

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM, TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
METEOROLÓGIAI TANSZÉK

**KONVEKTÍV PARAMÉTEREREK VIZSGÁLATA
MODELLANALÍZISEK ALAPJÁN
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT**



Készítette:

KOHLMANN MÁRK

Témavezető:

KOLLÁTH KORNÉL

(Országos Meteorológiai Szolgálat)

Tanszéki konzulens:

DR. MATYASOVSKY ISTVÁN

(ELTE TTK Meteorológiai Tanszék)

Budapest, 2013.

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
Bevezetés.....	3
1. fejezet	4
1.1 Szakirodalmi áttekintés	4
1.2 A felhasznált adatokról és a reprezentativitás problémájáról.....	7
2. fejezet	10
2.1.1 A felhasznált adatok és módszerek	10
2.1.2 A CPinq program működésének demonstrációja	12
2.1.3 A statisztikai vizsgálatok metodikája.....	20
2.2.1 Eredmények - egy változóra.....	22
2.2.1.1 Labilitáshoz és alacsony szintű termodinamikához köthető paraméterek.....	22
2.2.1.2 Labilitási indexek	27
2.2.1.3 Kinematikai, dinamikai és nedvességhez köthető paraméterek	29
2.2.1.4 Aszimmetrikus időablakok.....	32
2.2.2 Eredmények - több változóra	34
2.2.2.1 A csapadékhulláshoz köthető leáramlás - DCAPE	39
2.2.2.2 A relatív nedvesség	41
2.2.2.3 MLCAPE, konvektív indexek és LCL	42
2.2.2.4 Kinematikai paraméterek	44
Összegzés	47
Köszönetnyilvánítás	47
Hivatkozások:.....	48

Bevezetés

A hazai és nemzetközi időjárási veszélyjelző szolgálatok egyik (ha nem a legfontosabb) feladata a veszélyes konvektív időjárási események előrejelzése. Ezen események rendkívüli módon veszélyeztetik a személy- és vagyonbiztonságot, akár 5-8 milliárd eurós becsült anyagi károkat okozva Európában évente (Dotzek, Foster, 2011). Nem meglepő hát, hogy világszerte nagy erőfeszítések zajlanak a heves konvektív folyamatok dinamikájának mélyebb megértésére, a konvektív objektumok létrejöttének kedvező körülmények megfelelő előrejelzésére. A konvekció megjelenése, intenzitása, fennmaradása nagy hatással bír a szinoptikus helyzet, ugyanakkor igen érzékeny a helyi hatásokra is, így a mezo-és szinoptikus skála közötti pozitív (negatív) visszacsatolások hatékonyságának megítélése is a szinoptikus szakember feladata.

Zivataros helyzetekben a veszélyjelzés fő feladatai közé tartozik annak meghatározása, hogy a vizsgált területen előfordulhat-e konvektív esemény (helyben kialakult vagy advektált). Felmerül továbbá, hogy annak felépítése, morfológiája és mozgása milyen jelleget ölt majd, milyen járulékos eseményeket produkálhat, s azok intenzitása indokolja-e veszélyjelzés kiadását, és ha igen, meddig, és mekkora területen. Bár napjaink operatív gyakorlatába már beépültek a mélykonvekció alapvető sajátosságait modellezni képes ún. nem-hidrosztatikus modellek, a zivatarok kialakulását, intenzitását befolyásoló környezet feltérképezését segítő különféle származtatott paraméterek analízise elkerülhetetlen. Ezen indexek az adott szituáció gyors és többnyire hatékony kiértékelését teszik lehetővé (bár sokszor hibával terhelték). Az indexek veszélyességi kategóriáit többnyire nemzetközi kutatások eredményei alapján, valamint az előrejelzői tapasztalat nyomán határozták meg.

A dolgozat célja a konvektív paraméterek és indexek hazai körülmények között történő statisztikai vizsgálata, a rendelkezésre álló 6 zivatarszezonnyi ECMWF analízisekből számolt konvektív paraméterek alapján. A vizsgálat során az adathalmaz előnyeit kihasználva, hátrányait és korlátait felismerve és azok keretei között mozogva alapvető klimatológiai statisztikákat kívánunk előállítani a konvektív paraméterekre vonatkozóan, összevetve azokat nemzetközi és korábbi hazai kutatások eredményeivel. Célunk volt továbbá egy olyan program kifejlesztése, mely oktatási-kutatási célú esettanulmányok elkészítéséhez szükséges esetleválogatást tesz lehetővé részletes kritériumok alapján, majd az alapvető statisztikai számítások elvégzése után a Magyarországon előforduló zivatarláncoknak kedvező környezetek részletesebb vizsgálatát kezdjük meg.

1. fejezet

1.1 Szakirodalmi áttekintés

A külföldi szakirodalomban a konvektív folyamatok környezetének vizsgálata legnagyobb hagyományokkal az Egyesült Államokban bír, ahol a múlt század közepétől kezdve zajlanak kutatások az ott széles skálán előforduló heves események (a zivataroktól a tornádókig) dinamikájáról és a kialakulásuknak kedvező körülményekről. A kutatások a mérés technika, adatgyűjtés és interpretáció, modellezés, dinamikus és a (mezo) szinoptikus meteorológia egyidejű fejlődését igényelték. Az egyes tanulmányok megjelenésével egyszerre láthatunk példát egyre korszerűbb radartechnikai mérésekre, egyre precízebb adatgyűjtési módszerekre, egyre kiterjedtebb dinamikus meteorológiai eszköztárra, a rádiószondás felszállások adatainak egyre korrektebb figyelembevételére, és ezek által a konvektív paraméterek operatív felhasználhatóságának növekedésére.

A dolgozat koncepciójában a Rasmussen - Thompson - Doswell (és mtsai) féle megközelítést veszi alapul. Ezen tanulmányok külön figyelmet szentelnek az Egyesült Államokban komoly személy-és vagyonvédelmi problémát okozó (igen gyakori) szupercellás-tornádós esetek kutatására. Hazai körülmények között azonban az eltérő földrajzi fekvés, méretskálák, állomáshálózat és klimatikusan jellemző konvektív események a fent említettől eltérő cél kitűzését teszik fontossá.

A konvektív paraméterekre, és azok klimatológiájára vonatkozó kutatások több jellemző problémába is ütköznek. A legfőbb problémát a reprezentativitás és skála okozza, nem egyértelmű, hogy a rádiószondás mérések kapcsán a légkör függőleges hőmérsékleti rétegződését, nedvességi profilját és szélviszonyait a mérés környezetében melyik konvektív eseményhez rendeljük - ezt a problémát részletesebben a második fejezetben taglaljuk.

Következzen néhány nevesebb külföldi kutatás bemutatása! A konvektív paraméterek irányába a témában úttörő munkának számító Sholwater és Fulks (1943), Fawbush és Miller (1954) és Beebe (1955,1958) tanulmányainak nyomán fordult nagyobb figyelem. Ezen tanulmányokban a konvektív folyamatok környezetének termodinamikai és kinematikai tulajdonságaival kívánták jellemezni a heves eseményeket. Ezen munkákat követően ugrásszerűen megnőtt a témához tartozó kutatások száma, ezek közül említünk meg néhányat a teljesség igénye nélkül (a zivataros helyzetek kategorizálásánál az általános zivataros esetek,

szupercellás és tornádós zivatarok elkülönítésére a szakirodalomban szokásos NORM, SUP, TOR jelölést használjuk).

Rasmussen és Wilhelmson (1983) megállapították, hogy a nem forgó típusú zivatarokhoz alacsony CAPE és szélnyírás értékek tartoznak, míg a forgó, tornádókat produkáló zivatarok magas CAPE és szélnyírás értékekkel bírnak. Burgess és Lemon (1990) doppler radaros mérésekre alapozva munkájukat kimutatták, hogy a megfigyelt mezociklonok túlnyomó többsége veszélyes időjárási eseményeket produkál, további alapot támasztva azok kutatásának szükségességére.

Brooks és Doswell (1994) kutatása során részleteibe menően taglalta a reprezentativitás problémáját, s a Wood et al. (1994) által előállított megfigyelési adatsor és a Brooks et al. (1994) konceptuális modelljét alkalmazva vizsgálta az akkor ismert konvektív paramétereket. Kimutatta többek között, hogy az EHI (energia-helicitási index) jó indikátora a szupercellák kialakulásának kedvező rotációval rendelkező környezetnek, így jól elkülöníti a mezocikloniális eseteket a forgással nem rendelkező zivataroktól, ugyanakkor mezociklonok és a tornádókat produkáló mezociklonok elkülönítésére nem különösebben alkalmas. A fent említett konceptuális modell alapján bevezetett $H/v_{\min}$ arányszám (H-helicitás, $v_{\min}$ - a középszintű áramlás erősségét reprezentáló sebesség (2-9 km közötti szélsősebességek minimuma) és $q_{\max}$ maximális keverési arány együttes vizsgálatával kiderült, hogy a $H/v_{\min}$ kis értékei és a $q_{\max}$ nagy értékei kedveznek leginkább a tornádók kialakulásához. Ennek magyarázata az, hogy alacsony $H/v_{\min}$ értékeknél kisebb az esélye annak, hogy a erőteljes leáramlás és kifutószél negatívan hat az alacsony szintű mezociklon kialakulására.

Rasmussen és Blanchard (1998) munkájában egy alapvető klimatológiai adatbázist állított elő (azt megelőzően nem volt a paraméterek esetek szerinti katalógizálására objektív klimatológia) a legismertebb konvektív paraméterekről. A reprezentativitás problémáját megoldva vertikális szélnyírást, CAPE-et (konvektív rendelkezésre álló potenciális energia), azok kombinációit valamint az alacsony szintű termodinamikát vizsgálták, ill. a helikalitás, keverési arány, és a középszintű zivatarhoz képesti áramlás (Brooks et al. (1994) nyomán) együttesét is figyelembe vették. A 0-6 km-es nyírás esetén kimutathatóan elkülönültek a NORM esetek a SUP és TOR esetektől. A NORM esetek 75 %-a 15 m/s-os nyírás alatt született, míg a SUP/TOR esetek 75%-a 12 m/s-os szélnyírás fölött. Ugyanakkor a SUP és TOR esetek között nem adott jó elkülönítési alapot. A viharhoz képesti helikalitás még jobban szétválasztotta az egyes kategóriákat, lehetőséget adva a SUP és TOR esetek közötti különbségtételre is. Az átlagos szélnyírás (hodográf hossza / rétegvastagság) ugyancsak jó elkülönítő eszközül szolgál a NORM és SUP esetek közt (a NORM esetek fele 0.053 s^{-1} alá

esik, míg a SUP értékek mindössze 15% -a). A CAPE-hez köthető paramétereknél a vizsgálatok esetén a CAPE ill. az LFC -től LFC + 3 km magasságig integrált CAPE adott értékelhető eredményeket az esetek elkülöníthetőségét illetően, a cikk írói azonban felhívják a figyelmet, hogy a CAPE más paraméterekkel kombinálva sokkal értékelhetőbb indikátorként szolgál.

A kombinált paramétereknél a BRN (Bulk Richardson Number) , EHI és VGP (örvényesség generálási paraméter) statisztikai vizsgálatát végezték el. Az EHI és VGP esetén sikerült alátámasztani, hogy a CAPE és nyírás kombinációja ezen paramétereken belül sikeresen elválasztja az egyes kategóriákat.

Az emelési kondenzációs szint (LCL) vizsgálatánál kimutatták, hogy a SUP és TOR esetek többsége alacsony felhőalappal bír (<1200 m), viszont felhívják a figyelmet az LCL nagy térbeli változékonyságára és a mintavételezés hiányosságaira. A vizsgálat a cikkírók azon gyakorlati tapasztalatán alapul, hogy megfelelő labilitási és nyírási viszonyok mellett vannak zivatarok, melyek túlságosan erőteljes kifutószelők miatt nem produkáltak a paraméterek alapján egyébként várható eseményeket. A megközelítés szerint minél kevesebb nedvességgel bír a planetáris határréteg, annál nagyobb lesz a leáramlás során a párolgás miatt bekövetkező hűlés (természetesen csak addig, amíg a levegő nedves adiabatán mozog) – s a planetáris határréteg nedvességtartama összefüggésbe hozható az emelési kondenzációs szint magasságával.

Thompson et al (2003) munkássága az előzőeket támasztja alá és tárja elénk még nagyobb részletességgel (más metodikát és adathalmazt véve alapul). Munkájukban elemzik a Thompson et al, 2002 által bevezetett szupercella kompozit paramétert (SCP) és szignifikáns tornádó paramétert (STP) is, valamint a BRN helyett annak csak a nyírásból eredő tagját, a Bulk - Richardson nyírást vették alapul, mely jobb elkülönítést tett lehetővé az egyes intenzitási kategóriák között.

Craven és Brooks (2004) tanulmányában a mélykonvekció teljes spektrumát vizsgálták, nem csak SUP, NORM és TOR esetekre hagyatkozva, hanem a nemzivataros helyzeteket is vizsgálva. Vizsgálatuk során bevezették az SSP (szignifikáns hevességi paraméter) indexet, mely a zivataros és a heves zivataros esetek között bizonyult jó elkülönítő paraméternek. Egyéb vizsgált paraméterek az MLCAPE, LCL, hőmérsékleti gradiens és a szélnyírás (különböző nyomási szintek között). Megemlítendő még Davies (2006) vizsgálatai melyek a magas felhőalap mellett kialakuló TOR - SUP esetek felé irányultak.

Hasonló kutatások hazai vonatkozásban is készültek. Ezek között említendő pl. Götz és Pápainé (1966) munkája, melyben a szélnyírás zivatarképződésben betöltött szerepét

vizsgálják az SSI (showalter stabilitási indexe), K és LI (lifted index) segítségével. Götz és Mészáros (1967) a jégeső keletkezéseinek feltételeit vizsgálták.

Az indexek vizsgálata mellett a konvekció teljesebb megértéséhez elengedhetetlen annak kategorizálása, hogy mely szinoptikus helyzetek milyen konvektív események előfordulását indukálják - hazánkban ilyen tanulmány pl. Horváth, Seres (2009) munkája, ahol a nagy csapadékot adó, potenciálisan hirtelen árvizet okozó konvektív jellegű csapadékrendszereket megjelenésük, felépítésük, mozgásuk, valamint szinoptikus környezetük alapján nyolc alkategóriába sorolták.

Összefoglalva az itt leírtakat azt mondhatjuk el, hogy a leggyakrabban vizsgált paraméterek a termodinamikai paraméterek közül az CAPE, CIN (és ezek különféle változatai), LCL, valamint a 0-3 km között integrált CAPE. a nyírási paraméterek közül a 0-1 km-es illetve a 0-6 km-es nyírás. A legnépszerűbb kombinált paraméterek az EHI, SRH, BRN és BRN nyírás valamint a VGP, SCP és STP.

1.2 A felhasznált adatokról és a reprezentativitás problémájáról

A konvektív események kutatásakor felmerülő fő problémák közül azok, melyeket munkánk során figyelembe kellett vennünk:

- Az adatok forrása, a mintavételezés tér-és időbeli felbontása és annak hibái.
- Az adatok interpretációja - a mérésekre alkalmazott kritériumok, azok hibái, statisztikai szignifikanciájuk. A bemenő (különösen a termodinamikai) változók hibái.
- A reprezentativitás problémája térben és időben - a vizsgált paraméterek jellemző tér- és időbeli eloszlása és érzékenysége a konvektív folyamatok "szennyező" hatására.
- A vizsgált paraméterek eltérő számítási módjaiból adódó különbségek.

Az említettek részletes taglalása szükséges az adatsoraink, módszereink és eredményeink helyes interpretációjához.

A fent említett kutatások nagy többségében az eredmények nagy költségvetésű mérési kampányok hozományaként állnak elő. Brooks és Doswell (1994) Wood et al. (1994) mezociklon megfigyelési adathalmazát, az NSSL (National Severe Storm Laboratory) radarmegfigyeléseit (1975-1990 között) és a Storm Data jégeső, nagyerejű széllekeések és tornádókra vonatkozó megfigyeléseit használja fel. A cellakövetés hibáit kiszűrendő csak a fél óránál hosszabb élettartamú szupercellákat vették figyelembe. A rádiószondás felszállások legnagyobb részét a NWS (National Weather Service, Nemzeti Meteorológiai Szolgálat)

Oklahoma környékére vonatkozó rawinszondás adatok teszik ki. Az adathalmazt kibővítendő, felhasználták még az NSSL 1986-os mérési kampányában begyűjtött szupercellás eseteket is, valamint néhány speciális egyedi TOR és NORM szituációt is.

Rasmussen és Blanchard (1998) az 1992-es év rawinszonda felszállási adatait használták fel. Az adatokat hidrosztatikusság szempontjából és hiányzó széladatok alapján szűrték. A felszállások heves konvekcióhoz való párosítása villámadatok alapján történt (>10 CG (lecsapó) villám volt a zivatarok hevedessége vonatkozó kritériuma). A viharok további klasszifikációra egyéb vizuális, csapadék és szélméréseket alkalmaztak.

Thompson et al. (2003) a Rapid Update Cycle 2 (RUC-2) analíziseit, 1999-2001 között generált felszállási adatokat, radarméréseket és megfigyeléseket használt fel. A radaros mérésekre a Stumpf et al. (1998) - mezociklon detektálási algoritmushoz hasonló kritériumokat állítottak, s a RUC-2 analízisek hibáit (felszínközeli hőmérséklet és nedvesség) is részletekbe menően analizálták és szűrték.

Craven és Brooks (2004) 3 év 0000 UTC-s felszállási adatait (a nem zivataros helyzeteket is figyelembe véve), CG villám adatokat illetve valamint megfigyelési adatokat vették munkájuk alapjául.

Az adatok interpretációjánál az egyik legjelentősebb probléma a reprezentativitásban rejlik, mely megoldása mindig egy kényes egyensúly keresése a felhasználható adatok mennyisége és a zivatar-rádiószondás felszállás párosítás fizikai valóságtartama között.

