

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Meteorológiai Tanszék

# **A TRACE3D módszer adaptálása instabilitási vonalak vizsgálatára**

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

**Megyeri Otília Anna**

Meteorológus MSc,

Időjárás előrejelző szakirány

Témavezető:

**Mona Tamás** – MTA-CsFK Földtani és Geokémiai Intézet

Belső konzulens:

**Dr. habil. Ács Ferenc** – ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2017

## TARTALOMJEGYZÉK

|  |    |
|--|----|
| 1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS .....   | 3  |
| 2. A ZIVATARCELLA AZONOSÍTÓ ÉS KÖVETŐ MÓDSZEREK ALAPPILLÉREI .....   | 4  |
| 2.1. Műhold adatokon alapuló algoritmusok.....   | 4  |
| 2.1.1. RDT (Rapid Developing Thunderstorms).....   | 4  |
| 2.1.2. ForTraCC (Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters).....   | 6  |
| 2.1.3. Cb-TRAM.....  | 7  |
| 2.2. Villám adatokon alapuló algoritmusok .....  | 7  |
| 2.2.1. Cellsearch.....   | 7  |
| 2.2.2. Betz et al. cellakövető módszere .....  | 8  |
| 2.3. Kombinált adatokon alapuló algoritmusok .....   | 9  |
| 2.3.1. Steinecker et al. módszere.....   | 9  |
| 2.3.2. Lakshmanan et al. módszere .....  | 9  |
| 2.3.3. Bonelli és Marcacci módszere.....   | 9  |
| 2.3.4. ec-TRAM .....   | 10 |
| 2.4. Radar alapú algoritmusok .....  | 11 |
| 2.4.1. COTREC (COntinuity of TREC vectors) .....   | 12 |
| 2.4.2. TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking Analysis and Nowcasting).....  | 13 |
| 2.4.3. SCIT (Storm Cell Identification and Tracking).....  | 13 |
| 2.4.4. TRT (Thunderstorm Radar Tracking).....  | 15 |
| 2.4.5. ETITAN (Enhanced TITAN).....  | 16 |
| 2.4.6. TRACE3D .....   | 17 |
| 3. A TRACE3D MÓDSZER ALKALMAZÁSA VIZSGÁLATAINKBAN, A MeMoRIaTrack (Megyeri-Mona Radarcell Identification and Tracking) ..... | 23 |
| 3.1. A felhasznált adatok és a programozási környezet .....  | 23 |
| 3.2. A csapadékrégiók és erős intenzitású cellamagok azonosítása.....  | 24 |
| 3.3. A cellamagok időbeni követése .....   | 25 |
| 4. A MeMoRIaTrack VERIFIKÁCIÓJA ESETTANULMÁNYOK ÁTTEKINTÉSÉVEL .....   | 29 |
| 4.1. 2015. július 8-ai zivataros helyzet elemzése.....   | 30 |
| 4.2. 2015. július 25-ei zivataros helyzet elemzése.....  | 33 |
| 4.3. 2016. július 13-14-ei zivataros helyzetek elemzése .....  | 36 |
| 5. STATISZTIKAI VIZSGÁLATOK .....  | 39 |
| 5.1. Vizsgálatok korreláció-számítással.....   | 39 |
| 5.2. Belső távolságokon alapuló vizsgálatok .....  | 41 |
| 6. ÖSSZEFOGLALÁS .....   | 44 |
| 7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....  | 46 |
| 8. FELHASZNÁLT IRODALOM.....   | 47 |
| FÜGGELÉK .....   | 51 |

## 1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

Szakkolgozatomban (Megyeri, 2015) korábban bemutattam a hazai és nemzetközi gyakorlatban legismertebb, legtöbbet használt radar alapú cellakövető algoritmusokat. A cellakövető algoritmusokat ún. nowcasting rendszerekben használják, melyekkel nyomon követhető az aktuális időjárás, valamint ultra-rövid távú előrejelzést készíthetünk. A különböző – radar, villám, és műhold alapú – módszerek közös pontja, hogy a viharok azonosításához objektív küszöb(ke)t használnak (reflektivitási, villámgyakorisági, hőmérsékleti) és meghatározott területi minimummal kell rendelkezniük. Ezután minden esetben cellakarakterisztikákat határoznak meg (alak, méret, középpont stb.). A cellakövetés legfontosabb eleme a mozgás vektor kiszámítása. Ezt a cella korábbi mozgásából számolják ki átlagolással, születő cellák esetében pedig statisztikai módszerekkel adnak rá becslést. Két időpillanat közötti cellák párosításánál a legtöbb algoritmus – bizonyos számítások, megkötések után – a legrövidebb útvonalú párost választja. Az egymáshoz közeli, szomszédos cellák azonosítása mindig nehéz feladat, hiszen könnyen összetéveszthetőek a cella szétválással, avagy összeolvadással. Ezért utóbbi probléma megoldásának kiemelt figyelmet szentel minden technika.

Jellemzőik alapján összehasonlítottam a módszereket és ezek alapján témavezetőimmel a TRACE3D-t találtuk a legérdekesebbnek gyakorlati vizsgálatok elvégzéséhez. Ez más módszerektől eltérően először csapadékrégiókat azonosít, majd ezeken belül intenzív, környezetükre potenciálisan veszélyes cellamagokat különít el több, ún. adaptív (mindig az adott helyzethez igazodó) küszöb használatával.

Jelen munka első felében kivonatos betekintést nyújtok a legismertebb műhold-, villám és radar adatokon alapuló módszerekre, majd részletesen bemutatom a TRACE3D módszert. A 3. részben ismertetem az általunk alkalmazott algoritmust, a MeMoRIaTrack-et (Megyeri-Mona Radarcell Identification and Tracking) melynek hatékonysága és tesztelése e dolgozat célkitűzése. Erre az 4. fejezetben térek majd ki. A program nagy előnye, hogy a követési módszer kihasználja a cellamagok csapadékrégiók szerinti csoportosítását, mely hozzájárul a pontosabb cellakövetéshez. Az 5. fejezetben statisztikai módszerek segítségével fogom igazolni ezt a gyakorlati tapasztalatot, azaz, hogy a cellamagok egyértelmű kapcsolatban állnak az ezeket tartalmazó csapadékrégiókkal.

## 2. A ZIVATARCELLA AZONOSÍTÓ ÉS KÖVETŐ MÓDSZEREK ALAPPILLÉREI

Ebben a fejezetben a hazai és nemzetközi irodalomban fellelhető legismertebb és/vagy legtöbbször használt módszereket fogom bemutatni. Terjedelmi okokból csak a legfontosabb jellemzőiket említhetjük meg, részletesebb leírást az egyes algoritmusok szakirodalmában találhatunk.

Már igen korán, 1953-ban fejlesztettek radar adatokon alapuló algoritmust a csapadékgócok követéséhez, amelyben extrapolációval végeztek pozíció előrejelzést (*Ligda*, 1953). Nem sokkal később, az űrtechnológia előretörésével megszületett az első műhold adatokon alapuló módszer, mely a felhők mozgása alapján készített prognózist (*Fujita*, 1969). Ahogy egyre fontosabb lett a pontosabb előrejelzések készítése, úgy fejlődtek a cellakövetési programok is (*Crane*, 1979; *Rosenfeld*, 1987; *Chen and Kavvas*, 1992; *Dixon and Wiener*, 1993). A villám lokalizációs rendszerek kiépítésével és fejlesztésével újabb lehetőség nyílt a prognosztika számára (*Finke*, 1999; *Lang et al.*, 2004; *Tuomi and Larjavaara*, 2005; *Betz et al.*, 2008).

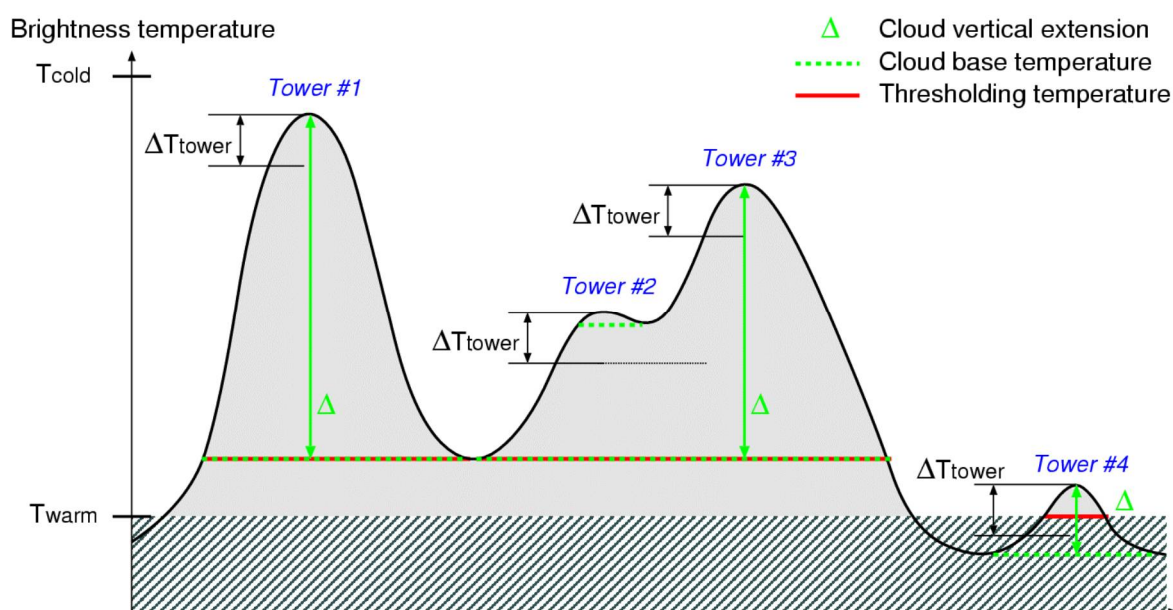
### 2.1. Műhold adatokon alapuló algoritmusok

Ezek a módszerek geostacionárius és/vagy kvázipoláris műholdképek alapján azonosítanak konvektív- és zivatarcellákat, illetve követik azok mozgását. Ebben az esetben a műholdképek fényességi hőmérsékletét használják fel az azonosításra. Tisztán műholdas módszer kevés van, a tapasztalatok szerint szükség van kiegészítő adatforrásokra is (pl. villám, radar) a hatékony működéshez. Az alábbiakban két, műholdas méréseket felhasználó technikára nézünk példát.

