, mely a Földközi-tenger nyugati medencéjétől Skandinávia északi térségéig húzódott és az 500 hPa-os térképeken is jól megfigyelhető volt (**F13. ábra**). A Balkán térség és Közép-Európa nagy részén egy szaharai eredetű légtömeg, talajszínti anticiklon helyezkedett el. Franciaország felett elterülő frontálzóna hátoldalán nyugati irányú, hidegebb levegő áramlása tolt a frontot kelet felé, a frontálzóna előtt és a fronton heves zivatarokat és zivatarrendszereket okozva [10 - met.hu].

A Kárpát-medence térségét - pontosabban a Nyugat-Dunántúl térségét - a hullámzó hidegfront előtt (**3.2.5.1. ábra**), augusztus 10-én a délután második felében közelítette meg,

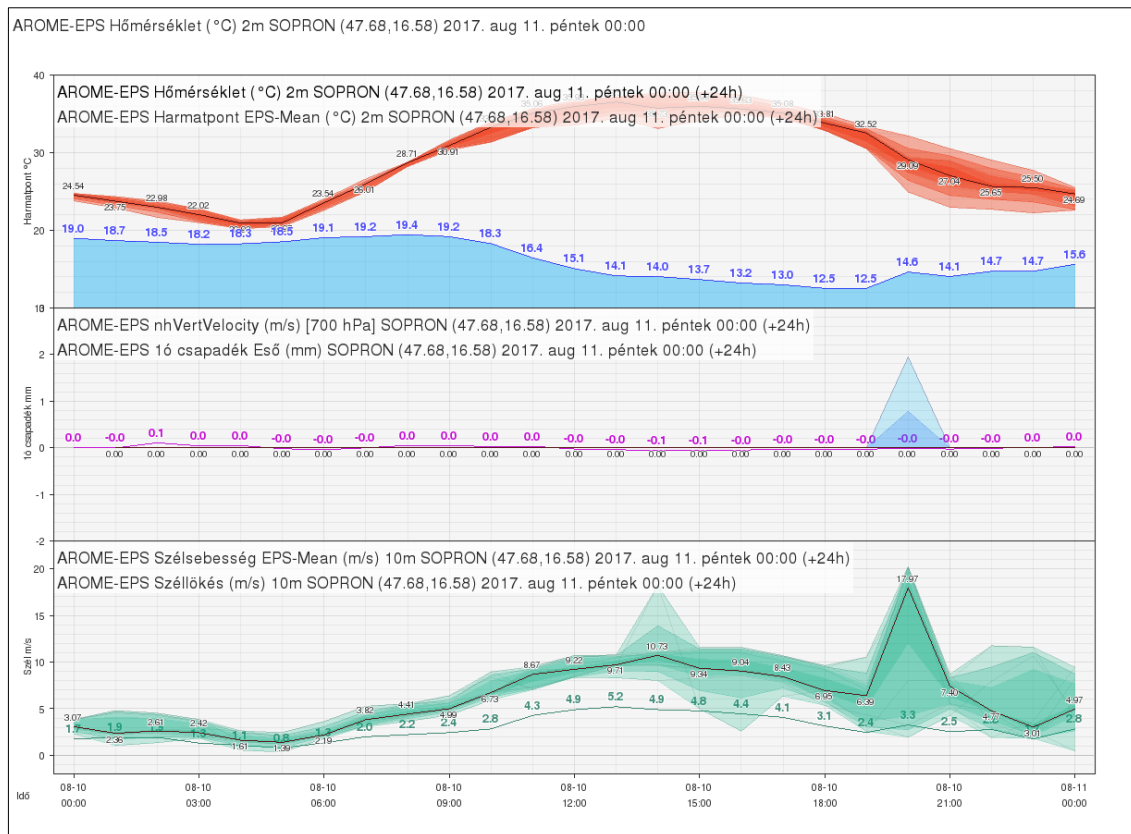
egy prefrontális mezoskálájú konvektív rendszer. A zivatarokat viharos, időnként orkán erejű kífutószél kísérte. Az OMSZ öt mérőállomása regisztrált 100 km/h-t meghaladó szellőkést. A legerősebb szellőkést Sopronban mérte az automata szélmérő, mely 38,1 m/s volt. A Győr-Moson-Sopron megyei Péren 25,6 m/s-s viharos szellőkést regisztráltak, melyet csapadék nem kísért. A zivatarokat kísérő kífutószelek a narancs illetve a piros riasztási fokozat kiadását is szükségessé tették [12 – met.hu].



**3.2.5.1. ábra: Az ECMWF által előrejelzett hőmérséklet [°C], geopotenciál [m], szél [m/s] az 850 hPa-os szinten, európai kivágatra, 2017. augusztus 10-én 18 UTC-re az 00 UTC-s futásból [O25].**

A veszélyes időjárási jelenségek valószínűségére a - jelen esetben 7 tagú - kvázi-AROME-EPS is felhívta a figyelmet. A **3.2.5.2. ábrán** látható Sopronra vonatkozó meteogramon a 00 UTC-s futásból számított értékek láthatók, a fentiekben már ismertetett módon.

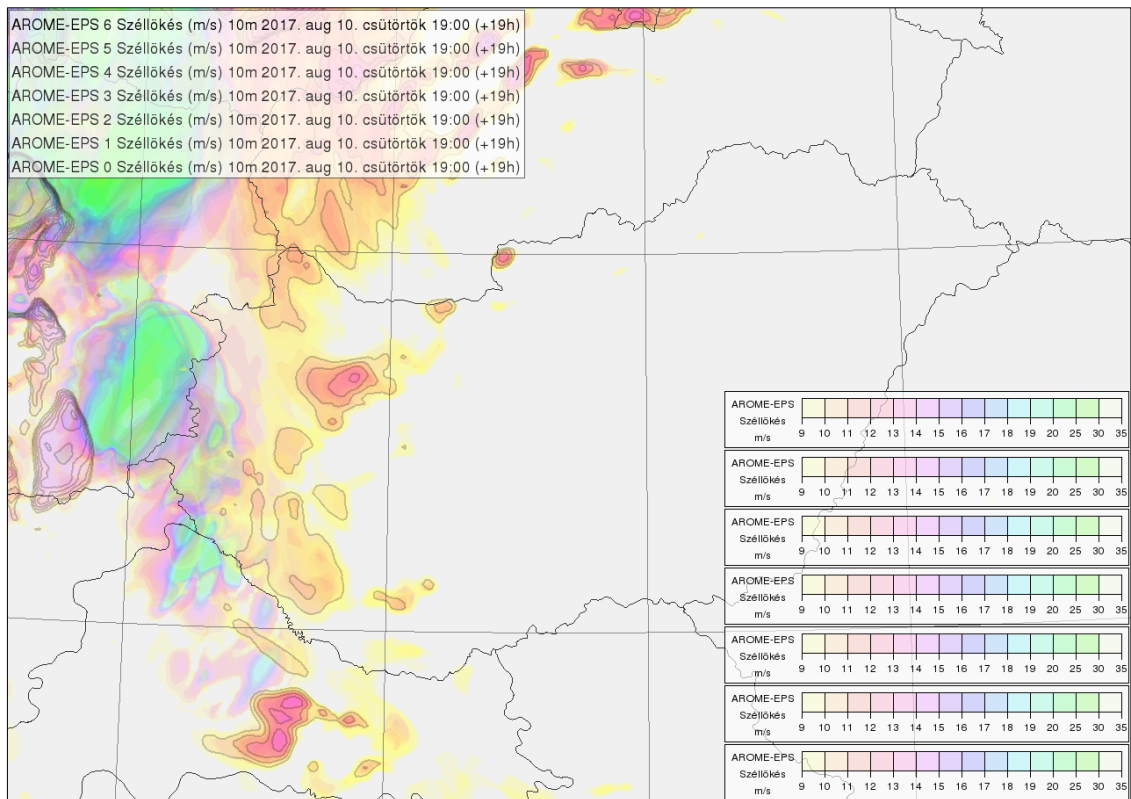




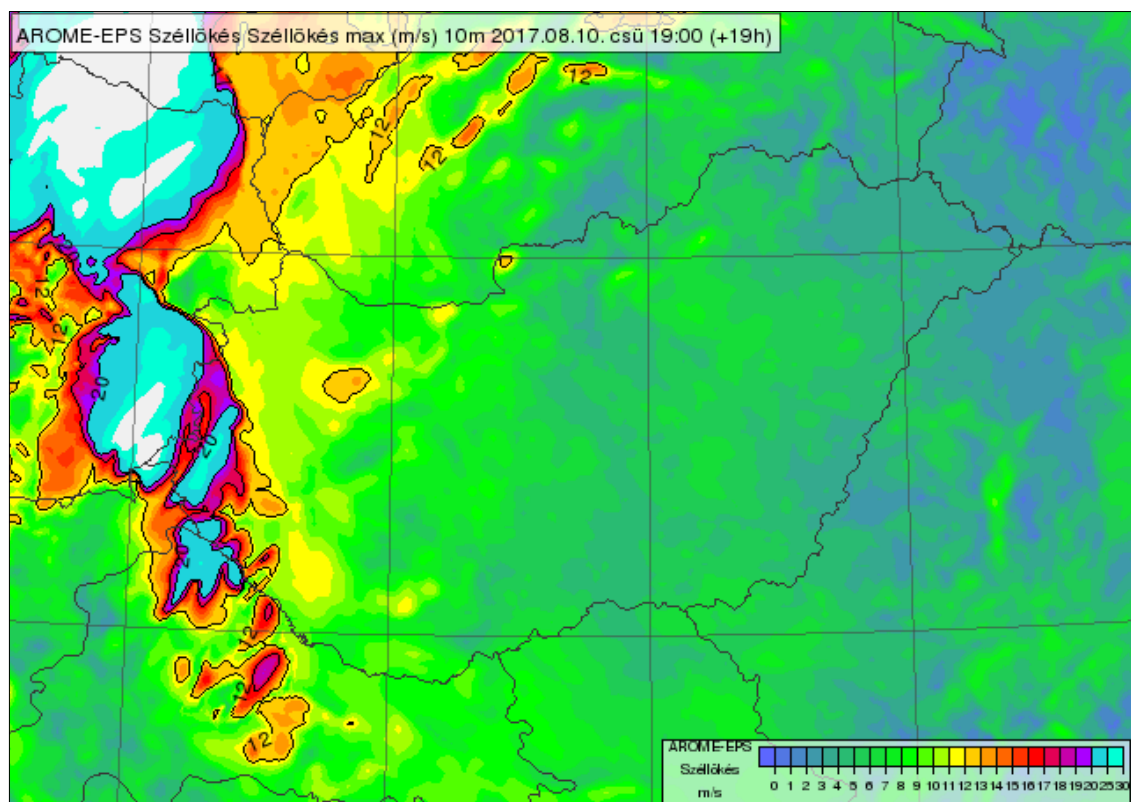
**3.2.5.2. ábra: A kvázi-AROME-EPS 2017. augusztus 10-i, 00 UTC-s futása alapján készült Sopronra vonatkozó meteogram.**

Látható, hogy az AROME futások a kora esti - esti órákra a legnagyobb valószínűséggel 17 m/s-nál nagyobb szellökéseket jeleztek előre. Így a továbbiakban a kvázi-AROME-EPS alapján készült szellökés előrejelzési térképeket mutatnék be 2017. augusztus 10-én 19 UTC-re.

A **3.2.5.3. ábrán** a fent bemutatott módszerrel készült szellökés EPS térképet láthatunk. Megfigyelhető, hogy a legfrissebb AROME futás Magyarországtól nyugatabbra tette a legnagyobb szellökés értékeket (14-15 m/s). Ezzel szemben a korábbi eredmények alapján 30-35 m/s-os szellökésekre is lehetett számítani hazánk nyugati szegletében. A kvázi-AROME-EPS hasznosságát ez az esettanulmány is alátámasztja, hiszen vannak olyan időjárási körülmények, mikor nem feltétlenül a legfrissebb modellkimenet a legpontosabb.

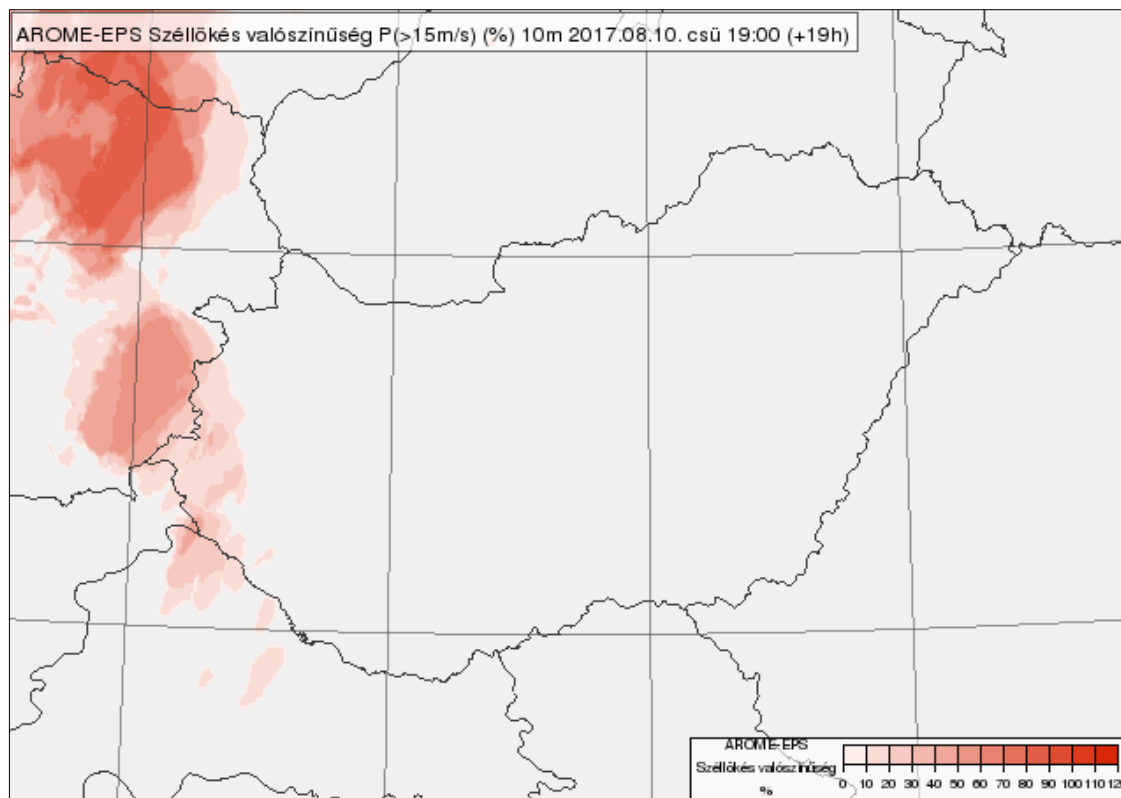


**3.2.5.3. ábra: A kvázi-AROME-EPS alapján készült EPS térkép a 10 méteres széllökésre 2017. augusztus 10-én 19 UTC-re.**



**3.2.5.4. ábra: 00 UTC-s kvázi-AROME-EPS futásból számított maximális 10 méteres széllökés 2017. augusztus 10-én 19 UTC-re.**

A **3.2.5.4.** és **3.2.5.5. ábrán** látható szintén a fentiekben már ismertetett módon kell értelmezni. A **3.2.5.4. ábrán** a maximális szellőkésre vonatkozó térképet láthatunk, melyen szintén megjelenik a 30 m/s-ot meghaladó szellőkés. A **3.2.5.5. ábra** valószínűségi értékei a 15 m/s-ot meghaladó szélsősebesség értékeit mutatják. A nyugati országrészben a küszöbérték átlépésére 57,1%-os valószínűséget adott a modell, mely igen magas értéknek mondható.

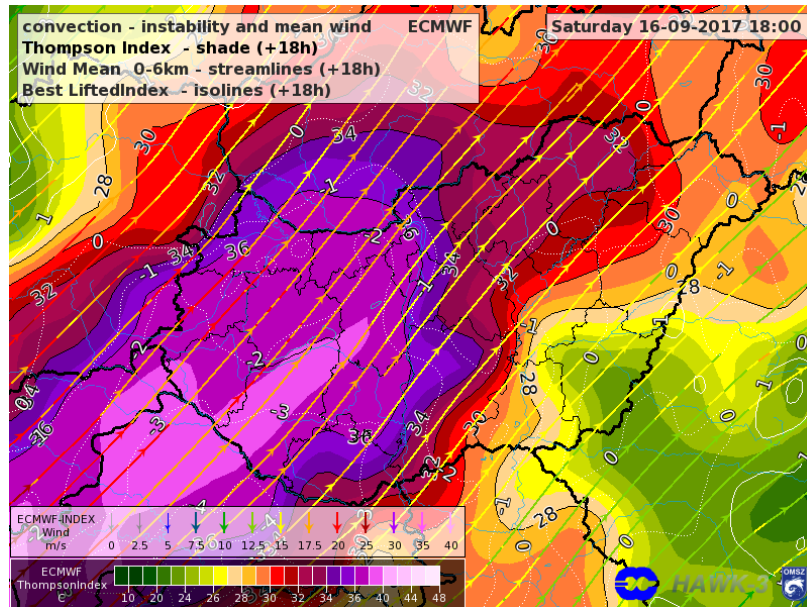


**3.2.5.5. ábra: 00 UTC-s kvázi-AROME-EPS futásból számított 10 méteres szellőkés valószínűség, 15 m/s-os küszöbvel, 2017. augusztus 10-én 19 UTC-re.**

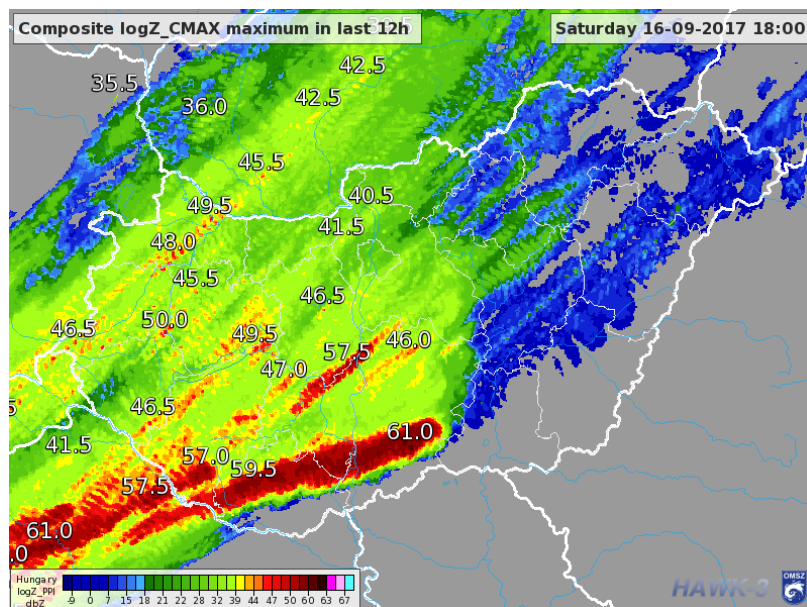
### 3.2.6. Esettanulmány őszi szupercellás helyzetre

2017. szeptember 16-án az 500 hPa-os nyomási szinten nyugatról keletre lassan mozgó hosszúhullámú teknő (**F14. ábra**) előoldalán helyezkedett el Magyarország. A jet stream az országtól nyugatabbra - Ausztria térségében - fújt a 300 hPa-os széltérképen (**F15. ábra**). Mediterrán ciklon közeledett délnyugati irányból, Szlovénia felől, labilitást okozva főleg az ország nyugati szegmensében (**3.2.6.1. ábra**), ezt továbbá megtámogatta a magas (25 m/s körüli) 0-6 km közötti szélnyírás (**F16. ábra**). A labilitási indexek alapján (TI, LI) - ahogy az a **3.2.6.1. ábrán** is látható -, a délnyugati területeken intenzív, heves zivatarok kialakulását várták a TI index alapján (lásd Thompson Indexhez köthető zivatarvalószínűségi táblázat: *Csirmaz*, 2013). Ezen körülmények hatására a déli országrészben egymást követően

szupercellák jöttek létre (F17. ábra), melyek viharos szellökéseket és nagy csapadékot produkáltak (3.2.6.2. ábra). Az ábrán például látható, hogy dél Magyarországon a zivatar pályája jelentősen jobbra tért el a többi zivatarcellához képest.



3.2.6.1. ábra: 2017. szeptember 16-án 18 UTC-s időpontra ECMWF által jelzett közepes szélesség 0-6 km között [m/s], Thompson Index és Best Lifted Index [O28].

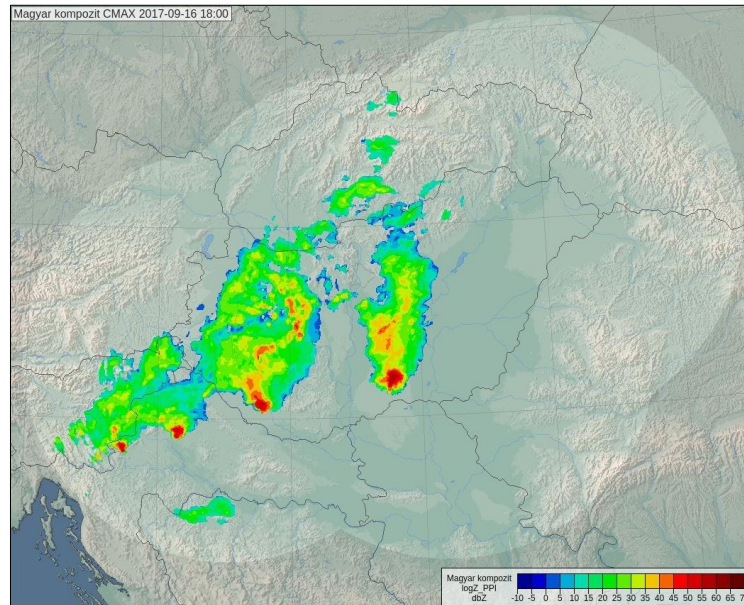


3.2.6.2. ábra: 2017. szeptember 16-án 18 UTC-re vonatkozó 12 órás kompozit radarkép (radar reflektivitás értékek dBz-ben megadva), ahol a reflektivitási értékek oszlopmaximumait láthatjuk [O31].

