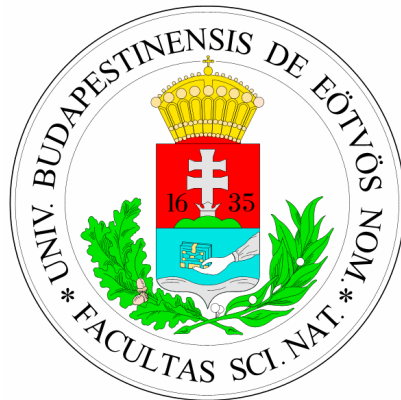


Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Az ensemble előrejelzések alkalmazhatóságának vizsgálata nyári konvektív időjárási helyzetekben

Tudományos Diákköri Dolgozat



Készítette:

Lázár Dóra
Meteorológia MSc
II. évfolyam

Témavezető:

Ihász István
Országos Meteorológiai Szolgálat

2013. január

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	3
1. A légköri konvekció	4
1.1. A légköri felhajtóerő	5
1.2. A konvergencia	7
1.3. A szélnyírás	8
2. Az ECMWF ensemble előrejelző rendszere	9
3. A konvektív események előrejelzését elősegítő valószínűségi előrejelzések vizsgálata	11
3.1. Hosszabb idősor vizsgálata	12
3.1.1 Egy paraméteres vizsgálatok	12
3.1.2. Kétparaméteres vizsgálatok.....	17
3.2. Új grafikus valószínűségi előrejelzés megjelenítési módszerek kifejlesztése.....	22
3.3 Valószínűségi grafikus produktumok veszélyjelző célú együttes használata	24
4. 2012 nyarán bekövetkezett néhány konvektív esemény előrejelezhetőségének tanulmányozása	25
4.1 Jégesőveszélyes zivatarcellák 2012. június 9-én éjszaka	25
4.1.1. Küszöbértéket meghaladó CAPE valószínűségi térképek.....	28
4.1.2. Előre definiált küszöbértékeket meghaladó valószínűségek időbeli menete	32
4.1.3. Ensemble vertikális profilok	36
4.1.4. Ensemble meteogramok	39
4.2 Gyors mozgású zivatarrendszer károkozó szélrohamokkal	41
4.2.1. Küszöbértéket meghaladó CAPE valószínűségi térképek.....	43
4.2.2. Előre definiált küszöbértékeket meghaladó valószínűségek időbeli menete	46
4.2.3. Ensemble vertikális profilok	48
4.2.4. Ensemble meteogramok	50
4.3 Zivataros hidegfront 2012. június 4-én	51
4.3.1. Küszöbértéket meghaladó CAPE valószínűségi térképek.....	53
4.3.2. Előre definiált küszöbértékeket meghaladó valószínűségek időbeli menete	56
4.3.3. Ensemble vertikális profilok	60
4.3.4. Ensemble meteogramok	62
Összefoglalás.....	64
Köszönetnyilvánítás	65
Irodalomjegyzék.....	66

Bevezetés

Az időjárás előrejelzése már évszázadok óta foglalkoztatja az emberiséget. Időjárásunk talán legszeszélyesebb eleme a légköri konvekció, mely a termikektől a zivatarokon keresztül a hurrikánokig széles skálát ölel fel. A konvekció termékei közé tartoznak a szépidő gomolyfelhők, vagy a percek alatt égbenyúló zivatarfelhők a sötétén örvénylő szupercellák felhőtornyai úgyszintén.

A meteorológusok számára egyik legnehezebb feladatnak számít a zivatarok kialakulásának, s erősségének előrejelzése, ugyanakkor mindig egyben ez is volt legizgalmasabb. Az elmúlt évtizedekben Magyarországon is kialakultak olyan speciális szakterületek, amelyek számára létfontosságú a konvektív folyamatok megfelelő ismerete. Ilyen szakterület például a repülésmeteorológia, a balatoni viharjelzés, a jégeső elhárítás, valamint az országos veszélyjelzés. 2011. augusztus 1-jével elindult az Országos Meteorológiai Szolgálat kistérségi szintű időjárási veszélyjelző rendszere. Ezen szakterületek fontossága napjainkban különösen megnőtt, hiszen az egyre gyakoribb szélsőséges időjárási helyzetek miatt a társadalmi elvárások egyre magasabbak és szükségessé vált, hogy ezen előrejelzések pontosabbá váljanak.

Dolgozatom témája az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - Középtávú Időjárás Előrejelzések Európai Központja) ensemble előrejelzések alapján kifejlesztésre kerülő az operatív veszélyjelzést segítő grafikus produktumok vizsgálata. A bemutatott eszközök használhatóságát vizsgálom konvektív időjárású helyzetekben.

Munkám során, illetve a dolgozatban az alábbi célkitűzéseket fogalmaztam meg:

- összefoglalom a légköri konvekció fogalmát és ezek összetevőit;
- bemutatom a légköri konvekció szerepét a veszélyes időjárású helyzetekben;
- ismertetem az ECMWF ensemble előrejelző rendszerét;
- a konvektív és összcsapadék összeg vizsgálata különböző statisztikai vizsgálata egy hosszabb idősor alapján;
- bemutatom a vizsgálataimban alkalmazott négy grafikus eszközt, s három esettanulmányban vizsgálom ezek együttes használatában rejlő előnyöket és összehasonlítom a mért adatokkal;
- végezetül összegzem az eredményeket és a további terveimet ismertetem.

1. A légköri konvekció

A légköri folyamatok között meghatározó szerepe van a koncentrált, erőteljes függőleges feláramlásokkal járó jelenségeknek, melyeket összefoglaló néven konvektív folyamatoknak nevezünk. A konvektív jelenségek közé tartoznak a szabad szemmel láthatatlan termikek vagy a gomolyfelhők, illetve a zivatarok. Néha veszedelmesek is létrejönnek, mint például szupercellák, különösen heves zivatargócok vagy zivatarláncok.

Felhők alatt azokat a diszperz rendszereket értjük, amelyek a fény útjában jól látható akadályt képeznek. Felhők akkor keletkezhetnek, ha a levegő hőmérséklete eléri a harmatpontot, és megindul a kondenzáció, vagyis a kicsapódás. A levegő felhőképződést eredményező lehűlését a levegő felemelkedése során végbemenő adiabatikus hőmérséklet-csökkenés váltja ki, ezért a felhők létrejöttét, alakját és kiterjedését döntően a levegőben kialakuló feláramlási viszonyok határozzák meg. Tehát a kondenzációhoz feláramlás, vízgőz, kondenzációs illetve jégképző magvak szükségesek. A feláramlásnak négy oka lehet:

- a talaj felmelegedése vagyis a termikus konvekció,
- orográfiai vagyis amikor a vízszintes légáramlást a domborzat kényszeríti emelkedésre,
- a felszíni légtömegek összeáramlása, más néven konvergencia,
- időjárási frontok.

Légköri feláramlásokat kiváltó hatások másfajta csoportosítását is alkalmazhatjuk, ilyenkor konvektív komponensekről beszélünk, melybe a következők tartoznak. A legfontosabb a légköri felhajtó erő, mely a szabad konvekcióért felelős és a légtömegben belüli zivatarok legfőbb okozója; második a torlódás, mely a kényszer konvekció jelenségét eredményezi, például ide tartozik a domborzat keltette kényszer feláramlás, vagy a hideg frontok felülete mentén feltorlódó felhőzet; harmadik komponens a szélnyírás, vagyis a horizontális vagy vertikális irányú szélfordulás és szélerősség megváltozása, mely a szupercellák kialakulásáért felelős. Továbbiakban ezen komponensek dinamikus meteorológiai leírását döntően *Horváth (2007)* munkája alapján ismertetem.

1.1. A légköri felhajtóerő

A légkörben a kistérségű feláramlás legfőbb kiváltó oka a felhajtóerő, amely a napsugárzás hatására felmelegedő felszín adja át a hőjét a fölötte lévő levegőnek és a felmelegedett alsó levegő emelkedni kezd, ami viszont nem rendezett feláramlás. Levegő pótlására ugyanis leáramlásnak kell megindulnia, mely inverziót hoz létre a határréteg fölött, így a szomszédos, emelkedni próbáló levegőnek gátat állít. Ezután a levegő már nem emelkedik, hanem a feláramlási csatorna irányába áramlik, pótolva a fellépő tömegvesztést. Vagyis a termikek egymástól elkülönülő cellákban jelennek meg.

Ha nincs elegendő mennyiségű nedvesség, akkor a konvekció nem lép tovább a termik fázison, azaz nem jönnek létre gomolyfelhők. Ha van elegendő nedvesség a levegőben a kicsapódó vízgőzből felszabaduló látens hő tovább melegíti az emelkedő légtestet, annak pályája száraz adiabatából nedves adiabatára tér át, a változást az első gomolyfelhők (cumulus humilis, cumulus mediocris) megjelenése kíséri. További fejlődését az határozza meg, hogy a környező levegő hidegebb vagy melegebb, mint az emelkedő légtömeg. A melegebb esetben továbbfejlődik tornyos gomolyfelhővé (cumulus congestus) vagy zivatarfelhővé (cumulonimbus).

Számszerű leírását az ún. részecske módszerrel lehet leírni. A részecske módszer feltételezi, hogy az emelkedő légtest nyomása megegyezik a környező légnyomással, a környező légkör hidrosztatikus, nincsenek a feláramlást kompenzáló mozgások, valamint az emelkedő légtest levegője nem keveredik a környező levegővel. Az első feltétel szerint

$$p' = p, \quad (1)$$

ahol a p' az emelkedő levegő nyomása, a p pedig a környező nyomás, az emelkedő ρ' sűrűségű részecske gyorsulása a következő alakban írható fel:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{dp'}{dz} \quad (2)$$

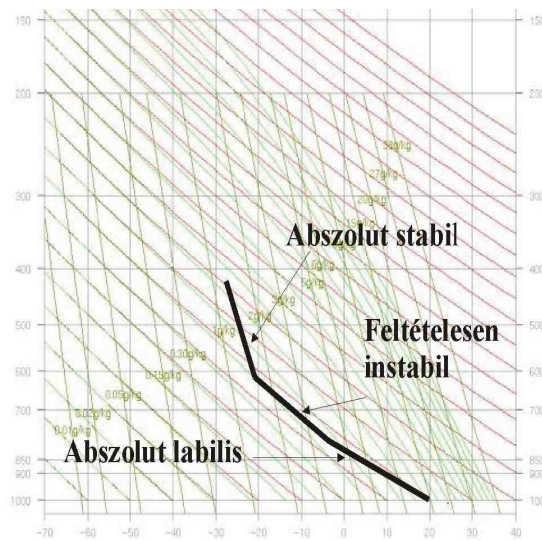
Ha figyelembe vesszük, hogy a környező levegő hidrosztatikus (3) és a mozgásegyenletben felhasználjuk a gáz egyenletet (4),

$$g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

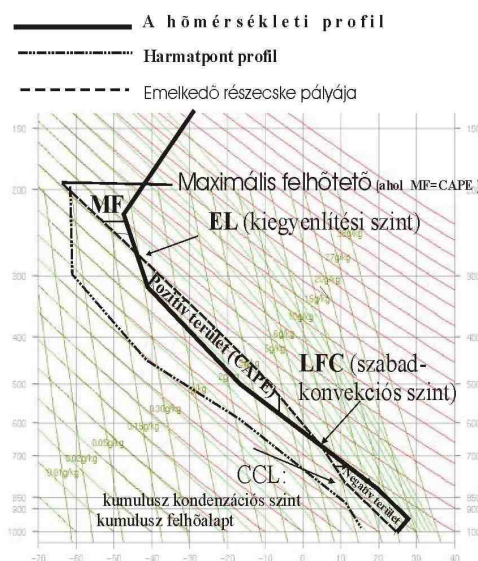
$$\frac{p'}{\rho'} = RT_v \quad (4)$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \rho \frac{\rho - \rho'}{\rho'} = g \frac{T'_v - T_v}{T_v} \quad (5)$$

akkor a következő egyenletet kapjuk (5), ahol a T'_v a virtuális hőmérséklet. Mindez azt jelenti, hogy az határozza meg a függőleges gyorsulás irányát, hogy az emelkedő levegő hőmérséklete a környezeténél melegebb, vagy hidegebb, vagyis konvektív esetben labilis vagy stabilis eset áll fenn. Lehet abszolút stabilis, feltételesen instabil és abszolút labilis, amint az 1. ábrán található termodinamikai diagram mutatja. Két szintet, az szabadkonvekciós valamint kiegyenlítési szintet különböztetjük meg (2. ábra).



1. ábra: a légkör lehetséges rétegződési labilitási szempontból
(Horváth (2007) nyomán).



2. ábra: Az emelkedő légrészecske pályája termodinamikai diagramon
(Horváth (2007) nyomán).

A szabadkonvekciós szint és a kiegyenlítési szint között található egy gyorsítási szakasz, mely megmutatja, hogy a részecskén a légkör mennyi munkát tud végezni, azaz mekkora az a belső energia, amely konvektív mozgási energiává tud alakulni. Ezt konvektív hasznosítható potenciális energiának (convective available potential energy), röviden CAPE nevezzük. Kiszámítása az (5) összefüggés segítségével történik, hogy az egyenlet baloldalát átalakítva kapjuk, hogy

$$\frac{d \frac{w^2}{2}}{dz} = g \frac{T'_v - T_v}{T_v} \quad (6)$$

Ha a fenti egyenletet integráljuk a szabadkonvekciós (LFC) és a kiegyenlítési (EL) szint között, akkor kapjuk meg a konvektív hasznosítható potenciális energiát (7).

$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} g \frac{T'_v - T_v}{T_v} dz \quad (7)$$

Értéke nagyban függ attól, hogy melyik szintről indítjuk a részecskét. Vagyis ha talaj közeli rétegekről indítunk, akkor az erős napi hőmérsékleti és nedvességi menet, vagy a lokális talaj közeli hatások miatt térben és időben erősen változó mennyiséget kapunk. Valóságban nem a talajszintről alkalmazzák ezt a módszert, hanem az alsó 1000 m átlagos, hőmérsékletéből, átlagos nedvességéből és átlagos nyomási szintről indítják a részecskét. A Kárpát-medencében a ritkán előforduló legmagasabb CAPE értékek 2500 J/kg körül vannak.

1.2. A konvergencia

A függőleges mozgások kialakulásához ugyancsak hozzájárulhat a levegő torlódása, melynek legtipikusabb formája az orográfia keltette feláramlás. A domborzat megemeli az áramló levegőt, vagyis ha labilis a rétegződés, akkor az emelkedő légtestek könnyebben jutnak el a szabad konvekciós szintig, így hamarabb kialakulhat a zivatar a hegyek szélfelőli oldalán, mint a síkvidéken.

Ha a levegő instabil, akkor nem éri el a szabad konvekciós (LFC) szintet, a domborzati hatás megszűnésével a levegő hidegebb marad, mint a környezete és ezért süllyedni kezd. Ez viszont a száraz adiabata mentén történik, így rövidesen ismét melegebb lesz a környezeténél, ismét felhajtóerő kezd rá hatni. A tipikus orografikus hullámfelhőket (lenticularis) ez a hullámmozgás hozza létre. A hidegfrontok mentén hasonló jelenség játszódik le.

1.3. A szélnyírás

A konvekciót ugyancsak erősítheti a szélsébség magassággal történő növekedése, amely egy meglehetősen összetett folyamat. Beindulásához szükséges, hogy legyenek fejlett zivatarok, amiben a feláramlási csatorna meglehetősen elszigetelt a környezetétől. A talajközeli alsó légrétegek és a magas légkör (közép és felső-troposzféra) között a zivatar közvetlen kapcsolatot létesít, a felhőalapba alacsonyabb sebességgel történik a beáramlás, míg a magasban az ottani viharos széllal távozik a levegő a felhőből. A feláramlási csatornában ez pedig gyorsulást okoz. Viszont a nem hidrosztatikus nyomás adalék már jelentősebb lehet a függőleges gyorsulás miatt, így a feláramlási csatornában alacsonyabb lesz a nyomás a függőleges szélnyírást hasznosító zivatarokban.

A másik következménye, hogy a légkörben függőleges tengelyű, horizontális örvényesség jön létre, amihez ha erős feláramlás járul, akkor az örvényesség tengelye függőlegessé válik. Azaz a feláramlási csatorna horizontálisan örvényleni kezd. A centrifugális erő nem kedvez a csatornába történő bekeveredésnek az örvényesség miatt, vagyis a feláramlás még hevesebb, a cella belsejében pedig a nyomás még kisebb lesz. A létrejövő nyomási gradiens erő egyensúlyba kerül, így azt eredményezi, hogy a zivatarcella több óráig fennmarad. Pótolni kell a feláramló légtömeget, ami egyre inkább csak a talaj közeli légrétegekből történik, ahol fenti egyensúlyt a súrlódási erő megbontja, így lehetővé téve a beáramlást.

A forgó zivatarok egy miniatűr ciklont formálnak, amit mezo-ciklonnak neveznek, az ilyen típusú zivatarokat pedig szupercellának, amibe beáramló örvénylő levegő hozza létre a tornádót. A heves feláramlás pedig szinte mindig pusztító jégesővel, felhőszakadással, orkánszerű zivataros kifutószéllel jár.

2. Az ECMWF ensemble előrejelző rendszere

Az ECMWF, más néven Középtávú Időjárás Előrejelzések Európai Központja (3. ábra) 1975-ben nemzetközi összefogásként jött létre. Fő célja középtávú globális előrejelzések operatív előállítása. Az operatív determinisztikus előrejelzések Magyarország 1994-ben társult tagországgént kötött együttműködési megállapodást az ECMWF-fel, az OMSZ középtávú prognózisai döntően az ECMWF által szolgáltatott numerikus előrejelzések alapján készülnek.



3. ábra: A Középtávú Időjárás Előrejelzések Európai Központja
a nagy-britanniai Readingben

1979-es bevezetését követően hosszabb kutató és fejlesztő munka eredményeként 1992 óta ún. EPS (Ensemble Prediction System) valószínűségi előrejelzések is operatíván készülnek (*Molteni et al.*, 1996). 2006 novemberétől naponta kétszer, 00 és 12 UTC-kor készülnek 15 napos középtávú EPS előrejelzések az ún. VarEPS (Variable Resolution Ensemble Prediction System) rendszer (*Buizza et al.*, 2006) keretében. egy, ún. kontrolltag, amely a determinisztikus modell kezdeti feltételeivel fut, de a térbeli felbontása a perturbált ensemble futtatásokéval egyezik meg.

A légkör állapotát meghatározó fizikai egyenleteknek, ún. hidro-termodinamikai vagy kormányzó egyenletrendszereknek különböző matematikai módszerekkel történő megoldását numerikus modelleknek nevezzük. Tagjai parciális differenciál egyenletek, amelyekhez kezdeti és határfeltételek megadása is szükséges. Ezek meghatározásához rendelkezésre állnak mérési adatok, korábbi modellfutatási eredmények, illetve dinamikai és fizikai törvényszerűségek.

Pontosabban készíthetünk előrejelzést, ha minél pontosabban ismerjük a kezdeti és peremfeltételeket (*Palmer et al.*, 2006). Tehát alapvető fontosságú egy numerikus előrejelzés készítése során, hogy kellően pontosan meg tudjuk adni a kezdeti feltételt. Ennek viszont számos hibaforrása lehet, mint például a domborzati és a területi viszonyok, a szinoptikus mérést végző műszer mérési és műszer hibái, és természetesen maga a modell is rendelkezik hibákkal, amelyek tovább rontják az előrejelzés pontosságát. Ráadásul a légkör nem lineáris dinamikai rendszer, hanem kaotikus viselkedésű, így igen nagy instabilitást mutat kis perturbációkkal szemben is.

Ezeket a modelleket főként rövid- és középtávú előrejelzésekhez használják, mert a kis mértékben eltérő kezdeti feltételekkel készített előrejelzések eltérése idővel rohamosan nő, lehetetlenné téve egy pontosabb hosszú távú előrejelzést. Az EPS előrejelző módszer arra szolgál, hogy a mérések és a modellek pontatlanságából származó bizonytalanságokra számszerű becslést adjon. Futtatása során nem egyetlen kezdeti feltétel van, hanem a kezdeti analízis mellett több tucat, különböző mértékben perturbált kezdeti állapot együttest használnak fel. Az előrejelzések összessége a meteorológiai esemény minden lehetséges értékéhez meghatározott valószínűséget rendel (*Persson*, 2011, *Persson and Riddaway*, 2011),

A legutóbbi évek főbb fejlesztési irányai közül célszerű kiemelnünk néhány fő sajátosságot. 2010 nyarán került operatív bevezetésre ensemble perturbációk előállítására szolgáló új módszer, az ún. ensemble adatasszimilációs rendszer (*Buizza et al.*, 2010, *Isaksen et al.*, 2010). A másik fő fejlesztési irány modell horizontális térbeli felbontás növekedéséből adódik, 2015 után - amikor a determinisztikus modell felbontása már 10 km alá csökken – szükségessé válik a nem hidrosztatikus modellek futtatása (*Wedi and Malardel*, 2010). A modellbeli fizikai parametrizáció is folyamatosan fejlődik, ennek a fejlesztési iránynak a keretében új felhőzeti séma került bevezetésre (*Forbes and Tompkins*, 2011), a fejlesztés pozitív hatással van a konvektív csapadékképződési folyamatok előrejelzésére is.

Napjaikban a determinisztikus modellt tíz napra futtatják 00 és 12 UTC-kor - 2010 januárja óta már – 16x16 km-es a rácsfelbontással (*Miller et al.*, 2010). Az EPS esetében a horizontális felbontás 32x32 km, a modell 51 tagból áll és szintén 00 és 12 UTC-kor fut, 2006 vége óta már 15 napig terjedően. A determinisztikus modell szintek száma jelenleg 91, az ensemble modell szintek száma 62. A determinisztikus modell szintek számát 2013-ban a jelenlegi 91-ről 137-re tervezik megnövelni. Így is elősegítve a határrétegbeli meteorológiai folyamatok még pontosabb leírását, a fejlesztés választott témánk, a konvektív események még pontosabb előrejelezhetőségét támogatja.

3. A konvektív események előrejelzését elősegítő valószínűségi előrejelzések vizsgálata

A légköri konvekciót bemutató 1. fejezetben bemutattam, hogy a konvektív események kialakulásában kiemelt szerepe van a konvektív hasznosítható potenciális energiának, a vertikális szélnyírásnak, valamint a nedvességi viszonyoknak. A nemzetközi meteorológiai szakirodalom mélyrehatóan foglalkozik a fenti paraméterek és az intenzív konvektív események kapcsolatával. A megfigyelési információra alapozottan a szélnyírás szerepének tanulmányozása volt célkitűzése *Weisman and Klemp* (1984), *Johns and Hart* (1993), *Weismann* (1996) és *Craven* (2000) munkájának. A fenti három tényező együttes vizsgálatát kapcsolatban *Davies and Johns* (1993), *Gilmore and Wicker* (1998) és *Craven et al.* (2002) tűzte ki célul.

A numerikus modellek fejlődésével több országban, így hazánkban is megkísérelték ezen paraméterek determinisztikus modellekre alapozott előrejelzését. Azonban ensemble modellekre alapozott ilyen célú vizsgálat, amely dolgozatunk témája a szakirodalom szerint nem volt. A következő részben a három meteorológiai paraméter hatását vizsgálom konkrét konvektív események kialakulása során.

Első lépésként a 2004 és 2012 közötti 9 nyári évek négy időpontbeli ECMWF analízis alapján gyakorisági diagramot, azaz hisztogramot készítettem CAPE indexre, a 850 és 500 hPa közötti réteg átlagos relatív nedvességére, valamint az 500 hPa-os és a 10 m-s szint közötti szélnyírásra vonatkozóan. Majd különböző statisztikai módszerekkel megvizsgáltam a konvektív és összcsapadék arány és a három paraméter viszonyát. Második lépésként két új grafikon típust fejlesztettem ki, melyek a elősegíthetik a fenti paraméterekre vonatkozó valószínűségi előrejelzés értelmezését illetve használatát. Harmadik lépésben három intenzív konvektív időjárási helyzetben esettanulmányok során a két új grafikon típus alkalmazhatóságát vizsgáltam az operatív gyakorlatban már használt két valószínűségi grafikonnal együtt.

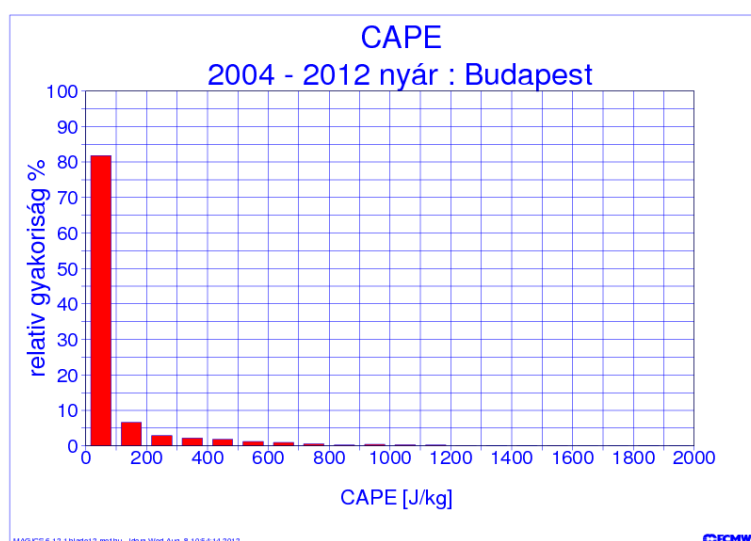
A vizsgálatokhoz UNIX operációs rendszerben FORTRAN nyelven írt programcsaládot fejlesztettem ki. A felhasznált adatok az ECMWF MARS rendszeréből (*Raoult*, 2001) származnak. A GRIB file-ok dekódolásához az ECMWF GRIB API software úgynevezett grib tools parancsait használtam. Az eredmények grafikus megjelenítéshez az ECMWF MAGICS++ grafikus programcsomag (*Lamy-Thépaut*, 2009, *Siemen and Lamy-Thépaut*, 2010) felhasználásával szintén FORTRAN nyelvű programokat készítettem.