#### 2.1.1. RDT (Rapid Developing Thunderstorms)

Az egyik legismertebb műholdas zivatarcella követő rendszer az RDT. Az algoritmus alapvetően a geostacionárius műholdak IR 10.8  $\mu\text{m}$  hullámhosszú képeit használja fel (*Morel et al.*, 2002). A konvektív cellák pontosabb elkülönítésére további csatornákat is figyelembe vesznek (WV6.2, WV7.3, IR8.7 és IR12.0  $\mu\text{m}$ ), ezen kívül adott esetben numerikus előrejelzési- és villám adatokat is figyelembe vesz [2 – eumetsat.int]. Úgy

fejlesztették ki, hogy már olyan kezdődő konvektív cellák észleléséhez is alkalmas legyen, melyek néhány pixel nagyságúak. Definíció szerint cellának tekinti azt az összefüggő (térbeli rácson vett) pixel halmazt, melyben a fényességi hőmérséklet alacsonyabb egy adott küszöbértéknél – ami minden cellánál egyedileg kerül megadásra –, illetve elér egy bizonyos nagyságot. Az RDT ezen felül adaptív hőmérsékleti küszöbölést használ az IR képekre, melyet *Crane* (1979) fejlesztett ki először. A módszer lényegét az 1. ábrán láthatjuk. Itt látható, hogy egy egyedileg meghatározott fényességi hőmérsékleti küszöböt használunk (*Thresholding temperature*), ami alapján több nagyobb objektumot azonosítunk cellaként. Ezután lokális minimumokat keresünk ezen a területen belül, majd ekörül minden egyes felhőobjektumnál egyedileg határozzuk meg a konkrét cellák határát. A lokális minimumok az egyes cellák fényességi hőmérsékletét reprezentálják, tehát a lokálisan leghidegebb érték mutatja meg a felhőtetőt.



1. ábra. Adaptív hőmérsékleti küszöbök egy ideális felhőrendszer keresztmetszetén  
(*Morel et al., 2002*)

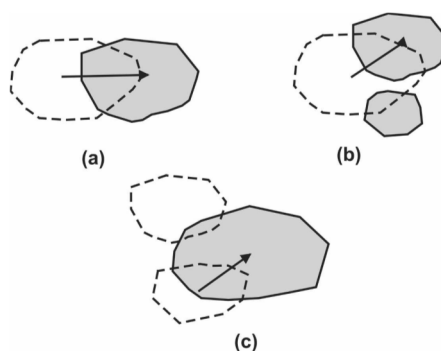
Ebből levonunk egy előre meghatározott differencia küszöböt ( $\Delta T_{tower}$ ) és amennyiben a különbség ( $\Delta$ ) a felhőalap hőmérséklet (*Cloud base temperature*) alá (az ábrán fölé) esik, az objektumot konvektív cellaként azonosítjuk. Minden nagyobb felhőalakzaton belül a legintenzívebb, legmagasabb felhőtetőjű cella alapjánál húzzuk meg a többi azonosított cella alapját. Mivel minden esetben egyedileg határozzuk meg az elsődleges küszöböt, ezért lehetőség van potenciálisan kialakuló cellákat is figyelemmel kísérni. Erre példa a *Tower #4*

elnevezésű cella, ahol bár a felhőalap hőmérséklet a meghatározott hőmérsékleti küszöb fölé (ábrán: alá) esik, a különbség hőmérsékletre vonatkozó definíció mégis teljesül.

A követési rendszer ún. területi átfedéssel használja a detektált cellákat, azaz a detektált cellára készít egy elsődleges pozícióbecslést annak sebessége alapján. Amennyiben ez a becsült pozíciójú cella megfelelő százalékban fedti a következő időlépcsőben detektált cellát, a párosítás megtörténik. Abban az esetben, ha a fenti módszerrel nem találja meg a következő időlépcsőbeli párt, egy többlépcsős módszert alkalmaz, melynek részleteit *Morel* (2002) munkája tartalmazza.

### 2.1.2. ForTraCC (Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters)

A ForTraCC algoritmus az RDT-hez nagyon hasonló lépéseket követ (*Vila et al.*, 2008). A módszer GOES IR 10.8  $\mu\text{m}$ -es műholdképeket használ fel a mezoskálájú konvektív rendszerek (Mesoscale Convective System) azonosításához és követéséhez. Az azonosítási módszer fényességi hőmérsékleti küszöbértéke 235 K, mert Dél-Amerika területén – ahol a módszert aktívan használják a flash floodok előrejelzésére – a kísérletek során ez vált be leginkább. A meghatározott területi minimum 2400  $\text{m}^2$ , tehát egy nagyobb objektumot (MCS) követünk. A követési algoritmus átfedéssel használja a cellákat, ami feltételezi, hogy a  $t_1$ -beli és  $t_2$ -beli pozíciójú cellák néhány rácspixelben fedik egymást a műholdképen, illetve hasonló alakúak, mérettel rendelkeznek.



2. ábra. Cellák követése (a) általános esetben, (b) szétválás esetén, (c) összeolvadás esetén. (*Vila et al.*, 2008)

Ha az első időpillanatbeli ( $t_1$ ) és az azt időben követő ( $t_2$ ) pozíció 25%-ban fedik egymást, akkor a cellákat összepárosítjuk (2.a. ábra). Amennyiben több  $t_2$ -beli cellával is átfedésbe kerül a  $t_1$ -beli cella, szétválásról beszélhetünk. Ekkor a program a nagyobb átfedésű cellát követi tovább, mint a  $t_1$ -beli utódját, a kisebb átfedésűt pedig új cellaként kezeli (2.b. ábra). Ellenkező esetben – összeolvadásnál –, amikor két  $t_1$ -beli cella kerül átfedésbe egy  $t_2$ -beli

cellával, a nagyobb átfedésű  $t_1$ -beli cellát tekinti a  $t_2$ -beli nagy elődjének, a kisebb átfedésűt pedig eltűnő cellaként értelmezi (2. c. ábra).

### 2.1.3. Cb-TRAM

A Cb-TRAM intenzív konvektív cellák azonosításához és követéséhez METEOSAT-8 SEVIRI adatokat használ fel (Zinner *et al.*, 2008). A módszer a kialakuló konvektív cellák azonosítására lett kifejlesztve, illetve olyan területekre, ahol nem áll rendelkezésre radar adat. A cellák megfelelő azonosításához többféle hullámsávú képet is használ: HRV (nagyfelbontású látható tartományú), IR10.8  $\mu\text{m}$  és WV6.2  $\mu\text{m}$  képeket. A módszer nem a hagyományos objektív hőmérsékleti küszöbvel dolgozik, hanem adaptív technikával határozza meg a cellát. Ennek érdekében tropopauza hőmérsékleti adatokat is figyelembe vesz, melyet rövid távú előrejelző modellekből vagy az ECMWF operatív analízis adataiból nyernek ki. A követési algoritmus a sebesség vektor becslésén alapuló előrejelzett és a tényleges pozíció átfedésén alapul.

## 2.2. Villám adatokon alapuló algoritmusok

A cella azonosító és követő rendszerek egy másik csoportját a villám detektáláson alapuló rendszerek adják. Ezek a módszerek önmagukban nem nyújtanak kielégítő eredményt a cella azonosítás során, ezért általában radar- és műhold rendszerekkel párhuzamosan használják, specifikusan a zivatarosan aktív cellák azonosítására. Ettől függetlenül létezik néhány program, mely kizárólag villám adatokat használ fel intenzív csapadékgócok detektálására.

A villámlás jellemzésére gyakran használják a villámgyakoriságot – vagy villámsűrűséget –, melyet adott felbontású rácshálózat segítségével adnak meg és egy grid területén lévő villámok számát jelenti.

### 2.2.1. Cellsearch

A Cellsearch-t (Tuomi and Larjavaara, 2005) Finnországban fejlesztettek ki, mely az azonosításra helyezi a hangsúlyt, hiszen egy zivatar jól jellemezhető a villámlási karakterisztikájával. Általánosságban cellának tekintjük azt a területet, ahol a villám sűrűség elér egy adott küszöbértéket, ami a vizsgálatok szerint gyakran egybeesik a cella csapadék

magjával. Nem világos azonban, hogy hol húzzuk meg egy cella határát radar, avagy műhold adatok használata nélkül. A Cellsearch a cellamag azonosítása után a detektált egyedüli, új villámokat is megvizsgálja, hogy a cellához tartoznak-e. Ehhez az alábbi szabályokat és paramétereket alkalmazza az algoritmus:

- egy keresési sugarat, amin belül még a cella részének tekinthetjük a villámot ( $R=15$  km),
- az utolsó- és a vizsgált villám között eltelt idő ( $t \leq 15$  perc),
- az utolsó- és a vizsgált villám közötti távolság és a  $t$  szorzata, ami nem haladhat meg egy küszöböt,
- a cella középpontját a villámok ( $\sim 20$  db villám) helyzetének átlagolásával.

Amennyiben a vizsgált villámhoz több, mint egy cella esetében, igaz az első három tulajdonság, a legközelebbi cellához társítjuk. Ha nem találunk megfelelő cellát, a villámot egy új cella részének tekintjük.

### 2.2.2. Betz et al. cellakövető módszere

2006-ban üzemelték be a LINET időmérésen alapuló villámlokalizációs rendszerét, melyhez egy cellakövető algoritmust is fejlesztettek (Betz *et al.*, 2008, 2009). A módszer kezdetleges, de a LINET adatok felhasználásával tökéletesen alkalmas a villámkarakterisztikák megfigyelésére, hiszen a lokalizációs rendszer képes az IC (in cloud, felhőn belüli) villámok detektálására is. Az azonosítási módszer egyszerű: amennyiben a villámsűrűség elér egy minimum küszöbértéket, feltételezzük, hogy az adott helyen cella van. A cella határát a villámgyakoriság küszöbérték alá csökkenése húzza meg. A követési algoritmus a két időlépcső közötti legrövidebb elmozdulás alapján párosít, a továbbiakban pedig egyszerű extrapolációval számol 3–4 időlépcső adatai alapján. Az időlépcsők tekintetében figyelembe kell venni, hogy – a radarral ellentétben, mely az általa kibocsátott jel visszaérkezését detektálja – a villámlokalizációs rendszer a villámok jeleit folyamatosan detektálja. Azonban a cellakövetéshez egy térbeli rács mellett szükség van időlépcsőkre is, melyek nagyságát a fenti okok miatt önkényesen adjuk meg.

A módszer továbbfejlesztett változata az ec-TRAM (Meyer *et al.*, 2013) melyet a következő fejezetben fogok bemutatni.



## 2.3. Kombinált adatokon alapuló algoritmusok

### 2.3.1. Steinecker et al. módszere

Ez az algoritmus villám és radar adatokat egyaránt felhasznál, mely konvektív cellák és cellarendszerek követésére egyaránt alkalmas (*Steinacker et al.*, 2000). A villám adatokat (4x4) km<sup>2</sup>-es, 20 perces felbontásban adjuk meg, Descartes-i koordinátarendszerben. A radar adatokat a villáméhoz hasonlóan transzformáljuk. Első lépésként a bemenő adatokat Gauss-filterrel simítjuk, majd megkeressük a villámsűrűség és reflektivitás lokális maximumait, melyeknek meg kell haladniuk egy bizonyos küszöböt. Ezek körül lesznek az azonosított cellák. A küszöböt az adott légköri képződmény nagyságrendi skálája határozza meg, melyet a Gauss-görbe félszélességéből számolnak. Ehhez a reflektivitás adatok esetében egy további kritériumot is figyelembe kell venni, a lokális maximum körüli 8 pixelre. A követési algoritmus ezután több lépcsős kritérium rendszerrel állapítja meg a cellák elmozdulás vektorát.