Az F18. ábrán egy a kvázi-AROME-EPS (7 tagból álló előrejelzés) alapján készült EPS térképet mutatok be, melyen 12 órás származtatott csapadékösszeg látható a 2017. szeptember 17-i 00 UTC-s időpontra. A 3.2.6.2. ábrával összevetve a 6. tag, tehát a 2017.

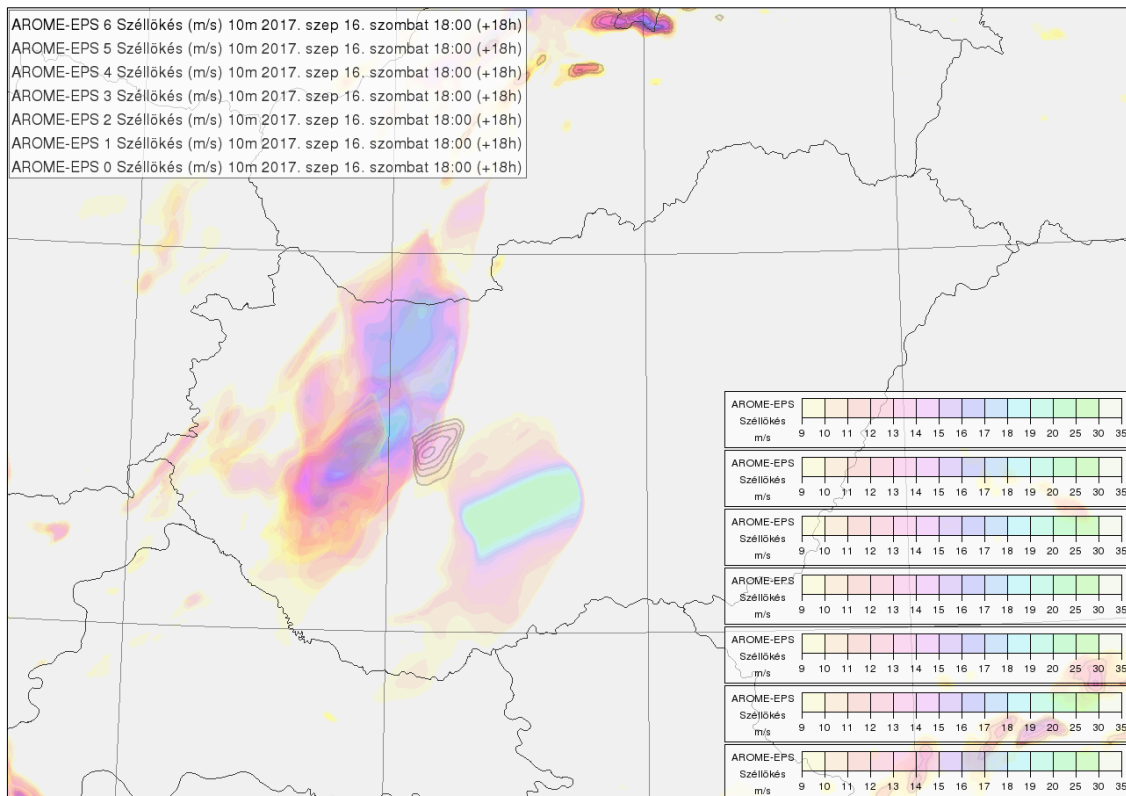


szeptember 15-i 00 UTC-s futás bizonyult a legpontosabbnak a csapadékos terület helyzetének meghatározásában. A **3.2.6.3. ábrán** látható radar kompozit alapján vizsgáltam a kvázi-AROME-EPS illetve a WRF modelleredményeket a 18 UTC-s időpontra.



**3.2.6.3. ábra: A zivatar kompozit radarképe (radar reflektivitás értékek dBz-ben megadva) 2017. szeptember 16-án 18 UTC-kor, ahol a reflektivitási oszlopmaximum értékeket láthatjuk [O32].**

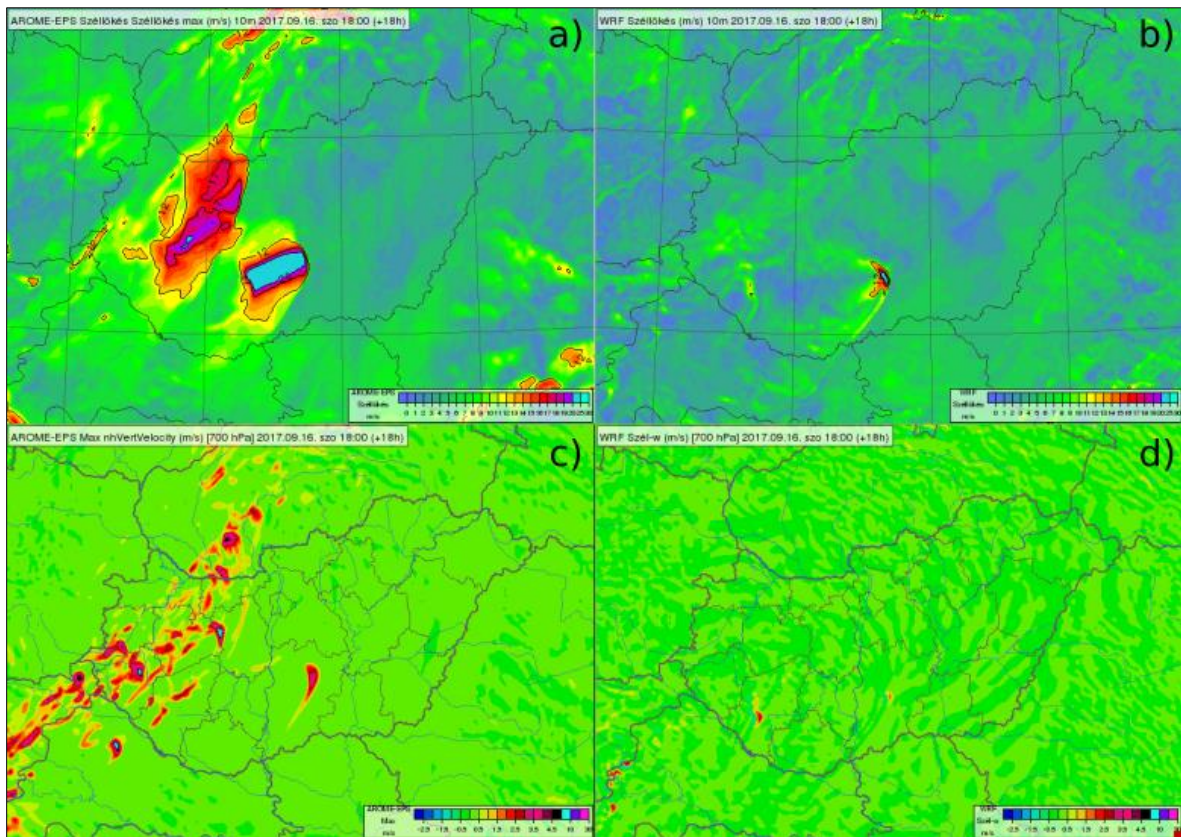
A zivatarok környékén heves, viharos szellőkésekre lehetett számítani, így a **3.2.6.4. ábrán** egy kvázi-AROME-EPS alapján készült EPS térképet mutatok be, melyen 18 UTC-re vonatkozó szellőkés látható. Az ábra 7 kvázi-EPS tagból készült, azonban ezek közül nem a legfrissebb (00 UTC-s, fekete kontúrral jelölt) volt a legpontosabb, hanem szintén az előző napi (szeptember 15.) 00 UTC-s modellfutás.



**3.2.6.4. ábra: A 00 UTC-s kvázi-AROME-EPS alapján készült EPS térkép 2017. szeptember 16-án 18 UTC-re vonatkozó 10 méteres széllökésre.**

Mivel a szeptember 16-i 00 UTC-s determinisztikus AROME futás nem felelt meg a valóságnak, a WRF modell esetében is megvizsgáltam a széllökést (10 m) és vertikális szélkomponenst (700 hPa). E két paramétert összevettem a kvázi-AROME-EPS-ből számított maximális széllökés és vertikális feláramlás térképekkel (**3.2.6.5. ábra**). A kvázi-AROME-EPS-sel ellentétben döntően kisebb területre valamint kisebb intenzitásúnak, heveségűnek jelezte a potenciálisan kialakulható cellákat. A különbség oka fakadhat a modell eltérő dinamikájából és fizikális parametrizációjából, valamint a kezdeti feltételekből is, hiszen ahogy a **3.2.6.4. ábrán** is látható, a legfrissebb AROME futásban sem jelentek meg a markánsabb viharok.

A sikeres tag által előrejelzett viharok (szupercellák) haladási iránya valamint várható széllökés maximuma jól megegyezett az észlelésekkel, ami a csapadékmennyiséget vagy a széllökést illeti. Ez a sikeres futás a szeptember 15-i 00 UTC-s tag volt, tehát az időben legtávolabbi még felhasználható modelleredmény. Jelen esettanulmány szintén alátámasztja a kvázi-AROME-EPS hasznosságát, mivel az általános iránytól eltérő zivatarcellákat a klasszikus extrapolációs nowcasting rendszerek nehezen jelzik előre. Azonban az ilyen cellák (itt jobbra térülő zivatarcellákról beszélhetünk) az esetek többségében a heves csapadék és szélvihar mellett nagyméretű jeget is képesek produkálni.

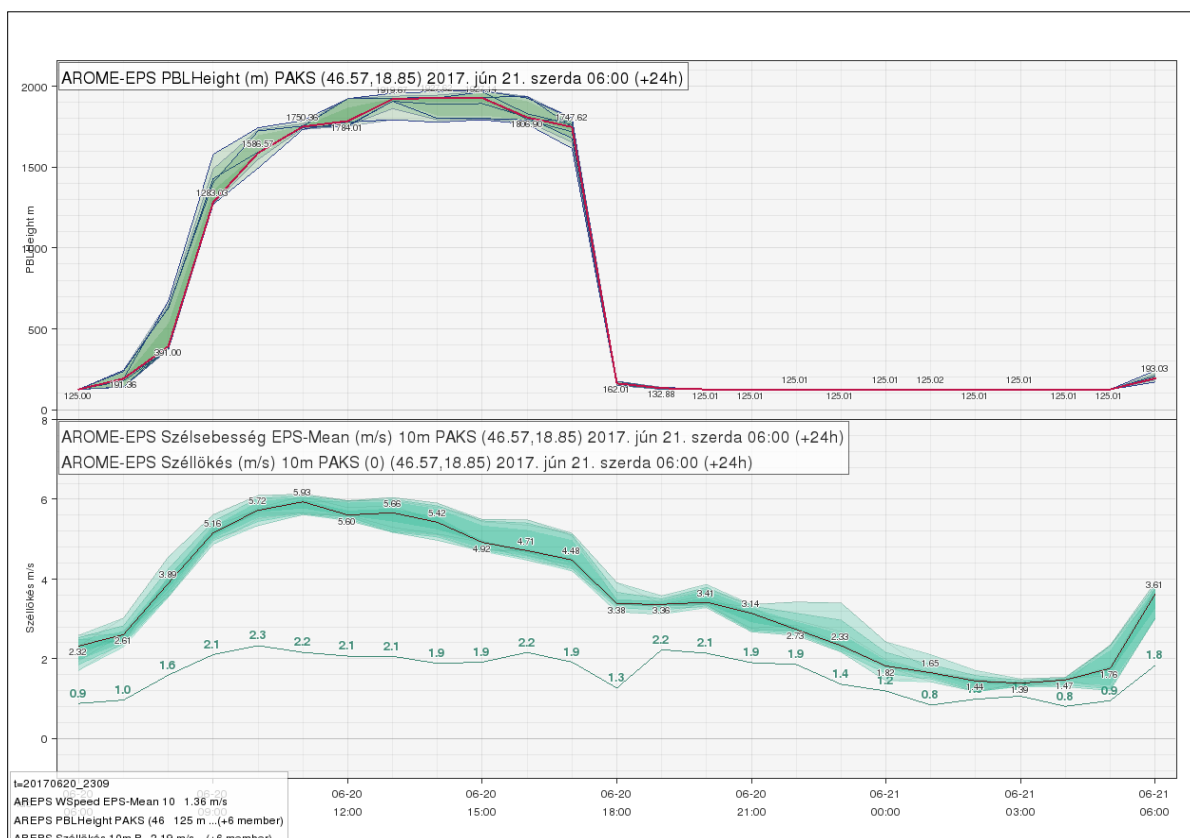


**3.2.6.5. ábra: a), c) 00 UTC-s kvázi-AROME-EPS maximum szélökés illetve vertikális feláramlás (700 hPa) előrejelzése összevetve a b), d) a WRF 00 UTC-s futásának szélökés illetve vertikális szélkomponens térképeivel, 2017. szeptember 16-án 18 UTC-re.**

Összefoglalva az esettanulmányok tükrében elmondható, hogy a kvázi-AROME-EPS által generált térképek hasznosnak bizonyulnak, ha a meteorológiai jelenségek nagy térbeli bizonytalansággal rendelkeznek. 2017 nyarán több olyan eset is volt, amikor nem a legfrissebb modellfutás volt a legpontosabb. Ennek okát a peremfeltételek megadásánál lehet keresni, mivel az AROME mellékterminusokban is a főterminusbeli ECMWF peremfeltételeket csatolja, elcsúsztatva. Ez a módszer így lehetőséget nyújt a modellfutások együttes ábrázolására, kijelölve a „legveszélyeztetettebb” területeket, mely segítséget nyújthat az előrejelzők és veszélyjelzők számára.

### 3.2.7. További felhasználási lehetőségek

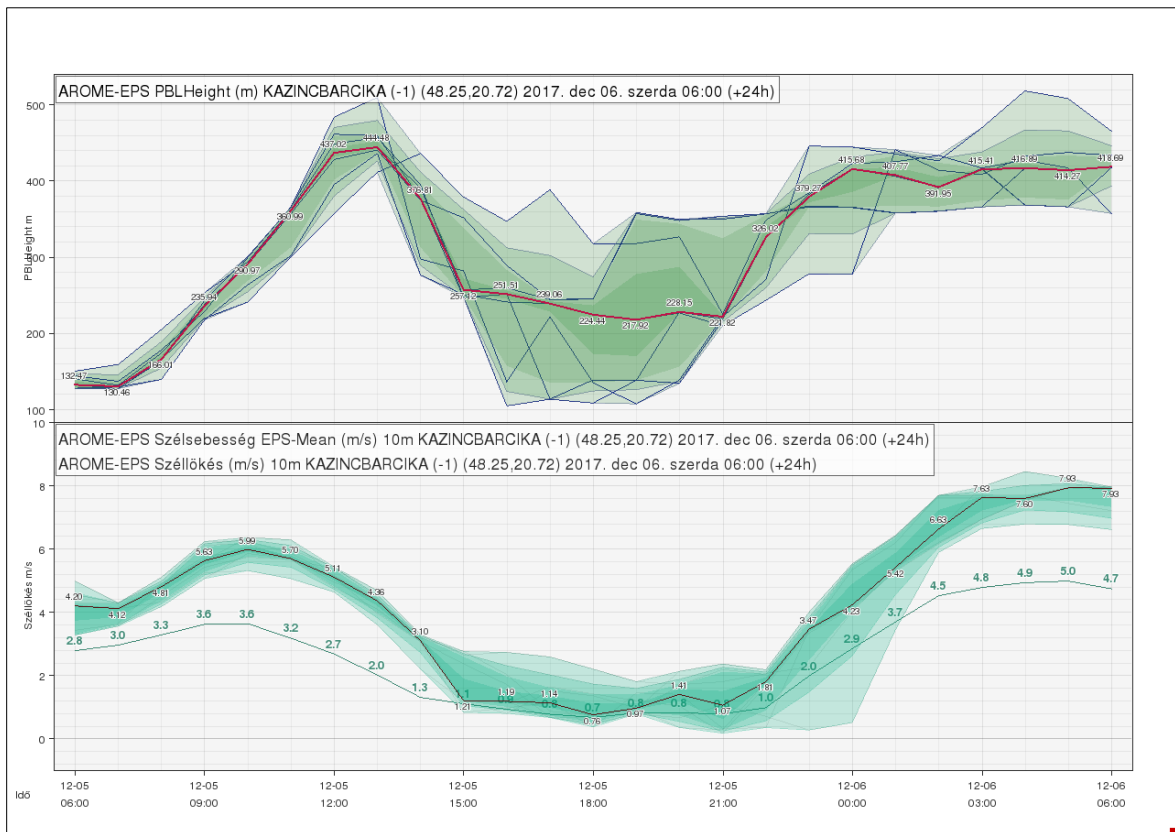
A kvázi-AROME-EPS nem csak a konvektív helyzetek előrejelzésében nyújthat segítséget, hanem például a planetáris határréteg (továbbiakban csak PHR) magasságának becslésében. Attól függően, hogy napos, anticiklonális időjárási helyzet vagy frontátvonulós időszak van, a PHR magasságának becslése szintén bizonytalanságok hordoz magában. Az előrejelzésére így érdemes lehet egy PHR magasság kvázi-AROME.EPS és egy szélsőesség, szélleőkés kvázi-AROME-EPS vizsgálata is (meteogramokkal). A 3.2.7.1. és 3.2.7.2. ábrán egy anticiklonális, valamint egy frontális helyzetre mutatnék példát a fent említett meteogramokból.



3.2.7.1. ábra: A kvázi-AROME-EPS 2017. június 21-i 06 UTC-s futása alapján készült Paksra vonatkozó meteogram.

Az 3.2.7.1. és 3.2.7.2. ábrák alapján elmondható, hogy abban az esetben, amikor a kvázi-AROME-EPS tagok a szélleőkésre nagy bizonytalanságot adnak (széles alsó fáklya, 3.2.7.2. ábra), akkor a planetáris határréteg magassága bizonytalan lesz olyannyira, mint a szélleőkés. Az őszi-téli hidegpárnás helyzetekben a meteorológusok felhasználhatják ezen plusz információt a légszennyezőanyagok feldúsulási mértékének előrejelzéséhez.



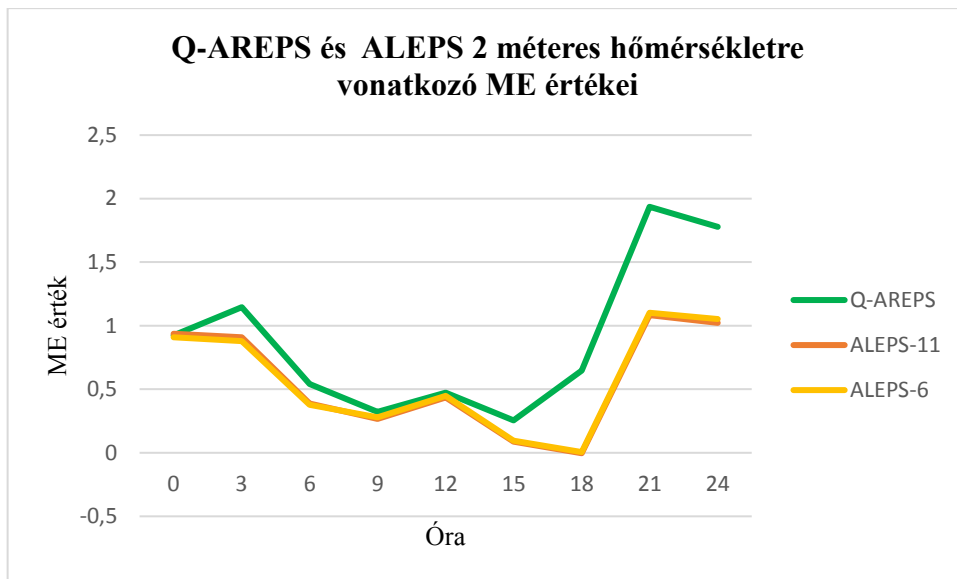


**3.2.7.2. ábra: A kvázi-AROME-EPS 2017. december 5-i 06 UTC-s futása alapján készült Kazinbarcikára vonatkozó meteogram.**

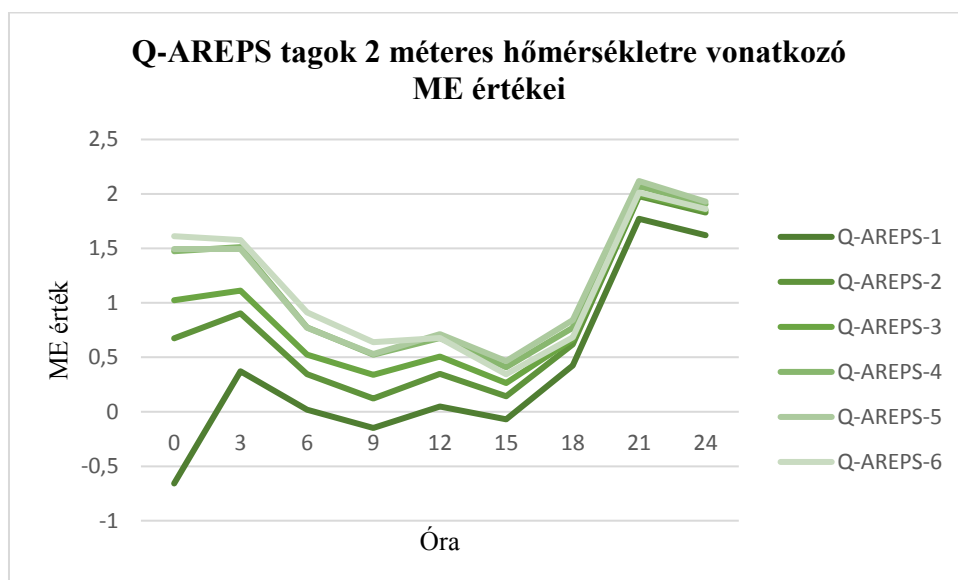
### 3.3. A kvázi-AROME-EPS verifikációja

Az előrejelzések bevalását objektívan is szükséges vizsgálni, így azok verifikációja az értékesség és gyakorlatiasság szempontjából elengedhetetlen (lásd **2. fejezet**). Ebben a fejezetben a kvázi-AROME-EPS által generált előrejelzések és megfigyelések értékeiből származtatott különböző verifikációs mérőszámokat fogok vizsgálni, melyek információt adnak arról, hogy adott döntéshelyzetben mennyire lehet figyelembe venni egy adott modelleredményt. A verifikációs munka során 2016 júliusát vizsgáltam, ahol a kvázi-AROME-EPS csupán 6 tagból állt, a 21 UTC-s futás hiányában. Azonban a modellfutások előállása egyenletesebb volt ebben a hónapban, mint a 2017-es év nyarán. A bemutatott ábrákon ME, Spread-Skill, Brier Score, Talagrand valamint CRPS diagram látható. A Spread-Skill ábrákon az ensemble tagok és azok átlagának RMSE értékei valamint az átlag körüli szórások jelennek meg.

