

## LABILITÁSI INDEXEK VIZSGÁLATA RADARMÉRÉSEK ÉS MODELLEREDMÉNYEK ALAPJÁN

### EXAMINATION OF INSTABILITY INDICES BASED ON RADAR MEASUREMENTS AND MODEL RESULTS

Hegedüs Adrienn, Breuer Hajnalka, Fodor Zoltán, Seres András Tamás

Eötvös Loránd Tudományegyetem, H-8135, Dég, Dr. Haug Antal u. 3., *adri04@caesar.elte.hu*,  
Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter stny. 1/A, *bhajni@nimbus.elte.hu*,  
Országos Meteorológiai Szolgálat, 1024 Budapest, Kitaibel Pál u. 1., *fodor.z@met.hu*,  
Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálat, H-1024 Bp., Szilágyi Erzsébet fasor 7-9., *seres.andrastamas@upcmail.hu*

**Összefoglalás.** A heves konvektív időjárási eseményeket kiváltó fizikai folyamatok mind térben, mind időben kis skálára korlátozódnak, ezért előrejelzésük nem könnyű feladat. A légköri konvekció intenzitásának számszerűsítésére az ún. instabilitási vagy labilitási indexeket szokás használni, melyek legfőbb előnye, hogy segítségével egyetlen számértékkel ellenőrizhető a hidrosztatikai instabilitás megléte, erőssége. Kutatásunk alapvető célja, hogy kiderítsük, a gyakorlatban mely labilitási indexek segíthetik leginkább a zivatarvekenységgel járó jelenségek lehető legpontosabb előrejelzését. Ezt radarmérések és modelledmények összehasonlításával hajtjuk végre: a TITAN-módszer felhasználásával az egymást követő radarképeken detektálható zivatarok szabálytalan alakú alakzatait számunkra ismert tulajdonságú ellipszisekkel modellezzük, azaz Magyarország területére megvizsgáljuk a heves zivatarokat modellező ellipszisek, ún. zivatarellipszisek számát és erősségét, majd ezeket összevetjük a GFS időjárás-előrejelző modell adataival. A vizsgálat során csak azokat az eseteket vesszük figyelembe, amelyek legalább 20 km<sup>2</sup>-nyi területen minimum 45 és 50 dBZ-s radarreflektivitással rendelkeznek. A felsorolt kritériumoknak eleget tevő objektumokat heves és nagyon heves zivatarellipsziseknek nevezzük. A detektált zivatarellipszisek száma, illetve a labilitási energia függvényében hattagú osztályozási rendszert alkalmazunk, eredményeink megjelenítéséhez pedig dobozdiagramokat használunk. A vizsgálat a 2011–2013-as időszak zivataros féléveire (április-szeptember) vonatkozik. A kutatás során egyelőre összesen 52 instabilitáson, nedvességen és szélnyírason alapuló változót elemzünk. Közülük a Lifted és a Best Lifted Index, a Thompson Index, a K-Index, a leglabilisabb kevert-rétegű konvektív hasznosítható potenciális energia, valamint a kihullható vízmennyiség és a specifikus nedvesség esetében elmondható, hogy a heves konvekció kialakulása, erőssége relatív szűk tartományokhoz köthető, ezért együttes alkalmazásuk és a szinoptikai háttérhelyzet kellő ismerete mellett segítségünkre lehetnek annak eldöntésében, hogy kell-e egy adott területen intenzív konvektív esemény kialakulására számítani.

**Abstract.** Physical processes that cause severe convective meteorological events are limited both in space and time; therefore it is quite difficult to predict their appearance. To quantify the intensity of the atmospheric convection so-called stability or instability indices are commonly used. The main advantage of these indices is that it is possible to check the presence and strength of hydrostatic instability with only one numerical value. The aim of our examination is basically to analyze which instability indices may help to predict thunderstorm activity as accurately as possible. Our method compares radar measures and model results. Using TITAN method (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting), the irregular-shaped thunderstorms detected by radars could be characterized by so-called thunderstorm ellipses with known parameters. The number and the intensity of these ellipses are examined in Hungary; our results are compared with data of GFS (Global Forecast System) weather forecast model. Our examination considered only those objects, which have pixels with minimum 45 or 50 dBZ radar reflectivity on an area of at least 20 km<sup>2</sup>. Objects that fulfill these criteria are called severe and highly severe thunderstorm ellipses. Considering the number of the detected thunderstorm ellipses and the convective available potential energy six clusters are created and box whisker diagrams are applied for visualization. This investigation is carried out for only thunderstorm seasons (April to September) between 2011 and 2013. Altogether 52 variables based on instability, humidity and wind shear are analyzed. It is found that the values of some indices – such as Lifted and Best Lifted Index, Thompson Index, K-Index, the most unstable mixed-layer convective available potential energy, the precipitable water and specific humidity – are scattered in relatively narrow ranges. Therefore knowing the synoptic background, the combined application of these indices may predict the existence of severe convection in a given area.