### 2.3.2. Lakshmanan et al. módszere

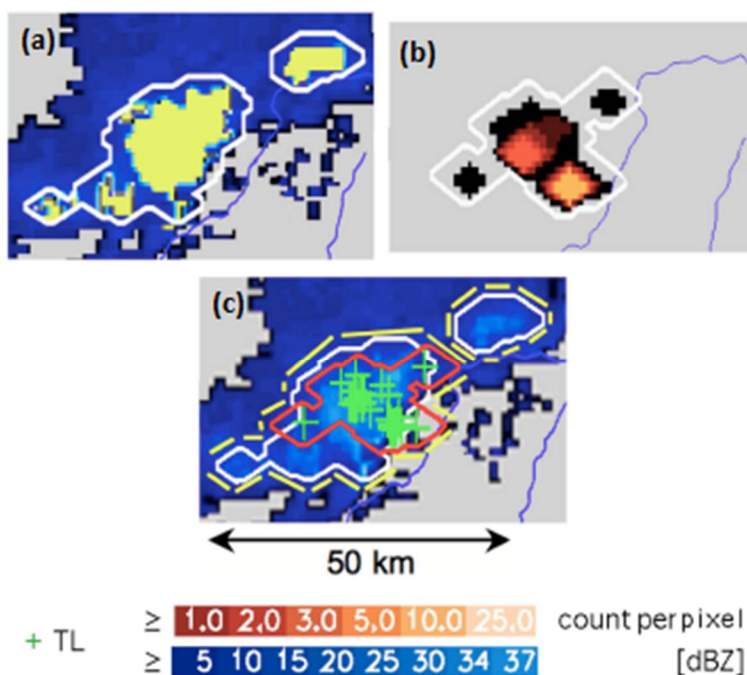
Ez egy műhold- és radar adatokat felhasználó algoritmus, mely speciális K-közép klaszterelemzést használ a cellák különböző léptékű azonosításhoz (*Lakshmanan et al.*, 2003). Utóbbi eljárást felhasználja a követési algoritmusban is, hogy minimalizálja a párosítási hibákat. A sebességek becsléséhez mind a GOES IR 11 μm műholdképeket, mind a radar képeket felhasználja, majd az eredményt Kálmán-filterrel simítja. A módszer előnye, hogy képes az egyes különböző nagyságrendű cellák vizsgálatára.

### 2.3.3. Bonelli és Marcacci módszere

Ebben az esetben szintén radar és villám adatokkal dolgoznak, azonban itt eltérő rácsméretet használnak a maximumok keresésénél (*Bonelli and Marcacci*, 2008). A villám sűrűséget (5x5) km<sup>2</sup>-es gridekben, a reflektivitási adatokat pedig a szokásos (1x1) km<sup>2</sup>-es rácsnál vizsgálja meg, 15 perces intervallumokban. A villámok esetében azért adnak meg nagyobb rácsfelbontást, mert a gyakorlatban kevés villám esne egy adott (1x1) km<sup>2</sup>-es rácsba. A módszer lokális maximum kereséssel kezdi az azonosítást, mely körül fix küszöböt használ az intenzív cellák berajzolására (ez a radar adatoknál 44 dBZ). A követési algoritmus a két időlépcső között elvégzi az összes lehetséges párosítást, de a TITAN-nal ellentétben

nem csak a legrövidebb távolság alapján dönt, hanem több paraméter számolása után dönti el, melyik a megfelelő pár. Ilyen például az alakjukat adó pixelek korrelálása, a sebesség, irány, stb. Ezekre a paraméterekre osztályozó függvényt ír fel, mely megmutatja, hogy melyik a megfelelő párosítás.

### 2.3.4. ec-TRAM

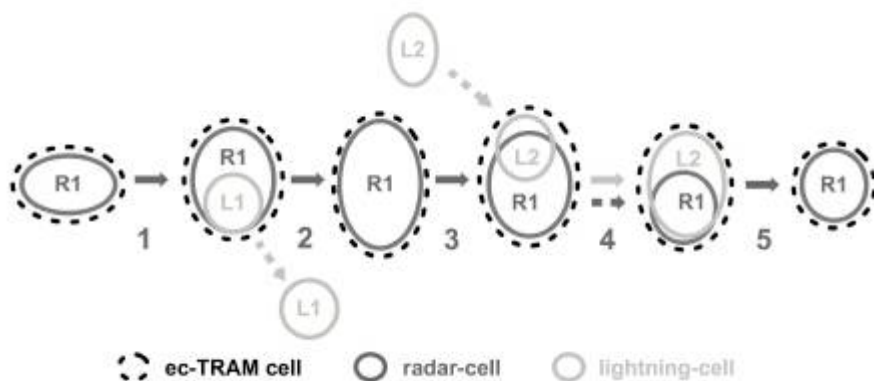


3. ábra. (a) Radar cella azonosítása (fehér vonallal határolva) (b) Villám cella azonosítása (c) A két cella összevetésével azonosítjuk az ec-TRAM cellát (Meyer *et al.*, 2013).

A korábban említett ec-TRAM (Electrically charged Cells Tracking and Monitoring) algoritmus radar és 3D-s LINET villám adatokra épül fel (Meyer *et al.*, 2013). A módszer a külön-külön is működő korábbi rad-TRAM (Kober and Tafferner, 2009) és az új li-TRAM rendszereket kombinálja, felhasználva a Cb-TRAM (Zinner *et al.*, 2008) műholdas követő algoritmusát.

Az ec-TRAM cella azonosításának első lépése, hogy azonosítsuk a radar cellát 33 dBZ küszöbértékkel (3.a. ábra). Második lépésként azonosítjuk a villám cellákat, melyek a legintenzívebb villámokat tartalmazó, legnagyobb villám sűrűségű területek (3.b. ábra). Ezután a két cellát átfedésbe hozzuk egymással, és ez adja meg az ec-TRAM cellát (3.c. ábra). A továbbiakban a követési algoritmus a radar cellák mozgását a becsült és a tényleges  $t_2$ -beli pozíció átfedése alapján határozza meg, míg a villám cellákat a  $t_1$ -beli és  $t_2$ -beli cellák átfedésével. Ezután a program egy újabb ec-TRAM cellát hoz létre, és ez lesz az előző ec-

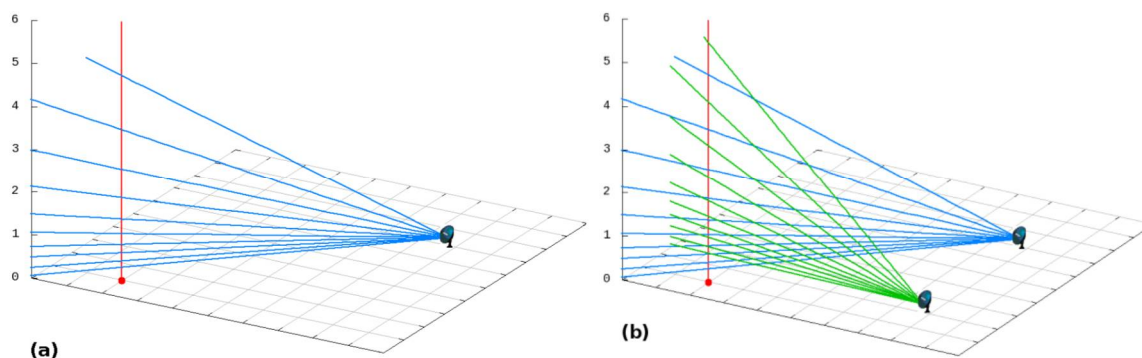
TRAM cella  $t_2$ -beli pozíciója (4. ábra). A szerzők a gyakorlati vizsgálatok során alkalmasnak találták a módszert a zivatarcellák ill. összetett rendszerek kialakulásának és fejlődési fázisainak vizsgálatára.



4. ábra. Az ec-TRAM cella követésének menete (Meyer *et al.*, 2013).

## 2.4. Radar alapú algoritmusok

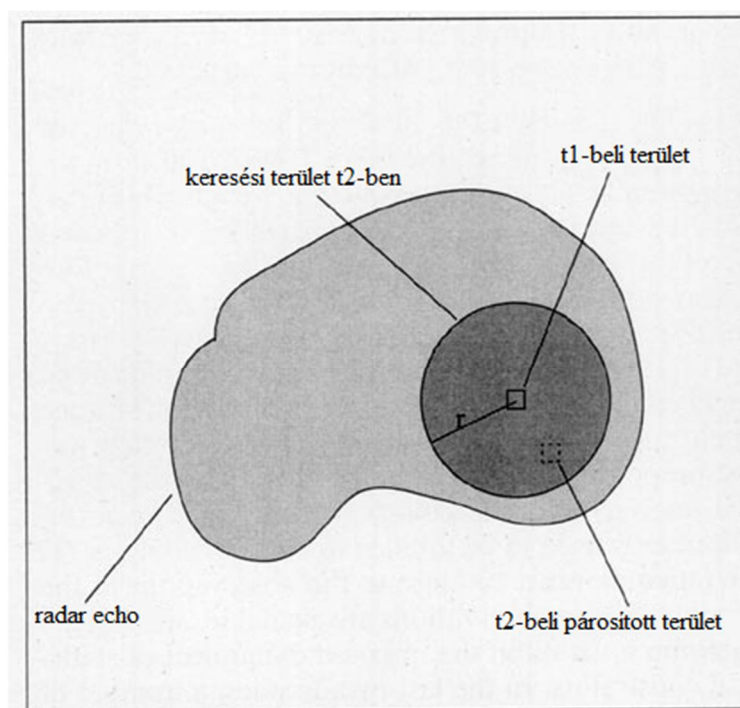
Jelen dolgozatnak nem célja magának a RADAR (Radio Detection and Ranging) műszernek, illetve a működésének bemutatása. Ebben a témában számtalan munka készült az utóbbi években (Szegeci, 2012; Fekete, 2014; Hajnal, 2015). A radar adatokon alapuló algoritmusok esetében kétféle adatformát különböztetünk meg: a nyers- és a kompozit radar adatokat. A radar több magassági szögön körbeforogva regisztrálja a reflektivitási értékeket, ami egy 3D-s képet eredményez. Ha ezen a képen pixelenként kiválasztjuk az oszlopban található maximális reflektivitási értéket, megkapjuk a 2D-s kompozit radar képet (5. ábra).



5. ábra. Az oszlopmaximum-leválogatás sematikus ábrája. A kék és zöld vonalak jelölik a radar sugárnyalábokat az egyes magassági szögeken, a piros vonal pedig kijelöli a függőleges egyenest/oszlopot, ami mentén történik a maximum érték keresés. (a) Egy radar mérés esetén, (b) két radar mérés esetén. (Szegeci *et al.*, 2014)

### 2.4.1. COTREC (COntinuity of TREC vectors)

A program a TREC (Trecking Radar Echoes by Correlation, (Rinehart and Garvey, 1978)) algoritmus egy továbbfejlesztett változata, mely korrigálja a sebességmező radar mérésekből fakadó hibáit (Li et al., 1995). A többi ismertetett cellakövető módszerrel ellentétben ez ún. területkövető technika és a Doppler-mérésekből származó szél adatokat is felhasználja. A módszerben nem azonosítunk konkrét cellákat, hanem egy adott reflektivitási küszöbvel detektált radar echo-n belül kijelölünk több, egymástól bizonyos távolságra lévő, adott nagyságú területet. Ezt elvégezve a  $t_1$  és  $t_2$  időpillanatokra, majd párosítva a két területet minden módon, minden párra kiszámoljuk a reflektivitásaik korrelációs együtthatóit. A számítási igény csökkenthető a  $t_1$ -beli területek köré húzott  $r$  sugarú körrel (6. ábra), melyen belül keresendő  $t_2$ -beli párjuk. Azok a párosok lesznek az igaziak, melyek korrelációs együtthatója a legnagyobb.



