

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
METEOROLÓGIAI TANSZÉK

**Konvektív folyamatok vizsgálata a nedvesség konvergencia
és a hasznosítható konvektív energia felhasználásával**

KÉSZÍTETTE: CSONKA TAMÁS

TÉMAVEZETŐ: DR HORVÁTH ÁKOS
TANSZÉKI KONZULENS: DR WEIDINGER TAMÁS

BUDAPEST, 2004

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Konvektív folyamatok, konvektív komponensek	4
2. 1 Zivatarok ultrarövidtávú előrejelzésével kapcsolatos alapvető fogalmak	5
2. 1. 1. Zivatar élettartama, fejlődése, karakterisztikái	5
2. 1. 2. Határrétegbeli folyamatok hatása konvektív cellákra	8
2. 1. 3. Stabilitási viszonyok zivatarok fejlődésére gyakorolt hatása	13
2. 1. 4. Előrejelzési szempontok	16
2. 1. 5. Automatikus zivatar-előrejelző rendszer jellemzői /NCAR/	17
2. 1. 5. 1. Adatállományok	18
2. 1. 5. 2. Ultrarövidtávú (nowcasting típusú) előrejelzési paraméterek	18
2. 1. 5. 3. Az előrejelzési paraméterek kombinációjának módszertana	23
2. 1. 5. 4. Példák ultrarövidtávú előrejelzésekre	25
3. A vizsgálatokhoz használt eszközök leírása	28
3. 1. Konvektív hasznosítható potenciális energia	28
3. 2. Nedvesség konvergencia	30
3. 3. Az MM5 modell	34
3. 3. 1. Az MM5 koordináta rendszere és dinamikája	34
3. 3. 2. Az MM5 modell parametrizációi	36
3. 3. 3. Négydimenziós adatasszimiláció	37
3. 3. 4. A vizsgálatokhoz szükséges modell-beállítások	37
4. Konvektív folyamatok vizsgálata numerikus modell felhasználásával	39
4. 1 Esettanulmányok	39
4. 1. 1. A 2003. 08. 14-es esettanulmány	39
4. 1. 2. A 2003. 07. 28-as esettanulmány	59
5. Összefoglalás	64
Mellékletek	65
Köszönetnyilvánítás	68
Irodalomjegyzék	69

1. Bevezetés

A kis skálájú konvektív folyamatok kialakulása, fejlődése, majd leépülése, általában nehezen magyarázható hagyományos szinoptikus módszerekkel (pl. csupán a felhajtóerő becslésén alapuló indexekkel). Részletes vizsgálatok kimutatták, hogy a konvektív mozgásformák kialakításában illetve fenntartásában több tényező is szerepet játszik, ezeket konvektív komponenseknek nevezzük. Így említhetjük a felhajtóerőt, a szélnyírást és a különböző típusú konvergenciát, mint a konvektív rendszerek tulajdonságait alapvetően meghatározó tényezőket.

Szakedolgozatunkban elsősorban olyan kis skálájú konvergenciát vizsgáltunk, amely részben zivatarok kialakulásához vezet, részben pedig a celláknál egyfajta öfenntartó folyamatot hoz létre azáltal, hogy a fejlődő majd széteső konvektív cellák zivataros kifutószelein keresztül újabb cellákat generálnak. Fontos megkülönböztetnünk ezt a vizsgálatot a hagyományos, inkább szinoptikus skálájú nedvesség konvergencia vizsgálatoktól, mivel itt alapvetően mezo- β skálájú folyamatokról van szó. Ebben az esetben a feladat annyiból összetettebb, hogy a hagyományos szinoptikus mérőhálózatból származtatott mezők nem alkalmasak arra, hogy az ilyen kis skálájú folyamatokat indikálják. A nagy felbontás illetve a dinamikai konzisztencia kielégítése végett szükséges volt egy, a feladathoz adekvát eszköz, egy nem-hidrosztatikus, részletes nedvesség és felhőfizikai képességekkel rendelkező modell. Erre a feladatra az MM5 modellt választottuk. Ezen modell eredményeit használtuk fel vizsgálatainkhoz. A dolgozatunkban említjük a hasznosítható konvektív energiát, a nedvesség konvergenciát illetve szerepét a konvektív folyamatok kialakulásában, felhasználói szempontból ismertetjük az MM5 modellt, ezután bemutatjuk saját számításainkat a nedvesség konvergencia, illetve a hasznosítható konvektív energia terén, végül levonjuk a vizsgálatainkból adódó következtetéseket.

2. Konvektív folyamatok, konvektív komponensek

A konvektív folyamatokat leíró állapotváltozók nagyrészt a magasság függvényei. Ha valamilyen más hatás (perturbáció) következtében egy adott magasságban elhelyezkedő réteg különböző pontjai között sűrűségkülönbség jön létre, akkor a relatív nyugalom $\mathbf{g} + \mathbf{P} = \mathbf{0}$ feltétele (\mathbf{g} : nehézségi erő, \mathbf{P} : nyomási gradiens erő) már nem elégül ki: az eredő erő irányában a vertikális mentén rendezett mozgás indul meg. Ez a mozgás a sűrűségkülönbség kiegyenlítésére irányul, és meghatározott feltételtől függően kétféle típusú lehet: vagy az eredeti egyensúlyi állapotot állítja vissza, vagy pedig *a légoszlop tömegét egy új egyensúlyi állapotba rendezi át*. A mozgás típusa az első esetben exponenciálisan csökkenő amplitúdójú ún. gravitációs oszcilláció, a tömeg átrendeződését eredményező mozgásforma pedig exponenciálisan növekvő amplitúdójú oszcilláció, amit a meteorológiában konvektív mozgásnak nevezünk (Götz, Rákóczi).

Légkörünkben konvektív mozgások, konvektív folyamatok 3 hatás következtében alakulhatnak ki. Ezeket a hatásokat, tényezőket konvektív komponensekként emlegetik a szakirodalomban (Horváth, Geresdi, 2000). Ezek alapján konvekció kialakulhat (1) felhajtóerő, (2) kényszerkonvekció (orográfia ill. konvergencia okozta feláramlás) és megfelelő (3) szélnyírás hatására. Természetesen adott konvektív folyamat esetén általában több konvektív komponens is jelen van, de különböző súllyal vesznek részt a konvekció kialakításában. Ily módon aszerint, hogy mely komponens a döntő az adott konvektív folyamat kialakításában ill. fenntartásában, különböző tulajdonságokkal (például méret, élettartam, intenzitás stb.) rendelkező konvektív rendszereket különíthetünk el. Konvektív mozgások hatására alakulnak ki pl. a néhány 10 méteres száraz termikek, ugyanakkor ezek a mozgás formák felelősek az akár egész országot beborító Mezokálajú Konvektív Komplexekért is (MKK) (Maddox, 1980).

Egy konvektív rendszer kialakulásának, fejlődésének előrejelzése annál nehezebb, minél kisebb skálán játszódik le az adott jelenség. A makroskála alsó illetve a mezoskála felő határán lejátszódó folyamatok még viszonylag, jól modellezhetőek kisebb felbontású modellekkel is, megfelelően választott cumulus parametrizációs séma alkalmazásával. Kisebb skálán pl. egy új cella kialakulása már igen sok tényezőtől függhet. A továbbiakban a konvektív rendszerek tulajdonságairól és azok ultrarövidtávú előrejelzésének technikáiról szólnunk.

2. 1. Zivatarok ultrarövidtávú előrejelzésével kapcsolatos alapvető fogalmak

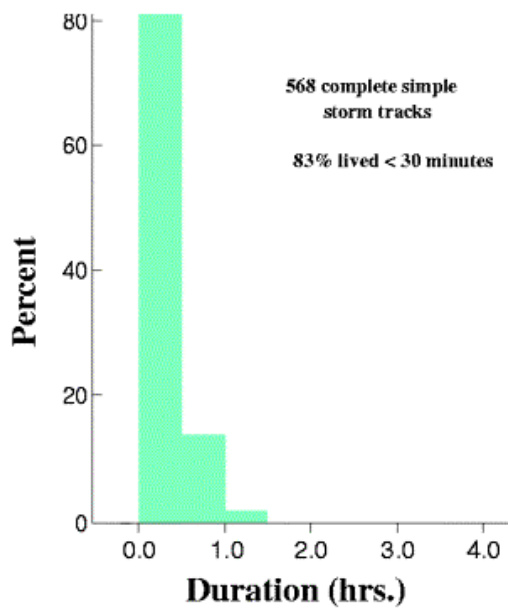
A következőkben a konvektív rendszerek kialakulásával, fejlődésével és feloszlásával kapcsolatos –előrejelzésük szempontjából- fogalmakat tekintjük át.

2. 1. 1. Zivatar élettartama, fejlődése, karakterisztikái

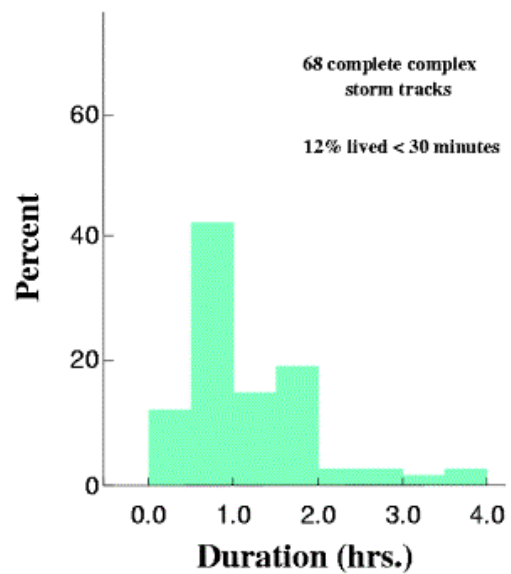
Egycellás zivatar élettartama általában kevesebb, mint 30 perc, multicellás zivatar esetén 30 percnél tovább megfigyelhető a kialakult konvektív rendszer (ld. 2.1.1. ábra).

Zivatarok élettartama

Egycellás zivatar általában 30 percig él

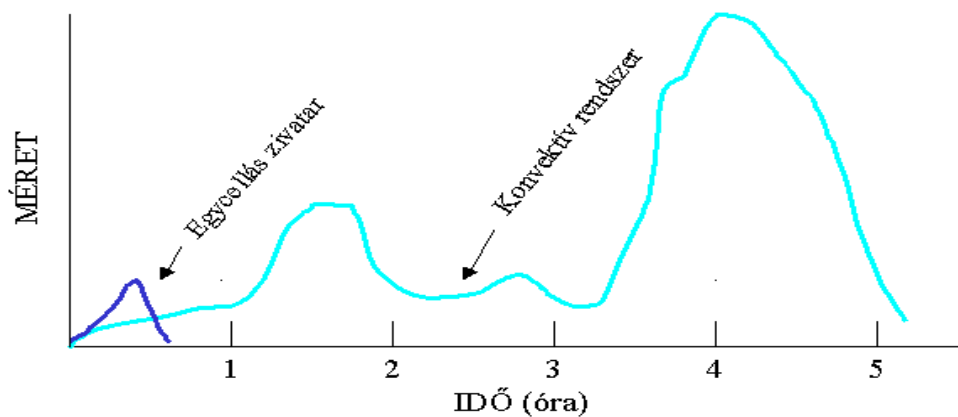


A multi-cellás rendszerek 30 percnél jóval tovább fennmaradhatnak



(Henry 1993; Battan 1953; Foote and Mohr 1979)

2. 1. 1. ábra

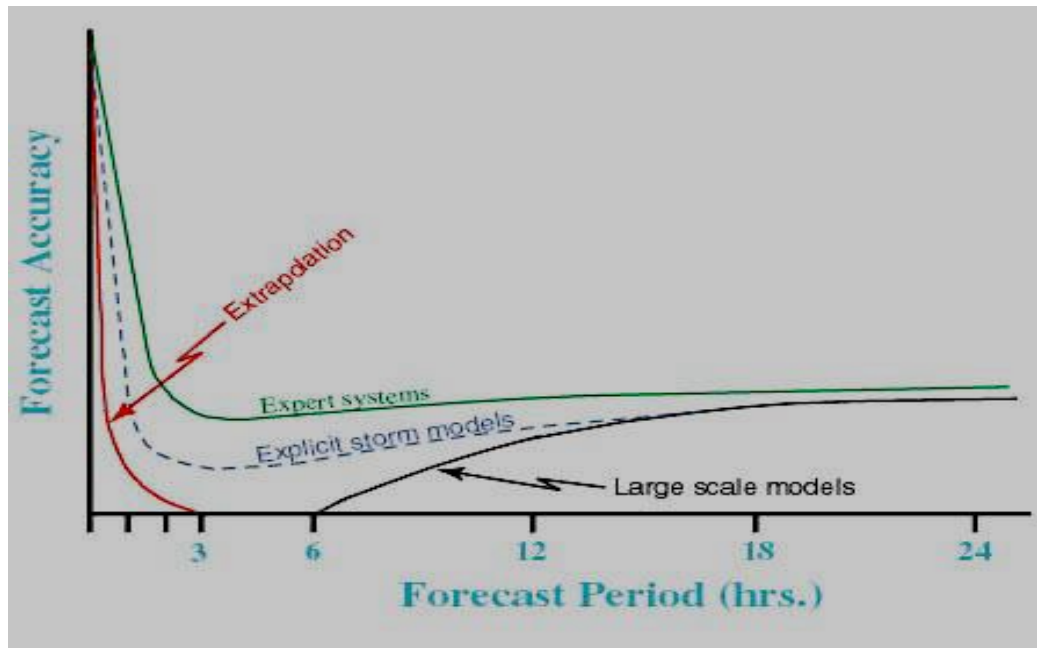


2. 2. ábra. Példa egycellás zivatar illetve konvektív rendszer fejlődésére

Radarral adott időközönként (hazánkban 15 percenként) információkat kaphatunk a zivatarok mozgásáról, méretéről, magasságáról, intenzitásáról, a vertikálisan kiterjedő csapadékos terület nagyságáról, ill. a függőlegesen felösszegzett ekvivalens folyékony víztartalomról. A 15 percenként mért vagy számított paraméterek csak korlátozottan használhatók előrejelzésre. A fizikai folyamatok, melyek a zivatarok fejlődését, változását, áthelyeződését meghatározzák nem feltétlenül figyelhetők meg a konvektív rendszer múltbeli viselkedéséből. Azonban a vizsgálni kívánt konvektív folyamatok kialakulását, fejlődését gyakran megszabják a határréteg tulajdonságai, ill. az ott lejátszódó folyamatok, úgy mint a stabilitási viszonyok és az ebben a rétegben fellépő esetleges konvergencia. (Tsonis and Austin 1981; Bellon and Austin 1978; Browning et al. 1982; Collier 1989)

Az erős viharral járó rendszerek többsége viszonylag rövid élettartamú és gyakran igen gyors változást mutatnak a méret és intenzitás tekintetében, így előrejelzésük, csupán az extrapoláció (lineáris interpoláció az időben) technikájával, általában nem megfelelő. Az

előrejelzés során szükség van a kialakulás, növekedés/fejlődés ill. a disszipáció (feloszlás) leírására is. A fejlett szupercellák és nagyobb instabilitási vonalak gyakran kivételt képeznek a fentiek alól, mivel ezek extrapolációval történő előrejelzése általában sikeres, például az előző két óra alapján.

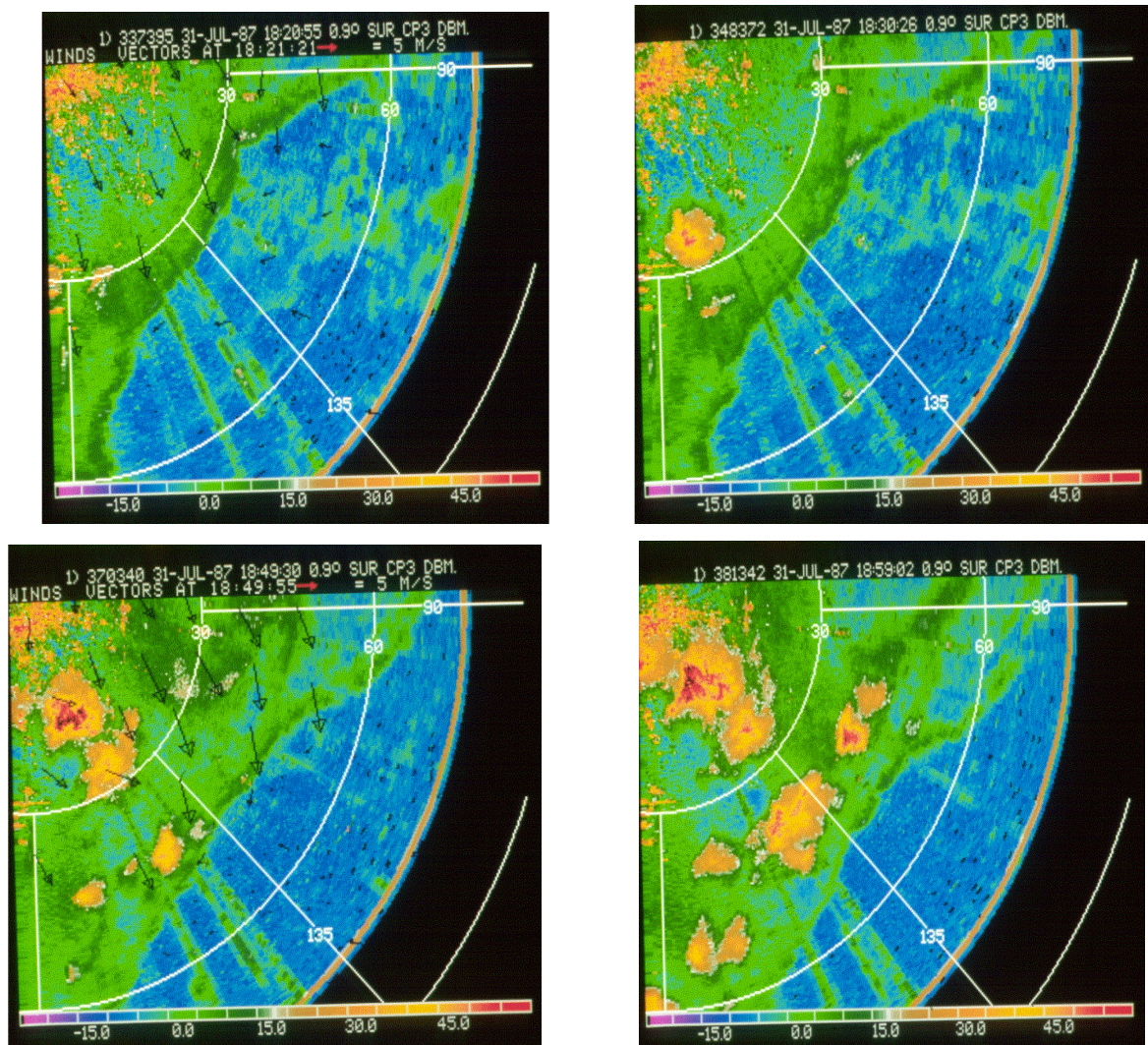


2. 3. ábra: Konvektív rendszerek előrejelzésének pontossága az idő múlásával

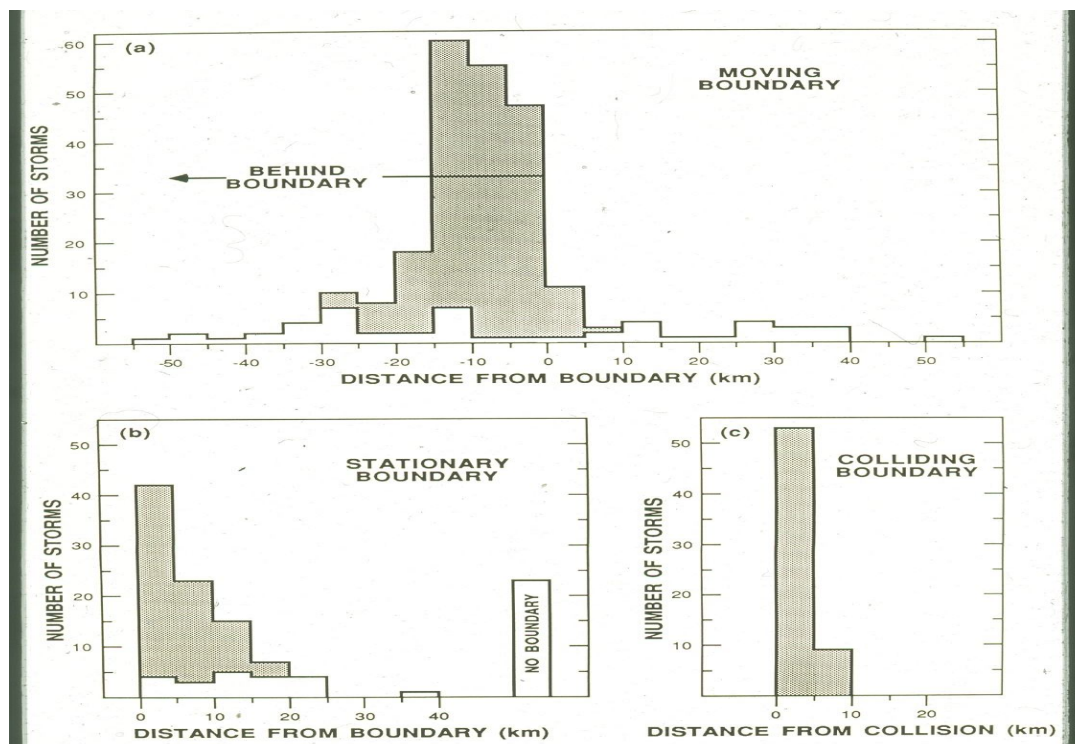
Látható az ábrán (3. ábra), hogy az előrejelzések pontossága nagyon gyorsan csökken az első egy órában. A nagy skálájú modellek (fekete) nem tudják "megfogni" ezeket a viszonylag rövid élettartamú jelenségeket. Az explicit módszerek alapján működő zivatar-előrejelző modellek (szaggatott kék) kezdeti érték problémájának feloldásához 4 km-enként kellene mérés, de ezek nem állnak rendelkezésre. A tapasztalati módszerekkel (zöld) történő közelítés erősen támaszkodik - az elmélet mellett - a megfigyelésekre. (Browning 1980; Doswell 1986; Austin et al. 1987)

2. 1. 2. Határrétegbeli folyamatok hatása konvektív cellákra

A határrétegben kialakuló konvergencia vonalak gyakran hatással vannak a zivatarok fejlődésére. Ezek az összeáramlási vonalak sokszor megfigyelhetők például műholdképeken cumulus felhőkből álló felhősávok, felhővonalak formájában. Doppler radarral is kimutathatóak ezek a képződmények, mint jól elkülönülő változás a szélmezőben (irány ill. sebesség szerint-ld. 2.4. ábra).



2. 4. ábra: Konvergencia vonal képe Doppler radar által készített szélmezőben



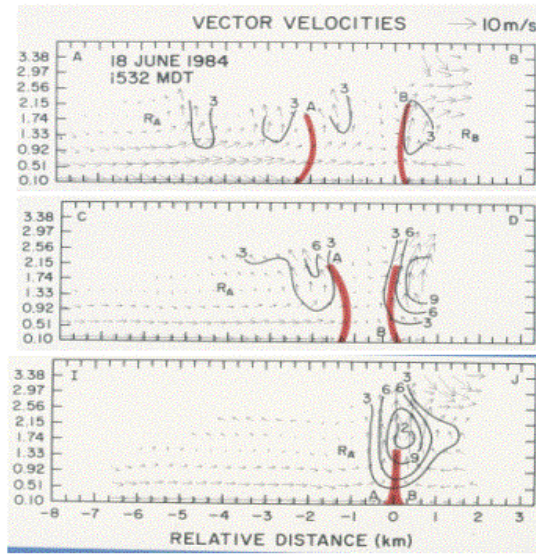
2. 5. ábra: Gyakran alakulnak ki zivatarok a határrétegben fellépő konvergencia vonalak közelében.

Az 2. 5. ábrán a zivatarok számát láthatjuk a konvergencia vonaltól vett távolság függvényében. Három különböző esetben vizsgálták a zivatarok előfordulását a konvergencia zóna környezetében:

- mozgó konvergencia vonal
- stacionárius konvergencia vonal
- konvergencia vonalak találkozása/ütközése

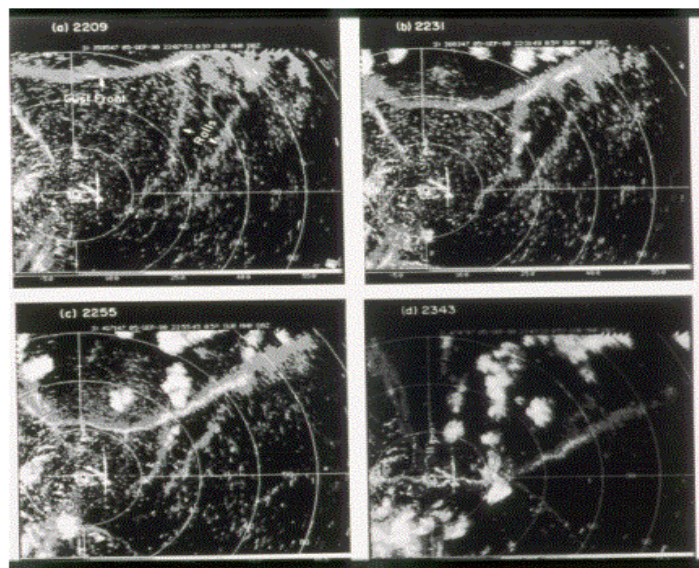
Ez a vonal tehát egy emelési zónának felel meg, ezen terület a legalkalmasabb zivatarok kialakulására és növekedésére. Ennek a területnek az elhelyezkedése a határvonaltól ill. annak mozgásától függ. (Wilson és Mueller 1993)

Konvergencia vonalak találkozásakor gyakran keletkeznek heves zivatarok, ilyen esetekben új zivatarok törhetnek ki vagy a meglévők intenzitása, ill. mérete megnőhet (2.6. ábra). (Mahoney 1988)

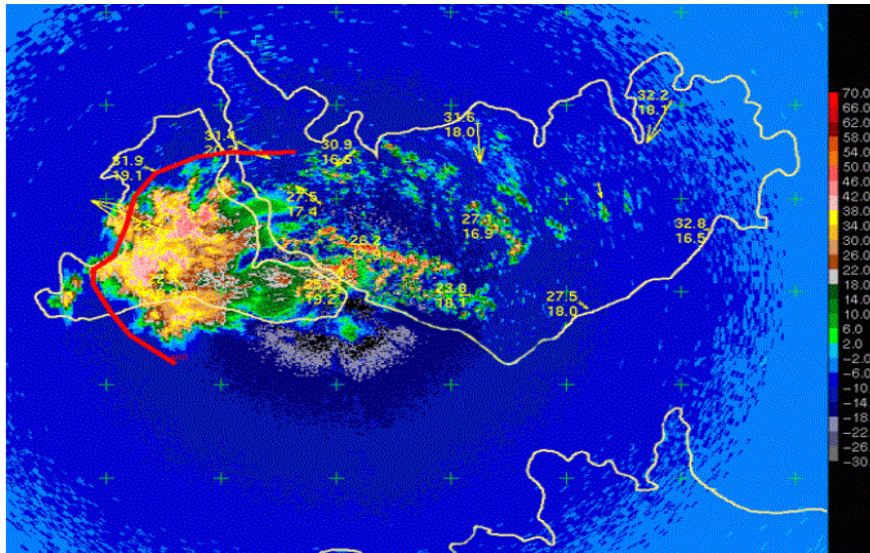
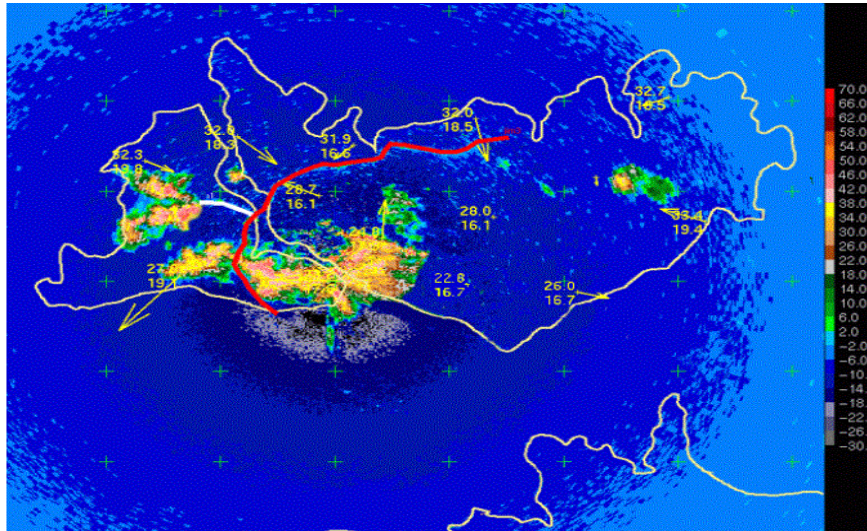


2. 6. ábra: Feláramlás megerősödése konvergencia vonalak találkozásánál

Gyakran alakulnak ki zivatarok cumulus felhősorok és ezeket elérő konvergencia vonalak (pl. zivataros kifutószél vezető éle) találkozásánál is (2. 7. ábra). Már meglévő konvektív cellák találkozása konvergencia vonalakkal zivatarok egyesülését, ill. erősödését eredményezheti (2. 8. ábra).