A fő problémát az jelenti, hogy az in-situ mérések (különösen a rádiószondás mérések) tér és időbeli felbontása a szinoptikus skáláról ad reprezentatív képet, míg a megfigyelni kívánt zivataros rendszerek a mezoskála objektumai. Ebből eredően az a kérdés, hogy az adott felszállás mennyire reprezentálja jól azt a környezetet, amelyben a hozzá rendelt konvektív objektum (vagy objektumok) megszületett és fejlődött, valamint az, hogy a kiválasztott felszállással történő megfigyeltetés a leginkább megalapozott-e a többi környező felszálláshoz képest (ha azok rendelkezésre állnak), mindig nyitott marad. A környezet, amelyben a zivatarok fejlődnek, nem homogén horizontálisan. A horizontális inhomogenitás mértékét ugyanakkor nagymértékben meghatározza a szinoptikus helyzet - ami a felsorolt paraméterekkel, adathalmazokkal, feldolgozási elvekkel és módszerekkel nem írható le közvetlenül. Nem elhanyagolható továbbá a konvekció perturbációs hatása sem annak tágabb környezetére – egy nagyobb zivatar által okozott konvergencia jelentős távolságokban is detektálható változásokat okoz az alacsonyszintű szél-és nedvességi mezőkben, megváltoztatva annak hatását az ott érvényes pl. MLCAPE értékekre, a zivataros kifutószél jelentős területeken stabilizálhatja a troposzférát (vagy épp labilizálhatja - függően a nyírás és

a kifutószél keltette örvények viszonyától). A zivatartevékenység nyomán teljesen átalakul a nedvesség függőleges rétegződésének szerkezete, (esetenként csak átmenetileg) csökken a labilitás, a felszíni hőmérséklet, megváltoznak a konvektív paraméterek értékei, stb.... Azt sem tudhatjuk biztosan, hogy az általunk mintavételezett légtömeg volt-e az a légtömeg, melyből a zivatar táplálkozott. Ha a rádiószondás mérés egy ilyen esemény által befolyásolt környezeten halad át, elveszíti reprezentativitását arra a környezetre, amely a zivatart kialakította / táplálta. Tovább komplikálja a helyzetet az is, hogy egyes konvektív paraméterek horizontális inhomogenitása (mint pl. az LCL) drasztikus mértékeket ölthet, és a rádiószondás állomáshálózat térbeli felbontása nem teszi lehetővé a reprezentatív mintavételezést (Markowski et al. 1998).

Problémát jelent az időbeni felbontás kérdése is - fontos kérdés, hogy mekkora időintervallumot tekintünk az adott szondázás körül reprezentatívnak a zivataros esetekre, hiszen a mért paraméterek időben sokszor ugrásszerűen változhatnak, ráadásul az adott eseménytől függően más-más időablak fogja azokat jól jellemezni.

Erre a problémára számos megoldási módszer született. Ezen megoldások természetesen nagy mértékben függtek a rendelkezésre álló adathalmaz méretétől, hiszen az eleve kisebb adatbázissal rendelkező kutatók sokszor kényszerültek kompromisszumra a reprezentativitás rovására.

Brooks és Doswell (1994) behatóan foglalkozott a problémával tanulmányában. Saját adatbázisukra végül egy 160 km-es korlátot adtak az adatbázis értékelhető méretének megtartása érdekében. Az időbeli korlátot (a mezociklonok környezetének potenciálisan gyors változásai miatt) a 0000 UTC és 1200 UTC-s felszállások köré 1 órában szabták meg (eseteik 50-60%-a ezen időkereten belül mozgott). A felszállások szűrésénél azon méréseket hagyták figyelmen kívül, ahol a CAPE 150 J/kg alatt volt, ha a CAPE < CIN feltétel teljesült, ill. ha a szondázás nem érte el a 300 hPa-t.

Rasmussen és Blanchard (1998) már egy beáramlási szektort is definiált, a "konvektív szennyezés" hatását minimalizálendő. A beáramlási szektort az alsó 500 m átlagos szélvektorának +/- 75°-os nyílásszögű, 400 km-es sugarú körcikkeként adták meg. Az a meteorológiai esemény (heves esemény, villám, flash flood), amely ebbe a szektorba esett, az adott felszálláshoz rendelkezhetővé vált. Amennyiben több felszállásra is teljesült a beáramlási kritérium, az eseményt ahhoz a méréshez rendelték, ahol CAPE értéke a legnagyobb volt. A villám-és heves esemény adatbázisból a felszálláshoz képesti +/- 3 órás intervallumot tekintették reprezentatívnak. Az egyes hevességi kategóriákat is ezek segítségével állapították meg.

Thompson et al. (2003) módszerei annyiban különböznek, hogy a RUC-2 modellanalíziseit kötötték az egyébként szigorú radardetektálási kritériumokkal kijelölt esetekhez. Az eseményekhez a legközelebbi rácspont értékeit és a felszíni méréseket interpolációval kötötték. A felmerülő problémák többek között az izobárfelületekre történő számítási módszerrel adódtak - a felszínközeli rétegekben ez jelentős veszteséget jelent a vertikális felbontásban. A az adatbázis sajátosságaiból adódóan a hőmérséklet, szél-és keverési arány értékek hibával terheltek - így a belőlük származtatott paraméterek is. A RUC-2 analízisek és előrejelzések legnagyobb előnye ugyanakkor a 40 km-es térbeli és 1 órás időbeli felbontásuk.

Craven és Brooks (2004) tanulmányában a felhasznált adatbázis (~ 60 000 felszállás) méretére helyezték a hangsúlyt, így nem vethették alá szigorú kritériumoknak a felszállások reprezentativitását (<185 km, időben a 0000 UTC-s felszállások +/- 3 órával előtt/után). Az adatok egy egyszerű minőségellenőrzési eljáráson estek át: a heves zivatar/jégeső/erős széllekedésekhez párosított szondázások esetén a MUCAPE értéke nem lehetett kisebb 150 J/kg- nál, valamint a CAPE számítások átmentek egy virtuális hőmérsékleti korrekción (Doswell, Rasmussen, 1994). A kiugró értékek szubjektív analízisnek lettek alávetve.

A fent bemutatottak alapján elmondhatjuk, hogy a reprezentativitás problémájának megoldása egyáltalán nem triviális, és a változatos megoldási módok rendszerint a kutatás céljához és igényeihez, ill. a rendelkezésre álló adatbázis méretéhez és minőségéhez kell, hogy illeszkedjenek.

2. fejezet

2.1.1 A felhasznált adatok és módszerek

Munkánk során a 2005-2011-es évek nyári zivatarszezonjára (ápr.-aug.) 3 órás ECMWF analízisekből konvektív paramétereket számoló program outputjaira (Csirmaz Kálmán, OMSZ) támaszkodva Craven és Brooks (2004) koncepcióját alkalmazva egy alapvető klimatológiát kívánunk előállítani a konvektív paraméterek és heves időjárási események Magyarországon jellemző kapcsolatáról. Az ECMWF analízisek mellett rendelkezésünkre állt még egy adatbázis a 2008-2012-es periódusra a TITAN módszer (Dixon és Wiener, 1993) segítségével azonosított zivatarellipszisekből, 15 perces felbontásban (középpont koordinátái, kistengely, nagytengely, 40 DBz-t meghaladó reflektivitású pixelek száma).

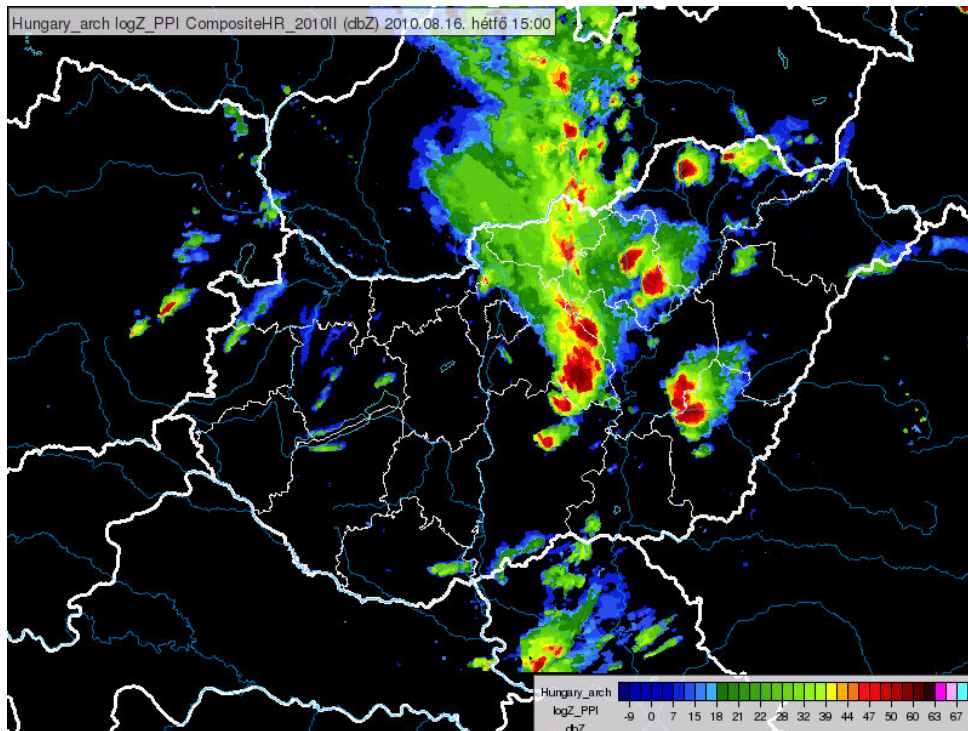
Fel kell hívnunk a figyelmet a bemutatott szakirodalmak és az általunk alkalmazott módszerek és adatok közötti lényegi különbségekre:

- A külföldi tanulmányok nagy többsége valós rádiószondás méréseket vesz alapul, ahol a szondák az egyes magassági szintek áramlásával a kiindulási ponttól messzire sodródva végeznek méréseket. Az általunk használt pszeudo-felszállások azonban nem számolnak az emelkedő légréteg advekcijával, hanem a föltöltés légoszlop tulajdonságait írják le, s a számítások meghatározott izobárfelületeken történnek, csökkentve ezzel a vertikális koordináta szerinti felbontást alacsonyabb szinteken. Hazai körülmények között a horizontális inhomogenitások a rádiószondás mérések térbeli felbontásához képest Magyarország területe fölött is igen jelentősek lehetnek.
- Mivel nem valós, verifikált megfigyelésekhez (ill. villámadatokhoz) kötünk felszállási adatokat, az eseteket csupán hevesség alapján kísérhetjük meg osztályozni, típus (pl. NORM, SUP) szerint nincs erre mód (a radarmérések alapján történő elkülönítésre szükség volna doppler - radaros radiális szélmérésekre is).
- Az adatok modellből való származtatásából következően a megközelítés módja is különbözik - ám a megfogalmazott fő cél - a hazai veszélyjelzés alapvető klimatológiával való támogatása nem sérül. Ennek oka az, hogy a veszélyjelzési (és szinoptikus) gyakorlatban a konvektív paraméterek származtatása a hidrosztatikus modellek előrejelzési mezőiből történik - így ha nem is feltétlenül egzakt, de mindenképpen az operatív munka során alkalmazott eszköztárhoz igazított eredményekhez jutunk.

Munkánk során az adatok feldolgozására egy C programnyelven írt algoritmust készítettünk (neve: CPinq, Convective Parameter inquiry), mely megfelelő hibakezelés után választható időablakkal rácspontonként párosítja a bináris ECMWF fájlokból kikért konvektív paramétereket az időintervallumon belül Magyarország területén megjelenő zivatarellipszisekkel, egy meghatározott térbeli kritérium alapján. A program alapszerkezetén túl lehetőséget nyújt arra, hogy választható időintervallumra (a rendelkezésre álló adatokból), az ország teljes területére vagy csak egy kiválasztott rácspontra, tetszőleges számú paraméterre kritériumokat ellenőrizzen, s megadja, hogy azok mikor és hol teljesültek, valamint hogy az éppen vizsgált rácspont közvetlen környezetében voltak-e zivatarellipszisek a kiválasztott időablak-kritérium alapján.

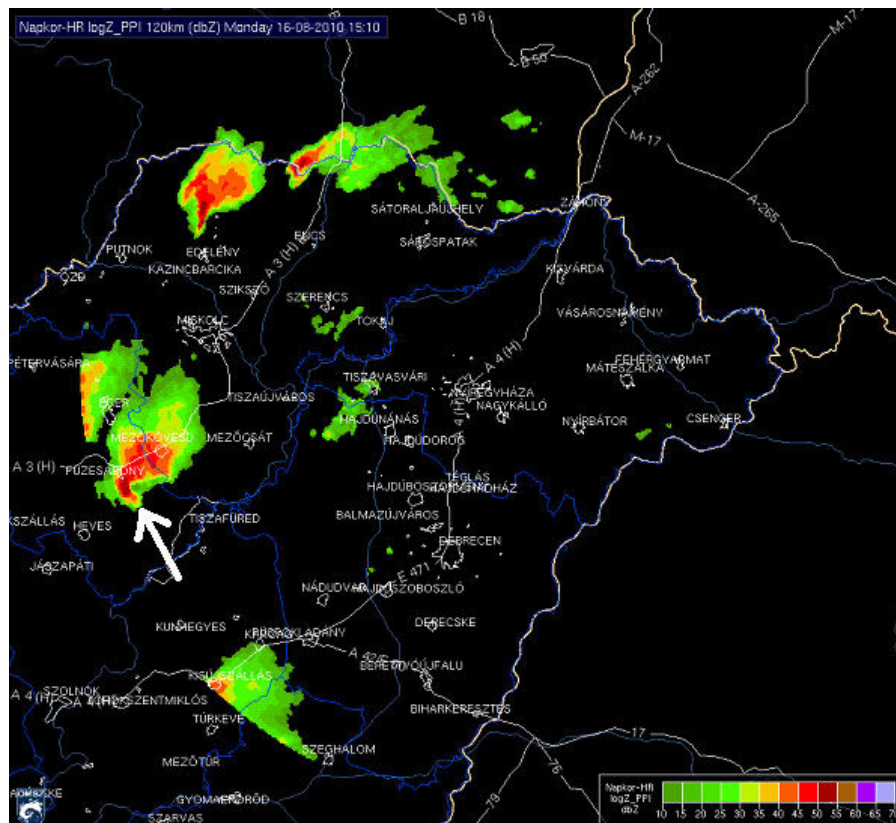
2.1.2 A CPinq program működésének demonstrációja

Lássunk egy rövid példát a program működésére! Esetünkben a 2010 augusztus 16-ai, hidegfront előtt fejlődő zivatarláncot analizáljuk. Egy jó feltételkeret megadásával azt kívánjuk megtudni, hogy kiszűrhetők-e az aznap megfigyelt tornádót produkáló szupercellák. Bár korábban említettük, nem ez a jelenségkör a leginkább jellemző Magyarországon, a könnyebb prezentálhatóság kedvéért ezt a markáns esetet választottuk.

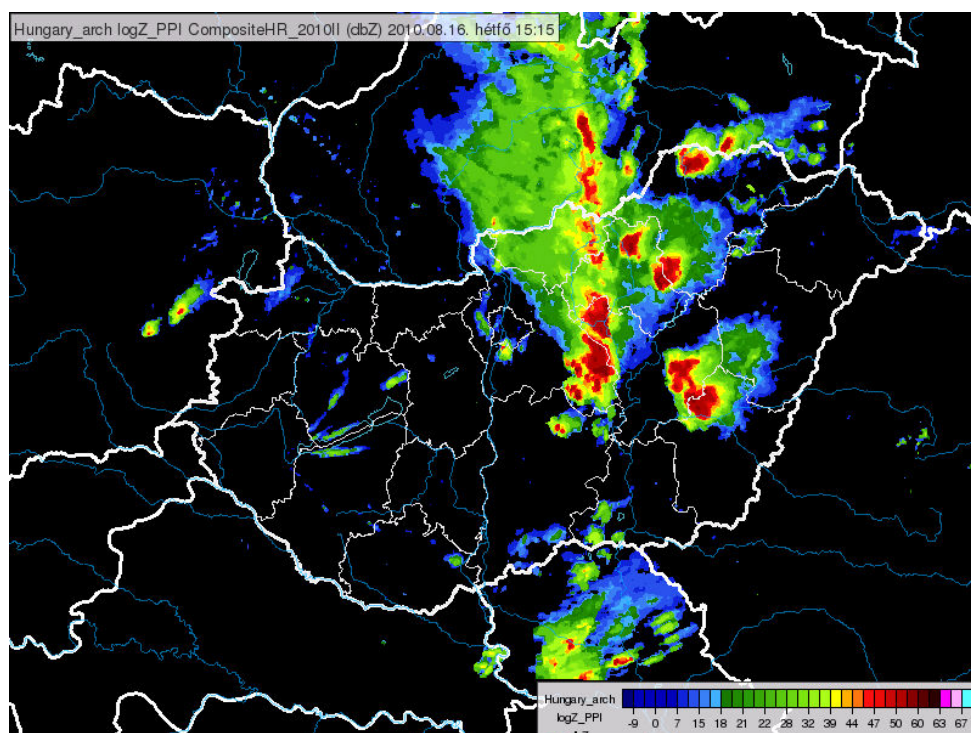


1. ábra 2010.08.16-ai radarkép az analízis időpontjában, 1500 UTC (forrás: OMSZ)

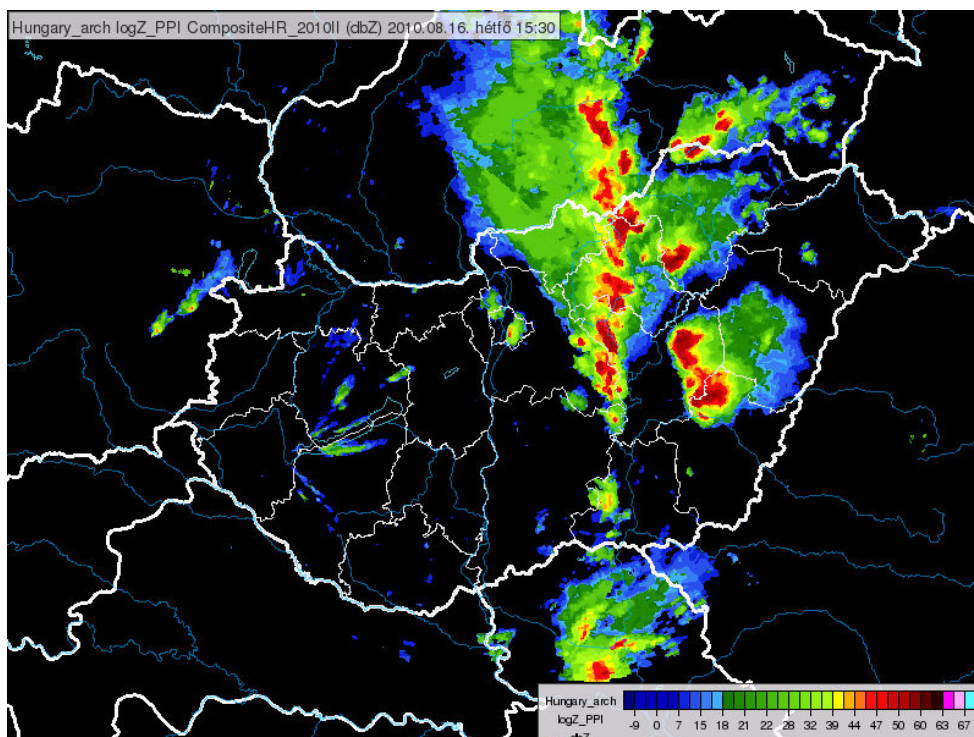
2010 augusztus 16-án egy hidegfronthoz kapcsolódó zivatarlanc vonult végig Magyarországon a kora délutáni órákban. A radarképeken követhető a rendszer mozgása 15 UTC és 16 UTC között. A zivatarláncban, és főleg annak előterében heves multicellás zivatarok és szupercellák fejlődtek ki, és az ország területéről 3 tornádót is sikerült dokumentálni (jégeső és 90-100 km/h feletti széllekeések mellett), Diósjenő, Hidasnémeti és Mezőkövesd felett, ezek közül Mezőkövesdet a radarképeken megjelöltük.