6. ábra. A  $t_1$ -beli terület párosítása  $t_2$ -beli helyzetével (Li et al., 1995 nyomán)

Ezután interpolálással megadhatjuk a terület mozgásvektor mezőjét. Abban az esetben, amikor a mérésből fakadóan hiányos, üres terület jelenik meg az echo-n belül, a szomszédos mozgásvektorokból számoljuk a területre jellemző mozgásvektort. A terület növekedés és csökkenés esetén előfordulhat, hogy a program nem talál párt a  $t_1$ -beli vagy  $t_2$ -beli területnek, mert az nem éri el a reflektivitási küszöböt. Ekkor kiszámoljuk a lehetséges párok közötti átlagos reflektivitás-különbséget, és a küszöb alatti területet a  $t_1$  vagy  $t_2$ -beli COTREC

vektormezővel jellemezzük. A pozitív értékű reflektivitás-különbséggel rendelkező területek a vihar erősödését jelzik, a negatív értékkel rendelkezők a vihar gyengülését.

#### **2.4.2. TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking Analysis and Nowcasting)**

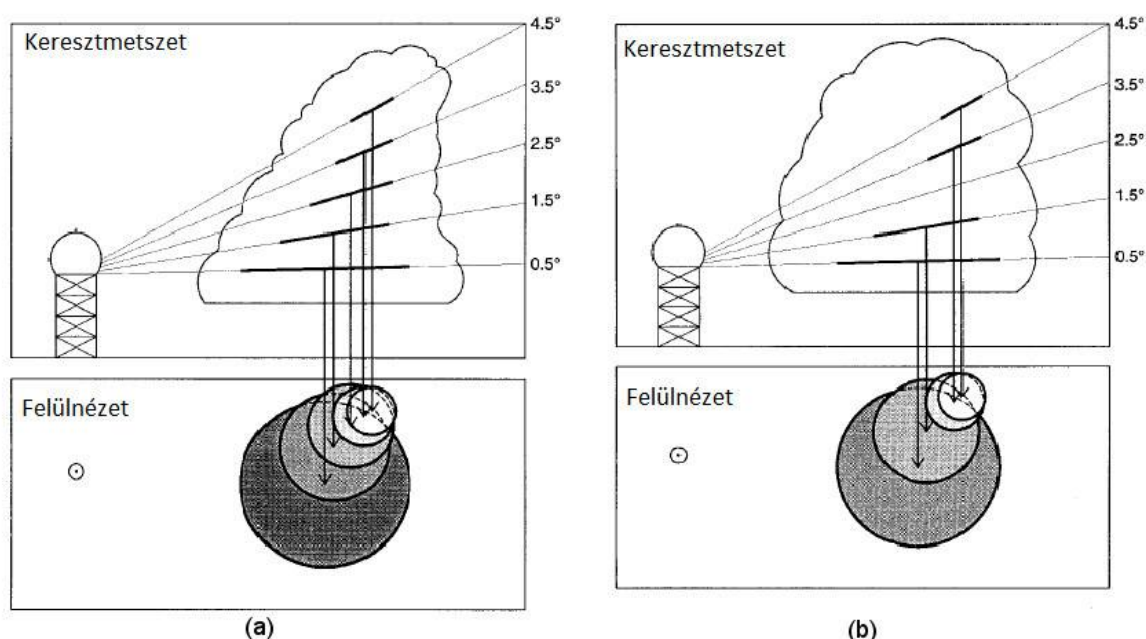
A TITAN a legismertebb zivatarcella felismerő és -követő módszer (*Dixon and Wiener, 1993*), melyet, vagy annak továbbfejlesztett változatát világszerte alkalmazzák a gyakorlatban, így a hazai meteorológiai elemzésekben is (*Horváth et al., 2008; Seres, 2014; Seres and Horváth, 2015; Mona et al., 2016*). Ezt az eljárást eredetileg nyers, 3D-s radar adatok felhasználására tervezték, de a számítások egyszerűsítése miatt e nyers adatokból először kompozit radar képeket szerkesztenek. Magát a cellát egy olyan egybefüggő területként jellemezzük, ahol a reflektivitás értékek meghaladnak egy adott küszöbértéket. A cella alakját ezután ellipszissel közelítjük, melynek alapvető tulajdonságait (méret, reflektivitással súlyozott középpont, a fő- és melléktengelyek hossza, illetve a főtengely és a koordináta rendszer által bezárt szög) könnyen kiszámíthatjuk. Értelemszerűen egy időlépcsőben több cella is lehet, és ezeket követjük időlépcsőről időlépcsőre.

A követés gyakorlatilag két egymás utáni időlépcsőben detektált cella párosítását jelenti. Kiemelendő, hogy a párosított cellák mindig hasonló karakterisztikával (méret, alak, stb.) rendelkeznek. A párosítást úgy végezzük, hogy a párosított cellák minél hasonlóbba és minél közelebb legyenek egymáshoz. Az ilyen módon történő cellapárosítással megkapjuk a cellák útvonalait. A TITAN a választott küszöbértékek miatt sokszor elnagyoltan kezeli az egymáshoz közeli cellák azonosítását és mozgását, így az összeolvadó és szétváló cellákét is. Ezekben az esetekben pozíció előrejelzést készítünk egy adott időpillanatban azonosított cellá(k)ra és ha ez átfedésben van a párosítással kapott pozícióval, kijelenthetjük, hogy valóban összeolvadás, vagy szétválás következett be.

#### **2.4.3. SCIT (Storm Cell Identification and Tracking)**

A TITAN hátrányát javítandó (*Johnson et al., 1998*) egy három dimenziós cella azonosító és követő módszert fejlesztettek ki. A három dimenziós radar adatokból (7.a. ábra) csak a környezeti zajokat és egyéb mérési hibákat szűrték ki. Láthatjuk, hogy a megfigyelés öt magassági szögön zajlik. A cella azonosításához mindegyik magassági szögön hét különböző reflektivitási küszöbértéket használnak, szemben a TITAN módszerével, ahol

mindössze egy küszöbérték használatos. A hét küszöbérték alapján beazonosítjuk a viharterületet (terjedelmi okok miatt ezt az eljárást nem fogom részletezni), ami látható az 7.a. ábrán is, ahol az adott magassági szögekhez tartozó viharterületeket a nyilak jelölik. E viharterületek területi elrendeződése megadja a vihar horizontális vetületét (7.a. ábra bal alsó része), azaz a cellát. Egymáshoz közeli cellák egynek tekintendők, ha nem rendelkeznek különálló vihar-területekkel ugyanazon magassági szögön, illetve a cellák középpontjai horizontálisan és vertikálisan is adott távolságon belül vannak (7.b. ábra). Amennyiben az azonosítási folyamat túl sok egymáshoz közeli cellát azonosít, az algoritmus csak az erősebb, nagyobb cellákat használja fel a további számításokhoz.

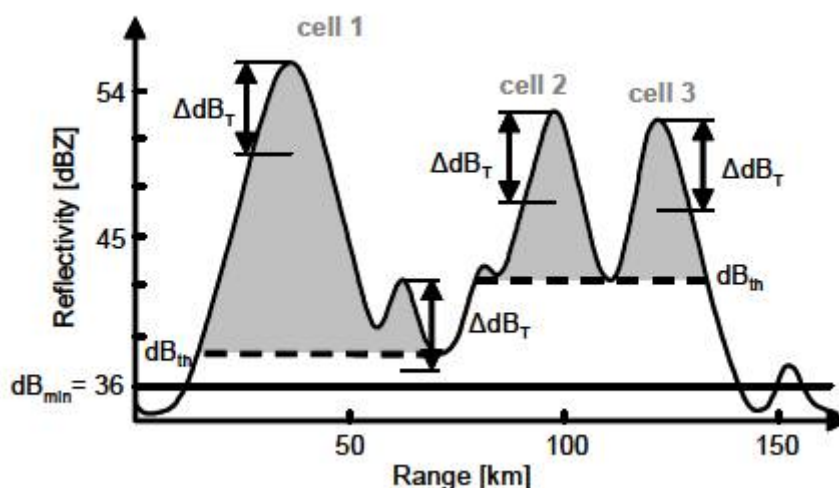


7. ábra. (a) A 3D vihar cella keresztmetszete és a viharterületek vertikális helyzete felülnézetből, (b) a 3D vihar cella keresztmetszete vertikális réssel (pl. adathiány) és a viharterületek vertikális helyzete felülnézetből (Johnson et al., 1998 nyomán).

A vihar követéséhez két, időben egymást követő cellát párosítunk össze. A párosításhoz természetesen itt is szükség van a reflektivitással súlyozott középpontra, melynek következő időpillanatbeli pozíciójára egy becslést adunk meg. Ezután megnézzük, hogy a detektált cellák középpontja milyen távolságra esik a becsült pozíciótól és a legközelebbit rendeljük a vizsgált cellához. A párosítások elvégzése után a program kiszámítja a cella tulajdonságait és karakterisztikáit.

#### 2.4.4. TRT (Thunderstorm Radar Tracking)

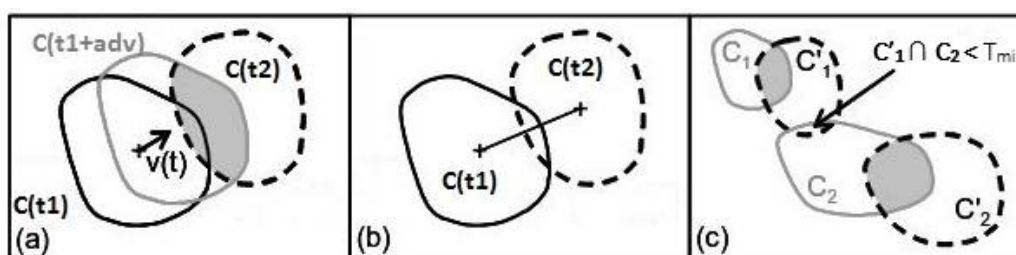
A TRT módszer kompozit radar adatokat használ fel egy szigorú, hét lépcsős szűrést követően, ami így pontosabb előrejelzést tesz lehetővé az Alpokban (Hering *et al.*, 2004). A detektáló algoritmus célja, hogy konvektív cellákat azonosítson csapadékrendszerekben. Ehhez több, adaptív reflektivitási küszöbértéket használnak, melyet az RDT-ben alkalmaztak először. A 8. ábrán látható a három küszöbérték:  $dB_{th}$ ,  $dB_{min}$  és  $\Delta dB_T$ . A módszer a cellákat olyan, egymáshoz folyamatosan kapcsolódó radar pixelek halmazának tekinti, melyek nagyobbak egy adott területnél, illetve a pixelek reflektivitása elér egy adaptív  $dB_{th}$  küszöböt.