**Előzmények és célkitűzés.** Az intenzív konvektív légköri képződmények gyakran állnak a figyelem középpontjában, ugyanis jellemző idő- és térbeli előfordulásukat tekintve kis skálán zajlanak, ezért előrejelzésük nem könnyű feladat, míg az általuk kiváltott másodlagos hatások a személyi- és vagyonsbiztonság szempontjából veszélyekkel járhatnak: heves esőzések, erőteljes szélviharok, esetenként jégeső, vagy akár tornádók is kialakulhatnak. A közelmúltban *Dalla Fontana* (2008), *Horváth et al.* (2008), *Énekes* (2010), *Kohlmann* (2013), illetve *Seres* (2015) radarméréseken alapuló zivatarstatistikai, zivatarklimatológiai kutatásokat végeztek. A hazai munkákban többek között megállapították, hogy a legtöbb

heves konvektív objektum országunk délnyugati, illetve északi, északkeleti tájain fordult elő, továbbá a tér- és időbeli sajátosságok mellett a jelenségek szinoptikai hátterét is elemezték. *Énekes* (2010) munkájára a következő fejezetben térünk ki, míg *Kohlmann* (2013) megalkotott egy, mind a gyakorlatban, mind pedig a további kutatásokban jól használható esetleválogató programot, amely segítségével vizsgálhatók az egyes konvektív paraméterek szinoptikus klimatológiai tulajdonságai.

Kutatásunk közvetlen előzményének *Énekes* (2010) munkája tekinthető, amely a 2009-es év áprilistól szeptemberig terjedő időszakára elemezte a hazánk területén

detektálható, minimum 40 dBZ-s radarreflektivitással rendelkező zivatarokat. Jelenlegi kutatásunkban a vizsgált időszak hosszán túl a reflektivitás küszöbértékét is megnöveljük (45, 50 dBZ).

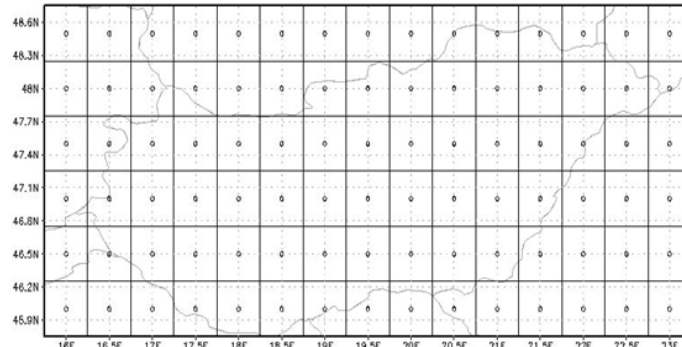
A magasabb küszöbérték segítségével célunk a fokozottan heves konvektív cellák azonosítása, illetve azok környezetének labilitási indexekkel és egyéb nedvességi, szélnyírási mennyiségekkel történő minél pontosabb jellemzése. Azoknál a vizsgált paramétereknél, amelyeknél a stabilis és a labilis esetek viszonylag jól elkülöníthetők egymástól, szeretnénk a lokális viszonyokhoz alkalmazkodó előrejelzési határértékeket megadni a heves konvekció kialakulásának lehetőségét illetően, kiválasztva ezzel a konvektív folyamatokat legpontosabban jellemző indexeket. Cikkünkben a kutatásunk legfontosabb eredményeit mutatjuk be.

**Módszerek.** Elemzéseinket a 2011-2013-as évek áprilistól szeptemberig terjedő időszakára végeztük el. Kutatásunk során az Országos Meteorológiai Szolgálat radarhálózatában található eszközök méréseit (Pogányvár, Nyíregyháza-Napkor, Budapest-Pestszentlőrinc), illetve a

a National Centers for Environmental Prediction (NCEP) fejlesztése alatt áll. A modell kezdeti verzióját, az MRF-et (Medium Range Forecast) Sela fejlesztette ki az 1980-as években. Ezt követően számos fejlesztés ment keresztül, a kutatás során alkalmazott horizontális rácsfelbontás már 0,5 fok x 0,5 fok, amely a mi szélességünkön körülbelül 55 km-es rácsávolságot jelent. A modell 64 vertikális szintet különböztet meg, míg időbeli felbontása két szakaszra osztható: a hat óránként futtatott modell az első részben (0–180 óra) 3 óránként, a másodikban (180–384 óra) 12 óránként szolgáltat információt a légkör várható állapotáról (NCEP, 2013).

Előnye, hogy az eredmények szabadon és gyorsan hozzáférhetőek, továbbá a szinoptikus gyakorlatban ez az egyik leggyakrabban használt globális modell. A vizgá-

gálatához felhasznált GFS-adatok az amerikai NOMADS (National Operational Model Archive & Distribution System) szerveréről származnak (NOMADS, 2013). Elemzésünkhöz a numerikus modell 00, 06, 12 és 18 UTC-s analíziseit, illetve ezen időpontok első előrejelzési időlépcsőit (analízis + 3 óra: 03, 09, 15 és 21 UTC) használjuk fel, így kellő, 3 órás gyakoriságú adatsorral dolgozhatunk.