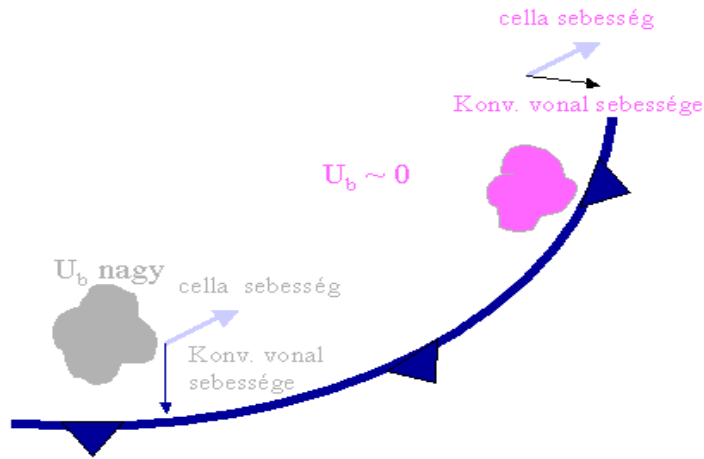
2. 7. ábra: Zivatarok keletkezése konvergencia vonal és „Cumulus-sorok” találkozásakor



2. 8. ábra: Zivatar megerősödése ráhúzóó konvergencia vonal hatására

A következőkben ismertetünk néhány, a konvergencia vonalakra jellemző, fogalmat ill. paramétert melyek meghatározzák a zivatarok fejlődését:

1. U_b , relatív cellasebesség: ez egy arányszám, ami megadja, hogyan mozog az adott cella a konvergencia-vonalhoz képest. Ha ez a szám nagyobb, mint 4 m/s a zivatar elmozdul az összeáramlási zónától és disszipálódik, ha kisebb, mint 4 m/s a cella a zóna közelében marad és feltehetően megmarad.(2.9. ábra)(Moncrieff és Miller 1976, Weisman és Klemp 1986, Wilson és Megenhardt 1997)

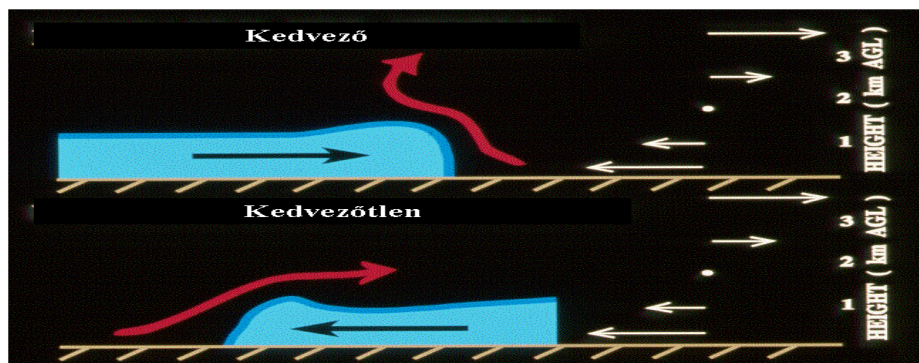


2. 9. ábra: A relatív cellasebesség és a cella mozgásának viszonya

2. Alacsonyszinti relatív szélnyírás a konvergencia-vonalon

Az alacsony szintű szélnyírás úgy kapjuk, hogy vesszük a talaj közeli és a 2,5 km-es magasságban lévő szélvektorok különbségét. Ez szinte mindig jelen van a határrétegben és jelentős változást mutathat az összeáramlási zóna környezetében. Ez a paraméter megmutatja, hogy milyen dőléssel rendelkezik majd a cella feláramlási csatornája. Ha ez az érték kisebb, mint -8 m/s akkor a feláramlási zóna felegyeneseedik, úgy is mondhatjuk „nem fekszik el” a szélnyírás hatására, így a zivatar hosszabb életű lesz ill. intenzitása erősödik.

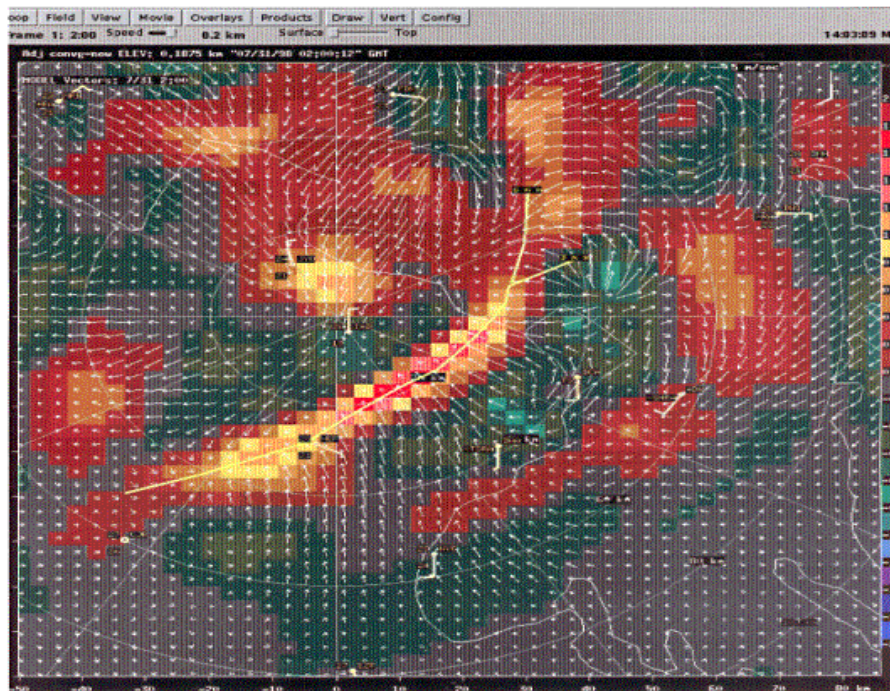
(Thorpe et al. 1982, Rotunno et al. 1988, Weisman and Klemp 1986)



2. 10. ábra: Szélnyírás hatása a feláramlásra

3. Konvergencia erőssége és mélysége

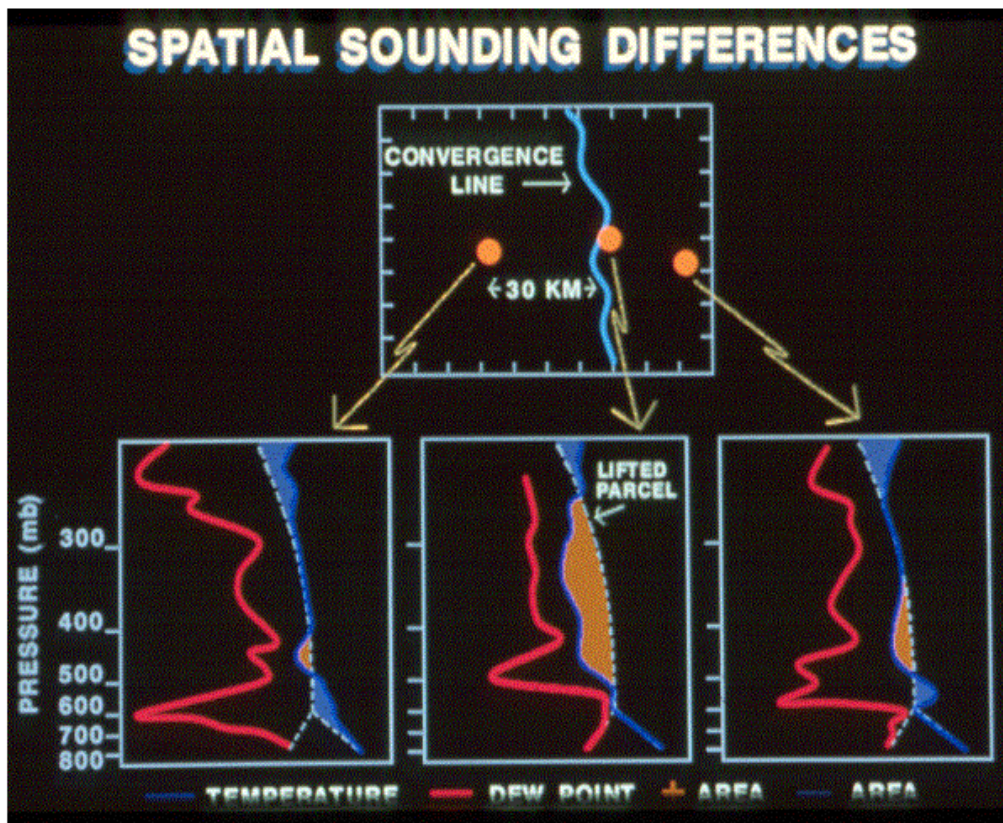
Nyilvánvalóan erős alacsony szintű konvergencia és erőteljes feláramlás, nagyobb energiákat szolgáltat intenzív zivatarok fejlődésekor. A képen (2.11.ábra) a szélvektorokra és a konvergencia nagyságára láthatunk példát az alsó 200 m-es rétegben, Doppler radaros mérés felhasználásával. A sárga vonal a gust frontot (zivataros kifutószél éle) jelöli ill. a sárga és vörös színek a legerősebb konvergenciájú helyeket mutatják. (Sun és Crook 1994, 1997)



2. 11. ábra: Szélmező konvergenciája Doppler radaros mérésrel

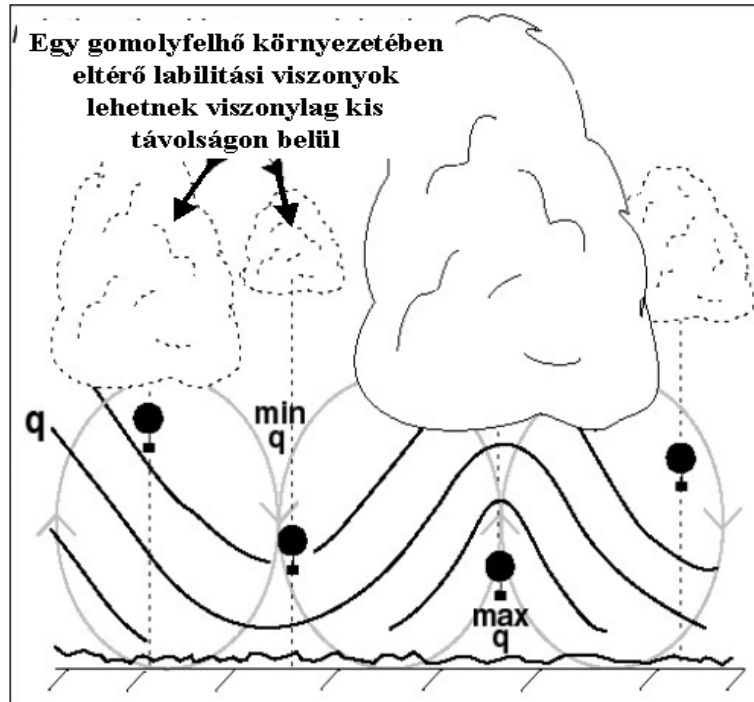
2. 1. 3. Stabilitási viszonyok zivatarok fejlődésére gyakorolt hatása

A légtömegek labilitási viszonyainak meghatározása hagyományosan a rádiószondás felszállások alapján történik. Mivel ezek a mérések viszonylag ritkán állnak rendelkezésre, csak korlátozottan alkalmazhatók a konvektív folyamatok előrejelzésére. A vízgőz térbeli változékonysága nagyobb, mint amit mérni tudunk a rádiószondákkal. A konvergencia vonalak módosítják a nedvesség eloszlását. A példában 3 felszállást látunk (2.12. ábra), amelyek kis távolságon belül nagy változékonyságot mutatnak a konvektív hasznosítható potenciális energia tekintetében, egy összeáramlási zóna környezetében. (Wilson et al. 1992)



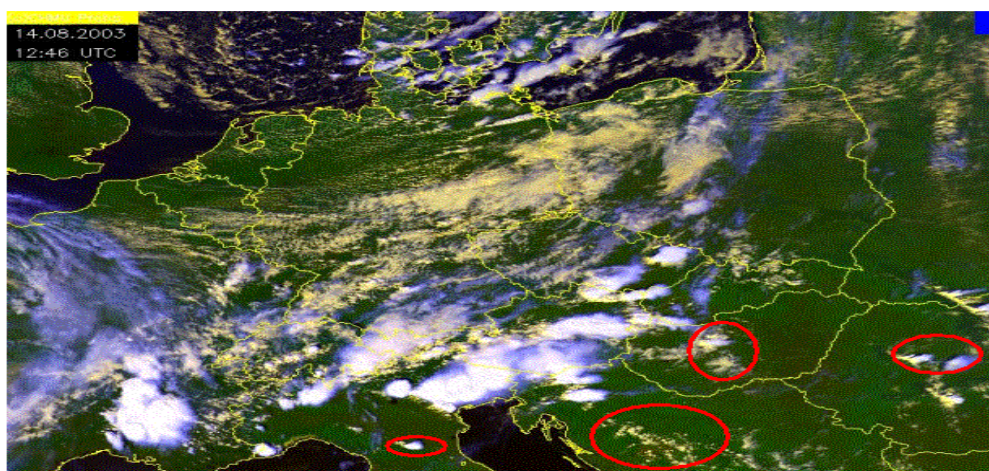
2. 12. ábra: Kis távolságon belül is jelentős különbségek adódhatnak a mérés helyének függvényében

A horizontálisan kialakuló felhősávok módosítják a nedvességi mezőt, mégpedig úgy, hogy a legnagyobb nedvességi értékeket ezen felhősorok feláramlási területén találjuk. Így ha a rádiószondás felszállásokat nem a konvektív feláramlásban indítjuk, alkalmasint alábecsüljük a zivatarok potenciális energiáját.(2. 13. ábra) (Weckwerth et al. 1996)



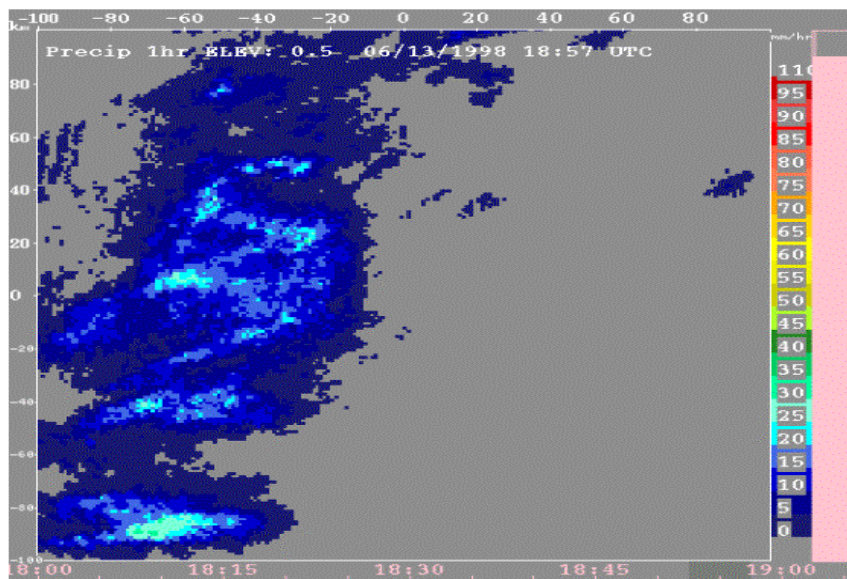
2. 13. ábra: A felszállás helye kis távolságon belül is nagy hatással van a labilitás mértékére

Műholdképeket is felhasználhatunk a stabilitási viszonyok vizsgálatára. Ezeken a képeken cumulus felhők jelzik az instabilitást, bár nagyságuk és vertikális kiterjedésük nem pontosan meghatározott. A látható (VIS) és infravörös (IR) tartományban készült műholdképek időnként jól használhatók, veszélyes Cumulus congestus vagy Cumulonimbus felhők helyének és fejlődésének megfigyelésére. (2. 14. ábra)



2. 14. ábra: Gomolyfelhők megfigyelése műholdképek segítségével

Összegzett csapadékmezőket is felhasználhatunk a stabilitás meghatározására ill. megfigyelésére (2. 15. ábra)



2. 15. ábra: Radar alapján összegzett csapadékmező

Az ábrán az elmúlt egy óra alatt lehullott eső becsült összegzett mezejét láthatjuk, ez felhasználható azon területek elkülönítésére, ahol a csapadék lokális lehülést eredményezett. Így ezek a térségek stabilisabbak a környezetüknél és kevésbé járulnak hozzá a későbbi konvekcióhoz. Ez a mező nagyon hasznos „laza izobárú, izobárikus mocsár” helyzetekben, amikor a határrétegbeli instabilitás elsődleges szerepet játszik.

2. 1. 4. Előrejelzési szempontok

A következőkben számba vesszük azokat a tényezőket, hatásokat, amelyek zivatarok kialakulásának, növekedésének ill. disszipációjának előrejelzésekor fontos szerepet játszanak.

a.) Zivatarok kialakulása

- Konvergencia vonal jelenléte
- LI (Lifted Index) <0 az emelési területen
- Cumulus felhőzet jelenléte
- Cumulus felhők gyors növekedése az emelési zónában
- Konvergencia vonalak/mezők találkozása
- Kicsi relatív cella sebességek a konvergens térségben

b.) Zivatarok fejlődése, növekedése

- Összeáramlási zóna mozgása megegyezik a konvektív cellák mozgásával
- Erős és vertikálisan jól fejlett konvergencia
- Felegyenesedő feláramlási rész
- Zivatarok egyesülése
- Konvergencia vonalakon lévő Cumulusok és zivatarok találkozása

c.) Zivatarok disszipációja

- Konvergencia vonal elmozdul a zivatartól
- Konvergencia vonal stabilis területre ér
- Zivatar méretének és intenzitásának csökkenése, összeáramlás hiányában

Ezen fejezetben láthattunk tehát, alapvető szempontokat, tényezőket amelyek meghatározzák a zivatarok fejlődését. A következőkben egy olyan automata zivatar előrejelző rendszerre szeretnénk egy példát mutatni, amely zömében az iménti szempontok alapján működik.

2. 1. 5. Automatikus zivatar-előrejelző rendszer jellemzői /NCAR/

Ebben a fejezetben az NCAR szakemberei által kifejlesztett ultrarövidtávú előrejelző rendszerről lesz szó. Ennek keretein belül gyakorlati felhasználását láthatjuk az előző fejezetben bemutatott alapvető fogalmaknak.

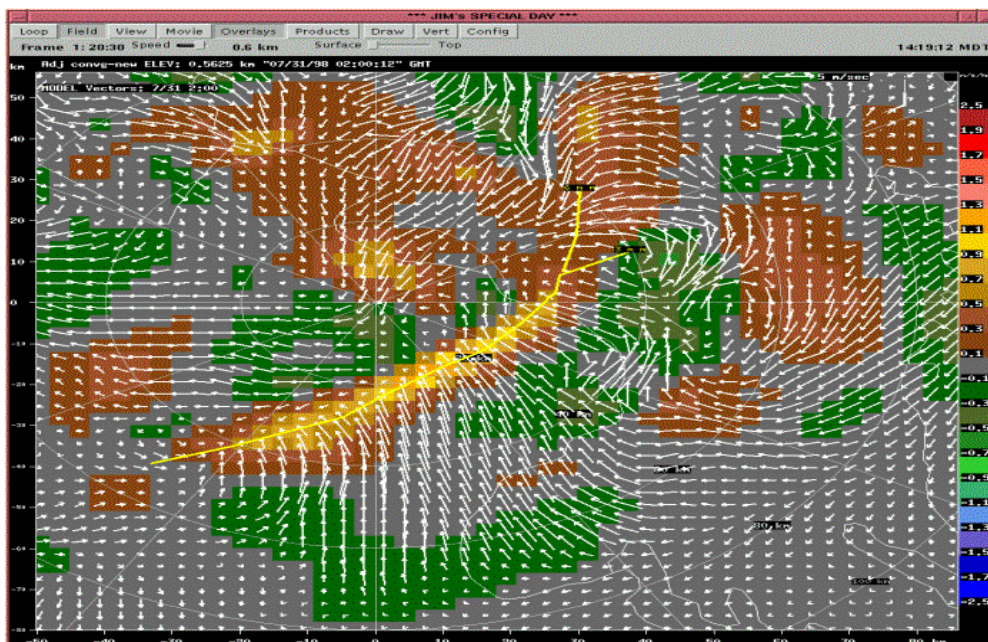
A zivatarok előrejelzésével kapcsolatos módszerek igen sokrétűek, az itt alkalmazott megoldások főként a Doppler radarok által készített nagyfelbontású szélmezők analízisén alapszik. Az alábbiakban az előrejelző rendszer legfontosabb alkotóelemeit foglaltuk pontokba:

- 0-tól 2 óráig terjedő idő és hely specifikus zivatar-előrejelzések készítése
- szakértői módszerek alkalmazása egy döntési eljárás (fuzzy logika) keretein belül
- összetett adatállományok használata
- zivatarok keletkezésének, növekedésének, pusztulásának előrejelzése
- algoritmusok az előrejelzési paraméterek meghatározására (konvergencia vonalak, zivatarok és a felhők alapján)

A következőkben néhány példát mutatunk az itt alkalmazott előrejelzési technikákra és az ehhez felhasznált alap ill. származtatott adatmezőkre.

2. 1. 5. 1. Adatállományok

- Radarmérések (sebesség és reflektivitás)
- Műhold (látható és infravörös tartomány)
- Megfigyelő állomások (befedi a domborzatot)
- Rádiószondás felszállások
- Numerikus modellek outputjai (vertikális profilok, szélmező a rácson)
- Szélmezők előállítása radar segítségével (2. 16. ábra)



2. 16. ábra: Szélmező előállítása radarral

2. 1. 5. 2. Ultrarövidtávú (nowcasting típusú) előrejelzési paraméterek

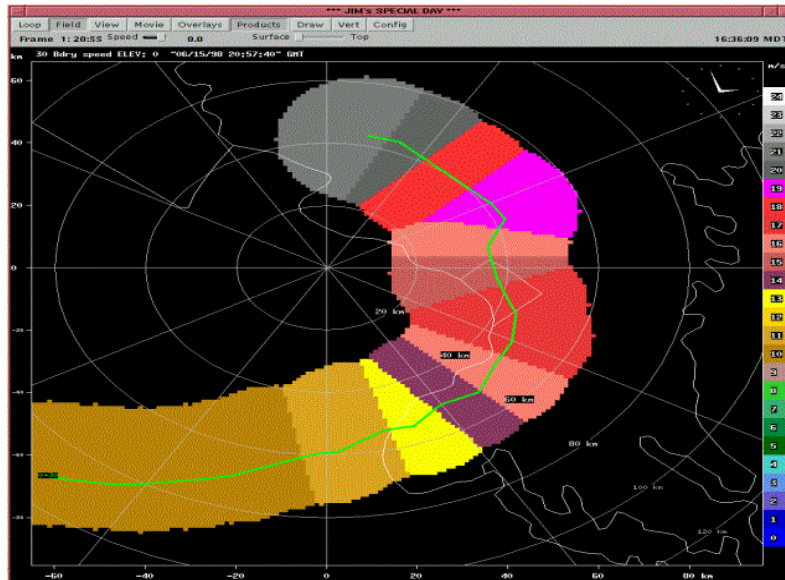
A konvergencia vonalakat jellemző fogalmak

Konvergencia vonal meghatározása:

Ez lehetséges algoritmusok segítségével és/vagy ember által. Az összeáramlási vonalakat jellemző paraméterek alapvető fontosságúak a zivatarok kialakulásának, növekedésének és disszipációjának előrejelzésekor.

Konvergencia vonal emelési körzete:

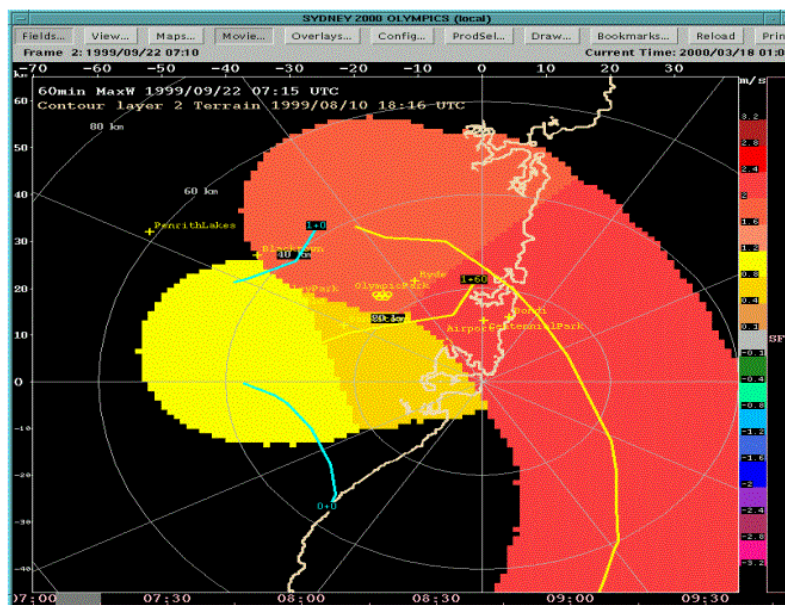
A zöld vonal jelöli a konvergencia vonalat (2.17. ábra), a színezett rész pedig az emelési területet körbe a konvergencia vonal mentén. A színek mutatják a konvergencia vonal mozgásának a sebességét. Az emelési zóna szélessége a mozgás sebességétől függ. A zivatarok kialakulása, majd növekedése leggyakrabban ezen a területen belül történik.