8. ábra. Egy idealizált csapadékrendszer vertikális reflektivitási keresztmetszete (Hering *et al.*, 2004).

Utóbbinak meg kell haladnia a  $dB_{min}$  minimum értéket. A lokális maximum reflektivitás és a cella alapjánál lévő reflektivitás különbségének nagyobbak kell lennie, mint a  $\Delta dB_T$  küszöb érték (8. ábra). Ezzel biztosítjuk, hogy csak az intenzívebb csapadékgócokat azonosítsuk cellaként. A  $dB_{th}$  értéket úgy választjuk meg, hogy kielégüljön az összes említett feltétel. Minden egyes cellánál egyéni küszöböt használunk fejlettségi állapotától függően. Az 6. ábrán három cellát azonosíthatunk a megadott feltételek szerint. Az 1. és 2. cella is tartalmaz egy kevésbé intenzív cellát, ezeket nem tekinthetjük önálló cellának, hiszen intenzitásuk alapján nem teljesítik a  $\Delta dB_T$  küszöböt. Ebben az esetben ezeket a nagyobb cella részének tekintjük. Az ábrán láthatunk egy önálló kis cellát 150 km-nél, de ez szintén nem éri el a küszöböt, valamint nem egy nagyobb cella közvetlen szomszédságában helyezkedik el, így elvetjük.

A cellakövetési módszer azonban – az előző algoritmusokat tekintve – új koncepciót mutat. A  $t_1$ -ben detektált cella számított mozgási sebessége alapján becslést készítünk a  $t_2$ -beli pozíciójára. Ezután megvizsgáljuk a  $t_2$ -ben ténylegesen detektált cella és a  $t_2$ -beli becsült cella átfedésének mértékét (9.a. ábra). Amennyiben ez meghalad egy előre beállított értéket, a  $t_1$ -ben és  $t_2$ -ben detektált cella párosítása megtörtént (9.b. ábra). Többcellás esetben mindig a nagyobb átfedéssel rendelkező páros határozza meg a  $t_1$ -beli cella párját (9.c. ábra). Összeolvadásnál és szétválásnál a kis cellákhoz ún. pszeudopixelet (fiktív, elméleti pixeleket) adunk a megfelelő átfedési nagyság eléréséhez.



9. ábra. (a)(b) Cellák párosítása  $t_1$  és  $t_2$  időlépcső között.  $C(t_1)$  jelöli a  $t_1$ -beli cellát,  $C(t+adv)$  a sebesség vektor segítségével kiszámolt becsült pozíció  $t_2$ -ben,  $C(t_2)$  a  $t_2$ -ben azonosított cella. A (b) ábrán látható „+” a cella középpontját jelöli, (c) a két időlépcsőbeli cellaterületek legnagyobb átfedése határozza meg a cella igazi  $t_2$ -beli párját (Hering *et al.*, 2004 nyomán).

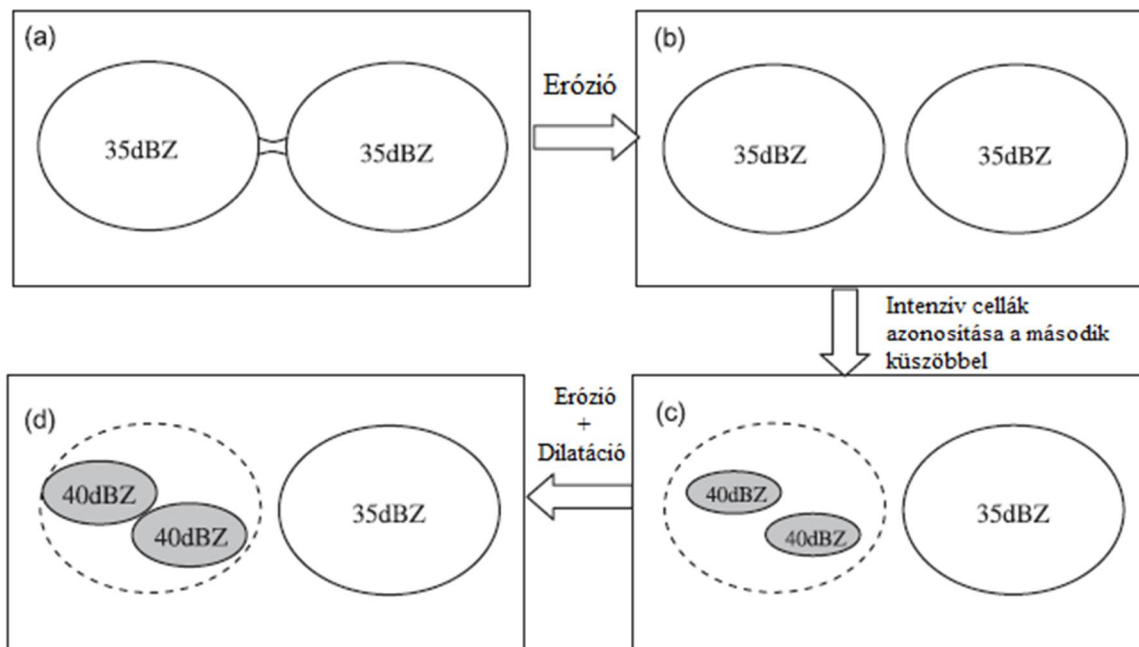
#### 2.4.5. ETITAN (Enhanced TITAN)

Ez a módszer a TITAN-ban használt matematikai eljárásra épít, amit pontosítottak a közeli és összeolvadó cellák azonosítása érdekében (Han *et al.*, 2009). Az azonosítási eljárás már ismert: meghatározunk egy adott reflektivitási küszöböt meghaladó összefüggő pixelsort, majd ezeket szomszédosság alapján csoportokba rendezzük. Ezt minden magassági szögön elvégezzük és egy három dimenziós képet kapunk a celláról, melynek kompozit vetületével dolgozunk tovább. A következő lépésben a látszólag egybeolvadt cellákat különálló cellákra bontjuk (10.a. és b. ábra). Az így kapott kisebb cellákra (10.b. ábra két cellája) egy újabb, magasabb küszöb értéket definiálunk, hogy azonosítsuk a cellamagokat (10.c. ábra baloldali cella). Ezt az eljárást további küszöb értékekkel is bővíthetjük az intenzitástól függően. Utolsó lépésként az azonosított cellamagokat az eredeti cella határáig tágítjuk (10.d. ábra).

A követési algoritmus részben megegyezik a TRT-nél megismert átfedéssel technikával. Azonban, ha az átfedés nem éri el a beállított határértéket, azaz, nem talál párt az eredeti cellának, a párosítást a TITAN módszernél megismert elvek alapján végzi el, azzal az



eltéréssel, hogy a cella elmozdulási vektorának sebessége maximális legyen. További érdekesség, hogy a mozgásvektor helyes meghatározásához kereszt-korrelációt is alkalmaz, melyet a TREC/COTREC módszer is használ.



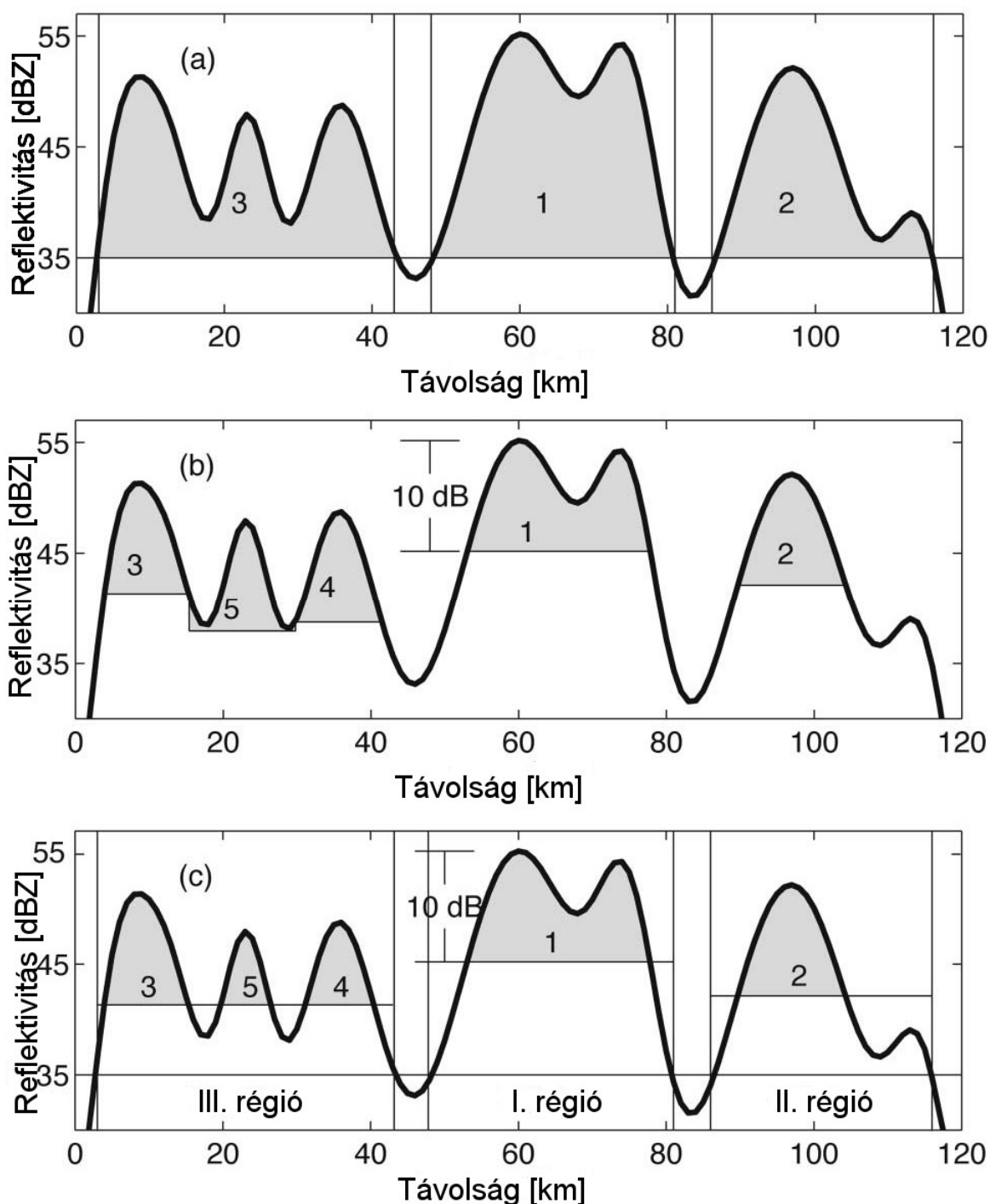
10. ábra. (a) Tévesen detektált összeolvadás (b) az eróziós módszert alkalmazva megkapjuk a két különálló cellát, (c) a második küszöböt használva mindkét cellában elkülönülnek az intenzív cellamagok, (d) megnöveljük a kapott cellamagokat az eredetileg detektált cella határáig, így megkapjuk az intenzív kis cellákat (*Han et al.*, 2009 nyomán).