3.1. Hosszabb idősor vizsgálata

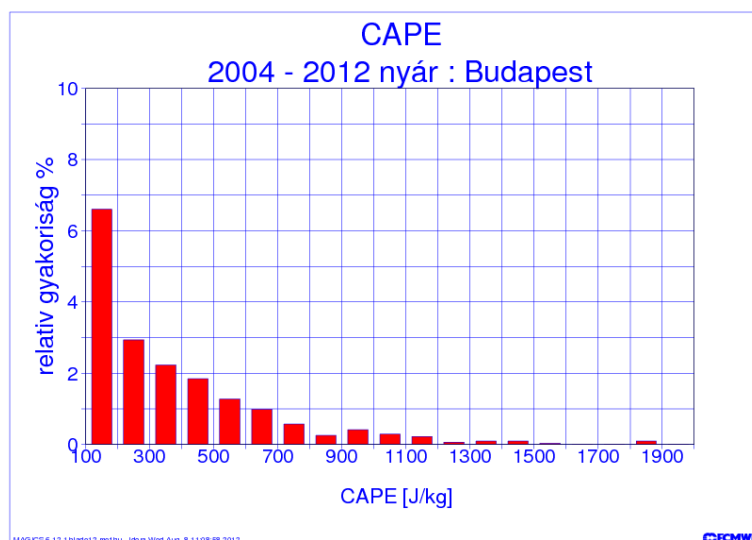
3.1.1 Egy paraméteres vizsgálatok

Amint említettem vizsgálataimat először egy hosszabb idősor, nevezetesen a 2004. és 2012 között évente a június 1. és augusztus 31. közötti időszakok ECMWF analízisei alapján hisztogramokat készítettem. Az ECMWF 2003. október 7-étől állít elő operatív modellekben EPS és determinisztikus CAPE analíziseket (*ECMWF*, 2004), ezért vizsgálunk csak kilenc éves időszakot. Első lépésként a vizsgált 2004-2012-es kilencéves időszakra GRIB file formájában lekértem az ensemble előrejelzéseket az ECMWF MARS adatbázisából (*Raoult*, 2001). Az adatok sorba rendezése után évszakos bontásban a relatív gyakoriságot kiszámolva hisztogram formájában grafikus program segítségével ábrázoltam az időszak nyári évszakaira nézve (4-5. ábra).

Először a CAPE értékekből készült Budapestre vonatkozó hisztogramot vizsgáltam meg a nyári időszakra (4. ábra). A vizsgált időszak körülbelül 80 % gyakoriságban fordul elő 0 és 100 J/kg közötti CAPE érték. A 4. ábrán jól látható, hogy gyakoriságok menete közel exponenciális alakot mutat. 500 J/kg feletti értékek is előfordulnak, de a 0-100 %-os intervallumú függőleges skála nem teszi lehetővé, hogy a pontos értékeket leolvashassuk. Így az 5. ábrán a függőleges skálát 0-10 %-os intervallumra csökkentve csak a 100 J/kg-nál nagyobb CAPE értékek gyakoriságot mutatom be. Látható, hogy 1000 J/kg és 2000 J/kg közötti értékek is előfordulnak, bár ezek gyakorisága elég kicsi.

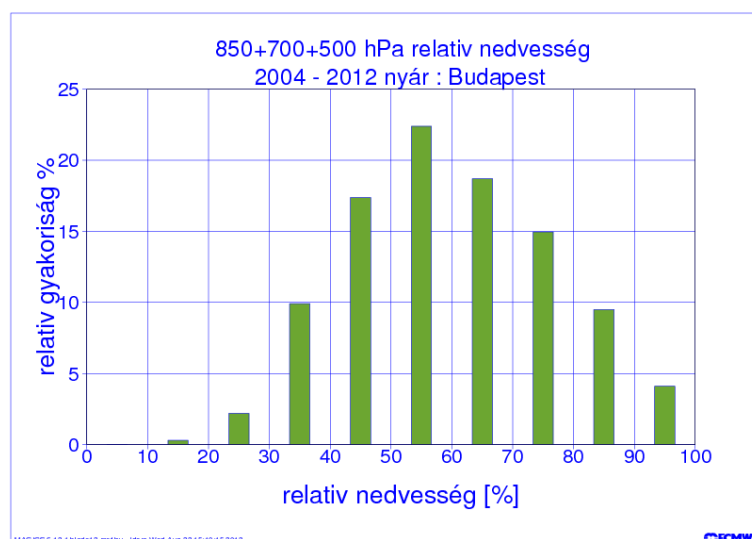


4. ábra: A 0-2000 J/kg intervallumban a CAPE érték hisztogram Budapesten
a 2004 és 2012 közötti nyári időszakban



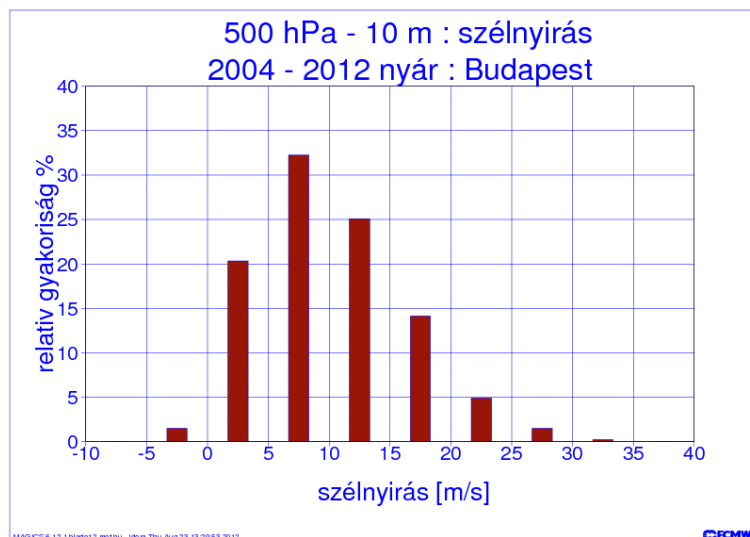
5. ábra: A 100-2000 J/Kg intervallumban a CAPE érték hisztogram Budapesten a 2004 és 2012 közötti nyári időszakban.

A következő lépésben a 850 és 500 hPa közötti rétegre kiátlagolt relatív nedvesség gyakoriságát vizsgáltam meg szintén a 2004 – 2012-es nyári időszakban (6. ábra). Jól látható, hogy a gyakoriság lognormális jellegű, azaz nem szimmetrikus harang alakú, a maximális gyakoriság mintegy 22 %-os értékkel a 50 - 60 %-os relatív nedvesség intervallumban található.



6. ábra: 850-500 hPa közötti rétegre kiátlagolt relatív nedvesség hisztogram Budapesten a 2004 és 2012 közötti nyári időszakban

Következő lépésben az 500 hPa-os szint és a 10 m-es szint közötti rétegre vonatkozó szélnyírást vizsgáltam (7. ábra). A CAPE értékhez hasonlóan itt is kvázi exponenciálisan csökkenés mutatkozik. A 0-2 m/s-os szélnyírás értéke a legmagasabb (40 %), de előfordulnak igaz kis gyakorisággal a 12-14, 14-16 m/s-os értékek is.



7. ábra: Az 500 hPa-os szint valamint a 10 m-es szint közötti rétegre vonatkozó szélnyírás hisztogram 500 hPa-os szinten Budapestre a 2004 és 2012 közötti nyári időszakban

Majd megvizsgáltam a konvektív (CP) és az összesített (TP) csapadék arányát különböző statisztikai vizsgálatok alkalmazásával. Először hisztogramon ábrázoltam az EPS és a kontroll előrejelzés adatok segítségével a 00 és a 12 UTC-s modell futtatások 24 órás csapadékösszegeit (8 – 10. ábra), melyekhez különböző küszöböket társítottam (1, 5, 10, 15, 20 és 25 mm). Látható, hogy ahogy haladunk az egyre nagyobb küszöb felé az esetek száma egyre kisebb és az eloszlás is egyre változik. A 12 UTC-s futtatás esetszáma minden esetben kisebb, mint a 00 UTC-sé. Viszont megjelennek a magasabb CP/TP arányok (80 – 100 %) a 12 UTC-s esetben. Az 1 és 5 mm-es küszöbnél a relatív gyakoriság maximuma 10 – 15 %-os CP/TP csapadékaránynál található, míg a 15 mm-eres esetben megjelenik egy második csúcs a 75 – 85 %-nál. A 20 és a 25 mm-es küszöbnél az esetek száma alacsony így nem lehet összehasonlítani az eloszlásokat a többi esettel.

Megvizsgáltuk a két eloszlásgörbe hasonlóságát két mintás Kolmogorov – Szmirnov próbával is. E hipotézis vizsgálat során azt a feltételt akarjuk ellenőrizni, hogy egy vizsgált valószínűségi változó eloszlása, eloszlásfüggvénye, egy adott konkrét eloszlásfüggvénnyel megegyezik-e (ez a nullhipotézisünk, azaz $H_0 : F(x) = G(x)$). Tekintsük a (ξ, η) valószínűségi

változó párt, és az azokból képzett független, ξ , η , n_1 , illetve n_2 elemű mintákat. Jelölje ξ eloszlásfüggvényét $F(x)$, a mintából számított empirikus eloszlásfüggvényét $F_{n_1}(x)$; míg ugyanezek az η valószínűségi változókra $G(x)$ és $G_{n_2}(x)$.

A választott próbához a próba statisztika:

$$D_{1,2} = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}} \sup_{-\infty < x < \infty} |F_{n_1}(x) - G_{n_2}(x)|,$$

amelyre Rényi (1966) 422. oldalán lévő tétel szerint

$$\lim_{\substack{n_1 \rightarrow \infty \\ n_2 \rightarrow \infty}} P(D_{1,2} < x) = K(x),$$

ahol a $K(x)$ a határeloszlás függvény. Az elfogadási tartomány definiálásához szükséges x_α értékeket a legfontosabb szignifikanciaszintekre az alábbi kis táblázat tartalmazza (1. táblázat):

α	0.1	0.05	0.001
x_α	1.23	1.36	1.63

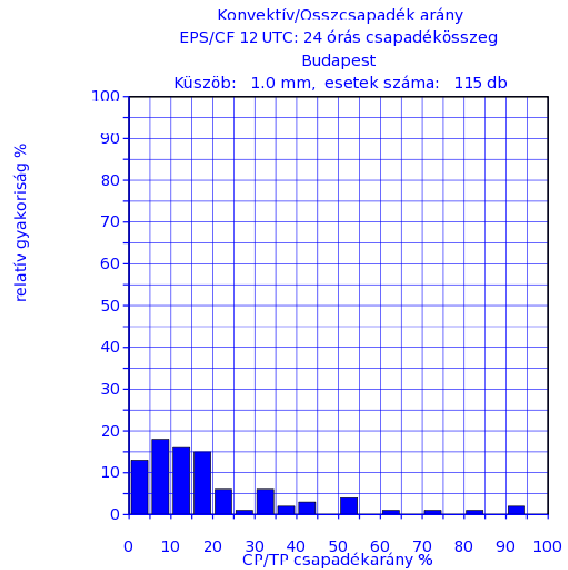
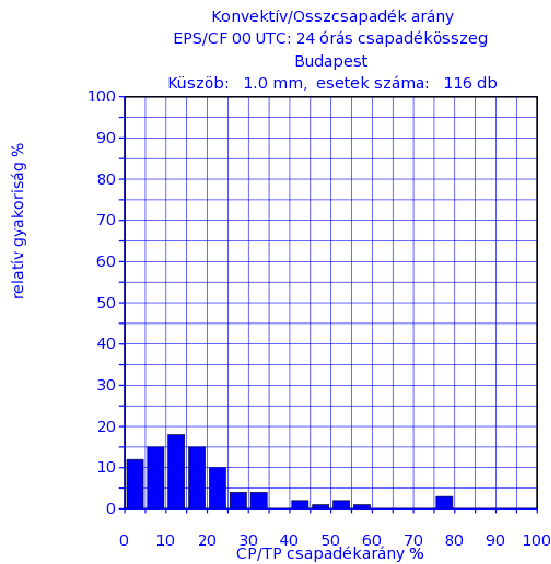
1. táblázat: x_α értékei a legfontosabb szignifikanciaszinteken

Az x_α értékeket a $K(x)$ eloszlásfüggvény táblázatából vesszük, $K(x_\alpha) = 1 - \alpha$. Az elfogadási tartomány a $(0, x_\alpha)$ intervallum az α szignifikanciaszinten. Azaz, a nullhipotézist megtartjuk, ha $0 \leq D_n < x_\alpha$, és a nullhipotézist elvetjük, ha $D_n \geq x_\alpha$. (Dévényi, Gulyás, 1988)

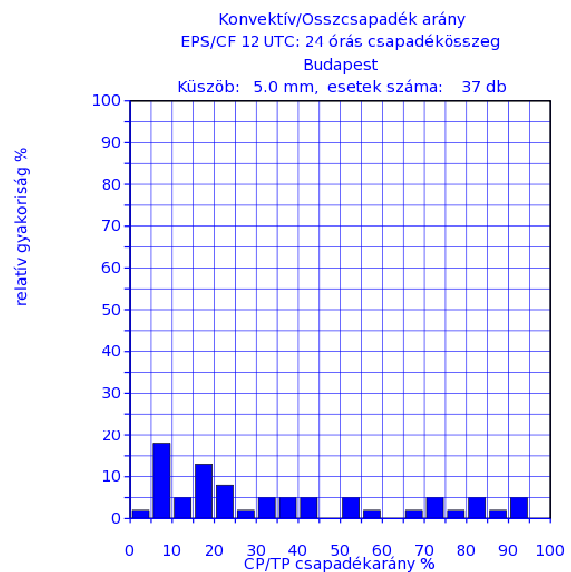
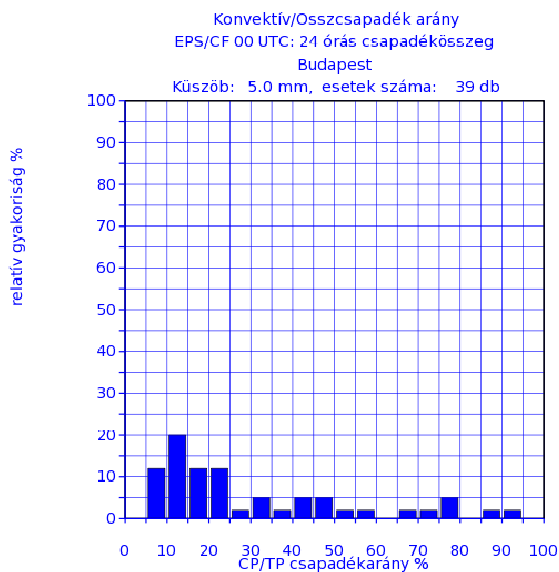
Vizsgálatunknál azt kaptuk, hogy a 00 és 12 UTC-s hisztogramok eloszlása 95%-os hipotézisvizsgálatkor nem azonos, mivel a próbastatisztika értéke 2,1 körüli volt.

A próba segítségével így a két eloszlásgörbe azonosságát statisztikai módszerrel, pontosan meg tudjuk állapítani. Nem csak vizuális következtetést vonunk le a két görbét összehasonlítva.

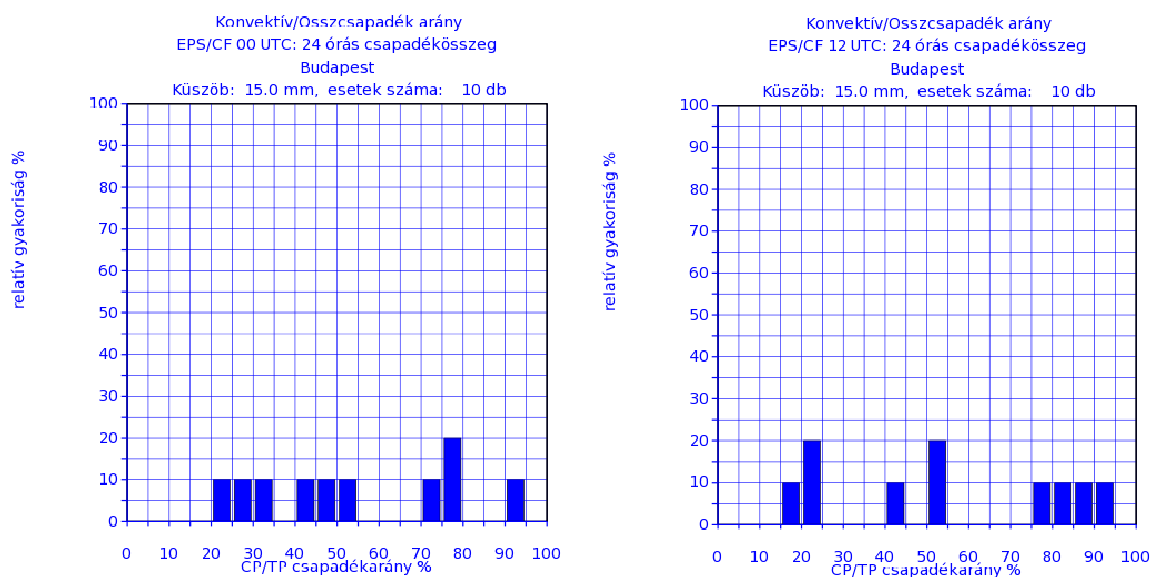
Tervezzük még a determinisztikus modellek és kontroll adatok alapján történő összehasonlítást is. Célunk még a többi modellek és a kontroll adatok vizsgálatából készített hisztogramok Kolmogorov – Szmirnov próbával való vizsgálata is.



8. ábra: Konvektív és összesített csapadék arány 00 és 12 UTC-kor készült 24 órás csapadékösszegre vonatkozó hisztogram 1 mm-es küszöbvel Budapestre



9. ábra: Konvektív és összesített csapadék arány 00 és 12 UTC-kor készült 24 órás csapadékösszegre vonatkozó hisztogram 5 mm-es küszöbvel Budapestre



10. ábra: Konvektív és összesített csapadék arány 00 és 12 UTC-kor készült 24 órás csapadékösszegre vonatkozó hisztogram 15 mm-es küszöbvel Budapestre

3.1.2. Kétparaméteres vizsgálatok

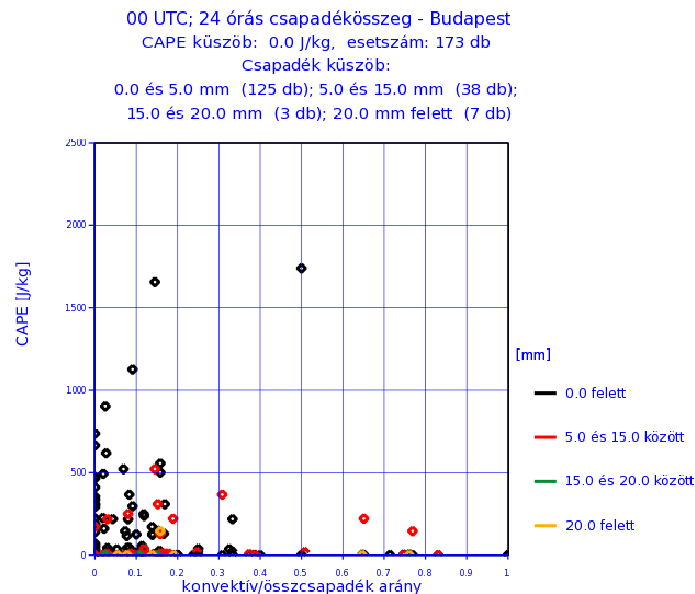
Az egy paraméteres vizsgálatok mellett megvizsgáltam a konvektív és összesített csapadék arány és a többi paraméter közötti kapcsolatot, így lényegesen jobb képet kaphatunk a paraméterek értékeiről a konvektív nagycsapadékú helyzetekkor. Ezért a hisztogram vizsgálat után megvizsgáltam a konvektív és az összesített csapadék arány és a CAPE stabilitási paraméter viszonyát keresztmetszeti diagram segítségével. Ezen belül is két fajta küszöb értéket vettem. Először a CAPE indexre nézve vettem 0, 500, 1000, 1500, 2000 és 2500 J/kg-os küszöböket (11 – 13. ábra), majd a csapadék aránynál 0, 1, 5, 10, 15, 20 és 25 mm-es értékekre (14 – 17. ábra) vettem.

A 11 – 13. ábrán látható még az ezen belül is különböző csapadékösszegek közötti esetek más-más színnel feltüntetve, alcímként pedig az esetek száma. Feketével a 0 és 5 mm, pirossal a 5 és 15 mm közötti, zölddel a 15 és 20 mm közötti, sárgával pedig a 20 és 25 mm közötti eseteket jelöltem. Az első esetben (11. ábra) a legtöbb eset a 0 és 15 mm között volt és leginkább a 0 – 500 J/kg és a 20 % alatti csapadék aránynál helyezkedett el. Voltak nagyobb csapadék arányok is, de ahhoz alacsony 500 J/kg-os CAPE értékek társultak.

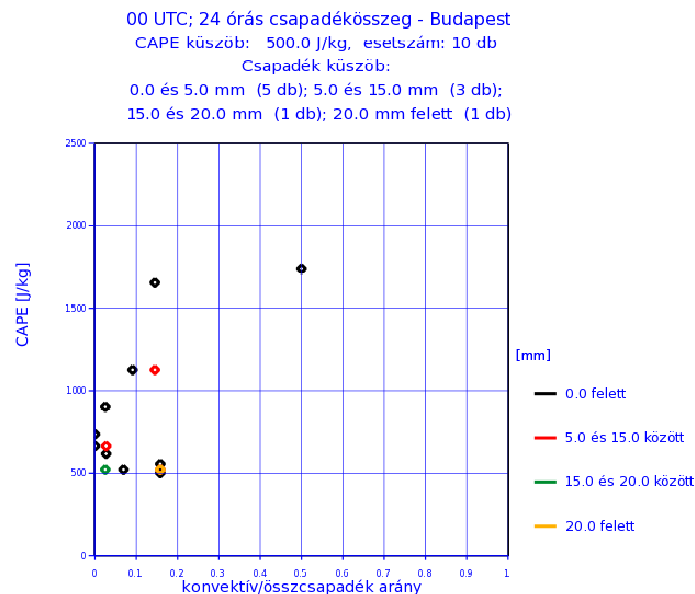
Az 500 J/kg-os küszöbértékeknél (12. ábra) már az eset számok jóval kisebbek voltak mint a első esetben és szintén a 0 és 15 mm közötti esetek száma a több. Itt a

legtöbb eset az 500 és 1000 J/kg-os értékek között van és 20 % alatti a csapadék arány. A 15 mm és a 20 mm fölötti értékek itt jobban kivethetők, de a 20 % alatti és 500 J/kg-os körüli értékeket mutatnak.

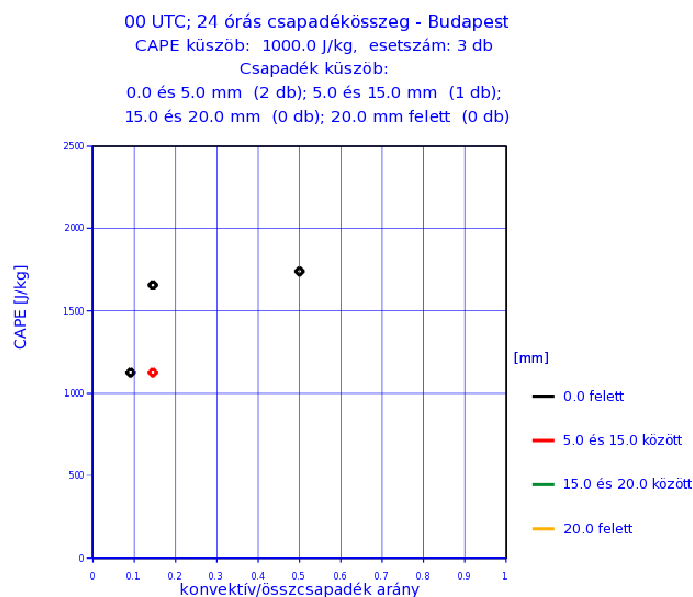
A harmadik diagramon (13. ábra) már 1000 J/kg-os küszöb volt és jól láthatóan csökkent az esetek száma. Egy kivétellel szintén a 20 % alatti csapadék aránynál van a legtöbb eset. Az ennél nagyobb küszöbértékes eseteket a kevés esetszám miatt nem lehetett megvizsgálni.



11. ábra: Konvektív és összesített csapadék arány 00 UTC-kor készült 24 órás csapadékösszegre vonatkozó keresztidogram 0 J/kg-os küszöbvel Budapestre



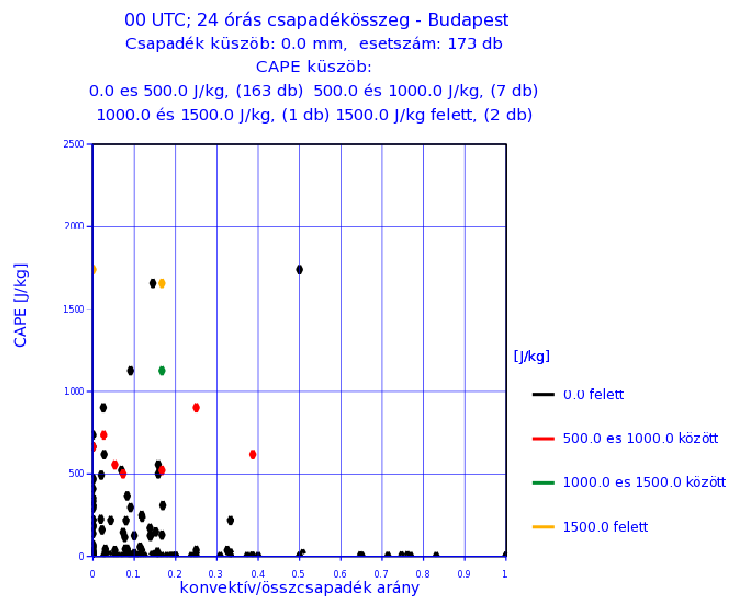
12. ábra: Konvektív és összesített csapadék arány 00 UTC-kor készült 24 órás csapadékösszegre vonatkozó keresztidogram 500 J/kg-os küszöbvel Budapestre



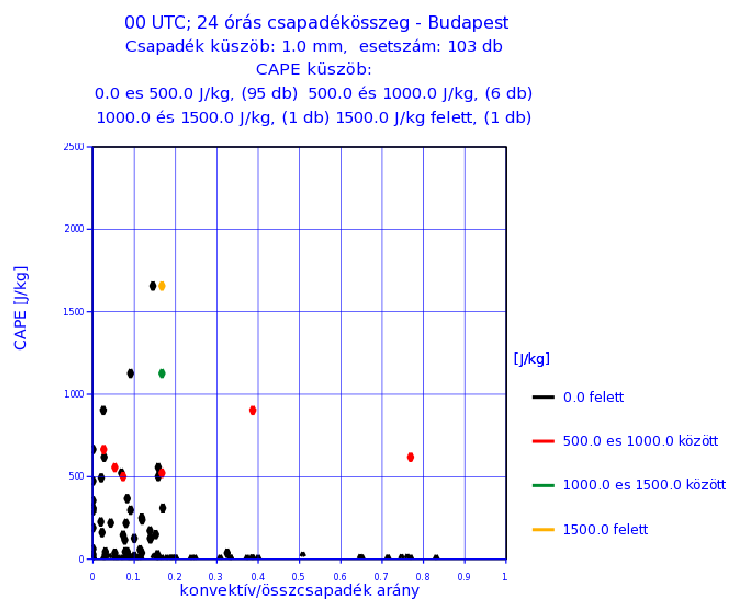
13. ábra: Konvektív és összesített csapadék arány 00 UTC-kor készült 24 órás csapadékösszegre vonatkozó kereszt diagram 1000 J/kg-os küszöbvel Budapestre

A csapadékarányra vett küszöbök után szintén ábrázoltam a különböző CAPE értékek közötti eseteket, feltüntetve az esetek számát is (14. – 17. ábra). Feketével a 0 és 500 J/kg, pirossal a 500 és 1000 J/kg közötti, zölddel a 1000 és 1500 J/kg közötti, sárgával pedig a 1500 J/kg feletti eseteket jelöltem. A 14. ábrán látható, hogy a legtöbb eset a 0 és 500 J/kg-os értékűek és 20 % alatti csapadék arány helyezkedik el. De vannak kiugró értékek mind a csapadék aránynál mind a CAPE értékek szempontjából is, habár ezekhez is alacsony értékek társulnak. Azaz, ha a csapadék arány magas, akkor a CAPE értéke nagyon alacsony, ha a CAPE érték magas, akkor a csapadék arány alacsony.