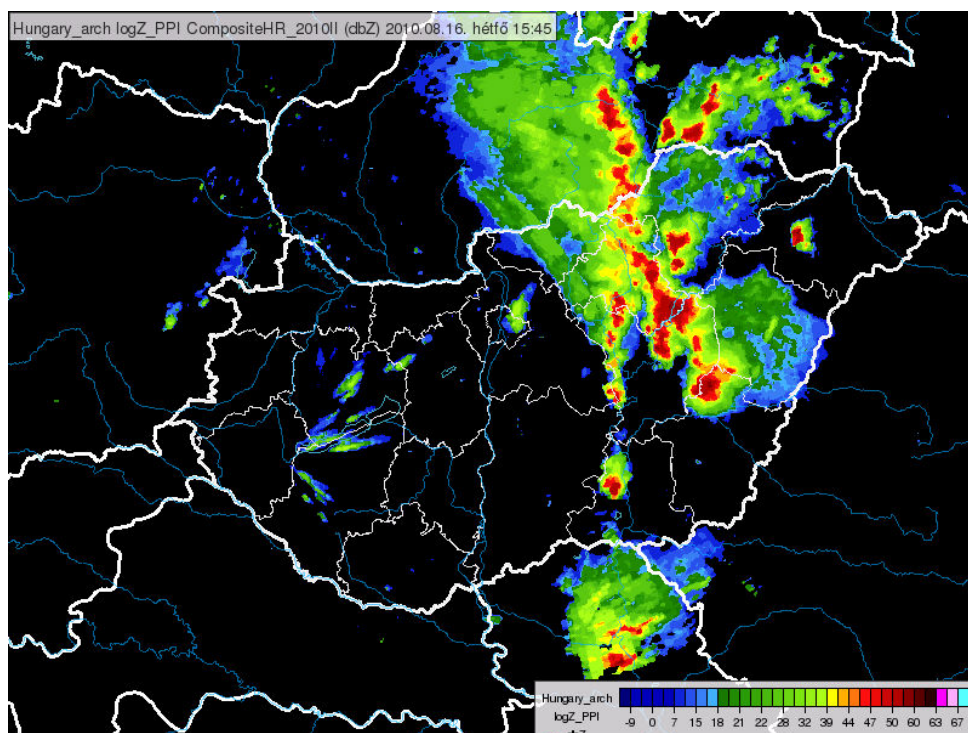
2. ábra 2010.08.16-ai radarkép, 1510 UTC. A nyíllal jelölt hook-echo-s szupercella produkálta a mezőkövesdi tornádót (forrás: OMSZ, www.met.hu)



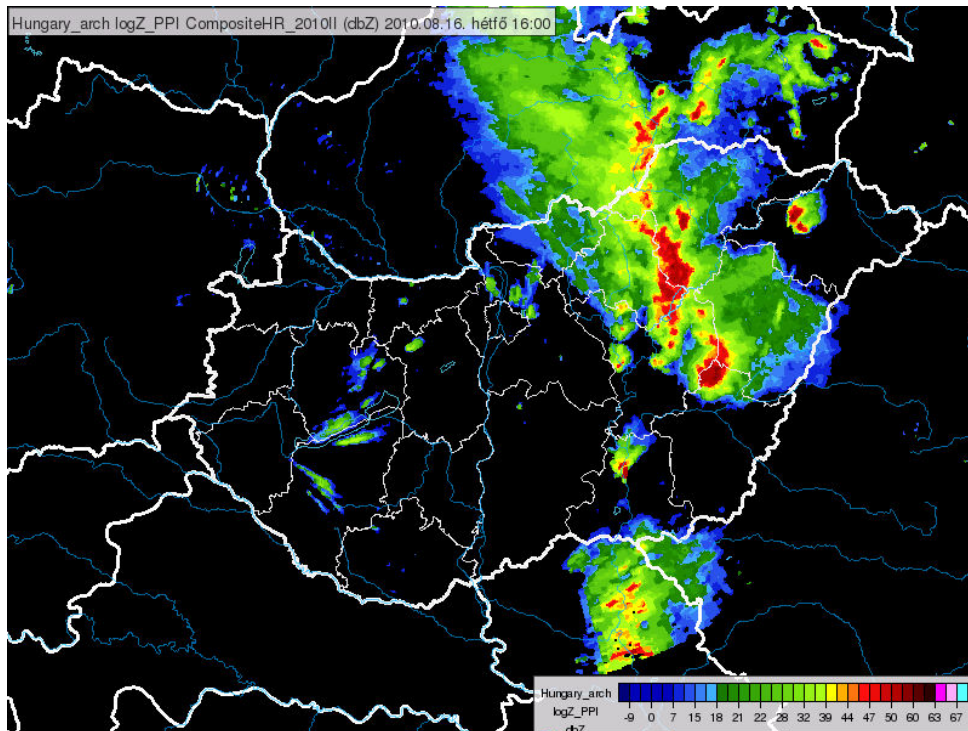
3. ábra: 2010.08.16-ai radarkép, 1515 UTC (forrás: OMSZ)



4. ábra: 2010.08.16-ai radarkép, 1530 UTC (forrás: OMSZ)



5. ábra: 2010.08.16-ai radarkép, 1545 UTC (forrás: OMSZ)



6. ábra: 2010.08.16-ai radarkép, 1600 UTC (forrás: OMSZ)

Az eljárás menete: a megfelelő időintervallum (esetünkben 2010.08.16) megadása után elsőként a nemzetközi ajánlások alapján vizsgáljuk a tornádók előfordulását indikáló index-intervallumokat. Elsőként egy egyszerű, tornádós esetekre jellemző feltételkeretet futtatunk végig a teljes 4 éves időszakon, hogy lássuk, az általunk vizsgált időpont megfelel-e az elvárt kritériumoknak. A program kimenete erre vonatkozóan:

A változók és a hozzájuk tartozó határok:

MLCAPE : 1200.00 [J/kg] <
 EHI : 1.00 <

A feltételek teljesülnek az alábbi időpontokban:

2008.5.27. 18:00 UTC
 2008.5.28. 15:00 UTC
 2008.5.28. 18:00 UTC
 2008.6.25. 18:00 UTC
 2008.7.13. 9:00 UTC
 2008.7.13. 15:00 UTC; 13/44 db ellipszis; T = 347.000291/718.000577 [km²]; <40 DBZ pixelek: 347/718 db;
 2008.7.14. 15:00 UTC; 0/49 db ellipszis; T = 0.000000/510.000427 [km²]; <40 DBZ pixelek: 0/514 db;
 2008.8.14. 15:00 UTC
 2008.8.15. 9:00 UTC
 2008.8.15. 12:00 UTC
 2008.8.15. 15:00 UTC
 2009.7.18. 12:00 UTC; 0/98 db ellipszis; T = 0.000000/2467.002107 [km²]; <40 DBZ pixelek: 0/2481 db;
 2009.7.23. 15:00 UTC
 2010.6.12. 21:00 UTC
 2010.6.13. 21:00 UTC; 0/12 db ellipszis; T = 0.000000/283.000244 [km²]; <40 DBZ pixelek: 0/283 db;
 2010.6.14. 6:00 UTC; 11/94 db ellipszis; T = 223.000202/2359.002037 [km²]; <40 DBZ pixelek: 223/2359 db;

2010.8.13. 6:00 UTC; 0/59 db ellipszis; $T = 0.000000/709.000623$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 0/709 db;
 2010.8.13. 12:00 UTC; 0/22 db ellipszis; $T = 0.000000/157.000152$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 0/162 db;
 2010.8.13. 18:00 UTC; 0/142 db ellipszis; $T = 0.000000/2696.002292$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 0/2700 db;
 2010.8.13. 21:00 UTC; 73/133 db ellipszis; $T = 4510.003826/5853.005010$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 4510/5853 db;
 2010.8.14. 21:00 UTC; 0/23 db ellipszis; $T = 0.000000/327.000291$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 0/327 db;
 2010.8.15. 0:00 UTC; 0/13 db ellipszis; $T = 0.000000/293.000264$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 0/293 db;
 2010.8.15. 6:00 UTC; 2/12 db ellipszis; $T = 77.000071/239.000197$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 77/239 db;
 2010.8.15. 9:00 UTC; 7/18 db ellipszis; $T = 209.000162/1119.000952$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 213/1123 db;
 2010.8.15. 12:00 UTC; 1/35 db ellipszis; $T = 5.000004/1037.000890$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 5/1037 db;
 2010.8.16. 6:00 UTC; 0/15 db ellipszis; $T = 0.000000/109.000094$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 0/109 db;
 2010.8.16. 12:00 UTC; 1/66 db ellipszis; $T = 5.000005/1667.001394$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 5/1671 db;
 2010.8.16. 15:00 UTC; 27/157 db ellipszis; $T = 988.000840/5587.004688$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 988/5595 db;
 2011.7.10. 9:00 UTC
 2011.7.10. 18:00 UTC; 0/73 db ellipszis; $T = 0.000000/1122.000959$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 0/1122 db;
 2011.7.13. 18:00 UTC
 2011.7.19. 18:00 UTC; 0/94 db ellipszis; $T = 0.000000/1566.001289$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 0/1566 db;
 2011.8.23. 12:00 UTC
 2011.8.23. 15:00 UTC
 2011.8.23. 18:00 UTC; 3/3 db ellipszis; $T = 51.000031/51.000031$ [km²]; <40 DBZ pixelek: 51/51 db;
 2011.8.26. 9:00 UTC

7.ábra: CPinq output tornádós-szupercellás feltételkeretre, 2008-2011-ig

A kimenő adatokban megjelenik a megadott feltételkeret, majd a feltételek teljesülésének időpontjai, valamint az aktivált rácspontokhoz rendelt ellipszisek és az országszerte detektált ellipszisek szerint elválasztva az ellipszisszám, az ellipszisek összterülete, valamint a 40 DBz-nél nagyobb reflektivitású pixelek száma. Az általunk választott időpont kézzel jelenik meg. Ezen az időpontra kívül a 2008.7.13 1500 UTC, 2010.6.14 0600 UTC, valamint 2010.8.13 2100 UTC-kor jelenik meg szignifikánsnak mondható ellipszisszám az aktivált rácspontok közelében, s látható, hogy azok összterülete az ország teljes területén detektált ellipszisekéhez képest azok jelentős hányadát adja.

Majd, most már a kiválasztott időpontra, a 0 km és 6 km közötti szélnyírást tekintjük részletesebben. Az ajánlások szerint amikor a 0-6 km-es szélnyírás nagyobb, mint 20 m/s, döntően szupercellás zivatarok fordulnak elő. Lássuk a program kimenő adatait:

9. ábra CPing output $MLCAPE > 1250 \text{ J/kg}$ -ra, 2010.08.16 1500 UTC

```

000000000000000000000000000000000000000000000000000
000000000000000000000000000000000000000000000000000
0000000000000000000000000000VVVVV000000000000000000
000000000000000000000001111VVxVxVxxx0000000000000000
0000000001110000011111111VVxxxVxxxxx0000000000000000
000000011111111111111111VVVxxxVxx000000000000000000
000000011111111111111111VxVxxx0000000000000000000000
000000011111111111111111VVxxx0000000000000000000000
0000001111111111111111V111VVVxx0000000000000000000000
0000001111111111111111Vx111Vxxx0000000000000000000000
00000001111111111111111xxx00000000000000000000000000
000000000111111111111111x0000000000000000000000000000
00000000001111111110000000000000000000000000000000000
000000000000111100000000000000000000000000000000000000
00000000000000000000000000000000000000000000000000000
00000000000000000000000000000000000000000000000000000

```

Mivel az EHI a CAPE-pel és a helikalitással arányos mennyiség, nem meglepő, hogy ahol a CAPE értékek sem haladják meg a fent megadott értékeket, ott az EHI sem lesz

jelentős. Viszont az EHI igen nagy területen haladja meg a szignifikánsnak mondható 0,5-ös értéket.

Végző lépésként vegyük az eddig vizsgált paramétereket, valamint a 0-1 km-es szélnyírást 6 m/s fölötti értékekkel, az alsó 3 km CAPE értékét 80 J/kg fölött (az alacsony szinteken jelenlévő labilitás figyelembevételére), és a 0-6 km-es szélnyírássra enyhébb, 15 m/s-os alsó határt adva. A fent megadott keretek között, az eddig említett kutatások eredményei alapján ha egy rácspontra aktiválódik, ott nagy esélye van annak, hogy tornádó is előforduljon.

2010.8.16 15:00 UTC

(48.50, 21.25);cellnum: 1 → Hidasnémeti
(48.25, 21.50);cellnum: 0
(48.00, 21.25);cellnum: 0
(47.75, 20.50);cellnum: 5 → Mezőkövesd
(47.75, 21.25);cellnum: 0
(47.75, 21.50);cellnum: 0
(47.50, 21.25);cellnum: 1
(47.50, 21.50);cellnum: 0
(47.25, 21.00);cellnum: 4
(47.00, 21.00);cellnum: 1

[illegible]

11.ábra CPing output kombinált feltételrendszerre, 2010.08.16 1500 UTC. Az ábrán pirossal vannak jelölve a Mezőkövesddel és Hidasnémetivel azonosított, aktivált ráncpontok.

Az ábrán jól láthatóan ez a feltételkeret már jóval kevesebb rácsponton aktiválódik, viszont ahol a feltételek teljesülnek, az analízist követő egy órában azok túlnyomó többségén

szupercella, ill. tornádó haladt át. Az analízisben tornádó képződésére igen kedvező környezetként jelennek mind a Mezőkövesdhez, mind a Hidasnémetihez rendelt rácspontok feletti légoszlopok (piros). A mezőkövesdi tornádót dokumentálók a tornádó megjelenésének idejét ~ 15 -16 UTC-re tették, így az analízis és radarkép vizsgálata szempontjából ez az időpont különösen szerencsés.

2.1.3 A statisztikai vizsgálatok metodikája

Első lépésként Énekes, Fodor (2010) diplomamunkában elvégzett kutatását vesszük alapul, a kapott eredmények összehasonlíthatósága végett. A diplomamunkában $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ -os felbontású GFS mezőkből számoltak ki konvektív paramétereket, és vetették őket össze radaradatokkal a 2009-es év zivatarszezonjából. Az általuk megadott hevességi kritérium az adott időablakon belül detektált ellipszisszámokat veszi alapul - feltéve, hogy a nagyobb ellipszisszámok nagyobb konvektív aktivitásra utalnak.

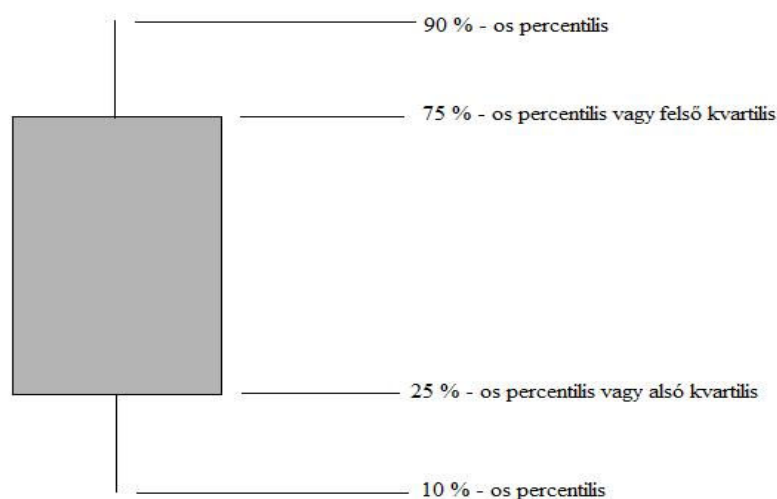
Esetszám [db]	Kategória leírása	Kategória neve
494737	Stabilis helyzet (MLCAPE=0 J/kg)	0 (stabilis)
322364	Labilis helyzet (MLCAPE>0 J/kg) és nincs zivatar-ellipszis	0 (labilis)
7739	1 db zivatar-ellipszis van jelen	1
7368	A zivatar-ellipszisek száma 2 és 5 között változik	2-5
551	A zivatar-ellipszisek száma 6 és 10 között változik	6-10
39	A zivatar-ellipszisek száma 10 felett van	10+

1. táblázat: A vizsgálat során alkalmazott kategóriák neve, leírása és az esetek száma (Énekes, Fodor (2010) nyomán)

Az általunk elvégzett vizsgálatok a 2008-2011-es periódust ölelik fel, $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ -os felbontású ECMWF mezőkből készültek, és a cella rácsponthoz való rendelésének algoritmus is különbözik. Vizsgálatunkban az ellipszis középpontja a rácspont $0,25^\circ$ -os környezetében kellett, hogy legyen ahhoz, hogy egy adott rácsponthoz legyen rendelhető. Ez a megközelítés jól példázza azt, hogy az adatbázis statisztikai számosságának megtartásának irányából megközelítve a problémát a rácspontok zivatarokra való reprezentativitása sok esetben minimális lehet csak. A kapcsolatok korrektebb feltárására konkrét eseteket kell majd megvizsgálnunk, most azonban az adatbázis pusztá méreteinek előnyére támaszkodva

eltekintünk a szigorú, jobb reprezentativitást megkövetelő kritériumoktól, de az eredményeket épp ezért megfelelő kritikussággal szemléljük.

Vizsgálatunk során 46 paraméterre gyártottunk hagyományos box-whisker diagramokat, szimmetrikus ($\pm 1,5$ órás) időablakra, valamint asszimmetrikus ($-1, +2$ órás) időablakra. A fent felsorolt kategóriák jogosságának vizsgálatára pedig darabonként elkülönítettük az egyes esetszámokat. Az esetek többségében az 1. táblázatban bemutatott kategóriák jónak bizonyultak, ám szükség szerint részletesebb ábrákat is bemutatjuk majd. Ezzel a módszerrel 184 box-whisker diagramos ábrát nyertünk, melyből a teljesség igénye nélkül a legfontosabbakat mutatjuk be most. Megjegyezzük, hogy a 0 (stabilis) és 0 (labilis) kategória elkülönítésére azért van szükség, mert ha $MLCAPE = 0 \text{ J/kg}$, az esetek elenyésző hányadában lesz a CAPE értéke nagyobb mint 0, így vehetjük a légkör stabilitási feltételének, s ezzel egy finomabb szerkezetét adtuk meg a 0-ás eseteknek, valamint a nemzetközi szakirodalomban bemutatott módszerekkel is konzisztens módon kezeljük őket.