#### 2.4.6. TRACE3D

A módszer nyers, 3D-s radar adatokat használ fel, melyet a főalgoritmustól elkülönülten, több lépésben szűrnek meg a mérési zajoktól (*Handwerker*, 2002). Ilyen probléma lehet azonosításnál a bright band-effektus (olvadási réteg megjelenése), a háttérzaj (pl. WiFi-jel), a repülőgépektől, madaraktól érkező jel, a tereptárgyokról visszaverődő jel és a gyengítés. Mindezen mérésből eredő hibára megoldást kínál a TRACE3D előszűrési algoritmus.

A legtöbb algoritmusnál a cellát egy olyan összefüggő területként/térfogatként definiáltuk, mely egy adott küszöbértéket meghaladó pixelek csoportja (11.a. ábra, pl. TITAN). Mint azt láhattuk, ebben az esetben nagyon nehéz egymástól elkülöníteni a szomszédos, közeli cellákat, illetve instabilitási vonalak vizsgálatánál igen nagy kiterjedésű cellák azonosításához vezethet. Ekkor nincs lehetőség az egyes konvektív cellák

tanulmányozására, ezen felül nagyobb esély van mérési hibák cellaként való azonosítására is.



11. ábra. A cella azonosítás módjai, a küszöbértékek használata: (a)  $\text{dBZ}_{\text{limit}}$  (35 dBZ), csapadékrégiók azonosítása cellaként (3 db cella) (b)  $\text{dBZ}_{\text{limit}} + \text{dBZ}_{\text{diff}}$  (10 dBZ), intenzív cellamagok azonosítása cellaként (5 db cella) (c) Régiókra bontás +  $\text{dBZ}_{\text{limit}} + \text{dBZ}_{\text{diff}}$ , intenzív cellák azonosítása a legintenzívebb cella alsó határa alapján (5 db kisebb cella) (Handwerker, 2002, nyomán).

A specifikusabb cella definiálás érdekében a területet/térfogatot ún. intenzív csapadék régióként határozzuk meg (11.c. ábra) és ezen belül keressük az intenzív reflektivitási magokat, melyeket cellamagként fogunk definiálni. Ehhez adaptív küszöbértéket vezetünk be, amit a program minden egyes cella adott fejlettségi állapotának megfelelően határoz meg (11.b. ábra). Megkeressük az intenzív csapadék régió lokális reflektivitási maximumait, és azokat az összefüggő területeket/térfogati részeket, melyekben a reflektivitási érték nem alacsonyabb, mint a maximum érték és a  $dBZ_{diff}$  (itt: 10 dBZ) különbsége, celláknak definiáljuk. Az 11.b. ábrán látható, hogy a kettes számú cella melletti kis csúcs nem teljesíti a küszöb által meghatározott feltételt, így nem tekintendő sem a cella részének, sem önálló cellának. Ezen kívül megfigyelhető, hogy a fenti módszerrel definiált cellahatárok eredményeképpen a cellák egymásba érhetnek, mint a 11.b. ábra harmadik és ötödik cellája. (Az ábrán a cellák újraszámozása intenzitásuk szerint, csökkenő sorrendben történik). A szétválasztáshoz megkeressük a csapadék régió legintenzívebb celláját, és annak az alsó küszöbértékével (lokális maximum-  $dBZ_{diff}$ ) húzzuk meg a régió többi cellájának határát (11.c. ábra). Látható, hogy a cellák meghatározott térfogata függ a legintenzívebb cella reflektivitás értékétől, így önmagában a kiterjedésükkel nem jellemezhetjük a cellák intenzitását. Fontos megjegyezni, hogy a kiválasztott küszöbök változtatásával kevésbé intenzív, születő cellák is tanulmányozhatók.

Következő lépésként a program kiszámítja az azonosított cellák (cellamagok) tulajdonságait: a pozíció koordinátáit, a cella súlyozott középpontját, a mérés magassági szögét, a cellát tartalmazó csapadék régiók számát, az egyes cellákat alkotó pixelek/gridek számát, illetve a dátumot és időt. A súlyozott középpontot az alábbi módon számítják ki:

$$\vec{r} = \frac{\sum w_i \vec{r}_i}{\sum w_i}, \quad (1)$$

ahol  $w_i$  az  $i$ . elem súlya (reflektivitás, csapadék intenzitás, logaritmusos reflektivitás, stb.),  $\vec{r}_i$  pedig a pozíció koordinátája. A továbbiakban ezeket fogja használni az algoritmus a követési eljárásnál. A cella következő időlépcsőbeli ( $t_2$ ) helyzetére egy becslést készítünk, melyet a jelenlegi ( $t_1$ ) pozíció és a mért vagy számított mozgássebesség segítségével számítunk ki. A becsült pozíció köré egy adott sugarú kört húzunk, melyen belül keresendő a ténylegesen detektálható  $t_2$ -beli párja (12. ábra).

Az extrapolációhoz a sebességeket többféleképpen is meghatározhatjuk. Amennyiben a cellát már legalább két, egymást követő radarmérésben megfigyeltük, az adott időlépcső alatti elmozdulás sebessége fogja megadni a sebességet:

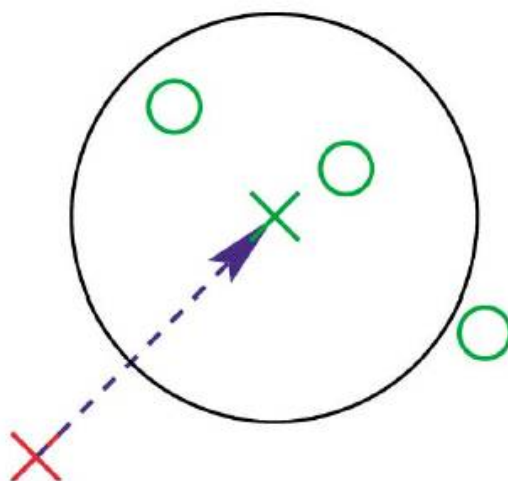
$$\vec{v}_e(t) = \vec{v}_m(t - \delta t) = \frac{\vec{r}_m(t - \delta t) - \vec{r}_m(t - 2\delta t)}{\delta t}, \quad (2)$$

ahol  $\vec{r}_m(t - 2\delta t)$  és  $\vec{r}_m(t - \delta t)$  a cella két mérés során regisztrált pozíciója,  $\delta t$  az időlépcső.

Amennyiben a cella mozgásáról több korábbi mérés is rendelkezésre áll, az extrapolációhoz szükséges sebességet az összes mért sebesség súlyozott összegeként adjuk meg:

$$\vec{v}_e(t) = k \cdot \vec{v}_e(t - \delta t) + (1 - k) \cdot \vec{v}_e(t - \delta t), \quad (3)$$

ahol  $k$  paraméter meghatározza az egyes régi adatok információtartalmának arányát. Ha  $k=0$  értéket vesz fel, kizárólag az utolsó mért sebesség kerül felhasználásra, míg 0,5-0,7 közötti érték esetén nincs érdemi hatás az eredményre. A szerzők a  $k=0,7$  értéket használták számításaik során.



12. ábra. A cella követés menete. A piros kereszt jelöli a cella  $t_1$ -beli helyzetét, a zöld kereszt a  $t_2$ -re becsült pozíciót. A fekete kör azt a régiót jelöli, melyen belül keresendő a cella  $t_2$ -ben, a zöld körök pedig a  $t_2$ -ben detektált lehetséges párok (Handwerker, 2002).

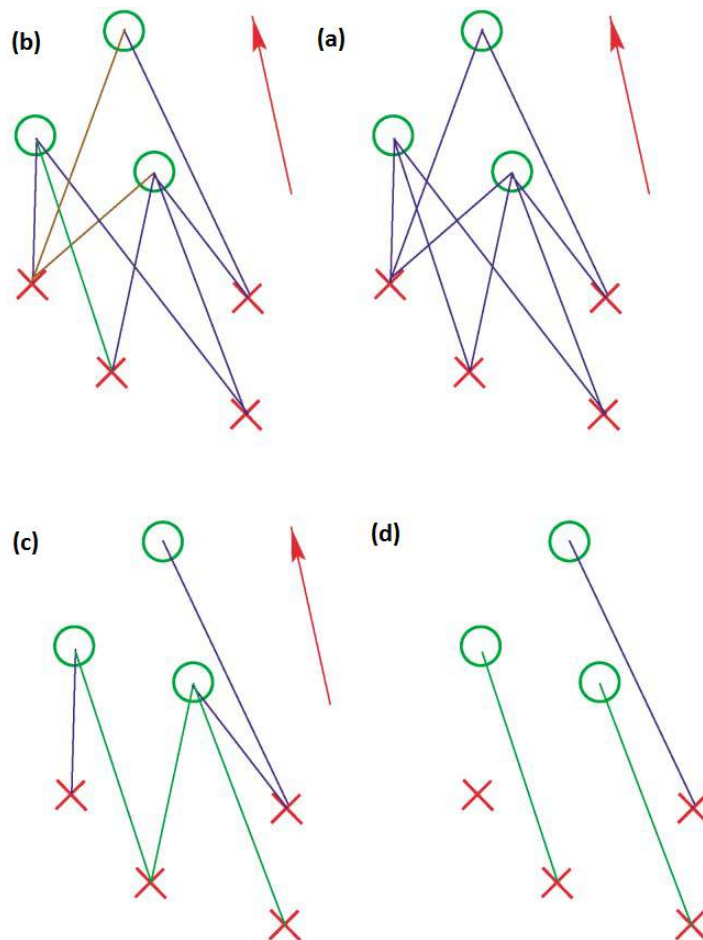
A fenti esetekben a sebesség számítása egyszerűnek bizonyul, de új cellák születésekor más méréseket kell figyelembe venni. Az egyik lehetőség, hogy a születő cella körüli régebbi, megfigyelt cellák átlagával jellemzem a cella mozgását, vagy Doppler-elvű

szélességmérésből számítjuk ki (VVP – volume velocity processing). Időnként előfordul, hogy semmilyen adat sem áll rendelkezésre a becsléshez. Mivel ebben az esetben elenyésző számú cella található a vizsgált mezőn, a következő időlépcsőben, a térben legközelebbi pozícióban detektált cellát tekintjük a születő cella utódjának.

A  $t_2$ -beli becsült pozíció kiszámítása után a súlyozott középpont köré egy kört húzunk, melyen belül akár több potenciális párt is találhatunk a  $t_1$ -beli cellának. A keresési sugár megadása kétféleképpen történhet:

1. a becslésünk alapján megtett utat megszorozzuk egy ún. sebességfaktorial (*VelocityFactor*), ami egy a felhasználó által meghatározott paraméter, tipikusan 0,6 értéket vesz fel ( $|\overline{v_e(t)}| \delta t \cdot VF$ );
2. a  $t_1$ -ben vizsgált cella legközelebbi szomszédjától vett távolságát megszorozzuk egy ún. szomszédos faktorial (*NextNeighborFactor*, tipikusan 0,6), ahol a távolság nem lehet nagyobb, mint 10 km.