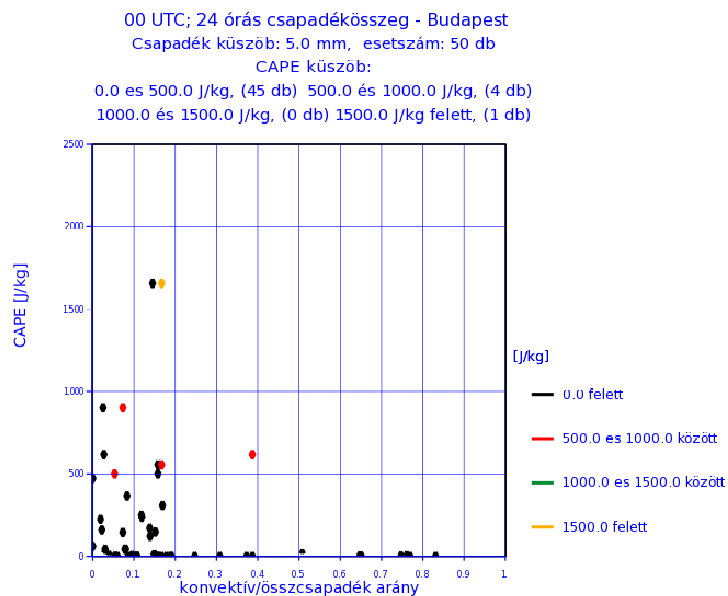
A 15. ábrán már az 1 mm feletti csapadék összegek vannak feltüntetve és az esetszám nem csökkent annyira, mint a CAPE küszöb esetében. Itt is alacsony értékek vannak, de az 500 és 1000 J/kg-os értéknél megfigyelhetők magasabb csapadékarányú esetek. 5 mm (16. ábra) és 10 mm (17. ábra) feletti küszöböknel az eset szám szintén csökkent és a kiugró értékekhez alacsony CAPE érték társul. Szintén az ennél nagyobb küszöbértékes eseteket a kevés esetszám miatt nem lehetett megvizsgálni.



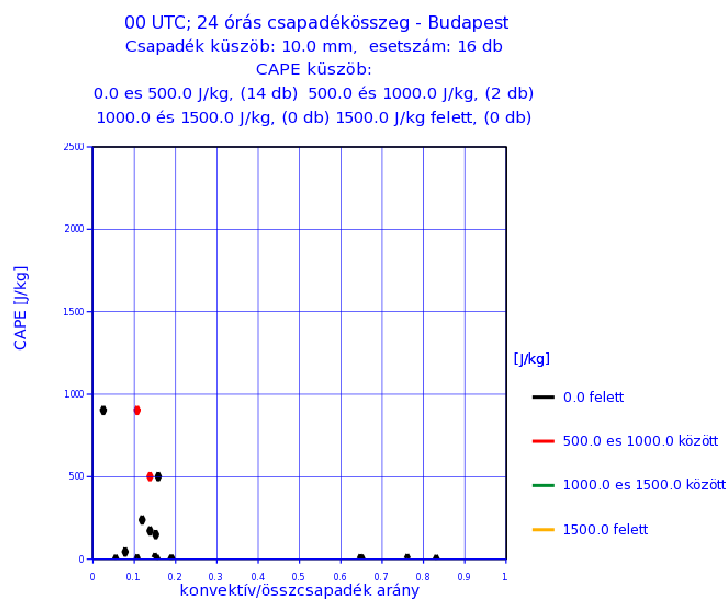
14. ábra: Konvektív és összesített csapadék arány 00 UTC-kor készült 24 órás csapadékösszegre vonatkozó keresztábrák 0 mm-es küszöbvel Budapestre



15. ábra: Konvektív és összesített csapadék arány 00 UTC-kor készült 24 órás csapadékösszegre vonatkozó keresztábrák 1 mm-es küszöbvel Budapestre



16. ábra: Konvektív és összesített csapadék arány 00 UTC-kor készült 24 órás csapadékösszegre vonatkozó keresztidíagram 5 mm-es küszöbvel Budapestre

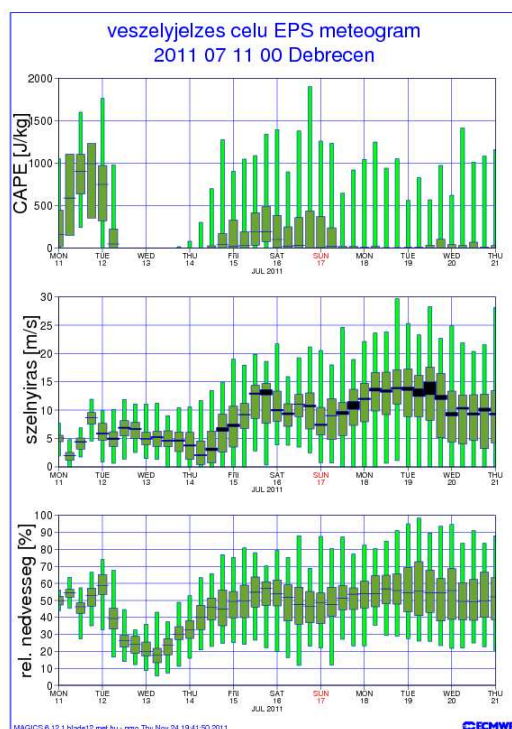


17. ábra: Konvektív és összesített csapadék arány 00 UTC-kor készült 24 órás csapadékösszegre vonatkozó keresztidíagram 10 mm-es küszöbvel Budapestre

3.2. Új grafikus valószínűségi előrejelzés megjelenítési módszerek kifejlesztése

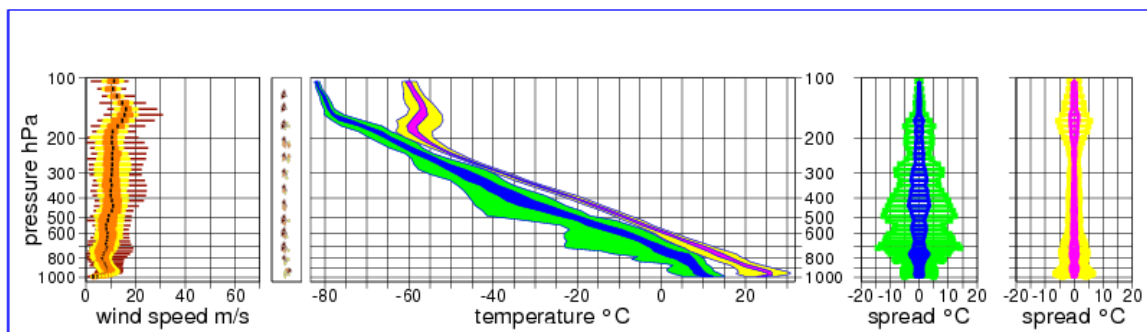
A 3.1 fejezetben bemutatott három meteorológiai paraméter esetében több grafikus produktum önálló illetve együttes alkalmazásával esettanulmányokban vizsgáltam az ensemble előrejelzésekben rejlő lehetőségeket. Négy grafikus eszközt alkalmaztam, melyből kettő saját fejlesztésű alkalmazás.

Munkám kezdetekor már operatíván rendelkezésre állt az Országos Meteorológiai Szolgálat Módszerfejlesztési Osztályán 2010-ben, illetve 2011-ben került kifejlesztésre pontszerű előrejelzést tartalmazó két új produktum. Az OMSZ Repülésmeteorológiai és Veszélyjelző Osztály kérésére a 2011 nyári konvektív időszakot megelőzően került kifejlesztésre a valószínűségi CAPE indexet, a 10 m-es és az 500 hPa-os szint közötti szélnyírást, valamint 850-500 hPa-os réteg relatív nedvességi viszonyait tartalmazó ensemble meteogram (18. ábra).



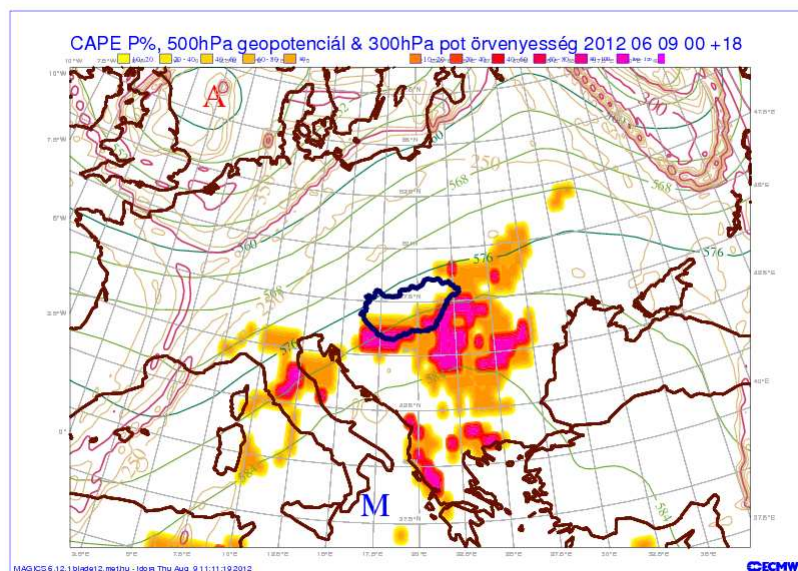
18. ábra: CAPE indexre, 500 hPa és a 10 m-es szint közötti szélnyírássra, valamint a 850-500 hPa réteg átlagos relatív nedvességére vonatkozó veszélyjelzés célú ensemble meteogram

2011 nyarán került szintén operatív bevezetésre a főizobárszinti valamint a 60 ensemble modellszintre épülő hőmérséklet, harmatpont, szélirány és sebesség ensemble vertikális profil előrejelzés (19. ábra) (Ihász és Tajti, 2011; Tajti, 2011).

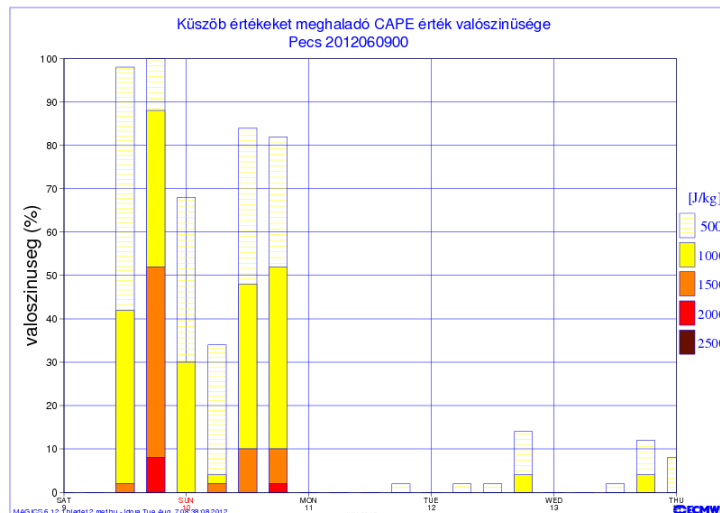


19. ábra: A hőmérsékletre, harmatpontra, valamint a szél irányra és sebességre vonatkozó ensemble vertikális profil

Saját fejlesztésű munkám eredményeként ezek mellett a kiválasztott meteorológiai paraméterek esetében bizonyos küszöböt elérő esemény valószínűségi térképeit (20. ábra), valamint pontra vonatkozóan különböző küszöböket meghaladó valószínűségek együttes időbeli menetet bemutató grafikonokat (21. ábra) vizsgáltam.



20. ábra: 500 hPa geopotenciál magassága és a 300 hPa potenciális örvényesség eloszlása és az 100 és az 500 J/kg-os értéket meghaladó CAPE index valószínűség 2012. június 9. 18 UTC-re vonatkozó előrejelzési térkép



21. ábra: Az 500, 1000, 1500, 2000 és 2500 J/kg CAPE értékeket meghaladó valószínűségeket tartalmazó ötnapos időtartamú grafikon 2012. június 9. 00 UTC-s modellfuttatással Pécsre

A fentiek alapján már a konvekcióhoz kapcsolódó meteorológiai események négydimenziós változását nyomon követő komplex eszköztárral rendelkezem. A fejlesztést UNIX operációs rendszerben FORTRAN nyelven írt programcsalád létrehozásával oldottam meg. Az eredmények grafikus megjelenítését MAGICS++ grafikus programcsomag (*Lamy-Thépaut, 2009, Siemen and Lamy-Thépaut, 2010*) felhasználásával szintén FORTRAN nyelvű programok készítésével oldottam meg.

3.3 Valószínűségi grafikus produktumok veszélyjelző célú együttes használata

Amint a 3.2 fejezetben említettem négy grafikus eszközt alkalmaztam, melyből kettő saját fejlesztésű alkalmazás. Vizsgálataim során a grafikus produktumokat következetesen az alábbi sorrendben használtam.

Először az időben egymás után következő bizonyos küszöbértéket meghaladó valószínűségi térképeket tanulmányoztam. A térképek alapján jól nyomon követhető a konvektív rendszerek időbeli fejlődése és térbeli áthelyeződése. Az azonos időpontra vonatkozó, de különböző időpontokban készült térképek alapján arról kaphatunk információt, hogy a konvektív esemény előtt milyen időelőnnel adhatunk korai figyelmeztetést.

Vizsgálataim második lépésében pontra vonatkozóan különböző küszöböket meghaladó valószínűségek együttes időbeli menetét bemutató grafikonokat vizsgáltam. A grafikonok alapján a fenti két eszközt kiegészítő információt kapunk, mely jól segíti a konvektív esemény veszélyességi szintjére vonatkozó valószínűség becslését.

Vizsgálataim harmadik lépésében a főizobárszinti valamint a 62 ensemble modellszintre épülő hőmérséklet, harmatpont, szélirány és sebesség ensemble vertikális profil grafikus előrejelzést vizsgáltam. Az eszköz jól segíti az egyes meteorológiai változók egymással való kölcsönhatásainak felismerését. Valamint a légkör előrejelzett finom vertikális szerkezetének ismeretében pontosabban behatárolhatók a konvektív események bekövetkezését kiváltó tényezők.

Végül a pontbeli időbeli menetet tartalmazó valószínűségi CAPE indexet, az 500 hPa-os és a 10 m-es szint közötti szélnyírást, valamint 850-500 hPa-os réteg relatív nedvességi viszonyait tartalmazó ensemble meteogramot vizsgáltam. Az ensemble meteogram révén jól nyomon követhetjük a konvektív események során kiemelt szerepet játszó három meteorológiai tényező időbeli alakulását, s egymást erősítő illetve gyengítő hatását. A módszer hátránya viszont, hogy az esemény térbeli kiterjedésére, illetve esetleges térbeli bizonytalanságára vonatkozóan nem kapunk információt.

4. 2012 nyarán bekövetkezett néhány konvektív esemény előrejelezhetőségének tanulmányozása

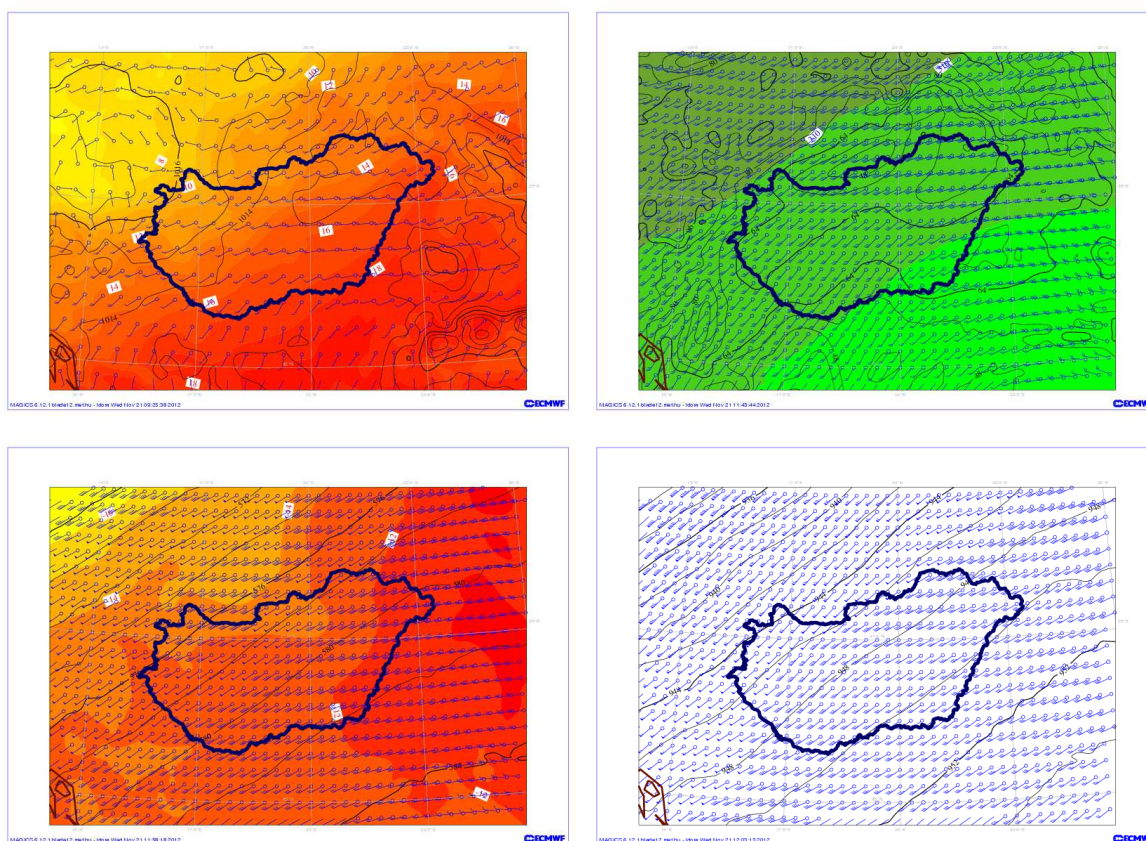
4.1 Jégesőveszélyes zivatarcellák 2012. június 9-én éjszaka

2012. június 9-én a délutáni órákban rendkívül heves zivatarcellák érték el a Dunántúl délnyugati részét. A legerősebb cellák kb. 18:45-kor lépték át az országhatárt Barcs környékén, majd a délnyugati vezető áramlástól kissé jobbra eltérülve Pécs – Baja – Szeged – Békéscsaba vonalában okoztak rövid ideig tartó, de nagyon intenzív csapadékot, viharos szelet és 3-4 cm átmérőjű jeget. (Horváth, 2012) A szupercellák járulékos jelenségei közé tartozik a heves jégeső, amelyet az átvonulás által érintett területeken mindenütt észleltek, a Mecsek környékén volt olyan terület, ahol perceként keresztül csak jég hullott eső nélkül.

A viharos időjárási helyzet kialakulásáért egy lassú mozgású hidegfront, illetve a hidegfronton kialakult hullám volt a felelős. A 22. ábrán látható, hogy június 9-én 14 órakor (12 UTC) a tengerszinti légnyomás mezejében kirajzolódó depresszió középpontja az

északkeleti országrész felett helyezkedett el, és ezen a mezo-léptékű örvény déli oldalán a légkör alsóbb szintjein (850 hPa-on) határozott melegáramlás alakult ki. Az örvény hátoldalán ugyanakkor a Dunántúl északi részét már hűvös levegő árasztotta el, így történhetett, hogy délután Szombathelyen csak 16, míg Szeged és Békéscsaba térségében 32 fokot mutattak a hőmérők.

A lassú mozgású hidegfront nem egy éles vonalban jelent meg, hanem több, ún. konvergencia vonalra szakadt fel, így a legelső hullám, amelyet inkább csak a szélmezőben lehetett megfigyelni 14 órakor már a déli határ mentén húzódott, míg a markánsabb hőmérséklet változással járó második hullám még csak a Dunántúli-középhegység vonalában helyezkedett el. Ugyanakkor a magasabb rétegekre ez a hullám, és így a hidegfront megtorpanása nem éreztette hatását, így a 700 hPa szinten már ennek jele nem látható, illetve 500 hPa-on a magassági hideg egyáltalán „nem vett tudomást” a talajközeli konvergenciákról.

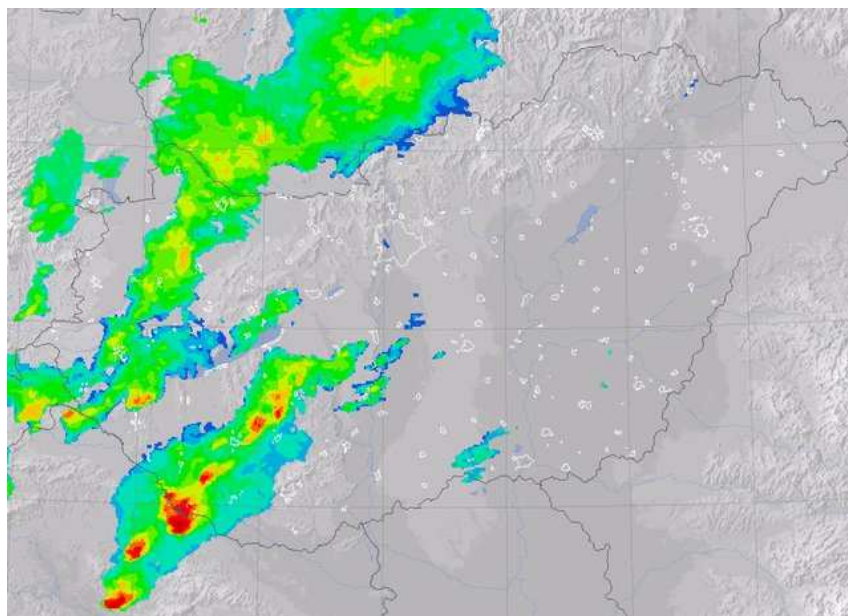


22. ábra: 850 hPa-os hőmérséklet, tengerszinti légnyomás és 925 hPa szél mezők (bal felső), 700 hPa-os relatív nedvesség, geopotenciál és szél mezők (jobb felső), 500 hPa-os hőmérséklet, geopotenciál és szél mezők (bal alsó), 300 hPa-os geopotenciál és szél mezők (jobb alsó) 2012. június 9 12 HLT-kor (10 UTC-kor)

Ennek eredményeként az alsó meleg beáramlás és a magassági hideg áramlás együttesen rendkívül labilissá tette a légkört, az erős magassági szél okozta szélnyírás illetve a szélfordulás kedvezett a miniatűr ciklonként örvénylő, így órákon keresztül fennmaradni képes szupercellák kialakulásához. A lassú mozgású hidegfront hosszan fenntartotta a talajközeli összeáramlást (konvergenciát) és a zivatarcellák e konvergencia vonalakban mozogva bőségesen juthattak a fennmaradásukhoz szükséges meleg, nedves levegőhöz. Ez utóbbi volt az oka annak, hogy a zivatarok nem a frontra merőlegesen láncban mozogtak, hanem a vonal mentén, többször egymást követve.

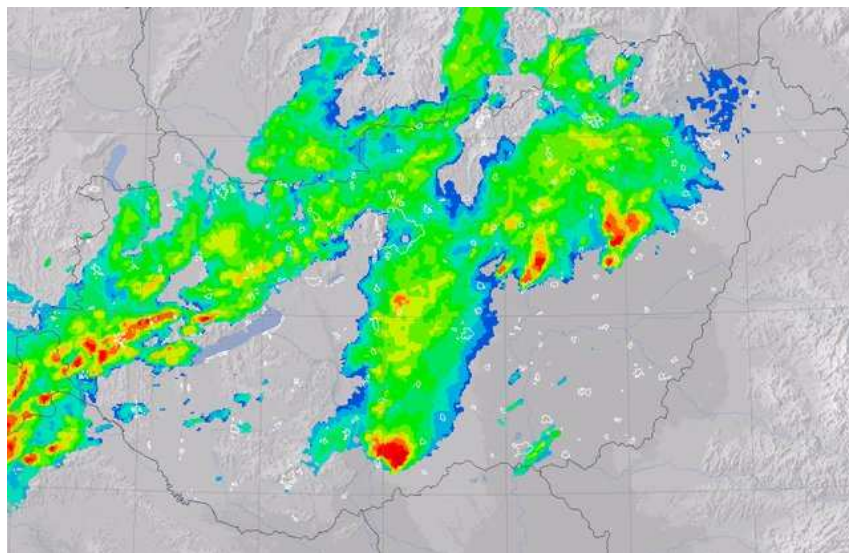
Az OMSZ országos kompozit radarképe szerint 18:50-kor érte el a már vélhetően szupercella állapotba fejlődött zivatar az országhatárt (23. ábra). A legerősebb cella a vonalban kialakult többi zivatarfelhőtől elszívta a hozzáférhető konvektív energia legnagyobb részét, így 21:30-ra, mire a Duna vonalát elérte, már egyedüli erős cella maradt a rendszerben (24. ábra).

A szupercella 23:40-kor már megközelítette Békéscsabát úgy, hogy az előtte lévő labilis levegőben ismét zivatarok alakultak ki (25. ábra). Ugyancsak ezen az ábrán látható, hogy jól elkülönült egymástól 7a délkeleti és az északnyugati konvergencia vonal, amely utóbbi inkább a hidegfront jegyeit hordozta.