A **3.3.1. ábrán** a kvázi-AROME-EPS (Q-AREPS) átlagára valamint az ALADIN-EPS-re vonatkozó ME értékek láthatóak 2 méteres hőmérséklet vizsgálatokor. A Q-AREPS (zöld vonal - 6 tag átlaga) mellett az ALADIN-EPS is szerepel 11 tag figyelembevételével (narancssárga – ALEPS 11 tag) valamint 6 tag figyelembevételével (citromsárga vonal – ALEPS 6 tag). Az ALADIN-EPS-t azért vizsgáltam két esetre is, hogy elkülöníthető legyen a két rendszer közti különbségek esetén, hogy mi fakad az elemszámbeli különbségből, és mi a felhasznált modellek közti eltérésből. Az ALADIN-EPS-ről meg kell jegyezni, hogy 18 UTC-s, míg az Q-AREPS 00 UTC-s indítású, valamint mindkét modell esetében azonos állomásokat vett figyelembe a verifikációs script. A ME azt mutatja meg, hogy alul, vagy felülbecsültük az esemény bekövetkezési valószínűségét. Torzítatlan becsléskor, vagyis tökéletes modell esetén a ME 0 értéket vesz fel. A **3.3.1. ábrán** látható, hogy ALADIN-EPS előrejelzése (mindkét esetben) jobbnak bizonyul a 2 méteres hőmérséklet előrejelzésében.



**3.3.1. ábra: A kvázi-AROME-EPS és ALADIN-EPS 2 méteres hőmérséklet előrejelzésére vonatkozó ME értékek.**

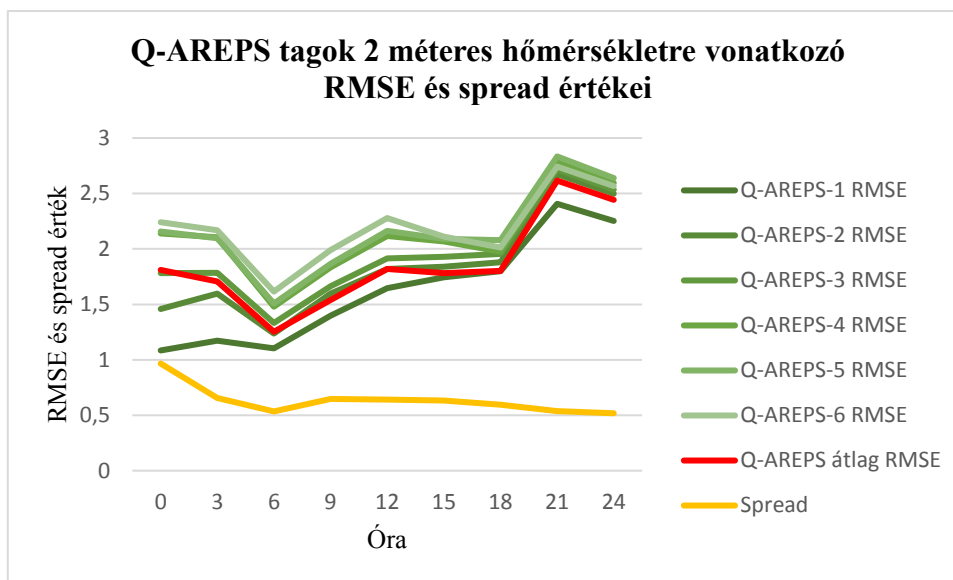


**3.3.2. ábra: A kvázi-AROME-EPS tagjaira vonatkozó ME érték 2 méteres hőmérséklet esetén.**

A **3.3.2. ábrán** kvázi-AROME-EPS tagjaira (Q-AREPS) és átlagára vonatkozó ME értékek láthatóak 2 méteres hőmérséklet vizsgálatakor. Látható hogy a legfrissebb futás (Q-AREPS-1: sötétzöld vonal) közelíti meg a legjobban a megfigyelés értékét. A futás indításától időben egyre távolodva egyre inkább torzulnak a modellek a 2 méteres hőmérséklet esetében. Ez a tendencia nem csak a 2 méteres hőmérséklet esetén figyelhető meg, hanem a szélesség (**F19. ábra**) és a szellőkés (**F20. ábra**) esetén is.

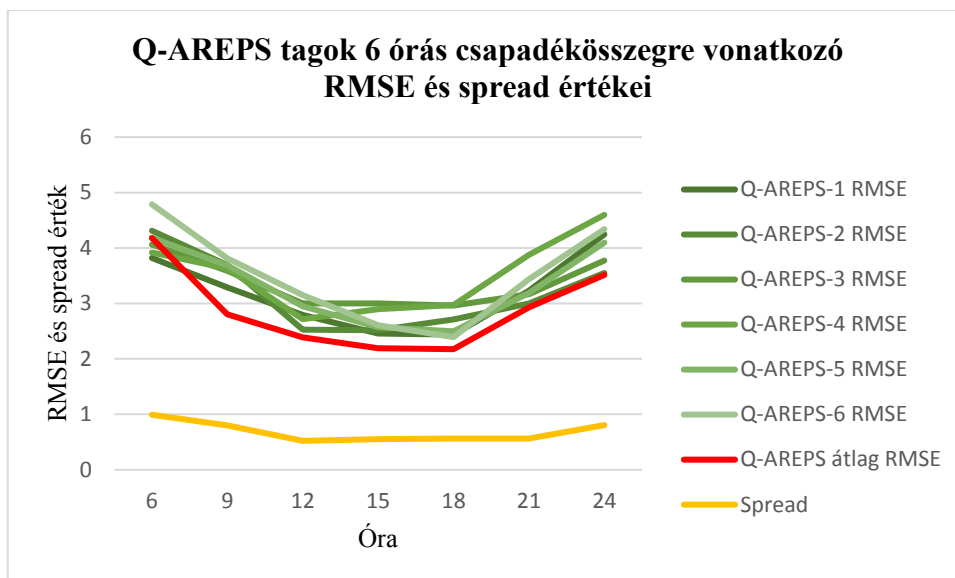
A 2 méteres hőmérséklet Spread-Skill ábrája (**3.3.3. ábra**) hasonló tulajdonságot mutat, ugyanis a legfrissebb futás hibája a legkisebb, de az idő előrehaladtával a szórása az

ensemble tagoknak egyre alacsonyabb (lásd sárga vonal). A kvázi-AROME-EPS tagok átlagának RMSE értéke magasabb a legfrissebb futásénál (Q-AREPS-1 RMSE: sötétzöld vonal). Mivel az ensemble átlag hibája nő az idővel, ezért a szórás csökkenése nem ideális tulajdonság, ami összefüggésbe hozható a módszernek azzal a hiányosságával, hogy itt semmiféle ideális perturbációt nem használunk.



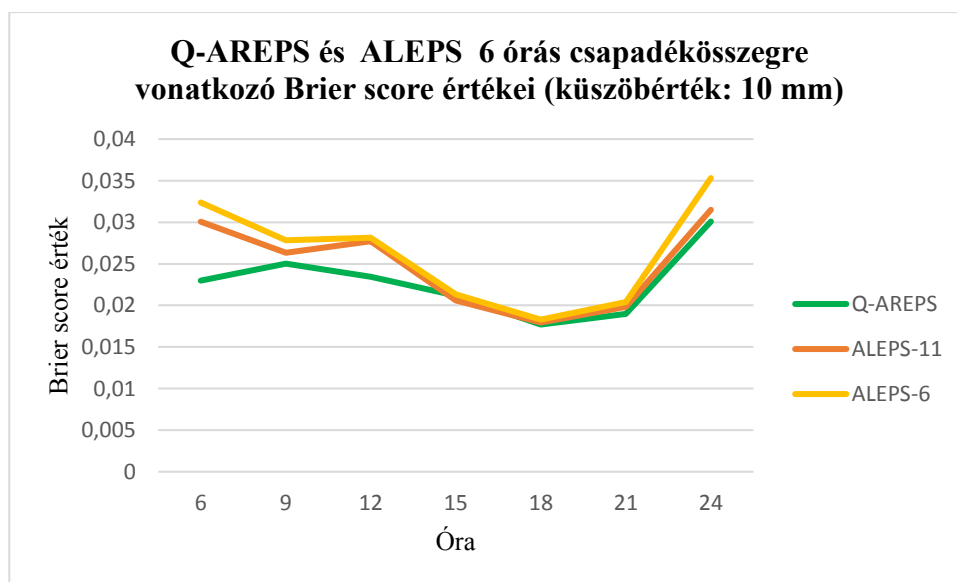
**3.3.3. ábra: A kvázi-AROME-EPS Spread-Skill ábrája 2 méteres hőmérséklet esetén.**

Meglehetősen más képet kapunk, ha a 6 órás csapadék Spread-Skill ábráját vizsgáljuk (**3.3.4. ábra**). Ebben az esetben az ensemble tagok szórása jobban követi az ensemble átlaghibáját – még ha továbbra is csak alulról – aminek jellegében erős napi menet figyelhető meg. A vizsgált időszakban a kvázi-AROME-EPS tagok átlagos négyzetes hibája nagyobb, mint azoké, tehát megbízhatóbb az átlagos érték a 6 órás csapadékösszeg esetén, mint a legfrissebb futásé. Emellett megfigyelhető, hogy a frissebb futások nem annyival egyértelműen jobbak a korábbiaknál, mint hőmérséklet esetében. Ez összefüggésbe hozható azzal, hogy konvektív időszakban a csapadéokra komolyabban hat a légkör kis skálájú folyamatainak erős belső bizonytalansága. Hasonló konklúziók vonhatók le szélsebesség (**F21. ábra**) és a szélökés (**F22. ábra**) esetén.

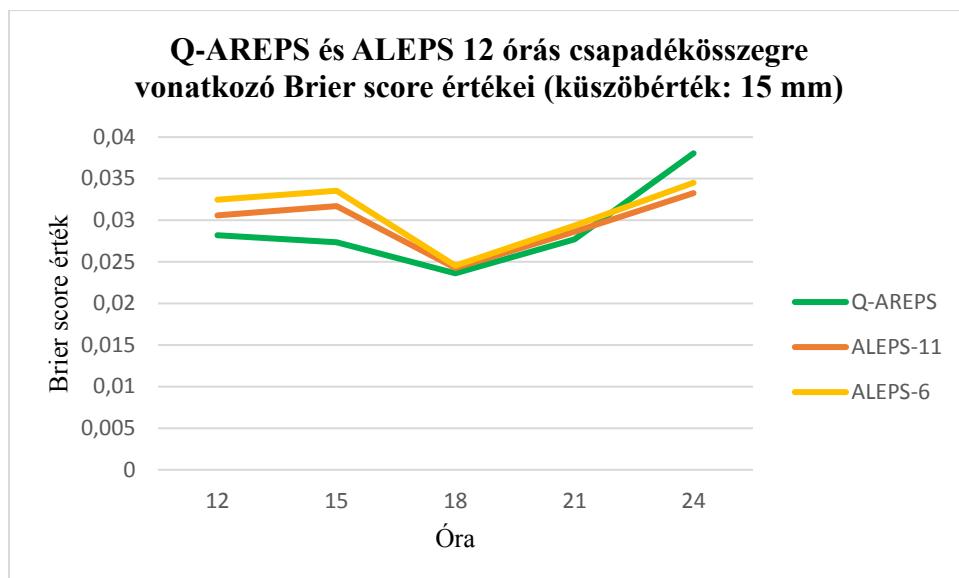


**3.3.4. ábra: A kvázi-AROME-EPS Spread-Skill ábrája 6 órás csapadékösszeg esetén.**

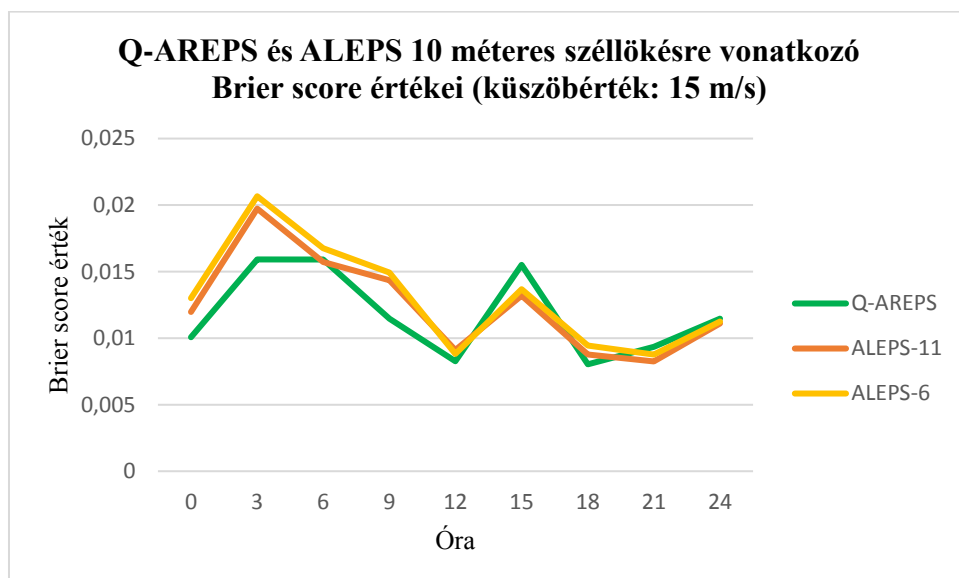
A 3.3.5., 3.3.6. és 3.3.7. ábrán a kvázi-AROME-EPS-re és az ALADIN-EPS-re vonatkozó Brier Score (BS) értékeket láthatjuk. Jó BS értékeket akkor kapunk, ha értéke a lehető legkisebb a [0;1] intervallumon (Tajti, 2009). Tehát a tökéletes modell esetén 0 lenne az értéke. A Q-AREPS (zöld vonal - 6 tag átlaga) mellett az ALADIN-EPS is szerepel 11 tag figyelembevételével (narancssárga – ALEPS 11 tag) valamint 6 tag figyelembevételével (citromsárga vonal – ALEPS 6 tag).



**3.3.5. ábra: A kvázi-AROME-EPS és ALADIN-EPS 6 órás csapadékösszeg előrejelzésére vonatkozó Brier score értékek 10 mm-es küszöb esetén.**



**3.3.6. ábra: A kvázi-AROME-EPS és ALADIN-EPS 12 órás csapadékösszeg előrejelzésére vonatkozó Brier score értékek 15 mm-es küszöb esetén.**

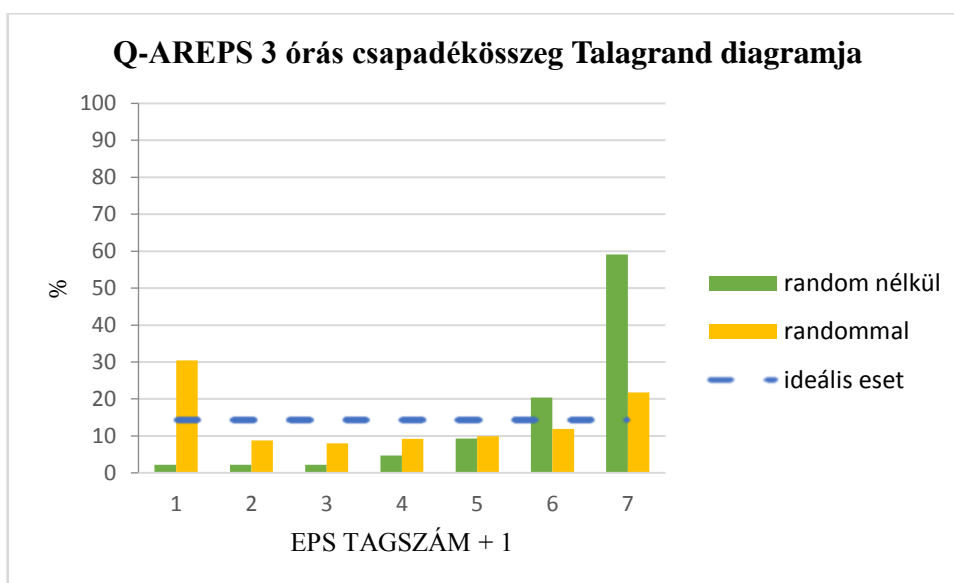


**3.3.7. ábra: A kvázi-AROME-EPS és ALADIN-EPS 10 méteres szellőkés előrejelzésére vonatkozó brier score értékek 15 m/s-os küszöb esetén.**

Ahogy az elvárható a 11 tagú ALEPS jobban jelez előre a Brier Score alapján, mint a 6 tagú, bár ezek a különbségek sokszor meglehetősen kicsik. A 6 és 12 órás csapadék valamint a 10 méteres szellőkés esetén is elmondható, hogy a Q-AREPS jobban teljesített az előrejelzés első óráiban, mint az ALEPS mindkét tagja, majd az idő előrehaladtával egyre jobban összesimultak a rendszerek mérőszámai.

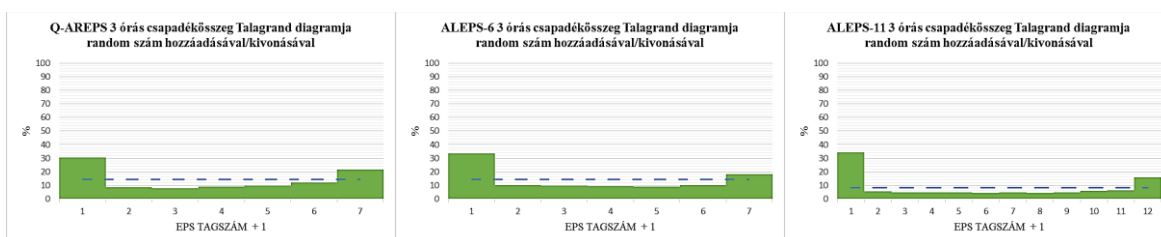
A továbbiakban Talagrand diagramokat (lásd **2.4.3. fejezet**) szeretnék vizsgálni kvázi-AROME-EPS-re valamint az ALADIN-EPS-re különböző tagszámok esetén a fent említett okokból kifolyólag. Azokban az esetekben, amikor a megfigyelt érték és az összes EPS tag

egyenlő (nem hullott csapadék, és a tagok sem jeleztek előre csapadékot), a megfigyeléshez valamint az összes ensemble taghoz érdemes hozzáadni illetve kivonni egy random számot (0-1 között), melynek értéke egy jelentéktelen nagyságú (0.0001) szorzót kap (indoklás a **2.4.3. fejezetben**). Így a csapadékmentes esetekben egyforma valószínűséggel esik a megfigyelés a különböző kategóriákba, míg csapadékos helyzetekben nem eredményez érdemi változást A jelentéktelen nagyságú random szám hozzáadásával illetve kivonásával a csapadéokra vonatkozó Talagrand diagramok lényeges javuláson esnek át. Lásd a **3.3.8. ábrán** megfigyelhető különbséget.



**3.3.8. ábra: A kvázi-AROME-EPS 3 órás csapadékösszeg előrejelzésére vonatkozó Talagrand diagram.**

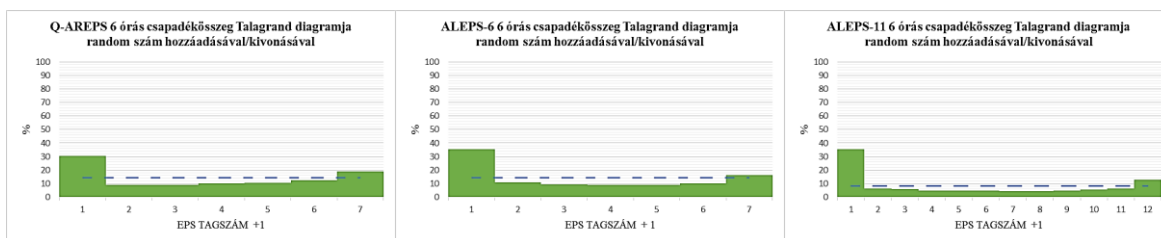
A **F23. – F25. ábrákon** a kvázi-AROME-EPS (Q-AREPS), 6 tagú ALADIN-EPS (ALEPS-6) valamint az operatív ALADIN-EPS (ALEPS-11) 3 órás csapadékösszegre vonatkozó diagramjai láthatók. Az előbbi kettő 7, míg az utóbbi 12 intervallummal rendelkezik. A szaggatott kék vonal a sík hisztogramot jelzi az esetszámnak megfelelően. Az EPS rendszerek könnyebb összehasonlíthatósága miatt százalékosan jelenítettem meg az eredményeket. Ezek kicsinyített összehasonlítása a **3.3.9. ábrán** látható.