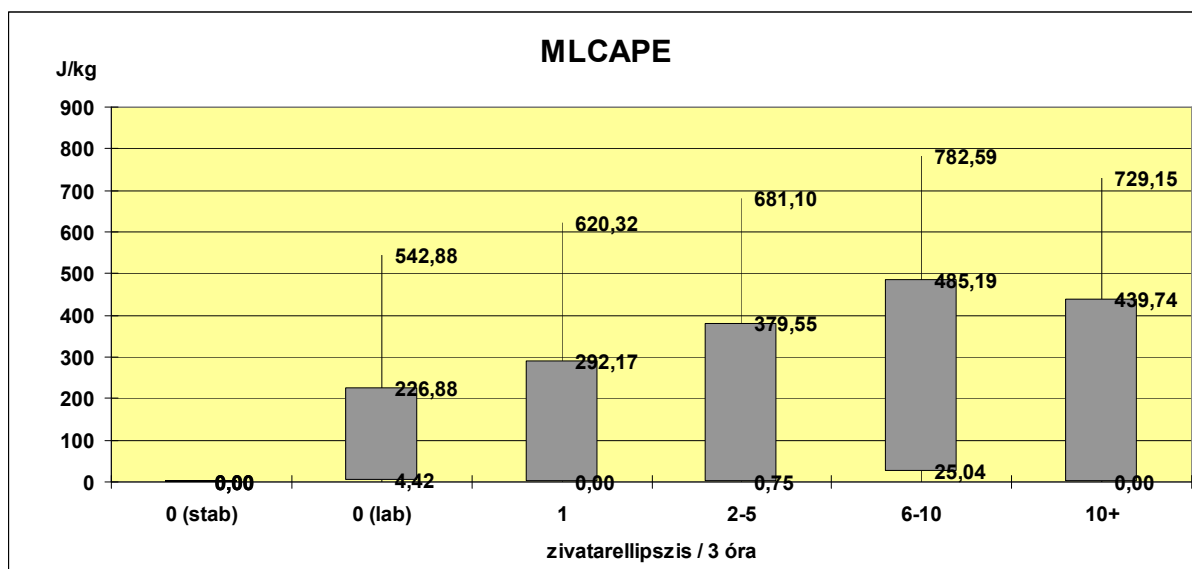
12. ábra: a box-whisker diagramok általános felépítése (az ábra forrása: Énekes, Fodor (2010))

A box-whisker diagramon látható percentilis értékek azt jelölik, hogy az sorba rendezett adatok hány százaléka kisebb az éppen aktuális percentilisének. A 25 %-os percentilist alsó kvartilisnek, a 75%-os percentilist felső kvartilisnek nevezik, míg az 50 %-os kvartilis pedig az adatsor mediánja.

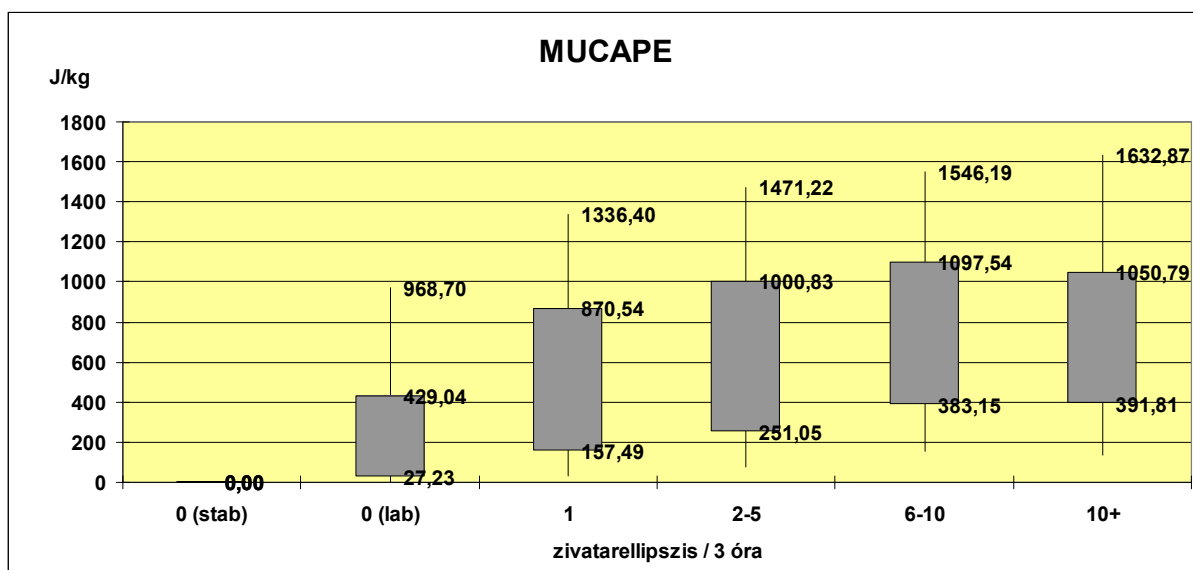
2.2.1 Eredmények - egy változóra

A szimmetrikus időablak melletti futtatásból nyert eredményeinket a témában megszokott módon a lent látható kategóriákba soroljuk. Az ábrázolás során a legtöbb esetben elhagytuk a 10 %-os percentilis értékeit a zsúfolt ábrák elkerülése végett. Előre felhívjuk a figyelmet arra, hogy a nullás esetek nagy száma miatt sokszor előfordul fedés más hevedési kategóriákkal – ezek az esetek az előforduló értékek jelentős részét fedik le, anélkül, hogy hevesebb esemény fordult volna elő. Ugyancsak problémát okozhat a 10+ esetek kis száma – ennek az adathalmaznak a számossága már nem elegendő ahhoz, hogy messzemenő következtetéseket vonhassunk le a kapott eredményekből, s az inkonzisztencia az előző kategóriák tendenciáival sokszor megfigyelhető. Az Énekes, Fodor (2010) diplomamunkában bemutatott esetszámoktól való nyilvánvaló eltérés abból adódik, hogy bár három éves periódust vizsgálunk, az esetek hozzárendelése több rácspont szűkebb környezetéből származik, így a 6-10, ill. a 10+ esetek jóval ritkábban fordulnak elő (a megközelítés logikáját követve ugyanakkor hevesebb eseményeket kell indikálniuk).

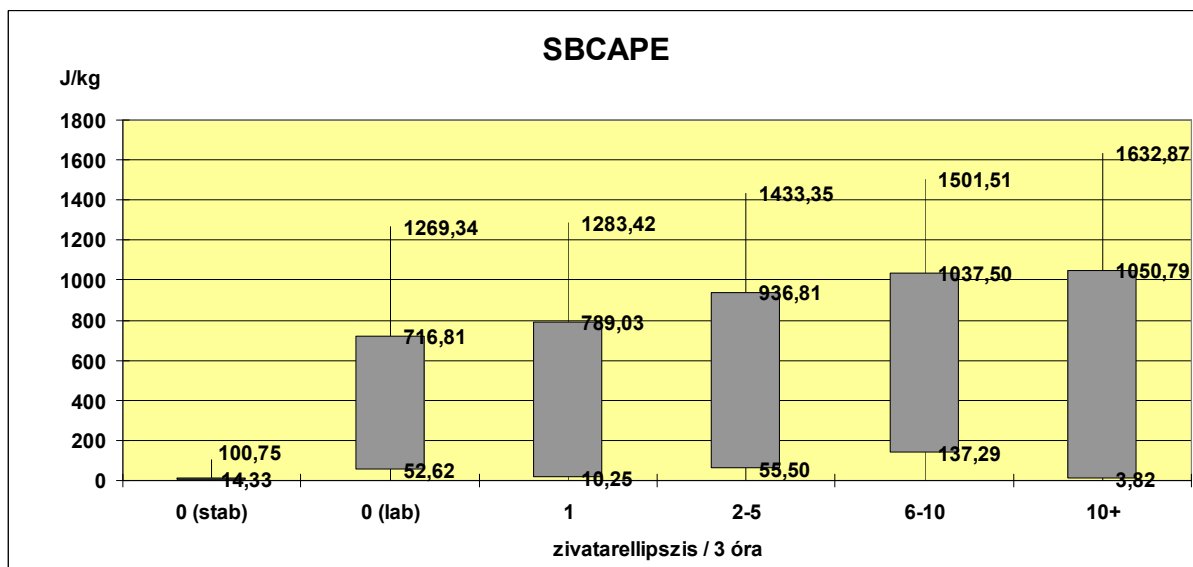
2.2.1.1 Labilitáshoz és alacsony szintű termodinamikához köthető paraméterek.



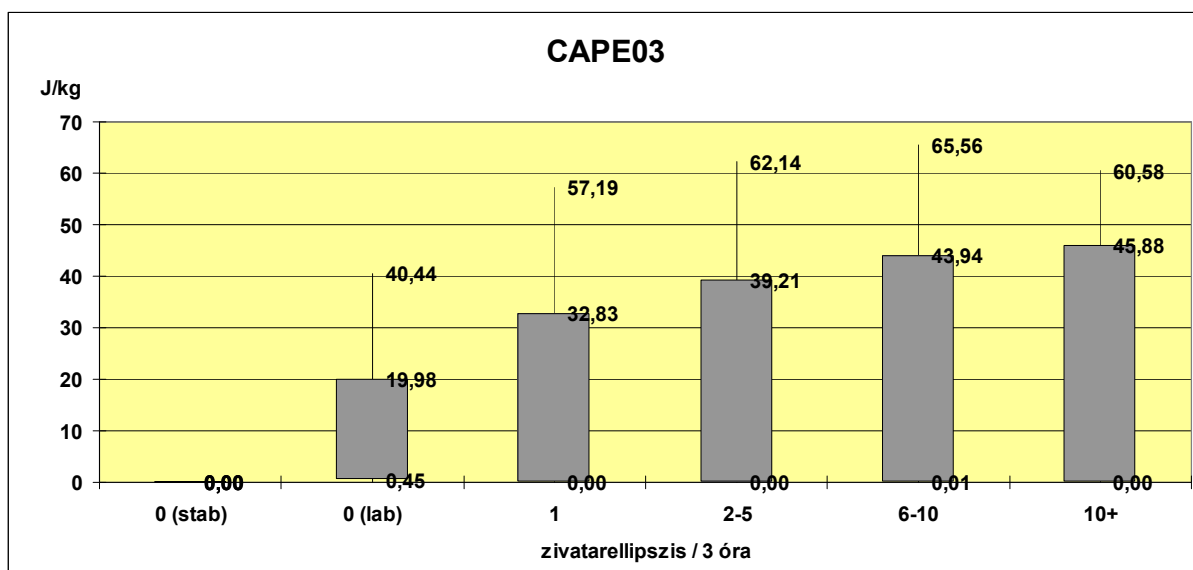
2. Táblázat: az MLCAPE box-whisker diagramja



3. Táblázat: a MUCAPE box-whisker diagramja



4. táblázat: az SBCAPE box-whisker diagramja



5. táblázat: a 0-3 km között integrált CAPE box-whisker diagramja

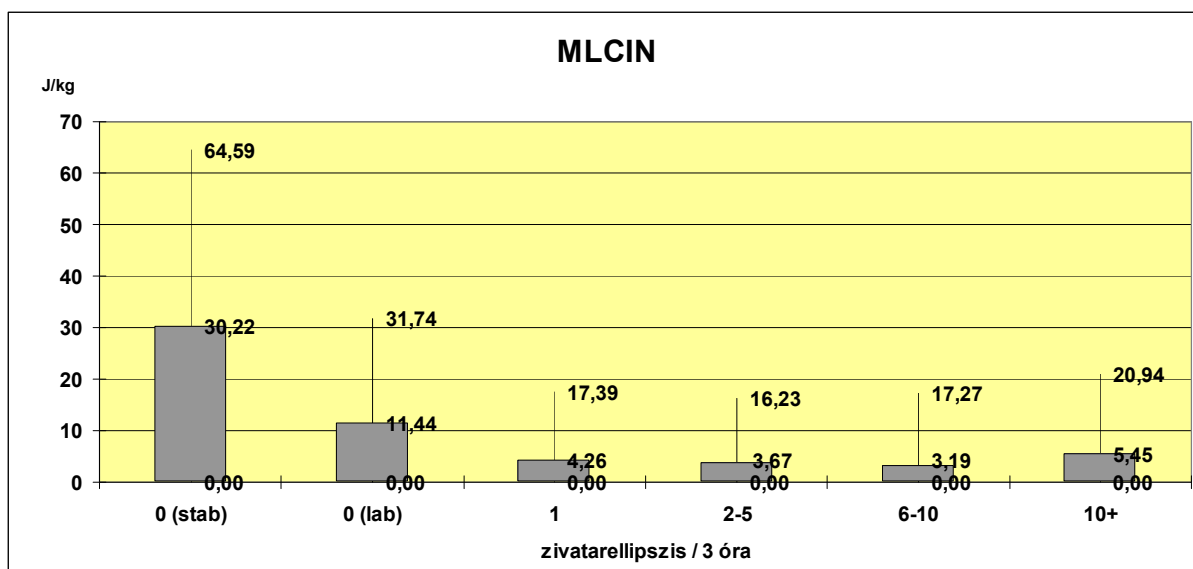
A 2-5-ik ábrákon a konvektív hasznosítható potenciális energia különböző változatainak box-whisker diagramjait láthatjuk. Az SBCAPE-et, azaz a felhasználható konvektív potenciális energiának felszínétől számított alakját a következőképp számoljuk:

$$SBCAPE = -R_d \int_{p_1}^{p_2} (T_{v1} - T_{v2}) d \ln p$$

Ahol R_d az száraz levegő gázállandója, T_{v1} az emelkedő légelem virtuális hőmérséklete és T_{v2} a környezet virtuális hőmérséklete adott nyomási szinten. Az integrálási út során azokat a területeket összegezzük fel, amelyekre igaz, hogy $T_{v1} > T_{v2}$. A felszíntől való származtatás azt jelenti, hogy a részecske módszer alapján a részecskét a felszínről indítva száraz adiabatán jutunk el az LCL szintjéig, majd onnan nedves adiabatán az egyensúly szintjéig (EL, equilibrium level). Az integrálás alsó és felső határai tehát $p_{\text{felszín}}$ és p_{el} . A kevert, azaz (mixed layer) MLCAPE az alsó 100 hPa-os légréteg átlagos potenciális hőmérsékletéből és átlagnedvességéből számolt CAPE. A módszerrel a határréteg nappali átkeveredésének folyamatait szokás figyelembe venni. A leglabilisabb CAPE, azaz (most unstable) MUCAPE egy bizonyos nyomási szint alatt az összes rendelkezésre álló szintről elindított részecskék CAPE értékei közül a legnagyobb. Legtöbbször az emelt konvekció esélyét szokás megbecsülni ezzel a paraméterrel. A 0-3 km között integrált CAPE a legalsó légréteg feláramlási viszonyait vizsgálja.

Mind a négy ábrán jól látható tendencia mutatkozik a nagyobb ellipszisszám - nagyobb CAPE értékek irányába, ám rámutat arra is, hogy (szituációtól függően) alacsony

CAPE értékek is generálhatnak zivataros helyzeteket, tehát a CAPE önmagában valóban nem elég jó szeparátor az egyes kategóriák között. Viszont a 0 és >0 labilis zivatarellipszises esetek között a legtöbbször több kvartilisnyi eltérések is láthatók.

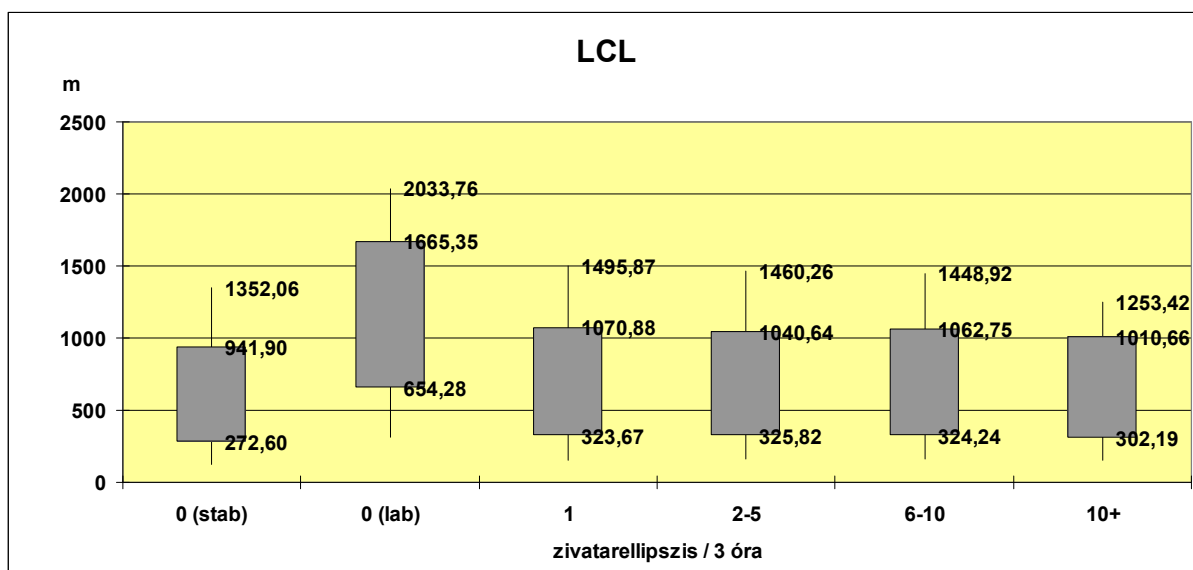


6. táblázat: az MLCIN box-whisker diagramja

Az MLCIN számítása (az MLCAPE-hez hasonlóan) az alsó 100 hPa- légréteg átlagos értékeinek figyelembevételével történik.

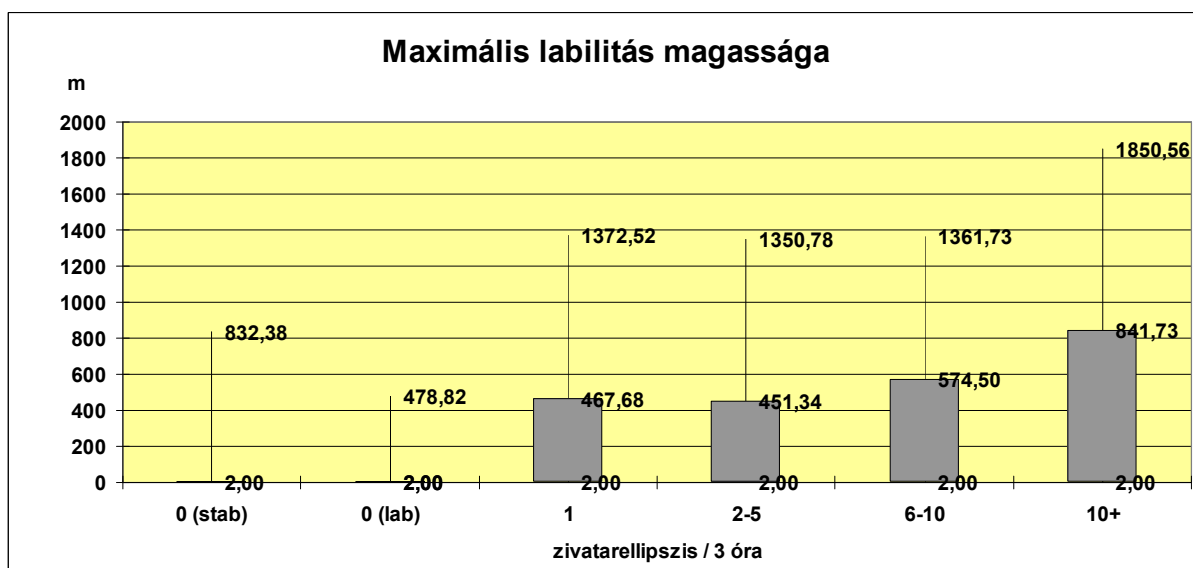
$$CIN = R_d \int_{SFC}^{LFC} (T_{v1} - T_{v2}) d \ln p$$

A CIN (Convective Inhibition - konvektív tiltás) azon területek összege, melyeknél $T_{v2} < T_{v1}$, azaz az emelkedő részecskére negatív irányú felhajtóerő hat, gátolva a konvekció létrejöttét, fejlődését. Jól látható, hogy a stabilis esetekben az emelkedő légtömegeknek jóval nagyobb konvektív tiltást kell leküzdeniük, mint labilis szituációkban, s jól elkülönülnek a 0 és a >0 zivatarellipszises helyzetek is.