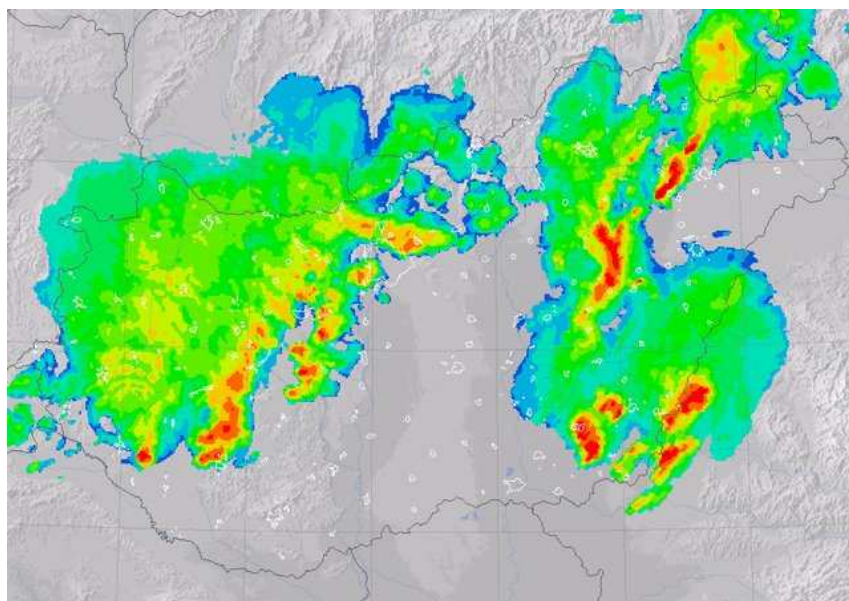
23. ábra: az OMSZ országos kompozit radarképe 2012. 06. 09. 18:50 HLT-kor (16:50 UTC-kor)

(forrás: www.met.hu)



24. ábra: az OMSZ országos kompozit radarképe 2012. 06. 09. 21:30 HLT-kor (19:30 UTC-kor)

(forrás: www.met.hu)



25. ábra: az OMSZ országos kompozit radarképe 2012. 06. 09. 23:40 HLT-kor (21:40 UTC-kor)

(forrás: www.met.hu)

4.1.1. Küszöbértéket meghaladó CAPE valószínűségi térképek

A 26. és 27. ábrák a 100 és 500 J/kg közötti (narancssárga) és az 500 J/kg –nál nagyobb (rózsaszín) CAPE értékek és konvektív csapadék valószínűségi térképeket mutatja a 2012. június 6. és 2012. június 9. között naponta 00 UTC-kor készült modell futtatások

alapján. Fel vannak tüntetve még az azonos magasságú 500 hPa-os geopotenciál szintek zöld izovonalakkal ábrázolva, jelölve az alacsony és magas értékek középpontját. A célidőpont minden egyes napi prognózis esetében 2012. június 9. 18 UTC.

A 2012. június 6-án és 7-én futtatott modellek (26. ábra) a Balkán-félszigeten és a határ közelében nagy területen, különböző intenzitásban fejlett konvektív aktivitásra mutató jel látszik. Az 500 J/kg-nél nagyobb valószínűségű területek eloszlása egy napon belüli modell futtatásonként is különbözik. A két napi futtatásban jól megfigyelhető, hogy a konvektív csapadék valószínűségét a modell egy nappal korábban csak néhol jeleníti meg. Míg június 7-én különböző mértékben, de a nyugati határvonalnál egy hosszanti sávban adja. Ennek oka valószínűleg a geopotenciál mező előrejelzésének alakulása, hiszen június 6-ára a modell Magyarország területén egy teknő hátoldala helyezett keletre ciklon középponttal.

Június 7-ére a mező „kisimult” és a teknő előoldalát jelezte előre a modell, Görögország területén egy anticiklon jelent meg. Ebben a két napban készült valószínűségi térkép sem adott az ország területére CAPE és konvektív csapadék valószínűségeket.

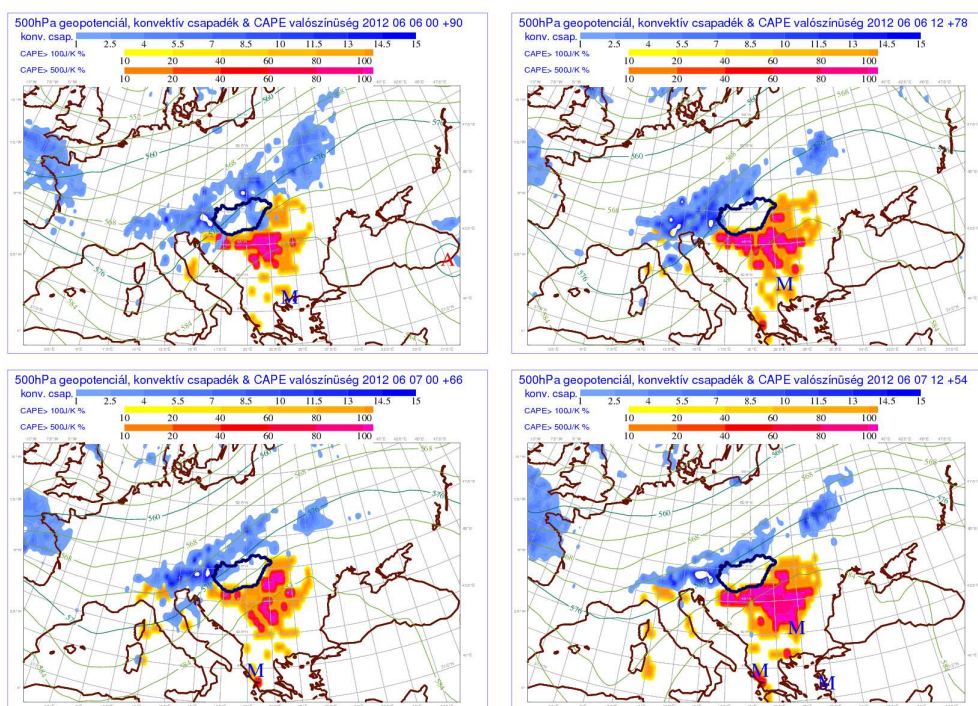
A 2012. június 8-i és 9-i modellfuttatásokban viszont már megjelennek az ország déli peremén a CAPE valószínűségi térképek, június 9-i futtatáson már a magasabb CAPE valószínűségek is megfigyelhetők. A magasabb CAPE értékek valószínűségi eloszlása folyamatosan változik, hat órával az esemény bekövetkezése előtt a terület megnövekedett és alacsony értékek az Itáliai félszigeten is megjelentek. A konvektív csapadék valószínűséget továbbra is az ország nyugati részére jelzi a modell, de a június 9-i éjféli modellfuttatásnál Szeged térségében megfigyelhető egy kisebb területen. Az 500 hPa-os geopotenciál mező fő struktúrája nagyon nem változott ezen időszak alatt, csak az anticiklon helyzete változott kismértékben.

A 28. és 29. ábrán a CAPE valószínűségeket a 300 hPa-os potenciális örvényességgel együtt vizsgáltam meg, feltüntetve az 500 hPa-os szint geopotenciál magasságát. A potenciális örvényesség (*PV*) fogalmát *Ertel (1942)* vezette be a szakirodalomba, amely a súrlódásmentes és adiabatikus folyamatok esetén időben állandó marad. (*Hoskins et al.*, 1985; *Holton*, 2004). Potenciális örvényességi anomáliának nevezik a légkörnek azon térrészét, ahol a potenciális örvényesség értéke jelentősen eltér a környezetétől. Ennek hátterében valószínűleg a mennyiség konzervatív jellegének megszűnése áll. Megkülönböztetnek pozitív és negatív anomáliát. A pozitív anomália esetén a potenciális örvényesség értéke az adott területen nagyobb a környezeténél és az adott szint felett magasabb, alatta alacsonyabb potenciális hőmérséklet helyezkedik el. Természetesen negatív anomália esetén a vertikális hőmérsékleti rétegződés az előzővel ellentétesen alakul (*Hoskins et al.*, 1985; *Hoskins*, 1997).

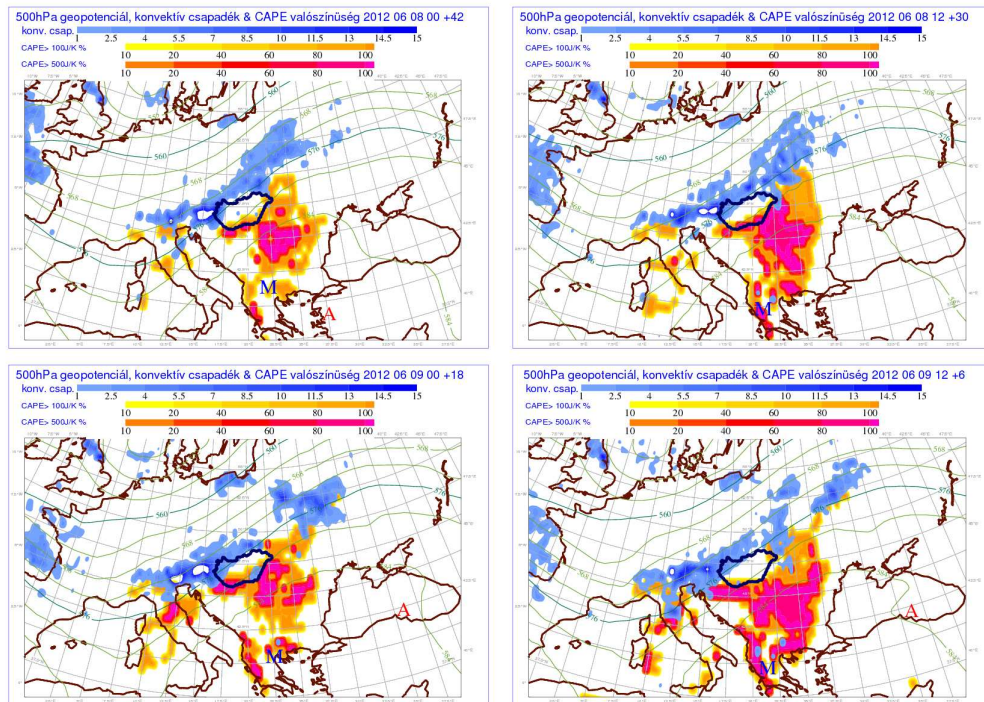
A potenciális örvényességi anomáliák viharciklonra gyakorolt hatását *Reed et al. (1992)* tanulmányozta, aki három féle pozitív anomáliát különített el:

- A ciklon térségében a felszíni potenciális hőmérsékleti anomália által előidézett *PV* anomália (pl. besugárzás hatása).
- A differenciált látens hőfelszabadulás által generált *PV* anomália (pl. felhő- és csapadékképződés folyamatok).
- A magas szintű *PV* anomália (pl. tropopauza szakadás).

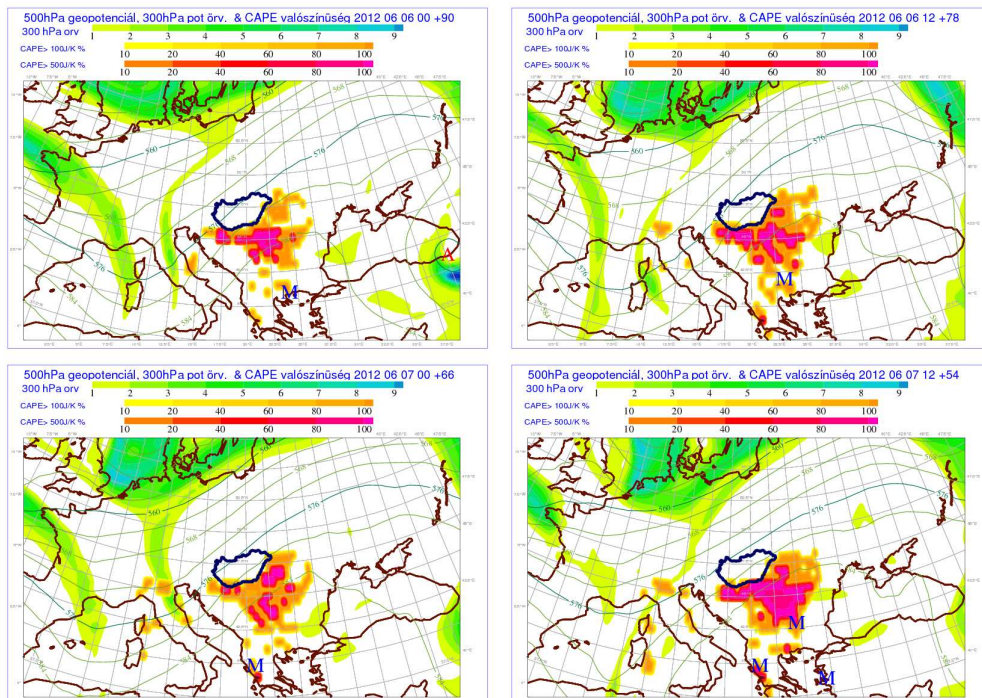
Vagyis a 2012. június 6-i és június 9-i időszak között futott modell előrejelzések alapján a pozitív örvényesség jól kirajzolja a ciklon helyzetét.



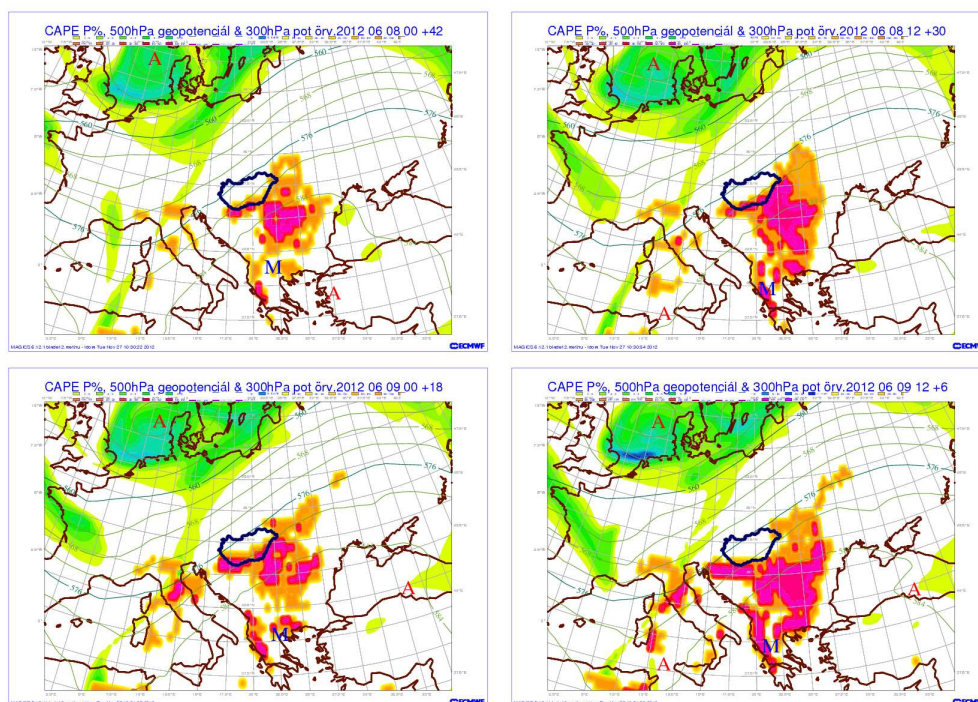
26. ábra: 500 hPa-os geopotenciál, konvektív csapadék (kék) 100 J/kg (sárgás) és 500 J/kg (rózsaszínes) CAPE értéket meghaladó valószínűségi térkép a 2012. június 6-án és 7-én készült ensemble előrejelzések alapján



27. ábra: 500 hPa-os geopotenciál, konvektív csapadék (kék) 100 J/kg (sárgás) és 500 J/kg (rózsaszínes) CAPE értéket meghaladó valószínűségi térkép a 2012. június 8-án és 9-én készült ensemble előrejelzések alapján.



28. ábra: 500 hPa-os geopotenciál, 300 hPa-os potenciális örvényesség (világos zöld), 100 J/kg (sárgás) és 500 J/kg (rózsaszínes) CAPE értéket meghaladó valószínűségi térkép a 2012. június 6-i és 7-i ensemble előrejelzések alapján.

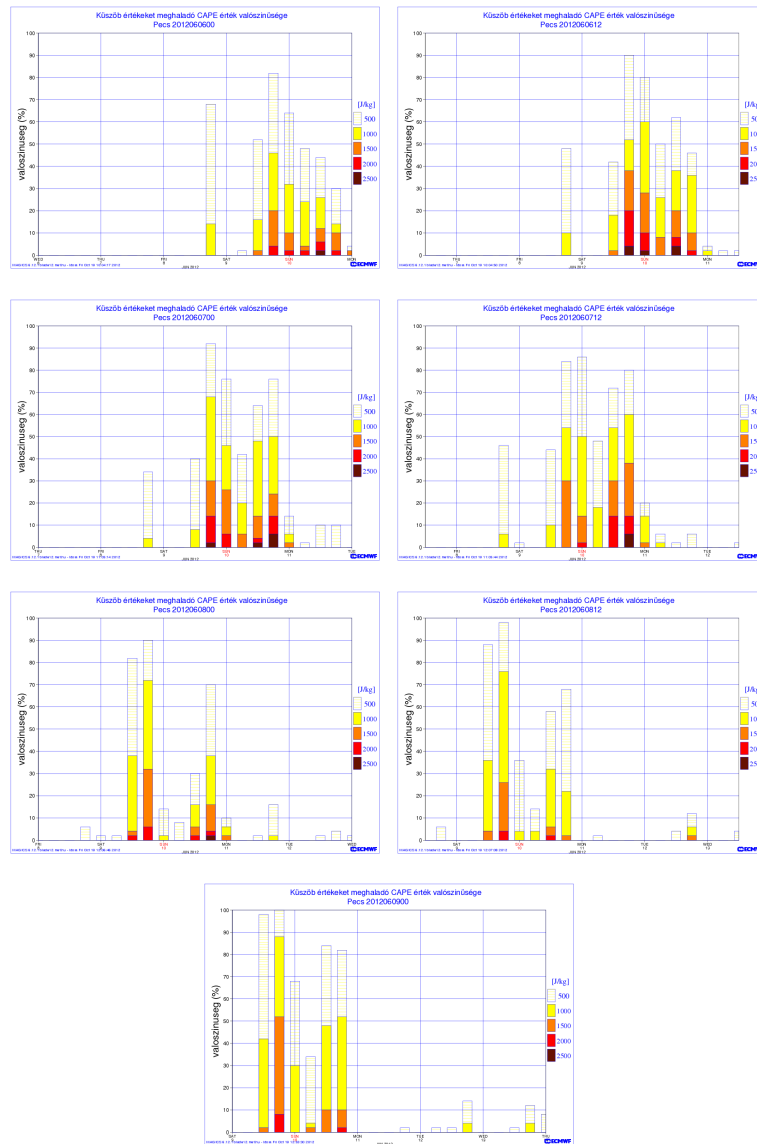


29. ábra: 500 hPa-os geopotenciál, 300 hPa-os potenciális örvényesség (világos zöld), 100 J/kg (sárgás) és 500 J/kg (rózsaszínes) CAPE értéket meghaladó valószínűségi térkép a 2012. június 8-i és 9-i ensemble előrejelzések alapján.

4.1.2. Előre definiált küszöbértékeket meghaladó valószínűségek időbeli menete

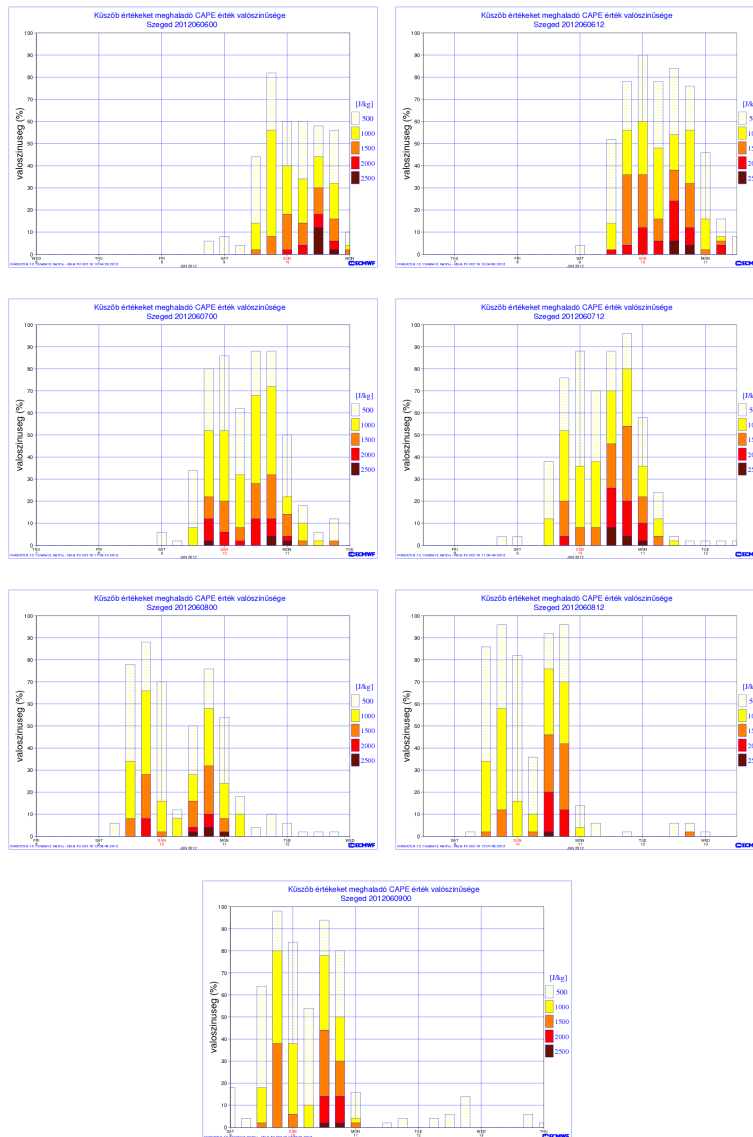
Második lépésben város szerint végeztem pontbeli vizsgálatokat 2012. június 6. és 2012. június 9. között ensemble előrejelzés alapján a 3.2 fejezetbeli új módszer segítségével. 12 városra készítettem el a diagramokat, de a terjedelmi korlátok miatt csak két városra – Pécsre és Szegedre – vonatkozó eredményeket szeretném ismertetni.

A Pécsre vonatkozó előrejelzésekben (30. ábra) a legmagasabb CAPE értékek a vizsgált 2012. június 9-i esemény utáni, azaz 2012. június 9. 18 UTC és 2012. június 10. 18 UTC közötti időszakban jelennek meg. A 2012. június 9-re vonatkozóan is mindig megjelenik 500 J/kg feletti valószínűség.



30. ábra: Az 500, 1000, 1500, 2000 és 2500 J/kg CAPE értéket meghaladó valószínűségi diagramok Pécsre a 2012. június 6. és június 9. közötti ensemble előrejelzések alapján

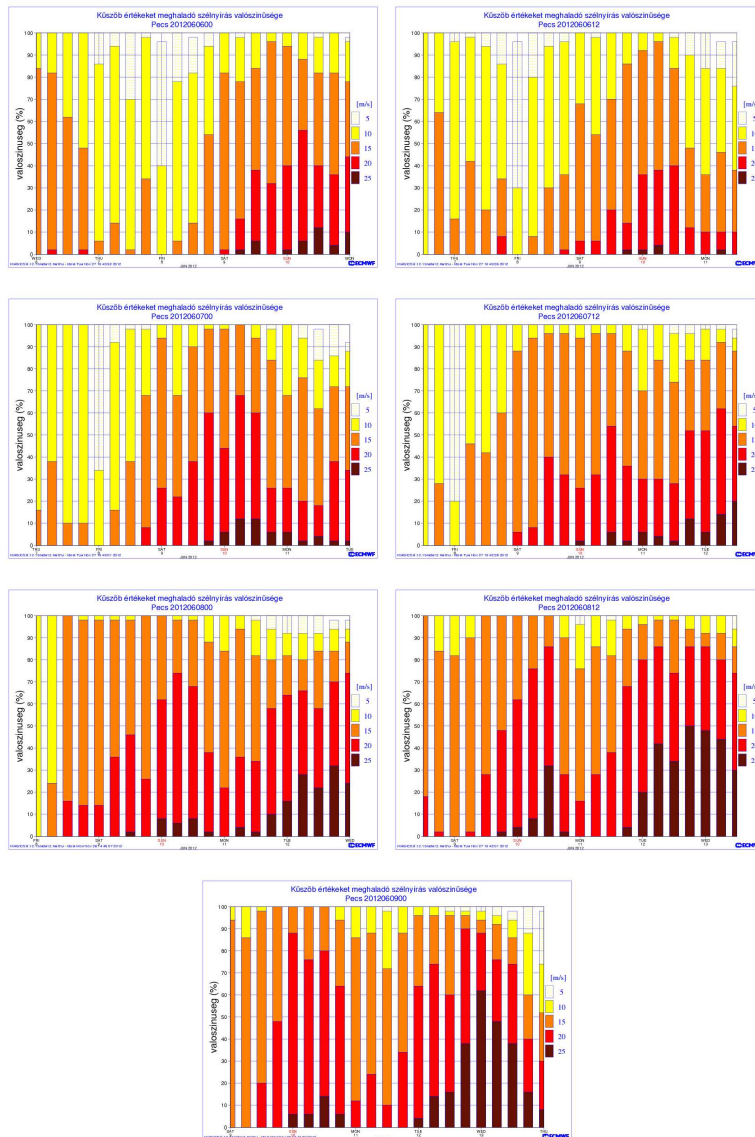
Szeged térségében (31. ábra) CAPE értékek valószínűsége 2012. június 9-től szintén megnövekszik, itt viszont nagyobb valószínűséggel és több alkalommal jelennek meg a 2000 és 2500 J/kg feletti értékek. 2012. június 6-án készült előrejelzésekben, pedig a 2500 J/kg-os CAPE értékek valószínűsége lecsökken. A 2012. június 7. 12 UTC-kor és 2012. június 8. 12 UTC-kor készült előrejelzések nagy valószínűséggel adnak nagyon magas CAPE értékeket.



31. ábra: Az 500, 1000, 1500, 2000 és 2500 J/kg CAPE értéket meghaladó valószínűségi diagramok Szegedre a 2012. június 6. és június 9. közötti ensemble előrejelzések alapján

A másik ilyen paraméter, amit valószínűségi diagrammal vizsgáltam, hogy megnézzem az időbeli változását a különböző küszöbökkel, az a szélnyírás. A két város, ahol megvizsgáltam a szélnyírás erősségeinek különböző valószínűségét szintén Pécs és Szeged (32. és 33. ábra).