A lehetséges cellapárosok esetében meg kell vizsgálni, hogy alakra, méretre hasonlítanak-e egymáshoz. Ha igen a párosítás egyértelmű, de egyéb esetben további vizsgálatok szükségesek. Az egyik lehetséges módszer a helyes páros megtalálására a keresztező cellák kizárása. A természetben csak bizonyos ritka alkalmakkor keresztezi egymást két cella útvonala, így feltételezhetjük, hogy a párosításban megjelenő keresztezések hibák. Ebben az esetben csak az útvonalak keresztezéséről van szó, tehát a cellák „nem találkoznak”, tehát nem történik összeolvadás. A probléma megjelenésekor leválasztjuk azokat a cellacsoportokat, melyeknél ez megjelenik, és minden  $t_1$ -beli cellát összekötünk minden  $t_2$ -beli cellával azon a területen belül (13.a ábra). Ezután kiszámoljuk a  $t_1$ -beli cellák átlagos mozgásvektorát (piros nyíl), és ezt egyeztetjük a potenciális, behúzott elmozdulásokkal. Azt az elmozdulást tekintjük elfogadhatónak, amelyik a leginkább illeszkedik ezzel az átlagvektorral (zöld vonal, 13.b ábra) és minden ezt keresztező potenciális útvonalat törölünk (barna vonalak, 13.b és c. ábra). Ezt a módszert addig folytatjuk, míg nem maradnak keresztező útvonalak vagy egy már elvetett útvonalat talál a program elfogadhatónak (13.d ábra). Amennyiben a két időpillanat között párosított cellák területükben vagy alakban eltérnek, feltételezhetjük, hogy szétválás vagy összeolvadás következett be.

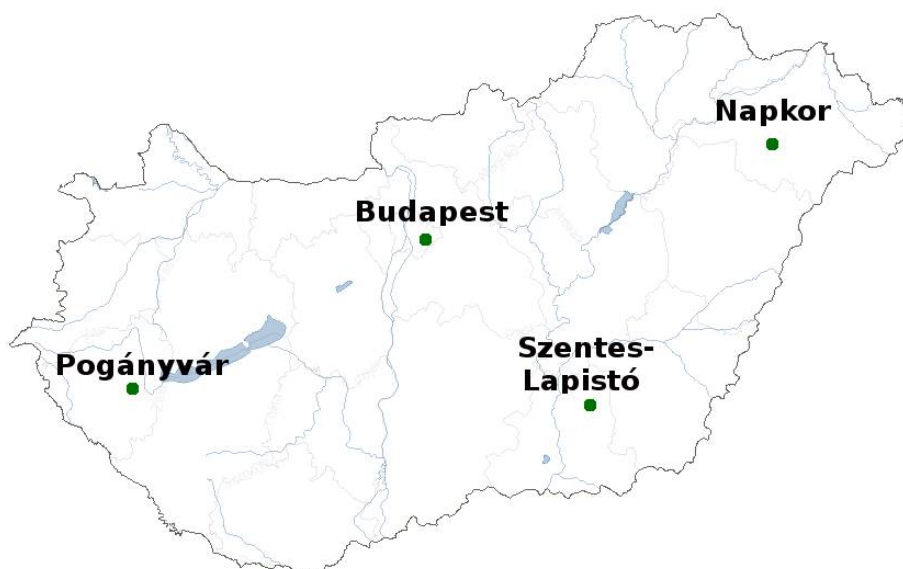


13. ábra. Útvonal keresztezések eltávolítása. A piros kereszt jelöli a  $t_1$ -ben, a zöld körök pedig a  $t_2$ -ben detektált cellák pozícióját. A piros nyíl a  $t_1$ -beli cellák átlag mozgásvektora. Az összekötő vonalak lehetséges útvonalakat jelölnek. (a) Közeli cellák esetén minden cellát összekötünk egymással a két időlépcső között. (b) Az átlag vektorral konzisztens elmozdulást megtartjuk, minden azt keresztező útvonalat elvetünk. (c) és (d) Ezeket a lépéseket addig folytatjuk, míg nem lesz több keresztezés vagy egy elvetett útvonal elfogadhatónak minősül (*Handwerker, 2002*).

### 3. A TRACE3D MÓDSZER ALKALMAZÁSA VIZSGÁLATAINKBAN, A MeMoRIaTrack (Megyeri-Mona Radarcell Identification and Tracking)

#### 3.1. A felhasznált adatok és a programozási környezet

Vizsgálataink során az Országos Meteorológiai Szolgálat 5 perces radar méréseiből származó, bináris kompozit radar adatokat dolgoztunk fel. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnak jelenleg négy radar berendezése van az országban, melyek elhelyezkedését a 14. ábrán láthatjuk. Ezek az adatok már előszűrési eljárásokon estek át, így a mérési hibákból (pl. WLAN jelek, domborzat hatása, stb. ) származó jelek korrigálva vannak. A programot ANSI C nyelven írtuk, ami többek között lehetővé teszi az adatok dinamikus beolvasását, kezelését pointerek segítségével. Ez egyben helytakarékosabb is, hiszen nem egy tömbként tárolja el az adat mezőt, hanem folytonos adatsorként. Ez a programnyelv lehetővé teszi továbbá struktúrák használatát, melyek segítségével képesek vagyunk egy vagy több, egymással összefüggő változót kapcsolati szempontok szerint csoportosítani, majd egyetlen egységként hivatkozni rájuk, meghívni őket a számításokhoz. A Pascal programnyelven például rekordnak nevezik az ehhez hasonló elrendezést (*Kernighan and Ritchie, 2008*).



14. ábra. Az Országos Meteorológiai Szolgálat radarjainak elhelyezkedése Magyarországon.  
(*Szegedi et al., 2014*)

### 3.2. A csapadékrégiók és erős intenzitású cellamagok azonosítása

A munkánk során minden adatot struktúrába mentve tároltunk (15. ábra). Az adatok beolvasásakor a bash-ból beolvastuk a fájl nevében található időbélyegzőt is, és egy idő struktúrát hoztunk létre számára (*TimeStr*; év, hó, nap, óra, másodperc).

Első lépésként kiszűrtük a radarképen a  $Z=255$  értékeket, melyeket 0-nak jelöltünk, hiszen ezek nem csapadékos területek. Ezután átszámoltuk a fájlban található  $Z$  reflektivitási értékeket a hagyományosan használt dBZ logaritmikus reflektivitási értéké, melyhez az alábbi képletet használtuk:

$$dBZ = \frac{Z}{2} - 32 . \quad (4)$$

Az azonosítás kezdeti lépéseként csapadékrégiókat azonosítottunk rekurzív (önmagát meghívó) függvény segítségével. Ennek során megnéztük, hogy az adott vizsgált pixel meghaladja-e a reflektivitási küszöbértéket, mellyel egy csapadékrégiót definiáltunk. Mivel különös hangsúlyt akartunk fektetni arra, hogy az összefüggő csapadékrégiót egyként kezelje, ezért egy alacsonyabb, 20 dBZ-s értéket választottunk (LIMIT). Amennyiben az adott pixel reflektivitása ezt eléri, vagy meghaladja, egy adott régió elemeként jelöli meg. Ezután megnézi, hogy a szomszédos pixelek reflektivitás értéke eléri-e a LIMIT-et. Ehhez a függvény meghívja önmagát és addig folytatja a keresést, amíg csak az összefüggő területhez új szomszédos pixelt talál. A megtalált, LIMIT feletti értékkel rendelkező pozícióban, egy új adatmezőre (*Region pointer*) egy régió azonosítót mentünk el (*regioID*). A *regioID* értékének növekedése egyben a megtalált régiók számát is jelöli az adott radarképen. A könnyebb kezelhetőség érdekében a folyamat végén a régió adatmező elemeit struktúrába mentjük (*loc (j, i, dBZ)*). A struktúra szerkezete lehetővé teszi a régiót alkotó pixelek számának pontos ismeretét és dinamikus számlálását. Ezután az algoritmus megkeresi az egyes azonosított régiókon belüli abszolút maximum (*regio+k → maxdBZ*) helyet és elmenti a struktúra adott régiójához (15. ábra). A régióon belüli intenzív cellamagok azonosításához először lokális maximumhelyeket (*locMax(j,i,dBZ)*) keresünk, mely során megvizsgáljuk, hogy egy éppen vizsgált elem magasabb értéket vesz-e fel, mint a környezete. Csak azok az elemek kerülnek mentésre, melyek magasabbak, mint a LIMITCELL értéke. Ennek vizsgálatainkban a 35 dBZ-t választottuk, hogy a legveszélyesebb, legintenzívebb cellák



magját azonosíthassuk. A cellamagok határát a régió abszolút maximum értéke alapján határoztuk meg, azaz minden olyan elem, aminek reflektivitása eléri, vagy meghaladja a  $maxdBZ-10$  dBZ értéket, cellamagként kerül elmentésre. Természetesen ennek az értéknek továbbra is magasabbnak kell lennie, mint a LIMITCELL. A keresés során ugyanazt a rekurzív függvényt használtuk, mellyel a régiók azonosítását is végeztük és az azonosítás eredményeként a csapadékrégiókban elkülönítésre kerülnek az egyes intenzív cellamagok. Ezek pozícióját és értékeit egy a régió belüli cella struktúrába mentjük ( $regio+k \rightarrow cell[n].loc(j,i,dBZ)$ , 15. ábra), mely során eltároljuk a cellamagot alkotó pixelek számát is. Csak olyan cellamagot tárolunk el, mely ténylegesen is tartalmaz elemet, így sor kerül az újraszámozásra is a folytonos számlálás érdekében. A *cell* struktúrába mentésre kerül továbbá egy egyedi azonosító (*realID*), mely a cellamag születési idejét és lokációját tartalmazza (ééééhhnn\_óópp\_ji). A program ezután kiszámolja az egyes régiók illetve a bennük lévő cellamagok karakterisztikáit, tulajdonságait. A reflektivitással súlyozott középpont:

$$(jCenter, iCenter) = \frac{\sum dBZ_{j,i} \cdot (j, i)}{\sum dBZ}, \quad (5)$$

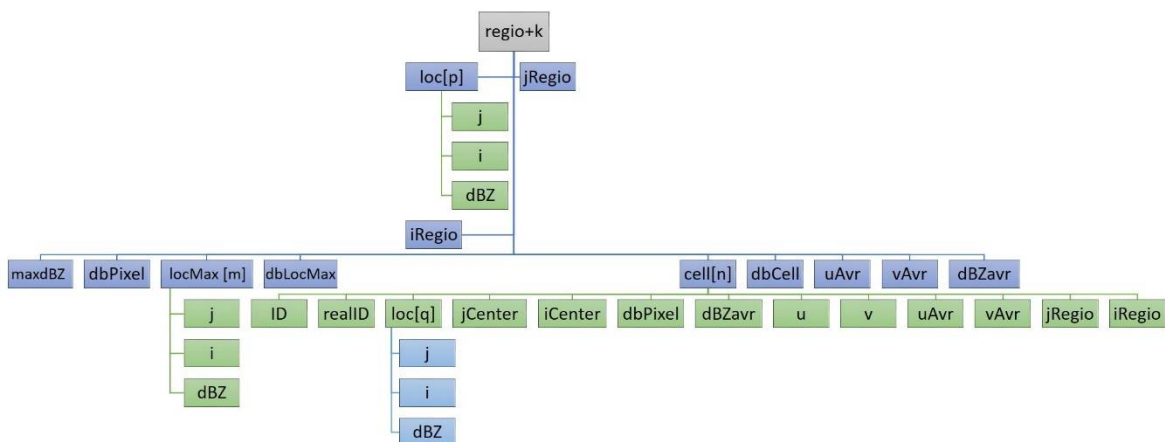
ahol  $dBZ_{j,i}$  a reflektivitás a (j,i) pozícióban. Ezen kívül kiszámításra kerül az átlagos dBZ érték mind a régiókra, mind a cellamagokra vonatkozóan.