7. táblázat: az emelési kondenzációs szint (LCL) box-whisker diagramja

Az emelési kondenzációs szint az a szint, ahol a száraz adiabatikusan emelkedő légréteg telítétté válik s megkezdődik a kicsapódás. Az ábrán az elvárások szerint megfigyelhető az, hogy (a 0 (lab) és a >0 lab eseteket összevetve) jól elkülönül a zivataros és nem zivataros helyzeteknél megfigyelhető felhőalap. A leglabilisabb helyzeteknél a felhőalapok 90%-a 1250 m alatt található, szemben a többi szituációra jellemző ~1450 m-nél.

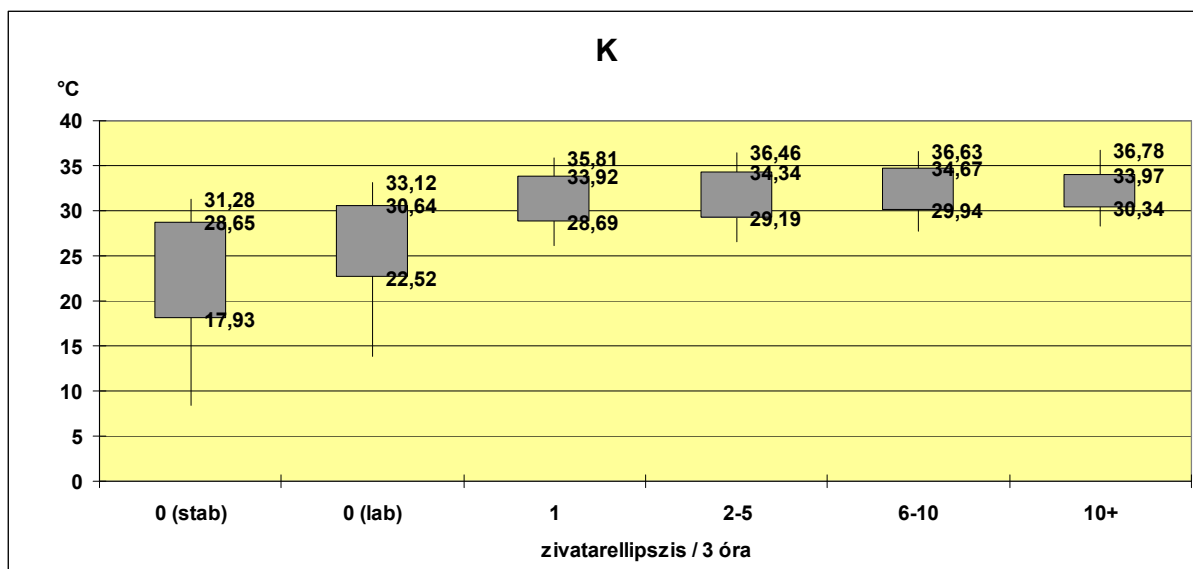


8. táblázat: a maximális labilitás magasságának box-whisker diagramja

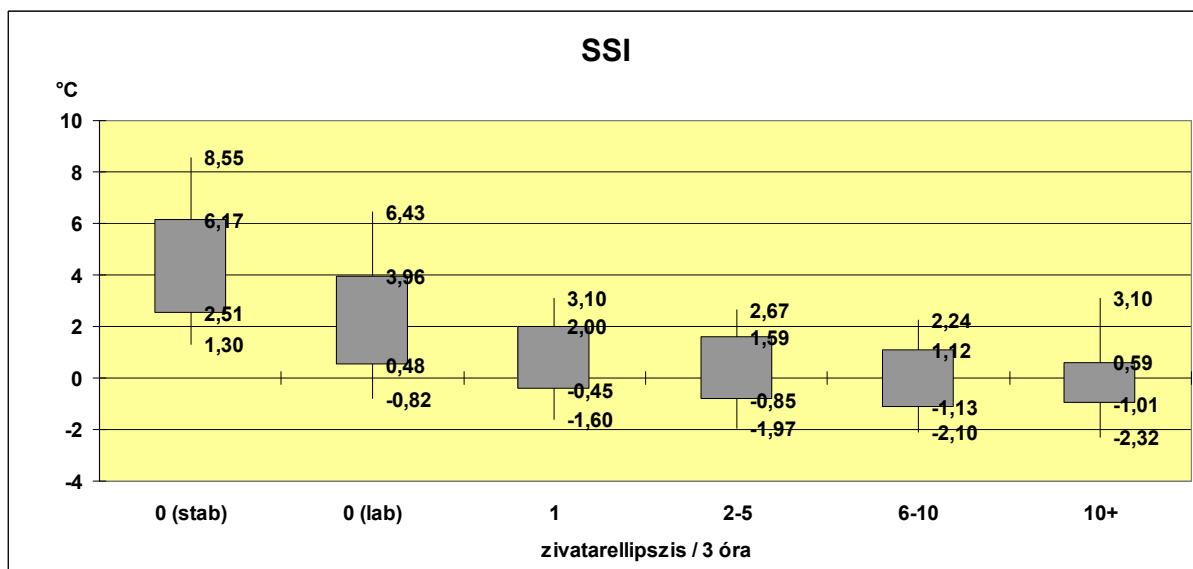
A maximális labilitás magassága az adott MUCAPE értékhez rendelt nyomási szint magassága. Látható az ábrán, hogy az egyre zivatarosabb helyzetekhez egyre magasabb MUCAPE magassági szintek tartoznak, melyek utalhatnak emelt konvekciós szituációk

meglétére az adatbázisban, bár az egyedül fent elmondottak nem szükséges és elégséges feltételei az emelt konvekciós esetek egyértelmű meghatározásának.

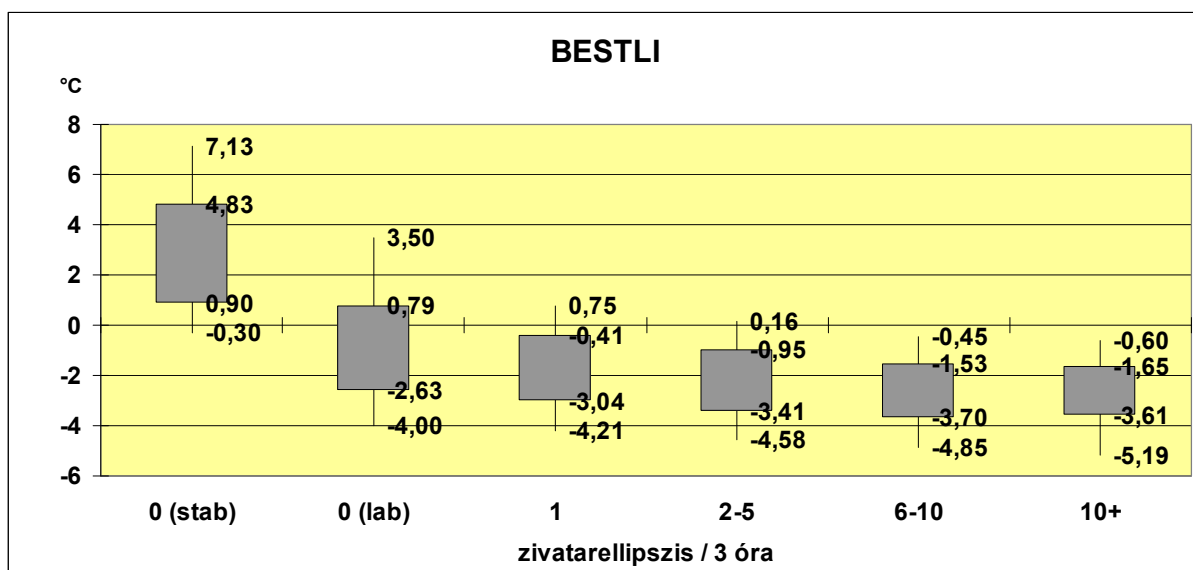
2.2.1.2 Labilitási indexek



9. táblázat: A K-index box-whisker diagramja



10. táblázat: A Showalter - féle stabilitási index (SSI) box-whisker diagramja



11. táblázat: A Best Lifted Index (BESTLI) box-whisker diagramja

Az SSI és a BESTLI index számítása a következő módon történik:

$$LI = T_{500} - T_{a500}$$

$$SSI = T_{500} - T_{p500}$$

A két index között a különbség az, hogy a Showalter index esetén a légrészünket a 850 hPa-os nyomási szintről száraz adiabatikusan idítva juttatjuk el az LCL-ig, majd onnan nedves adiabatikusan 500hPa-ig, míg az LI ugyanezt a talajról teszi meg. A BESTLI ettől abban különbözik, hogy (esetünkben) az 1500 m alatt minden szintről elindított részecskék közül a legalacsonyabb LI értéket kiválasztva kapjuk meg a BESTLI értékét.

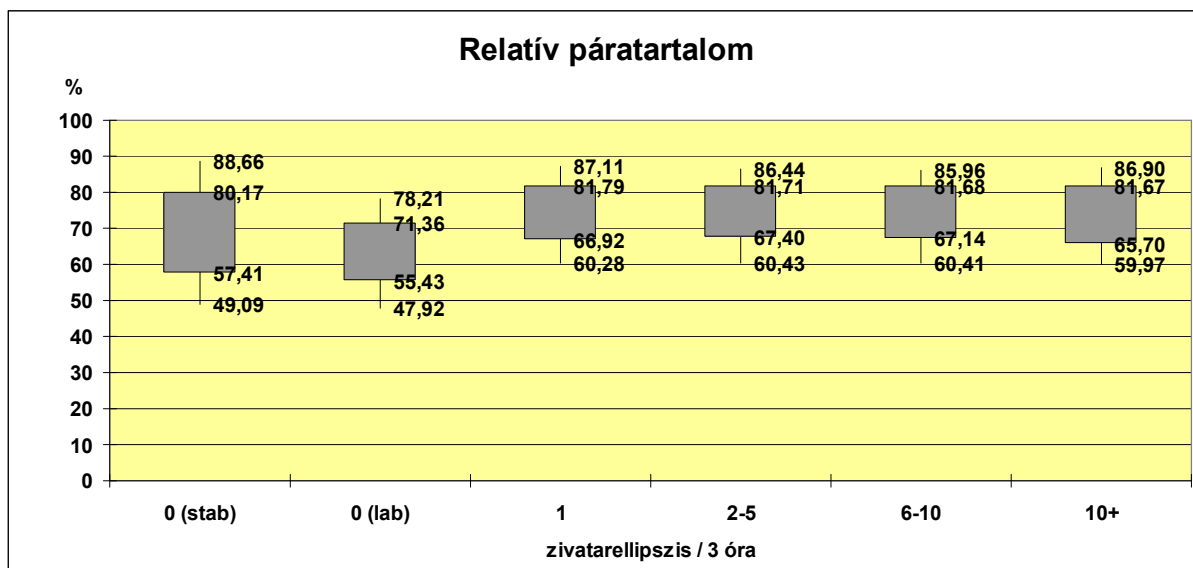
A K-index számítása a

$$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700})$$

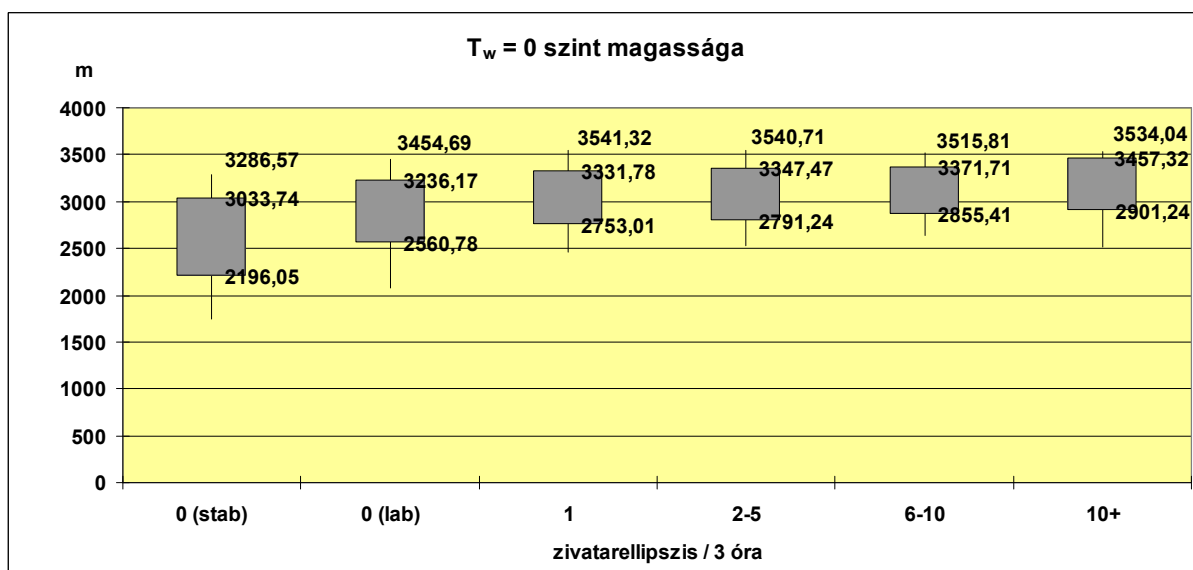
képlettel történik. A K-index koncepciójában többek között a közepes szinteken történő bekeveredést is igyekszik figyelembe venni.

Eredményeinkben minden esetben jól elkülönülnek a zivataros helyzetek a nem zivatarosoktól s az SSI és a BESTLI esetén még egy észrevehető tendenciát is láthatunk a nagyobb ellipszisszámú esetek irányába. A leglabilisabb esetek -1 és -4 °C-os BESTLI valamint -1 és 1 °C-os SSI értékek mellett fordultak elő. A K index esetén is jól elkülönülnek a zivataros-nem zivataros esetek, s az esetek nagy többsége a 30-34 °C-os intervallumba látszik szűkülni.

2.2.1.3 Kinematikai, dinamikai és nedvességhez köthető paraméterek

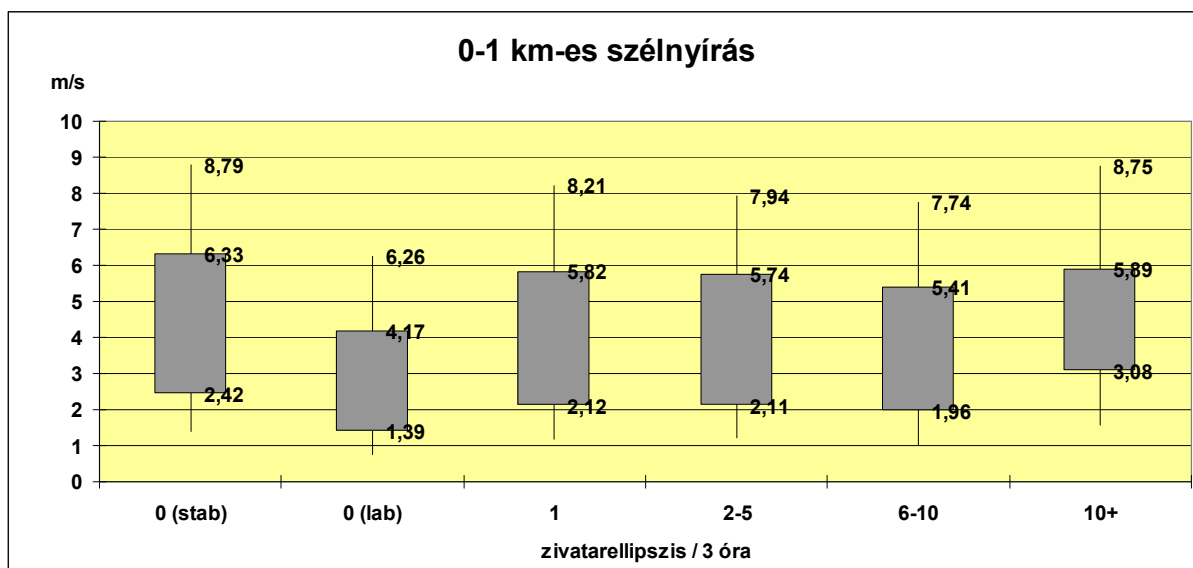


12. táblázat: az alsó 3 km átlagos relatív páratartalmának box-whisker diagramja

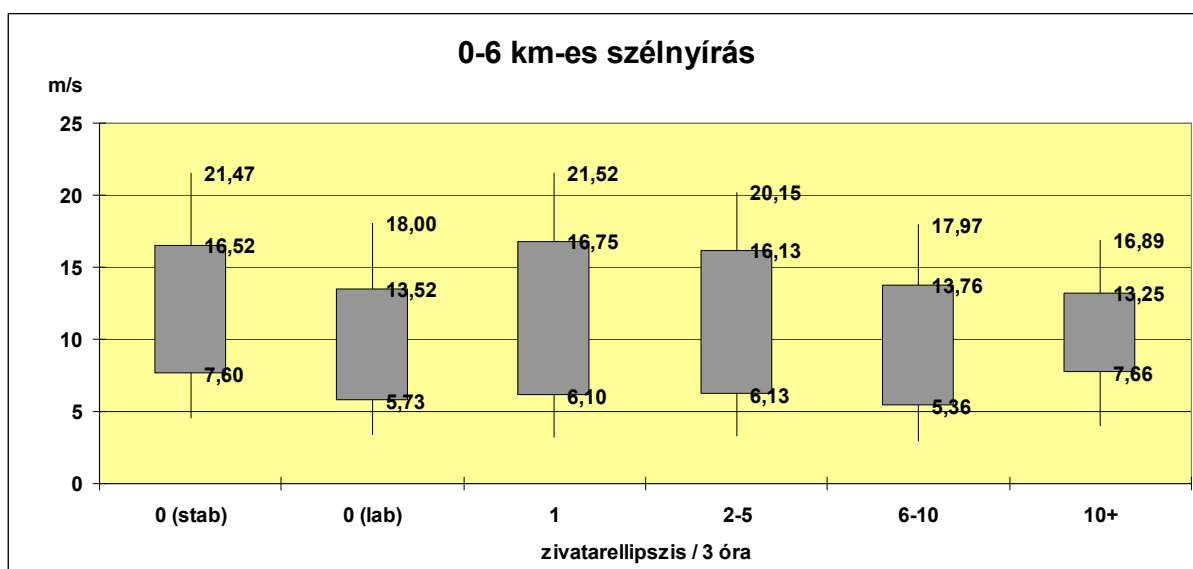


13. táblázat: a nedves hőmérséklet 0°C -os izotermájának magassága

Az alsó 3 km átlagos relatív páratartalma esetén az egyes zivataros kategóriák nem különülnek el markánsan, de jól láthatóan elválnak a nem zivataros szituációktól. A zivataros esetek 75%-a 66 %-os relatív nedvesség fölött jelenik meg, viszont 90%-uk esetén a relatív nedvesség nem nagyobb 87%-nál. A 0°C -os nedves hőmérsékleti izoterma a jégeső egzisztenciájának előrejelzésében használatos. Az egyre intenzívebb eseteknél jól láthatóan magasabban van az izoterma is.