2. 17. ábra: Konvergencia vonal emelési körzete

Vertikális sebesség az összeáramlási zóna mentén:

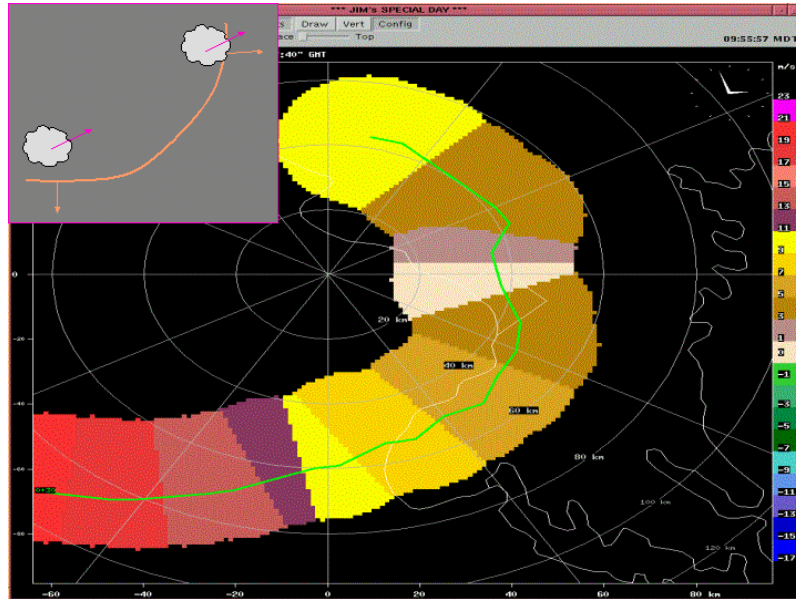
A határrétegen belüli vertikális sebesség kiszámítható a horizontális szélmezből. A magasabb értékek a zivatarok keletkezésének ill. intenzitásuk erősödésének kedveznek.



2. 18. ábra: Vertikális sebesség az összeáramlási zóna mentén

A konvergencia vonalhoz kapcsolódó relatív vezető áramlás:

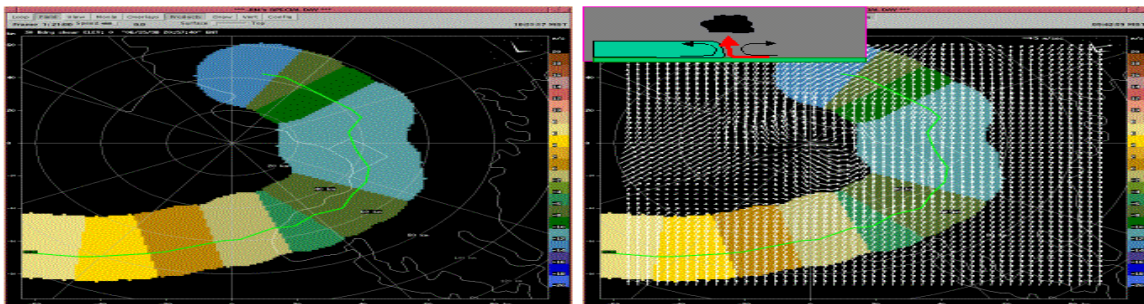
Ez a paraméter használható a szintén konvergencia vonalához köthető relatív cella sebesség helyett. A feltételezés az, hogy a 2 és 4 km közötti rétegre jellemző átlagszéllel becsülhető a cella mozgása (2. 19. ábra). A barna színek (<4 m/s) jelölik azt a területet, ahol a zivataroknak és a konvergencia vonalnak együtt kellene maradniuk és a lila ill. piros színek azok a területek, ahol a konvergencia vonal elmozdulhat a celláktól.



2. 19. ábra: A cellák valószínűsített mozgása az alacsonyszintű áramlás alapján

Konvergencia vonalhoz köthető alacsony szintű szélnyírás:

Ez egy különbség a szélvektorban a talaj és a 2,5 km-es szél között. A 2,5 km-es szelet rádiószondás felszállásokból ill. modellekből, míg a talaj közeli szelet Doppler radarmérésekből nyerhetjük (2. 20. ábra).

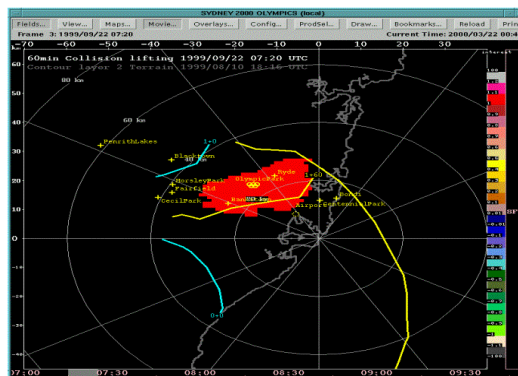


2. 20. ábra: Alacsonyszintű szélnyírás mező radar és felszállások alapján

A sötétzöld ill. kék színek jelölik azokat a területeket, ahol a feláramlás felegyenesedik, míg a barnás részek azok, ahol döntött marad, így nem kedvező a zivatarok szempontjából.

Konvergencia vonalak találkozására (ütközése):

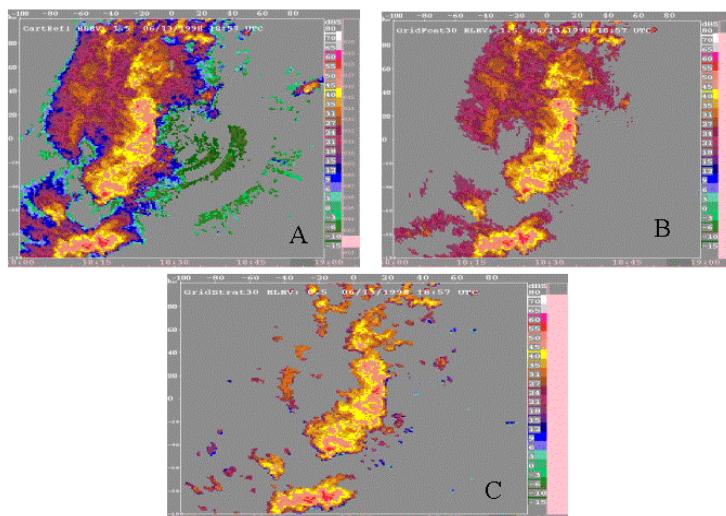
Konvergencia vonalak találkozási zónái meghatározhatók az egyes konvergencia vonalak extrapolációjával (2. 21. ábra). A kék vonalak mutatják az eredeti helyüket, míg a sárga az extrapolációval kapott elmozdulás. A piros rész jelzi azt a térséget, ahol a konvergencia vonalak találkozására valószínűsíthető az előrejelzési időszakban. Ez a terület az, ahol a zivatarok kialakulása a legvalószínűbb.



2. 21. ábra: Konvergencia vonalak találkozásának előrejelzése

Zivatarok extrapolációja

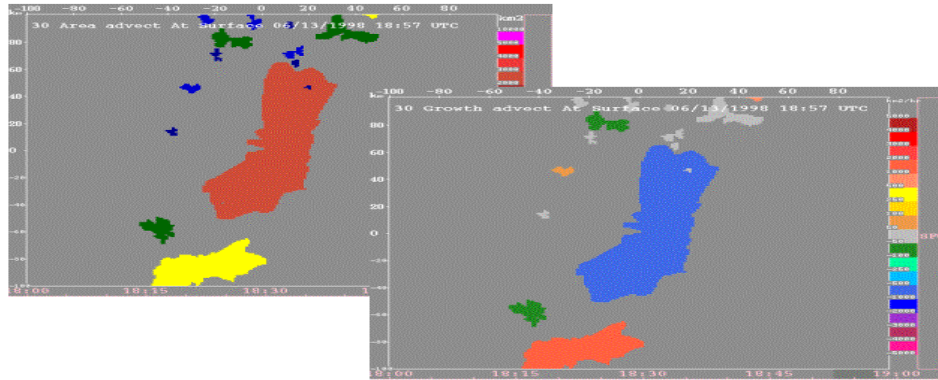
- Kezdeti radar reflektivitási mező alapján (A)
- Extrapolált radarkép a múltbéli mozgás alapján (B)
- Szűrő alkalmazása, mely eltünteti a nem konvektív echokat (C) (2. 22. ábra)



2. 22. ábra: Zivatarok extrapolációja

Zivatar mérete, fejlődése

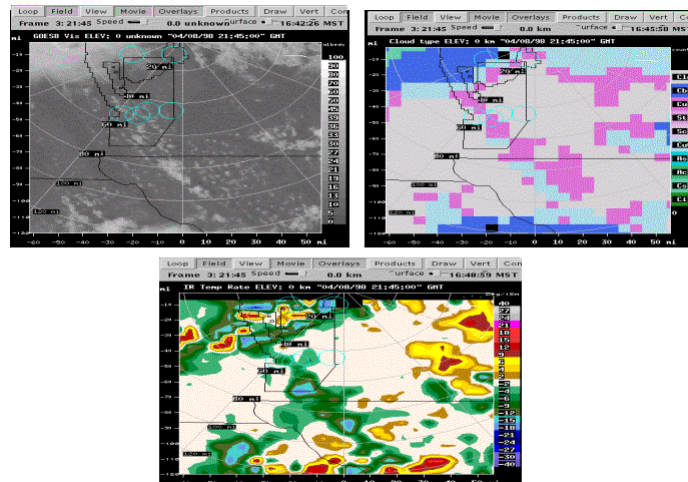
A zivatarok méretét (m^2) a színek jelölik (felső), a nagyobb kiterjedésű rendszerek tovább élnek (2. 23. ábra). A növekedés trendjét is a megfelelő színek mutatják (alul) ($m^2/óra$).



2. 23. ábra: Zivatarok fejlődésének, növekedésének megjelenítése

A felhőket jellemző paraméterek

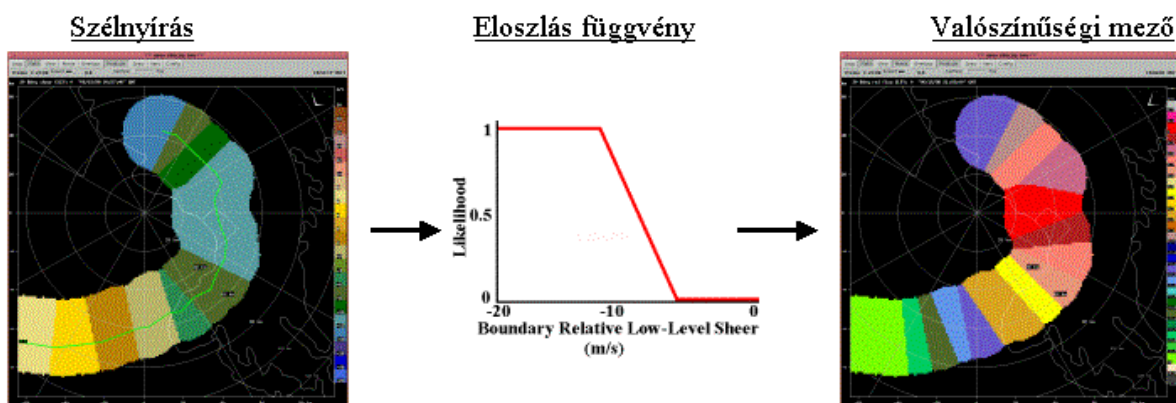
Az infravörös (IR) és a látható (VIS) tartományban készült műholdképek alapján a felhőket automatikusan osztályozhatjuk. (2.24.ábra) A jobb oldalon egy ilyen, csoportosítást láthatunk, a különböző típusú felhőket színezés jelöli. Az infravörös képek segítségével, az egyes időlépcsőkben, a felhőtető hőmérséklet különbsége alapján becslést adhatunk, hogy a cumulusok növekednek-e vagy sem. A képen (alul) egy ÉNY-DK tengelyű Cumulus vonal felhőtető hőmérsékletének csökkenése látható (kék és zöld), amiből a felhők növekedésére következtethetünk.



2. 24. ábra: Felhőket jellemző paraméterek (magyarázat a szövegben)

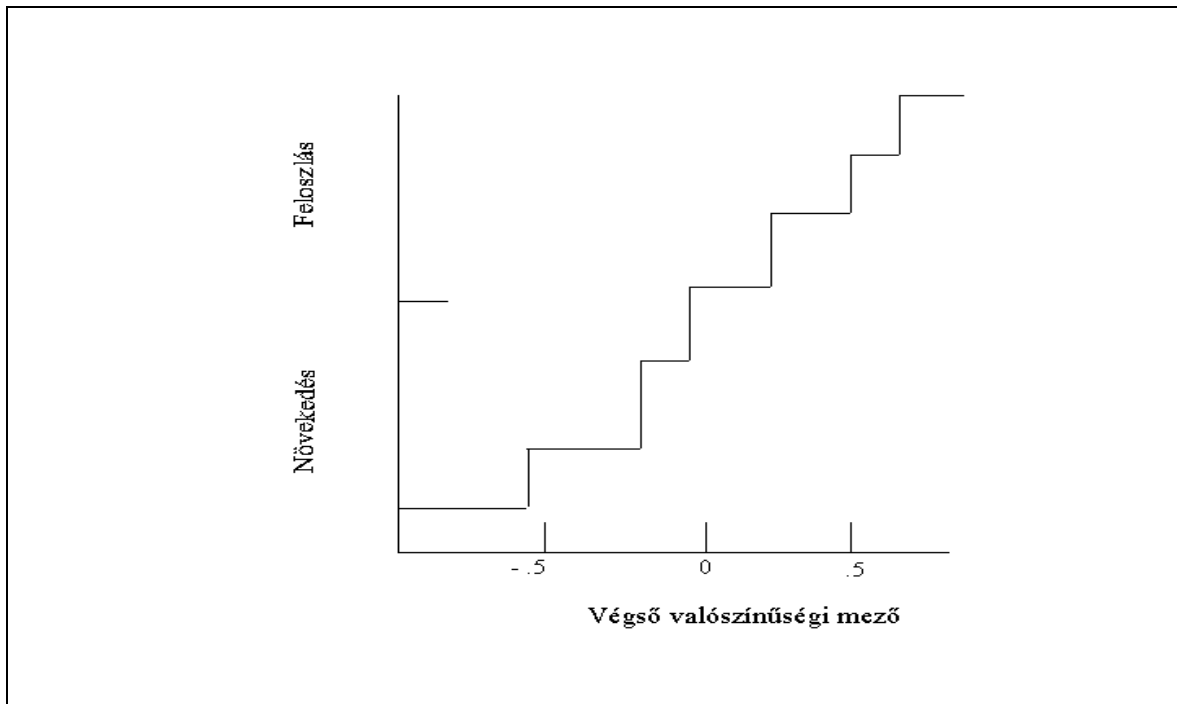
2. 1. 5. 3. Az előrejelzési paraméterek kombinációjának módszertana

Ezen eljárás során a fuzzy logika koncepcióját használják. Minden előrejelzési paramétert/mennyiséget átalakítanak egy -1 és 1 közé eső számmá, amelyek kapcsolatba hozhatók a zivatarok kialakulásával, növekedésével, leépülésével. (-1 nagyon valószínűtlen, 1 nagyon valószínű) (2. 25. ábra)



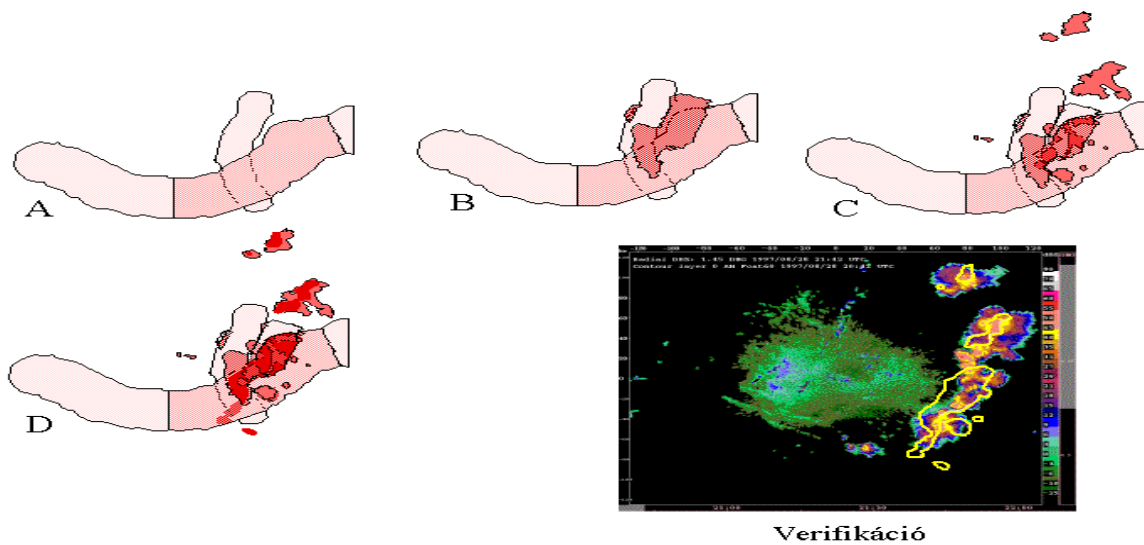
2. 25. ábra. A szélnyírás és zivatar kialakulásának valószínűségi kapcsolta

Az ábrán (10. ábra) konvergencia vonalra vonatkozó relatív alacsonyszinti szélnyírásra láthatunk példát. A valószínűségi eloszlás függvény segítségével láthatjuk, hogyan kapcsolódnak az alacsonyszinti szélnyírás értékek, pl. a zivatarok kialakulásának valószínűségéhez. A negatívabb értékek esetén valószínűbb a zivatar. Belátható, hogy minden, -a zivatarok előrejelzésére szolgáló-, valószínűségi mező igen összetett, ezért egy származtatott súlytényezővel relatívan (fontosságuk szerint) veszik figyelembe őket az előrejelzésnél. Ezen –már megfelelően súlyozott- mezőket összegzik és így kapják a végső valószínűségi mezőt. Ezen folyamat során elkülönülnek egymástól a zivatar keletkezésének, növekedésének vagy éppen leépülésének valószínűségi értékei, a meglévő radarechók alapján. (2. 26. ábra)



2. 26. ábra: Zivatar keletkezésére, növekedésére ill. feloszlására vonatkozó valószínűségek

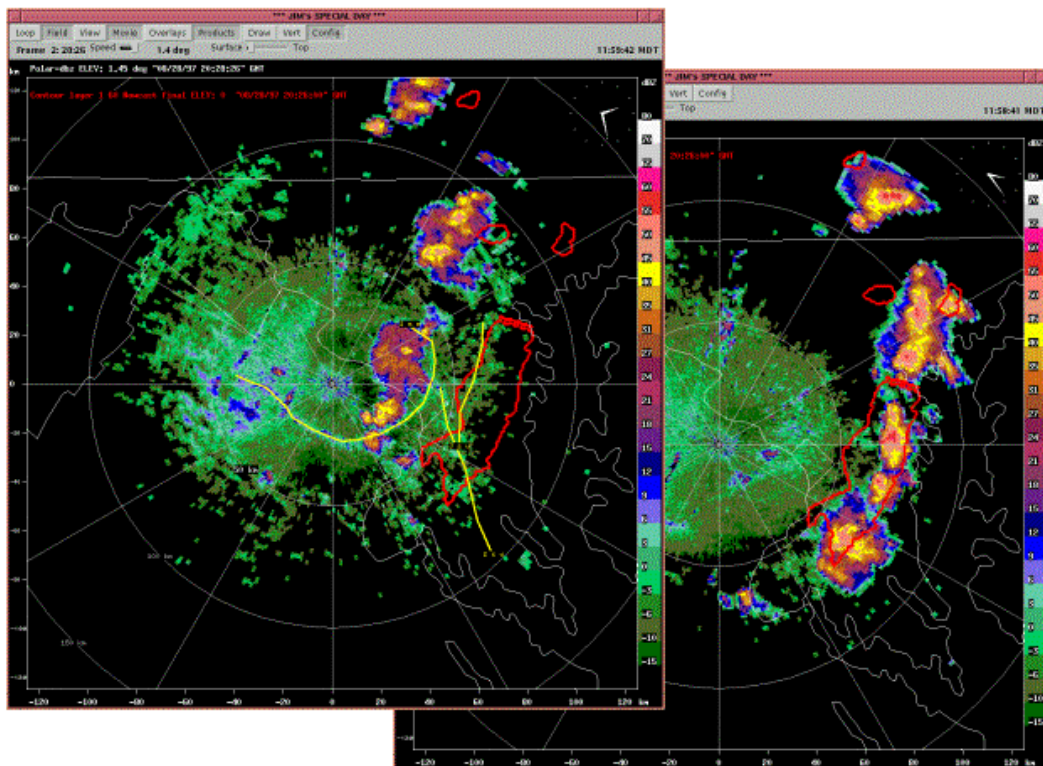
A grafikon egy eloszlás függvény példája, amely megadja a végző növekedési/leépülési valószínűségi mezőt vagyis az egész területre a növekedést vagy disszipációt minden radar reflektivitási érték figyelembevételével. Az eloszlás függvényeket és súlyokat az előrejelző definiálja és könnyen módosíthatja.



2. 27. ábra: Zivatarok helyének előrejelzése egyedi valószínűségi mezők segítségével

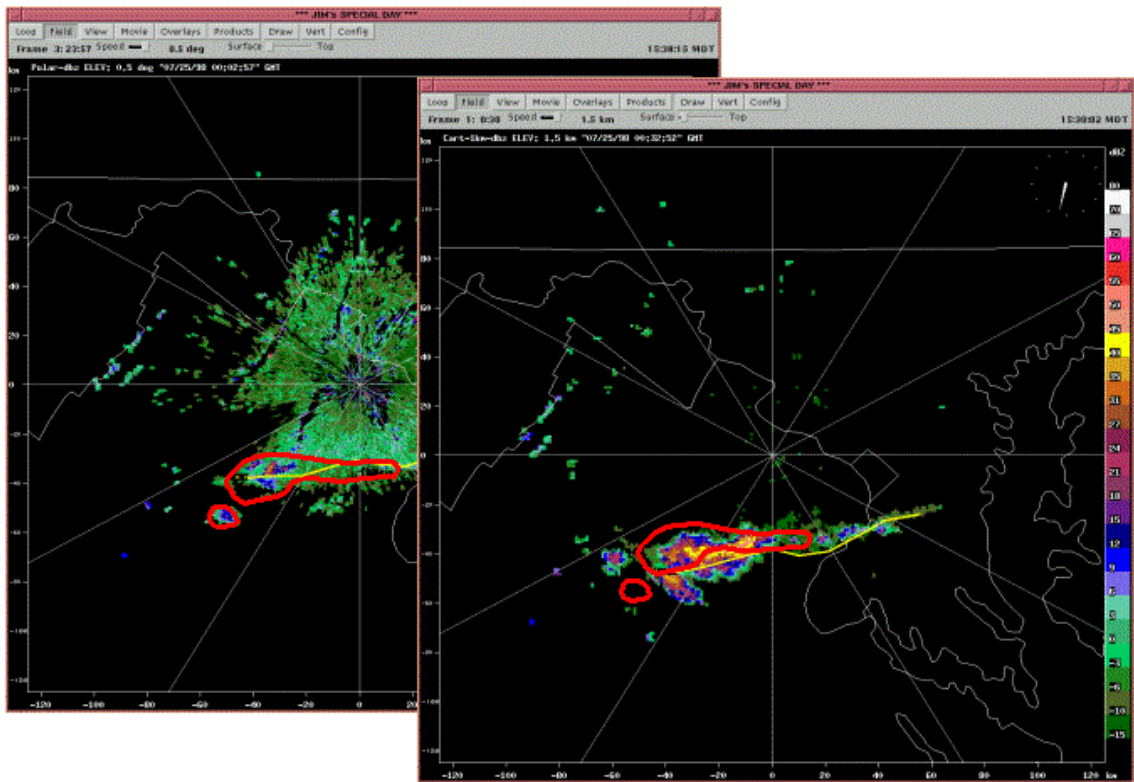
- a.) Valószínűségi kapcsolat (A) a konvergencia vonalra vonatkozó relatív irányító áramlással, majd a kormányzó áramlás valószínűségi mezeje súlyozás után
 - b.) Valószínűségi kapcsolat 2 összeáramlási vonal ütközésekor (B), majd az ütközésre vonatkozó valószínűsített mező súlyozás után, ráfektetve a „jósolt” mező.
 - c.) Valószínűségi kapcsolat a radarmérésekből származó advektált Cu-mezővel (C), majd a súlyozott cumulus valószínűségi mező, rátéve az előre jelzett mezőre.
- Végül a fentiek alapján összegzett valószínűségi mező kiemelten (D), majd az előrejelzési végtermék (sárga vonal) illetve a verifikáció (2. 27. ábra).

2. 1. 5. 4. Példák ultrarövidtávú előrejelzésekre

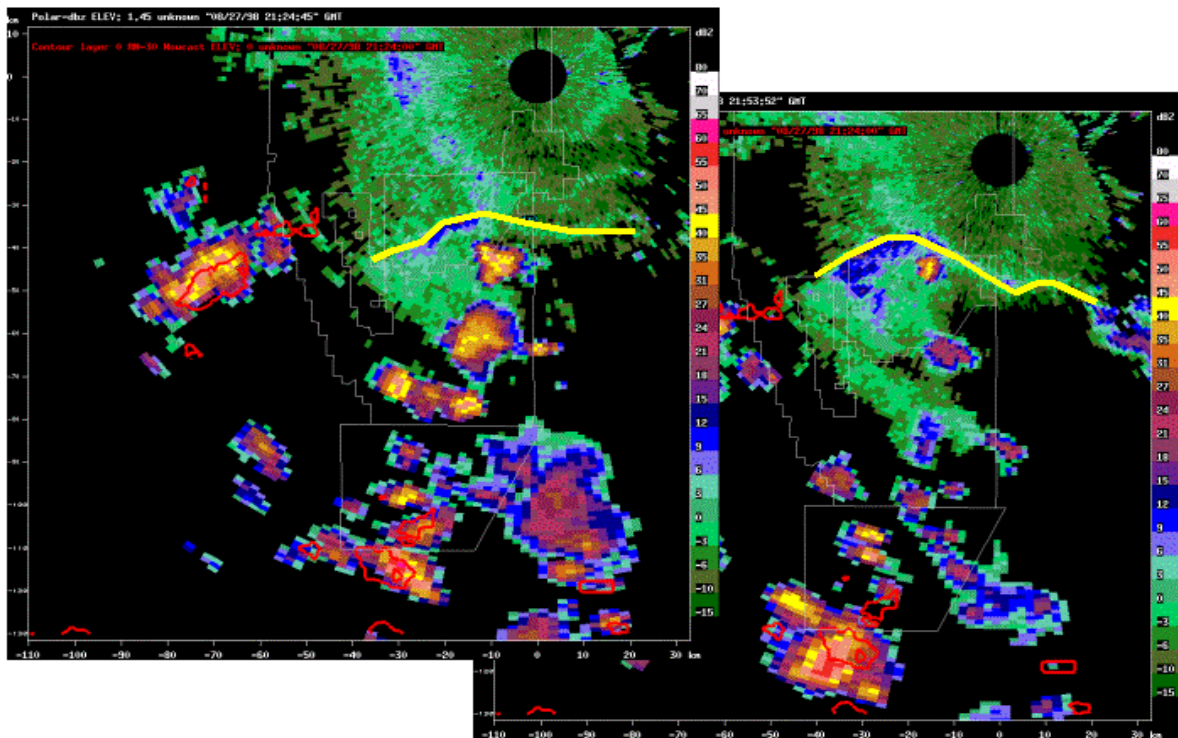


2. 28. ábra: Instabilitási vonal kialakulása

Konvergencia vonalak találkozásakor instabilitási vonal kialakulása (13. ábra Sterling, VA)
 Vörös kontúr: az előre jelzett mezők (>35 dBZ) A sárga vonalak az összeáramlási vonalakat jelölik, amelyek a gust front és az öböl felől fújó szél (alacsonyszintű alapáramlás) találkozásánál alakulnak ki.