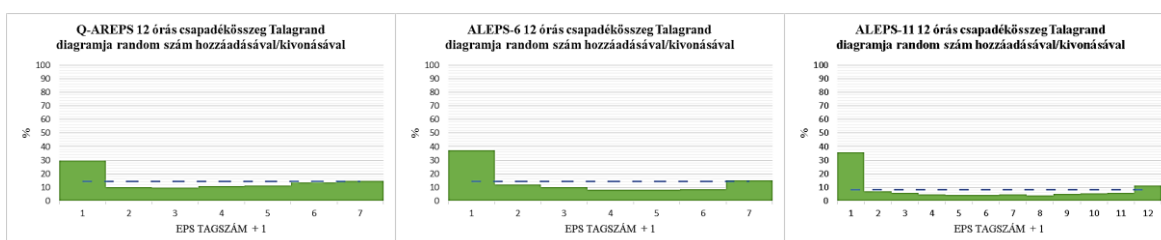
**3.3.9. ábra: A Q-AREPS, ALEPS-6 és ALEPS-11 3 órás csapadékösszegre vonatkozó Talagrand diagramjai**

A **2.4.3. fejezet** alapján elmondható, hogy mindhárom rendszer esetén U alak figyelhető meg (az alsó szélsőérték a meghatározó, tehát inkább felülbecsül), mely a túl kicsi szórásra utal. Mindez összhangban van a korábban bemutatott Spread-Skill ábrákon látottakkal.

A **3.3.10. ábrán** a 6 órás csapadékösszegre (nagyobb méretben **F26-F28. ábrán**), míg a **3.3.11. ábrán** a 12 órás csapadékösszegre (nagyobb méretben **F29-F31. ábrán**) vonatkozó összehasonlító Talagrand diagramok láthatóak. Ezen esetekben a Q-AREPS és az ALEPS-6 U alakot, míg az ALEPS-11 inkább L alakot vesz fel, mely felülbecslésre utal.



**3.3.10. ábra: A Q-AREPS, ALEPS-6 és ALEPS-11 6 órás csapadékösszegre vonatkozó Talagrand diagramjai**



**3.3.11. ábra: A Q-AREPS, ALEPS-6 és ALEPS-11 12 órás csapadékösszegre vonatkozó Talagrand diagramjai**

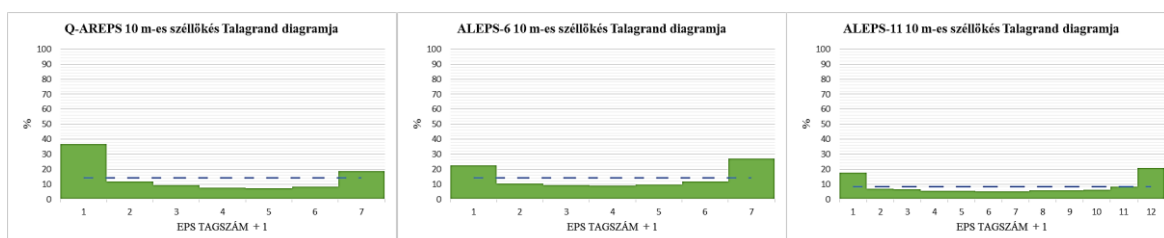
A **3.3.9.-3.3.11. ábra** esetén is elmondható hogy a csapadék előrejelzésénél az ensemble tagok szórása nem elég nagy, valamint a Q-AREPS jobban közelítette a sík hisztogramot az alsó szélsőérték esetén. A Talagrand diagramok %-os összehasonlítását a **2. táblázat** segíti, mely alapján megállapítható, hogy a Q-AREPS 2016 júliusában kevesebbszer becsülte felül a csapadékot (3, 6 és 12 órás összeg), mint az ALEPS-6 és ALEPS-11. A felső szélsőérték esetében viszont elmondható, hogy csak a 12 órás csapadékösszegnél bizonyult jobbnak az ALEPS-6-nál és ALEPS-11-nél.



**2. táblázat: A vizsgált EPS rendszerek szélsőértékeinek a százalékos eltérése az ideális szórású esettől.**

	3 órás csapadékösszeg		6 órás csapadékösszeg		12 órás csapadékösszeg	
	Alsó szélsőérték	Felső szélsőérték	Alsó szélsőérték	Felső szélsőérték	Alsó szélsőérték	Felső szélsőérték
<b>Q-AREPS</b>	16,17	7,46	16,14	4,51	15,31	0,56
<b>ALEPS-6</b>	19,39	3,99	21,20	1,81	23,14	0,71
<b>ALEPS-11</b>	25,84	7,43	27,07	4,48	27,63	3,07

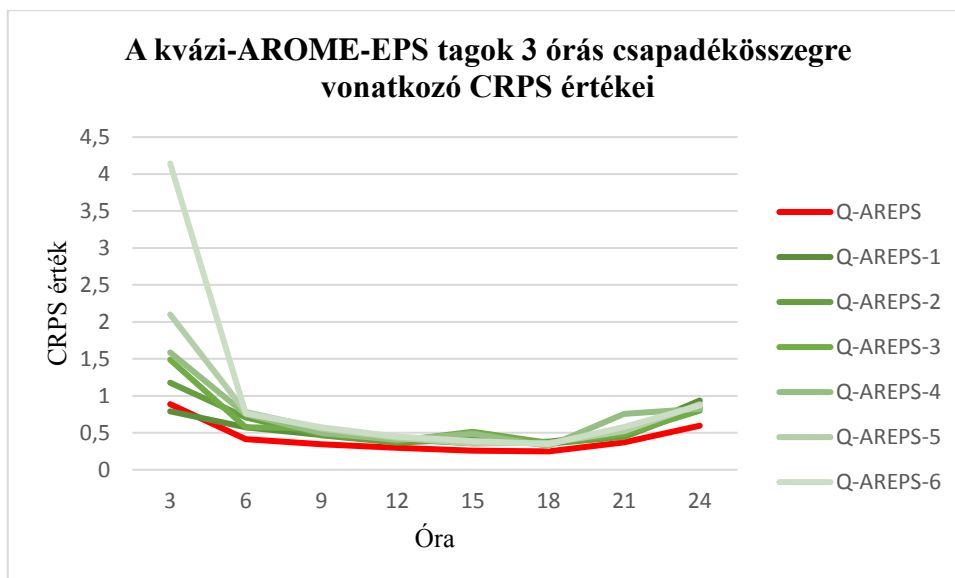
A szellőkésre vonatkozó EPS ábrák (lásd **F32-F34. ábra**) összevető Talagrand diagramjai a **3.3.12. ábrán** láthatóak.



**3.3.12. ábra: A Q-AREPS, ALEPS-6 és ALEPS-11 10 méteres szellőkésre vonatkozó Talagrand diagramjai**

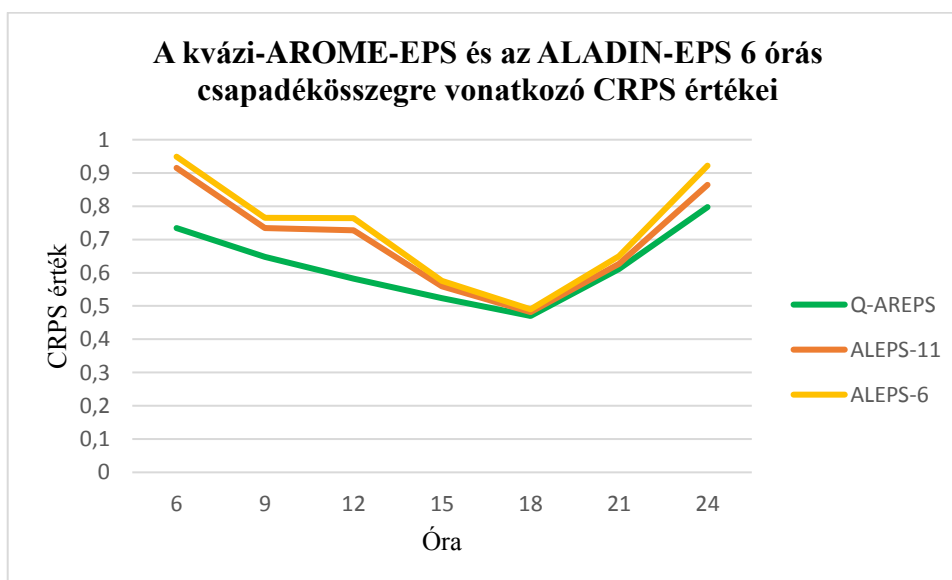
A **3.3.12. ábrán** a kvázi-AROME-EPS-hez tartozó diagram enyhe L alakot vesz fel, mely felülbecslésre hívja fel a figyelmet. A ME ábrák is (**3.3.1., 3.3.2. ábra, F19. és F20. ábra**) alátámasztják a felülbecslést. Az ALADIN-EPS azonban mindkét esetben a kis szórású U alakot veszi fel. Elmondható tehát, hogy az ALADIN-EPS 2016 júliusára jobb ensemble szórást biztosított, mint a Q-AREPS. Ez az eltérés a nagyobb tagszámból eredhet, valamint a globális ensemble rendszerből leskálázott optimálisan perturbált kezdeti feltételekből.

A 3 órás csapadékösszeg CRPS ábrája (**3.3.13. ábra**) hasonló tulajdonságot mutat, a 6 órás csapadékösszeg Spread-Skill ábrájához (**3.3.4. ábra**), ugyanis a legfrissebb futás hibája a legkisebb a modellfutások közül. A vizsgált időszakban a kvázi-AROME-EPS egyes tagjainak eloszlás függvényeinek CRPS értékei nagyobbak, mint ha vesszük az összes tag eloszlásfüggvényét és annak a CRPS értékét tekintjük (Q-AREPS). Tehát megbízhatóbb a Q-AREPS érték a 3 órás csapadékösszeg esetén, mint ha a futásokat külön tekintjük, hiszen itt a CRPS azonos jelentésűnek tekinthető a MAE-ral (**2.4.2. fejezet**).



**3.3.13. ábra: A kvázi-AROME-EPS tagjaira vonatkozó CRPS érték 3 órás csapadékösszeg esetén.**

A 3.3.14. ábrán és F35. ábrán a kvázi-AROME-EPS-re és az ALADIN-EPS-re vonatkozó CRPS értékeket láthatjuk. Tökéletes modell esetén a CRPS értéke 0. A Q-AREPS (zöld vonal - 6 tag átlaga) mellett az ALADIN-EPS is szerepel 11 tag figyelembevételével (narancssárga – ALEPS 11 tag) valamint 6 tag figyelembevételével (citromsárga vonal – ALEPS 6 tag).



**3.3.14. ábra: A kvázi-AROME-EPS és ALADIN-EPS 6 órás csapadékösszeg előrejelzésére vonatkozó CRPS értékek.**

Hasonlóan a Brier Score ábrákhoz (**3.3.5.-3.3.7. ábra**), a 11 tagú ALEPS jobban jelez előre a CRPS alapján, mint a 6 tagú. 6 órás csapadék valamint a 10 méteres szélökés esetén is elmondható, hogy a Q-AREPS jobban teljesített az előrejelzés első óráiban, mint az ALEPS mindkét tagja, majd az idő előrehaladtával egyre jobban összesimultak a futások.

## 4. Összefoglalás

A előrejelzések bizonytalanságának számszerűsítésére az ensemble közelítés használható, melynek segítségével értékes valószínűségi információ nyerhető ki. Az OMSZ ALADIN-EPS rendszere 8 km-es horizontális felbontást biztosít, azonban a kis skálájú folyamatok jobb reprezentációja érdekében célszerű a 2,5 km-es felbontású AROME-EPS-re támaszkodni. Az operatív gyakorlatban a váltást a megnövekedő számítási igény akadályozza meg. E probléma áthidalására diplomamunkámban a napi 8 determinisztikus AROME futást egy ensemble rendszer tagjaiként fűztem össze és abból valószínűségi információt nyertem ki (bővebb technikai háttérét a **3.1. fejezetben** taglalom). Munkám során ezt a kvázi-AROME-EPS rendszert tanulmányoztam esettanulmányok vizsgálatán keresztül 2017 konvektív időszakára. Ezek segítségével vizsgáltam, finomítottam a HAWK-3-ban történő megjelenítést, hogy az előrejelzők számára minél informatívabb legyen. A kvázi-AROME-EPS-en alapuló előrejelzések bevalásának számszerű megjelenítéséhez verifikáltam az eredményeket 2016 júliusára.

Az esettanulmányok megmutatták, hogy bizonyos esetekben a több futás kvázi-EPS-ként kezelése hasznos például csapadékszóna, maximális széllokés, maximális vertikális feláramlás változó térbeli elhelyezkedésének és erősségének megjelenítésében, mely futásonként eltérő. Az előrejelzők számára így kijelöli, mely területeken fordulhatnak elő nagy valószínűséggel a veszélyes időjárási események. Ezt a módszert célszerű lehet alkalmazni más modellek esetén is (**3.2.6. esettanulmány**).

A verifikációs vizsgálat elvégzését követően elmondható, hogy az ALADIN-EPS előrejelzése az optimális perturbációnak és megfelelő tagszámnak köszönhetően jobbnak bizonyul az olyan meteorológiai mezők esetében, mint a 2 méteres hőmérséklet. Ugyanakkor a konvektív jelenségekhez köthető mezők előrejelzésében (lásd 3 órás csapadékösszeg, széllokés) hatékonyabbnak mutatkozik a kvázi-AROME-EPS. Statisztikailag elmondható, hogy általában a Q-AREPS legfrissebb tagja a legpontosabb, azonban számos, jelen diplomamunkámban ismertetett esettanulmány ellentmond ennek, mivel ezekben az esetekben a korábbi futások bizonyultak pontosabbnak.

A kvázi-AROME-EPS csapadék- és széllokés-előrejelzése felülbecslést mutat, valamint a tagok szórása nem elegendő. Elmondható tehát, hogy az ALADIN-EPS 2016 júliusára jobb ensemble szórást biztosított, mint a Q-AREPS. Ez az eltérés a nagyobb tagszámból

eredhet, valamint a globális ensemble rendszerből leskálázott perturbált kezdeti feltételekből.

Összességében elmondható, hogy a kvázi-AROME-EPS előrejelzése a konvektív szezonban támogathatja az előrejelzők munkáját, különösen veszélyes időjárási helyzetekben. Ezenfelül érdemes lehet vizsgálni a rendszert például ónos-esős, tapadó havas időszakokra is. További fejlesztési lehetőség rejlik a kvázi-EPS tagok súlyozásában, mely verifikációs score-ok alapján vehetné figyelembe a különböző tagok átlaghoz való hozzájárulását. Az AROME-EPS-t természetesen nem helyettesítheti elegendő tagszám és perturbáció hiányában, azonban annak operatív működése előtt hasznos információt biztosíthat a meteorológusok számára.

## **Köszönetnyilvánítás**

Szeretném megragadni az alkalmat arra, hogy köszönetemet fejezzem ki Szűcs Mihály témavezetőmnek, aki szakértelmével, hasznos magyarázataival, és elengedhetetlen tanácsaival támogatta a tudományos munkámat és a diplomamunkám megírását.

Sok köszönettel tartozom Simon André külső konzulensemnek, aki tapasztalatával, tudásával, szakértelmével és szakmai szeretetével végigkísérte, és segítette esettanulmányaim leírását.

Köszönet illeti dr. habil. Barcza Zoltán belső konzulensem, aki mindvégig támogatta munkámat.

Továbbá szeretném megköszönni a családomnak, páromnak és barátaimnak, hogy segítettek, támogattak és minden helyzetben mellettem álltak a tanulmányaim során.

## Irodalomjegyzék

- Baldauf, M., Seifert, A., Förstner, J., Majewski, D., Raschendorfer, M., and Reinhardt, T., 2011: Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities. *Monthly Weather Review*, 139, 3887-3905.
- Bénard, P., Vivoda, J., Masek, J., Smolíková, P., Yessad, K., Smith, C., Brozková, R., and Geleyn, J.-F., 2010: Dynamical kernel of the Aladin-NH spectral limited-area model: Revised formulation and sensitivity experiments. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136, 155–169.
- Böloni, G., 2005: Development of a variational data assimilation system for a limited area model at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, 110, 309-327.
- Csirmaz, K., 2013: A konvektív előrejelzéshez használt diagnosztikus paraméterek és indexek számolásának dokumentációja. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest.
- Hamill, T. M. and Colucci, S. J., 1998: Evaluation of Eta-RSM Ensemble Probabilistic Precipitation Forecasts. *Monthly Weather Review*, 126, 711-724.
- Hágel, E., 2010: The quasi-operational LAMEPS system of the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, 114, 121-133.
- Hegedűs, A., 2014: Heves konvekció vizsgálata radarmérések és modelleredmények alapján. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Seres András Tamás). 42 p.
- Horányi, A., Ihász, I. és Radnóti, G., 1998: Az időjárás számszerű előrejelzése. *Természet Világa*, 129, 1. különszám, 39-42.
- Horányi, A., Kertész, S., Kullmann, L. and Radnóti, G., 2006: The ARPEGE/ALADIN mesoscale numerical modeling system and its application at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, 110, 203-227.
- Horányi, A., Mile, M., Szűcs, M., 2011: Latest developments around the ALADIN operational short-range ensemble prediction system in Hungary. *Tellus*, 63A, 642–651.
- Jolliffe, I. T. and Stephenson, D. B., 2012: *Forecast Verification, A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. Wiley-Blackwell, Chichester. 274 p.
- Lascaux, F., Richard, E., and Pinty, J.-P., 2006: Numerical simulations of three map IOPs and the associated microphysical processes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132, 1907–1926.
- Mile, M., 2008: Az ECMWF ensemble előrejelzések utólagos kalibrációja. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Ihász István). 48 p.
- Pieczka, I., 2007: Az AROME nem-hidrosztatikus korlátos tartományú modell alkalmazása a mezoskálájú, szélsőséges jelenségek előrejelzésénél. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Kullmann László). 59 p.
- Práger, T., 1982: *Numerikus Prognosztika I*. Tankönyvkiadó, Budapest. 327 p.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., and Masson, V., 2010: The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Monthly Weather Review*, 139, 976-993.
- Simmons, A., and Burridge, D. M., 1981: An energy and angular-momentum conserving finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Monthly Weather Review*, 109, 758–766.
- Szintai, B., 2006: Rövidtávú ensemble előrejelzések készítése az ALADIN modellel. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Ihász István). 56 p.

Szintai, B., Szűcs, M., Randriamampianina, R., and Kullmann, L. 2015: Application of the AROME non-hydrostatic model at the Hungarian Meteorological Service: physical parametrizations and ensemble forecasting. *Időjárás*, 119, 241-265.

Szűcs, M., Horányi, A., and Szépszó, G., 2016: Ensemble Methods in Meteorological Modelling. In: *Mathematical Problems in Meteorological Modelling* (szerk.: Bátkai, A., Csomós, P., Faragó, I., Horányi, A., Szépszó, G.). Springer, Switzerland. 207-237.

Tajti, D., 2009: Az ECMWF determinisztikus és valószínűségi előrejelzések összehasonlító verifikációja. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Ihász István). 29 p.

Vissy, K. (2004): Az időjárás előrejelzése: jóslás vagy tudomány. *Mindentudás Egyeteme* (Második kötet). Kossuth Kiadó, Budapest. 187-210.

Wilks, D. S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, Ithaca. 467 p.