1. ábra: A vizsgált rácsálózat. "0" az adott rácsdoboz középpontját jelöli

1. táblázat: A vizsgált változók (paraméter: nyers modelleredmény, származtatott változó: a modelleredményből utólag számított mennyiség). A vastaggal kiemelt mennyiségekre vonatkozó eredményeinket mutatjuk be mindhárom vizsgált küszöbértékre.

| Paraméter  | Származtatott változók                                |
|--|---|
| CAPE - konvektív hasznosítható potenciális energia | TLR - hőmérsékleti gradiens / több szinten            |
| <b>MLMUCAPE - kevertrétegű potenciális energia</b> | BII - Boyden Instability Index                        |
| CIN - konvektív gátlás                             | TT - Total Totals                                     |
| MLMUCIN - kevertrétegű konvektív gátlás            | KI - K-index  |
| LI - emelési index                                 | <b>TI - Thompson index</b>                            |
| BLI - Best Lifted Index                            | NI - nedvesség index                                  |
| RH - relatív nedvesség / több szinten              | <b>SHR - szélnyírás / több magassági szint között</b> |
| <b>Kihullható vízmennyiség</b>                     | BRN - Bulk-Richardson-szám                            |
| Specifikus nedvesség 2 m-en                        | MC - nedvesség konvergencia                           |
|  | 0 °C-os szint magassága                               |
|  | Divergencia / több szinten                            |

GFS időjárás-előrejelző modell adatait használtuk fel.

**A felhasznált radaradatok.** Kutatásunk során a három hazai radarberendezés által előállított egyedi CMax mérésekből származtatott országos kompozit radarképekkel dolgoztunk, melyeknek felbontása időben 15 perc, térben 2 km x 2 km.

**A GFS modell adatai.** Kutatásunk szerves részét képezik a GFS (Global Forecast System) adatai is. A GFS egy globális, hidrosztatikus időjárás-előrejelző modell, mely

**Zivatarellipszisek előállítása.** Elsőként egy ismert zivatardetektáló- és követő módszer segítségével előállítjuk a zivatarellipszisek területi eloszlásait a hazai radaradatokból az 1. ábrán látható rácsálózatra. Ezt egy matematikai-programozási eljárás alkalmazásával, a TITAN-nal (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting) végezzük el (Dixon and Wiener, 1993). A program az egymást követő radarképeken megjelenő magas reflektivitású góccokat detektálja és követi. Amennyiben talál az általunk előre meghatározott terüle-

$t_i$  ( $T_{\text{limit}}$ ) és radarjel-erősségi ( $R_{\text{limit}}$ ) küszöbértékeknek eleget tevő objektumot, akkor a detektált zivatar területét azonos tulajdonságú ellipszissel modellezi, miközben számolja az egyes rácsdobozokban megjelenő ellipszisközéppontokat is. Az eljárás segítségével megadhatók a

negyedórás időszakokra. A 15 perces zivatarellipszis számokat a korábban felsorolt modell kimeneti időponatokra összegezzük az adott modellidőpont plusz-mínusz másfél órás időtartamára. Erre a finomítási időeltolásra azért van szükség, hogy folyamatosan, a modellkimenet

2. táblázat: A vizsgálat során alkalmazott csoportosítási rendszer a zivatarellipszisek száma és a labilitási energia függvényében

| Kategória neve | Kategória leírása  | Esetszám |        |        |
|----------------|--|----------|--------|--------|
|                |  | 45 dBZ   | 50 dBZ | 55 dBZ |
| 0 (stabilis)   | Stabilis helyzet (MLMUCAPE = 0 J/kg) és nincs jelen zivatarellipszis | 264508   | 264702 | 264731 |
| 0 (labilis)    | Labilis helyzet (MLMUCAPE > 0 J/kg) és nincs jelen zivatarellipszis  | 306567   | 311832 | 314095 |
| 1              | 1 db detektált zivatarellipszis                                      | 3113     | 1325   | 247    |
| 2-5            | A detektált zivatarellipszisek száma 2 és 5 között van               | 3817     | 1178   | 146    |
| 6-10           | A detektált zivatarellipszisek száma 6 és 10 között van              | 940      | 154    | 4      |
| > 10           | A detektált zivatarellipszisek száma több mint 10                    | 279      | 33     | 1      |

3. táblázat: A vizsgált mérőszámokhoz tartozó (heves) konvekció mentes statisztikai határértékek

| Változó                      | Nem valószínű heves konvekció |        |        |
|------------------------------|-------------------------------|--------|--------|
|                              | 45 dBZ                        | 50 dBZ | 55 dBZ |
| $LI$ [ $^{\circ}C$ ]         | > 4                           | > 3    | > 3    |
| $BLI$ [ $^{\circ}C$ ]        | > 2                           | > 1    | > 0    |
| $KI$ [ $^{\circ}C$ ]         | < 24                          | < 25   | < 24   |
| $TI$ [ $^{\circ}C$ ]         | < 25                          | < 27   | < 26   |
| Kihullható vízmennyiség [mm] | < 20                          | < 21   | < 23   |
| Specifikus nedvesség [g/kg]  | < 9                           | < 9    | < 9    |
| $BII$ [ $^{\circ}C$ ]        | < 95                          | < 96   | < 96   |
| $TT$ [ $^{\circ}C$ ]         | < 45                          | < 46   | < 47   |