2. 29. ábra: Zivatar kialakulása egy állandó konvergencia vonal mentén



2. 30. ábra: Zivatarok pusztulása

Zivatarok disszipációja gyakran előfordul, amikor a konvergencia vonal elmozdul és maga mögött hagyja a cellákat.

Az alábbiakban pontokba szedve mutatjuk be, az ismertett ultrarövidtávú zivatar-előrejelző, rendszer előnyeit ill. hátrányait.

Az automatikus előrejelzések előnyei:

- Ezen előrejelzések láthatóan jól alkalmazhatóak konvektív folyamatok (zivatarok) kialakulásának, fejlődésének ill. disszipációjának előrejelzésére, megfelelően kiválasztott prognosztikai paraméterekkel illetve ezen tényezők -egy tapasztalati rendszeren belüli- kombinációjával.
- Láttuk, hogy az így kapott előrejelzések beválása jobb az extrapolációnál, különösen igaz ez zivatarok fejlődési stádiumában. Emellett lehetőség van a módszerek továbbfejlesztésére.

Az automatikus előrejelzések hátrányai:

- A konvergencia vonalak -melyek döntő fontossággal bírnak ezen előrejelzéseknél- automatikus detektálásához jelentős fejlesztésre van szükség
- Nem áll rendelkezésre részletes információ a stabilitási viszonyokról
- Továbbá szükség van a növekvő cumulusokat meghatározó módszerek tökéletesítésére

3. A vizsgálatokhoz használt eszközök leírása

Az előző fejezetben látott automata előrejelző rendszer elsősorban a Doppler radarral történő szélmező előállításán alapul. Mivel hazánkban nem állt módunkban ilyen típusú adatállományokkal vizsgálatokat végezni, ezért a Kárpát-medence földrajzi viszonyai között kialakuló konvektív folyamatokat egy nagy felbontású modell segítségével elemeztük.

A következőkben ismertetjük azokat az alapvető fogalmakat, eljárásokat, amelyek segítségével számításainkat majd vizsgálatainkat végeztük.

3. 1. Konvektív hasznosítható potenciális energia

A címben szereplő energiajellelű mennyiséggel a vertikálisan kimozdított légrézecskeire ható felhajtóerőt (ami természetesen lehet negatív vagy pozitív), szokták becsülni.

A CAPE (**C**onvective **A**vailable **P**otential **E**nergy), tehát megadja a konvektív folyamatokban kialakuló függőleges sebességből fakadó maximális mozgási energia szisztematikus felülbecslését 1 kg levegőre vonatkozóan. A mértékegysége J/kg. A függőleges irányban kimozdított részecske, a környezetétől függően, három lehetséges állapotba kerülhet azon a helyen, ahová jutott; vagy távolodik a kezdeti helyétől, vagy visszatér eredeti helyzetébe vagy az új helyzetében, ismét egyensúlyi állapotba kerül. Így beszélhetünk labilis (instabil), stabilis, indifferens rétegzettségről a részecskeire ható eredő erők tekintetében. A kimozdított részecskeire ható felhajtóerő a környezeti levegő és a légréz sűrűségkülönbségéből adódik. A szakirodalomban, ezen felhajtóerő és a gravitációs erő eredőjét nevezik felhajtóerőnek, vagy buoyance-nak.(röv. buoy).

A konvekció során a részecske kezdetben a száraz adiabatán emelkedik a kondenzációs szintig, tovább emelkedve, a magassággal már kevésbé csökken a hőmérséklete a felszabaduló kondenzációs hő miatt. Ezáltal az emelkedő légréz hőmérséklete magasabbá válhat a környezet hőmérsékleténél, azt a magassági szintet, ahol ez legelőször bekövetkezik szabad konvekciós szintnek nevezzük. (Miller) A 3.1.1. ábrán ez a szint 656 hPa-on található. A környezet hőmérsékletének csökkenése a tropopauzához közeledve egyre kisebb mértékű, így a légrézecske egy idő múlva sűrűbb lesz, mint a környezete, ahol ez bekövetkezik az a szint, a kiegyenlítési szint. Az ábrán ez a szint 196 hPa-on van. Ekkor a részecske emelkedése még nem áll meg, hiszen nagy lendületre tesz szert a szabad konvekciós és a kiegyenlítési

szint között. Miután egy magasságban elveszíti lendületét tovább már nem emelkedik, ezt a szintet nevezzük elméleti felhőtetőnek. Ily, módon a magasra törő zivatarfelhők cirrusz tetejének hőmérséklete jóval alacsonyabb lehet, mint az ugyanabban a magasságban lévő környező levegőé. A szabad konvekciós rétegben (a szabad konvekciós szint és a kiegyenlítési szint között) a légréteg környezete munkát végez a részecskén. A maximális sebességét a részecske a kiegyenlítési szinten éri el.

A felhajtóerő a következő módon adható meg:

$$buoy(\rho, \rho') = \frac{\rho - \rho'}{\rho'} g,$$

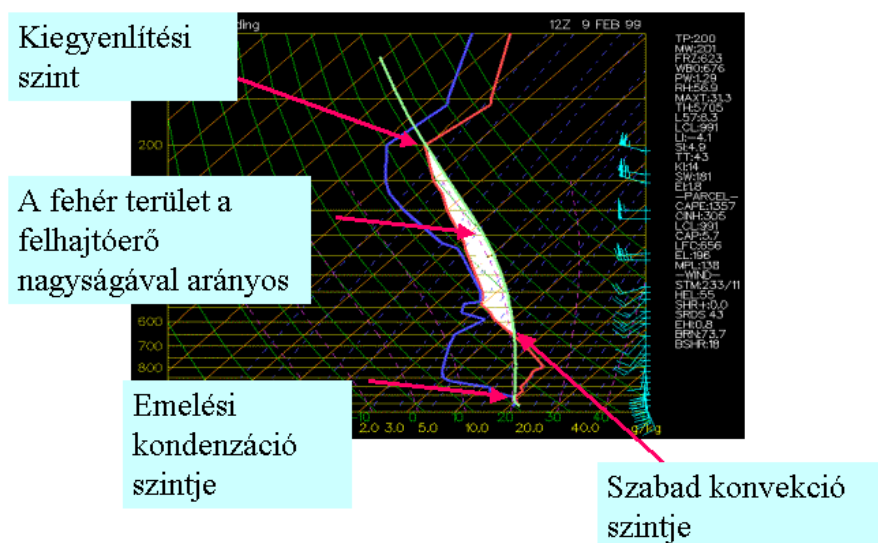
ahol ρ' az emelkedő levegőrész sűrűsége, míg a ρ a környezet sűrűsége, g gravitációs állandó. A virtuális hőmérséklet segítségével a felhajtóerő így írható:

$$buoy(T, T'_v) = \frac{T - T'_v}{T_v} g.$$

A konvektív hasznosítható potenciális energiát az utóbbi egyenlet, szabad konvekciós (FCL) és a kiegyenlítési szint (EQL) közötti integrálásával kapjuk:

$$CAPE = \int_{FCL}^{EQL} \frac{T - T'_v}{T_v} g.$$

Hasznosítható Konvektív Energia



3. 1. 1. ábra: A vertikálisan kimozdított részecske termodinamikai útja

A termodinamikai diagramon a kiegyenlítési szint és a szabad konvekciós szint közötti terület arányos a konvektív hasznosítható potenciális energiával. Az ábrán ez a fehéren satírozott terület. Szükségszerűen ezzel a területtel megegyező a kiegyenlítési szint fölötti rész.

A CAPE-nek kimutatható napi menete van, a légköri labilitás a délutáni, esti órákban éri el maximumát, mikor az alsó rétegek a legjobban felmelegedtek, a minimumot a hajnali ill. reggeli időszakban mérhetjük. Ezen túl a CAPE értékeinek természetesen évszakos változása is van, ill. függ a fennálló makroszinoptikus helyzettől is. (Weidinger és Matyasovszky, 1998)

A konvektív hasznosítható potenciális energia értékek alapján a légköri labilitást különböző kategóriákba sorolhatjuk:

0 J/kg	0-1000 J/kg	1000-2500 J/kg	2500-3500 J/kg	3500 J/kg fölött
stabilis	gyengén labilis	közepesen labilis	erősen labilis	szélsőségesen labilis

3. 2. Nedvesség konvergencia

A numerikus szimuláció során a konvektív rendszerek jellemzésére, szerkezetük tanulmányozására a nedvesség konvergencia mezőt használtuk fel. Ezen mennyiség többet nyújt az egyszerű konvergenciától, mivel a vizsgált térség nedvességi viszonyairól is tájékoztatást ad. A nedvesség konvergenciát már sikerrel alkalmazták, elsősorban szinoptikus skálájú, konvektív folyamatok (zivataros hidegfrontok, zivatarláncok, MKK-k) tanulmányozásakor. (Horváth és Geresdi, 2000; Fehér Balázs, 2002)

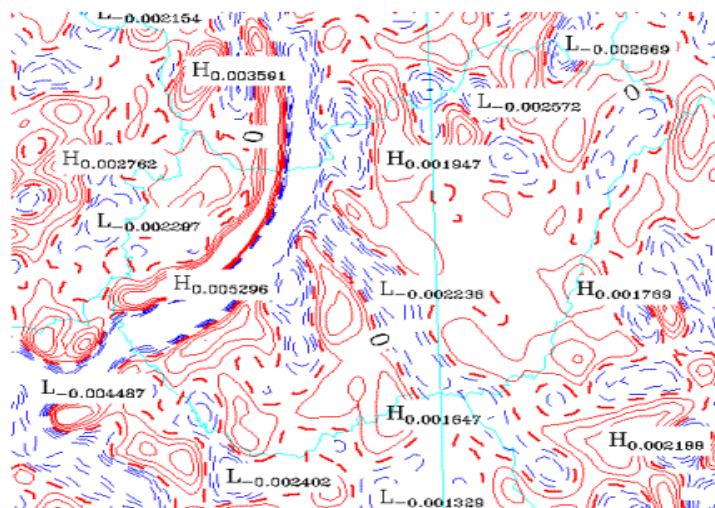
A nedvesség konvergenciát a következő módon definiálhatjuk:

$$\nabla(\vec{V}r) = \frac{\partial(ur)}{\partial x} + \frac{\partial(vr)}{\partial y}$$

ahol (u,v) a szélvektor horizontális komponensei (m/s); r a vízgőz keverési aránya (kg/kg).

A gyakorlatban a nedvesség konvergencia számítása egy másodrendben pontos véges differencia sémával történt.

06. 04. 1999. 12 UTC Nedvesség konvergencia mező
/Horváth és Geresdi, 2000/



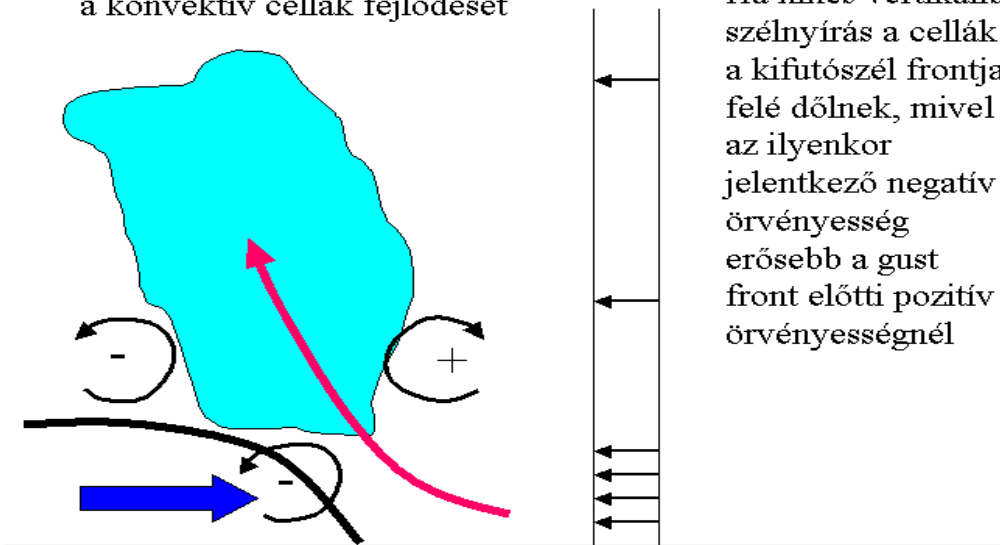
3. 2. 1. ábra

A 3.2.1. ábrán egy nedvesség konvergencia mezőt láthatunk, melyen szaggatott vonallal jól kivehető a Dunántúlon lévő zivatarlánc előtti konvergencia zóna illetve a vele párhuzamosan húzódó zivataros magasnyomás. Azonban a kisebb skálájú konvektív cellák mezői már simítottabban jelentkeznek. Ezeknél a vizsgálatoknál egy hidrosztatikus modellt használtak (ALADIN).

A nedvesség konvergenciát azonban használhatjuk olyan jelenségek vizsgálatára is, mint például zivataros kifutószél másik cellára gyakorolt gerjesztő hatása, illetve multi- vagy supercellás konvekció, amelyek zömében már a mezo- β méret tartományba esnek.

A következő sematikus ábrákon (A, B, C) azt láthatjuk, hogy a konvergencia típusa, miként befolyásolja a feláramlási csatorna helyzetét, ezáltal a konvekció fejlődését. Ezen ábrákból az is leolvasható, hogy az alacsony szintű szélnyírás komoly szerepet kap a konvektív folyamatok számára optimális feltételek kialakításában.

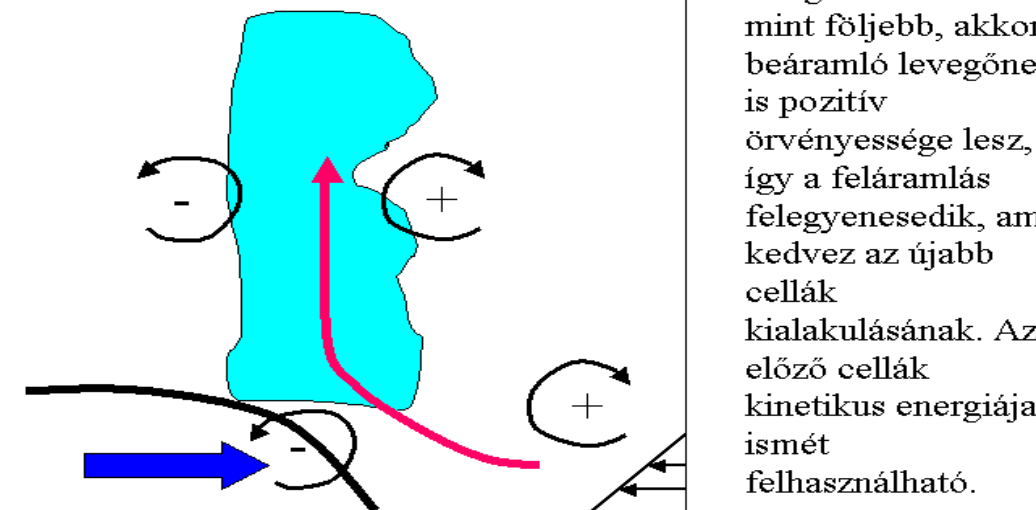
A konvergencia típusa meghatározza a konvektív cellák fejlődését



Ha nincs vertikális szélnyírás a cellák a kifutószél frontja felé dőlnek, mivel az ilyenkor jelentkező negatív örvényesség erősebb a gust front előtti pozitív örvényességnél

A

A konvergencia típusa meghatározza a konvektív cellák fejlődését

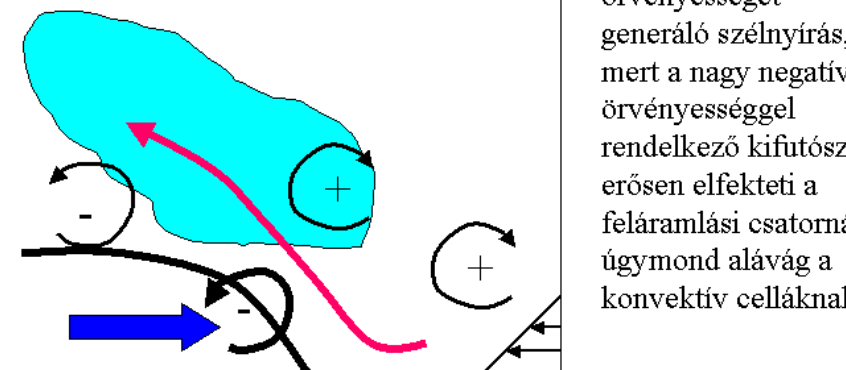


Ha a szél az alsó rétegekben erősebb mint följebb, akkor a beáramló levegőnek is pozitív örvényessége lesz, így a feláramlás felegyenesedik, ami kedvez az újabb cellák kialakulásának. Az előző cellák kinetikus energiája ismét felhasználható.

B

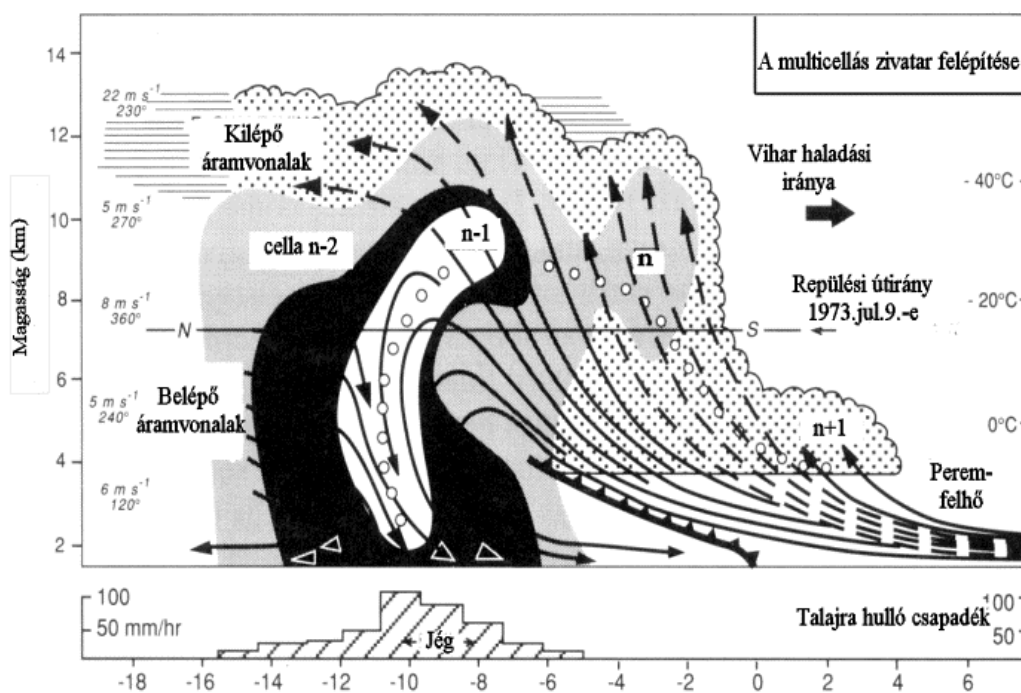
A konvergencia típusa meghatározza a konvektív cellák fejlődését

Ha a kitörő áramlás túl gyorsan halad, akkor hiába van meg az alsó szinteken a pozitív örvényességet generáló szélnyírás, mert a nagy negatív örvényességgel rendelkező kifutószél erősen elfekteti a feláramlási csatornát, úgymond aláág a konvektív celláknak



C

Igen gyakran előforduló konvektív rendszer a multicellás zivatar, melynek fenntartásában döntő szerepet játszik az előregedő cellák által keltett zivataros kifutószél frontjának (gust front vagy pseudo hidegfront) és a mindenkori alacsony szintű áramlás találkozásának zónájában kialakuló konvergencia mező (3. 2. 2. ábra).



3. 2. 2. ábra: Multicellás rendszer felépítése

Ezen rendszerek érett cellája fölött, a kiterjedt „cirruszernyő” fölé nyúló csúcs figyelhető meg, amely a rendszer legerősebb feláramlási csatornájának helyét mutatja meg, ez azonban, csak rövid ideig marad fenn, utat engedve a következő celláknak. Ha ez a csatorna tartósan fennmarad egy helyen, akkor a rendszer már szupercellás jelleget mutat (Fujita).

3. 3. Az MM5 modell

A következőkben, elsősorban felhasználói szempontok szerint, a vizsgálatainkhoz használt numerikus modellt mutatjuk be.

3. 3. 1. Az MM5 koordináta rendszere és dinamikája

Az Egyesült Államokban, a '70-es években kezdődött a modell fejlesztése az NCAR (National Center for Atmospheric Research) és a Penn State Egyetem együttműködésében. Az eredetileg hidrosztatikus modellt a 80-as évek elején nem-hidrosztatikussá fejlesztették és hozzáadták a négydimenziós adatasszimiláció ill. a beágyazott modell futtatási lehetőségét. Ez a modell Magyarországon -az Országos Meteorológiai Szolgálatnál- 2002-óta működik szolgálatoszerűen, 2003 tavaszától a nowcasting rendszer részeként 3 óránként kerül futtatásra, a Pécsi Egyetemen felhőfizikai kutatásokra alkalmazzák.

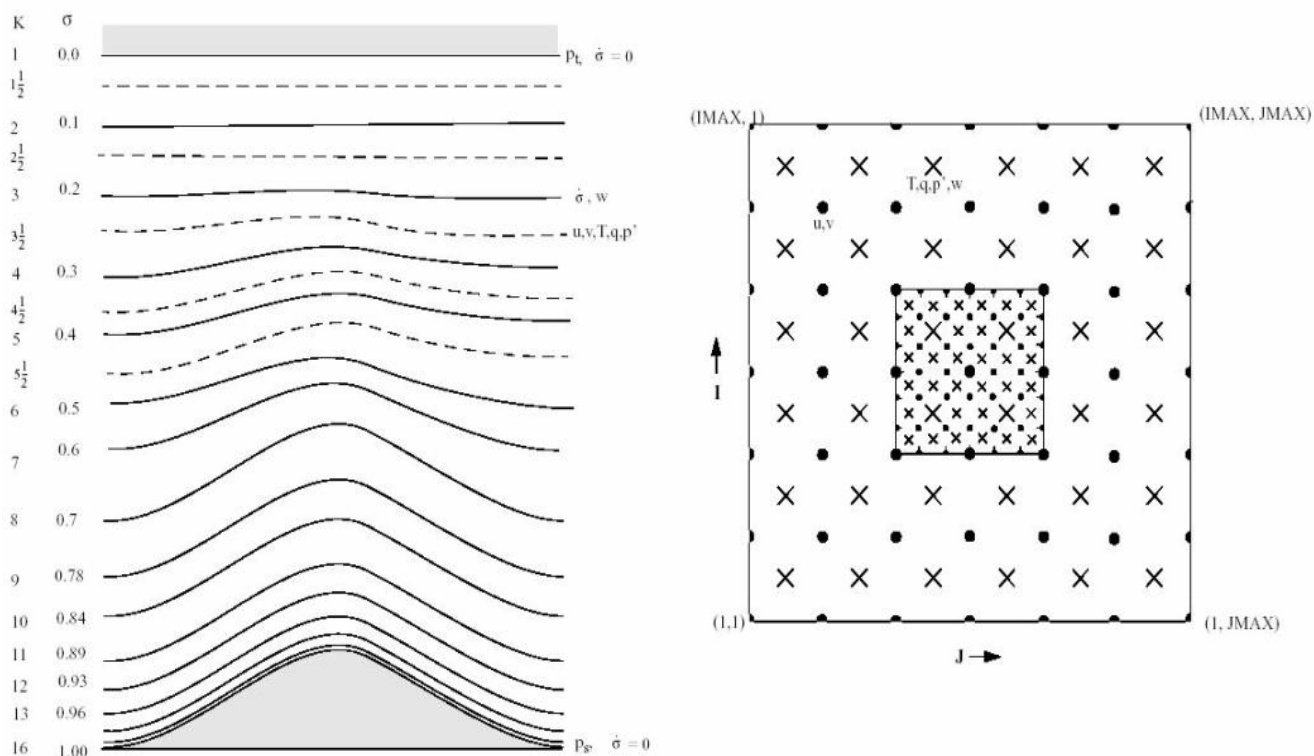
A modell különböző térképvetületek felett képes számolni (polár-sztereografikus, kúpvetület, Mercator-vetület, stb.). Az MM5 vertikálisan a felszínkövető szigma koordinátázást alkalmazza, azaz

$$\sigma = (p - p_t) / (p_s - p_t)$$

ahol p a nyomás, p_t a konstans nyomásérték a modell tetején, p_s a felszíni nyomás.

A 3. 3. 1. ábrán látható, hogy a modellben ún. egész és fél szigma szintek vannak: a fél szigma szinteken a szél, hőmérséklet, nedvesség és a légnyomás van értelmezve, míg az egész szigma szinteken a vertikális sebesség kerül megadásra. Horizontális koordináta rendszerként az Arakawa-Lamb rendszert alkalmazták. Ennek lényege, hogy a fő rács pontjain (pontokkal jelölve) a horizontális sebesség, az ún. köztes pontokban (x-szel jelölve) pedig a saklár mennyiségek és a vertikális sebesség jelenik meg. Mód van arra is, hogy a modellben olyan kisebb területeket jelöljünk ki, ahol nagyobb rácsfelbontás mellett az alapmodelltől eltérő

fizikai parametrizációk alkalmazásával vizsgálhatjuk a kritikus időjárási jelenségek fejlődését- ez a beágyazott modellezési (nesting) lehetőség.