### **Internetes hivatkozások:**

[1 - Alkalmazott számszerű előrejelzés]

<http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/AlkalmazottNumerikusPrognosztika/book.pdf>

[2017.10.04-én ellenőrizve]

[2 - met.hu]

[https://met.hu/ismeret-tar/meteorologiai\\_hirek/index.php?id=98&m=2&hir=Villamarviz\\_a\\_Borzsonyben](https://met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_hirek/index.php?id=98&m=2&hir=Villamarviz_a_Borzsonyben)

[2017.10.04-én ellenőrizve]

[3 - met.hu]

<http://www.met.hu/omsz/tevekenysegek/idojarasmodellezes/parametrizacio/>

[2017.10.04-én ellenőrizve]

[4 – umr-cnrm.fr]

[http://www.umn-cnrm.fr/aladin/IMG/pdf/omsz\\_poster\\_aladin\\_ws\\_2017\\_final\\_3.pdf](http://www.umn-cnrm.fr/aladin/IMG/pdf/omsz_poster_aladin_ws_2017_final_3.pdf)

[2017.10.10-én ellenőrizve]

[5 – ecmwf.int]

<https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2016/16299-newsletter-no147-spring-2016.pdf>

[2017.11.15-én ellenőrizve]

[6 – umr-cnrm.fr]

<https://www.umn-cnrm.fr/gmapdoc/IMG/pdf/brasovfb-plot.pdf>

[2017.10.03-én ellenőrizve]

[7 – met.hu]

[http://met.hu/ismeret-tar/meteorologiai\\_hirek/index.php?id=2034&m=2&hir=Intenziv\\_zivatarok\\_a\\_Balatonnal](http://met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_hirek/index.php?id=2034&m=2&hir=Intenziv_zivatarok_a_Balatonnal)

[2017.10.04-én ellenőrizve]

[8 – met.hu]

[http://www.met.hu/ismertetok/EUMETSAT\\_produkulum\\_ismerteto.pdf](http://www.met.hu/ismertetok/EUMETSAT_produkulum_ismerteto.pdf)

[2017.10.04-én ellenőrizve]

[9 – met.hu]

[http://met.hu/ismertetok/viharjelzesi\\_fokozatok.pdf](http://met.hu/ismertetok/viharjelzesi_fokozatok.pdf)

[2017.10.04-én ellenőrizve]

[10 – met.hu]

[http://met.hu/idojaras/aktualis\\_idojaras/napijelentes/](http://met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/napijelentes/)

[2017.10.04-én ellenőrizve]



[11 – met.hu]

[http://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek\\_tanulmanyok/index.php?id=1931&hir=Heves\\_zivatarok\\_legzuhatagok\\_a\\_Balatonnal](http://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1931&hir=Heves_zivatarok_legzuhatagok_a_Balatonnal)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[12 – met.hu]

[http://met.hu/ismeret-tar/meteorologiai\\_hirek/index.php?id=1968&hir=Heves\\_zivatarok\\_viharos\\_kifutoszellel](http://met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_hirek/index.php?id=1968&hir=Heves_zivatarok_viharos_kifutoszellel)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

#### **OMSZ belső oldalaira vonatkozó hivatkozások:**

[O1]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_06/20170606/6hourlyNWP\\_an\\_run0615and1815UTC/000\\_n\\_Eu-500hPa\\_20170606\\_1200.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_06/20170606/6hourlyNWP_an_run0615and1815UTC/000_n_Eu-500hPa_20170606_1200.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O2]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_06/20170606/6hourlyNWP\\_an\\_run0615and1815UTC/000\\_n\\_EuAtl-300hPa\\_20170606\\_1200.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_06/20170606/6hourlyNWP_an_run0615and1815UTC/000_n_EuAtl-300hPa_20170606_1200.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O3]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_06/20170606/TEMP\\_TOPI\\_run0330and1530UTC/000\\_n\\_TEMP\\_Wien\\_20170606\\_1200.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_06/20170606/TEMP_TOPI_run0330and1530UTC/000_n_TEMP_Wien_20170606_1200.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O4]

<http://krradmin.met.hu/>  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O5]

[http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar\\_arch\\_image.php?host=Composite\\_CMAX&type=&kd=2017-06-06&kora=12&vd=2017-06-06&vora=12&image\\_id=0](http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar_arch_image.php?host=Composite_CMAX&type=&kd=2017-06-06&kora=12&vd=2017-06-06&vora=12&image_id=0)  
[2017.10.15-én ellenőrizve]

[O6]

[http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar\\_arch\\_image.php?host=Composite\\_CMAX&type=&kd=2017-06-06&kora=12&vd=2017-06-07&vora=12&image\\_id=12](http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar_arch_image.php?host=Composite_CMAX&type=&kd=2017-06-06&kora=12&vd=2017-06-07&vora=12&image_id=12)  
[2017.10.15-én ellenőrizve]

[O7]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_06/20170622/6hourlyNWP\\_an\\_run0615and1815UTC/000\\_n\\_Eu-500hPa\\_20170622\\_1200.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_06/20170622/6hourlyNWP_an_run0615and1815UTC/000_n_Eu-500hPa_20170622_1200.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O8]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_06/20170622/TEMP\\_TOPI\\_run0330and1530UTC/000\\_n\\_TEMP\\_Szeged\\_20170622\\_1200.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_06/20170622/TEMP_TOPI_run0330and1530UTC/000_n_TEMP_Szeged_20170622_1200.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O9]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_06/20170622/12hourlyNWP\\_fc\\_run0615and1815UTC\\_ptempek/000\\_n\\_pTEMP\\_ECM\\_Sopron\\_20170622\\_1200+00000.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_06/20170622/12hourlyNWP_fc_run0615and1815UTC_ptempek/000_n_pTEMP_ECM_Sopron_20170622_1200+00000.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O10]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_06/20170622/12hourlyNWP\\_fc\\_run0615and1815UTC\\_convection/000\\_n\\_Hu\\_convection\\_ECM\\_deepshear\\_20170622\\_1200+00300.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_06/20170622/12hourlyNWP_fc_run0615and1815UTC_convection/000_n_Hu_convection_ECM_deepshear_20170622_1200+00300.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O11]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_06/20170622/6hourlyNWP\\_an\\_run0615and1815UTC/000\\_n\\_MEZO\\_RHU\\_925-600hPa\\_20170622\\_1200.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_06/20170622/6hourlyNWP_an_run0615and1815UTC/000_n_MEZO_RHU_925-600hPa_20170622_1200.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O12]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_06/20170622/12hourlyNWP\\_fc\\_run0615and1815UTC\\_convection/phpshow.php?oldGD&slides&271](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_06/20170622/12hourlyNWP_fc_run0615and1815UTC_convection/phpshow.php?oldGD&slides&271)  
[2017.12.08-én ellenőrizve]

[O13]

[http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar\\_arch\\_image.php?host=Composite\\_CMAX&type=&kd=2017-06-22&kora=12&vd=2017-06-23&vora=12&image\\_id=48](http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar_arch_image.php?host=Composite_CMAX&type=&kd=2017-06-22&kora=12&vd=2017-06-23&vora=12&image_id=48)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O14]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_07/20170710/6hourlyNWP\\_an\\_run0615and1815UTC/000\\_n\\_Eu-500hPa\\_20170710\\_1200.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_07/20170710/6hourlyNWP_an_run0615and1815UTC/000_n_Eu-500hPa_20170710_1200.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O15]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_07/20170710/6hourlyNWP\\_an\\_run0615and1815UTC\\_A/phpshow.php?oldGD&slides&4](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_07/20170710/6hourlyNWP_an_run0615and1815UTC_A/phpshow.php?oldGD&slides&4)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O16]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_07/20170710/TEMP\\_TOPI\\_run0330and1530UTC/000\\_n\\_TEMP\\_Budapest\\_20170710\\_1200.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_07/20170710/TEMP_TOPI_run0330and1530UTC/000_n_TEMP_Budapest_20170710_1200.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O17]

[http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar\\_arch\\_image.php?host=Composite\\_CMAX&type=&kd=2017-07-10&kora=12&vd=2017-07-11&vora=12&image\\_id=77](http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar_arch_image.php?host=Composite_CMAX&type=&kd=2017-07-10&kora=12&vd=2017-07-11&vora=12&image_id=77)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O18]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_07/20170710/06\\_18UTC\\_OBS\\_run0715and1915UTC/phpshow.php?oldGD&slides&7](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_07/20170710/06_18UTC_OBS_run0715and1915UTC/phpshow.php?oldGD&slides&7)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O19]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_07/20170726/6hourlyNWP\\_an\\_run0615and1815UTC/000\\_n\\_Eu-500hPa\\_20170726\\_0600.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_07/20170726/6hourlyNWP_an_run0615and1815UTC/000_n_Eu-500hPa_20170726_0600.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O20]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_07/20170726/6hourlyNWP\\_an\\_run0615and1815UTC\\_A/000\\_n\\_Eu-300hPa\\_windspeed\\_20170726\\_0600.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_07/20170726/6hourlyNWP_an_run0615and1815UTC_A/000_n_Eu-300hPa_windspeed_20170726_0600.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O21]

[http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar\\_arch\\_image.php?host=Composite\\_CMAX&type=&kd=2017-07-26&kora=00&vd=2017-07-27&vora=00&image\\_id=180](http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar_arch_image.php?host=Composite_CMAX&type=&kd=2017-07-26&kora=00&vd=2017-07-27&vora=00&image_id=180)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O22]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_07/20170726/06\\_18UTC\\_OBS\\_run0715and1915UTC/000\\_n\\_MEZO-Prec12h\\_20170726\\_1800.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_07/20170726/06_18UTC_OBS_run0715and1915UTC/000_n_MEZO-Prec12h_20170726_1800.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O23]

[http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar\\_arch\\_image.php?host=Composite\\_CMAX&type=&kd=2017-07-26&kora=12&vd=2017-07-27&vora=12&image\\_id=72](http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar_arch_image.php?host=Composite_CMAX&type=&kd=2017-07-26&kora=12&vd=2017-07-27&vora=12&image_id=72)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O24]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_08/20170810/6hourlyNWP\\_an\\_run0615and1815UTC/000\\_n\\_Eu-500hPa\\_20170810\\_1200.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_08/20170810/6hourlyNWP_an_run0615and1815UTC/000_n_Eu-500hPa_20170810_1200.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O25]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_08/20170810/6hourlyNWP\\_an\\_run0615and1815UTC/000\\_n\\_Eu-850hPa\\_20170810\\_1800.png](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_08/20170810/6hourlyNWP_an_run0615and1815UTC/000_n_Eu-850hPa_20170810_1800.png)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O26]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_09/20170916/6hourlyNWP\\_an\\_run0615and1815UTC/phpshow.php?oldGD&slides&2](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_09/20170916/6hourlyNWP_an_run0615and1815UTC/phpshow.php?oldGD&slides&2)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O27]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_09/20170916/6hourlyNWP\\_an\\_run0615and1815UTC/phpshow.php?oldGD&slides&50](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_09/20170916/6hourlyNWP_an_run0615and1815UTC/phpshow.php?oldGD&slides&50)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O28]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_09/20170916/12hourlyNWP\\_fc\\_run0615an1815UTC\\_convection/phpshow.php?oldGD&slides&204](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_09/20170916/12hourlyNWP_fc_run0615an1815UTC_convection/phpshow.php?oldGD&slides&204)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O29]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_09/20170916/12hourlyNWP\\_fc\\_run0615an1815UTC\\_convection/phpshow.php?oldGD&slides&191](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_09/20170916/12hourlyNWP_fc_run0615an1815UTC_convection/phpshow.php?oldGD&slides&191)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

[O30]

[http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar\\_arch\\_image.php?host=Composite\\_CMAX&type=&kd=2017-09-16&kora=12&vd=2017-09-17&vora=00&image\\_id=89](http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar_arch_image.php?host=Composite_CMAX&type=&kd=2017-09-16&kora=12&vd=2017-09-17&vora=00&image_id=89)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

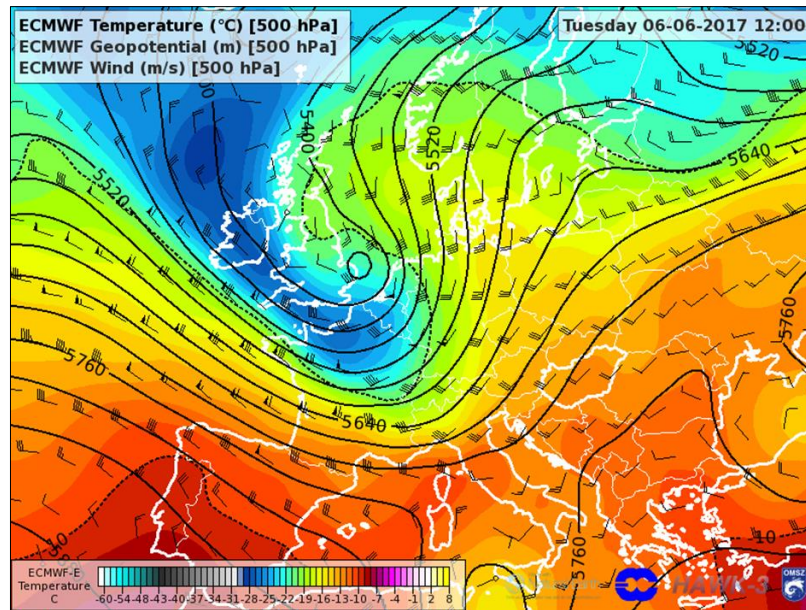
[O31]

[http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3\\_images\\_auto\\_arch/2017/2017\\_09/20170916/06\\_18UTC\\_OBS\\_run0715and1915UTC/phpshow.php?oldGD&slides&23](http://forecasters.met.hu/vol5/hawk/h3_images_auto_arch/2017/2017_09/20170916/06_18UTC_OBS_run0715and1915UTC/phpshow.php?oldGD&slides&23)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

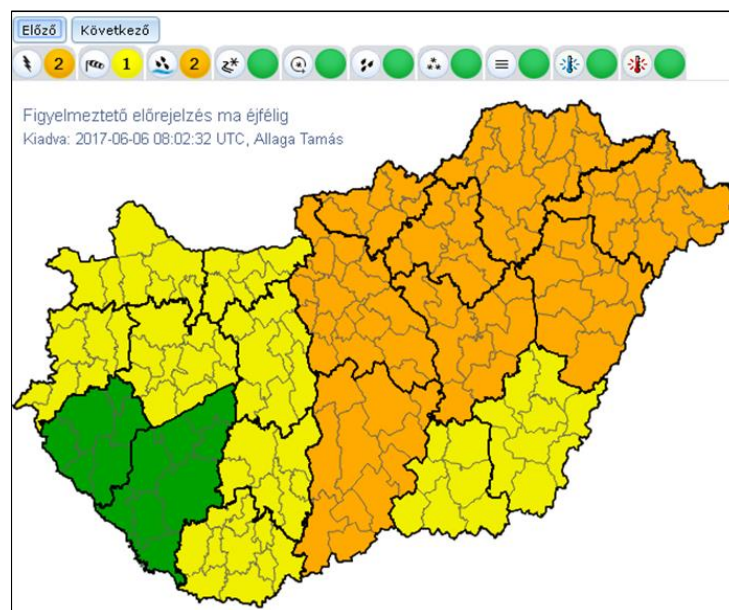
[O32]:

[http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar\\_arch\\_image.php?host=Composite\\_CMAX&type=&kd=2017-09-16&kora=12&vd=2017-09-17&vora=12&image\\_id=72](http://to.met.hu/~to/toweb/radar/radar_arch_image.php?host=Composite_CMAX&type=&kd=2017-09-16&kora=12&vd=2017-09-17&vora=12&image_id=72)  
[2017.10.04-én ellenőrizve]

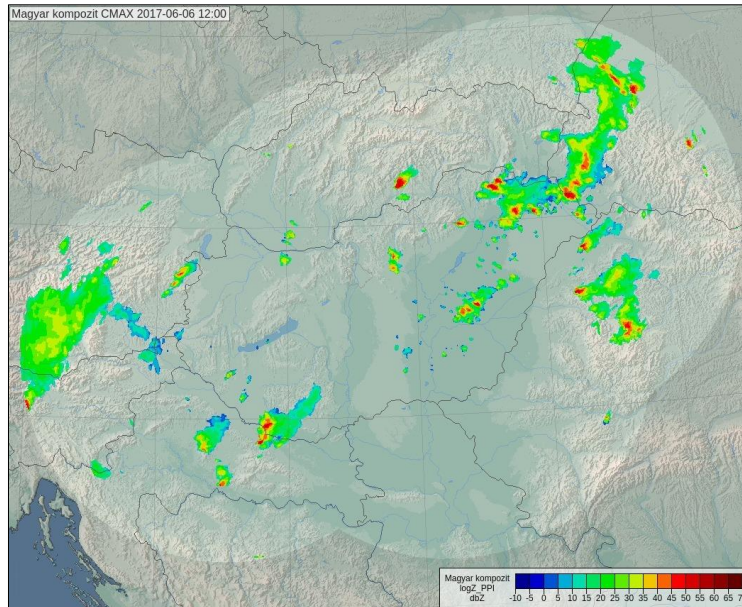
## Függelék



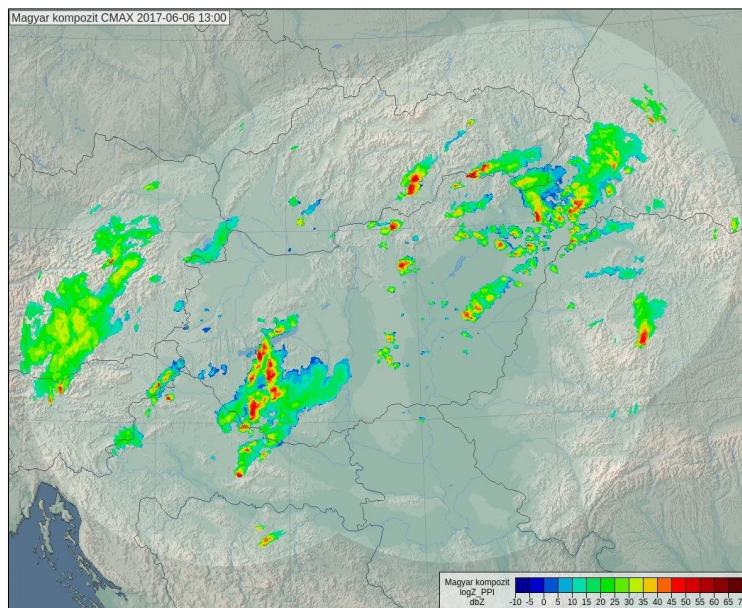
**F1. ábra: Az ECMWF által előrejelzett hőmérséklet [°C], geopotenciál [m], szél [m/s] az 500 hPa-os szinten, európai kivágatra, 2017. augusztus 10-én 12 UTC-re az 00 UTC-s futásból [O1].**



**F2. ábra: 2017. június 6-án, 08:02 UTC-kor kiadott figyelmeztető előrejelzés Magyarország térségére [O4].**

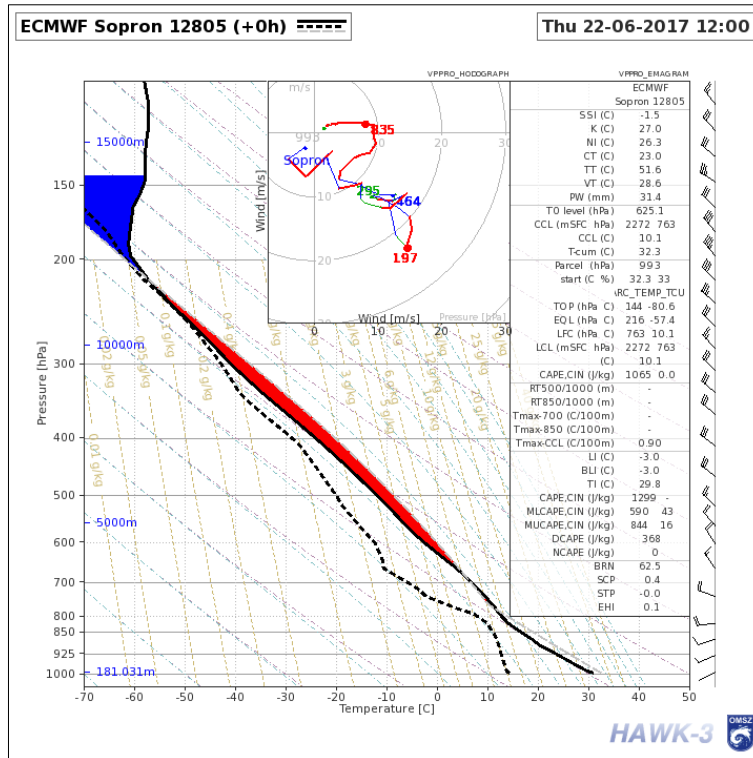


**F3. ábra: A zivatar kompozit radarképe (radar reflektivitás értékek dBz-ben megadva) 2017. június 6-án 12 UTC-kor, ahol a reflektivitási oszlopmaximum értékeket láthatjuk [O5].**

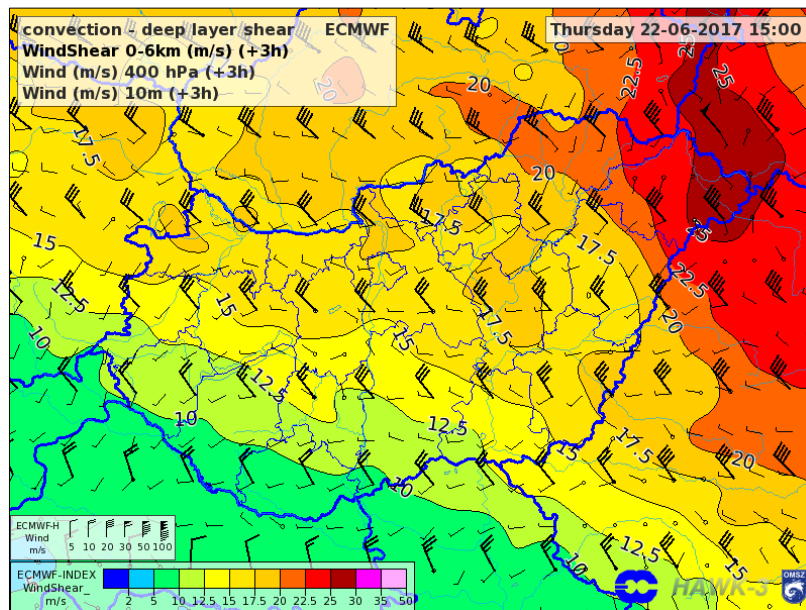


**F4. ábra: A zivatar kompozit radarképe (radar reflektivitás értékek dBz-ben megadva) 2017. június 6-án 13 UTC-kor, ahol a reflektivitási oszlopmaximum értékeket láthatjuk [O6].**

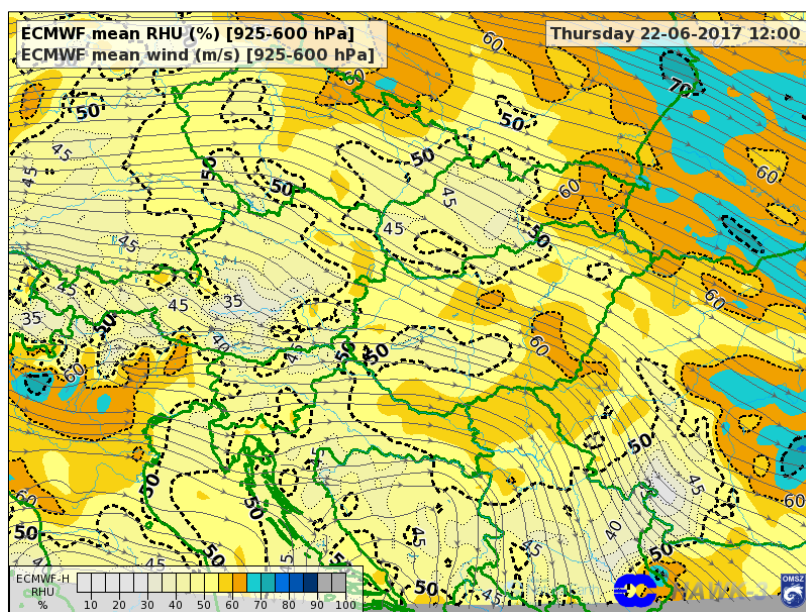




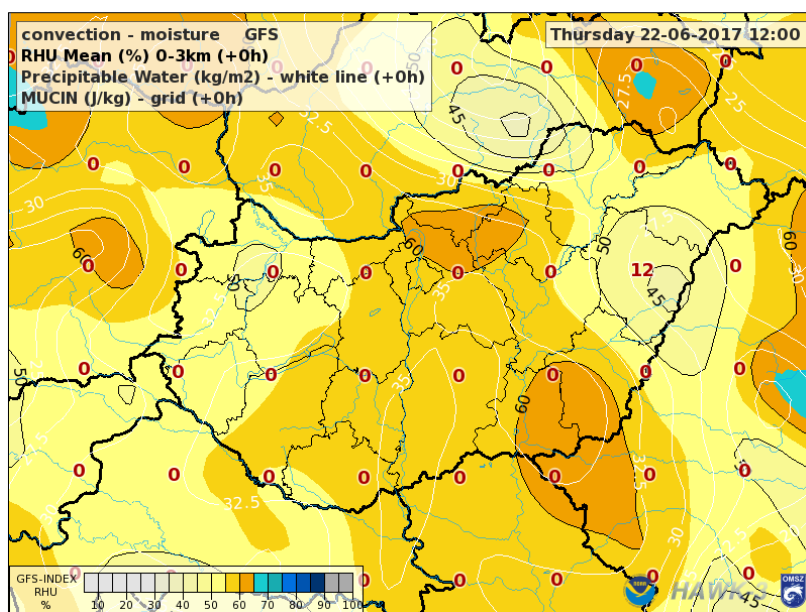
F5. ábra: A soproni pseudo-TEMP felszállás, 2017. június 22-én 12 UTC [O9].