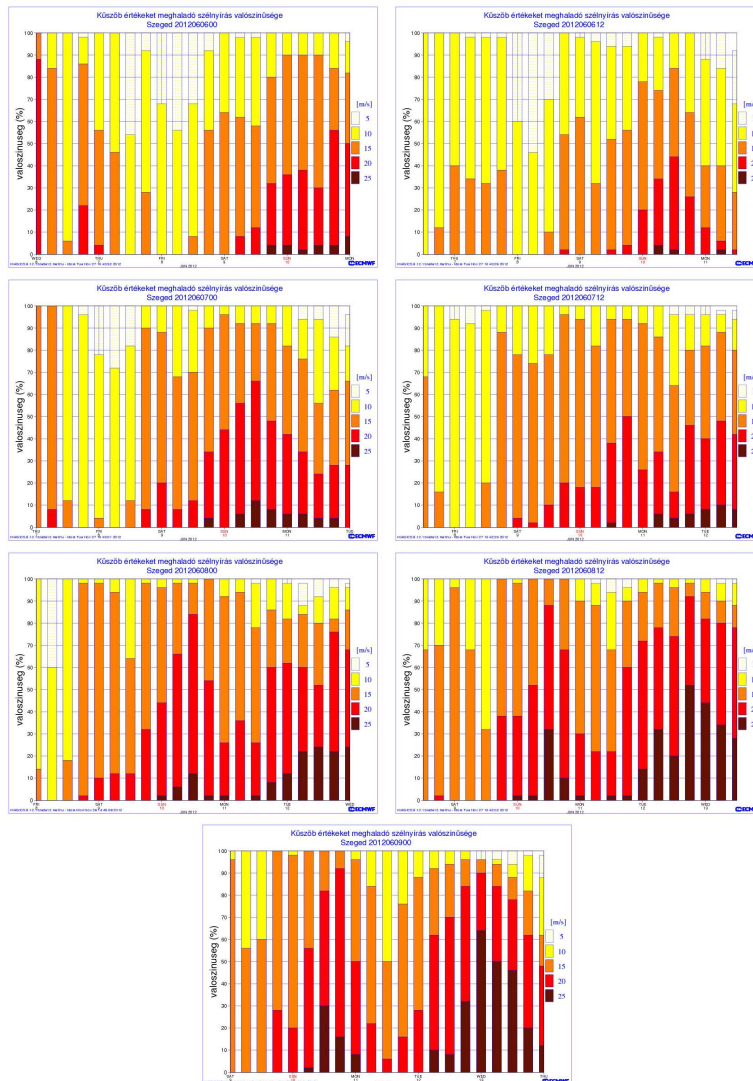
Pécsre megfigyelve a szélnyírás értékeket (32. ábra) jól látható, hogy már 2012. június 01-i 00 UTC-s modellfuttatás is az esemény bekövetkezésekor magas szélnyírás értékeket jelzett előre, melynek valószínűsége az idővel egyre nőtt és az extrém erősségű 20 m/s-nél magasabb értékek valószínűsége is megjelenik.



32. ábra: Az 5, 10, 15, 20 és 25 m/s szélnyírás értéket meghaladó valószínűségi diagramok Pécsre a 2012. június 6. és június 9.

között készült ensemble előrejelzések alapján

Szegedre is megvizsgálva a szélnyírás valószínűségeket (33. ábra) megfigyelhető, hogy itt a szélnyírás értékek még nagyobbak, mint Pécs esetében és sokkal valószínűbben adja a modell a 25 m/s-os értéknél nagyobb szélnyírásokat. Ezek a modell valószínűségek az esemény időpontjához közeledve egyre növekednek.

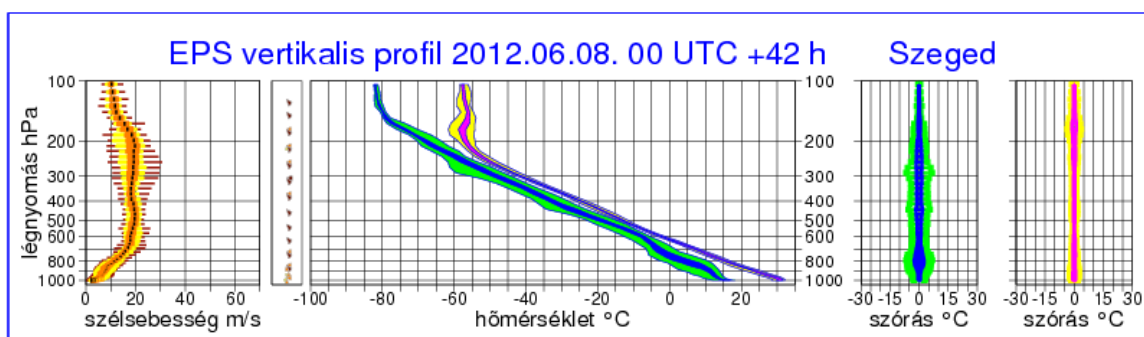


33. ábra: Az 5, 10, 15, 20 és 25 m/s szélnyírás érték meghaladó valószínűségi diagramok Szegedre a 2012. június 6. és június 9. között készült ensemble előrejelzések alapján

4.1.3. Ensemble vertikális profilok

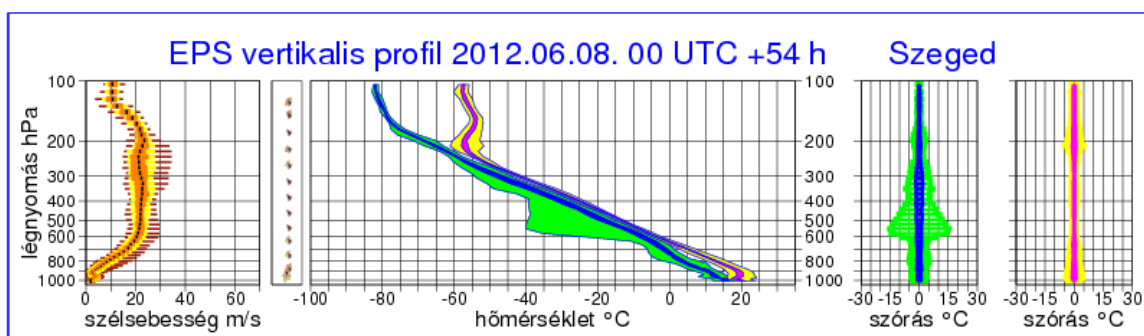
Továbbiakban a hőmérséklet, a harmatpont valamint a szél- irány és sebesség viszonyát ensemble vertikális profilok segítségével vizsgálom (34. ábra). Itt a hőmérséklet és szélesebbég alakulását láthatjuk az egyes nyomásszinteken, hőmérséklet (rózsaszín és sárga) mellett a relatív nedvesség alakulása is látható (zöld és kék). Az ábra jobb oldalán a hőmérséklet és a nedvesség előrejelzés bizonytalansága, szórása látszik. Kékkel illetve lilával feltüntetve az alsó és felső kvartilis közé eső tagokat.

A 34-36. ábrákon a 2012. június 8. 00 UTC-kor Szegedre készített +42, +54, +66 órás ensemble vertikális profilok látszanak. Megfigyelhető, hogy a 2012. június 8. 00 UTC-s előrejelzés esetében a 2012. június 9. 18 UTC-kor a hőmérsékletben nem jelentős, de szélsébségben nagy változás jelentkezik. A szélsébségnél a 18 UTC-kor a felsőbb szinteken a boxplot kiszélesedik. 12 órával később a szélsébség a 200-300 hPa-os szinteken megerősödik és a bizonytalanság megnő. A hőmérséklet változása viszonylag stabil marad. A harmatpontban az 500 hPa szint körül kiszáradás, míg az 400 hPa szintnél nedvesedés észlelhető, mely erősíti az intenzív konvekciót. A két szint közötti különbség 12 órával később már kevésbé intenzív.



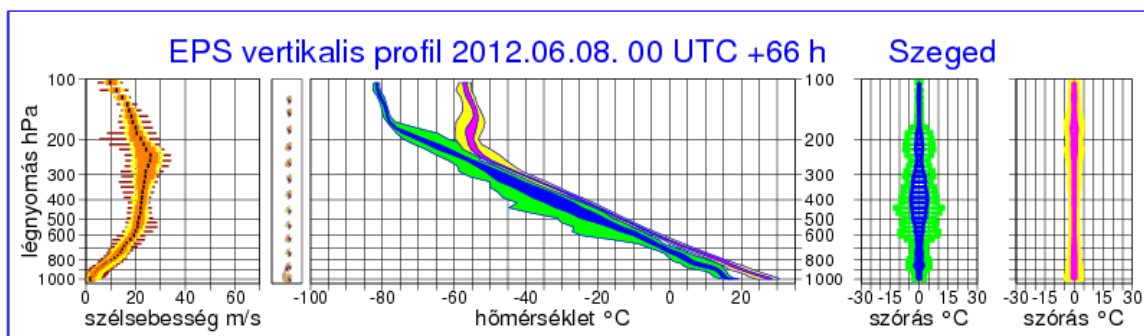
34. ábra: Hőmérséklet, harmatpont valamint szél- irány és sebesség ensemble vertikális profil előrejelzés Szegedre.

Az előrejelzés készült: 2012. június 8. 00 UTC-kor (időtáv: +42 h)



35. ábra: Hőmérséklet, harmatpont valamint szél- irány és sebesség ensemble vertikális profil előrejelzés Szegedre.

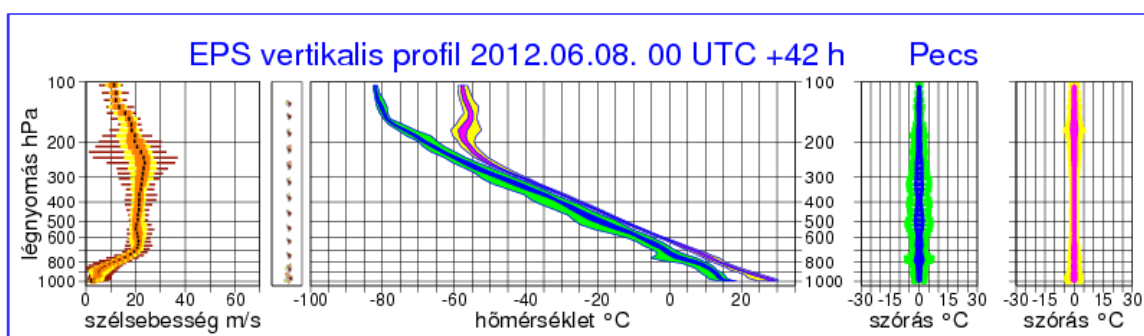
Az előrejelzés készült: 2012. június 8. 00 UTC-kor (időtáv: +54 h)



36. ábra: Hőmérséklet, harmatpont valamint szél- irány és sebesség
ensemble vertikális vertikális profil előrejelzés Szegedre.

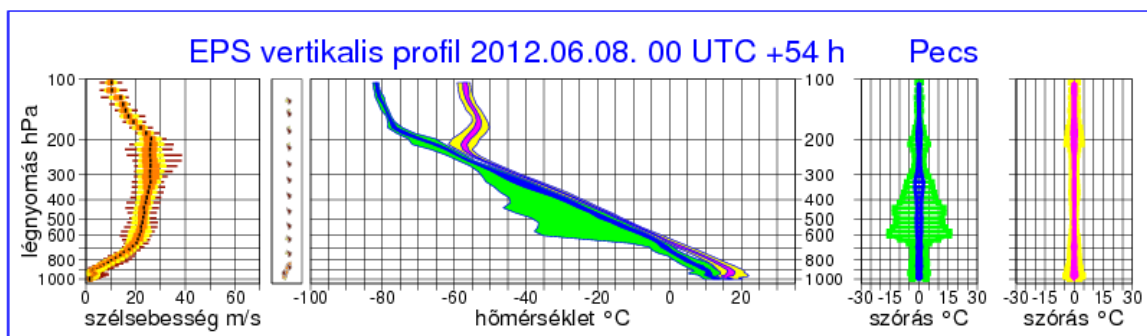
Az előrejelzés készült: 2012. június 8. 00 UTC-kor (időtáv: +66 h)

A 37-39. ábrákon a 2012. június 8. 00 UTC-kor Pécsre készített +42, +54, +66 órás ensemble vertikális profilok látszanak. Megfigyelhető, hogy a 2012. június 8. 00 UTC-s előrejelzés esetében a 2012. június 9. 18 UTC-kor a hőmérsékletben nem jelentős, de szélsebességben nagy változás jelentkezik. A szélsebességnél a 18 UTC-kor a felsőbb szinteken a boxplot alsó és felső kvartilise kicsit kiszélesedik. 12 órával később a szélsebesség a 200-300 hPa-os szinteken megerősödik és a bizonytalanság megnő. A hőmérséklet változása viszonylag stabil marad. A harmatpontban az 500 hPa szint körül kiszáradás. A két szint közötti különbség 12 órával később már kevésbé intenzív.



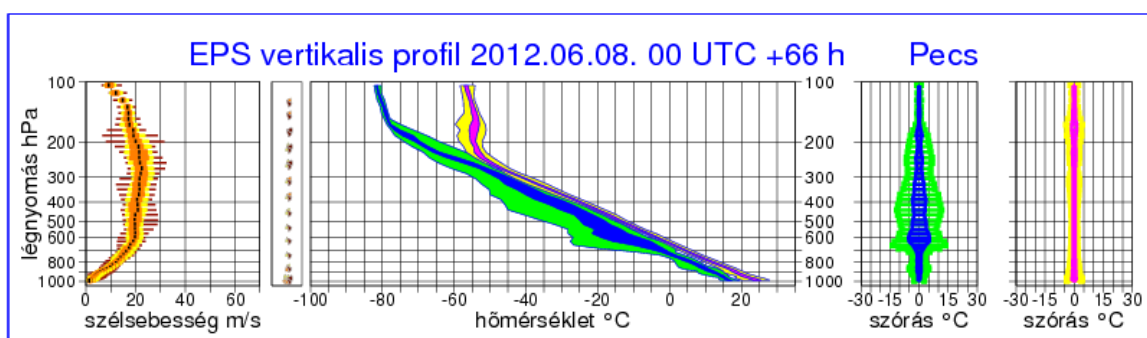
37. ábra: Hőmérséklet, harmatpont valamint szél- irány és sebesség
ensemble vertikális vertikális profil előrejelzés Pécsre.

Az előrejelzés készült: 2012. június 8. 00 UTC-kor (időtáv: +42 h)



38. ábra: Hőmérséklet, harmatpont valamint szél- irány és sebesség ensemble vertikális vertikális profil előrejelzés Pécsre.

Az előrejelzés készült: 2012. június 8. 00 UTC-kor (időtáv: +54 h)



39. ábra: Hőmérséklet, harmatpont valamint szél- irány és sebesség ensemble vertikális vertikális profil előrejelzés Pécsre.

Az előrejelzés készült: 2012. június 8. 00 UTC-kor (időtáv: +66 h)

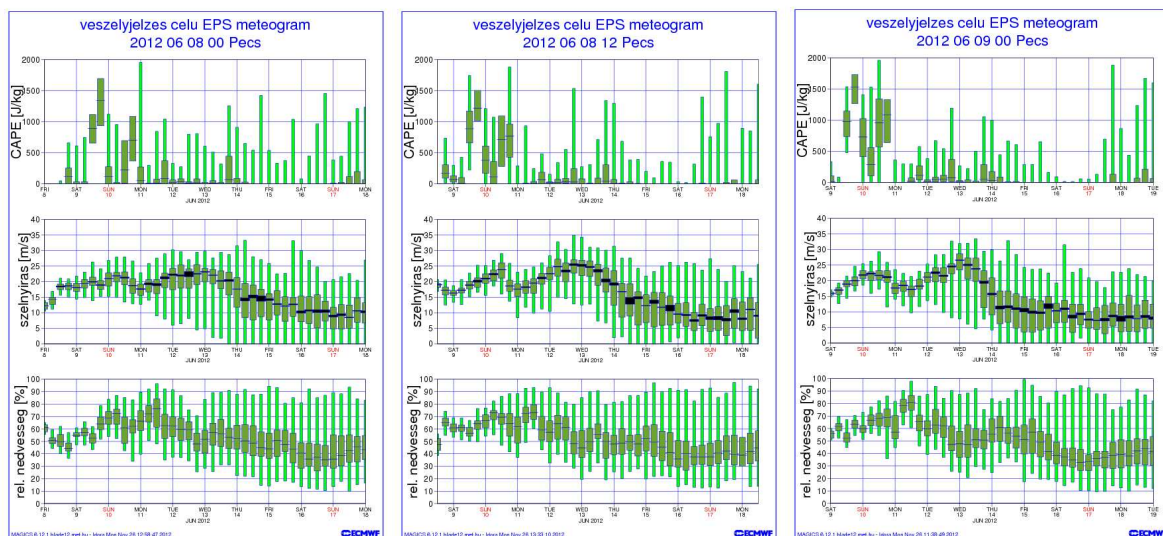
4.1.4. Ensemble meteogramok

Végezetül megvizsgáltam a CAPE, szélnyírás és relatív nedvesség időbeli változását és viszonyát veszélyjelzés céljából készült EPS meteogramok segítségével (40-41. ábra) a többi vizsgálatokhoz hasonlóan a két kiválasztott városra.

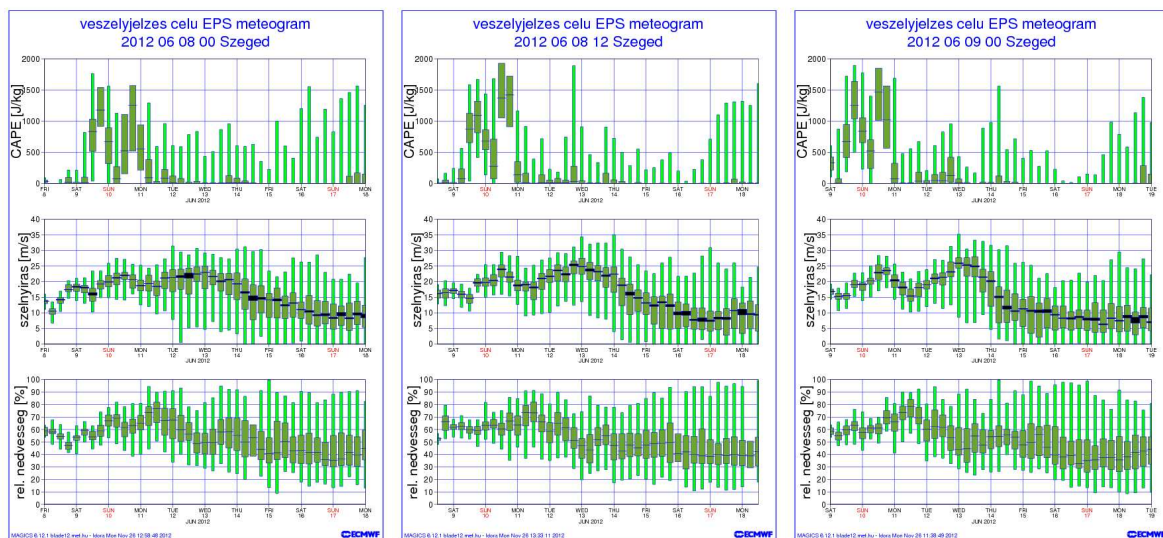
A 2012. június 8. és 9. között Pécsre készített EPS meteogramokon (40. ábra) a CAPE érték a délelőtti órákhoz képest hirtelen nagy valószínűséggel megnövekszik 1500 és 2000 J/kg-os értékeket a 2012. június 9-ére. A szélnyírásnál és a relatív nedvességnél szintén 2012. június 9-én láthatunk megnövekedett boxplotokat.

A 2012. június 8. és 9. között Szegedre készített EPS meteogramokon (41. ábra) a 1500 és 2000 J/kgot meghaladó CAPE értékek valószínűsége egyre nagyobb az eseményhez

időben közelebb készült előrejelzésekben. A szélnyírásnál és a relatív nedvességnél szintén 2012. június 9-én lokális maximumot láthatunk, és itt lényegesen nagyobb különbség, mint Pécs térségében.



40. ábra: CAPE, szélnyírás és relatív nedvesség EPS meteogram Pécsre, az előrejelzés készítés ideje: 2012. június 8. 00 és 12 UTC és 2012. június 9 00 UTC



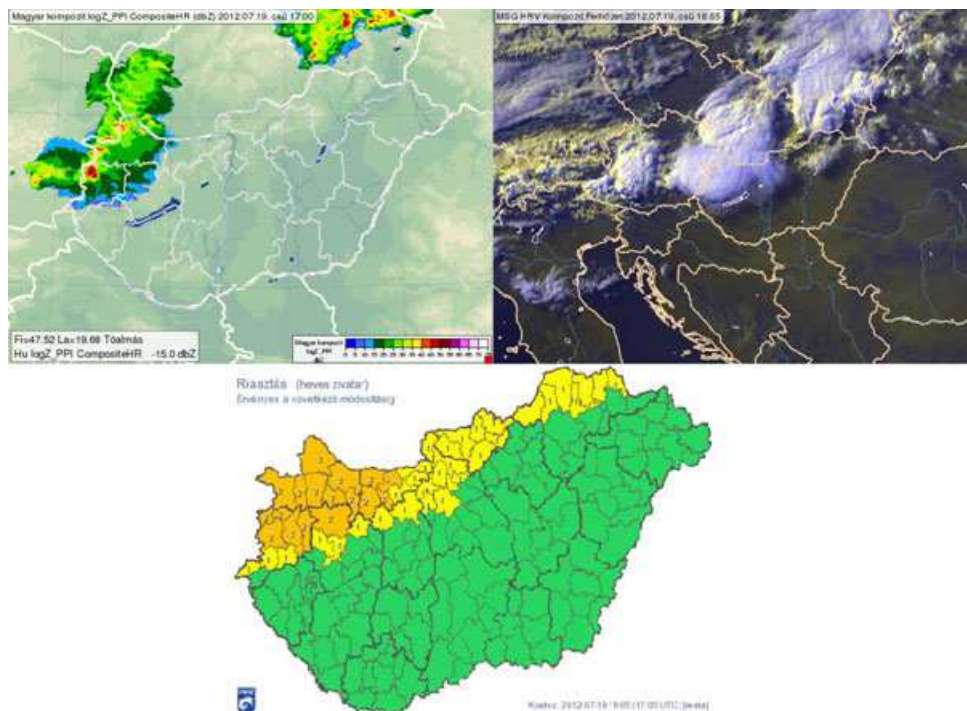
41. ábra: CAPE, szélnyírás és relatív nedvesség EPS meteogram Szegedre, az előrejelzés készítés ideje: 2012. június 8. 00 és 12 UTC és 2012. június 9 00 UTC

4.2 Gyors mozgású zivatarrendszer károkozó szélrohamokkal

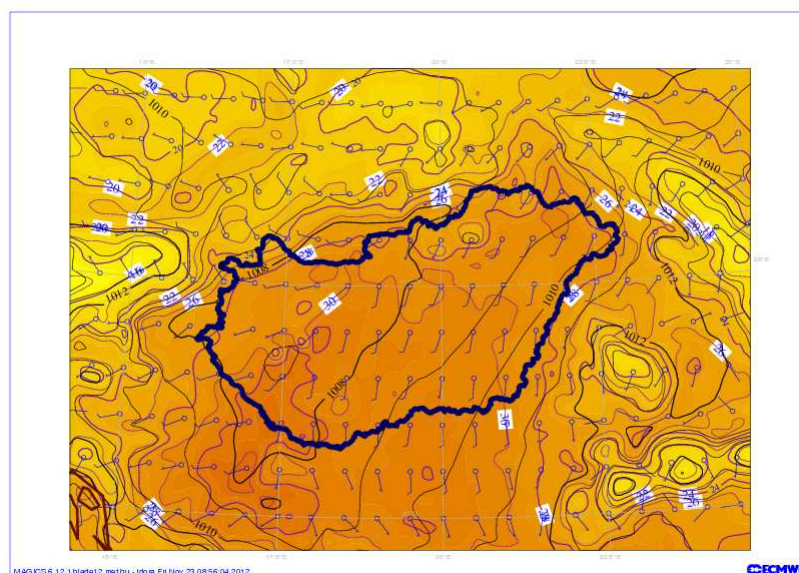
2012. július 19-én este nyugatról kelet felé egy gyors mozgású zivatar láncolat vonult át az ország északi és keleti része fölött. A rendszer vonulását sokfelé viharos szellőkések kísérték. (OMSZ, 2012a.) Az Északnyugat-Európa felett elhelyezkedő ciklonrendszer előoldalán egy hullámozó frontzóna érte el a Kárpát-medence térségét a késő délutáni, esti órákban. A hidegfronti szakaszon, illetve közvetlenül előtte a labilis légkörben, erős szélnyírási értékekkel (a szélsősebesség magassággal történő jelentős megváltozása) jellemzett környezetben több helyen zivatarok, helyenként heves zivatarok alakultak ki előbb Ausztria és Szlovákia térségében. A kialakult zivatarok este 7 órára elérték az ország északnyugati részét (42. ábra).

A front előtt napközben meleg és meglehetősen száraz levegő áramlott a Kárpát-medencébe, amelyet jól mutat, hogy este 7 órakor is sokfelé 30-32 °C-os volt a levegő hőmérséklete, miközben 9-12 °C körül alakultak a harmatpontok (43. ábra). A Kisalföld relatíve nedvesebb környezete felől gyorsan (hőzávetőlegesen 55-70 km/h-s sebességgel) kelet felé terjedő zivatarok ezáltal egy igen száraz levegőjű környezet felé haladtak, amelynek következtében a konvektív cellák kifutószeleit nem csak a magasabb szintekről történő viharos sebességű szél lekeveredése, hanem a csapadék okozta párolgás miatti erős hűtés is erősítette.