3. 3. 1. ábra: Az MM5 modell koordináta-rendszere

Az MM5 modell eredetileg hidrosztatikusnak készült, később fejlesztették nem-hidrosztatikussá bevezetve a vertikális sebességet, ami viszont felbontja a hidrosztatikus egyensúlyt és egy újabb nyomás perturbációs tagot jelent. A problémát úgy oldották meg, hogy bevezettek egy vertikális referencia állapotot, amelyet hidrosztatikusnak tekintettek, s az ehhez képest történő nyomás perturbációt (p'), valamint a vertikális sebességet (w) prognosztikai változóként kezelték. A modell alapegyenletei a perturbációs nyomásváltozásból, az x , y és z komponensű momentum egyenletből, a termodinamikai egyenletből, valamint a diagnosztikai egyenletekből állnak. A prognosztikai egyenletek magukba foglalják a diffúziót is. A mozgásegyenletek tartalmazzák a Coriolis-erő mindhárom komponensét, továbbá a görbületi (metrikus gyorsulási) tagokat is. Ugyancsak prognosztikai egyenletek írják le a vízgőz fázisátalakulásait és a felhőfizikai folyamatokat. Mindez lehetővé teszi az egészen kis skálájú mezo- γ folyamatok- ilyenek például a zivatarcellák- modellezését is. A modell egyenletek véges differenciás alakban kerülnek megoldásra. A gradiensek másodrendű centrális formában jelennek meg. A numerikus megoldást nehezíti, hogy az egyenletek olyan gyors terjedésű mozgásformákat is magukba foglalnak, mint a hanghullámok, ezért a szélkomponensek (u , v , w) és a nyomási perturbációs tag (p')

előrejelzésénél az integrációs időlépcsőt felbontják négy kisebb lépésre; míg a többi paraméter előrejelzésére az $n-1$ és $n+1$ időlépcsők között egy lépésben (long leapfrog) történik. A vertikális hanghullámok kezelése –amiatt, hogy a határréteg leírására az alsó szinteken nagyon sűrű rácshálózatot kell bevezetni- csak implicit sémával lehetséges. Ez az egyetlen terület a modellben ahol implicit sémát használnak.

3. 3. 2. Az MM5 modell parametrizációi

A modell egyik erőssége, hogy széles parametrizációs lehetőséget ajánl fel a felhasználóknak. A cumulus-, a határréteg-, a nedvességi-, a sugárzási-, ill. a talaj sémák (v. parametrizációs eljárások) közül lehet választani. Egy jól kiválasztott parametrizációs együttes jelentősen csökkentheti a modell futási idejét. Lehetővé teszi annak átgondolását, hogy milyen folyamatok leírására helyezzük a hangsúlyt, s ehhez melyek az optimális sémák.

A cumulus parametrizáció egyik formája, ha nem alkalmazunk cumulus sémát, hanem a modell dinamikájára bízunk a gomolyfelhők kezelését. Ennek nyilvánvalóan akkor van értelme, ha a horizontális rácsfelbontás jóval kisebb, mint egy zivatarfelhő karakterisztikus mérete. Ez az eljárás 6-8 km-nél finomabb rács esetén jöhet szóba. Kis felbontás esetén nyilvánvalóan ez a legjobb megoldás, de ha a felbontás túl nagy (>10 km) , akkor irreálisan erős konvektív aktivitáshoz vezethet a nem-hidrosztatikus modell alkalmazása. (Az MM5 prognosztikai egyenleteket használ a felhőfizikai folyamatok leírása során ld. előbb)

Nagy horizontális rácsfelbontás esetén 8 különböző cumulus séma közül lehet választani. Ezek a különböző nemzeti modellekben alkalmazott ismert eljárások, mint pl. a Grell, a Kain-Miller vagy a Kain-Fritsch sémák, amelyek főleg abban különböznek egymástól, hogy milyen módon számolják a felhajtóerőből származó labilitási energiát, s milyen relaxációs időt alkalmaznak (*Bett és Miller 1993, Kain és Fritsch 1993, Grell et al. 1994*).

A határréteg modellezésében 7 különböző sémát lehet alkalmazni. E modellek elsősorban a turbulens kinetikus energia, a turbulens diffúziós együttható és a keveredési rétegvastagság számításában térnek el egymástól- alkalmazhatóságuk nagyban függ attól, hogy milyen talaj-modellt használunk.

Az MM5 modellben 8 különböző nedvességi séma áll a felhasználók rendelkezésére. A sémákban különböző mélységgel veszik figyelembe a felhőfizikai folyamatokat, az egyszerűbb közelítéstől (Hsie séma, ahol csak a vízgőz-felhőcsepp-esőcsepp kapcsolatokat vizsgálják) egészen a bonyolult öt fázisú Goddard sémáig (ahol a felhőcsepp-vízgőz-graupel-

jég-esőcsepp kölcsönhatásokat veszik figyelembe). A sémák helyes kiválasztása sokat javíthat egy-egy előrejelzés pontosságán (Tao és Simson, 1989; Schultz 1995).

A sugárzási modelleknél négyféle választási lehetőség van, a talajmodelleknél három. A talaj sémákban a modell az ún. „substrate temperature”-t használja, amelynek a lényege, hogy egy bizonyos mélységben a talajhőmérsékletet állandónak tekintjük, a fölötte lévő talajrétegekben viszont a modell futtatása során változnak a hőmérsékleti és nedvességi viszonyok, azaz a légköri modell tulajdonképpen nem a légkör alsó határán, hanem a talajban végződik (Xiu és Pleim, 2000).

3. 3. 3. Négydimenziós adatasszimiláció

Az MM5 modell egyik érdekessége, hogy lehetőség van az ún. négydimenziós adatasszimilációs séma (FDDA: **f**our **d**imensional **d**ata **a**ssimilation) alkalmazására. Az FDDA lényege, hogy a modell futása során figyelembe veszi a mérések és megfigyelések adatait, oly módon, hogy a futási idő nem az utolsó mérési periódustól indul, hanem pl. 2 időponttal korábban. Ekkor a -2 órákor induló modell figyelembe veszi a -2, -1, 0 időpontban mért adatokat és mintegy kényszeríti a modellt, hogy az első két órában közelítse a valóságot. Az MM5 erre a célra az ún. Newton-relaxációs technikát alkalmazza. Az FDDA két módon valósítható meg. Egyrészt az ún. analízis igazodási (vagy nudging) módszerrel, amikor minden egyes rácspontonál figyelembe vesszük a méréseket (pontosabban a mérésekből az objektív analízissel származtatott mezőket), illetve az ún. megfigyelési igazodási (observation nudging) módszerrel, ahol az egyedi méréseket vehetjük figyelembe.

Ilyen módon alkalmazhatjuk az adatsszimilációt akár objektív analízis célokra is, illetve arra, hogy lecsökkentsük a modell beállási (spin-up) idejét, ami a nowcasting jellegű alkalmazásoknál létkérdés lehet (Horváth Á., 2003).

3. 3. 4. A vizsgálatokhoz szükséges modell-beállítások

Vizsgálataink során a modellt 2 illetve 4 km-es rácsfelbontás mellett futattuk, ezzel biztosítva, hogy a felbontás a zivatarok nagyságrendjébe essen. Ezen értékek mellett már, a modell dinamika közvetlenül képes a zivatarokhoz kapcsolódó folyamatok szimulálására. 6-8 km-es felbontás felett már ez az út nem járható és cumulus-parametризációt kellene alkalmazni. Így azonban ún. direkt konvekció számítást használhattunk, melyben egy igen összetett felhőfizika sémán (Reisner) keresztül, benne van a feláramlás, beszívódás,

bekeveredés, leáramlás (kifutószél) ill. jégképződés hatása is. A határréteg modellezésénél az eta modell sémáját használtuk, amely jól kezeli a turbulens kinetikus energiát. A sugárzási sémát 5 percenként futtattuk. A talaj modellre pedig a több szintes „substrate temperature” modellt alkalmaztuk.

A modell peremfeltételeit az ECMWF adatokból származtattuk. Azt mondhatjuk, hogy a modell által felkínált nagy számú beállítási lehetőség közül, mi a konvektív folyamatok szempontjából a legaprólékosabb, legrészletesebb ill. a lehető legtöbb hatást figyelembe vevő, modell-beállítást részesítettük előnyben.

4. Konvektív folyamatok vizsgálata numerikus modell felhasználásával

4. 1. Esettanulmányok

Mint már a bevezetésben is említettük, jelenleg Magyarországon még nem áll rendelkezésünkre (operatív alkalmazásban) olyan típusú mérő és megfigyelő hálózat (pl. Doppler radar által előállított nagy felbontású szélmező), amellyel megfelelően vizsgálhatnánk a kisebb skálájú konvektív rendszerek szerkezetét, fejlődését. Így vizsgálatainkhoz egy numerikus modell eredményeit használtuk. Következtetéseinket, megállapításainkat, ezen modell (MM5) eredményei alapján tettük. A modell eredményeit az operatíván használt 1 órás időközök helyett 15 percenként vizsgáltuk, mivel az 1 órás intervallum ezen konvektív folyamatok elemzésénél már -várakozásunknak megfelelően- túl nagyoknak bizonyult. (Elég, ha arra gondolunk, hogy egy zivataros napon mennyit változik a radar mező akár egy negyedóra leforgása alatt.)

4. 1. 1. A 2003. 08. 14-es esettanulmány

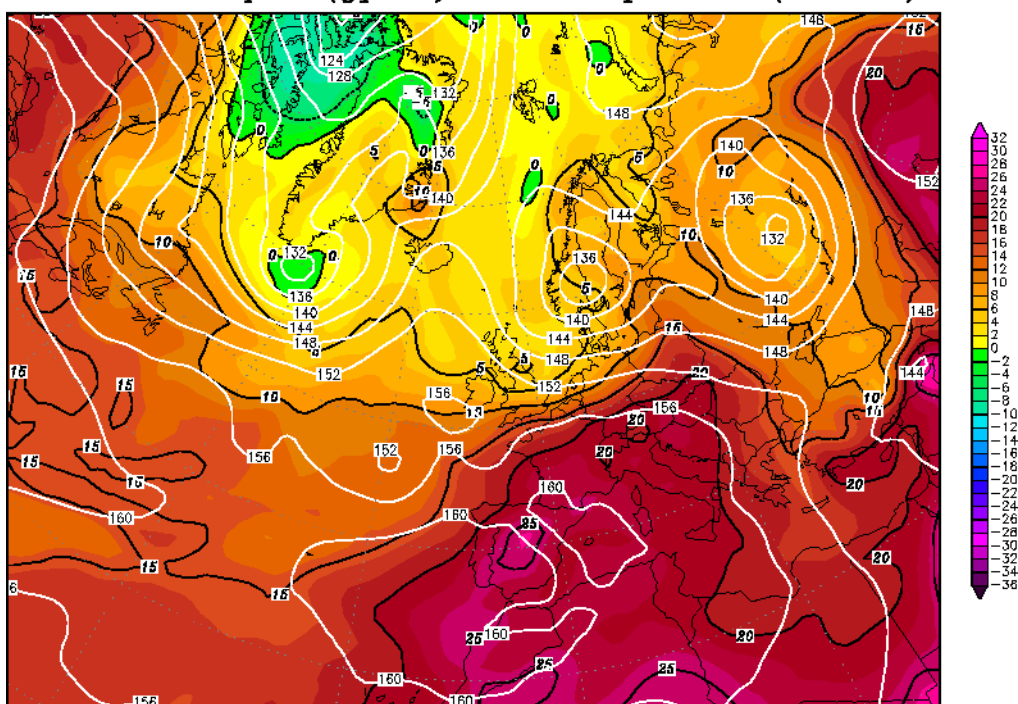
Európában a Skandináv-félsziget, illetve a Kelet-európai síkság feletti középponttal két ciklon örvénylik, míg a mediterrán térség nyugati felében egy hatalmas anticiklon alakítja az időjárást. A hazánktól észak-északnyugatra lévő ciklon hidegfrontja előtt igen meleg levegő áramlik a közép-európai térségbe (4.1. ábra).

Hazánk nyugati részét a délutáni órákban érte el ez a front, amely előtt a Dunántúl északi részétől egészen az Északi-középhegység területéig húzódó, konvergencia vonal alakult ki az előoldali áramlási mezőben. A zivataros hidegfront és ezen konvergencia vonalon kialakult zivatarcellák az esti órákban Pest-megye területén egyesültek és nagy vihart okozva haladtak tovább kelet felé.

Init : Thu,14AUG2003 00Z

Valid: Thu,14AUG2003 00Z

850 hPa Geopot. (gpm) und Temperatur (Grad C)

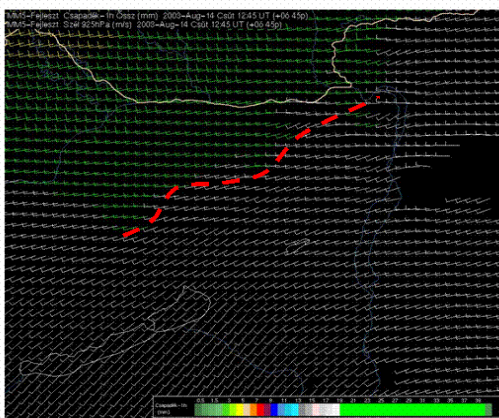


Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

4. 1. ábra: 850 hPa-os hőmérséklet és geopotenciál mező

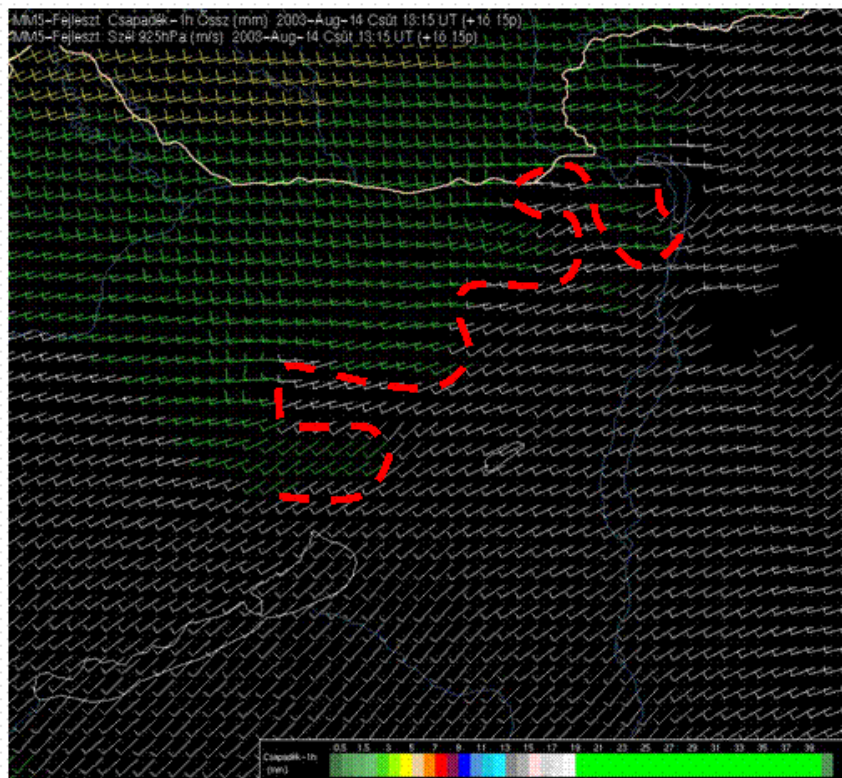
4. 1. 1. 1. A szél- és csapadékmező vizsgálata

Az alábbiakban a 925 hPa-os szélmezőt és az MM5 modell által adott egy óras csapadékösszeg mezőket elemezzük. A vizsgálatok során felhasználtuk az OMSZ (Országos Meteorológiai Szolgálat) HAWK munka-állomását. A 4. 1. képen (az időpontok UTC-ben értendők) az előoldali áramlási mezőben kialakult gyenge konvergenciát figyelhetünk meg.

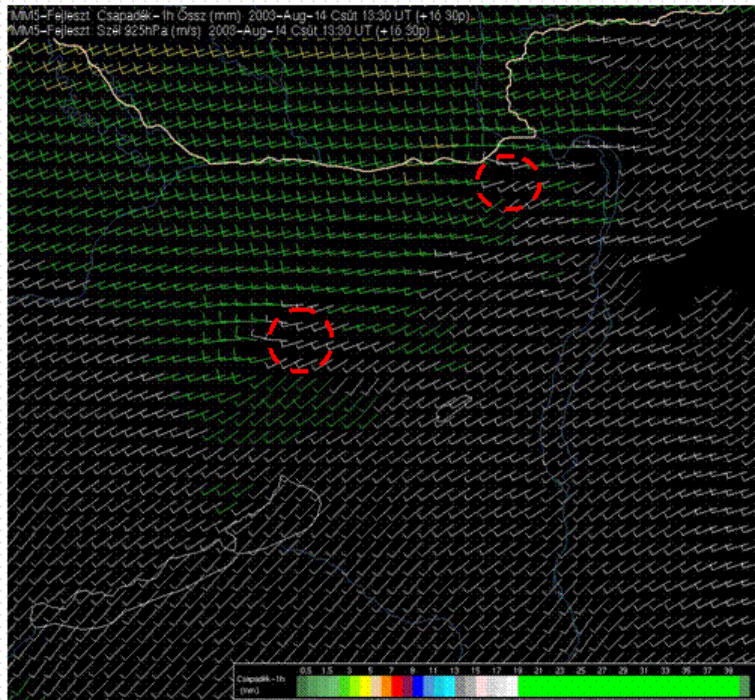


4.1. kép. Konvergencia vonal kialakulása (piros szaggatott) az előoldali áramlási mezőben

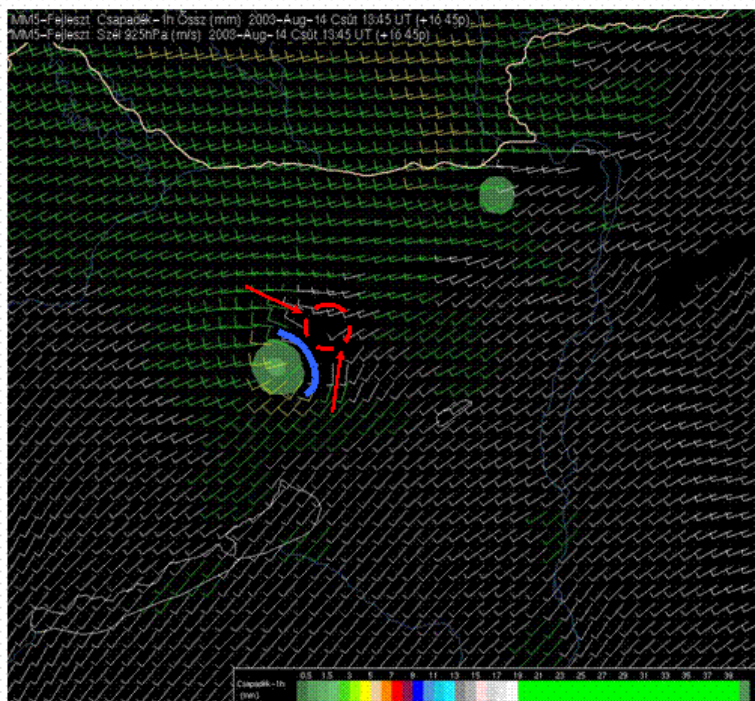
Az összeáramlási zónán idővel egyre nagyobb horizontális hullámok jelennek meg (4.2. kép), a rajta kialakuló konvektív cellák hatására. Ezen hullámok legnagyobb amplitúdóval rendelkező részén alakulnak ki a majdani zivatarcellák (4.3. kép). Ezen cellákhoz a modell már csapadékot is rendel és a nagyfelbontásnak köszönhetően megjelennek a zivatarokhoz kapcsolódó zivataros kifutószelek, ezentúl a kifutószél vezető éle és az alacsony szintű alapáramlás találkozásánál egy konvergencia terület is elkülöníthető (4.4. kép). A továbbiakban a 4. képen látható rendszer ÉK felé helyeződött és a konvergencia vonalon lévő, -kialakuló-cellákat erősíti azzal, hogy gust frontja további összeáramlást biztosít ezen zivatarok számára(4.5. kép). A továbbiakban a kialakult cellákban a feláramlás során távozó tömeg pótlására a horizontális mezőben az alsóbb rétegekben kompenzáló áramlás indul a konvergencia zóna felé, a 6. képen jól látható ez az áramlás, amely egyúttal kedvező feltételeket nyújt a már meglévő illetve a kialakuló zivatarok számára a tartós összeáramlással.



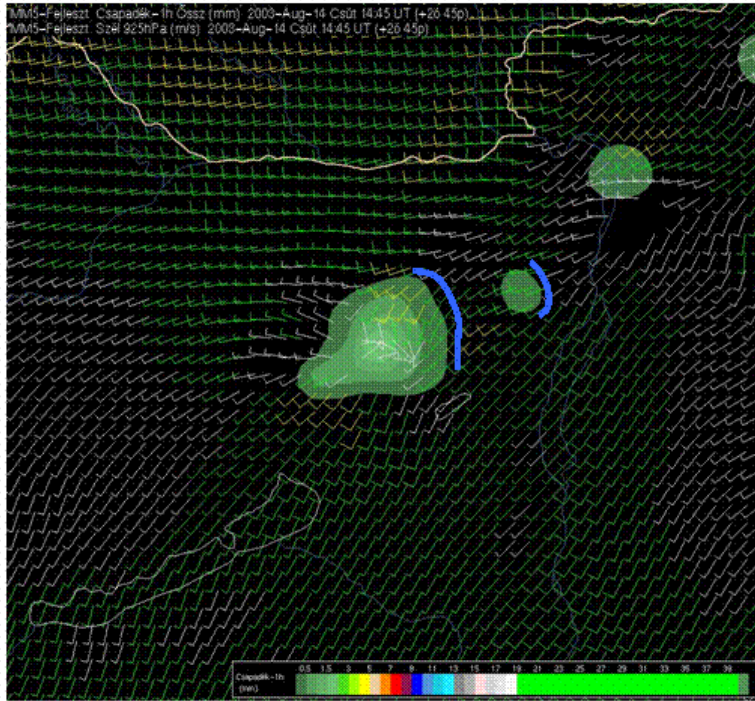
4. 2. kép: Horizontális hullám kialakulása konvergencia vonalon



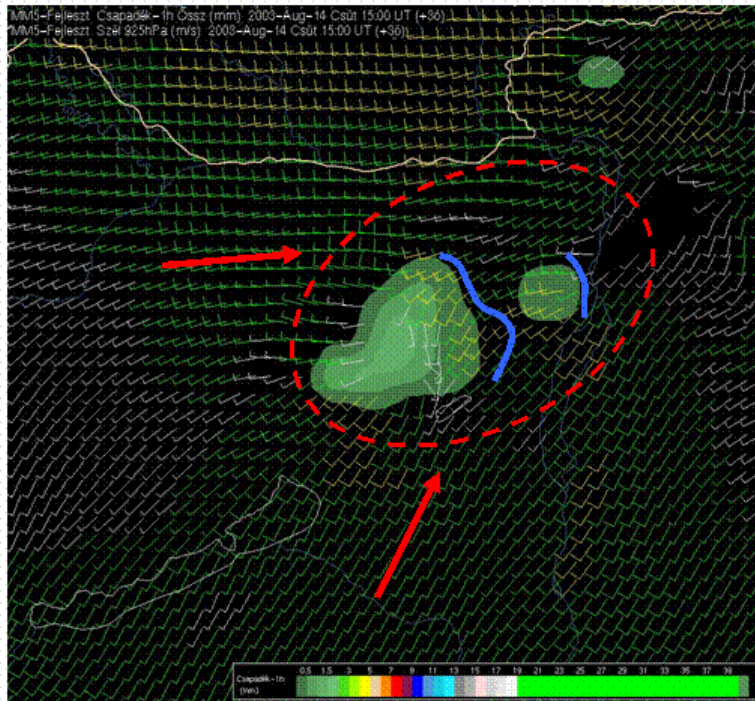
4. 3. kép: Zivatarcellák kialakulása a legnagyobb amplitúdójú helyeken



4. 4. kép: Zivatarcella kifizőszele (gust frontja, kék) és a beáramlási terület (piros)