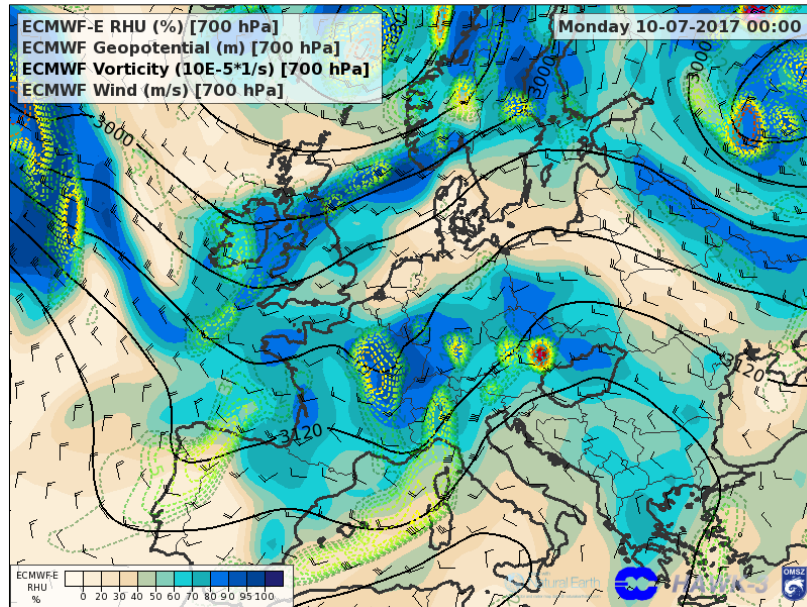
F6. ábra: Az ECMWF által előrejelzett szélnyírás (0-6 km között) [m/s], 400 hPa-os szintre előrejelzett szél [m/s] valamint a 10 m-es szintre előrejelzett szél [m/s] hazánk térségére, 2017. június 22-én 15 UTC-re az 00 UTC-s futásból [O10].



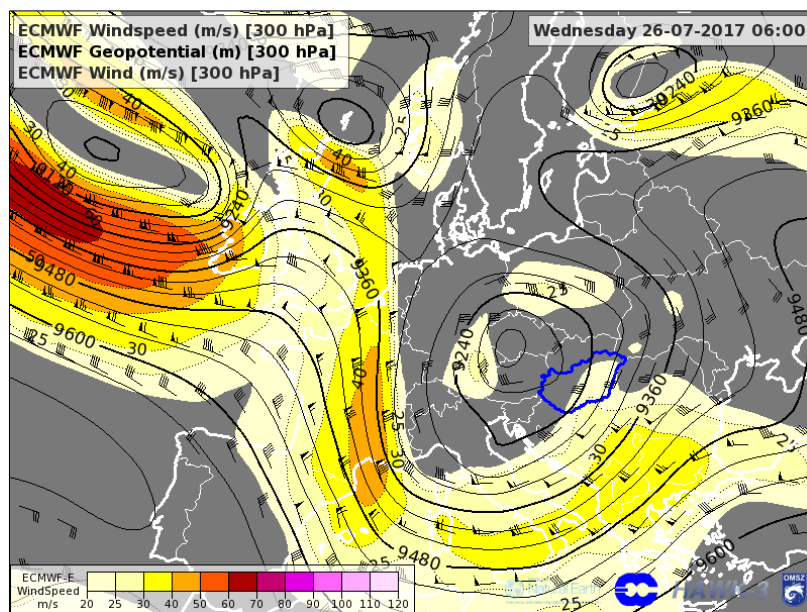
F7. ábra: Az ECMWF által előrejelzett átlagos relatív nedvesség (925-600 hPa között) [%], valamint átlagos előrejelzett szél (925-600 hPa között) [m/s] hazánk térségére, 2017. június 22-én 12 UTC-re az 00 UTC-s futásból [O11].



F8. ábra: A GFS által előrejelzett átlagos relatív nedvesség (0-3 km között) [%], kihullható vízmennyiség [kg/m<sup>2</sup>] valamint a MUCIN (legkisebb konvektív gátlás, (Hegedűs, 2014)) [m/s] hazánk térségére, 2017. június 22-én 12 UTC-re az 00 UTC-s futásból [O12].

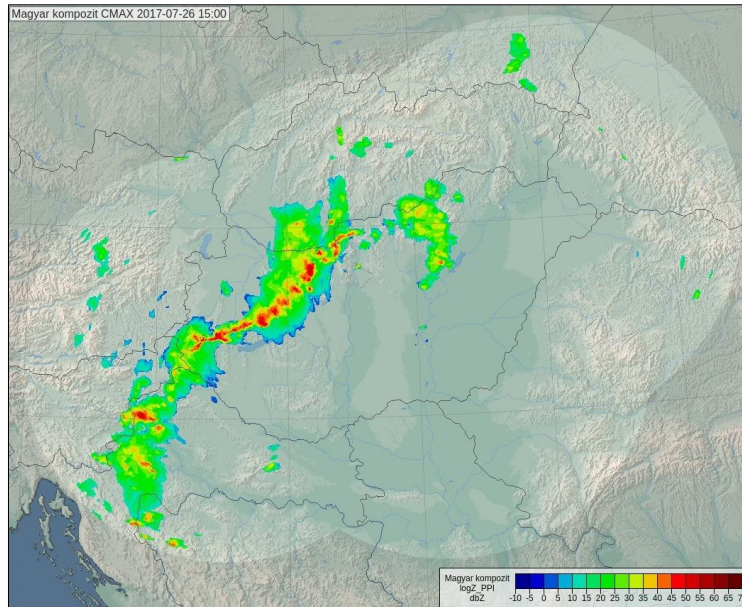


**F9. ábra:** Az ECMWF által előrejelzett relatív nedvesség [%], geopotenciál [m], örvényesség [1/s], valamint szélmező [m/s] a 700 hPa-os nyomási szinten Európa térségére, 2017. július 10-én 00 UTC-re az 00 UTC-s futásból [O15].

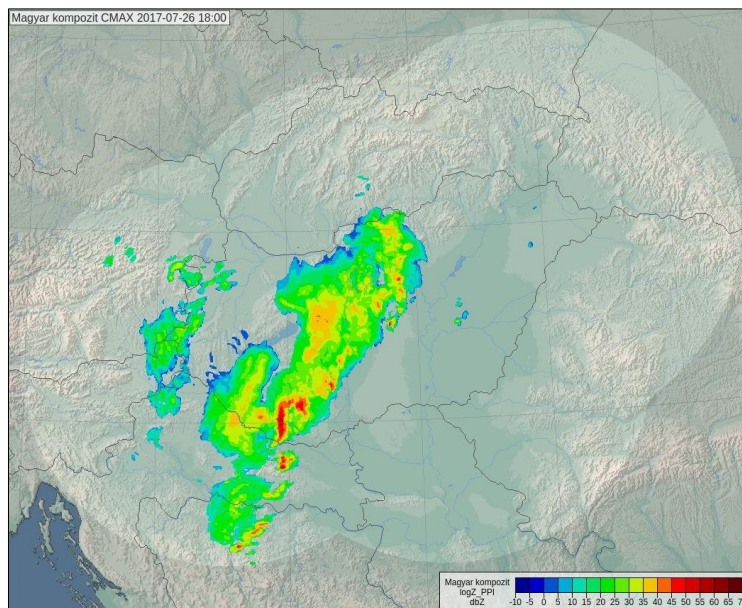


**F10. ábra:** Az ECMWF által előrejelzett szélsébség [m/s], geopotenciál [m], valamint szélmező [m/s] a 300 hPa-os nyomási szinten Európa térségére, 2017. július 26-án 06 UTC-re az 00 UTC-s futásból [O20].

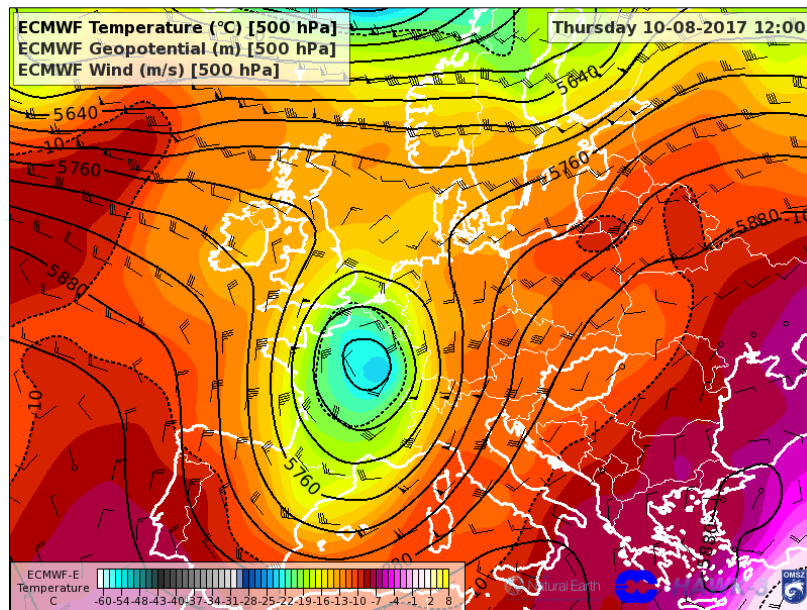




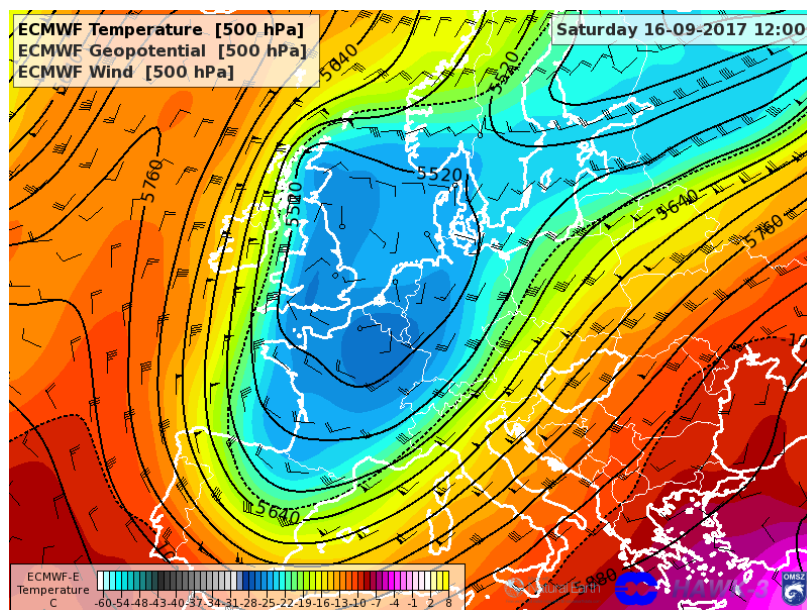
**F11. ábra: A zivatar kompozit radarképe (radar reflektivitás értékek dBz-ben megadva) 2017. július 26-án 15 UTC-kor, ahol a reflektivitási oszlopmaximum értékeket láthatjuk [O21].**



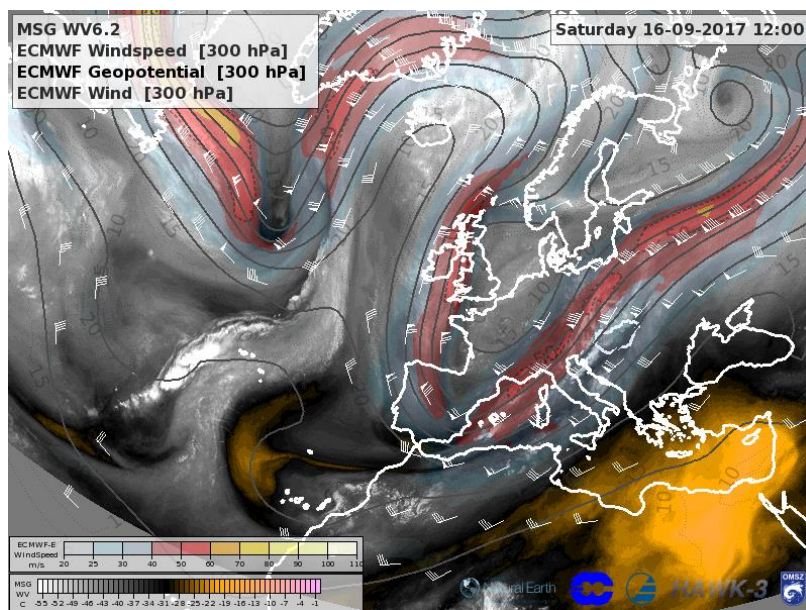
**F12. ábra: A zivatar kompozit radarképe (radar reflektivitás értékek dBz-ben megadva) 2017. július 26-án 18 UTC-kor, ahol a reflektivitási oszlopmaximum értékeket láthatjuk [O23].**



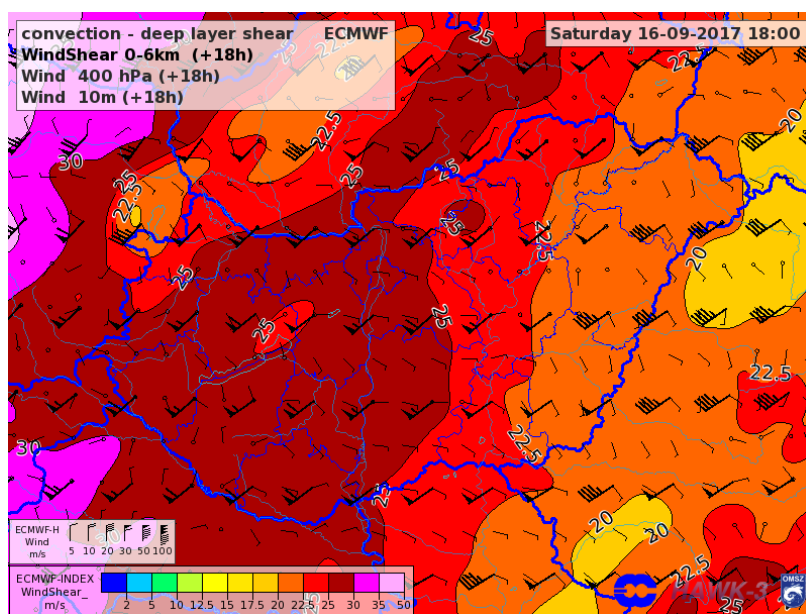
**F13. ábra:** Az ECMWF által előrejelzett hőmérséklet [°C], geopotenciál [m], szél [m/s] az 500 hPa-os szinten, európai kivágatra, 2017. augusztus 10-én 12 UTC-re az 00 UTC-s futásból [O24].



**F14. ábra:** Az ECMWF által előrejelzett hőmérséklet [°C], geopotenciál [m], szél [m/s] az 500 hPa-os szinten, európai kivágatra, 2017. szeptember 16-én 12 UTC-re az 00 UTC-s futásból [O26].

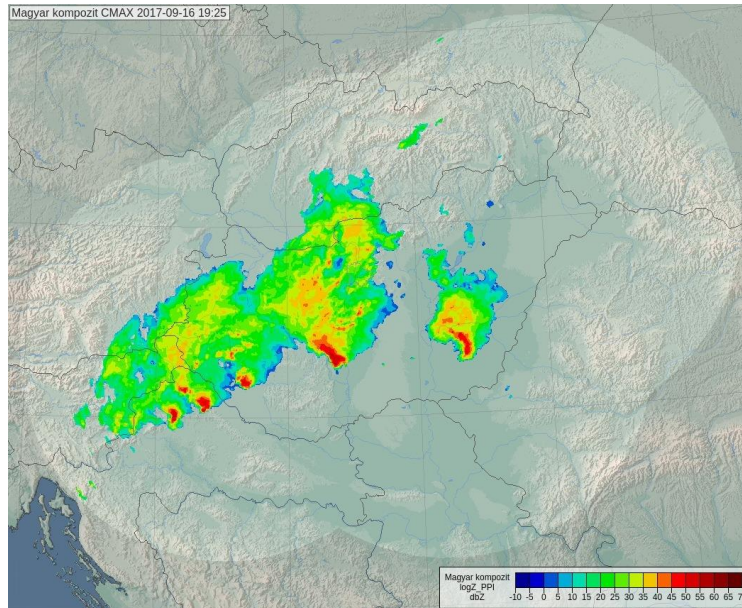


F15. ábra: 2017. szeptember 16-án 12 UTC időpontban MSG vízgökép [6.2 csatorna, °C] Európa fölött, ECMWF által előrejelzett szélesség 300 hPa-on [m/s], geopotenciál 300 hPa-on [m], valamint szélzászló 300 hPa-on [O27].

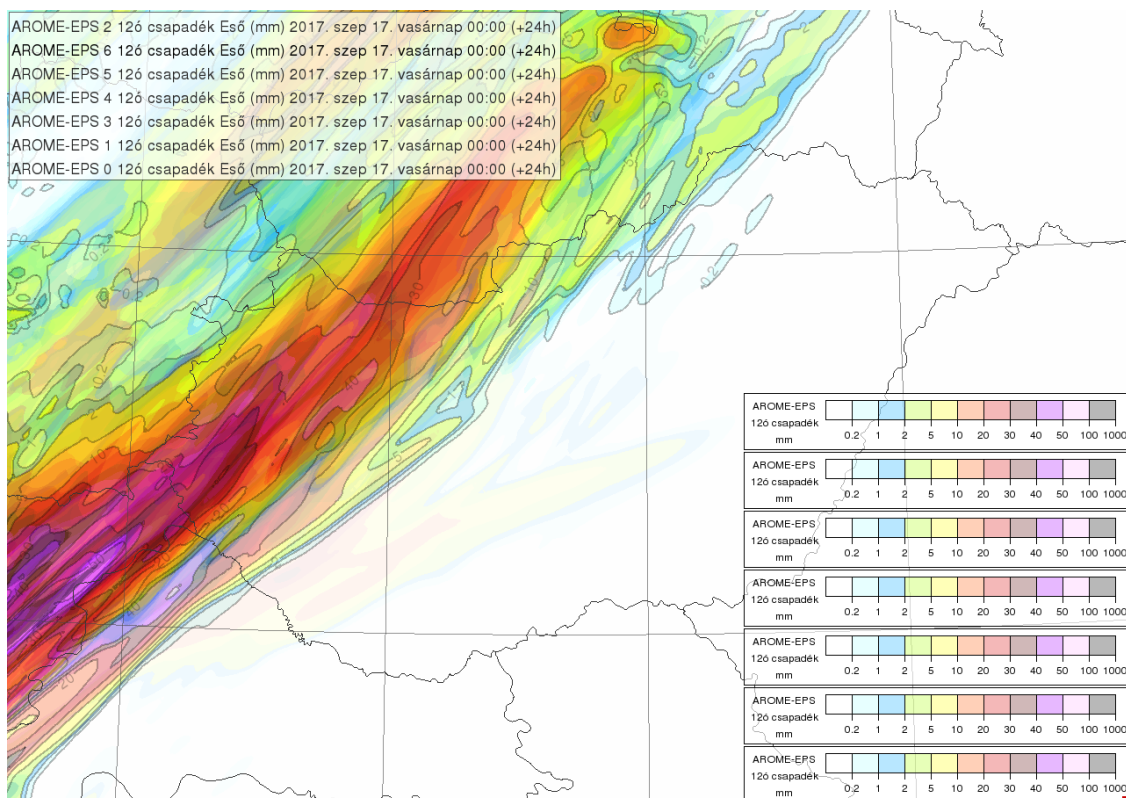


F16. ábra: 2017. szeptember 16-án 18 UTC időpontra ECMWF által jelzett szélnyírás 0-6 km között [m/s], szélesség 10 méteren és a 400 hPa-os nyomási szinten [m/s] [O29].