14. táblázat a 0 km és 1 km között vett szélnyírás abszolútértékének box-whisker diagramja



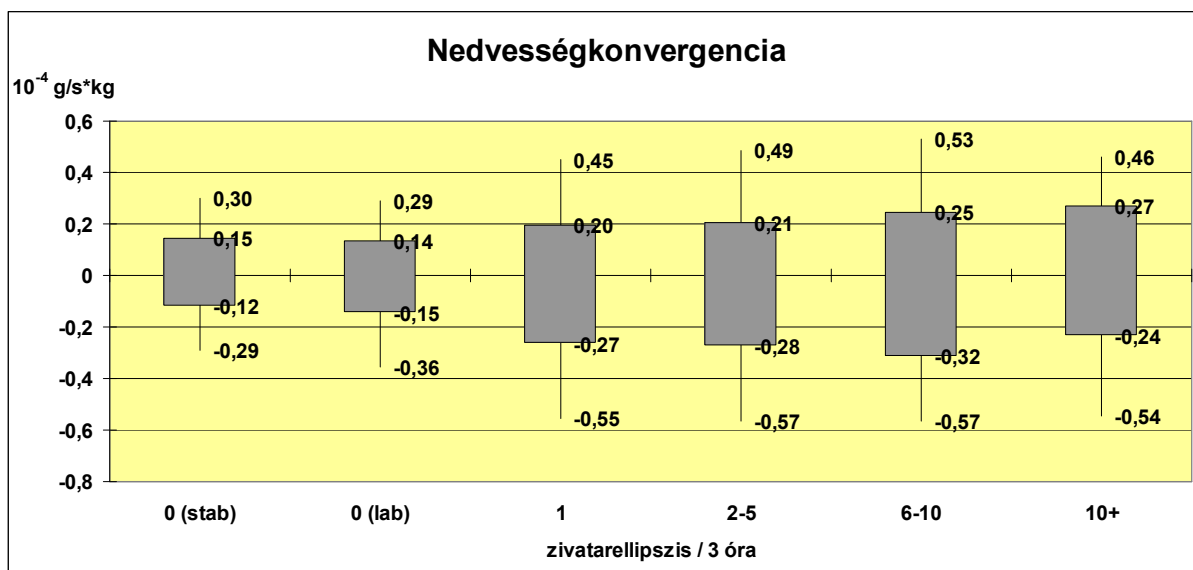
15. táblázat: a 0 km és 6 km között vett szélnyírás abszolútértékének box-whisker diagramja

A 0-1 km-es szélnyírásvektorának abszolútértékét általában a középszintű rotációval kapcsolatos jelenségek becslésére, míg a 0-6 km-es szélnyírást a konvekció szerveződésének előrejelzésére szokás használni. A 0-1 km-es szélnyírás esetén az esetek nagy többsége 2 m/s és 6 m/s között mozog, míg a 0-6 km-es szélnyírás esetén 6 m/s és ~ 16 m/s között mozog, mely a nemzetközi szakirodalom szerint magába foglalja az erős evolúciós multicellás kategória felső felét és a gyenge evolúciós, hibrid supercellás-multicellás zivatarok kategóriáját. Megemlítjük még azt is, hogy a 0-6 km-es átlagos szélvektor u és v

komponensének vizsgálatából az adódott, hogy az intenzívebb zivataros helyzetek túlnyomó többsége délies, délnyugatias áramlásban jelent meg, mely arra utalhat, hogy intenzív zivatartevékenység általában a nyitott MNSZ (meleg, nedves szállítószalag) jelenlétében alakul ki.

0-6 km-es szélgyírás	Zivatar típus
~ 0 m/s	Döntően egycellás zivatarok
2-10 m/s	Multicellás zivatarok - inkább erős evolúciók
10-15 m/s	Multicellás zivatarok – egyre inkább gyenge evolúciók, hibrid szupercellás-multicellás zivatarok
15-20 m/s	Multicellás, szupercellás zivatarok
>20 m/s	Döntően szupercellás zivatarok

16. táblázat: a 0-6km-es szélgyírás és a zivatartípusok viszonya, forrás: Csirmaz (2012)



17. táblázat a nedvességkonvergencia box-whisker diagramja

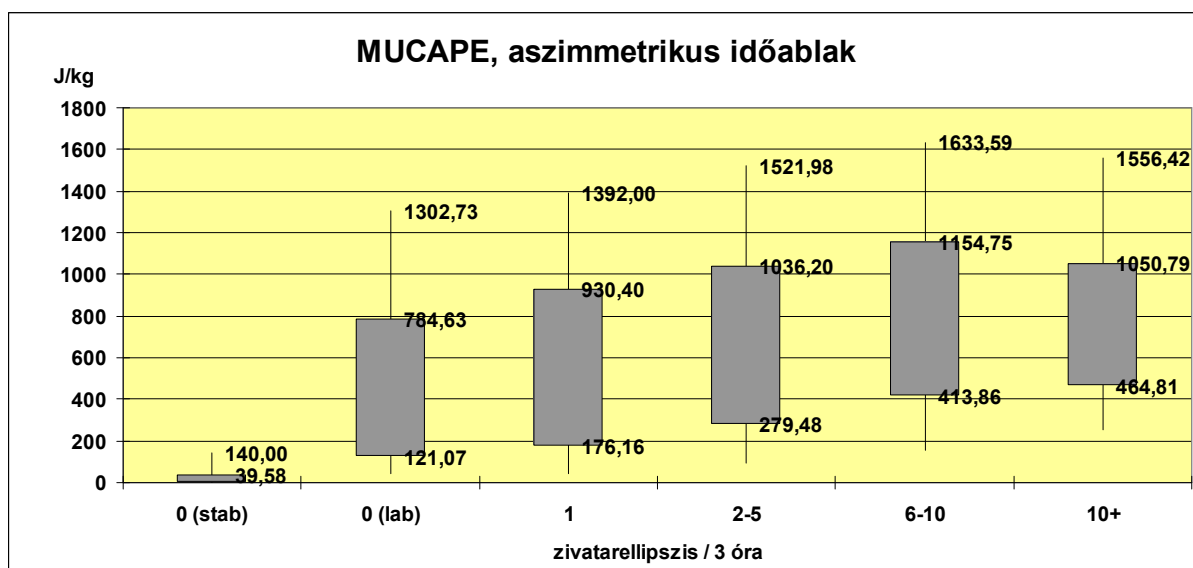
Az általunk vizsgált paraméterek közül az egyetlen dinamikai paraméter a nedvességkonvergencia, melyet az alábbi képlettel számolunk:

$$div_q = \nabla(q \cdot \vec{v})$$

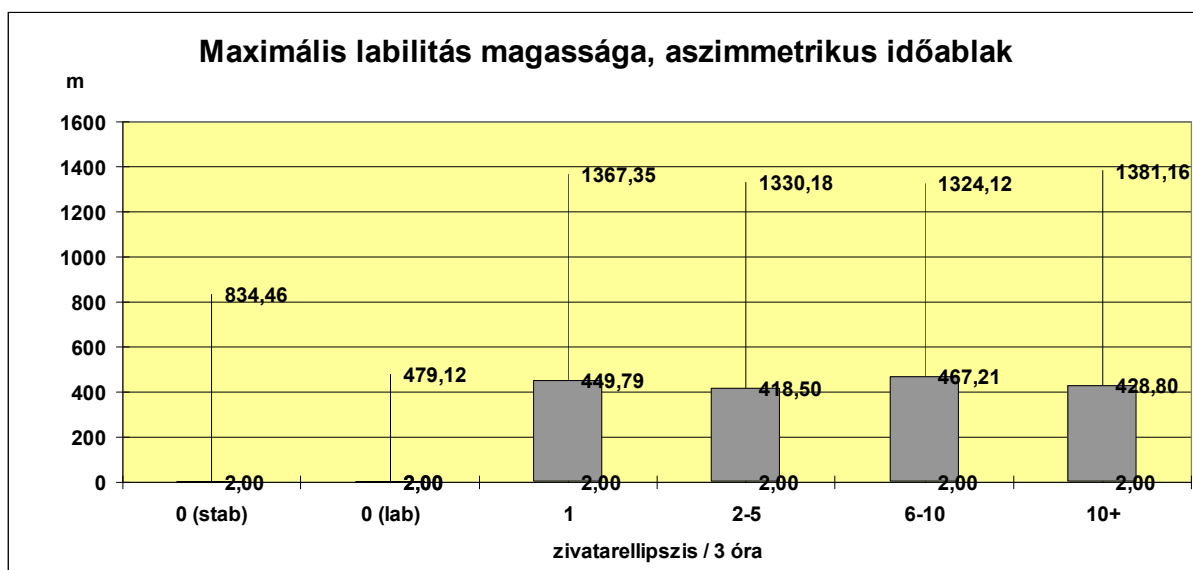
A fentiek alapján látható, hogy a fentiek alapján zivataros helyzetek előfordulnak konvergens és divergens mezőkben is (ha az eddigi logikánkat követjük), s az egyetlen látható tendencia az abszolútérték növekedése a számegetes mindkét irányába.

2.2.1.4 Aszimmetrikus időablakok

Az aszimmetrikus időablakokra (-1,+2 óra) elvégzett vizsgálatok azért fontosak, mert a megfelelő háttérparaméterek az analízisben inkább a vizsgált esemény előtt, illetve annak idején jelennek meg, mintsem utána, így érdemes további időpontokra is reprezentatívnak tekinteni az adott analízist/mérést, hiszen előfordul az olyan eset, amikor az adott rácspontra jellemző állapot tovább lesz reprezentatív a mérés után, mint a analízis/mérés előtt, vagy fordítva, az aktuális időjárási helyzet függvényében. Az aszimmetrikus időablakok bevezetésével a konvektív paraméterek érzékenységét vizsgálhatjuk az ilyen helyzetekre. Az esetek legnagyobb többségében jó volt az egyezés a szimmetrikus és aszimmetrikus időablakok között, ám akadtak eltérések is. Az utóbbiak közül mutatunk be néhányat:



18. táblázat: aszimmetrikus időablak mellett számolt MUCAPE. A 3.ábrával összevetve markáns eltérés látható, különösen a 0 (lab) kategória esetén.



19. táblázat: a maximális labilitás magassága, aszimmetrikus időablak mellett. A 8. ábrában látottakkal ellentétben a nagyobb ellipszisszám felé haladva csökkenő tendenciát figyelhetünk meg a maximális labilitás magasságában.

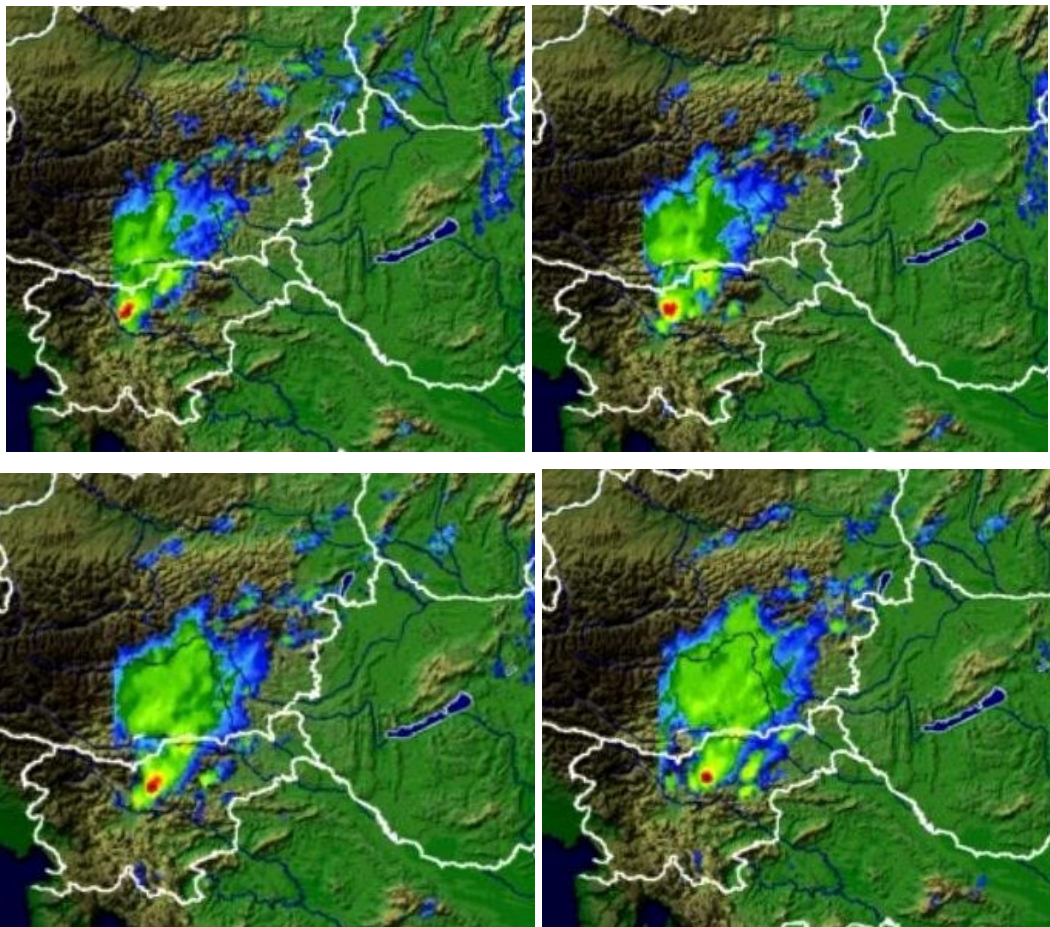
Az esetek nagy többségében nem figyelhető meg szignifikáns különbség a két időablak között, ám a fent bemutatottak rávilágítanak: fennáll a veszélye annak, hogy kvartilisnyi különbségek és jelentős tendenciabeli változások is mutatkozhatnak, ha más időintervallumot tekintünk reprezentatívnak a konvektív eseményekre.

2.2.2 Eredmények - több változóra

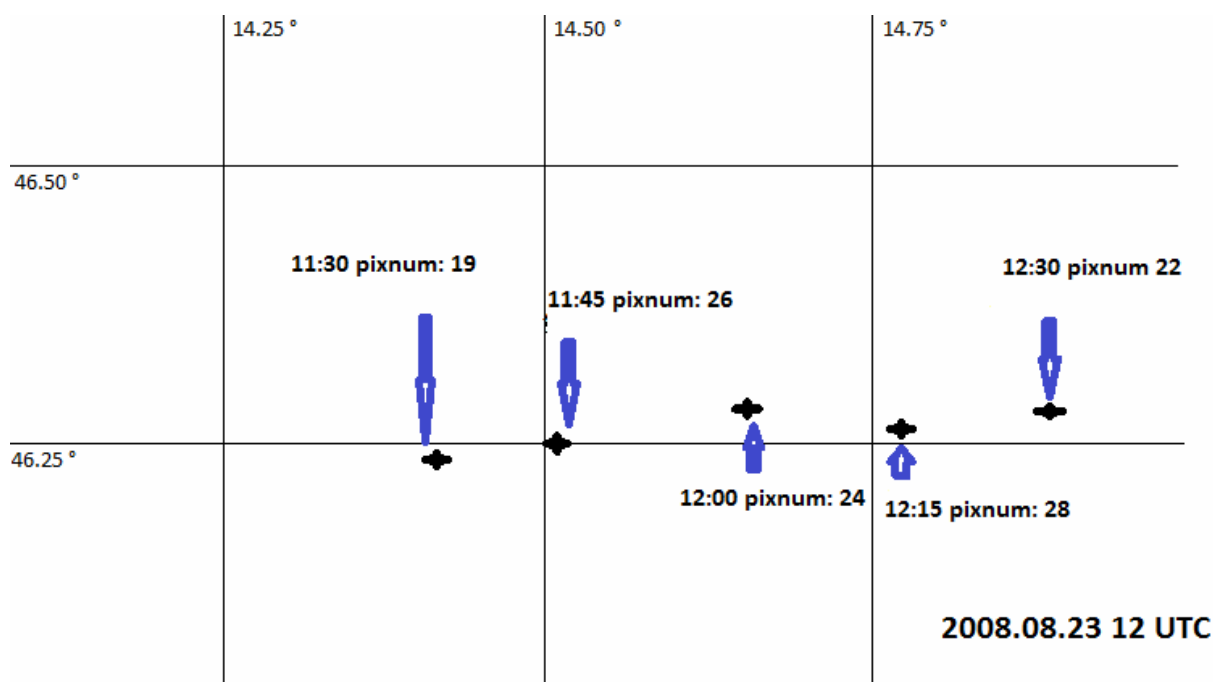
A fenti vizsgálat eredményeiben nagy szerepet játszik az a tény, hogy az egyes kategóriák az előforduló szituációk széles skáláját tartalmazzák magukban, s egy adott paraméter értéke mellett a többi paraméter sok másikat felvehet, az időjárási helyzettől függően. Ennek szűrésére vizsgálunk több paramétert egyszerre az ellipszisszám függvényében. Az ellipszisszám az ilyen típusú vizsgálatoknál ugyanakkor nem jellemzi kielégítő módon a konvektív események hevedését, így ahelyett az ellipszisszámot a detektált ellipszisek területén belül 40 dbZ-nél nagyobb értéket felvető pixelek számával súlyoztuk. Az így definiált TotRefl értéket tehát a következőképp számoljuk:

$$TotRefl = esetszám \times [40dbZ\text{-nél nagyobb reflektivitású pixelek száma}]$$

Az eredmények bemutatása előtt ugyanakkor tekintsünk egy gyors számítást, amely a több változóra kapott eredmények megértését segíti! Egy 2008.08.23 - 12 UTC-s esetet veszünk alapul.