4. táblázat: Az egyes indexek esetén heves konvekciót nagy valószínűséggel eredményező küszöbértékek

| Változó                      | Kialakulhat heves zivatar |           |             | Nagyobb számban is kialakulhatnak heves zivatarak |             |
|------------------------------|---------------------------|-----------|-------------|---|-------------|
|                              | 45 dBZ                    | 50 dBZ    | 55 dBZ      | 45 dBZ  | 50 dBZ      |
| $LI$ [ $^{\circ}C$ ]         | $\leq 0$                  | $\leq -1$ | $\leq -1,5$ | $\leq -1$   | $\leq -2$   |
| $BLI$ [ $^{\circ}C$ ]        | $\leq -0,5$               | $\leq -1$ | $\leq -2$   | $\leq -1,5$                                       | $\leq -2,5$ |
| $KI$ [ $^{\circ}C$ ]         | $\geq 29$                 | $\geq 30$ | $\geq 32$   | $\geq 31$   | $\geq 31$   |
| $TI$ [ $^{\circ}C$ ]         | $\geq 30$                 | $\geq 32$ | $\geq 34$   | $\geq 33$   | $\geq 34$   |
| Kihullható vízmennyiség [mm] | $\geq 26$                 | $\geq 27$ | $\geq 28$   | $\geq 29$   | $\geq 29$   |
| Specifikus nedvesség [g/kg]  | $\geq 9$                  | $\geq 10$ | $\geq 11$   | $\geq 11$   | $\geq 11$   |

zivatarellipszis derékszögű-koordináta-rendszerben kifejezett középponti koordinátái, kis- és nagy tengelyei, illetve a zivatar területét megadó pixelek darabszáma is (Horváth et al., 2008). Kutatásunkban a  $T_{\text{limit}} = 5$  pixel ( $=20 \text{ km}^2$ ), míg az  $R_{\text{limit}} = 45$  és  $50 \text{ dBZ}$ . Azokat az objektumokat, amelyek eleget tesznek a fenti küszöbértékeknek, heves és nagyon heves zivatarellipsziseknek nevezzük.

**A zivatarellipszisek számának és a GFS modell eredményeinek összevetése.** Az ellipszis-detektáló programrendszer segítségével 15 perces felbontásban előállítjuk a zivatarellipszisek területi eloszlásait egy Magyarországot lefedő rácsmátrixra.

Ekkor megkapjuk az egyes,  $55 \text{ km} \times 55 \text{ km}$ -es méretű rácsdobozokhoz tartozó ellipszis-középpontok számát a

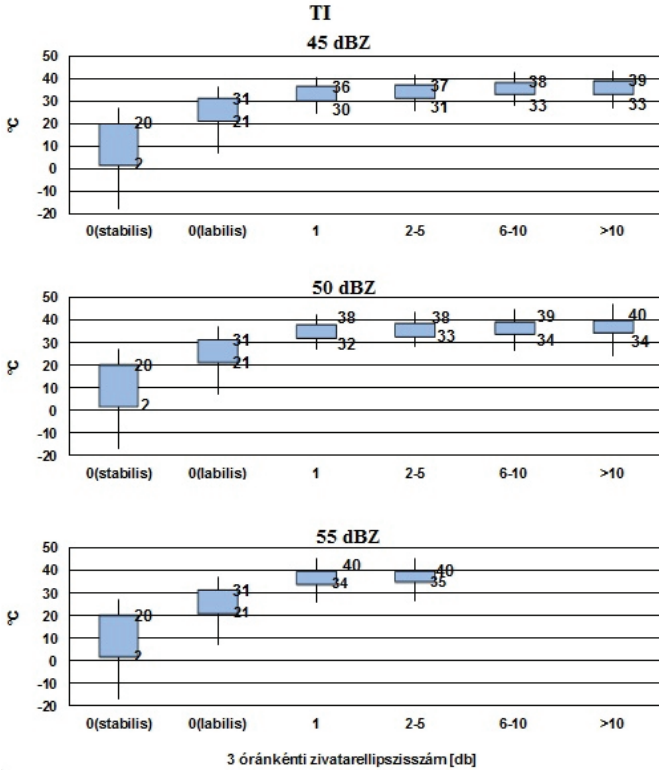
tekhez illeszkedve láthatjuk a detektált zivatárokat modellező ellipszisek segítségével az objektumok keletkezési, áthelyezési és leépülési folyamatait. Az ellipszisközéppontok számaihoz az 1. táblázatban felsorolt modellváltozókat, és a segítségükkel számított egyéb általunk vizsgált paramétereket párosítjuk az adott 3 órás időszakokra.

A kigyűjtött adatsorokat a labilitási energia és a konvektív aktivitás mértéke, azaz a detektált zivatarellipszisek száma alapján Énekes (2010) tipizálását követve különböző kategóriákba soroljuk (2. táblázat). Ha egyetlen ellipszis sem detektálható a vizsgált 3 órás időintervallumban, a leglabilisabb kevertrétegű potenciális energia értéke alapján megkülönböztetünk stabilis, illetve labilis esetet.