A fronttal érkező nedvesebb levegő és az alacsonyszintű áramlási mező az ország középső részén kedvező feltételeket teremtett ahhoz, hogy a zivatarok jól szervezett gyors mozgású zivatarrendszerré (ún. instabilitási vonallá) fejlődjenek. A kialakult rendszer kelet felé helyeződött, miközben valamelyest déli irányba is terjeszkedett. (44. ábra)



42. ábra: Országos kompozit radarkép (bal felső), MSG látható tartományban készült műholdkép (jobb felső), illetve az OMSZ által kiadott időjárási riasztás az ország különböző kistérségeire 2012. július 19. 19:05-kor (17:05 UTC) (alsó)
(forrás: www.met.hu)



43. ábra: Tengerszinti légnyomás, harmatpont, az OMSZ szinoptikus meteorológiai hálózatában mért aktuális léghőmérséklet, szélirány és szélesség 2012. július 19. 19:00-kor (17:00 UTC)



44. ábra: Országos kompozit radarkép (bal felső), MSG infravörös tartományban készült műholdkép (jobb felső), – 2012. július 19. 21:00 (19:00 UTC) körül, illetve az OMSZ kiadott időjárási riasztás az ország különböző kistérségeire 2012. július 19. 21:16-kor (19:16 UTC) (alsó)
(forrás: www.met.hu)

4.2.1. Küszöbértéket meghaladó CAPE valószínűségi térképek

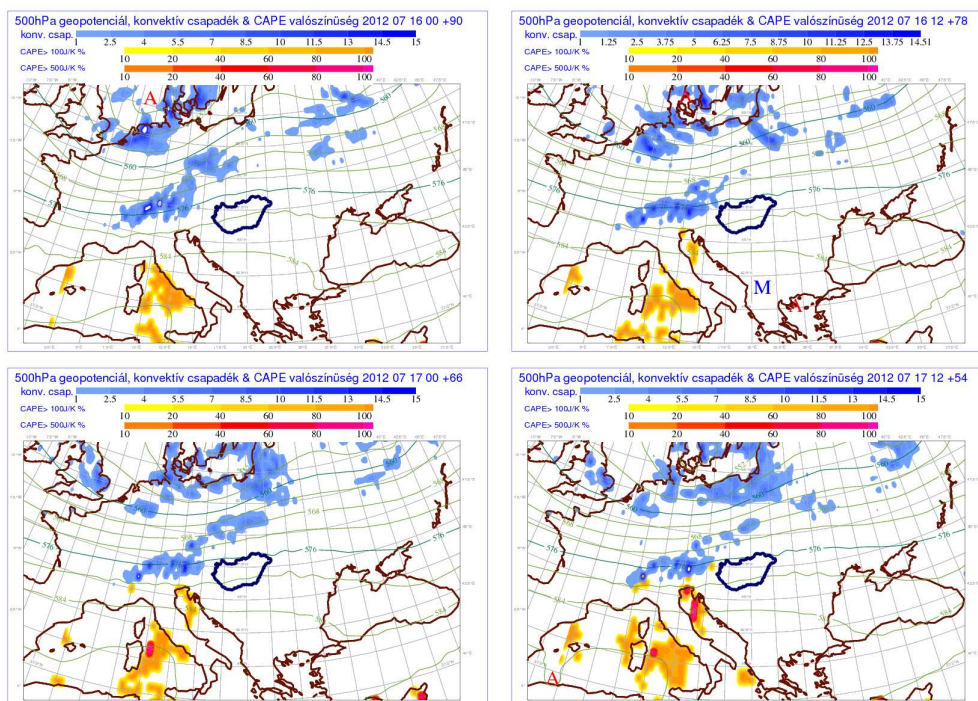
Az előző két esethez hasonlóan a 45. és 46. ábrák a 100 és 500 J/kg közötti (narancssárga) és az 500 J/kg –nál nagyobb (rózsaszín) CAPE értékek és konvektív csapadék valószínűségi térképeket mutatja a 2012. július 16. és 2012. július 19. között naponta 00 UTC-kor és 12 UTC-kor készült modell futtatások alapján. Fel vannak tüntetve még az azonos magasságú 500 hPa-os geopotenciál szintek zöld izovonalakkal ábrázolva, jelölve az alacsony és magas értékek középpontját. A célidőpont minden egyes napi prognózis esetében 2012. július 19. 18 UTC.

A 2012. július 16-án és 17-én futtatott modellek (45. ábra) Európa térségére nem jeleznek előre 100 J/kg-nál nagyobb valószínűségeket. Az 500 J/kg-nél nagyobb valószínűségű területek eloszlása egyedül a Földközi tenger, azon belül is Adriai tengernél jelenik meg.

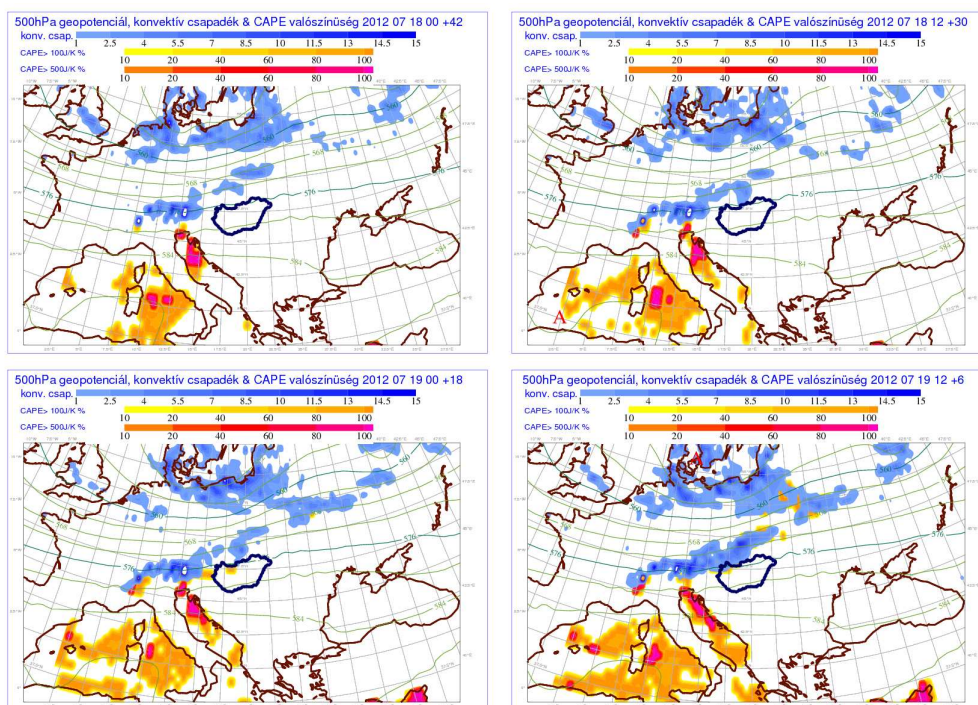
A kétnapi futtatásban jól megfigyelhető, hogy a konvektív csapadék valószínűségét a modell csak az országtól nyugatra jeleníti meg, eltérő intenzitással és nagysággal. Ennek oka valószínűleg a geopotenciál mező előrejelzésének alakulása, hiszen július 16-ára a modell Dániához közel ciklon középpontot jelez, aminek a helyzete folyamatosan változik. Így az eleinte Magyarország teknő előoldala helyett idővel egy „kisimult” geopotenciál mezőbe kerül. Ebben a két napban készült valószínűségi térkép sem adott az ország területére CAPE és konvektív csapadék valószínűségeket.

A 2012. július 18-i és 19-i modellfuttatásokban (46. ábra) viszont már megjelennek az országtól nyugatra a CAPE valószínűségi értékek és a Földközi-tengeren is nagyobb területen lehet megfigyelni magasabb CAPE valószínűségeket. 2012. július 19-i 12 UTC-s futtatáson már a Kisalföld területén megjelennek valószínűségi értékek, melyhez konvektív csapadék is társul. Az 500 hPa-os geopotenciál mező értékei nagyon nem változott ezen időszak alatt Magyarországra nézve, csak az anticiklon helyzete változott, de az sem nagymértékben.

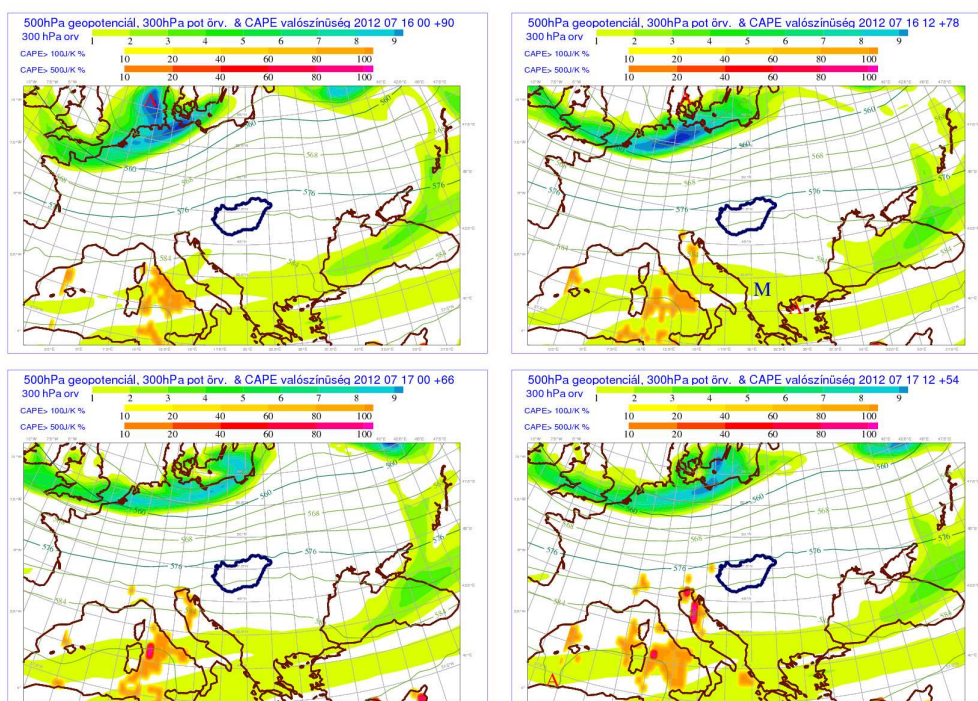
A 47. és 48. ábrákon jól látható szintén a 300 hPa-os szint pozitív örvényesség erőssége a 2012. július 19-i előrejelzéseknél az alacsony nyomású geopotenciál magasságnál helyezkedik el, a ciklon középpontjánál.



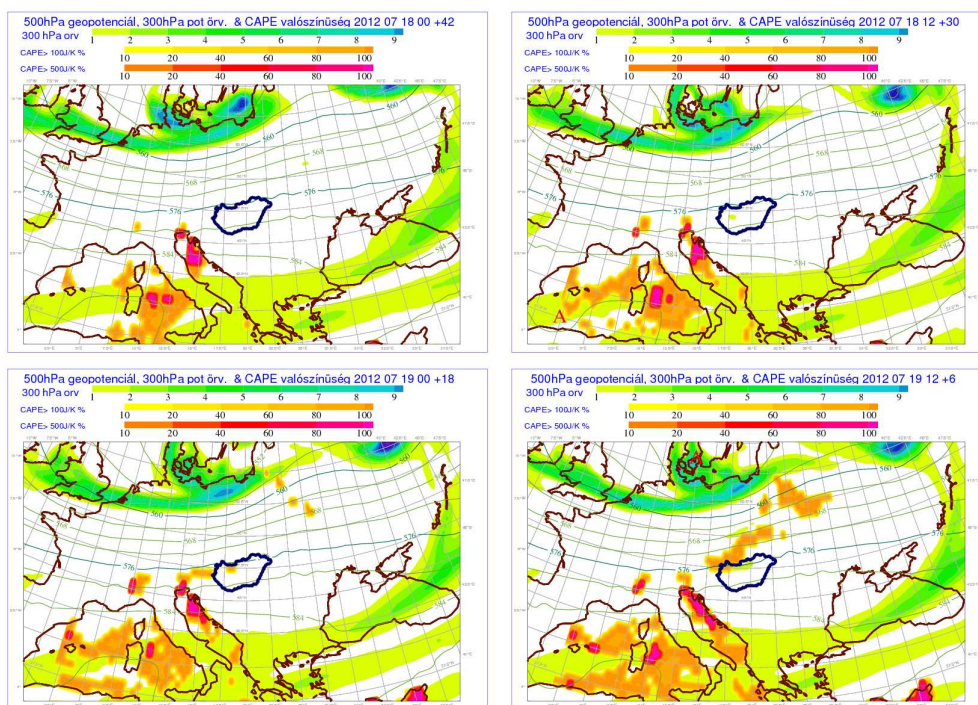
45. ábra: 500 hPa-os geopotenciál, konvektív csapadék (kék), 100 J/kg (sárgás) és 500 J/kg (rózsaszínes) CAPE értéket meghaladó valószínűségi térkép a 2012. július 16-án és 17-én készült ensemble előrejelzések alapján.



46. ábra: 500 hPa-os geopotenciál, konvektív csapadék (kék), 100 J/kg (sárgás) és 500 J/kg (rózsaszínes) CAPE értéket meghaladó valószínűségi térkép a 2012. július 18-én és 19-én készült ensemble előrejelzések alapján.



47. ábra: 500 hPa-os geopotenciál, 300 hPa-os potenciális örvényesség (világos zöld), 100 J/kg (sárgás) és 500 J/kg (rózsaszínes) CAPE értéket meghaladó valószínűségi térkép a 2012. július 16-én és 17-én készült ensemble előrejelzések alapján.



48. ábra: 500 hPa-os geopotenciál, 300 hPa-os potenciális örvényesség (világos zöld), 100 J/kg (sárgás) és 500 J/kg (rózsaszínes) CAPE értéket meghaladó valószínűségi térkép a 2012. július 18-én és 19-én készült ensemble előrejelzések alapján

4.2.2. Előre definiált küszöbértékeket meghaladó valószínűségek időbeli menete

Második lépésben város szerint végeztem pontbeli vizsgálatokat 2012. július 16. és 2012. július 19. között ensemble előrejelzés alapján a 3.2 fejezetbeli új módszer segítségével, mint a másik két eset tárgyalásában. 12 városra készítettem el a diagramokat, de a terjedelmi korlátok miatt csak egy városra – Szombathelyre – vonatkozó eredményeket szeretném ismertetni. 2012. június 4. esethez hasonlóan itt is alacsony CAPE értékekhez alacsony valószínűségek társulnak.

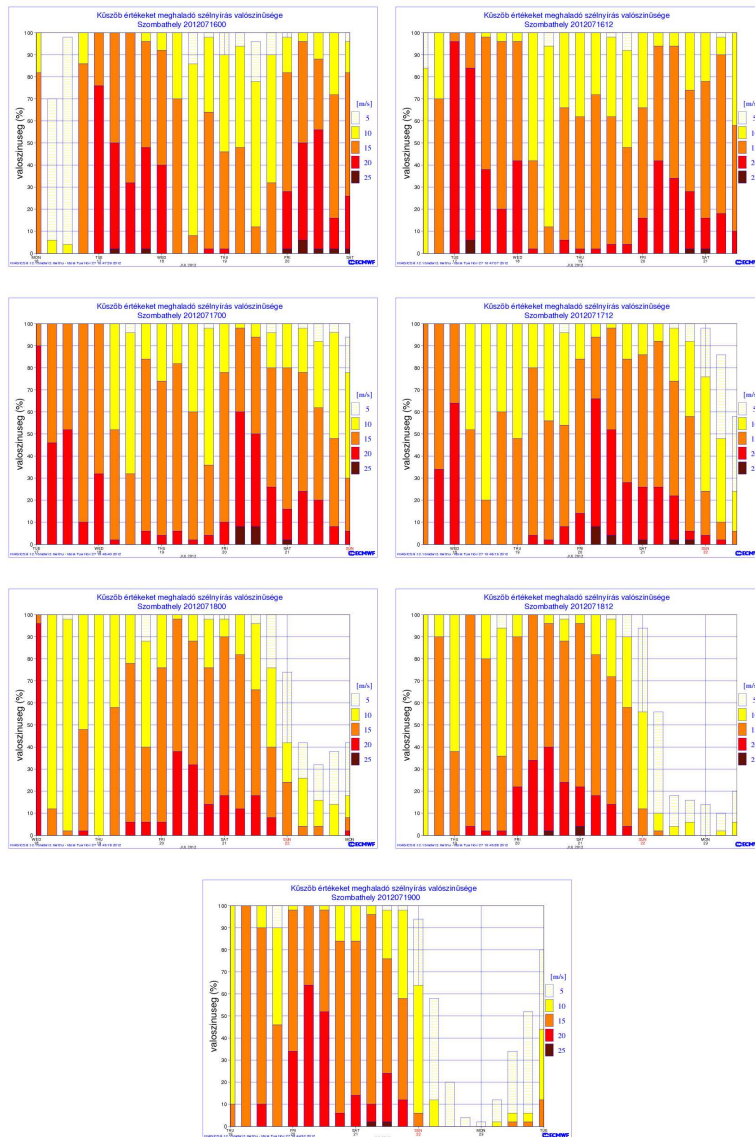
A Szombathelyre vonatkozó előrejelzésekben (49. ábra) a legmagasabb CAPE értékek a vizsgált 2012. július 19-i esemény már a 2012. július 16-i 00 UTC-s modellfutatásnál megjelenik. Majd egyre nagyobb értékek jelennek meg egyre nagyobb valószínűséggel, ahogy haladunk az időben .



49. ábra: Az 500, 1000, 1500, 2000 és 2500 J/kg CAPE értéket meghaladó valószínűségi diagramok Szombathelyre a 2012. július 16. és július 19.

között készült ensemble előrejelzések alapján

A szélnyírás értékek valószínűségét szintén megvizsgáltam (50. ábra) Szombathelyre. Jól megfigyelhető, hogy 2012. július 19-ére a modellek már a vizsgált időpontok kezdetén, vagyis 2012. július 16-án is 18 UTC-re erős szélnyírás értékeket prognosztizálnak, ami az idő folyamán egyre nagyobb valószínűséggel jeleznek előre. Viszont, hogy ha megfigyeljük az előtte és utána következő napokat, akkor látható, hogy ezekhez az értékekhez képest erősebb szélnyírásokat jósolt a modell, mint 2012. július 19. 18 UTC-re.

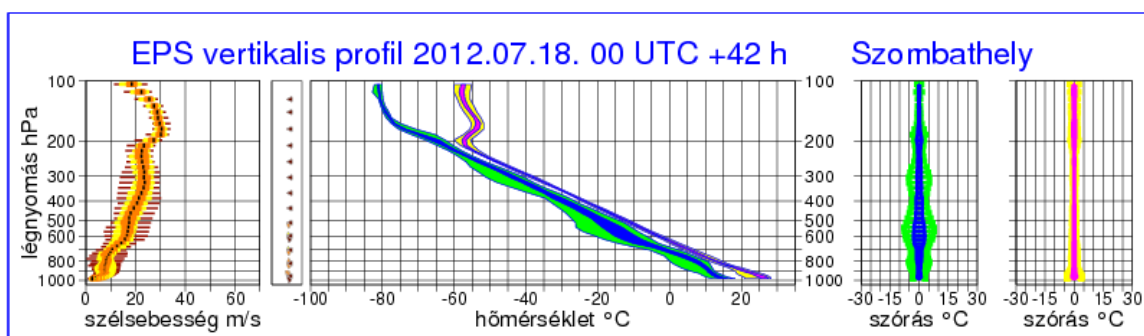


50. ábra: Az 5, 10, 15, 20 és 25 m/s szélnyírás értéket meghaladó valószínűségi diagramok Szombathelyre a 2012. július 16. és július 19. között készült ensemble előrejelzések alapján

4.2.3. Ensemble vertikális profilok

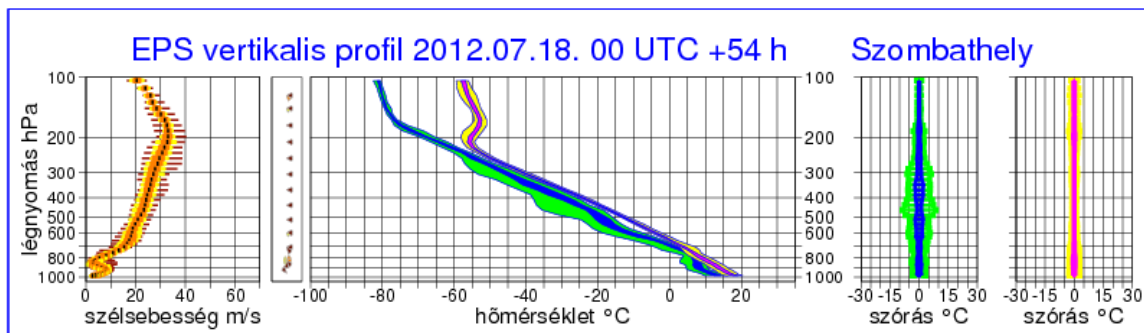
Következőekben a vertikális profilok vizsgálatát végzem modell szinteken különböző időléptékekkel. A 51-53. ábrákon a 2011. július 18. 00 UTC-kor futtatott modell látható különböző időléptékekkel (+24, +36, +48 h) Szombathelyre.

Megfigyelhető, hogy a 2012. július 18. 00 UTC-s előrejelzés esetében a 2012. július 19. 18 UTC-kor a hőmérsékletben nem jelentős, de szélsébségben nagy változás jelentkezik. A szélsébségnél a 18 UTC-kor a felsőbb szinteken a boxplot összeszűkül. 12 órával később a szélsébség a 300 hPa-os szinten megerősödik, és a bizonytalanság megnő. A hőmérséklet változása viszonylag stabil marad. A harmatpontban a szinteken sem kiszáradás, sem nedvesedés nem észlelhető nagymértékben, mely erősítene az intenzív konvekciót. A két szint közötti különbség 12 órával később sem lesz kevésbé intenzív.



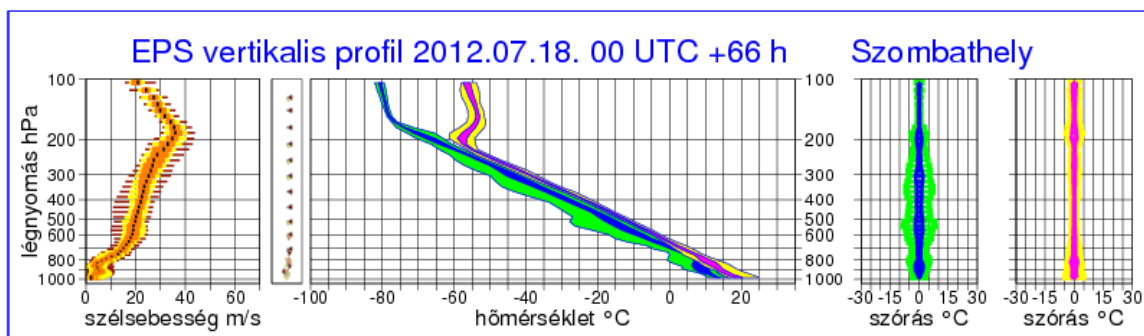
51. ábra: Hőmérséklet, harmatpont valamint szél- irány és sebesség ensemble vertikális vertikális profil előrejelzés Szombathelyre.

Az előrejelzés készült: 2012. július 18. 00 UTC-kor (időtáv: +42 h)



52. ábra: Hőmérséklet, harmatpont valamint szél- irány és sebesség ensemble vertikális vertikális profil előrejelzés Szombathelyre.

Az előrejelzés készült: 2012. július 18. 00 UTC-kor (időtáv: +54 h)

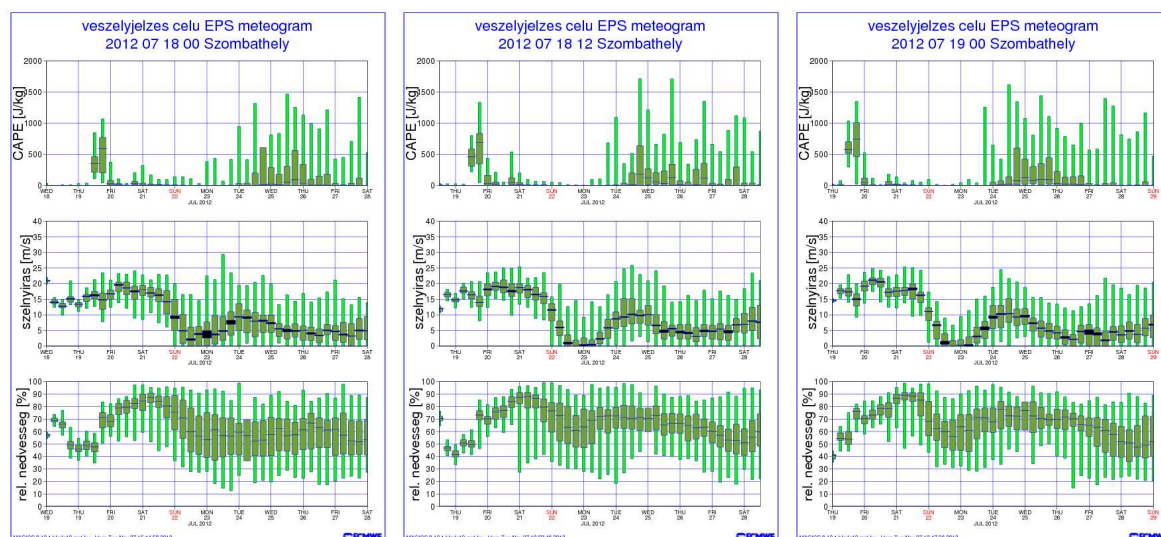


53. ábra: Hőmérséklet, harmatpont valamint szél- irány és sebesség ensemble vertikális profil előrejelzés Szombathelyre.
Az előrejelzés készült: 2012. július 18. 00 UTC-kor (időtáv: +66 h)

4.2.4. Ensemble meteogramok

Végezetül megvizsgáltam a CAPE, szélnyírás és relatív nedvesség időbeli változását és viszonyát veszélyjelzés céljából készült EPS meteogramok segítségével (54. ábra) a többi vizsgálatokhoz hasonlóan az egy kiválasztott városra.

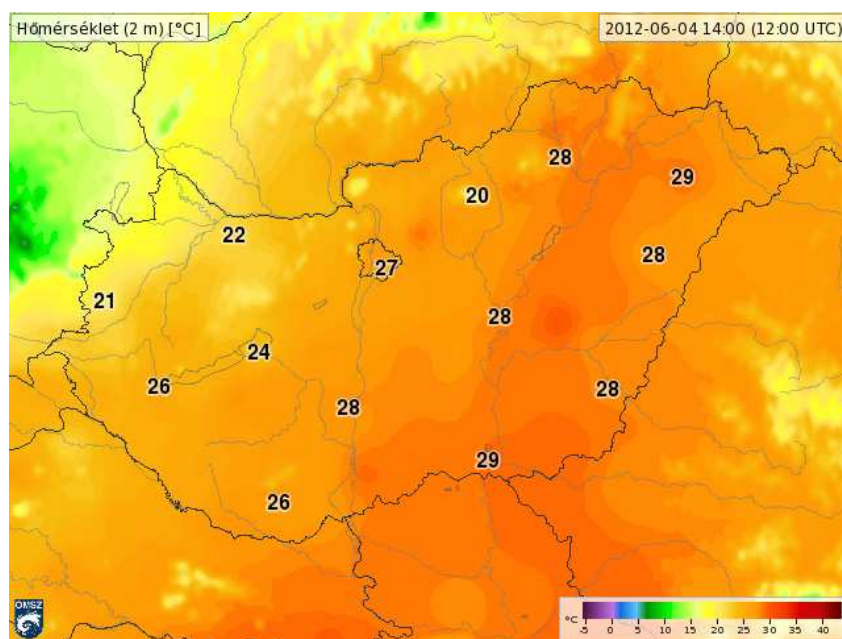
A 2012. július 18. és 19. között Szombathelyre készített EPS meteogramokon (54. ábra) a CAPE érték a délelőtti órákhoz képest hirtelen nagy valószínűséggel megnövekszik 1500 és 2000 J/kg-os értékeket a 2012. július 19-ére. A szélnyírásnál és a relatív nedvességnél szintén 2012. július 19-én láthatunk lokális maximumokat.