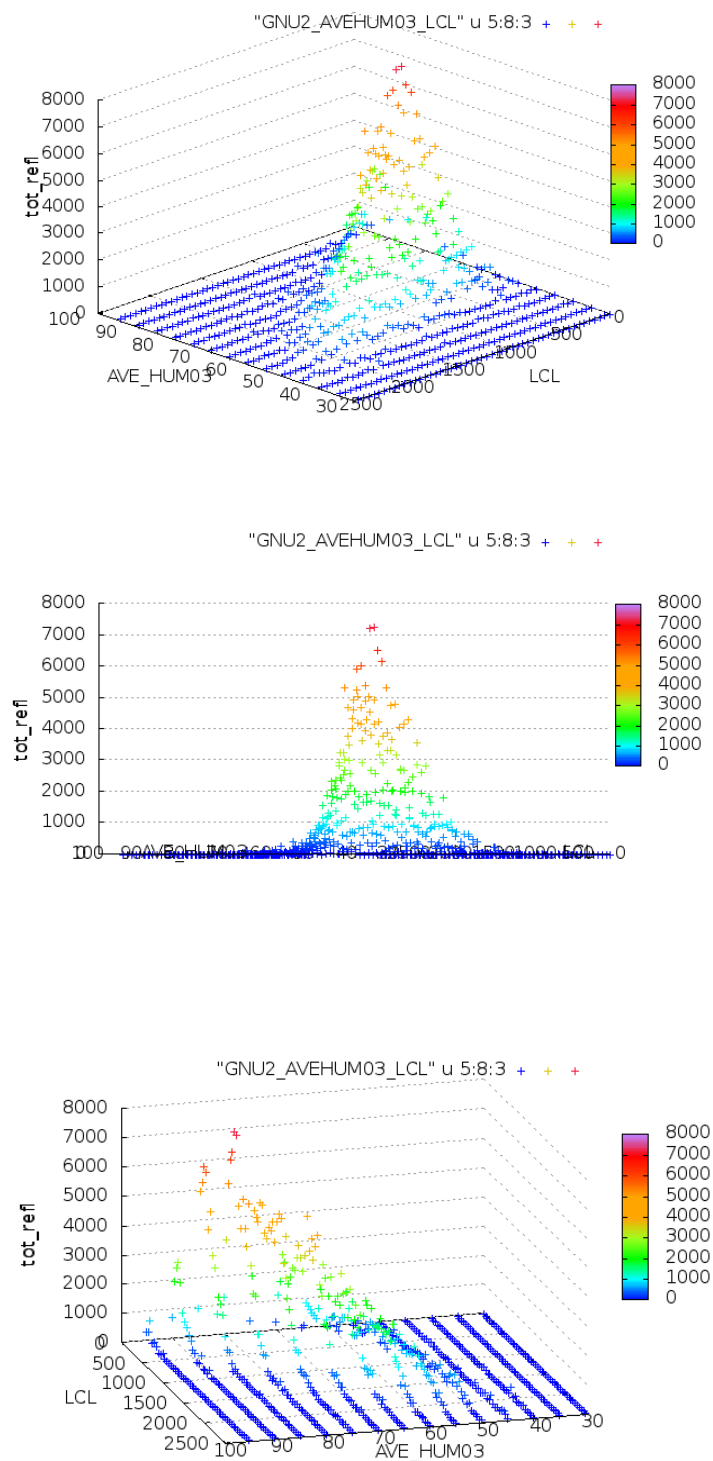
13.ábra: 2008 augusztus 23-ai 1200 UTC-s Szlovén zivatar. (11:45-12:30). Forrás: OMSZ.



14.ábra: A 2008 augusztus 23-ai cella 12 UTC-s időablakbani mozgása a megjelölt rácspontok körül. A pixnum értékek 40 dBZ-nél nagyobb reflektivitású cellák számát adják meg.

Az 13. és 14. ábrák egy szupercella mozgását mutatják be Szlovénia területén. Amint az a radarképeken is látható, a 40 dbZ-nél nagyobb értékeket felvevő pixelek száma igen nagy, így ha tartozik a szupercellához aktivált rácspont, igen markáns járulékkal adódik hozzá a teljes értéktartományhoz. Ha 14. ábrán ábrázolt (46.25, 14.50) és a (46.25, 14.75) rácspontok is aktiválódnának (ugyanarra a feltételkeretre), akkor a 12 UTC-s időablakon belül hozzájuk tartozó TotRefl (azaz a fent említett súlyozott mennyiség) rendre 45 [40dbZ] (11:30 + 11:45 UTC-s eset) és 74 [40dbZ] (maradék eset). Ezek igen kiugró értéknek számítanak a legtöbb ábrán látható értékekhez képest, ugyanakkor maga az esemény is a heves kategóriákba sorolandó, így jogos a járulék súlya. A legtöbb hevesebb esetben a TotRefl értékek 10 és 40 [40dbZ] értékek körül mozognak, ám előfordulnak extrém, 150 [40dbZ]-s értékek is.

A következőkben először a több paraméterre vonatkozó vizsgálatok általános bemutatását végezzük el egy példán keresztül, melyben a TotRefl által kirajzolt "topográfiát" is bemutatjuk, majd a későbbiekben már csak a felülnézeti ábrákat vizsgáljuk, tekintettel arra, hogy a 3 dimenziós ábrákat ezen keretek között nem tudjuk elég szögben bemutatni ahhoz, hogy azok értékelhetők legyenek.

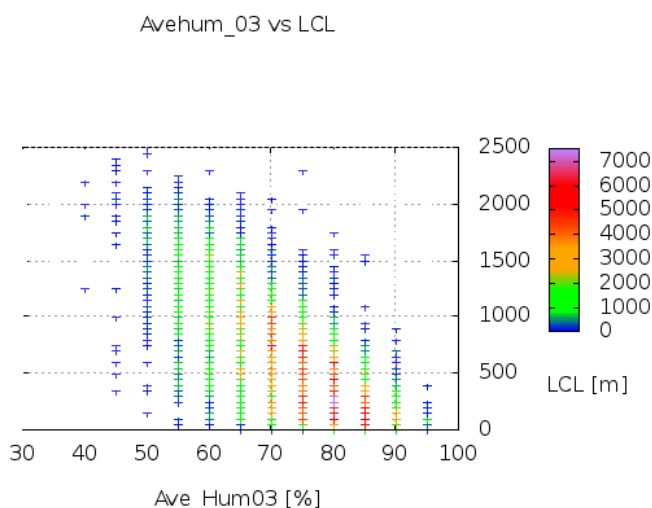


15. ábra: Reflektivitással súlyozott ellipszisszám az LCL és AVEHUM03 paraméterek által kifeszített sík felett, több szögből ábrázolva.

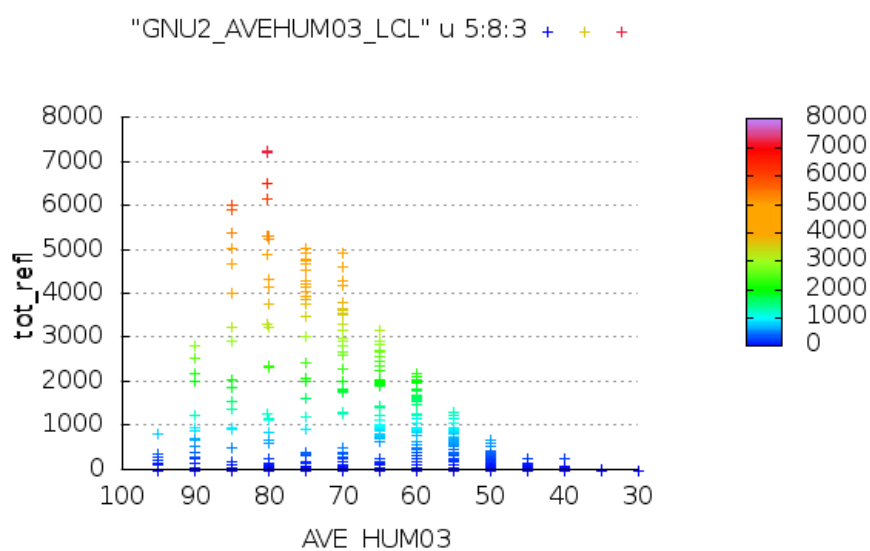
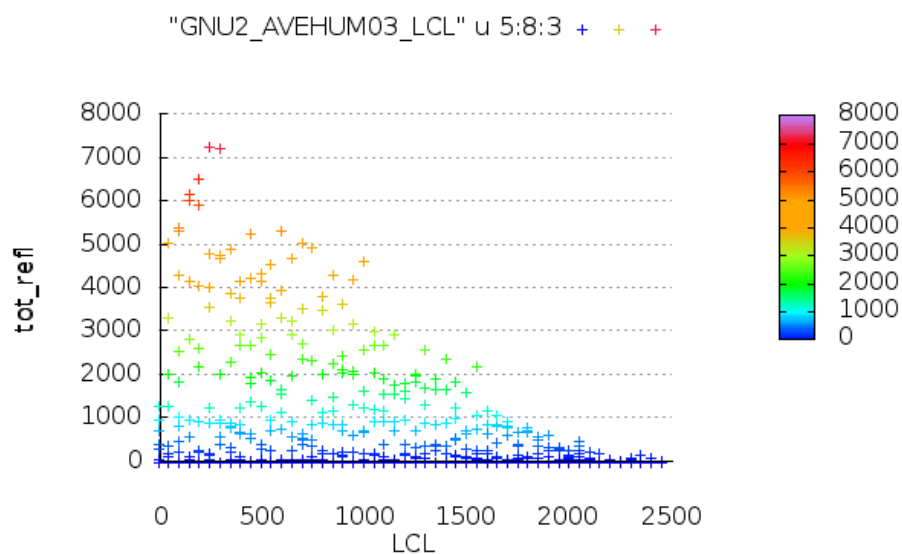
A 15. ábrán a 0-3 km átlagos relatív nedvessége (AVEHUM03) és az emelési kondenzációs szint - LCL - felhőalap magassága között keresünk kapcsolatot. Az x tengelyen

az AVEHUM03 értékei láthatók (%-ban megadva, 5 %-os intervallumokban), az y tengelyen az LCL értékei (m, 50 m-es intervallumokban). A "z" tengelyen az egyes kategóriaintervallumokon belül detektált ellipszisszám látható a >40 DBz -s reflektivitású rácsponatok számával súlyozva (tot_refl). Az ábrákon jól látható gradiens vehető észre az alacsony AVEHUM03 - magas LCL értékek és az alacsony LCL - magas AVEHUM03 értékek között. A legnagyobb tot_refl értékeket a 70-90 %-os relatív nedvességi, és a 250-1000 m felhőalap magassági intervallumokban figyelhetjük meg, ez a felülnézeti 16. ábrán még jobban láthatóan megjelenik. Jól kimutatható az az egyszerű összefüggés is, hogy nedvesebb alsó troposzférában alacsonyabb felhőalappal rendelkező cellák fejlődnek, míg szárazabb alsó troposzférában csak magasabb felhőalappal rendelkező cellák jöhetnek létre, jóval kisebb esetszámmal.

Meg kell említenünk, hogy az TotRefl értékek függvényei annak, hogy milyen intervallumokkal dolgozunk. CAPE értékeknél 50 J/kg, relatív nedvességeknél 5%, magasság dimenziójú mennyiségeknél 100/200 m-es, a konvektív indexeknél pedig 2 °C-os intervallumok fordulnak elő, így a sűrűbb intervallumoknál a TotRefl maximumok kisebbek lesznek, ellenben az esetszám eloszlásának egy finomabb rajzolatához jutunk. Meg kell említenünk továbbá azt is, hogy az MLCAPE=0 értékeket lehangyuk az ábrákról, mivel az ott felvett esetek túl nagy száma torzította a többi intervallumon felvett esetek számával kapott képet.



16. ábra Reflektivitással súlyozott ellipszisszám az LCL és AVEHUM03 paraméterek által kifizített sík felett (más színezésben).

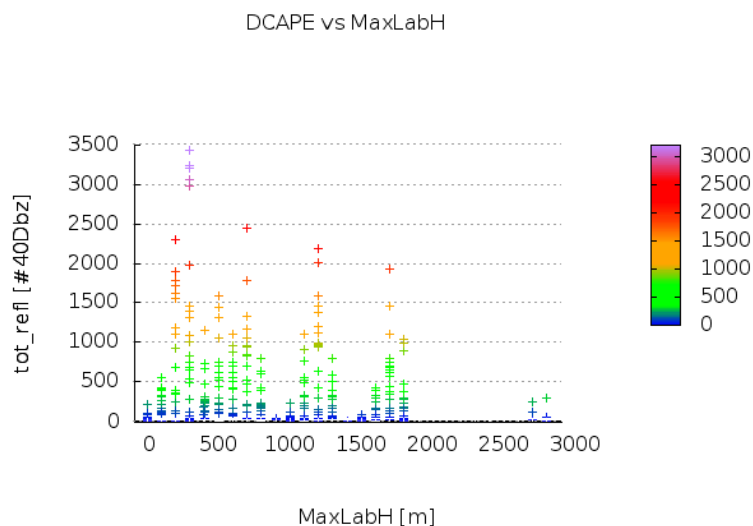


17. ábra Súlyozott ellipszisszám eloszlása a relatív nedvesség (0-3 km) és a felhőalap magasságának függvényében. (a 11. ábra xz, yz síkokra vett vetülete)

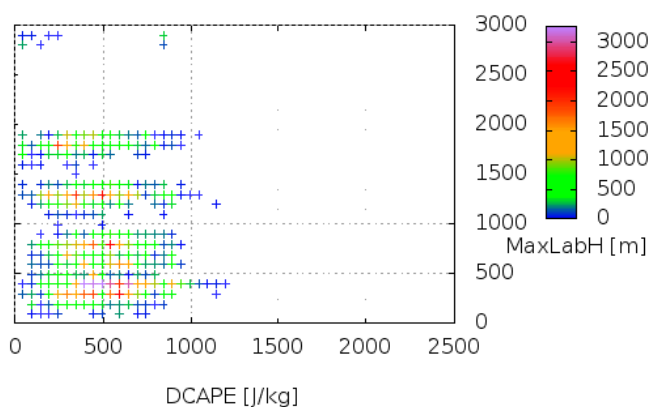
A meszeteken is jól megfigyelhető a nagy esetszám ~ 1000 m -es LCL-ig, illetve 70 - 85 %-os relatív nedvességértékek között. A 80-85 % -os relatív nedvességhez köthető nagy esetszám az egyváltozós eredményekkel egyetemben egy optimális relatív nedvességi intervallum létét sejteti a heves zivatarok kialakulásánál.

2.2.2.1 A csapadékhulláshoz köthető leáramlás - DCAPE

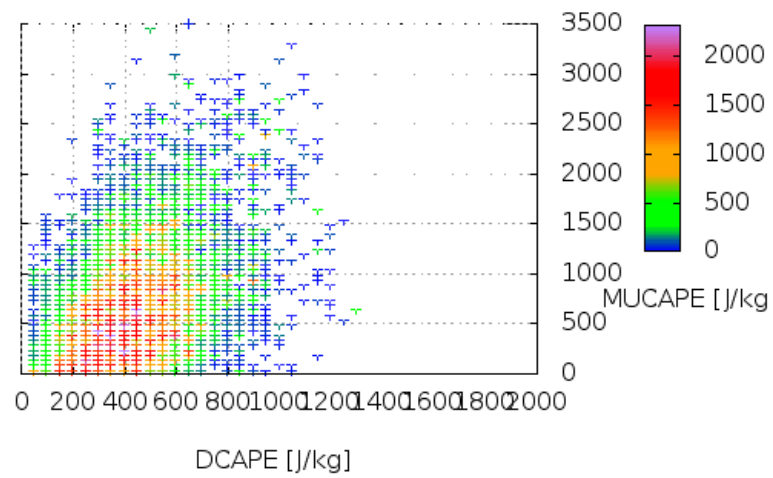
Az első vizsgált paraméter a DCAPE vagy Downdraft (leáramlási) CAPE, mely a talaj felé áramló kihűlt légoszlopra ható felhajtóerejét adja meg, azaz a zivatarban végbemenő, csapadékhulláshoz köthető leáramlás maximális kinetikus energiáját (szemléletesebben: "lehajtóerőt") (Gilmore, Wicker (1998), Evans, Dotzek (2001)).



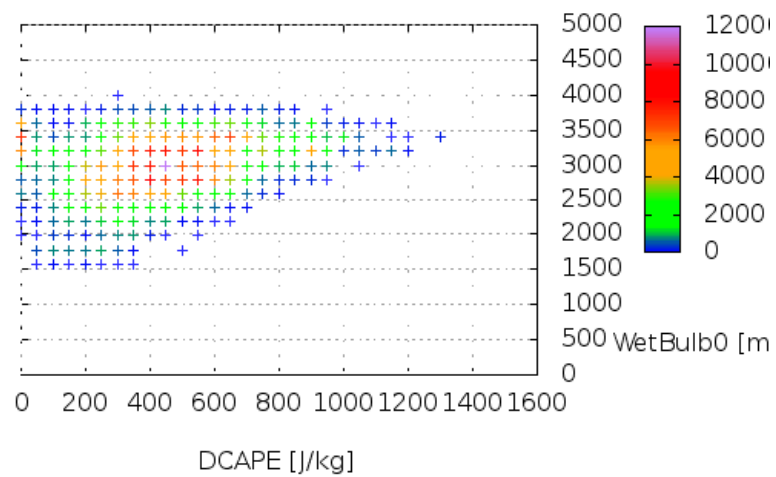
18. ábra Súlyozott ellipszisszám eloszlása a maximális labilitás magassága szerint.



19. ábra Súlyozott ellipszisszám eloszlása a leáramlási CAPE és a maximális labilitás magasságának függvényében



20. ábra Súlyozott ellipszisszám eloszlása a leáramlási CAPE és a leglabilisabb CAPE függvényében.



21. ábra Súlyozott ellipszisszám eloszlása a leáramlási CAPE és a 0-fokos nedves hőmérsékleti izoterma függvényében.

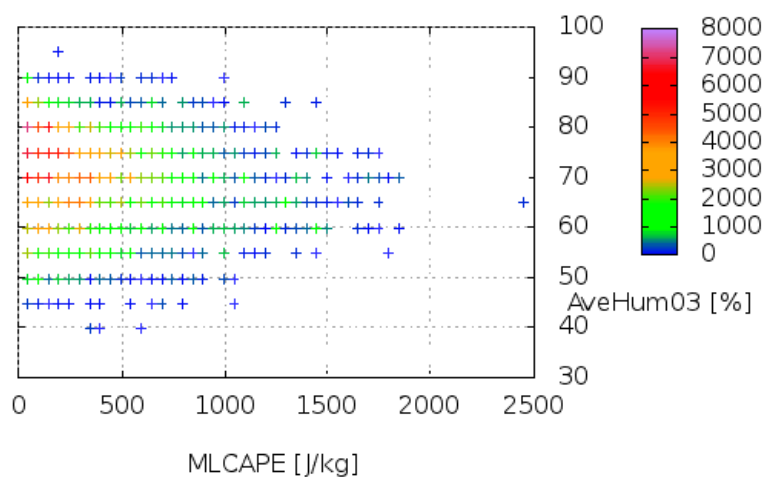
Az ábrákon látottak alapján a következőket mondhatjuk el: a DCAPE értékeknek létezik (a nem szennyezett ECMWF analízisekre) egy, a heves zivatartevékenységre jellemző maximum-tartománya, mely ~ 250 - 300 J/kg és 700 - 750 J/kg közé helyezhető.