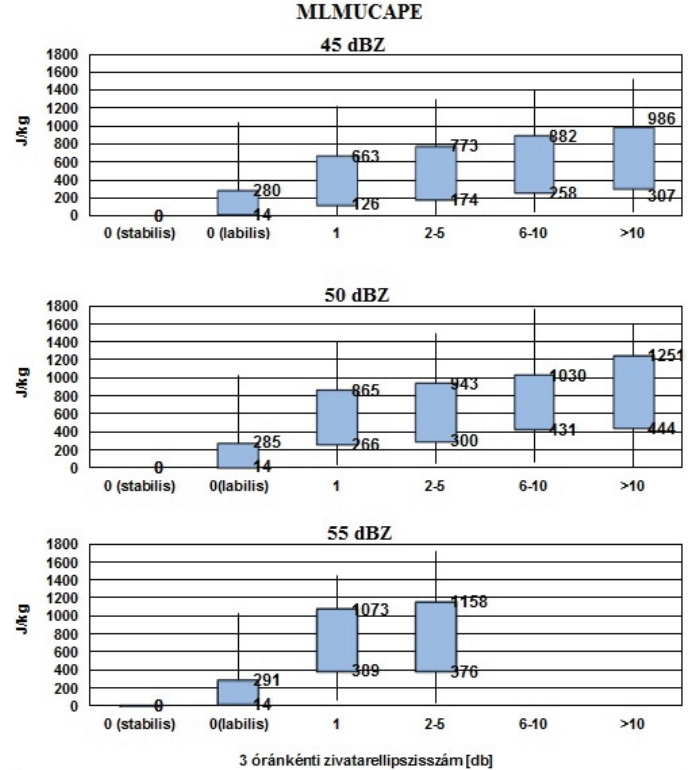
Végül a kapott eredményeket ún. *box-whisker* (box plot) vagy *dobozdiagramok* (Benjamini, 1988) segítségével szemléltetjük. A dobozdiagramok az adatsorok alábbi statisztikai jellemzőit mutatják: 95%-os, 75%-os, 25%-os és 5%-os percentilisértékek. A 25%-os és a 75%-os percentiliseket *alsó* és *felső kvartiliseknek* is szokás nevezni. Eredményeink megjelenítésének áttekinthetősége

érdekében az ábrákon csak a kvartilisek számértékeit tüntetjük fel, a 95%-os és 5%-os percentiliseket a különbségvonalak jelölik.

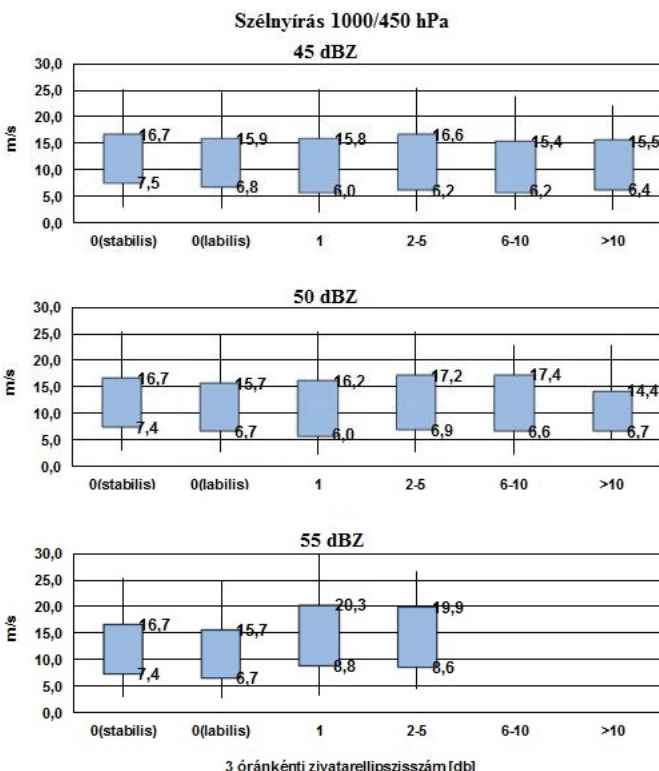
**Eredmények.** Ebben a fejezetben a három különböző reflektivitási küszöbértékre elvégzett vizsgálat során kapott eredményeinket mutatjuk be a 2011–2013 közötti időszakokra. Az egyes labilitási mérőszámokhoz tartozó do-



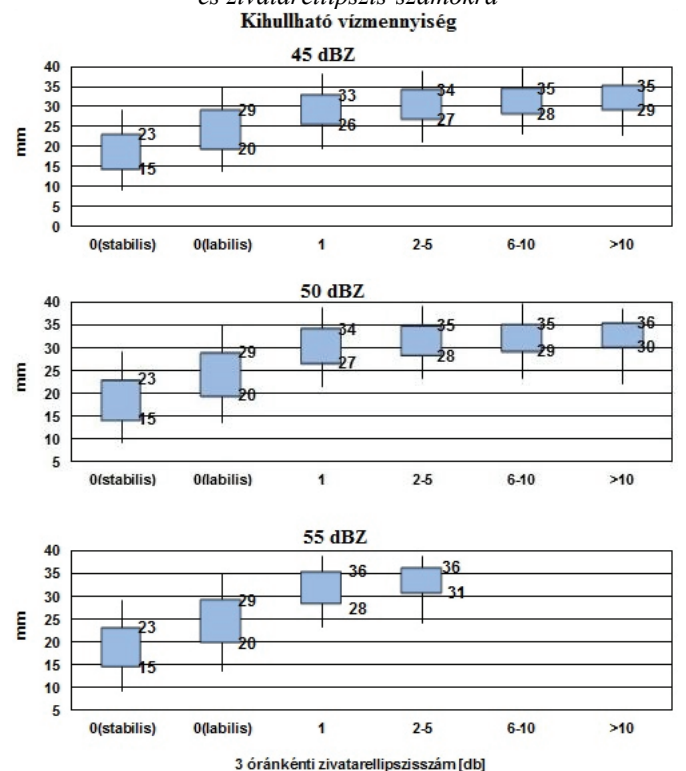
2. ábra: A Thompson Index eloszlása a különböző reflektivitási küszöbértékekre és zivatarellipszis-számokra