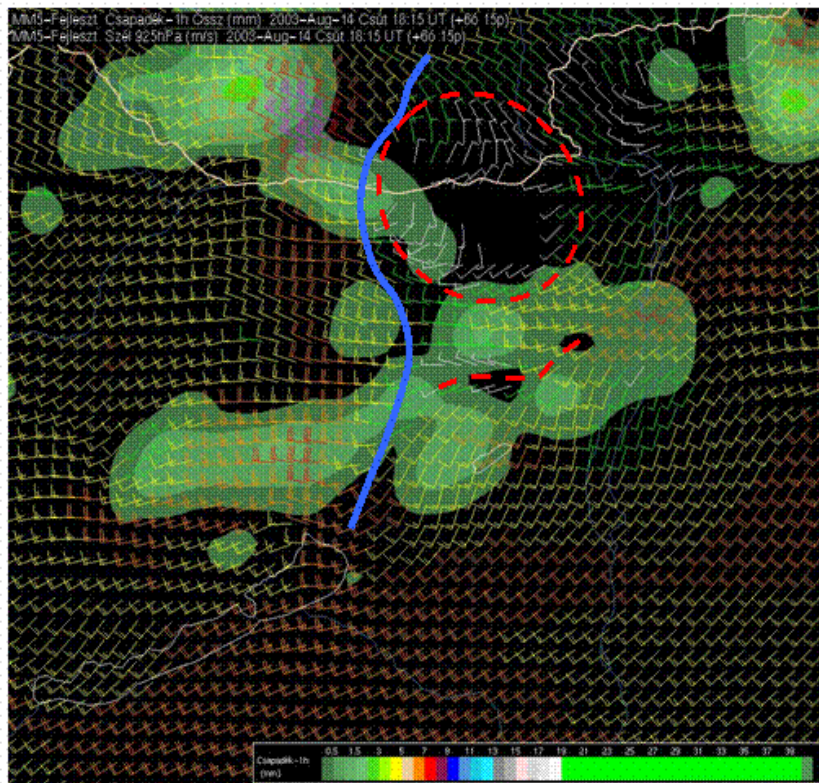


4. 5. kép: Zivatarok egymásra gyakorolt gerjesztő hatása

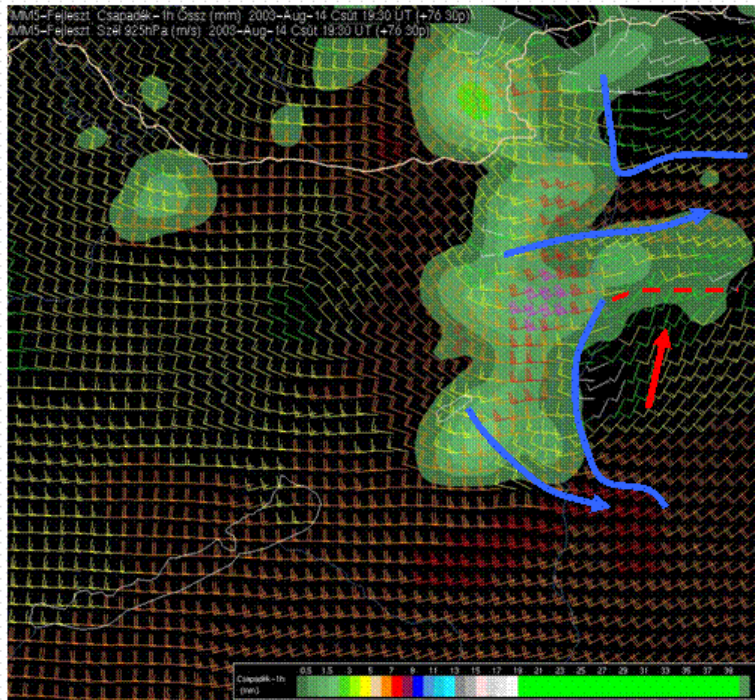


4. 6. kép: A konvekció által keltett tartósan fennmaradó beáramlás

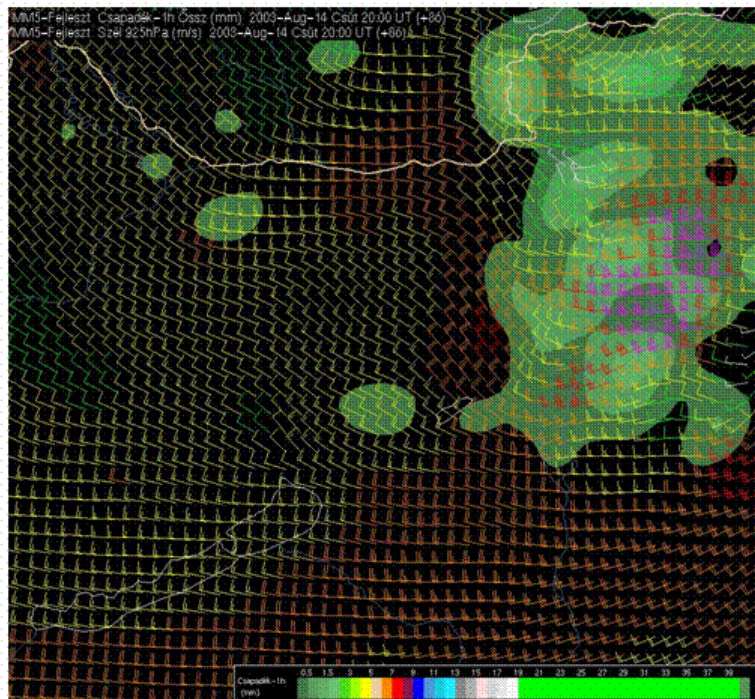
Ez a konvergencia zóna igen hosszú ideig fennállt (14:30 tól 18:15 UTC-ig), sőt az Északi-középhegység térségére is kiterjedt, miközben a területén sorra képződtek és pusztultak el a zivatarok, melyek nagy valószínűséggel az egycellás ill. multicellás kategóriába sorolhatók. Az időközben több részre szakadó konvergencia vonalat 18:15 UTC-kor érték el a közelgő hidegfronton kialakult frontális zivatarcellák kifutószelei (4.7. kép), plusz emelést biztosítva az itt lévő rendszereknek. A zivataros hidegfront előtt az előoldali áramlások is erősödnek, amely jelen esetben közvetlenül a vizsgált összeáramlási vonal déli beáramlási oldalát látja el meleg nedves levegővel, déli, délnyugati áramlással (4.8. kép, 19:30). A 4.8. képen az is látható, hogy az általunk vizsgált konvergencia zóna északi területein lévő cellák már gyakorlatilag összekapcsolódtak a hidegfronti rendszerekkel és azokon a területeken a hideg levegő, úgy mond előresiet a déli peremhez képest, ezáltal az északon kitörő hideg illetve már a fronttal nyugat, délnyugat felől előrenyomuló szintén hideg levegő, egyszersmind közrefogja a még mindig előoldali -a konvergencia vonalat tápláló- beáramlási mezőt. Ez a helyzet nem egészen fél óra alatt megszűnik és a leáramlás ill. szétáramlás, veszi át az irányító szerepet (4.9. kép), mindazonáltal a zivataros rendszerek jelentős megerősödését láthatjuk, ezen időszak alatt, amit a szél és csapadékmező is mutat.



4. 7. kép: Zivataros hidegfront (kék) éri az előoldali konvergencia zónát



4. 8. kép: Zivataros hidegfront és konvergencia vonal találkozása



4. 9. kép: A megerősödő szél és lezúduló csapadék numerikus szimulációja a két konvektív rendszer egyesülése után

4. 1. 1. 2. Nedvesség konvergencia mező vizsgálata

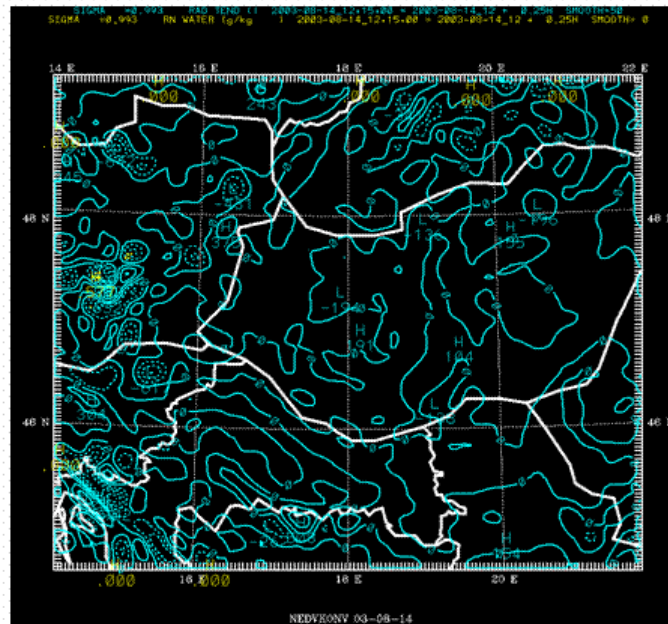
A következőkben a konvektív rendszerek és környezetük nedvesség konvergencia (vagy nedvesség áram konvergenciája) mezőit mutatjuk be. A nedvesség konvergencia értékeket az MM5 modell szél és nedvességértékei alapján számítottuk egy másodrendben pontos véges differencia séma alkalmazásával. A bemutatásra kerülő képeken az alsó szigma szinteken (950 és 1000 hPa közötti nyomásszintek) számolt nedvesség konvergenciát láthatjuk, mivel ezen paraméter a felső szigma szinteken már nem szignifikáns, ami jól tükrözi a légköri nedvességtől való erőteljes függését. A képeken szaggatott vonal jelöli a konvergens, míg folytonos a divergens területeket, ezen túl sárgával jelöltük a modell által az adott területre (adott szinten) előre jelzett felhőben lévő esővíz tartalmát, ami szoros kapcsolatban van a csapadékkal. Ily módon azt is megfigyelhettük, hogy a fel illetve leáramlási területeken a modell ad e csapadékot.

A kezdeti mezőben (10. kép) hazánk területén nem mutatható ki sem szignifikáns konvergencia, sem divergencia. Ellenben a magasabb hegységek (Alpok, Kárpátok) térségében láthatóan már vannak jól elkülöníthető divergens és konvergens magok. A mező tehát jól mutatja a domborzatnak a konvektív folyamatok kialakulása során jelentkező „trigger” hatását. A későbbiekben (11. kép) már határozott konvergenciát láthatunk a Dunántúl északi felében, ahová a modell már csapadékot is ad. Fél óra múlva már a konvergenciától jól elkülönülő divergens mag (12. kép) „szakítja meg” a mezőt, amely a kialakult első zivatarcella leáramlási zónáját jelöli. Ezzel az eddigi mező szerkezete jelentősen módosul, hiszen a továbbiakban a zivataros kifutószél mentén jelentkező konvergencia is megjelenik, amely mintegy -körkörös- körülveszi az aktív cellákat (13. kép). A 13. képen azonban az előzőekben említett, relatíve nagytérségű összeáramlás (ld. 6. kép) is kirajzolódik. A következőkben azt vizsgáltuk, hogy a hidegfront mentén kialakuló cellák és a konvergencia zónában lévő rendszerek egyesülése, hogyan mutatkozik meg a nedvesség konvergencia mezőben. A nyugat felől közeledő front zivatarai által kialakított –durván É-D tengelyű- összeáramlási vonal és a Dunántúl északkeleti részén található konvergens mező találkozásánál (pontosabban a konvergencia gyűrű nyugati részén) amolyan összekötő cellák kialakulása figyelhető meg (14. ill. 15. kép), amelyek úgymond egyik rendszerhez sem tartoznak. Ezen cellák szerepe igen fontosnak tűnik a két rendszer közötti energiátaszport szempontjából. A találkozáskor az is megfigyelhető, hogy a hidegfronthoz kapcsolódó zivatarcellák áthelyeződési sebessége csökken, és időbe telik a konvergencia zóna saját szerkezetének, áramlási struktúrájának felszámolása. A jelentős szél erősödés akkor figyelhető meg (a 925 hPa-os szélmezőben), amikor a konvergencia mező celláinak nyugat felé (vagyis a

front felé) irányuló „gust fronti” áramlását áttöri, a már a hidegfronthoz kapcsolódó zivatarok ellenirányú kifutószele. Ekkor a két rendszer -nedvesség konvergencia mezőbéli szerkezete közötti különbség gyorsan megszűnik (30-45 perc) és a már egyesült rendszer cellái ismét nagyobb áthelyeződési sebességgel vonulnak kelet felé.

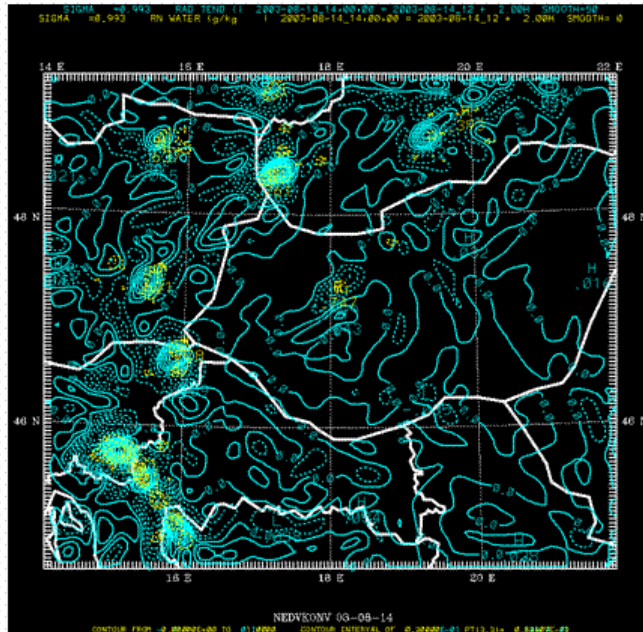
A Dunántúl déli részét is elérték a hidegfronthoz kapcsolódó zivatarok, de ezek zöme erősödés helyett elhalt. Természetesen itt is megfigyelhető volt a konvergencia a hidegfront előtt, azonban, már jelen lévő konvergencia vonal hiányában, ez kevésnek bizonyult -a modell szerint- a hidegfronthoz kapcsolódó zivatarok fenntartásához is.

12:15 14.08.2003



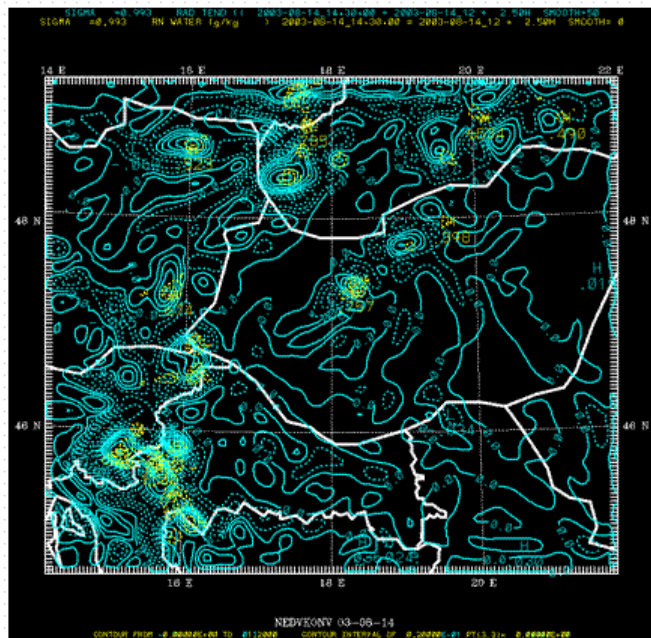
4. 10. kép: A kezdeti nedvesség konvergencia mező

14:00 14.08.2003



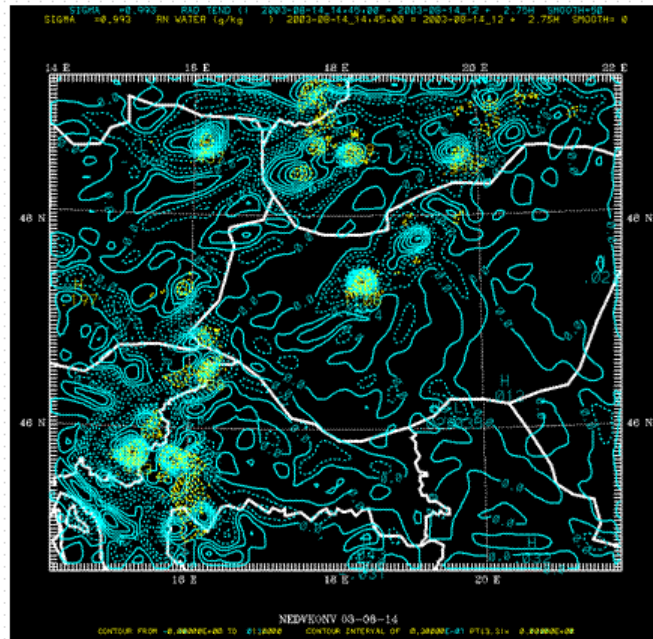
4. 11. kép: Konvergencia a Dunántúl északkeleti részén

14:30 14.08.2003



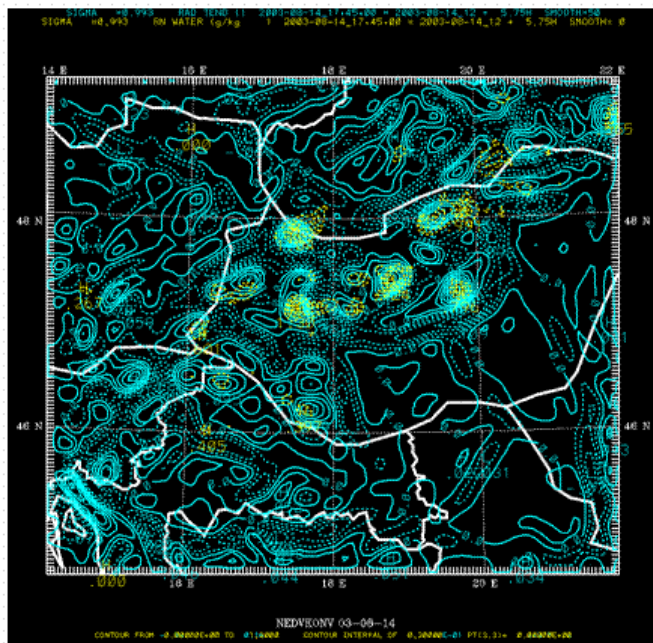
4. 12. kép: Divergens mag az összeáramlási zónában

14:45 14.08.2003



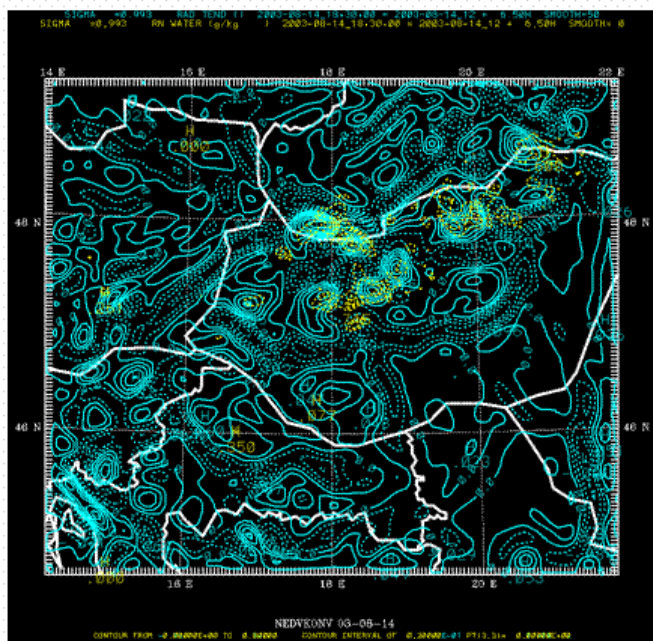
4. 13. kép: A kifutószél hatására kialakuló „konvergencia gyűrű”

17:45 14.08.2003



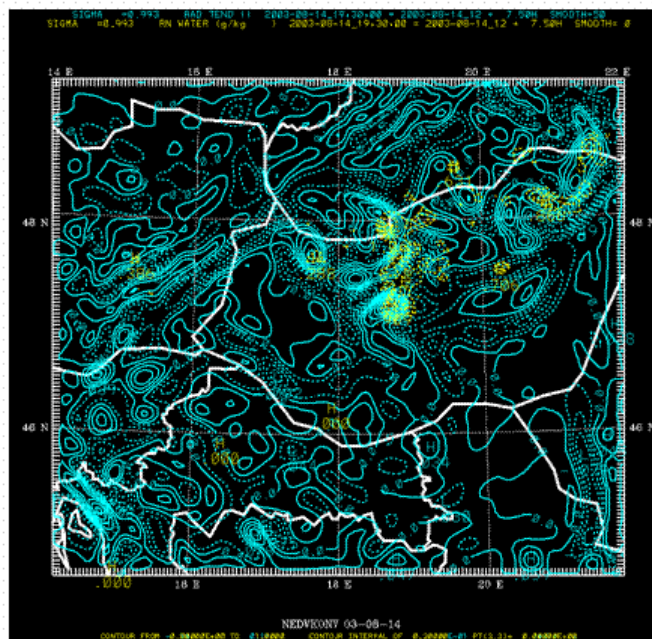
4. 14. kép: Zivataros hidegfront és konvergencia vonal találkozása

18:30 14.08.2003



4. 15. kép: Kapcsolat a két rendszer között

19:30 14.08.2003



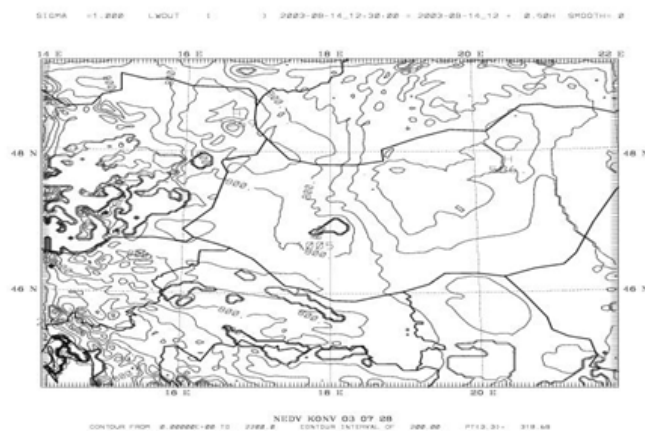
4. 16. kép: Az egyesülés során megerősödő cellák képe a nedvesség konvergencia mezőben

4. 1. 1. 3. Konvektív hasznosítható potenciális energia (CAPE)

A következőkben a CAPE mezőit mutatjuk be. A CAPE számításánál felhasználtuk Geresdi István és Horváth Ákos felhőfizikai programcsomagját.

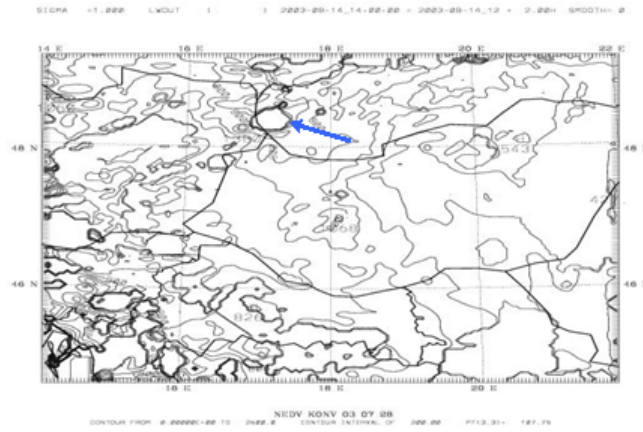
A képeken azt láthatjuk amint a kezdetben (4.2. ábra) meglévő hasznosítható energiát (gyengén labilis eset) a kialakuló zivatarok, fokozatosan megszüntetik az alsó szintekre kiterjedő szétáramlással (4.3. a.) ill. b.) ábra). Azt is láthatjuk, hogy ha két zivatar egymás közelében van, akkor a hasznosítható energia nagy gradienssel a két cella között összpontosul. Ezeken a területeken újabb zivatar alakulhat ki, ha az alacsonyszintű áramlás is kedvező. (ld. 4.4. ábra)

12:30 14.08.2003



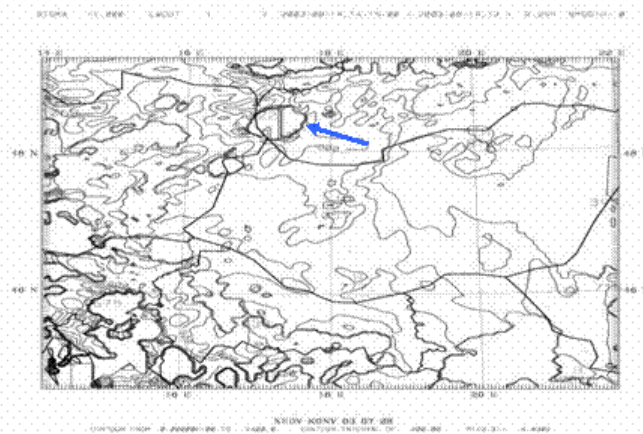
4.2. ábra. A CAPE mező kezdetben

14:00 14.08.2003



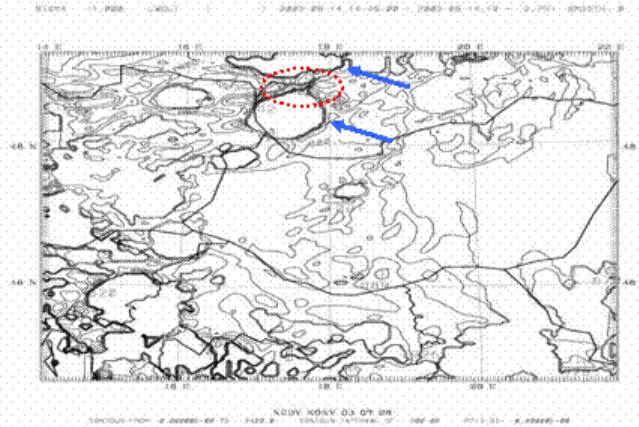
4. 3. a) ábra: A leáramló hideg levegő megszünteti a labilitást az alsó szinteken

14:15 14.08.2003



4. 3. b) ábra: A divergencia hatása a hasznosítható konvektív energiára

14:45 14.08.2003



4. 4. ábra: A CAPE mező szerkezete két rendszer között

4. 1. 1. 4. Konvektív rendszerek vertikális szerkezete a nedvesség konvergencia mező tükrében

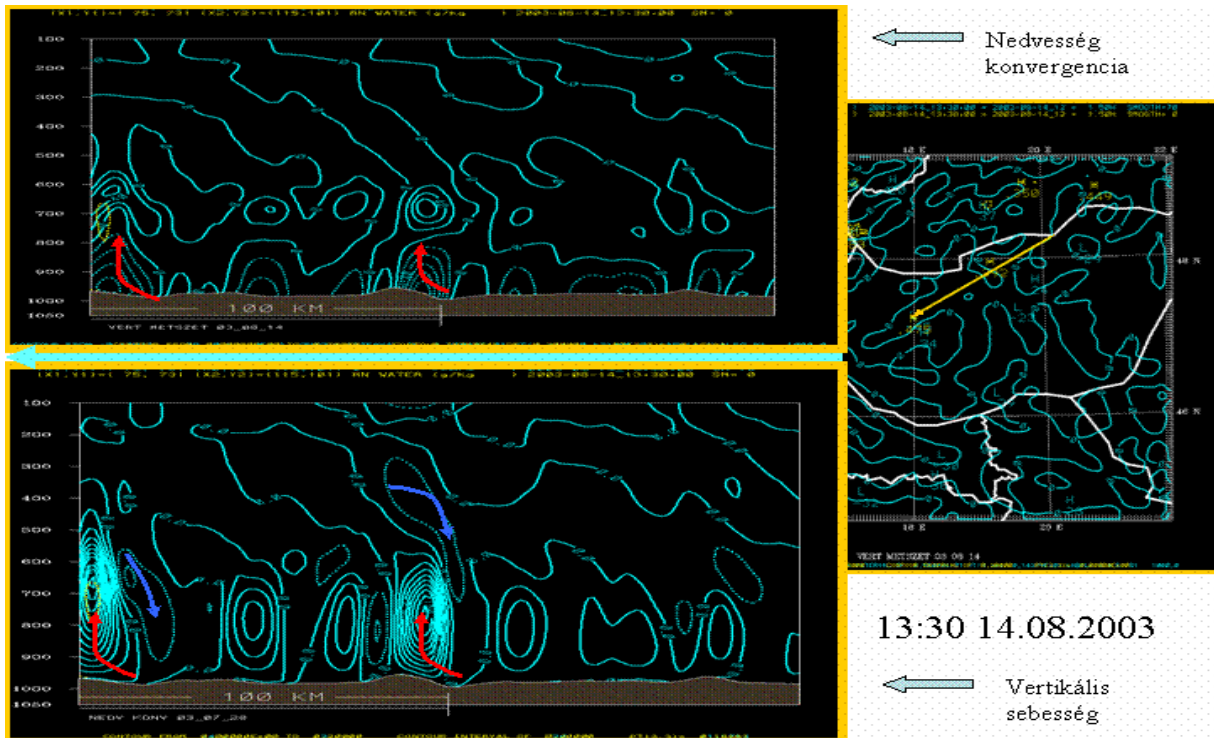
A továbbiakban azt vizsgáljuk, hogy a konvektív képződmények fejlődése során hogyan alakul a nedvesség konvergencia mező a magassággal illetve mely szintekig szignifikáns. Ezáltal elemzzük a kialakuló, fejlődő, majd disszipálódó cellák mozgását, áthelyeződését, ezen cellák egymásra gyakorolt hatását, ill. egy-egy egyedi cella vertikális struktúráját.