Az 18-19. ábrákon megfigyelhető, ahogy a heves zivatarok nagy TotRefl értékei négy jól elkülönülő maximumot adnak a maximális labilitás magasságát jellemző szint szerint, 250 és 500 m között, 750 m, 1250 m, valamint 1750 m körül, DCAPE szerint pedig a már fent említett intervallumban sűrűsödnek.

A 20. ábrán a leglabilisabb CAPE (MUCAPE) mellett tekintjük a leáramlási CAPE intervallumokat. A DCAPE sűrűsödési intervallum ismét jól megjelenik, míg a MUCAPE értékek igen tág keretek között mozognak, s a legnagyobb esetszámok 0 és 1500 J/kg-os értékek között mozognak, és 1500 J/kg-fölött már igen kevés eset fordul elő, csupán elszórtan figyelhető meg néhány maximum (pl. ~ 2300 J/kg MUCAPE és ~ 900 J/kg DCAPE értékeknél).

A 21. ábrán a 0 -fokos nedves hőmérsékleti izoterma magasságát láthatjuk a DCAPE mellett. Az esetszámok itt egy jól kivehető maximum köré csoportosulnak, a 350 - 650 J/kg DCAPE és ~ 2700 - 3500 m-es WetBulb0 értékek között.

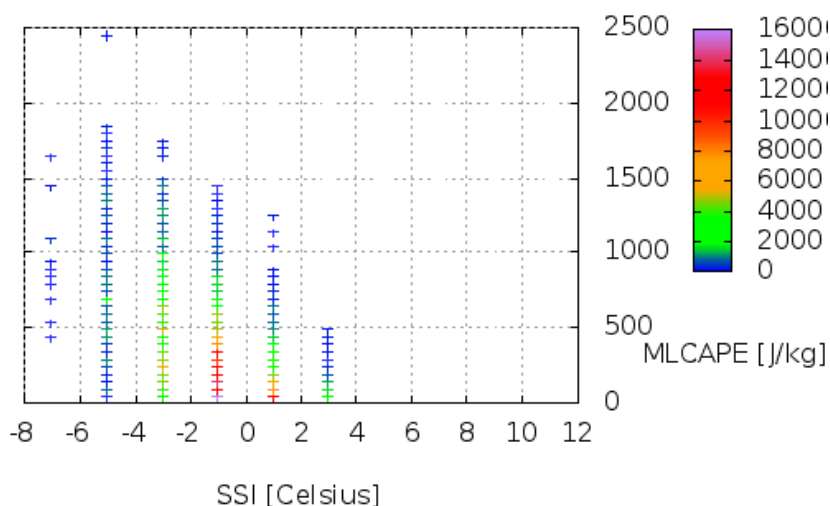
2.2.2.2 A relatív nedvesség



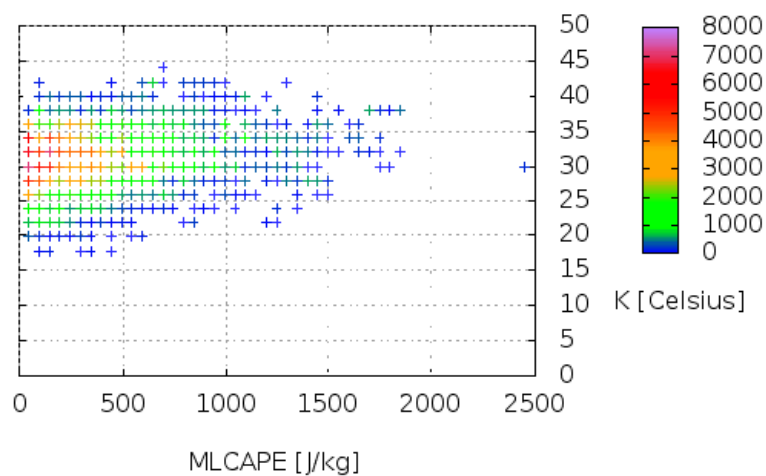
22. ábra Súlyozott ellipszisszám eloszlása az alsó 3 km átlagos relatív nedvességének és az MLCAPE függvényében.

Az ábrán jól megfigyelhető az alsó 3 km relatív nedvességére jellemző sűrűsödési zóna 70 és 85 % között. A legtöbb eset meglepően alacsony MLCAPE értékeknél fordul elő, ugyanakkor ~ 1500 J/kg-os MLCAPE értékekig még megjelennek a nagy esetszámok, mely jól mutatja, hogy a CAPE térbeli eloszlása legtöbbször sokkal inkább inhomogén, mint az alacsonyszintű nedvességé. Meg kell jegyeznünk ugyanakkor, hogy a legnagyobb esetszámok MLCAPE=0 esetén fordultak elő, mely indokolja a korábban vizsgált MUCAPE figyelembevételét, a valóban labilitásmentes esetek és a konvektíve szennyezett esetek elválasztására. A nagy térbeli inhomogenitás egyben válasz a null-esetek nagy számára is.

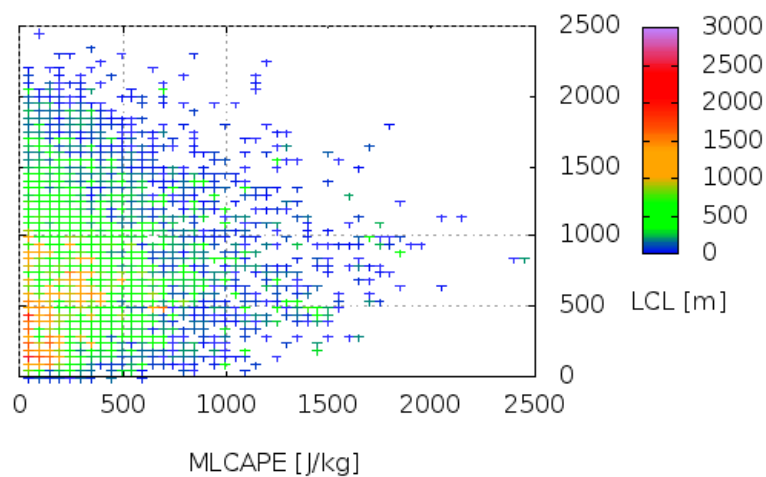
2.2.2.3 MLCAPE, konvektív indexek és LCL



23. ábra Súlyozott ellipszisszám SSI és MLCAPE függvényében



24. ábra Súlyozott ellipszisszám a K index és MLCAPE függvényében

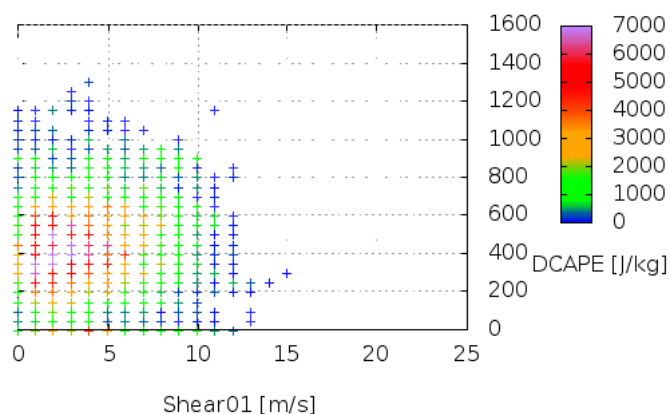


25. ábra Súlyozott ellipszisszám az LCL és a MLCAPE függvényében

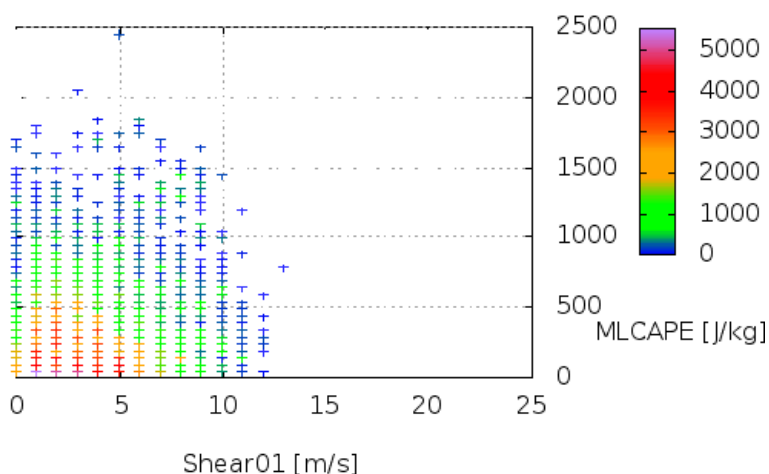
A CAPE és a K index, az SSI index, valamint az LCL értékeinek összevetésekor ugyanúgy megjelenik a kisebb MLCAPE értékek túlsúlya, mint az előzőeknél. Az LCL (25.ábra) vizsgálatokor egy jól elkülönülő maximumzóna figyelhető meg 250 és 500 J/kg MLCAPE és 500-1000 m -es LCL értékek között, ám a legnagyobb esetszámok most is az

alacsony CAPE - alacsony LCL értékek értékek köré tömörülnek. Az SSI index esetén a legtöbb eset a -4 és $+2$ °C-os értékek között figyelhető meg, ~ 1000 J/kg-os MLCAPE értékekig. A K index esetén ez az intervallum 25 °C és 40 °C között van, ennél kisebb, ill. nagyobb értékek esetén nem jellemző heves zivatartermékenység.

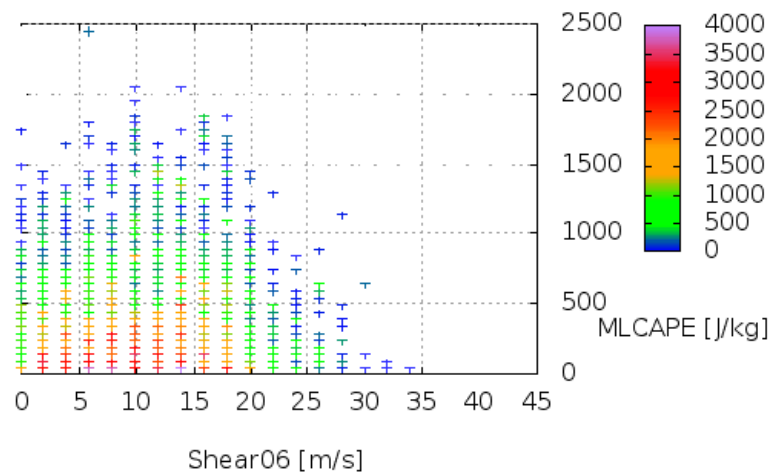
2.2.2.4 Kinematikai paraméterek



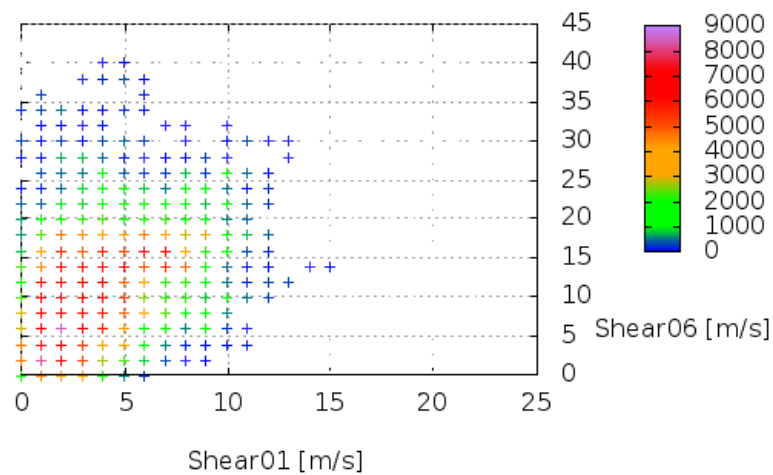
26. ábra Súlyozott ellipszisszám a DCAPE és a 0-1 km között vett szélnyírás értékek függvényében



27. ábra Ellipszisszám a MLCAPE és a 0-1 km között vett szélnyírásértékek függvényében



28. ábra Súlyozott ellipsziszám a MLCAPE és a 0-6 km-es szélnyírás függvényében



29. ábra Súlyozott ellipsziszám a 0-1km -es és a 0-6 km-es szélnyírás függvényében

A 26. ábrán látható DCAPE-0-1 km-es nyírás összevetésének célja közelíteni a "coldpool", azaz a kifutószél (horizontális örvényességének) és a szélnyírás viszonyát. Az ábrán egy jól elkülönülő maximum figyelhető meg az esetek számában - a 200-600 J/kg-os DCAPE és az 1-7 m/s -os szélnyírás intervallumban.

A labilitás és a szélnyírás viszonyának vizsgálatakor a nagy esetszámok 0-500 J/kg-os MLCAPE és 1-5 m/s 0-1 km-es, valamint 3-15 m/s-os 0-6 km-es szélnyírás-intervallumban figyelhetők meg. A két különböző szélnyírás összevetésekor hasonló kép adódik.

Összegzés

A dolgozat céljaként a rendelkezésünkre álló adatbázisból konvektív paraméterek radaradatokkal való együttes vizsgálatán keresztül alapvető statisztikák előállítását tűztük ki. A számításokat egy általunk C nyelven megírt program segítségével végeztük el, mely egyben egy részletes, oktatási-kutatási célokat szolgáló lekérdező algoritmussá nőtte ki magát. A szakirodalom áttekintése után a dolgozatban egy esettanulmányon keresztül demonstráltuk a dolgozat esetleválogató funkcióját.

Ezek után Énekes, Fodor (2010) munkáját alapul véve egy, a szakmában bevett box-whisker diagramos ábrázolásmóddal 46 konvektív paraméter vizsgálatát végeztük el szimmetrikus és aszimmetrikus időablakokra, majd a legfontosabb eredményeket közöltük. Megállapíthatjuk, hogy eredményeink igen jó egyezést mutatnak a referenciatanulmány eredményeivel, bár különbségek is megmutatkoznak (pl. az MLCIN vagy a CAPE értékekben), melyek többek között a paraméterek eltérő számítási módjaiból, a felhasznált modellek különbözőségeiből és az eltérő térbeli felbontásból adódnak. Rámutattunk arra is, hogy a konvektív paraméterek együttes vizsgálata sokkal jobb eredményeket hozhat azok kutatásánál. Ezt a legalapvetőbb konvektív komponensekre (labilitás, nedvesség, szélnyírás) vonatkozó paraméterek együttes vizsgálatával demonstráltuk.

Célunk az alapvető statisztikák elvégzésén túl az adatbázis homogenizálása és újragyártása a konvektív paramétereket számoló program legfrissebb verziójával, valamint csapadék és széladatok integrálása egy objektívebb lekérdező-és analízáló rendszer reményében, a heves események még jobb kiemeléséhez. Munkánkat ezek után a Magyarországon előforduló zivatarvonalak, zivatarláncok és a hozzájuk kapcsolódó heves események környezetének részletesebb vizsgálata irányában végezzük tovább.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet nyilvánítani az Országos Meteorológiai Szolgálatnak a dolgozatban felhasznált adatok és a munkakörnyezet biztosításáért, Dr. Horváth Ákosnak a radaradatbázis rendelkezésemre bocsátásáért és hasznos észrevételeiért, Csirmaz Kálmánnak a konvektív paramétereket számoló algoritmus kimeneteinek és dokumentációjának rendelkezésemre bocsátásáért és segítő ötleteiért, valamint témavezetőmnek, Kolláth Kornélnak a dolgozat elkészítésében nyújtott segítségével.

Hivatkozások:

- Beebe, R. G., 1955: Types of airmasses in which tornadoes occur. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 36, 349–350.
- Burgess, D.W., and L.R. Lemon, 1990: Severe thunderstorm detection by radar. *Radar in methodology*, D. Atlas, Ed., Amer. Meteor. Soc., 619–647.
- Craven, J. P., és H. E. Brooks, 2004: Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection. *Nat. Wea. Digest*, 28, 13–24.
- Csirmaz, K., 2012: A konvektív előrejelzéshez használt diagnosztikus paraméterek és indexek számolásának dokumentációja, OMSZ.
- Davies, J. M., 2006: Total CAPE, low-level CAPE, and LFC in significant tornado events with relatively high LCL heights. Preprints, 23rd Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM, P1.3
- Dotzek, N., Forster, C., 2011: Quantitative comparison of METEOSAT thunderstorm detection and nowcasting with in situ reports in the European Severe Database *Atmos. Res.*, doi:10.1016/j.atmosres.2010.12.013
- Evans, J. S., and C. A. Doswell III, 2001: Examination of derecho environments using proximity soundings. *Wea. Forecasting*, 16, 329–342
- Énekes, N. A., 2010: Intenzív konvektív folyamatok környezetének vizsgálata modell analízisek alapján. *Diplomamunka, témavezető: Fodor Zoltán*.
- Fawbush, E. J., and R. C. Miller, 1954: The types of air masses in which North American tornadoes form. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 35, 154–165.
- Gilmore, M. S., and L. J. Wicker, 1998: The influence of midtro-pospheric dryness on supercell morphology and evolution. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 943–958
- Götz, G. és Pápainé, Sz. G., 1966a: Zivatarvékenység a nyári félévben Magyarországon. *Időjárás* 70, 106–114.
- Götz, G. és Pápainé, Sz. G., 1966b: A vertikális szélnyírás szerepe a konvektív zivatarok kialakulásában. *Időjárás* 70, 47–52.

- Götz, G. és Mészáros, E., 1967: A jégesők keletkezésének föltételei Magyarországon. *Időjárás* 71, 91–99.
- Rasmussen, E.N., és D.O. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 13, 1148–1164.
- Rasmussen, E. N., 2003: Refined supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 18, 530–535.
- Rasmussen, E.N., and R.B. Wilhelmson, 1983: Relationships between storm characteristics and 1200 GMT hodographs, low level shear, and stability. Perprints, *13th Conf. On Severe Local Storms*, Tulsa, OK, Amer.Meteo. Soc., J5-J8.
- Seres, A. T. és Horváth, Á., 2009.: Konvektív jellegű, nagy csapadékhozamú rendszerek vizsgálata Magyarországon. *Légkör* 54, 5–10.
- Showalter, A. K., and J. R. Fulks, 1943: Preliminary report on tornadoes. *U.S. Weather Bureau*, 162 pp.
- Stumpf, G. J., A. Witt, E. D. Mitchell, P. L. Spencer, J. T. Johnson, M. D. Eilts, K. W. Thomas, and D. W. Burgess, 1998: The National Severe Storms Laboratory mesocyclone detection algorithm for the WSR-88D. *Wea. Forecasting*, 13, 304–326.
- Thompson, R. L., R. Edwards, J. A. Hart, K. L. Elmore, és P. Markowski, 2003: Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. *Wea. Forecasting*, 18, 1243–1261
- Wood, V.T., R.A. Brown, and D.W. Burgess, 1994: Characteristics of mesocyclone tracks associated with Southern Great Plains thunderstorms. *Mon. Wea. Rev.*, Submitted.