3. ábra: A kevertrétegű, leglabilisabb CAPE (MLMUCAPE) eloszlása a különböző reflektivitási küszöbértékekre és zivatarellipszis-számokra



4. ábra: Az 1000 és 450 hPa (0–6 km-es) szintek közötti szélnyírás eloszlása a különböző reflektivitási küszöbértékekre és zivatarellipszis-számokra



5. ábra: A kihullható vízmennyiség eloszlása a különböző reflektivitási küszöbértékekre és zivatarellipszis-számokra

bozdiagramok megjelenítése és elemzése mellett röviden a vizsgált változók meghatározási módját is ismertetjük.

**Thompson Index (TI).** A TI a különböző magassági szintek hőmérséklet és nedvességi viszonyait jellemző K-index (KI), illetve egy adott magasságban az emelkedő légréteg és a környezet hőmérséklet-különbségét szemléltető Best Lifted Index (BLI) különbségeként áll elő (Haklander and Van Delden, 2003). Mivel a BLI értéke konvekciót támogató környezetben negatív, ezért a TI meghatározásakor a K-indexből kivonva kapunk egyre nagyobb TI értéket, ahogyan a zivatarok kialakulásának esélye is növekszik.

Az 2. ábra alapján elmondható, hogy a 30 °C-ot meghaladó értékek esetén már gyakran kialakulnak a vizsgált reflektivitási és területi küszöbértékeknek eleget tevő zivatarellipszisek, amely jellemző minimumérték a radarjel-erősségével tovább emelkedik. A vizsgálat során kapott eredményeink nem térnek el jelentősen a közismert 28-29 °C körüli küszöbértékétől. Mindkét esetben látható, hogy a detektálható objektumok nélküli labilitás már 20 °C fölötti értékek esetén is jelentkezik. A zivatarellipsziseket tartalmazó kategóriák értékei viszonylag szűk tartományon belül helyezkednek el, a 33 °C-os küszöbérték meghaladása már nagy valószínűséggel eredményez több ellipszist. Elmondható továbbá, hogy a reflektivitás és a zivatarellipszisszám növekedésével az index alsó és felső percentilisértékei is növekednek, amely jól tükrözi a hevesebb zivatarok kialakulásához szükséges nagyobb mértékű légköri instabilitást.

**Hozzáférhető konvektív potenciális energia (CAPE).** A CAPE az az energiamennyiség, ami a felszínről induló légrétegben emelkedése során maximálisan felszabadulhat, azaz a termodinamikai diagramon az ún. „pozitív terület” nagysága. A hozzáférhető konvektív potenciális energiát gyakran *SBCAPE*-ként is jelölik, ami az angol „surface based” (talajalapú) kifejezésből ered. Egyéb származtatott változatai még a *MUCAPE* (legnagyobb hozzáférhető potenciális energia) és az *MLCAPE* (kevert rétegű potenciális energia) vagy ezek kombinációja, az *MLMUCAPE* (Markowski and Richardson, 2010). Tapasztalatok alapján célszerűbb a kevert típusú CAPE használata, hiszen ezt alkalmazva már nemcsak a felszíni adatokat vesszük figyelembe, hanem a légréteg 1600-1800 méteres magasságig terjedő hőmérsékleti és nedvességi viszonyait is. Az *MLMUCAPE* az eddig tárgyaltaknál még előnyösebb, ugyanis ekkor az alsó légrétegek különböző tartományaiából kevert és indított CAPE értékek közül a leglabilisabbat vesszük. A kevert típusú labilitási energiák, ellentétben a talajalapúval, megjelenítik az emelt (például éjszakai) konvekciót is, emiatt az elkülönítési osztályozásnál is az *MLMUCAPE*-et használjuk.

Ahogy a 3. ábrán is látható, az *MLMUCAPE* esetében a detektálható zivatarellipszisz nélküli és zivatarellipsziseket tartalmazó kategóriák a reflektivitási küszöbérték emelkedésével egyre jobban elkülönülnek. Heves zivataroknál (45 dBZ) egyetlen észlelhető objektum esetében körülbelül 100–200 J/kg fölötti, míg több ellipszis kialakulásához minimum 200–300 J/kg-nyi energia szüksé-

ges, míg a nagyon heves zivatarok (50 dBZ) esetén 200–300 J/kg, illetve 400 J/kg feletti energia kell.