A bemutatásra kerülő vertikális metszeteken, a függőleges tengelyen a nyomást, míg a vízszintesen a horizontális távolságot -amelyen a metszet készült- tüntettük fel. A nedvesség konvergencia esetében szaggatott vonal jelöli a konvergenciát, míg folytonos a divergenciát. A sárga szín a modell által adott csapadéknak megfelelő víztartalmat jelöli. A vizsgált rendszerekben kialakuló vertikális mozgások erősségének szemléltetésére a modell vertikális sebességkomponens értékeit is feltüntettük, itt folytonos a feláramlást (felfelé mutató

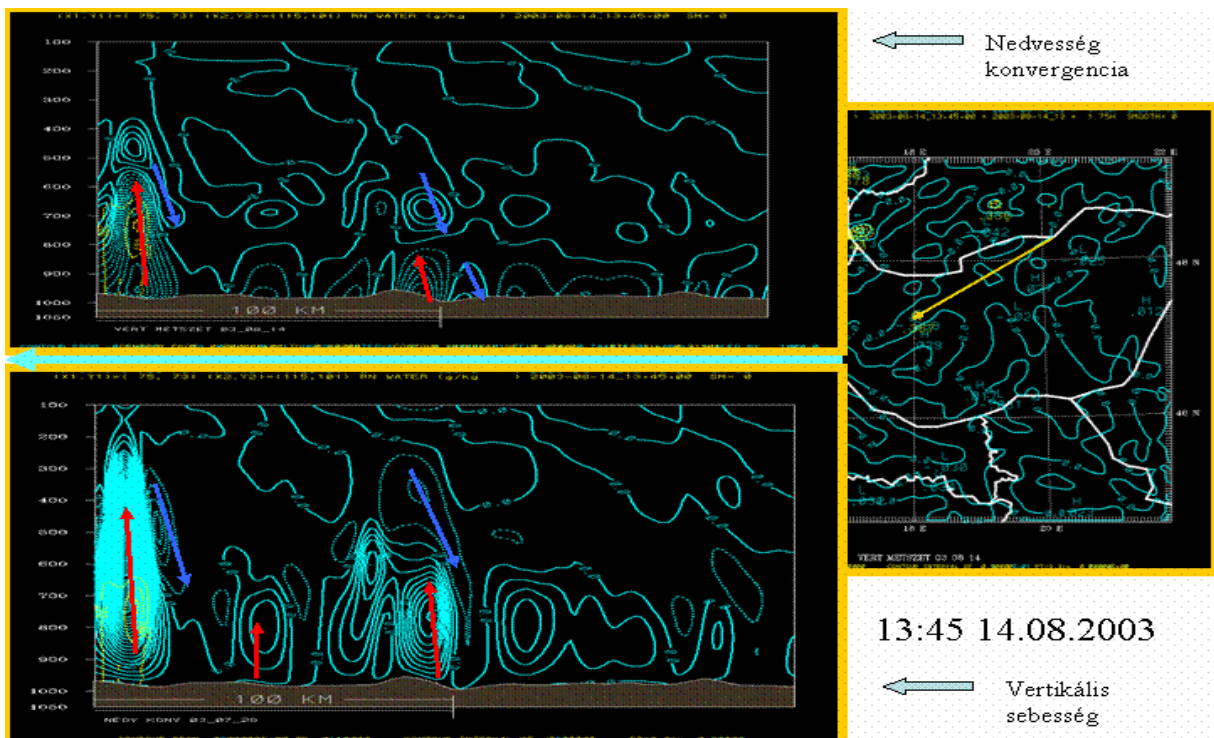
vertikális sebességkomponens, w), míg a szaggatott a leáramlást jelöli ($-w$). A vertikális komponens esetén az izovonalak 0,2 m/s ill. 0,5 m/s-ot (erősebb celláknál) jelölnek.

Konvergencia vonalon kialakuló zivatarok

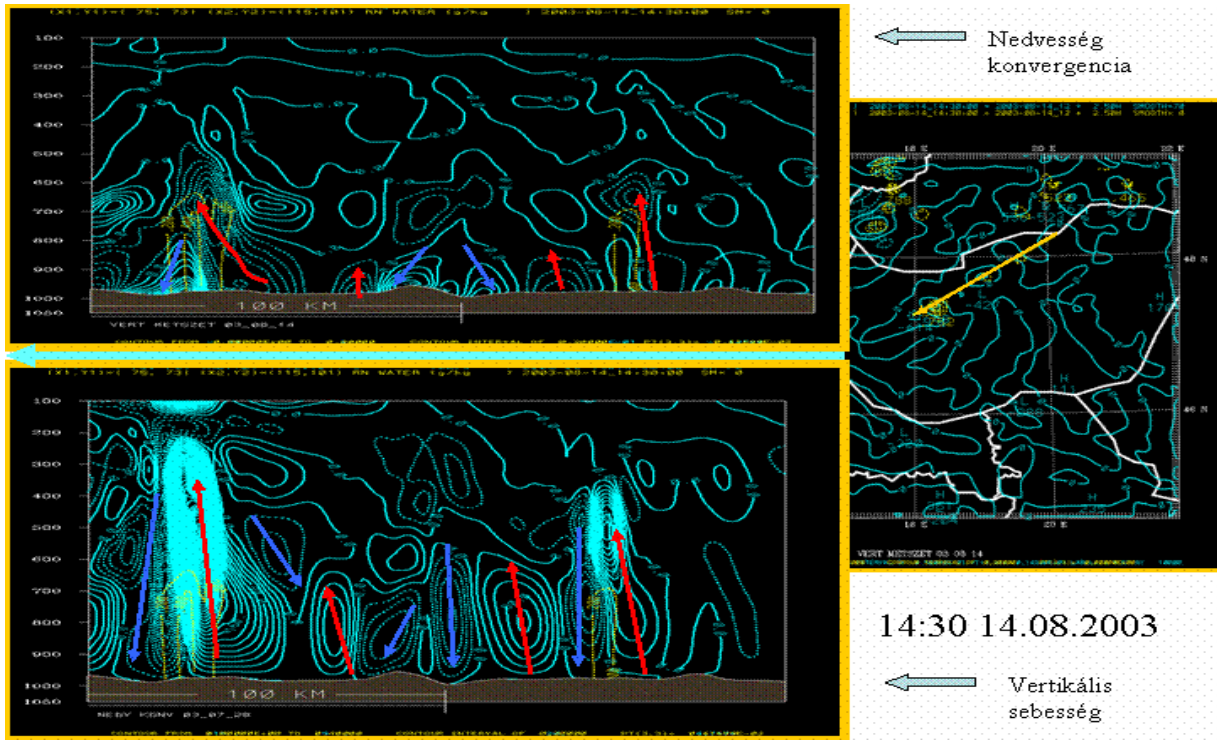
Először a -már említett- hidegfront előtt kialakuló konvergencia vonalon létrejövő zivatarcellákat vizsgáljuk. Az 4.5. ábrán, a Dunántúl északkeleti részétől egészen az Északi-középhegységig húzódó konvergencia vonalra fektetett metszetet láthatunk. Megfigyelhető, hogy ebben az időpontban az alsó szinteken (kb. 850 hPa) már szignifikáns nedvesség konvergencia alakul ki. Ekkor az alsóbb rétegekben jelentős divergencia nem tapasztalható, ellenben a felsőbb szinteken a konvergencia magok fölött határozott szétáramlás uralkodik. 15 perc múlva az ábra baloldalán lévő rendszer jelentősen megerősödik és a nedvesség konvergencia már az 500 hPa-os szint közelébe emelkedik, eközben a vertikális sebesség a kezdeti 2-3 m/s-ról, 6-7 m/s-ra növekszik (4.6. ábra). A kialakuló cella környezetében a magasban leáramlás indul meg, amely megakadályozza a közeli területen kialakult kisebb cellák továbbfejlődését. A későbbiekben megjelenik a határozott leáramlás is, amely már a zivatar érett stádiumát jelöli. A nedvesség konvergencia mezőt vizsgálva azt is láthatjuk, hogy az imént említett „kisebb konvergenciákat” a domináns cella (zivatarcella) saját feláramlási csatornájába adoptálja (4.7. ábra). A továbbiakban azt láthatjuk amint a vizsgált baloldali zivatar cella alsó részeire kiterjed a divergencia és ezzel a cella a disszipáló stádiumba ér, miközben az alacsonyszinti konvergencia hatására (a vizsgált cella kifutószél frontja és az alapáramlás következtében) egy másik zivatart hozott létre (az 4.8. ábrán balra). A 4.9. ábrán a két cellát látjuk együtt, majd a leáramló hideglevegő hatására létrejövő divergencia kiterjed mindkét rendszer beáramlási zónájára és úgy mond „alávágja” (megszünteti a beáramlást az alsó szinteken) a cellákat (4.10. ábra). Ekkor a magasabb rétegekben még feláramlás (ill. konvergencia) zajlik.



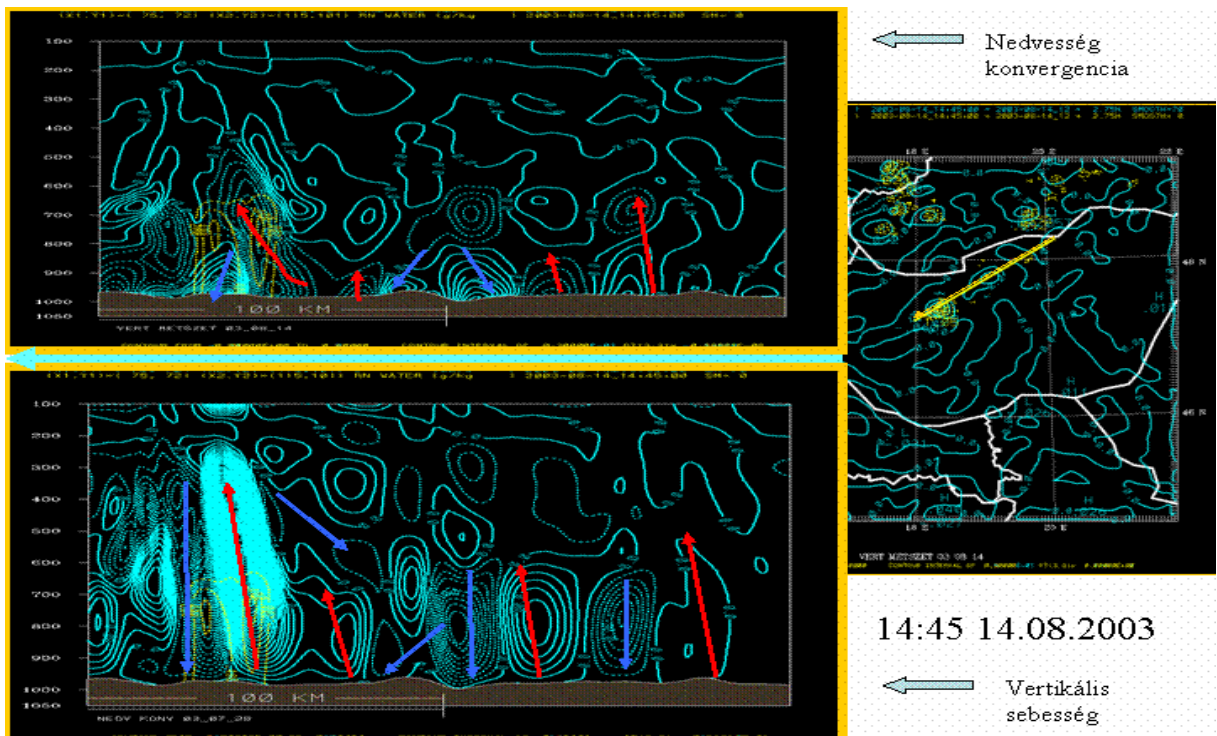
4. 5. ábra: A nedvesség konvergencia és a vertikális sebességkomponens metszete konvergencia vonalon (a metszet irányítottága: jobbról, balra az északi határunktól a Dunántúl felé)



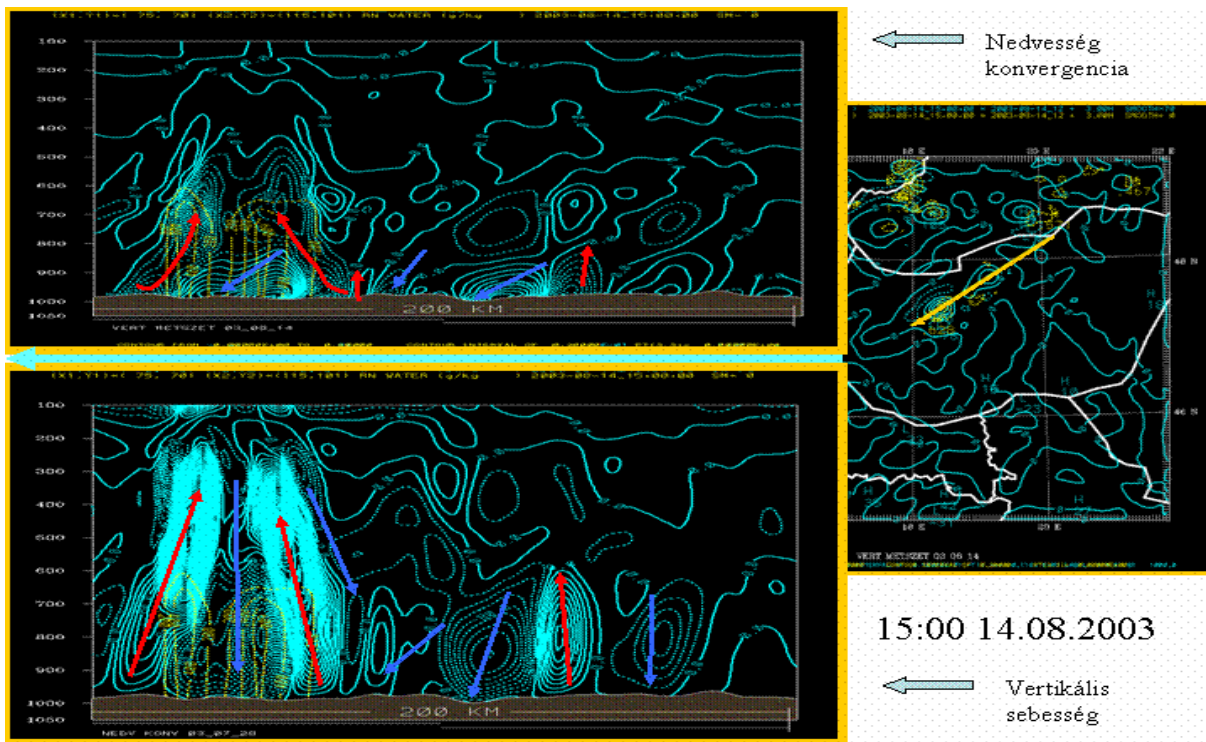
4. 6. ábra. Konvektív cella megerősödése (bal oldal)



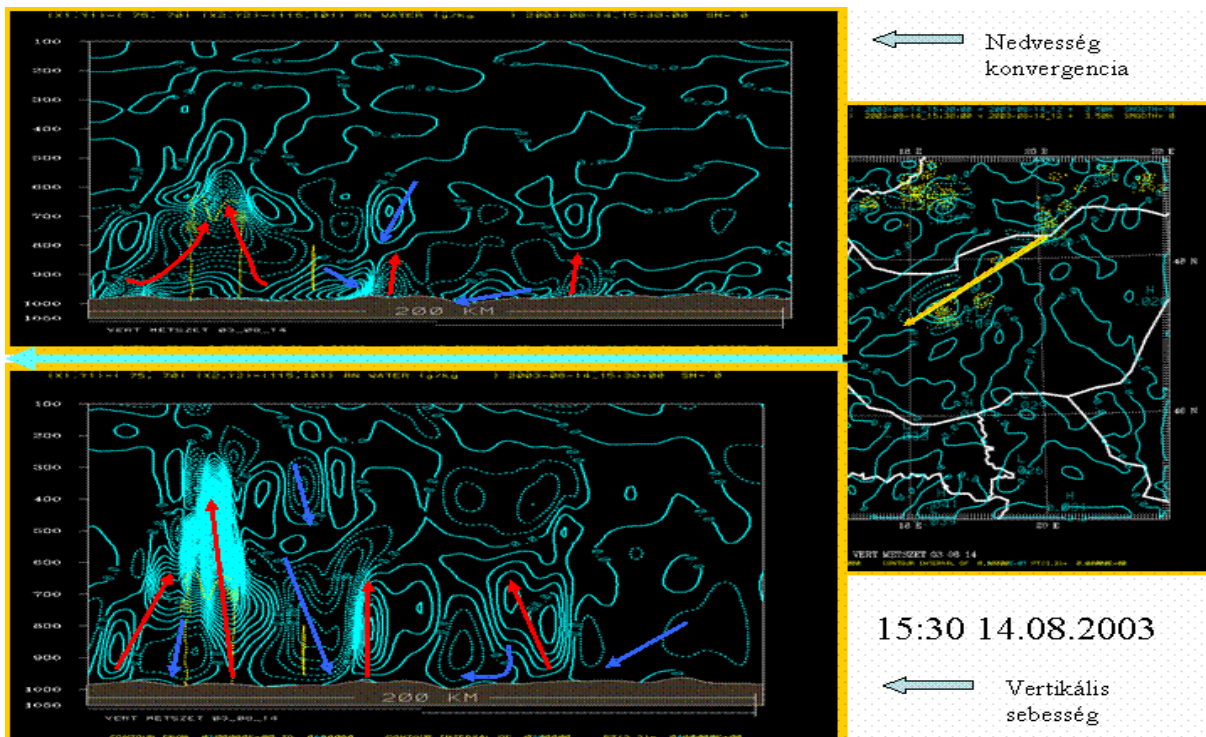
4. 7. ábra: A kisebb cellák konvergenciája hozzáadódik a baloldalon látható rendszeréhez



4. 8. ábra: Új cella kialakulása (a vizsgált zivatar bal oldalán) az alacsonyszintű konvergencia hatására



4. 9. ábra: Kapcsolatban lévő cellák képe a nedvesség konvergencia és a feláramlási mezőben

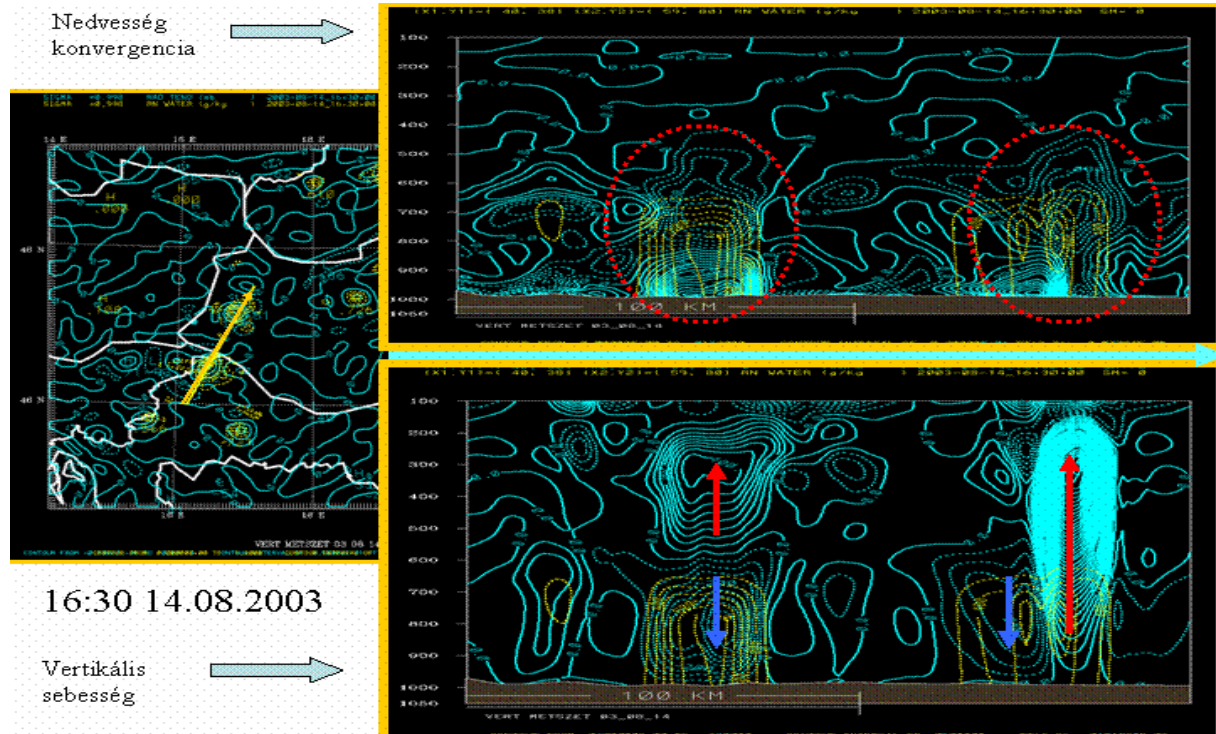


4. 10. ábra: A divergencia kiterjed az alsó szintekre és megszünteti (alávágja) a feláramlási csatornát

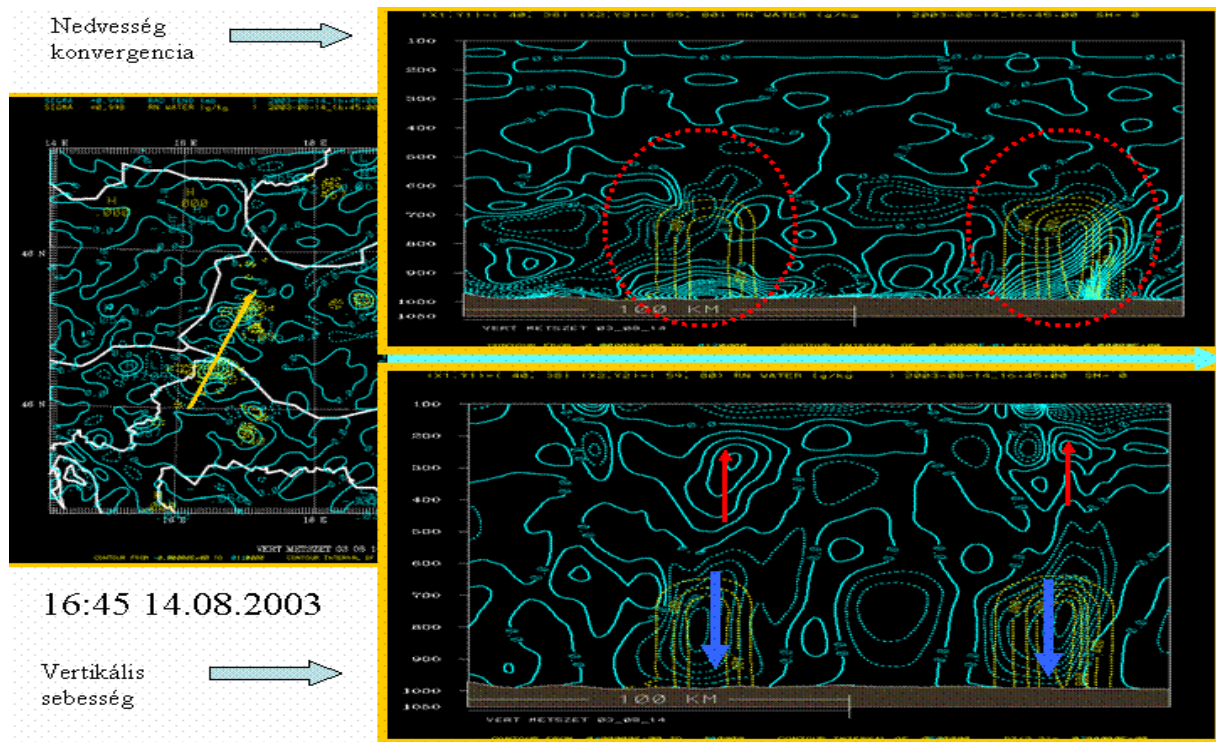
Hidegfronton kialakuló zivatarok

A 4. 11. a) ill. b) ábrákon hidegfronton kialakult cellákat láthatunk (a metszet a fronttal párhuzamosan készült) és megfigyelhetjük, hogy 15 perc alatt milyen mértékű változások játszódnak le egy konvektív cella életében. A 16:30 UTC-s képen a bal oldali cella már a disszipációs fázisban van, ekkor az alsó szinteken divergencia, felül még konvergencia figyelhető meg, a b.) ábrán a vertikális sebességkomponens már jóval kisebb, a divergens rész pedig szétterül az alsó rétegekben, vagyis a momentum-megmaradás értelmében a vertikális leáramlás horizontális áramlássá alakul, amit kifutószélnek (gust front) nevezünk. A jobb oldali cella érett stádiumban lévő zivatart mutat, amelyben a leáramlás még nem zárta el a feláramlási csatornát. 15 perc múlva ((b.) ábra) a leáramlás okozta divergencia már, csaknem teljesen lezárta a feláramlási csatornát.

Az ábrák érdekessége, hogy két olyan modell-cellát láthatunk, amelyek életoiklusai igen közel esnek egymáshoz, de a 15 perces időlépcső alkalmazásával a fejlettségi stádiumok közötti, viszonylag kisebb különbségek is megfigyelhetők.



4. 11. a) ábra: Felbomló (bal) és érett stádiumban (jobb) lévő zivatarcellák (a metszet irányítottága: balról jobbra, Horvátországtól a Kisalföld felé)



4. 11. b) ábra: A két cella 15 perccel később

Az 1. számú mellékletben szintén egy fronton elhelyezkedő cellát láthatunk, melyről elmondható, hogy igen komoly feláramlással rendelkezik és a nedvesség konvergencia mező is 500 hPa fölé terjed, ami komoly hő és nedvesség transzportot jelent a felső rétegek számára. Az ábra baloldalán látható a front előtti áramlási mezőben kialakuló nedvesség konvergencia.

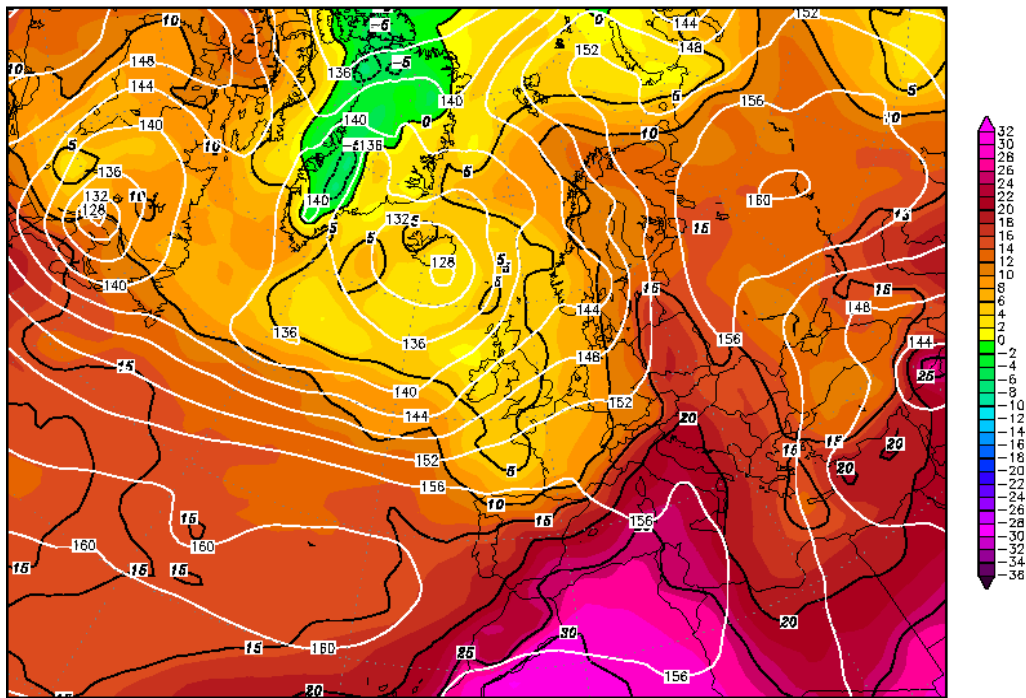
4. 1. 2. A 2003. 07. 28-as esettanulmány

2003. július 28-án a délutáni órákban egy hullámzó hidegfront érte el hazánk nyugati, délnyugati részeit, a front előtt áramló meleg levegő igen nagy labilitást (4. 12. ábra), míg maga a lassan mozgó hidegfront megfelelő szélnyírást biztosított szupercellás zivatarok kialakulásához. A front előtt az esti órákban egy instabilitási vonal alakult ki, amely Zágrábban jelentős vihart és jégesőt okozott, ezek a cellák elérték hazánk délnyugati területeit is.