54. ábra: CAPE, szélnyírás és relatív nedvesség EPS meteogram Szombathelyre, az előrejelzés készítés ideje: 2012. július 18. 00 és 12 UTC és 2012. július 19. 00 UTC

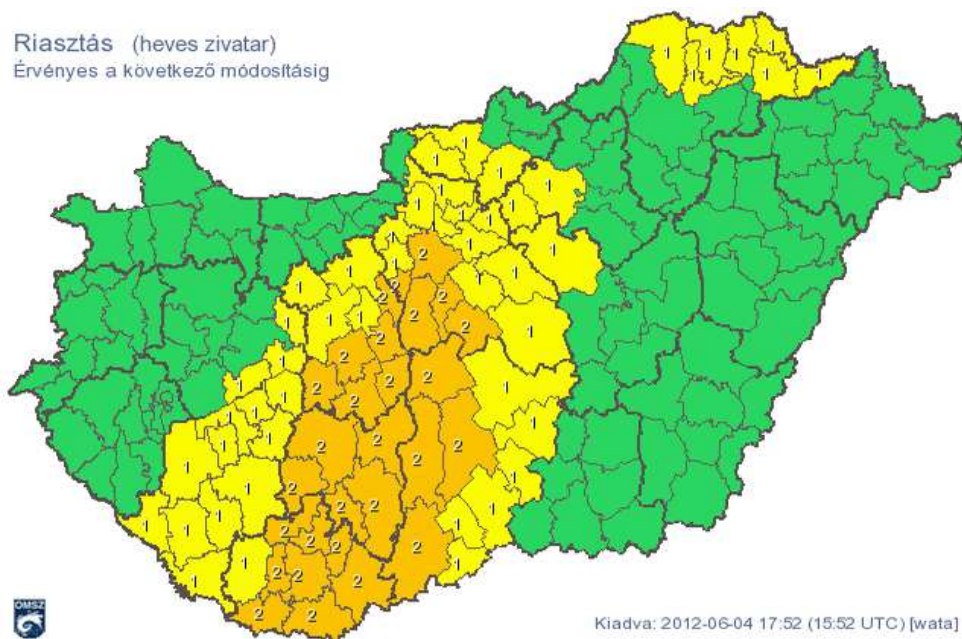
4.3 Zivataros hidegfront 2012. június 4-én

Hétfőn a délutáni órákban – az előrejelzéseknek megfelelően – heves zivatarokkal érkezett erőteljes hidegfront vonult át az ország felett. (OMSZ, 2012b.) Több helyről jelentettek károkat – beázott pincék, kidőlt fák, helyenként jégeső kísérték a zivatarrendszer útját. A front előtt még az ország nagyobb részére meleg levegő érkezett, ennek hatására délutánra sokfelé 27-30 fokig emelkedett a hőmérséklet (55. ábra). A magas kétméteres hőmérséklet labilis légállapotot eredményezett, amely kedvezett a heves záporok, zivatarok kialakulásához. Emiatt a veszélyjelző meteorológus második fokozatú (narancssárga) riasztást adott ki több térségre (56. ábra). Az előrejelzéseknek megfelelően a délutáni órákban a Dunántúlt délnyugat felől egy szervezett zivatarrendszer érte el, amely északkelet felé haladt (57. ábra). A zivatarzóna éjfél után már a Tiszántúlon volt (58. ábra). A rendszer vonulását felhőszakadás, helyenként jégeső és többfelé viharos szellőkés kísérte.

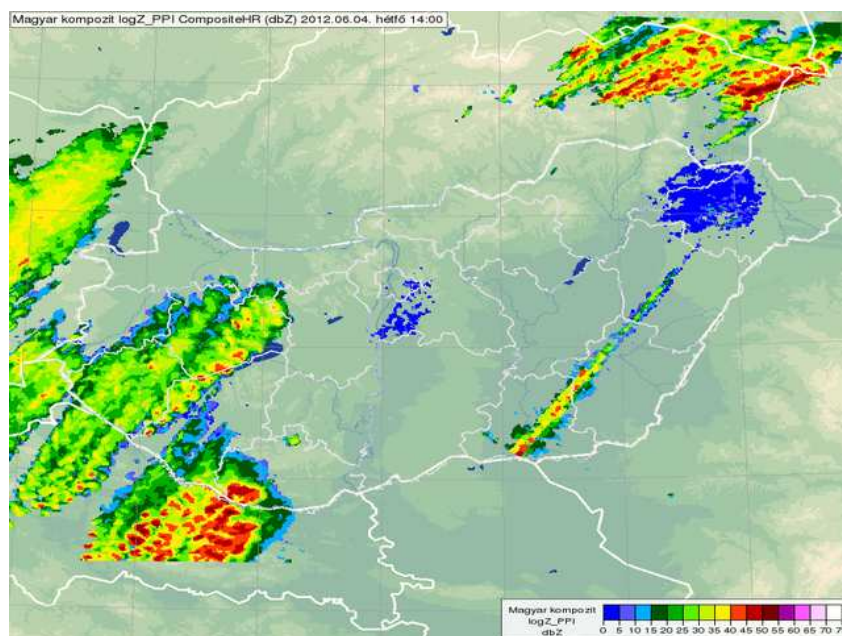


55. ábra: A hőmérséklet alakulása 2012. június 04-én, 14 HLT-kor (12 UTC-kor)

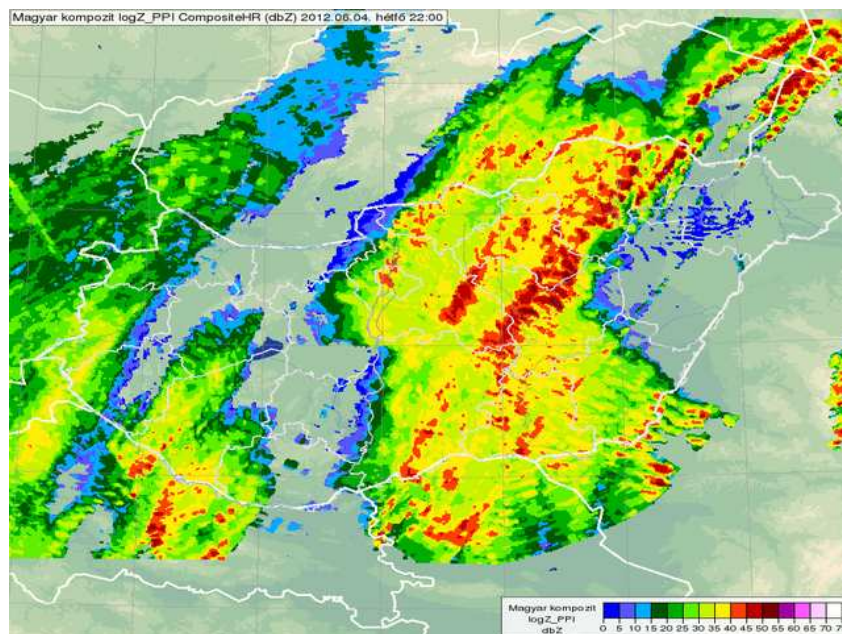
(forrás: www.met.hu)



56. ábra: A 2012. június 04-én 17:52 HLT-kor (15:52 UTC-kor) heves zivatarra kiadott riasztási térkép
(forrás: www.met.hu)



57. ábra: 4 órás időintervallumra vonatkozó összegzett maximális radarreflektivitás 2012. június 4-én 16:00 HLT-kor (14:00 UTC-kor)
(Megjegyzés: a tiszántúli radarjel nem csapadékcélokat mutat.)
(forrás: www.met.hu)



58. ábra: 4 órás időintervallumra vonatkozó összegzett maximális radarreflektivitás 2012. június 04-én 24:00 HLT-kor (22:00 UTC-kor)
(forrás: www.met.hu)

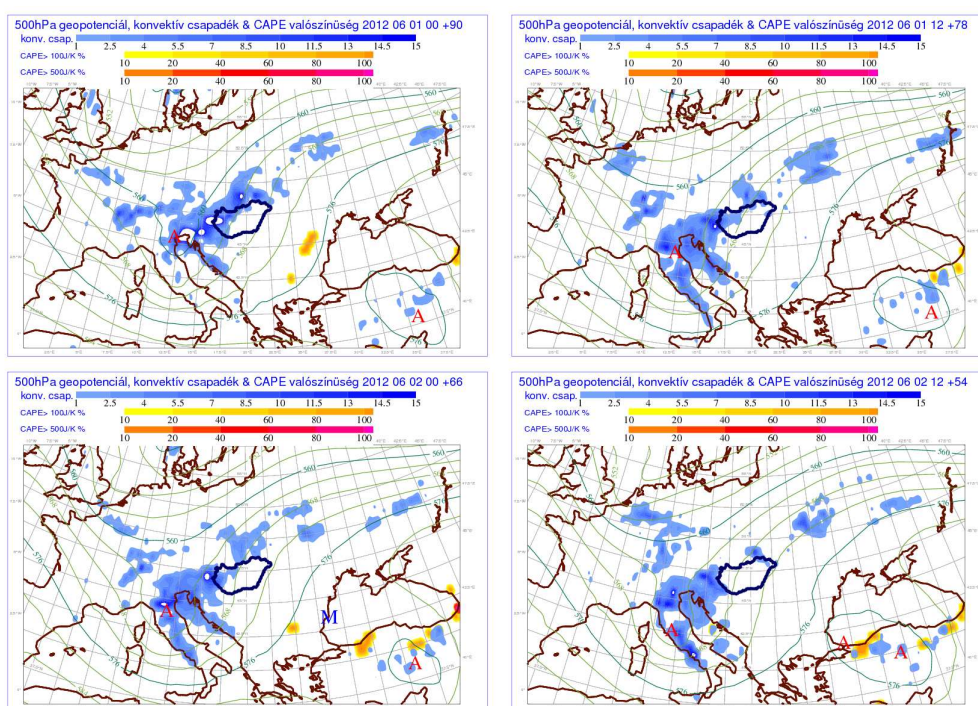
4.3.1. Küszöbértéket meghaladó CAPE valószínűségi térképek

A 59. és 60. ábrák szintén a 100 és 500 J/kg közötti (narancssárga) és az 500 J/kg –nál nagyobb (rózsaszín) CAPE értékek és konvektív csapadék valószínűségi térképeket mutatja a 2012. június 1. és 2012. június 4. között naponta 00 UTC-kor és 12 UTC-kor készült modell futtatások alapján. Fel vannak tüntetve még az azonos magasságú 500 hPa-os geopotenciál szintek zöld izovonalakkal ábrázolva, jelölve az alacsony és magas értékek középpontját. A célidőpont minden egyes napi prognózis esetében 2012. június 4. 18 UTC.

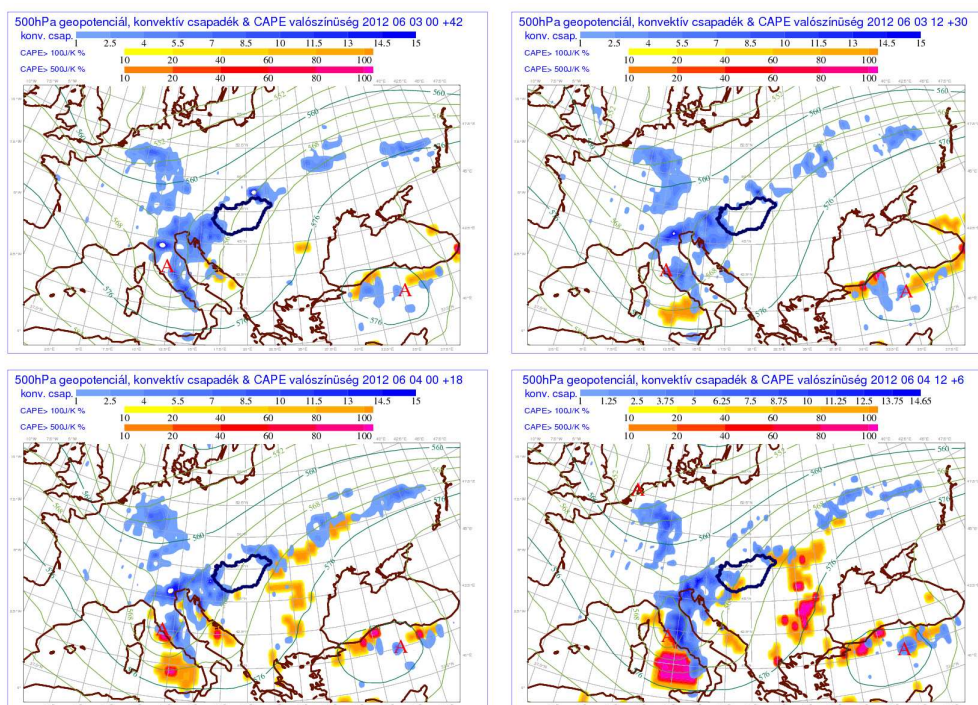
A 2012. június 1-én és 2-án futtatott modellek (59. ábra) alig jelez előre 100 J/kg értéknél magasabb CAPE értékeket, csak a Török-félszigeten és a Fekete – tengerénél van egy két kisebb terület a június 2-i modellfuttatásokban. Az 500 J/kg-nél nagyobb valószínűségű területek eloszlása meg se jelenik e két napi előrejelzésben. Viszont a két napi futtatásban jól megfigyelhető, hogy a konvektív csapadék valószínűségét a modell a Dunántúli térségbe eléggé jól jelzi előre, kivéve a június 2-ai 12 UTC-s futtatáskor. Ennek oka valószínűleg a geopotenciál mező előrejelzésének alakulása, hiszen a modellfuttatások az idő előre haladtával az Olaszország északi felében lévő alacsony nyomású ciklon középpontja egyre délebbre helyeződik át.

A 2012. június 3-i és 4-i modellfuttatásokban (60. ábra) viszont már megjelennek az országtól keletre a CAPE valószínűségi értékek, június 3-i futtatáson még csak az eddig foltokban megjelent CAPE valószínűségi értékek már egyre nagyobb értékeket mutatnak és egyre nagyobb területen helyezkednek el. A június 4-i 12 UTC-s futtatás már a Dunántúl déli részén és a keleti országrészen 100 J/kg-os értékek valószínűsége megjelenik. A konvektív csapadék valószínűsége továbbra is az ország nyugati részére jelzi a modell, és kis területen a keleti országrészre is, bár eltérő valószínűséggel. Az 500 hPa-os geopotenciál mező értékei nagyon nem változott ezen időszak alatt, csak az anticiklon helyzete változott, de az sem nagymértékben.

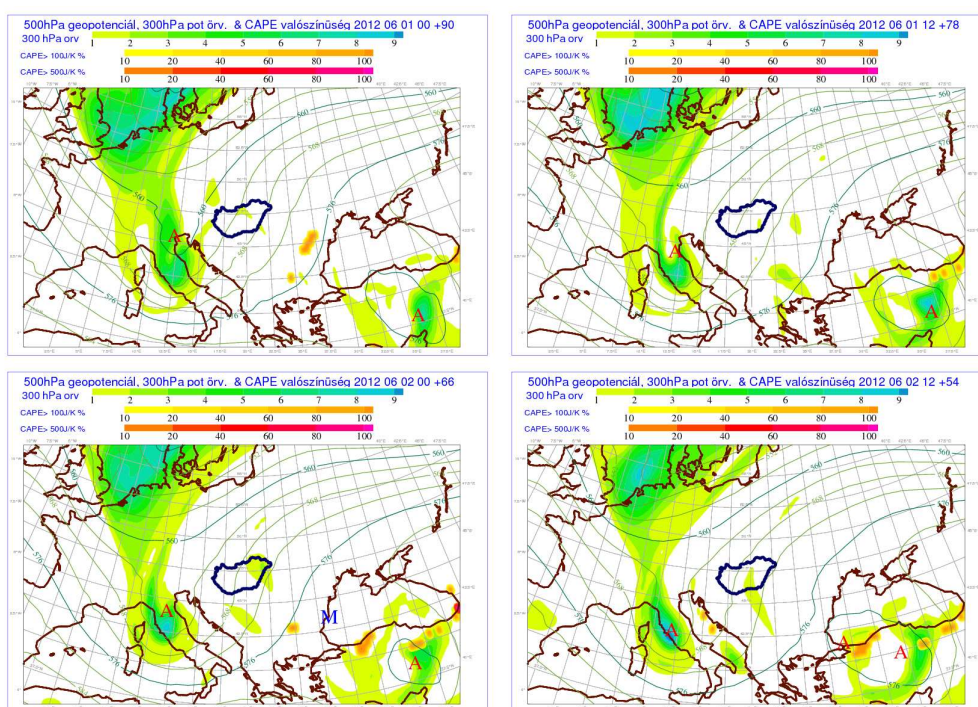
A 61. és 62. ábrákon jól látható szintén a 300 hPa-os szint pozitív örvényesség erőssége a 2012. június 4-i előrejelzéseknél az alacsony nyomású geopotenciál magasságnál helyezkedik el, a ciklon középpontjánál, ami az idővel egyre gyengébb maximumokat jelez előre.



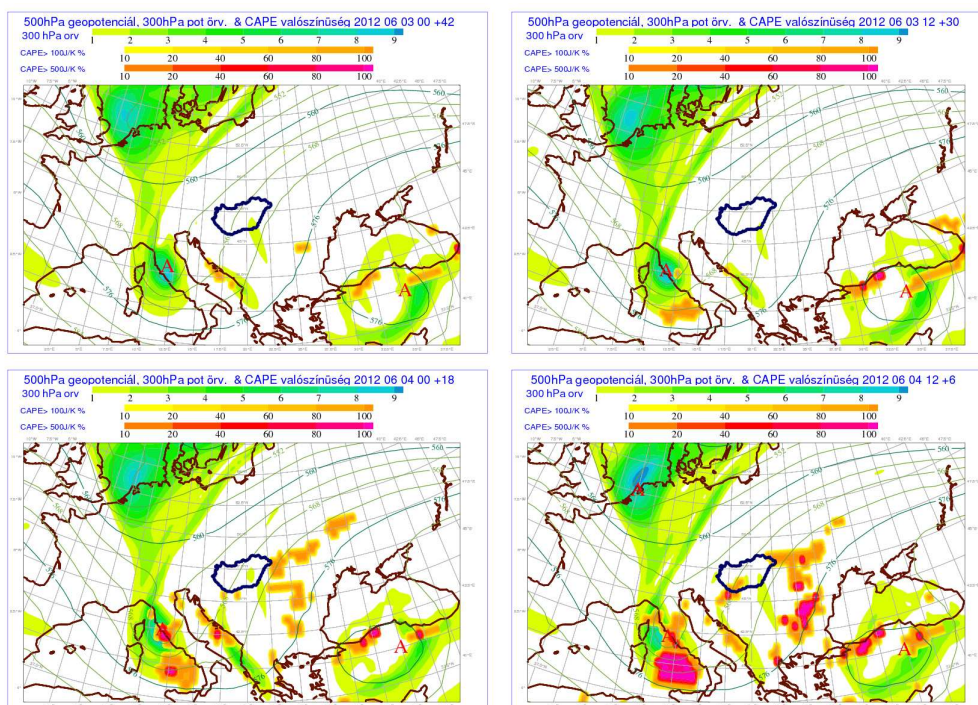
59. ábra: 500 hPa-os geopotenciál, konvektív csapadék (kék), 100 J/kg (sárgás) és 500 J/kg (rózsaszínes) CAPE értéket meghaladó valószínűségi térkép a 2012. június 1-én és 2-án készült ensemble előrejelzések alapján.



60. ábra: 500 hPa-os geopotenciál, konvektív csapadék (kék), 100 J/kg (sárgás) és 500 J/kg (rózsaszínes) CAPE értéket meghaladó valószínűségi térkép a 2012. június 3-én és 4-én készült ensemble előrejelzések alapján.



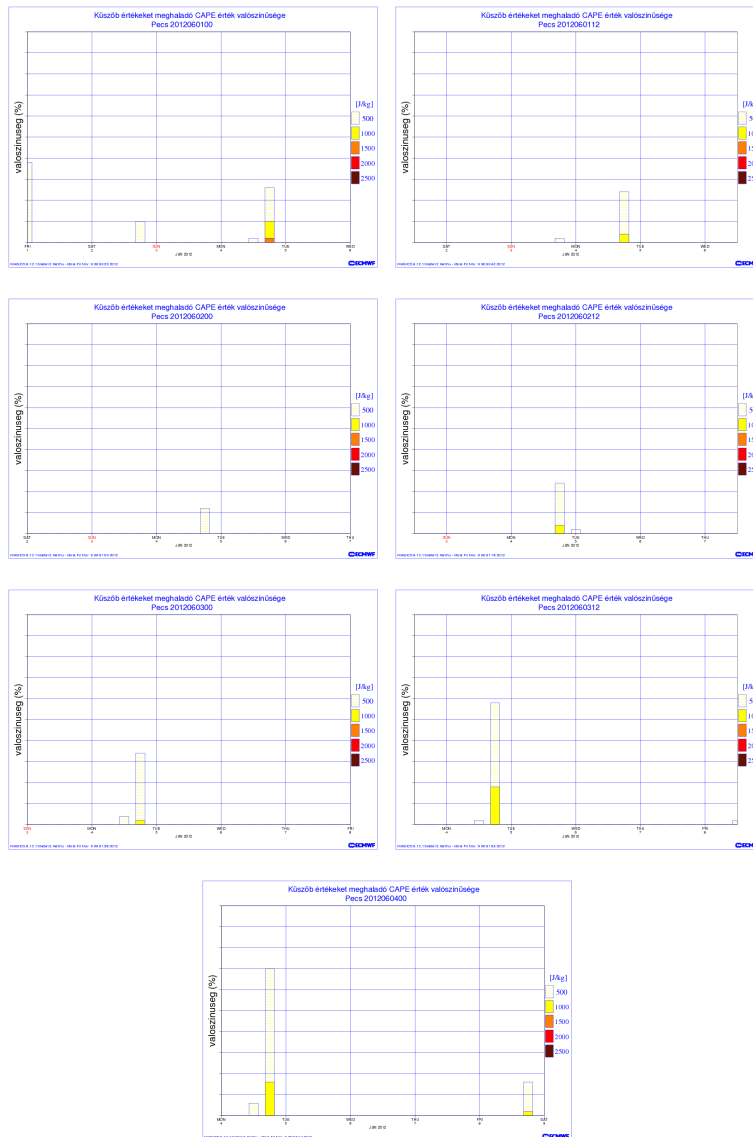
61. ábra: 500 hPa-os geopotenciál, 300 hPa-os potenciális örvényesség (világos zöld), 100 J/kg (sárgás) és 500 J/kg (rózsaszínes) CAPE értéket meghaladó valószínűségi térkép a 2012. június 1-én és 2-án készült ensemble előrejelzések alapján.



62. ábra: 500 hPa-os geopotenciál, potenciális örvényesség (világos zöld), 100 J/kg (sárgás) és 500 J/kg (rózsaszínes) CAPE érték meghaladó valószínűségi térkép a 2012. június 3-án és 4-én készült ensemble előrejelzések alapján.

4.3.2. Előre definiált küszöbértékeket meghaladó valószínűségek időbeli menete

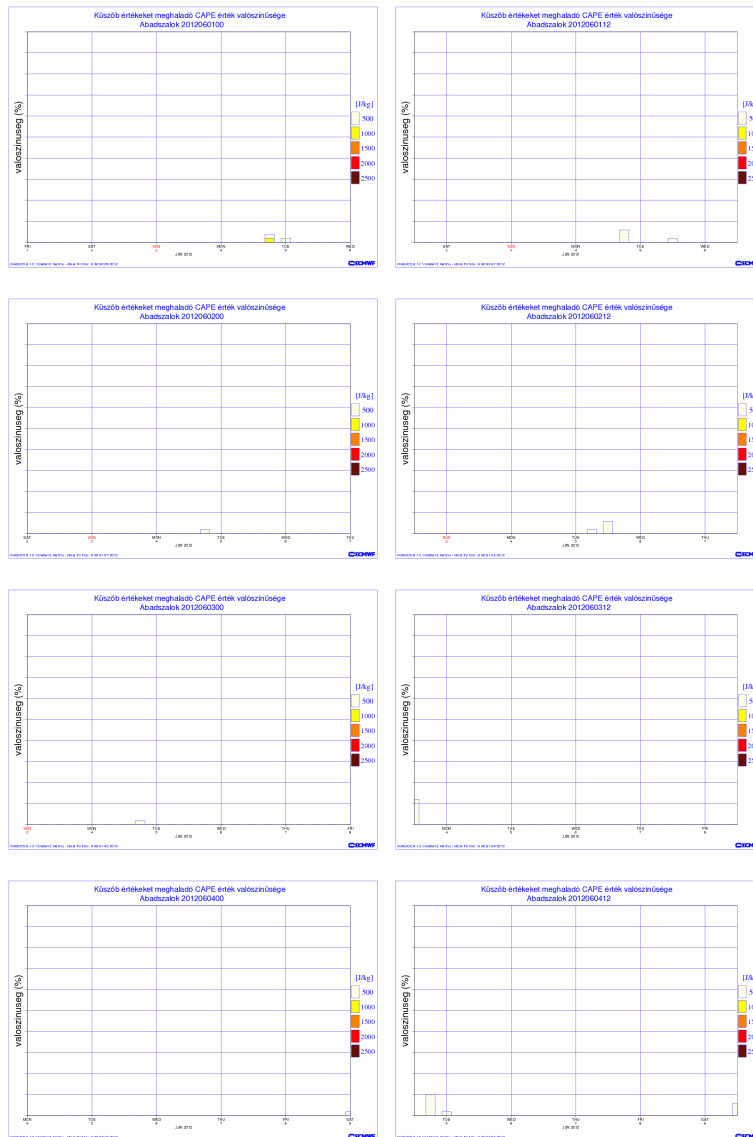
Második lépésben hasonlóképpen város szerint végeztem pontbeli vizsgálatokat 2012. június 1. és 2012. június 4. között ensemble előrejelzés alapján a 3.2 fejezetbeli új módszer segítségével. 12 városra készítettem el a diagramokat, de a terjedelmi korlátok miatt csak két városra – Pécsre (63. ábra) és Abádszalókra (64. ábra) – vonatkozó eredményeket szeretném ismertetni. Azért e két városra, mivel a radarképet megnézve és az események ismeretében feltételezhattunk volna alacsony, de nagy valószínűséggel rendelkező értékeket. De ez egyik városban sem következett be. A másik 10 városra is megnézve hasonló volt a helyzet.