**Különböző magassági szintek közötti vertikális szélnyírások.** A szélnyírások a szélvektorok térbeli változásait szemléltetik. Az előrejelzési gyakorlatban egyidejűleg általában két szint szélviszonyait hasonlítjuk össze, leggyakrabban a 0-1 km (körülbelül 1000 és 900 hPa), a 0-2,5 km (körülbelül 1000 és 750 hPa), a 0-6 km (1000 és 450 hPa), illetve a 0-8 km (1000 és 350 hPa) szintek közötti szélnyírás kap figyelmet. Vizsgálatunkban a sebesség szerinti különbségeket elemezzük, de az előrejelzési térképeken szokás a szélnyírás vektorának irányát is megjeleníteni.

A 4. ábrán bemutatott, 0 és 6 km-es (1000/450 hPa) magassági szintek közötti szélnyírás dobozdiagramjain gyakorlatilag nincs érzékelhető elhatárolódás a stabilis, illetve a labilis kategóriák között. Elmondható, hogy az értékek széles skálán mozognak, így szűkebb tartományt nem tudunk megadni. Az eredményeket a tapasztalat is megerősíti, a túl erős szélnyírás többnyire rontja a heves konvekció esélyeit, kivéve, ha az rendkívül erős labilitással párosul, ez pedig Magyarország területén viszonylag ritkán fordul elő.

**A bemutatott eredmények összegzése.** Ahogy a korábban részletezett labilitási mérőszámok és egyéb változók dobozdiagramjain is látszik, nem minden vizsgált változóról mondható el, hogy segítségével megfelelő pontossággal jellemezhető a konvektív környezet, hiszen egyes indexeknél még a stabilis és labilis légköri állapotok sem különíthetők el élesen egymástól.

Néhány vizsgált instabilitási, szélnyírási, illetve nedvességi változót tekintve megadhatunk olyan küszöbértékeket, amelyek megjelenése esetén kis esély van heves konvektív esemény létrejöttére a légkörben. A 3. táblázatban összefoglalt adatok alapján látszik, hogy intenzívebb zivatarok létrejöttéhez erősebb légköri instabilitás szükséges. Például, ha az előrejelzendő időszakra nézve a BLI várható értéke magasabb, mint 2 °C, heves zivatar csak kis valószínűséggel fordulhat elő az adott területen, míg nagyon heves zivatar már 0 °C-os BLI érték fölött sem jellemző. Ha a modelladatok alapján a kihullható vízmennyiség értéke nem éri el a 20 mm-t, valamint a 2 méteres magasságban várható specifikus nedvesség a 8 g/kg-ot, akkor a légköri feltételek szintén nem kedveznek az intenzív konvektív jelenségek kialakulásának. A heves időjárási események kialakulásának eldöntésében segítségünkre lehet még a tanulmányban nem részletezett, de megvizsgált Total Totals Index és Boyden Instability Index értékeinek áttekintése is. A kihullható vízmennyiségre kapott eredményeink alapján is elmondható, hogy jól elkülöníthetők egymástól a stabilis és labilis, illetve a „nullás” és a „nem nullás” esetek (5. ábra). A fenti táblázatban összefoglalt értékeket az egyes indexekre vonatkozó 5%-os, vagy 95%-os percentilisek értékeinek vizsgálatával határoztuk meg attól függően, hogy az adott mennyiség magas vagy alacsony értéke segíti elő az intenzív konvektív folyamatok kialakulását.



A 3. táblázatban található nyolc index közül hat esetben szűkebb tartományok is kijelölhetők a heves konvekció lehetőségét, illetve intenzitását illetően, ugyanis ezeknél a változóknál erősebb elkülönülést tapasztaltunk a vizsgált kategóriák percentilisértékei között. A különböző változókhoz tartozó küszöbértékeket a vizsgált, egymástól jól elkülönülő kategóriák 25%-os, illetve 75%-os percentilisek előforduló értékeinek segítségével határoztuk meg. A 4. táblázat második oszlopában azokat az értékeket jelenítettük meg radarjel-erősség szerint csoportosítva, amelynek elérése esetén nagy valószínűséggel számíthatunk kialakuló heves légköri eseményre. Az utolsó oszlopok azokat a küszöbértékeket tartalmazzák, amelyek az adott mennyiségekre vonatkozóan biztosítják az előrejelzőt arról, hogy várható több, akár nagyobb területet is lefedő intenzív zivatar. Például a Thompson Index esetében elmondható, ha értéke meghaladja a 30 °C-ot, a légköri feltételek kedvezőek heves zivatar kialakulásához, míg a 33 °C-nál magasabb érték nagyobb számú detektálható objektum megjelenését is jelezheti. A táblázatok segítségével összegzett eredmények így már könnyedén és azonnal alkalmazhatók a rövidtávú előrejelzések készítésénél, javítva azok pontosságát.