Init : Mon,28JUL2003 00Z

Valid: Mon,28JUL2003 00Z

850 hPa Geopot. (gpm) und Temperatur (Grad C)



Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

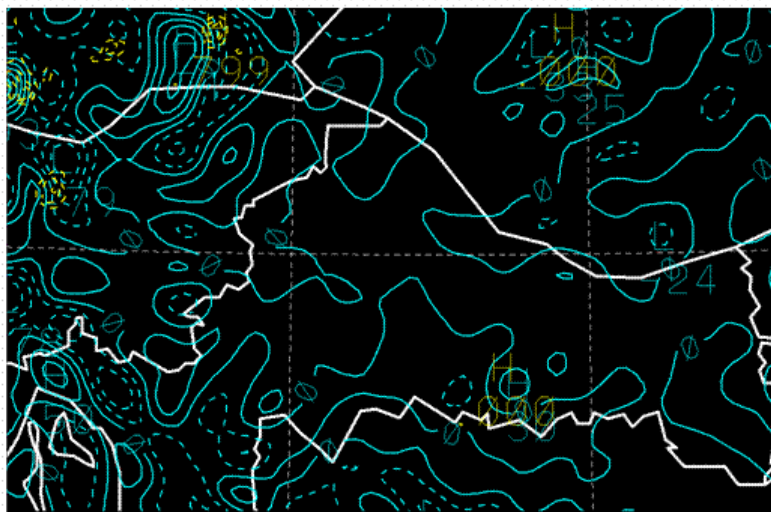
4. 12. ábra: 850 hPa hőmérséklete és a geopotenciál

4. 1. 2. 1. Szupercellás zivatarok szerkezete a nedvesség konvergencia mező tükrében

Magyarországon ez volt az első eset, hogy numerikus szimuláció során egy modell szupercellához kapcsolható áramlási mezőt mutatott, a valósághoz közel álló modellbeállítások esetén. A következőkben a szupercellás zivatarok nedvesség konvergencia mezőben megjelenő képét mutatjuk be.

A kezdeti mezőben szignifikáns konvergenciát ill. divergenciát, csak Szlovénia nyugati határainál láthatunk, ez a hullámzó hidegfront környezetében kialakuló zivataroknak tulajdonítható (4. 17. kép).

16:00 28.07. 2003.

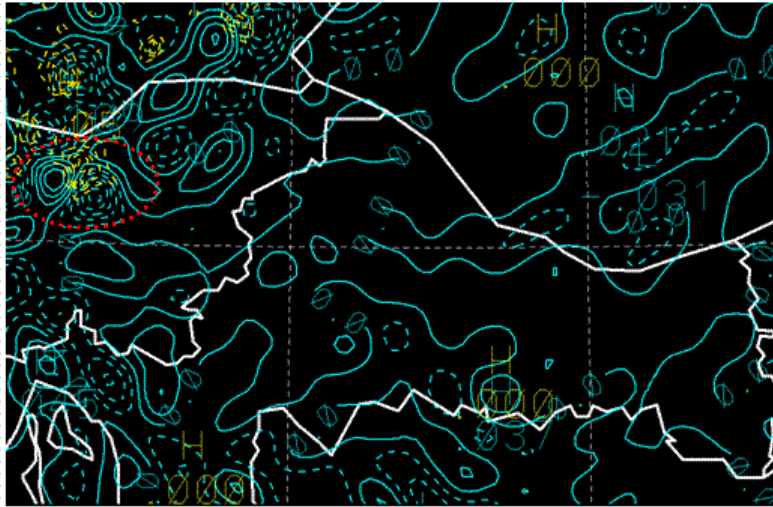


4. 17. kép: „Kisebb” cellák Szlovénia nyugati határainál

A továbbiakban a front kelet felé történő elmozdulásával egyre több zivatarcella alakult ki. Az egyes cellákhoz tartozó konvergens és divergens magok (vagyis a konvektív cellákhoz tartozó fel ill. leáramlási zónák) igen hosszú ideig fennmaradtak egymás mellett, ami a szupercellák egyik fő ismertetőjele.(4. 18. kép) A zivatarcellák áthelyeződését a 2. számú mellékletben félórás bontásban tekinthetjük meg.

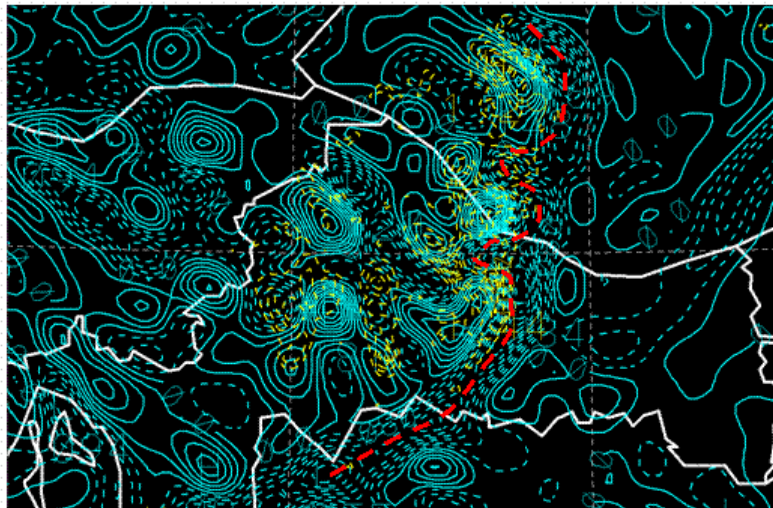
Idővel ezek a rendszerek az előoldali nedvesség konvergencia támogatásával kelet felé mozdultak és jelentősen megerősödtek. A feláramlási és leáramlási övezetek, a későbbiekben is viszonylag jól elkülönültek egymástól több konvergens és divergens pár esetében, amiből feltételezhetjük, hogy a kialakult instabilitási vonal több tagja is szupercellás zivatarból állhatott (4. 19. kép). A zivatarlánc mozgásának képe a nedvesség konvergencia mezőben a 3. számú mellékletben láthatjuk.

16:45 28.07. 2003.



4. 18. kép: A fel és leáramláshoz köthető nedvesség konvergencia ill. a divergencia

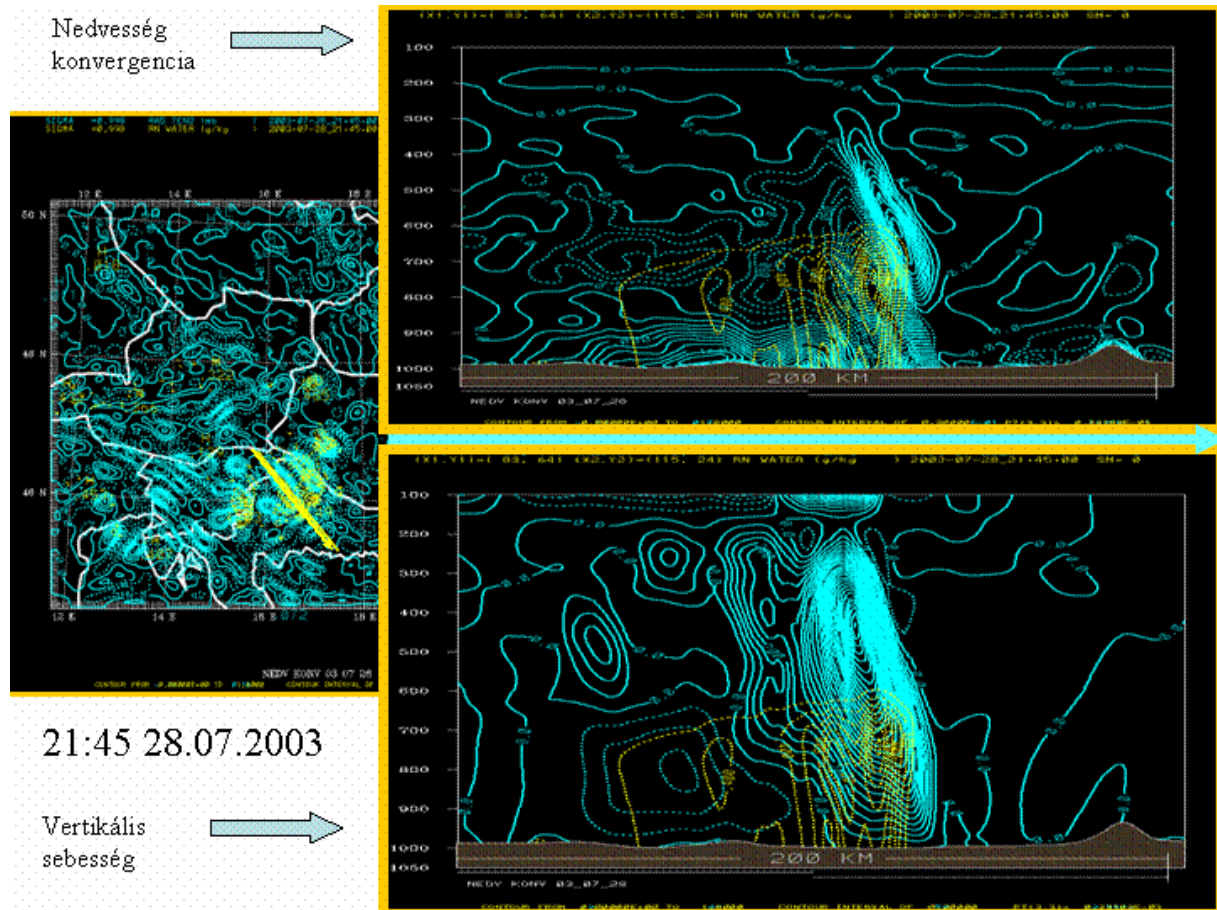
23:00 28.07. 2003.



4. 19. kép: Instabilitási vonal szupercellás tagokkal

4. 1. 2. 2. Szupercellás zivatarok vertikális szerkezete a konvergencia mező tükrében

A 4. 20-as képen egy vertikális metszetet látunk, mely az imént említett instabilitási vonalra merőlegesen készült. A metszetből kitűnik, hogy igen erőteljes nedvesség konvergencia alakult ki a cella körül, mely már a 400 hPa-os szintet is eléri, ehhez egyes szinteken 22-23 m/s-os feláramlás tartozik. Azt is megfigyelhetjük, hogy a konvergencia és divergencia mező egymáshoz viszonyított elhelyezkedése eltér az eddig vizsgált cellák szerkezetétől, mivel az erőteljes konvergenciát a leáramláshoz tartozó divergencia nem szorítja a magasba, mint ezt az előzőekben láttuk, hanem a fel és leáramlási csatorna tartósan egymás mellett marad. (Ez a szupercellás zivatar saját dinamikájából adódhat.)



4. 20. kép: Szupercellás zivatar vertikális metszete a nedvesség konvergencia és a feláramlás tükrében

5. Összefoglalás

A nedvesség konvergencia és a hasznosítható konvektív energia vizsgálata során azt tapasztaltuk, hogy a konvektív folyamatok kezdeti szakaszában jelentős szerepe van a hasznosítható energiának. A konvektív cellák kialakulása után már a nedvesség konvergencia játssza a főszerepet, ezen rendszerek életében. Ebből az is következik, hogy egy kialakuló cella, az összeáramlás révén, kiaknázza a környezetében meglévő hasznosítható energiát, amely gyakran más kisebb cellák korai pusztulásához vezet. A későbbiekben a (zivatarcellák kialakulása után) zivatarfelhőkön belüli illetve környezetükben létrejövő áramlási mező szerkezete és az alapáramlási mezővel való kölcsönhatása határozza meg az új cellák kialakulásának helyét és az új rendszer jövőbeni tulajdonságait (élettartam, méret, erősség).

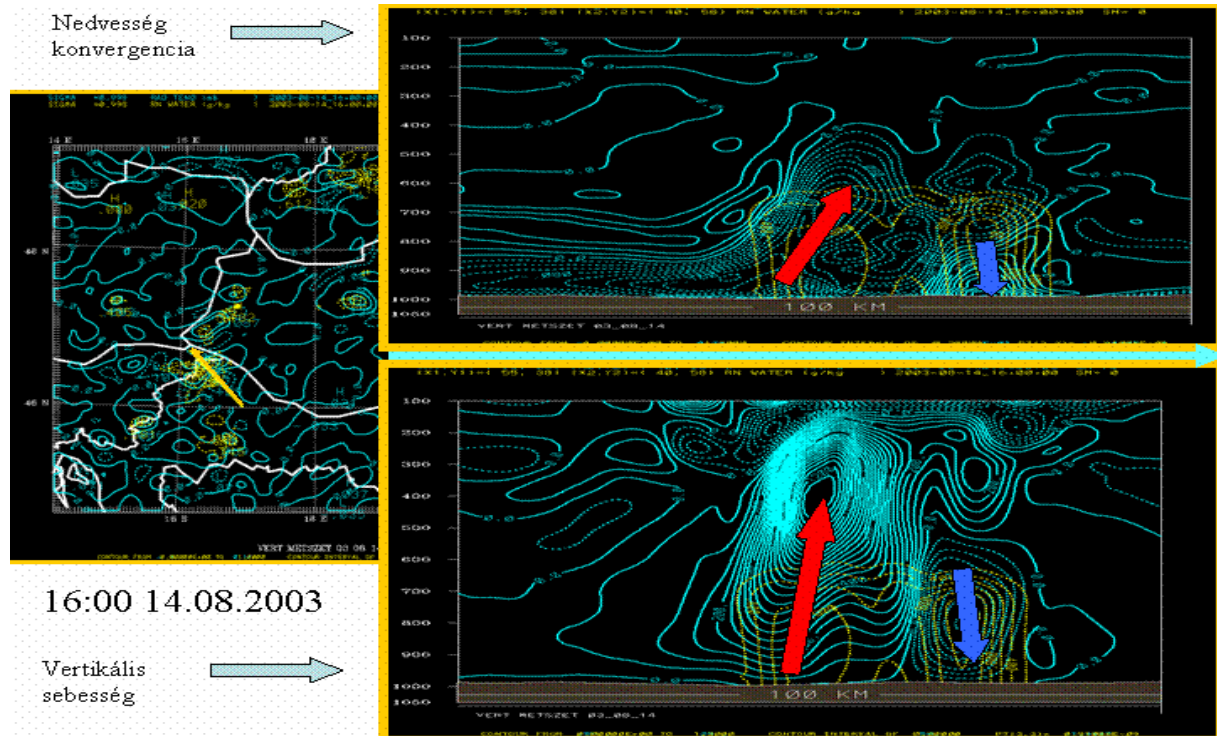
Vizsgálataink során megfigyelhettük, hogy az orográfia hatására létrejövő konvektív rendszerek illetve áramlási mezőjük, bizonyos idő után, új cellákat generálhat, már a domborzat hatásától mentes területeken is. Szakdolgozatunkban zömében mezo- β illetve mezo- α nagyságrendű folyamatokat és azok egymásra gyakorolt hatását elemeztük. Ezek alapján elmondható, hogy a különböző konvergencia típusok illetve ezek kapcsolódása mellett (ld. például, konvergencia mezők találkozása), kiemelt szerepet játszik az alsó rétegekben található nedvességi mező eloszlása.

Összességében elmondható, hogy a konvektív folyamatok során, a felhalmozódó, konvektív szempontból hasznosítható energia, a kialakuló cellákban (ill. a cellákhoz kapcsolódó áramlási rendszerben) kinetikus energiává alakul és a későbbiekben ez határozza meg a konvektív rendszerek kialakulását, fejlődését.

Mellékletek

1. Melléklet

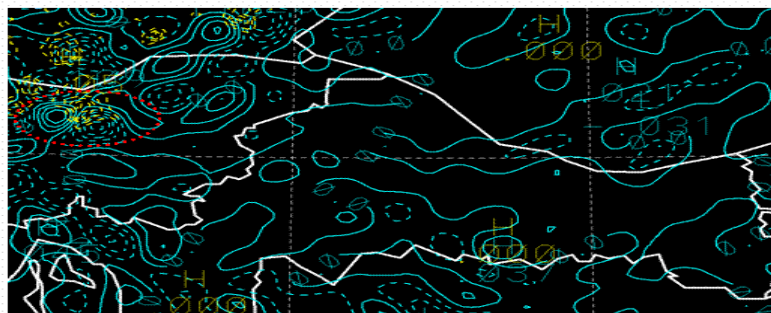
Hidegfronton kialakult zivatarcella: a front előtti nedvesség konvergencia biztosítja a cella fenntartásához szükséges energiát:



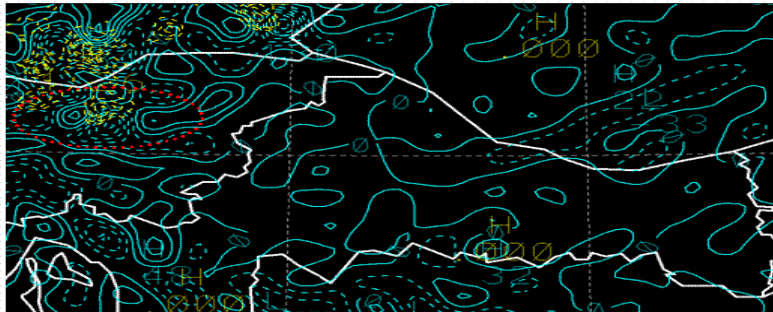
2. Melléklet

Szupercellás zivatarok áthelyeződése; az összeáramlás és leáramlás tartósan elkülönül egymástól (piros szaggatott)

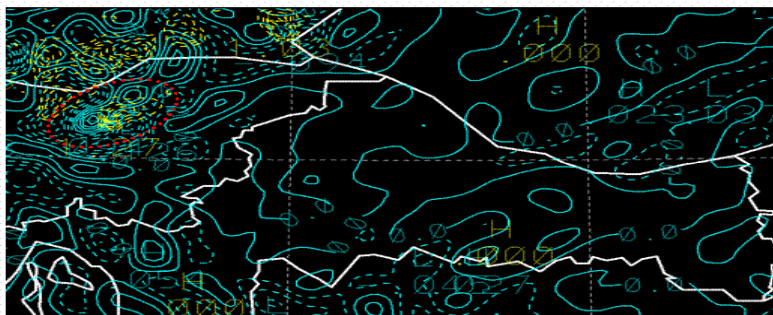
16:45 28.07. 2003.



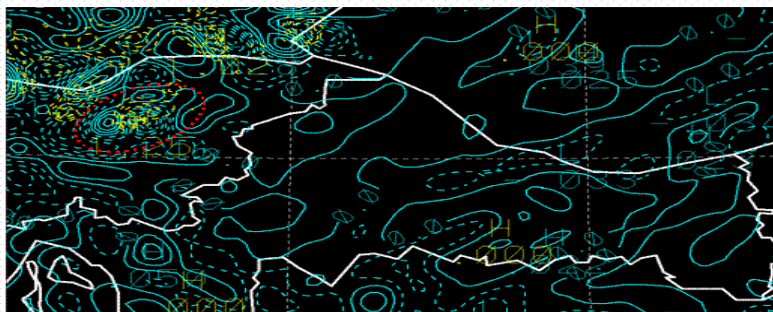
17:15 28.07. 2003.



17:45 28.07. 2003.



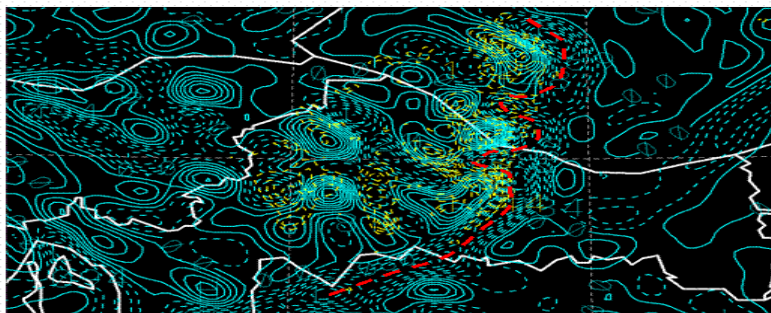
18:15 28.07. 2003.



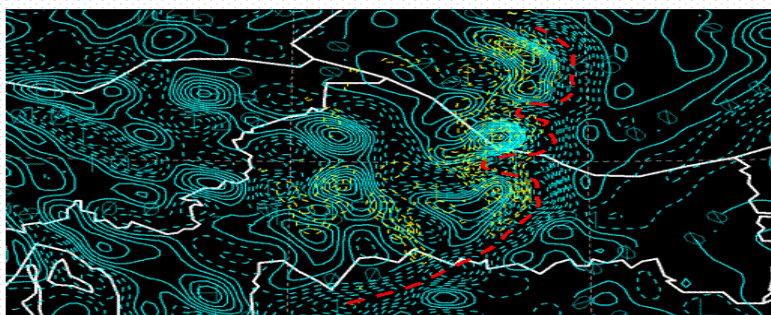
3. Melléklet

Instabilitási vonal mozgása szupercellás tagokkal a nedvesség konvergencia mező tükrében

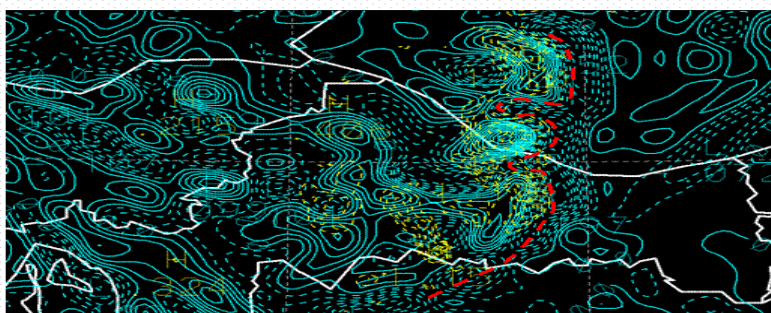
23:00 28.07. 2003.



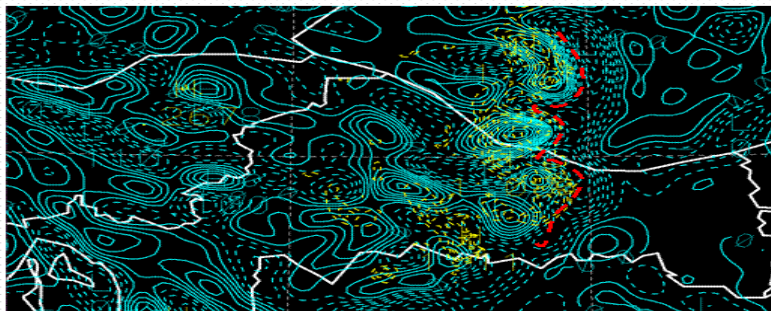
23:15 28.07. 2003.



23:30 28.07. 2003.



23:45 28.07. 2003.



Köszönetnyilvánítás

A szakdolgozatom elkészítésében nyújtott segítségért elsősorban köszönetet mondok témavezetőmnek, Horváth Ákosnak. Emellett köszönettel tartozom kedves csoporttársaimnak: Csirmaz Kálmánnak és Polyánszky Zoltán ötödéves meteorológus hallgatóknak és Mika Ágnesnek szakmai észrevételeikért, valamint Bartha Imrének, a siófoki Viharjelző Observatórium vezetőjének a diplomamunkám elkészítéséhez szükséges feltételek biztosításáért. Ezentúl köszönettel tartozom tanszéki konzulensemnek, Weidinger Tamásnak hasznos tanácsaiért, észrevételeiért.

Irodalomjegyzék

- Bodolalainé Jakus E. és Tánczer T.*, 2003: Mezőléptékű konvektív komplexumok. *OMSZ Kiadvány*, Budapest
- Browning, K. A., C. G Collier, P.R. Larke, P. Menmuir, G. A. Monk, and R. G. Owens*, 1982: On the forecasting of frontal rain using a weather radar network. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 534-552.
- Doswell, C.A.*, 1986: Short-range forecasting. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*, P.Ray, Ed. Amer. Meteor. Soc., Boston, 793 pp. *Fehér B.*, 2002: Záporok, zivatarok kialakulásának előrejelzése gyenge gradiensű mezőn. *Diplomamunka, ELTE Meteorológiai Tanszék*
- Götz G., Rákóczi F.*, 1981: A dinamikus meteorológia alapjai. *Tankönyvkiadó*, Budapest
- Horváth Á.*, 2003: Az MM5 modell, és alkalmazása az ultrarövidtávú előrejelzésében. 29. *Meteorológiai Tudományos Napok*, Budapest, 97-103.
- Á. Horváth, I. Geresdi*, 2000: Severe convective storms and associated phenomens in Hungary. *Atmospheric Research* 56, 127-146
- I. Matyasovszky, T. Weidinger*, 1998: Characterizing air pollution potential over Budapest using macrocirculation types. *Időjárás vol. 102, No. 4, pp. 219-237*
- Kolláth K.*, 2002: Konvektív veszélyes időjárási helyzetek szinoptikájának és dinamikájának vizsgálata. *Diplomamunka, ELTE Meteorológiai Tanszék*
- Madox R. A., K.W. Howard, K.W. , Bartels D. L., Rodgers D.M.*, 1986: Mesoscale Convective Complex in the Middle Latitudes, Chapter 17. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*, P.S.Ray, Ed., Amer. Meteor. Soc., 390 pp.

Mahoney, W.P. III, 1988: Gust front characteristics and the kinematics associated with interacting thunderstorm outflows, *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 1474-1491.

Práger T., 1980: Numerikus prognosztika I. *Egyetemi jegyzet*

Weisman M.L., and J.B. Klemp, 1986: Characteristics of isolated convective storms, Chapter 15. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*, P.S.Ray, Ed., Amer. Meteor. Soc., 763 pp.

Wilson, J.W., W.E. Schreiber, 1986: Initiation of convective storms by radar-observed boundary layer convergent lines. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 2516-2536.

Wilson, J. W., C. K. Mueller, 1993: Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution. *Wea. Forecasting.*, **8**, 113-131.

Wilson, J. W., D. L. Megenhardt, 1997: Thunderstorm initiation, organization and lifetime associated with Florida boundary layer convergence lines. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1507-1525