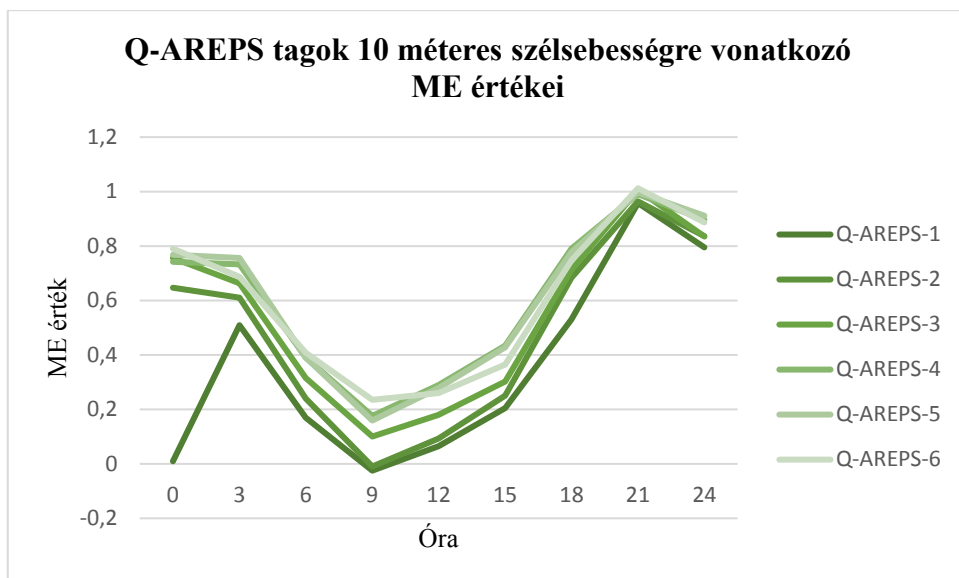




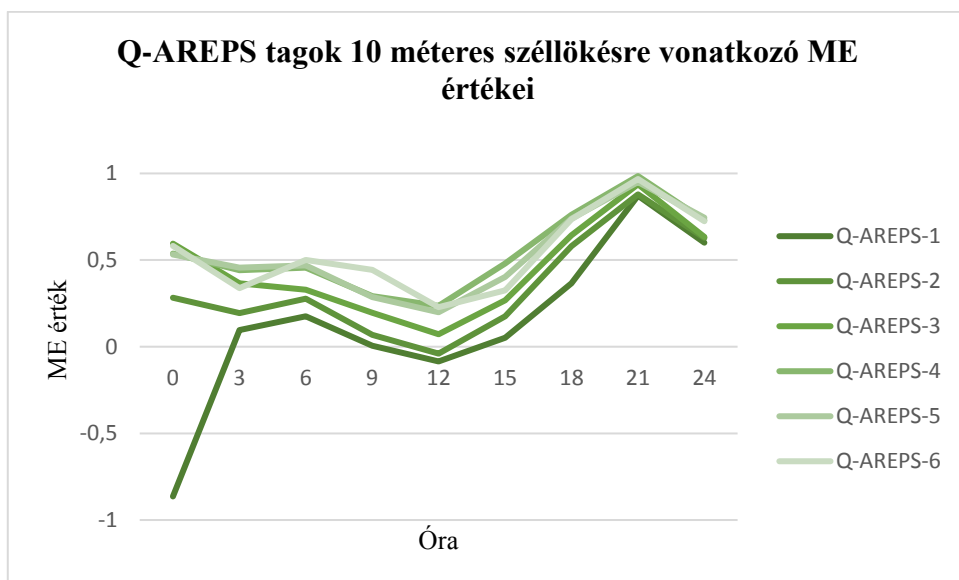
**F17. ábra: A zivatar kompozit radarképe (radar reflektivitás értékek dBz-ben megadva) 2017. szeptember 16-án 19:25 UTC-kor, ahol a reflektivitási oszlopmaximum értékeket láthatjuk [O30].**



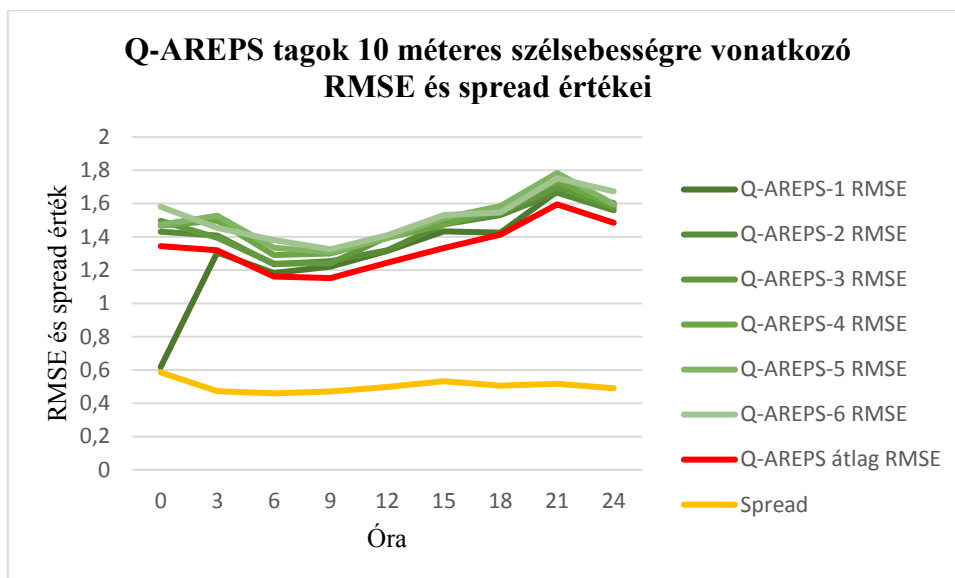
**F18. ábra: 2017. szeptember 16-án készült kvázi-AROME-EPS csapadéktérkép, melyen 12 órás származtatott csapadékösszeg látható a 2017. szeptember 17-én 00 UTC-s időpontra.**



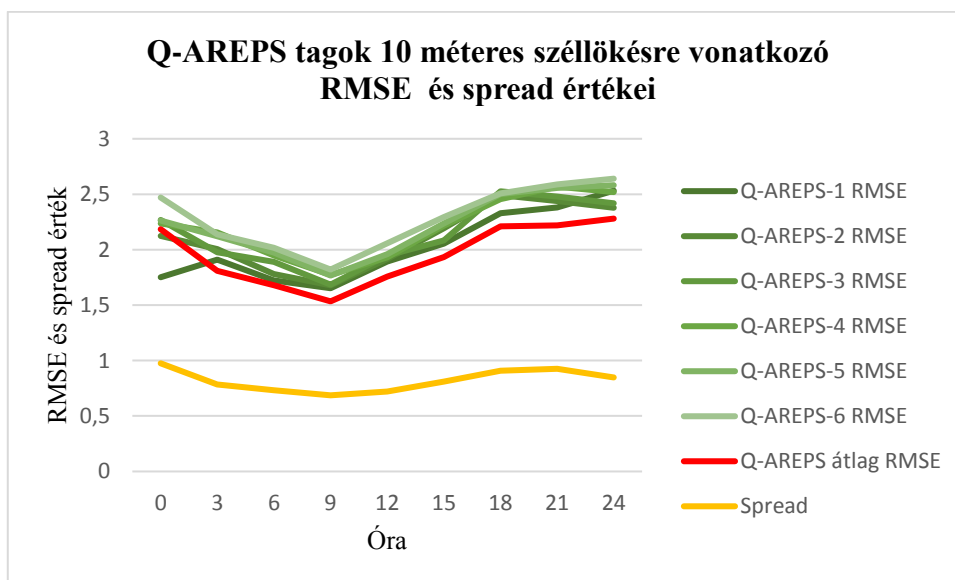
**F19. ábra: Kvázi-AROME-EPS tagjaira vonatkozó ME érték 10 méteres szélesség esetén**



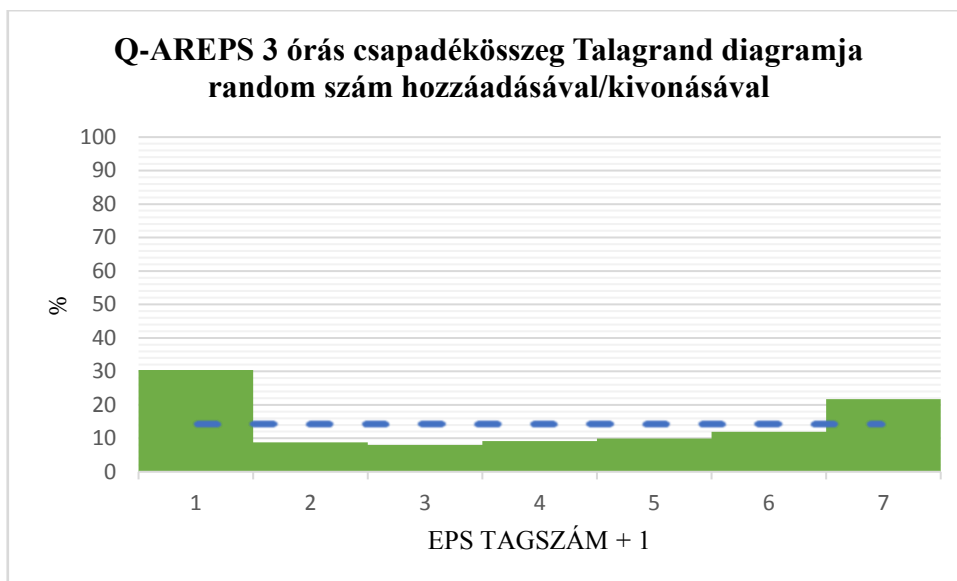
**F20. ábra: Kvázi-AROME-EPS tagjaira vonatkozó ME érték 10 méteres szélirány esetén**



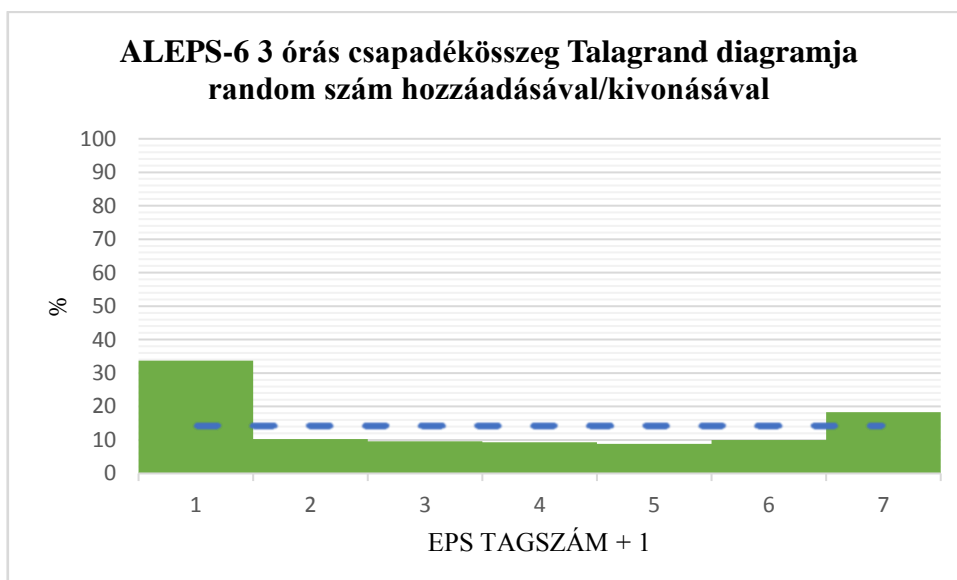
F21. ábra: A kvázi-AROME-EPS Spread-Skill ábrája 10 méteres szélesség esetén.



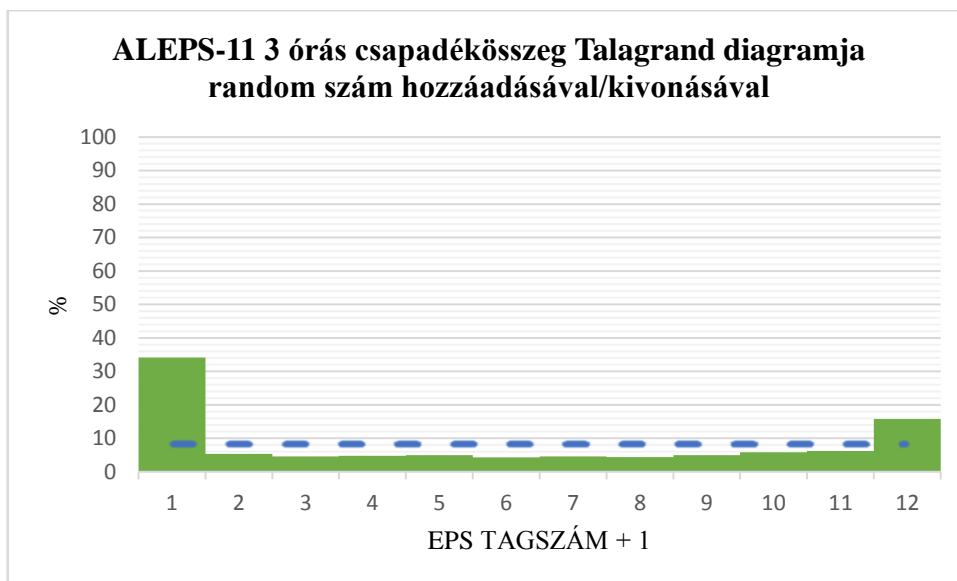
F22. ábra: A kvázi-AROME-EPS Spread-Skill ábrája 10 méteres szélőkés esetén.



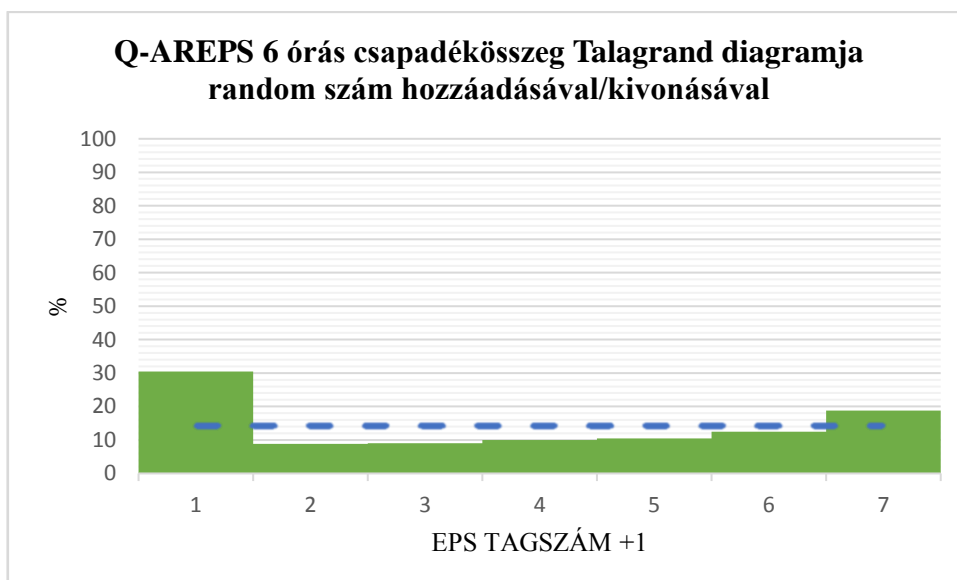
**F23. ábra: A kvázi-AROME-EPS 3 órás csapadékösszegre vonatkozó Talagrand diagramja.**



**F24. ábra: A 6 tagú ALADIN-EPS 3 órás csapadékösszegre vonatkozó Talagrand diagramja.**

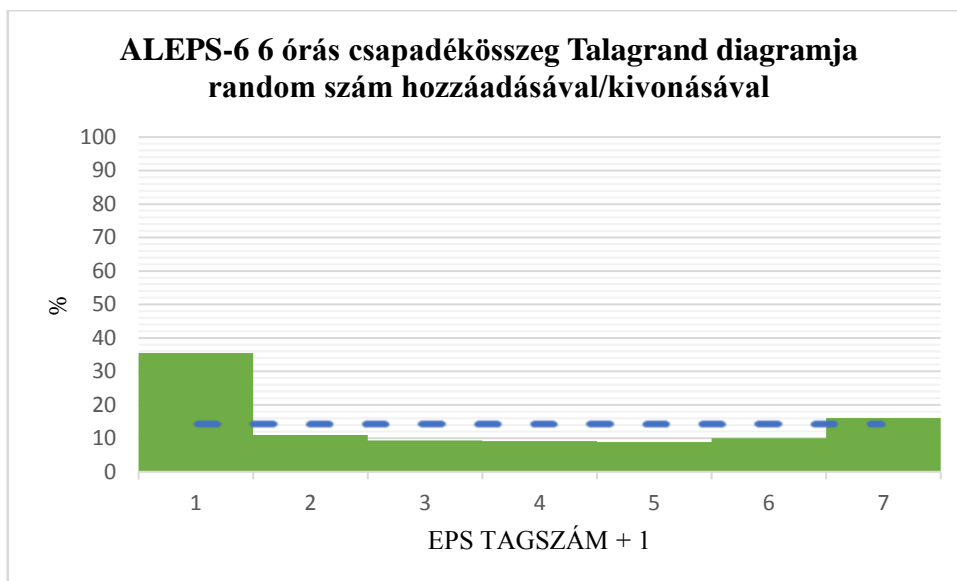


**F25. ábra: A 11 tagú ALADIN-EPS 3 órás csapadékösszegre vonatkozó Talagrand diagramja.**

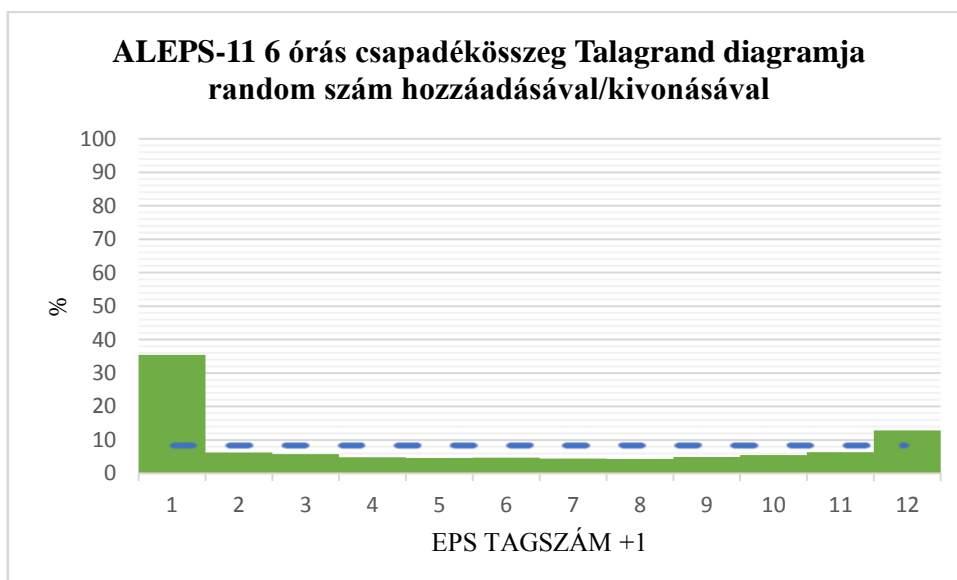


**F26. ábra: A kvázi-AROME-EPS 6 órás csapadékösszegre vonatkozó Talagrand diagramja.**

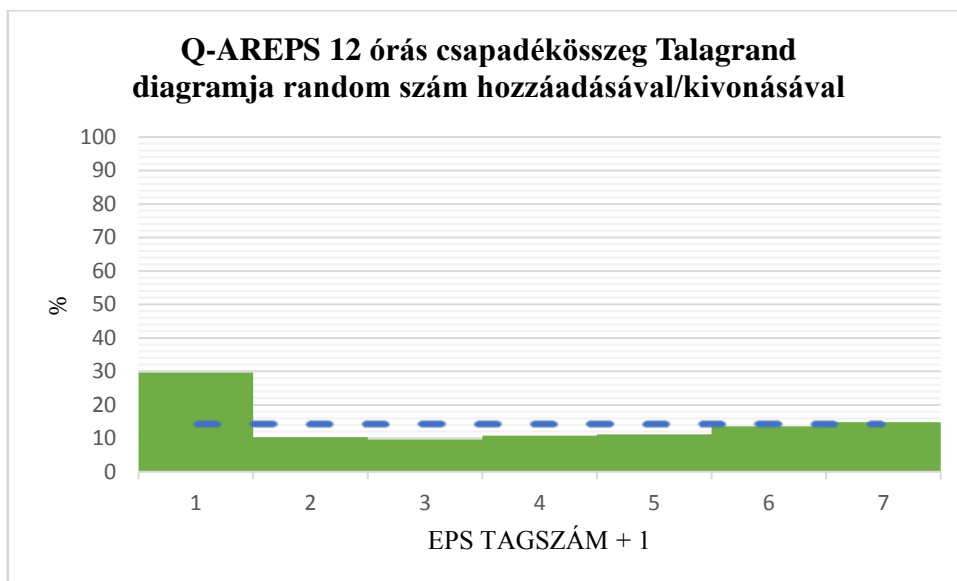




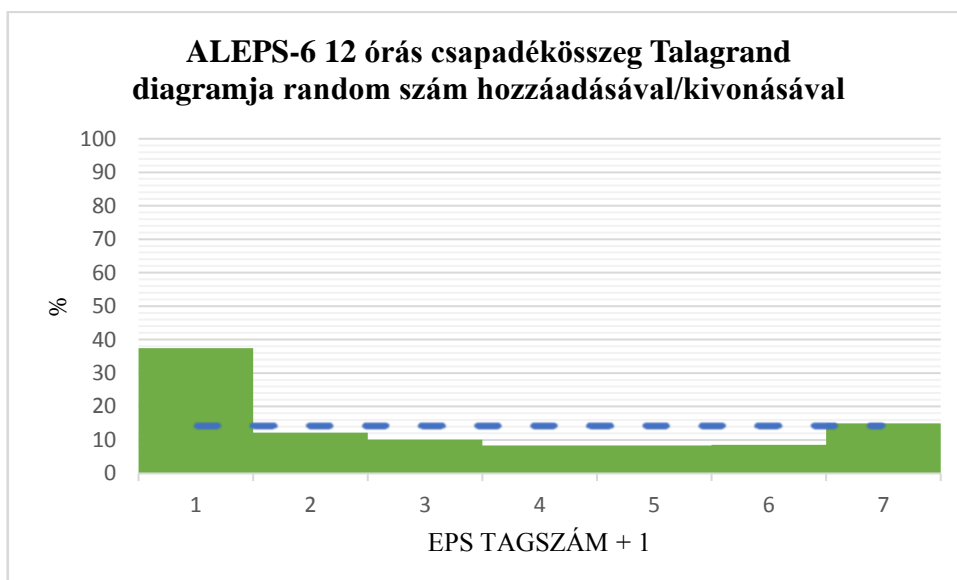
**F27. ábra: A 6 tagú ALADIN-EPS 6 órás csapadékösszegre vonatkozó Talagrand diagramja.**