**Összefoglalás, további célok.** A heves konvekciót vizsgáló kutatásunk célja, hogy kiderítsük, mely labilitási mérőszámok alkalmazása javíthatja leginkább a zivataros helyzetben készülő előrejelzések pontosságát. A vizsgált változók a GFS időjárás-előrejelző modell amerikai szerveréről származnak. Az elemzéshez felhasználtuk még az Országos Meteorológiai Szolgálat radarhálózatában található berendezések méréseit is. A keletkező zivatarok radarképeken megjelenő, szabálytalan alakú alakzatait ugyanakkora területű ellipszisekkel modelleztük. A kutatás során csak azokat az objektumokat vettük figyelembe, amelyek eleget tettek az általunk előre meghatározott területi és radarjel-erősségi küszöbértékeknek, tehát legalább 20 km<sup>2</sup>-nyi területen minimum 45 vagy 50 dBZ-s reflektivitással rendelkeztek. A kigyűjtött adatszoportok osztályozására hattagú rendszert alkalmaztunk, amelyben az egyes, vizsgált kategóriákat a detektálható zivatarellipszisek száma alapján különítettük el egymástól. Utolsó lépésként eredményeinket dobozdiagramok segítségével jelenítettük meg. Az elemzést Magyarország területére hajtottuk végre a 2011–2013-as évek zivataros féléveire.

A vizsgálat során összesen 52 labilitási indexet és egyéb paramétert elemeztünk, ezek közül néhányat be is mutatunk. Közülük a Thompson Indexet, az MLMUCAPE-et és a kihullható vízmennyiséget találtuk kifejezetten megbízhatónak a heves konvekcióval járó légköri események előrejelzéséhez. Találtunk azonban olyan változókat is, amelyeknél a zivatarellipszis-szám növekedése és az index értéke között nem volt olyan erős összefüggés, a tanulmányban erre jó példa a szélnyírás. A megfelelő pontosságú előrejelzés készítéséhez nem szabad azonban figyelmen kívül hagynunk a szélnyírásához hasonló eloszlású diagrammal rendelkező labilitási paraméterek értékeit sem, hiszen gyakran hordoznak fontos információt a konvektív környezet állapotáról. Ez különösen az intenzívebb zivatarok esetében fontos, ugyanis esetükben

gyengébb labilitás mellett is létrejöhet erőteljes konvekció a további konvektív paraméterek kedvező fennállása esetén. Ezért az előrejelzések készítésénél kiemelkedően fontos több változó várható értékének együttes szemlélete, valamint a szinoptikai háttérhelyzet kellő ismerete.

A vizsgálatban az 55 dBZ-s küszöbértékkel számolt (extrém heves) ellipsziseket is elemeztük, de azokat területi okokból részletesen nem értékeljük. Ennek ellenére a táblázatokban és az ábrákban feltüntetjük azokat is, amelyeknél kellő számban találtunk ilyen ellipsziseket.

Jövőbeli terveink között szerepel esettanulmányok készítése, azt vizsgálva segítségükkel, hogy a labilitási, szélnyírás és nedvességi paraméterek mely kombinációja a legkedvezőbb a heves zivatarok kialakulásához. Ezeket túlmenően célszerű lenne még a felhasznált radarméréseket más előrejelző modellekben található adatokkal is összevetni a megfelelő időszakokra, összehasonlítva ezzel a modellek érzékenységet a konvektív folyamatokra. Ezeket felül további statisztikai módszerek alkalmazása is szükséges a heves konvekciónak kedvező tartományok pontosabb kijelöléséhez. A bemutatott eredmények azonnal alkalmazhatóak a mindennapi előrejelzések, repülésmeteorológiai prognózisok, illetve veszélyjelzések készítésénél, emellett hasznosak lehetnek a balatoni vízharjelzésnél is.

## Irodalom

- Benjamini, Y., 1988: Opening the Box of a Boxplot. *The American Statistician* 42, 257–262
- Dalla Fontana, A., 2008: Tuning of a thunderstorm index for north-eastern Italy. *Meteorological Applic.* 15, 475–482
- Dixon, M. and Wiener, G., 1993: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting- A Radar-based Methodology. *J. of Atmos. and Oc. T.* 10, 785–797
- Énekes, N. A., 2010: *Intenzív konvektív folyamatok környezetének vizsgálata modell analízisek alapján* (Diplomamunka). ELTE-TTK Meteorológiai Tanszék, Budapest, pp. 57
- Haklander, A. J. and Van Delden, A., 2003: Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands. *Atmos. Res.* 67–68, 273–299.
- Horváth, Á., Ács, F., and Seres, A. T., 2008: Thunderstorm climatology analyses in Hungary using radar observations. *Időjárás* 112, 1–13
- Kohlmann, M., 2013: *Konvektív paraméterek vizsgálata modellanalízisek alapján* (Diplomamunka). ELTE-TTK Meteorológiai Tanszék, Budapest, pp. 86
- Markowski, P. and Richardson, Y., 2010: *Mesoscale meteorology in midlatitudes*. Wiley-Blackwell, pp. 430
- NCEP, 2013: *Az NCEP ismertetői a GFS modellről*. Világhálón közzétett írások: <http://www.nomads.ncep.noaa.gov> [olvasva: 2013. október 1.]
- NOMADS, 2013: *Data Access, Hi-Res NCEP Model Datasets, GFS*. <http://nomads.ncdc.noaa.gov/data/gfs4> [olvasva: 2013. október 01-15.]
- Seres, A. T., 2015: *Zivatarok meteorológiai elemzések és a nagy csapadékhozamú, konvektív jelenségek, időszakok vizsgálata Magyarországon* (Doktori értekezés). ELTE-TTK, Földtudományi Doktori Iskola, Budapest, pp. 115