63. ábra: Az 500, 1000, 1500, 2000 és 2500 J/kg CAPE értéket meghaladó valószínűségi diagramok Pécsre a 2012. június 1. és június 4. között készült ensemble előrejelzések alapján

A Pécsre vonatkozó előrejelzésekben (63. ábra) a vizsgált 2012. június 9-i esemény időszakában nagyon kis valószínűséggel, de ad alacsony CAPE értékeket. Ahogy haladunk előre az időben a 2012. június 9-i esemény időpontjára, vagyis 18 UTC-re a modellfuttatások egyre nagyobb valószínűséggel adnak magasabb értékeket.

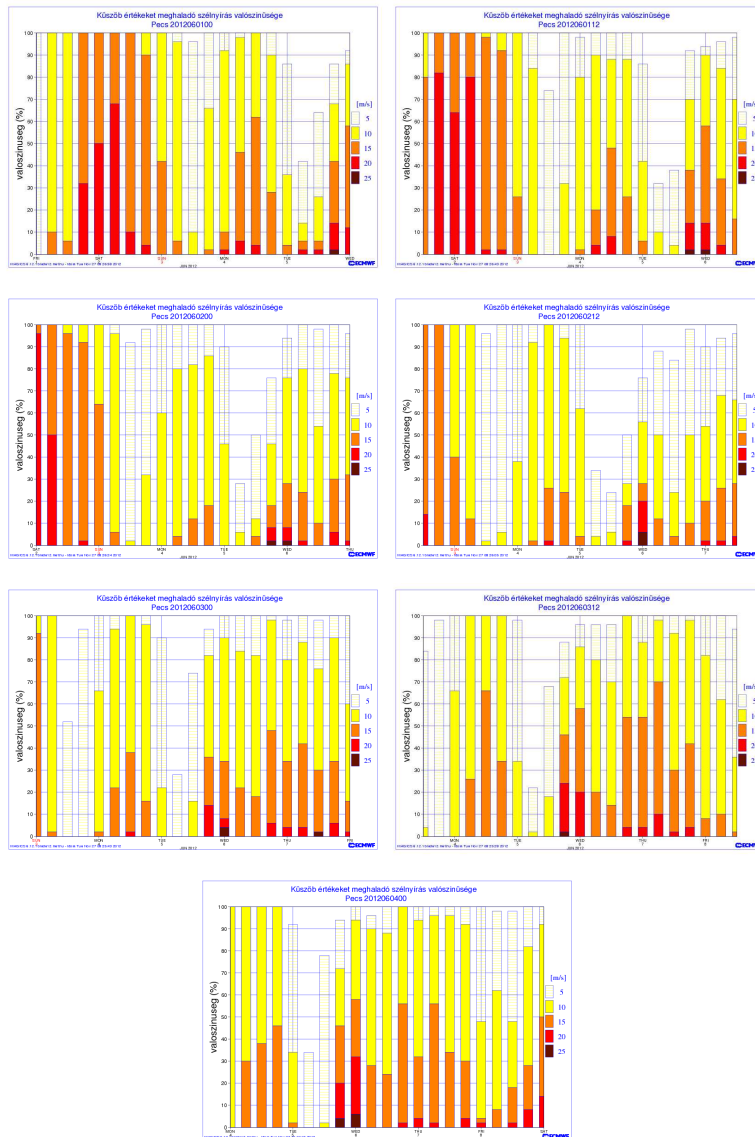
Abádszalók térségében (64. ábra) CAPE értékek valószínűsége 2012 június 1-étől kezdve egészen az esemény bekövetkeztéig meg sem jelenik.



64. ábra: Az 500, 1000, 1500, 2000 és 2500 J/kg CAPE értéket meghaladó valószínűségi diagramok Abadszalókra a 2012. június 1. és június 4. között készült ensemble előrejelzések alapján

A szélnyírás paraméter vizsgálatánál (65. és 66. ábra) a harmadik esetben is a modellek adnak erős szélnyírás értékeket 2012. június 4-ei 18 UTC-s időpontra, nem úgy mint a CAPE esetében.

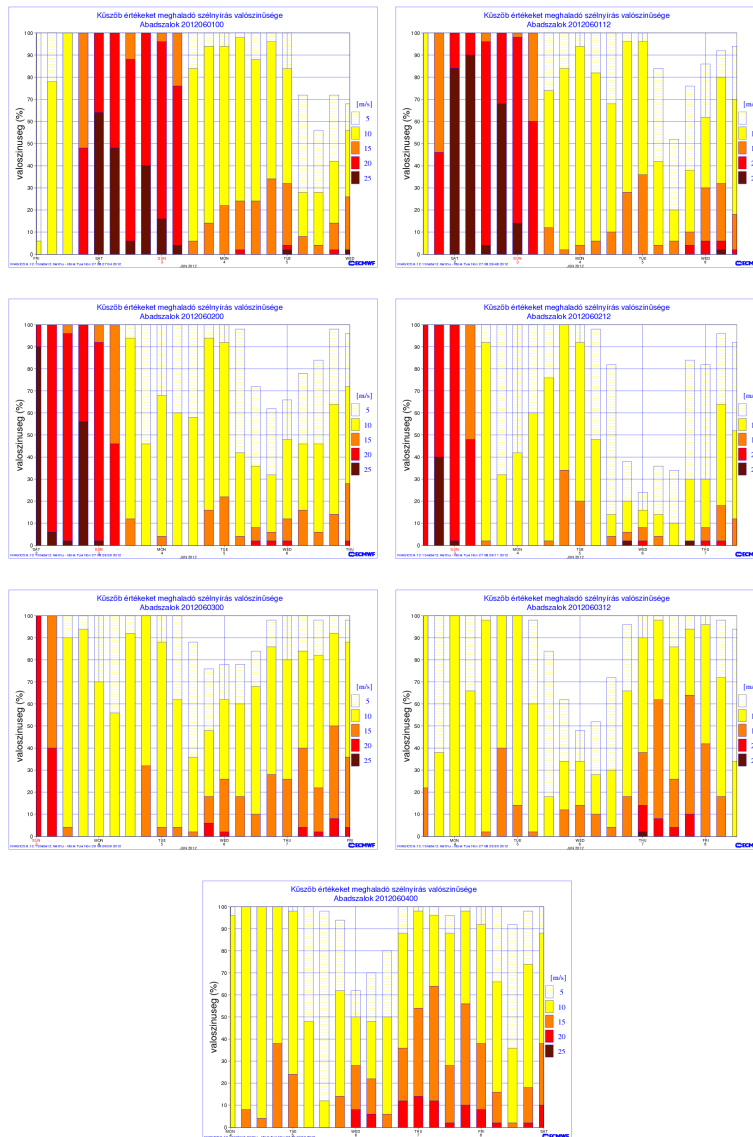
Pécsre nézve a szélnyírás valószínűségeket (65. ábra), megfigyelhető, hogy a vizsgált időpontra már 2012 június 1-én 00 UTC-s futtatás is jelez előre magasabb értékeket kisebb valószínűségekkel. Ez idővel egyre növekszik. Viszont a 25 m/s-os szélnyírás értékek nagyon kis valószínűségekkel jelez előre a modell.



65. ábra: Az 5, 10, 15, 20 és 25 m/s szélgyírás értéket meghaladó valószínűségi diagramok Pécsre a 2012. június 1. és június 4.

között készült ensemble előrejelzések alapján

Abádszalókra is jelez előre a modell szélgyírás viszonylag nagy értékeket (66. ábra), de ezek közel sem olyan erősek és nem olyan nagy valószínűségűek, mint a 2012. június 2-ára és június 3-ára előre jelzett értékek. Ekkorra a 25 m/s-os értékek valószínűségeit 80 – 90 %-osra prognosztizálják a modellfuttatások.



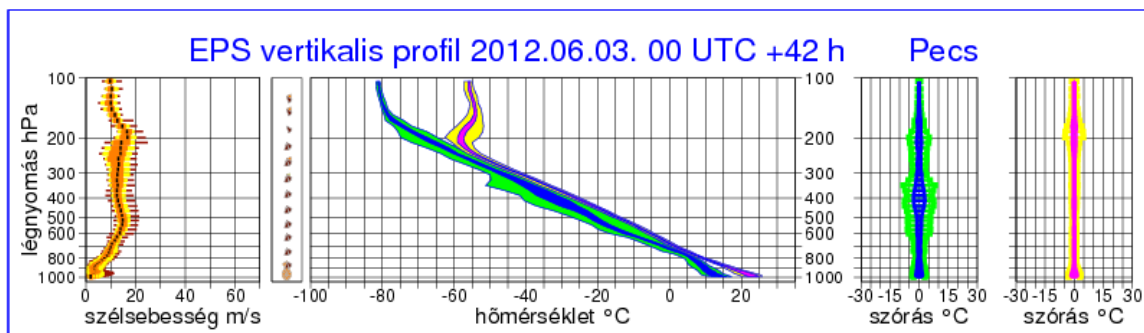
66. ábra: Az 5, 10, 15, 20 és 25 m/s szélnyírás értéket meghaladó valószínűségi diagramok Abádszalókra a 2012. június 1. és június 4. között készült ensemble előrejelzések alapján

4.3.3. Ensemble vertikális profilok

Következőekben a vertikális profilok vizsgálatát végzem modell szinteken különböző időléptékekkel. A 67-69. ábrákon a 2012. június 3. 00 UTC-kor futtatott modell látható különböző időléptékekkel (+42, +54, +66 h) Pécsre.

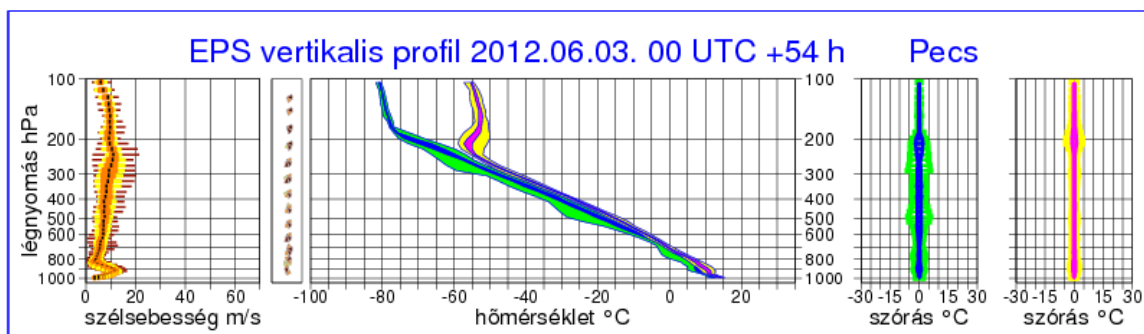
Látható, hogy a 2012. június 3. 00 UTC-s előrejelzés esetében a 2012. június 4. 18 UTC-kor mind a hőmérsékletben és szélsébségben is nagy változás jelentkezik. A szélsébségnél a 66 UTC-kor a felsőbb szinteken a boxplot összeszűkül. 12 órával később a szélsébség a 400-300 hPa-os szinten megerősödik, és a bizonytalanság megnő. A

hőmérséklet változása alig marad stabil. A harmatpontban a 600 hPa-os szinten kiszáradás, 500 hPa-os szinten nedvesedés észlelhető, mely erősíti az intenzív konvekciót.



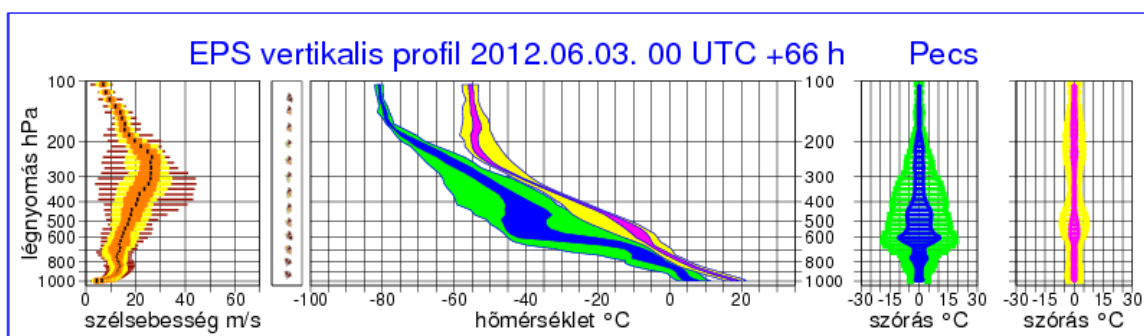
67. ábra: Hőmérséklet, harmatpont valamint szél- irány és sebesség ensemble vertikális vertikális profil előrejelzés Pécsre.

Az előrejelzés készült: 2012. június 3. 00 UTC-kor (időtáv: +42 h)



68. ábra: Hőmérséklet, harmatpont valamint szél- irány és sebesség ensemble vertikális vertikális profil előrejelzés Pécsre.

Az előrejelzés készült: 2012. június 3. 00 UTC-kor (időtáv: +54 h)



69. ábra: Hőmérséklet, harmatpont valamint szél- irány és sebesség ensemble vertikális vertikális profil előrejelzés Pécsre.

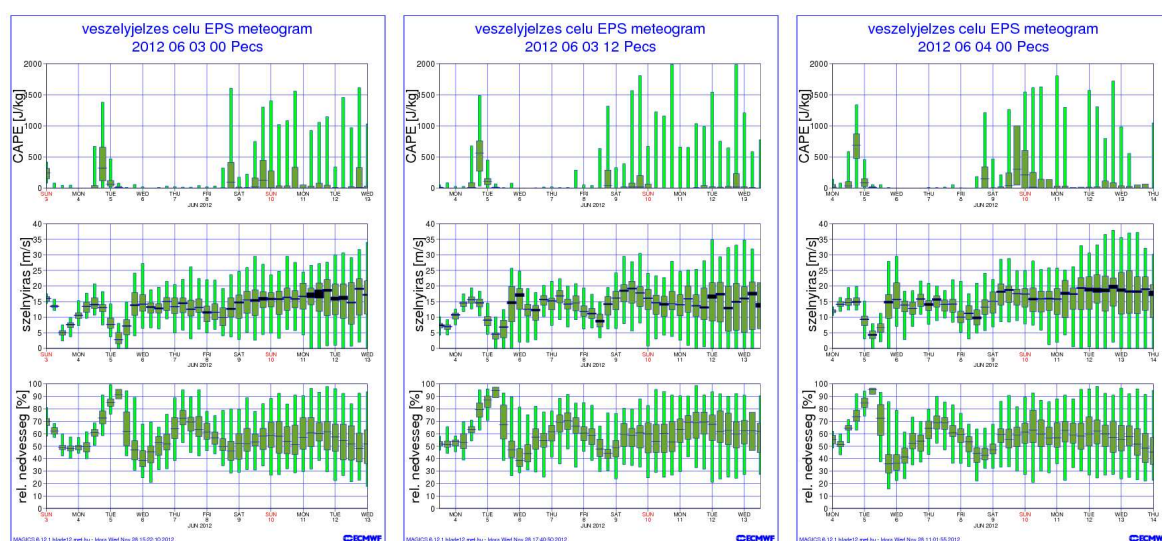
Az előrejelzés készült: 2012. június 3. 00 UTC-kor (időtáv: +66 h)

4.3.4. Ensemble meteogramok

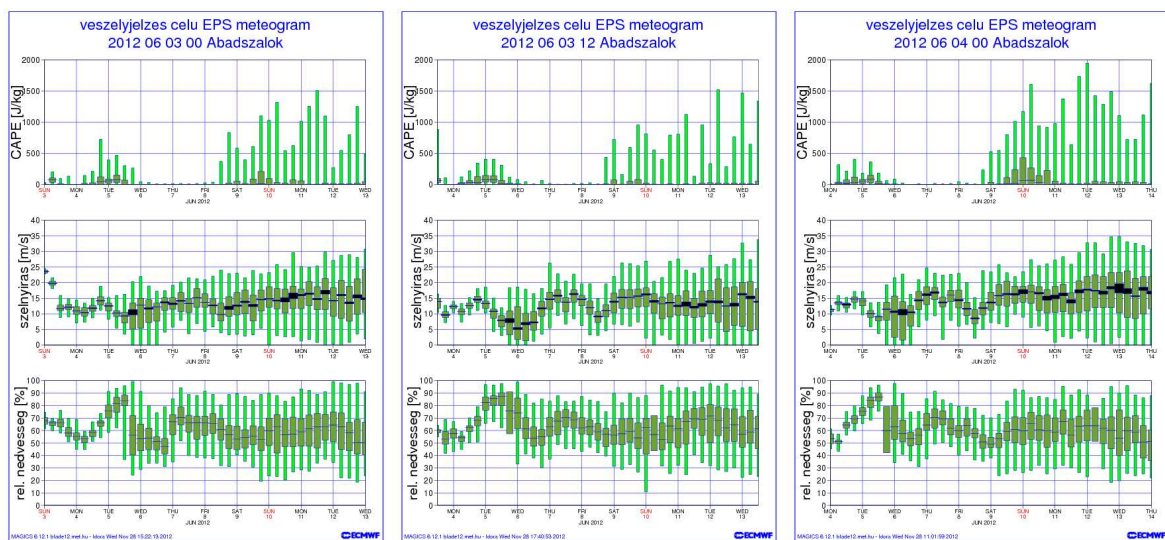
Végezetül megvizsgáltam a CAPE, szélnyírás és relatív nedvesség időbeli változását és viszonyát veszélyjelzés céljából készült EPS meteogramok segítségével (70-71. ábra) a többi vizsgálatokhoz hasonlóan a két kiválasztott városra.

A 2012. június 3-án és 4-én Pécsre készített EPS meteogramokon (70. ábra) a CAPE érték a délelőtti órákhoz képest hirtelen nagy valószínűséggel megnövekszik 1500 és 2000 J/kg-os értékeket a 2012. június 4-ére. A szélnyírásnál és a relatív nedvességnél szintén 2012. június 4-én láthatunk nagy lokális maximumokat.

A 2012. június 3-án és 4-én Abádszalókra készített EPS meteogramokon (71. ábra) a 1500 és 2000 J/kg-ot meghaladó CAPE értékek valószínűsége egyre nagyobb az eseményhez időben közelebb készült előrejelzésekben. A szélnyírásnál és a relatív nedvességnél szintén 2012. június 4-én lokális maximumot láthatunk, és itt lényegesen kisebb különbség, mint Pécs térségében.



70. ábra: CAPE, szélnyírás és relatív nedvesség EPS meteogram Pécsre, az előrejelzés készítés ideje: 2012. június 3. 00 és 12 UTC és 2012. június 4. 00 UTC



71. ábra: CAPE, szélnyírás és relatív nedvesség EPS meteogram Abadszalókra, az előrejelzés készítés ideje: 2012. június 3. 00 és 12 UTC és 2012. június 4. 00 UTC

Összefoglalás

Tudományos diákköri dolgozatomat az Országos Meteorológiai Szolgálat Módszerfejlesztési Osztályán készítettem. Témám *”Az ensemble előrejelzések használata nyári konvektív időjárási helyzetekben”*. Egy rövid bevezetésben foglaltam össze a kitűzött célokat. A célkitűzést követően a légköri konvekcióban fontos három vizsgált paraméter felhőfizikai és dinamikus meteorológiai hátterét tekintetem át.

Az ECMWF ensemble előrejelzési rendszerének bemutatása után rátértem a saját vizsgálataimra. A konvekció szempontjából kiemelt jelentőséggel bíró három meteorológiai paraméter, CAPE index, az 500 hPa-os szint és a 10 m-es szint közötti szélnyírás valamint a 850 és 500 hPa-os rétegbeli relatív nedvesség statisztikai és szinoptikai jellemzőit vizsgáltam. Kilencévnnyi adatsor statisztikai vizsgálatát követően új grafikus ensemble megjelenítési módszereket fejlesztettem ki illetve vizsgáltam. Megvizsgáltam még a CAPE index viszonyát a konvektív és összcsapadék arányával is különböző statisztikai vizsgálatok segítségével.

Négy grafikus ensemble megjelenítési mód együttes alkalmazásával három intenzív konvektív esemény előrejelezhetőségét esettanulmányokban vizsgáltam Meteorológiai szempontból a három vizsgált eset alapján megállapítható, hogy a szélnyírás a legjobban előrejelezhető paraméter. A relatív nedvesség előrejelzése többnyire szintén elég jó, de nagyobb bizonytalanság jellemzi. A legnehezebben előrejelezhető a CAPE labilitási index, gyakran mind térbeli s időbeli bizonytalanság jellemzi. Azaz a CAPE index középtávú (2-4 napos) előrejelzése nem mindig sikeres, de a figyelmeztető és veszélyjelzés során a valószínűségi CAPE index hasznos többlet információt jelenthet az operatív előrejelzésben és ehhez hasznos egyéb mezők együttes vizsgálata a CAPE valószínűségek mellett.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném e néhány sorban kifejezni köszönetemet témavezetőmnek, Ihász Istvánnak a rengeteg segítségért és útmutatásért, amit kaptam. Köszönöm még azt a rengeteg tanácsot, a sok motivációt, hogy a témában való ismereteim mélyítsem és, hogy megszerettette velem.

Irodalomjegyzék

- Buizza, R., Bidlot, J.R., Wedi, N., Fuentes, M., Holt, G., Palmert, T., Vitart, R., 2006: The ECMWF variable Resolution Ensemble System (VAREPS), *ECMWF Newsletter* 108, 14-20.
- Buizza, R., Leutbecher, M., Isaksen, L., Haseler, J., 2010: Combined use of EDA- and SV-based perturbations in the EPS. *ECMWF Newsletter*, 123, 22-28.
- Craven, J.P., 2000: A preliminary look at deep layer shear and middle level lapse rates during major tornado outbreaks. Preprints, *20th Conference of Severe Local Storms*, Orlando, FL, American Meteorological Society, 547-550.
- Craven, J.P. and Brooks, H.E.: 2002 Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection. *Proceeding of The 21st Conf. on Severe Local Storms and 19th Conf. on Weather Analysis and Forecasting/15th Conf. on Numerical Weather Prediction*. San Antonio, TX, 11-16 August 2002.
http://ams.confex.com/ams/SLS_WAF_NWP/techprogram/program_115.htm
- Davies, J.M. and Johns, R.H., 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornados. 1: Wind shear and helicity. *The tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*. Geophys. Monogr. 79. American Geophysical Union. 573-582.
- Dévényi, D., Gulyás, O., 1988: Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában. Tankönyvkiadó. Budapest. 235-236.
- ECMWF, 2004: Impact of forecast system upgrades (1994-2004), ECMWF TAC Report
http://www.ecmwf.int/products/data/operational_system/evolution/evolution_2003.html
- Ertel, H., 1942: Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz. *Meteorologische Zeitschrift*, 59, 277-281.
- Forbes, R. and Tompkins A., 2011: An improved representation of cloud precipitation. *ECMWF Newsletter*, 129, 13-18.
- Gilmore, M.S., and Wicker, L.J., 1998: The influence of midtropospheric dryness on supercell morphology and evolution. *Monthly Weather Review*, 126, 943-958.
- Holton, J.R., 2004: An introduction to dynamic meteorology. 4th ed, Elsevier Academic Press, pp 1-535.
- Horváth Á., 2007: A légköri konvekció összetevői. In A légköri konvekció (szerkesztette Horváth Ákos), Országos Meteorológiai Szolgálat. Budapest. 4-17.

- Horváth Á., 2012: Szupercellás zivatarok Dél-Magyarországon: 2012. június 9., *Országos Meteorológiai Szolgálat*, www.met.hu
- Hoskins, B.J., McIntyre, M.E., Robertson, A.W., 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111, pp. 877-946.
- Hoskins, B., 1997: A potential vorticity view of synoptic development. *Meteorological Applications*, 4, 325-334.
- Ihász, I., Tajti, D., 2011: Use of ECMWF's ensemble vertical profiles at the Hungarian Meteorological Service. *ECMWF Newsletter*, 129, 25-29.
- Isaksen, L., Haseler, J., Buizza, R., Leutbecher, M., 2010: The new ensemble of Data Assimilations, *ECMWF Newsletter*, 123, 17-21.
- Johns, R.H., and Hart, J.A., 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. Part II: Variations in the combinations of wind and instability parameters. *The tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*. Geophys. Monogr. 79. American Geophysical Union. 583-590.
- Lamy-Thépaut, S., 2009: MAGICs++ meteorological graphics library generating weather maps and graphics for web. *Proceedings of the Twelfth ECMWF Workshop on Meteorological Operational Systems*, Reading UK, 2-6 November 2009, 64-69.
- Miller, M., Buizza, R., Haseler, J., Hortal, M., Janssen P., Untch A., 2010: Increased resolution in the deterministic and ensemble prediction systems. *ECMWF Newsletter* 124, 10-16.
- Molteni, F.R., Buizza, T.N., Palmer, T.N., Petroliagis, 1996: The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 122, 37-119.
- OMSZ, 2012a.: Gyors mozgású zivatarrendszer károkozó szélrohamokkal, *Országos Meteorológiai Szolgálat*, www.met.hu
- OMSZ, 2012b.: Zivataros hidegfront (2012. június 4.), *Országos Meteorológiai Szolgálat*, www.met.hu
- Palmer, T., Buizza, R., Hagedorn, R., Lawrence, A., Leutbecher, M. and Smith, L., 2006: Ensemble prediction: A pedagogical perspective. *ECMWF Newsletter*, 106, 10-17.
- Persson, A., 2011: User Guide to ECMWF forecast products, ECMWF Reading, UK
- Persson, A. and Riddaway, R., 2011: Increasing trust in medium-range weather forecasts. *ECMWF Newsletter*, 129, 8-12.
- Raoult, B., 2001: MARS on the Web: a virtual tour. *ECMWF Newsletter* 90, 9-17.

- Reed, R.J., Stoelinga, M.T., Kuo, Y.-H., 1992: A model-aided study of the origin and evolution of the anomalously high potential vorticity in the inner region of a rapidly deepening marine cyclone. *Monthly Weather Review*, 120, 893-913.
- Rényi, A., 1966: Valószínűségyszámítás. Tankönyvkiadó. Budapest. 422.
- Siemen, S., Lamy-Thépaut, S., 2010: MAGIC++ 2-8 – New developments in ECMWF's meteorological graphics library. *ECMWF Newsletter*, 122, 32-33.
- Tajti D. 2011: Ensemble vertikális profilok sajátosságainak vizsgálata. *Diplomamunka*. ELTE Meteorológiai Tanszék. Budapest
- Wedi, N. and Malardel, S., 2010: Non-hydrostatic modelling at ECMWF. *ECMWF Newsletter*, 125, 17-21.
- Weisman, M.L., 1996: On the use of vertical wind shear versus helicity in interpreting supercell dynamics. *Preprints, 18th Conf. on Severe Local*, San Francisco, CA, American Meteorological Society, 200-204.
- Weisman, M.L. and Klemp, J.B., 1984: The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears. *Monthly Weather Review*. 112, 2479-2498.