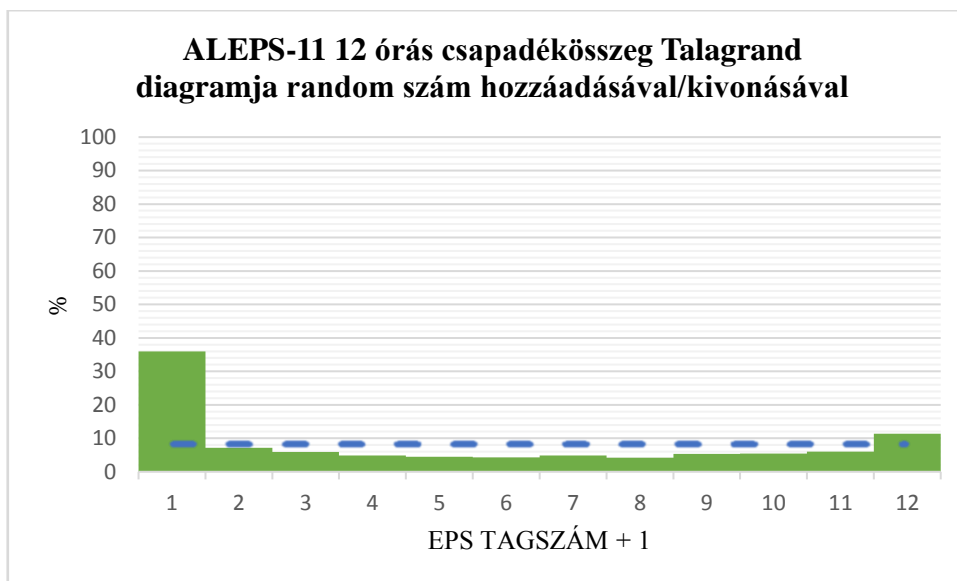
**F28. ábra: A 11 tagú ALADIN-EPS 6 órás csapadékösszegre vonatkozó Talagrand diagramja.**



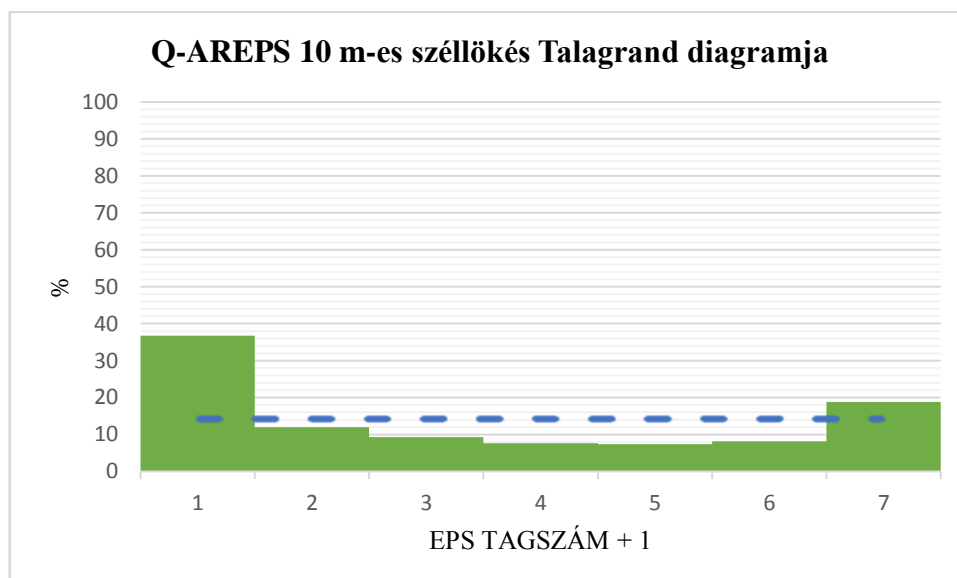
**F29. ábra: A kvázi-AROME-EPS 12 óras csapadékösszegre vonatkozó Talagrand diagramja.**



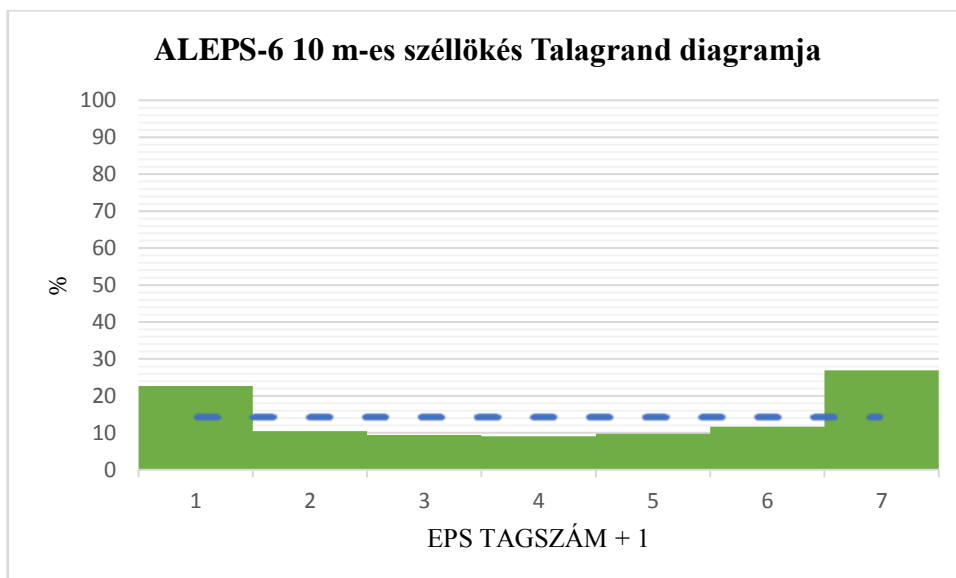
**F30. ábra: A 6 tagú ALADIN-EPS 12 óras csapadékösszegre vonatkozó Talagrand diagramja.**



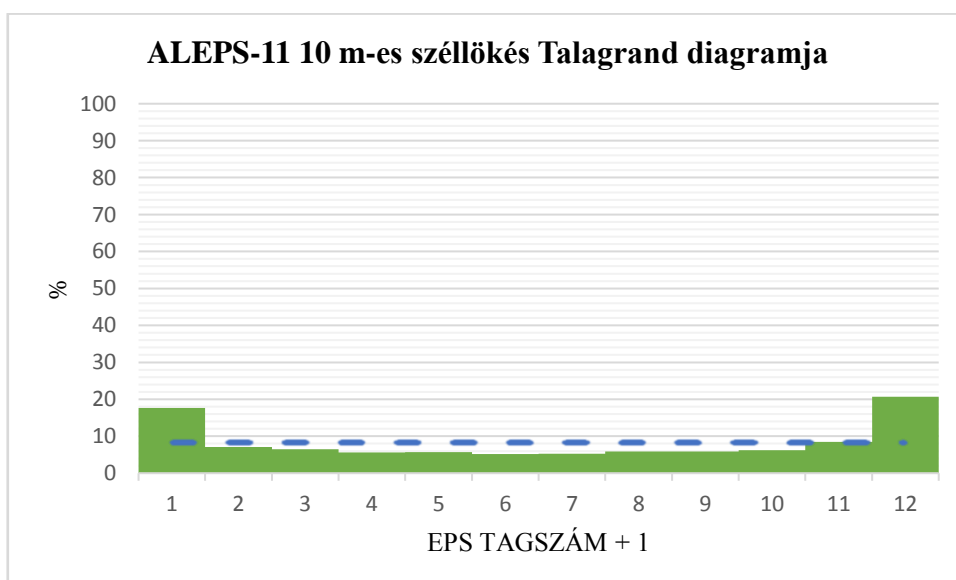
**F31. ábra: A 11 tagú ALADIN-EPS 12 órás csapadékösszegre vonatkozó Talagrand diagramja.**



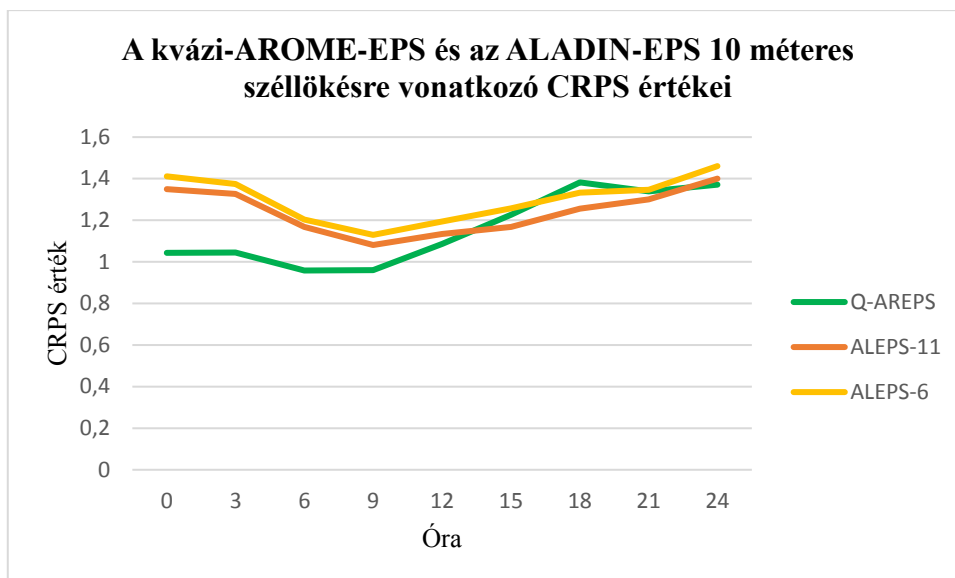
**F32. ábra: A kvázi-AROME-EPS 10 méteres szellőkésre vonatkozó Talagrand diagramja.**



**F33. ábra: A 6 tagú ALADIN-EPS 10 méteres szellőkésre vonatkozó Talagrand diagramja.**



**F34. ábra: A 11 tagú ALADIN-EPS 10 méteres szellőkésre vonatkozó Talagrand diagramja.**



**F35. ábra: A kvázi-AROME-EPS és ALADIN-EPS 10 méteres szellőkés előrejelzésére vonatkozó CRPS értékek.**

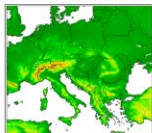
# Quasi-AROME-EPS

Réka Suga, Mihály Szűcs, André Simon  
(suga.r@met.hu)

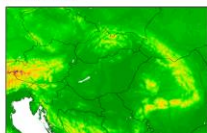


## Abstract

At the Hungarian Meteorological Service (HMS) the operational ensemble system of the limited-area model is called LAMEPS, based on the hydrostatic ALADIN model. We have research to refine this system by using non-hydrostatic AROME, which predicts small-scale phenomena like deep convections more properly. AROME has a 2.5 km resolution, which makes the computation costs too high for an operational EPS. Therefore to eliminate this problem, we are testing a time-lagged EPS, including 7 members, which are the AROME runs from the previous 24 hours. This method helps the forecasters to see the model runs together and examine the probability of high-impact weather events. In this poster I would like to show some case studies and a comparative verification of quasi-AROME-EPS and LAMEPS.



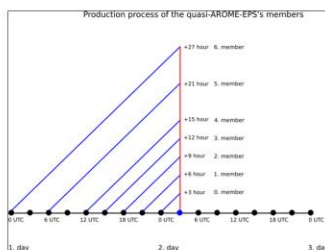
The ALADINHU model domain and orography.



The operational AROME domain used at the Hungarian Meteorological Service.

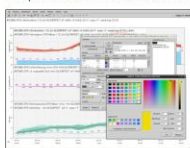
## Elaborated method

In the best case, the time lagged EPS includes 7 members, which are the combination of 00, 06, 12, 18 UTC and the 03, 09, 15, 21 UTC model runs. The members of the first group go for 48 hours, while the forecasts of the second group go only for 36 hours. An example is the simplest way to explain the methods: We are on the 2nd day and would like to make a prognosis to the 2nd day's 3 UTC. By this time, the algorithm picks the 2nd day 03 and 00 UTC runs and from the 1st day the 21, 18, 15, 12, 06 UTC runs as an EPS members (see the illustration below). This method is flexible, thus when one of the runs are missing, don't take a leap to a wrong forecast. Consequently the quasi-AROME-EPS members are created in this way. With this method, the forecasters are able to examine the variability of the model from runs, and take into account the spatial differences typically in high precipitation or windgust areas.



## Implementation

Forecasters of the HMS have been using our own, internally developed visualisation software for many years. HAWK-3 is the latest meteorological visualisation and graphical product generation system developed and used by the HMS. I have converted the quasi-AROME-EPS algorithm products from FA format to NetCDF, which are compatible with the HAWK-3. The system facilities (macros) set to implement the data on meteorograms, different kind of layers, like average, minimum, onto each other packed. These maps and diagrams are shown in the part of case studies. Hereafter the quasi-AROME-EPS is named Q-AREPS.



Screen shot during working in HAWK-3 macro.

### Explicate techniques of the used maps:

- **Meteorogram:** It shows the Q-AREPS results as probabilities, occurrence depends on the number of members. In case of 7 members, means 1/7 probability in the 0-10 and 90-100% areas. It is combined with the Q-AREPS mean (black thick line).
- **Precipitation EPS:** It packs onto each other the layers of members with different colours shaded fields. The most recent run gets black contour for the easier separate.
- **Windgust EPS:** It works like the precipitation EPS.
- **Maximum Windgust:** It shows the windgust highest values of Q-AREPS in the Carpathian Basin.
- **Maximum Vertical Velocity:** It shows the highest values of the 700 hPa level vertical velocity.
- **Windgust Probability:** It counts out the probability of 15 m/s windgust from Q-AREPS.

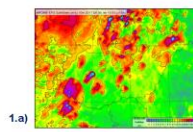
## 2017 Summer

The summer of 2017 contained many extreme meteorological events in the area of Hungary. Several supercells, overhanging windgusts values, heavy precipitations in short period. It was a hard period from nowcasting point of view due to the rapid progress of phenomena. Thus the summer was particularly exciting testing of Q-AREPS aspects. Many case studies were created, but I would like to mention only some of them. Their figures are shown in the next part, with short descriptions.

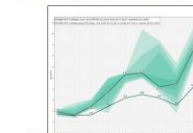
## Case studies

Q-AREPS was tested in a convective season, which means analyzing meteorological phenomena, mainly heavy storms and their attendant phenomena.

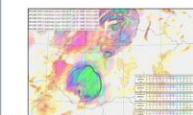
- Due to a cold front was a downburst along the coast of lake Balaton. The most recent single model runs didn't expect high windgust values like 20 m/s, but there were members in the Q-AREPS which did. The two illustration of this event (06.06.2017.) are shown in figure 1.a) and figure 1.b). 1.a) is a maximum forecast map of the windgust at 15 UTC and 1.b) is an meteorogram of windgust at Siófok (near to lake Balaton).
- On 10.07.2017. a supercell with downburst was located at lake Balaton in Hungary, which had high precipitation and enormous gust front. The latest caused plenty of damage. In related figures we see 2.a) windgust-EPS for 18 UTC, 2.b) precipitation EPS for 18 UTC, 2.c) meteorogram of T, Td, vertical velocity, precipitation, mean wind, windgust. Q-AREPS was built from 6 members.



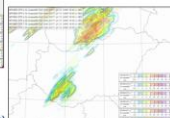
1.a)



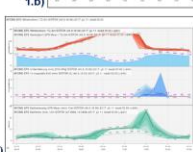
1.b)



2.a)



2.b)



2.c)

- In case of 10.08.2017. we could talk about heavy storm and gust front as well in the North-West part of the country. The damage of the stormy wind had a fatal victim at Szombathely. In figure 3.a) is a windgust probability for 19 UTC and in figure 3.b) we see the map of maximum vertical velocity at 700 hPa pressure level.

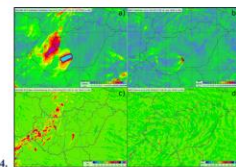


3.a)



3.b)

- In the fourth case, Hungary was before an Mediterranean cyclone, on 16.09.2017. Due to the vertically advection and high convective available potential energy, six supercells were evolved on 16 and at dawn of 17 in the south area of the country. The figures show notable spatial variability, if Q-AREPS is compared with single WRF. 4.a) c) figures show the Q-AREPS maximum windgust map and the map of maximum vertical velocity at 700 hPa pressure level at 18 UTC. On the opposite side, in figure 4.b) and d) we can see the same, instead of Q-AREPS, they are WRF model's outputs.

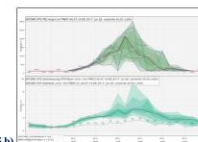


4.

- The Q-AREPS is not only working in convective weather period. Forecasters, researchers and developers may use it to monitor other meteorological phenomena, like forecast planetary boundary layer altitude. 5.a) and 5.b) illustrations are planetary boundary layer altitude and windgust, windgust meteorograms, first one in sunny, anticyclonic summer day, second one in day with frontal passage, convection.



5.a)



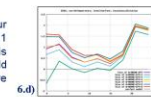
5.b)

As it was shown, the Q-AREPS has many advantages against with single forecasts. Uncertainties of forecasts are displayable, quantifiable or visually separable. In case of some special study, the recent model run is not absolutely the best. So it has benefits, if for example the forecaster sees all of the model runs in the same graph, same time.

## Verification

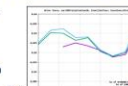
For objective verification, July of 2016 was analyzed with a verification program.

I would like to implement the Brier Score (BS) of Q-AREPS in case of 6 hour precipitation with threshold 10 mm, compare with ALADIN-EPS in case of 11 members and 6 members as Q-AREPS (Figure 6.a). Similar comparative figure is seen in 6.b) 12 hour precipitation with 15 mm threshold, and in 6.c) 15 m/s threshold in case of 10 m windgust. The purple lines are the Q-AREPS, green lines are ALADIN-EPS and blue ones are the ALADIN-EPS with 6 members.

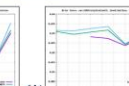


6.a)

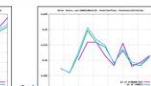
In 6.d) are seen the bias of different Q-AREPS members in case of 2 m temperature, compared against each other, and with their mean.



6.b)



6.c)



6.d)

## Conclusion

The Quasi-AROME-EPS is a new method at the HMS, which may support forecaster's decision making. The results of Q-AREPS are visualized by HAWK-3 macros to check difference between the AROME runs in temporal and spatial way. Statistically the recent forecasts are the most reliable if compare to the previous ones. On the other hand, in summer of 2017 there were special cases, when it was not true. These cases are connected with convective events, for instance supercells, downbursts, heavy rains. Q-AREPS maybe also useful with measure of planetary boundary layer height during autumn and winter (persistent cold air pool in the Carpathian Basin) or in an emergency (industrial accident). This points to the fact that in particular circumstances it is not sufficient to analyze the latest model runs or mean of the members. A member weight is recommended to give to the model outputs, which is the next propose in my work.

**Az alábbi posztort az EUMETNET SRNWP EPS II Workshop-ra készítettük, ami 2017. október 24-26-ig tartott Madridban.**