### 3.3. A cellamagok időbeni követése

A továbbiakban a program rátér a cellamag követésre. Ennek során a program egyszerre mindig csak két fájlal dolgozik: az aktuálisan elemzett és az időben egyel korábbi, már elemzett radarfájllal. Minden radarfájl elemzésének a végén készül egy ASCII eredményfájl (output – RccD dátum\_idő.txt), melybe kiíratjuk a cellamag azonosítás legfontosabb adatait:

- ❖ a cellamag születési ID-ja (*realID*, (ééééhhnn\_óópp\_ji), azaz dátum\_idő\_lokáció),
- ❖ a cellamag régió belüli azonosítója (*cellID*),
- ❖ a cellamagot alkotó pixelek száma (*dbPixel*),
- ❖ a cellamagot alkotó pixelek lokációja (*j, i*),
- ❖ a cellamagot alkotó pixelek reflektivitása (*dBZ*),
- ❖ súlyozott középpont (*jCenter, iCenter*),

- ❖ a cellamagot tartalmazó régió súlyozott középpontja ( $jRegio, iRegio$ ),
- ❖ a cellamag mozgási sebessége ( $u, v$ ),
- ❖ a régió belüli cellák átlagos mozgási sebessége ( $uAvr, vAvr$ ) (1. táblázat, Függelék).



15. ábra. A MeMoRIaTrack tárolt adatstruktúrája. A  $k$ . régióban ( $regio+k$ ) az alábbi információk kerülnek mentésre:  $loc(j,i,dBZ)$  a régiót alkotó pixelek lokációja és reflektivitása [ $p$  darab],  $(jRegio,iRegio)$  a régió súlyozott középpontjának koordinátája,  $maxdBZ$  a régióban mért abszolút maximum reflektivitás,  $dbPixel$  a régiót alkotó pixelek száma,  $locMax(j,i,dBZ)$  a régió belüli lokális maximum helyek lokációja és reflektivitása [ $m$  darab],  $dbLocMax$  a régió belüli talált lokális maximum helyek száma. A  $cell$  struktúra a régió belüli detektált cellamagok [ $n$  darab] karakterisztikáit tartalmazza:  $ID$  a cellamag régió belüli azonosítója, a  $realID$  a cella keletkezési idejét és súlyozott középpontját tartalmazó azonosító,  $loc(j,i,dBZ)$  a cellamagot alkotó pixelek lokációja és reflektivitása [ $q$  darab],  $(jCenter,iCenter)$  a cellamag súlyozott középpontja,  $dbPixel$  a cellamagot alkotó pixelek száma,  $dBZavr$  a cella átlagos reflektivitása,  $(u,v)$  a cella elmozdulási sebessége,  $(uAvr,vAvr)$  az átlagos cellamag-sebesség a régió belüli. Ezen felül a régió átlagos reflektivitása  $dBZavr$ , a benne található cellák száma  $dbCell$  van elmentve.

Az éppen vizsgált időlépcső cellakövetéséhez az előző időlépcsőre készült eredményfájlból ( $radFileOld$ ) beolvasásra kerülnek a követéshez szükséges adatok. A cellamagok követése során az előző időlépcsőben azonosított cellamag súlyozott középpontjából indulunk ki. Amennyiben az Old cella egy születő cella volt, tehát nem tartozik hozzá mozgásvektor (a mentett  $u, v$  sebességkomponensek 0 értéket vesznek fel), abban az esetben megkeressük az aktuálisan vizsgált radarképen a pozíciójához legközelebb elhelyezkedő cellaközéppontot, és az ahhoz tartozó cellamaghoz párosítjuk. Amennyiben tartozik sebességvektor az Old cellához, először egy pozíció becslést készítünk a következő időlépcsőre (aktuális radarkép), és a becsléshez legközelebb eső cellát választjuk az Old cella párjának.

A párkeresés („utódkeresés”) során csak egy, az éppen vizsgált cellamag középpontjától vett keresési sugáron (MAXDIST) belüli cellákat vesszük figyelembe. Ez a sebességgel rendelkező celláknál 10 km, míg a sebességgel nem rendelkező celláknál 30 km. A párosításokat csak akkor fogadjuk el, ha az időlépcső alatti méretváltozás nem haladja meg az Old cellamag méretének ötszörösét. Ezzel a feltétellel elkerülhető, hogy a program egy cellamagot félrepárosítson egy közelebbi, de másik cellamag utódhoz. A módszer eredményeként az aktuálisan vizsgált képen azonosított cellához bejegyzésre kerül az Old cellamag *realID*-ja, mint „születési” ID. A párosítás után az elmozdulás alapján kiszámolja az új mozgási sebességet és elmenti az aktuális cellához. Ez az érték a következő időlépcsőjű radarfájl beolvasásakor kerül majd be a rendszerbe, mint egy Old cella sebessége. Annak érdekében, hogy minél kevesebb 0 sebességű cella legyen a következő számításoknál, kiszámoljuk az egy régió belüli átlagos mozgási sebességet ( $u_{Avr}$ ,  $v_{Avr}$ ), mely a benne található cellák mozgási sebességének átlagolásával történik. A gyakorlat azt mutatja, hogy ugyanazon csapadékrégió belüli cellamagok mozgási sebessége hasonló, így a sebességgel még nem rendelkező születő cellák a régió átlagos mozgási sebességét kapják meg, ez kerül mentésre az eredményfájlba. Ahogy már fent említettem, az eredményfájl kiírása a program végén történik az aktuálisan vizsgált radarfájltra vonatkozóan. Ezt az eredményfájlt (*radarFileOld*) fogja beolvasni a program a következő időlépcsőbeni radarfájl vizsgálatakor, a cellakövetési eljárás során.

A program végén egy statisztikai adatokat tartalmazó kiírás (ASCII – STATdatum\_idő\_pozíció.txt) is történik a vizsgált radarfájltra vonatkozóan, mely tartalmazza

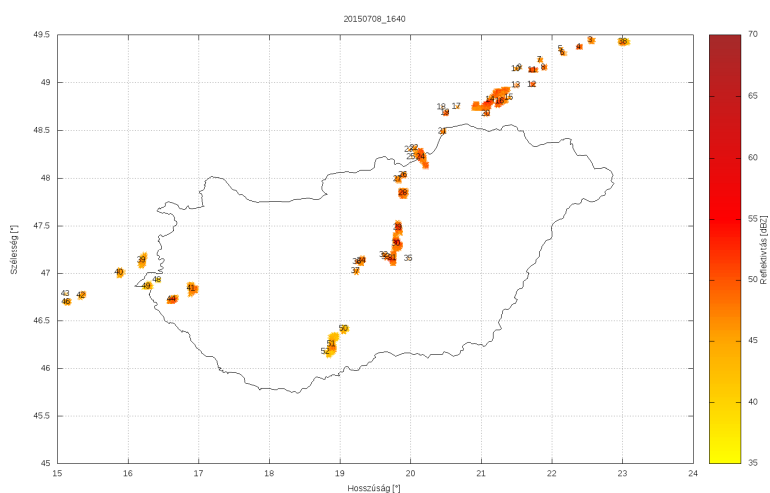
- ❖ azon régiók ID-ját, melyekben cellamagot azonosítottunk (*regioID*),
- ❖ a benne azonosított cellák számát (*dbCell*),
- ❖ az átlagos mozgási sebességet ( $regio \rightarrow (u_{Avr}, v_{Avr})$ ),
- ❖ a régió átlagos reflektivitás értékét ( $regio \rightarrow dBZ_{avr}$ ),
- ❖ a cellamag ID-jét (*cellID*),
- ❖ a „születési” ID-jét (*realID*),
- ❖ a cellamagot alkotó pixelek számát (*cell dbPixel*),
- ❖ a középpont földrajzi és grid koordinátáit ( $(lat, lon)$  és  $(jCenter, iCenter)$ ),
- ❖ a cellamag sebességét ( $u, v$ ),
- ❖ és a cellamag átlagos reflektivitás értékét (*cell dBZ<sub>avr</sub>*) (2. táblázat, Függelék).

Ezen kívül kiíratásra kerül egy-egy külön ASCII fájlba (TRACKdatum\_idő\_pozíció.txt) a cellamagok életútja, mely tartalmazza az egyes időlépcsőket, a cellamagot tartalmazó régió

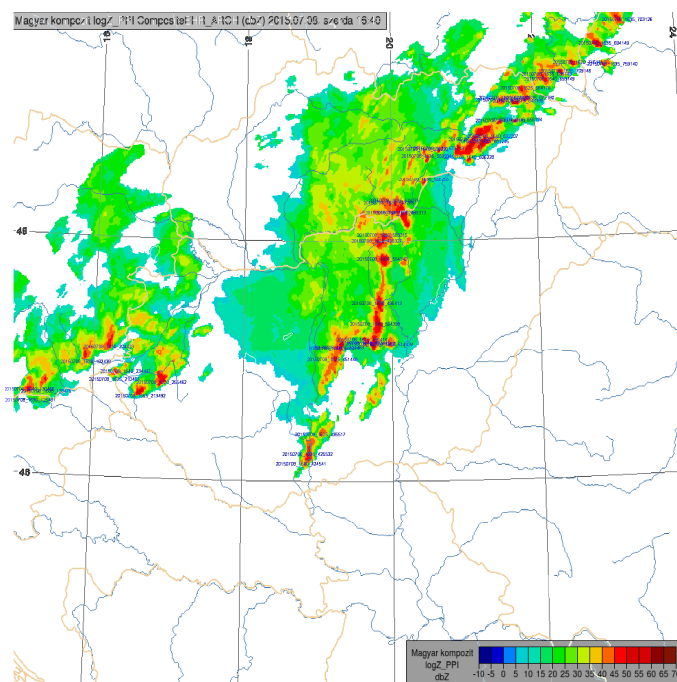
számát (*regioID*), a cellamag ID-jét (*cellID*), méretét (*cell dbPixel*), a cellamag pozícióját (középpont (*jCenter,iCenter*) és (*lat,lon*)), sebességét (*u,v*), illetve átlagos dBZ értékét (*dBZavr*) (3. táblázat, Függelék).

## 4. A MeMoRIaTrack VERIFIKÁCIÓJA ESETTANULMÁNYOK ÁTTEKINTÉSÉVEL

A MeMoRIaTrack körülbelül 10 napnyi adaton futott le a Siófoki Viharjelző Obszervatóriumban. Az alábbiakban azonban csak 3 nap esettanulmányát fogom részletesen bemutatni, mert az előzetes eredmények alapján ezek bizonyultak a legérdekesebbnek.



(a)



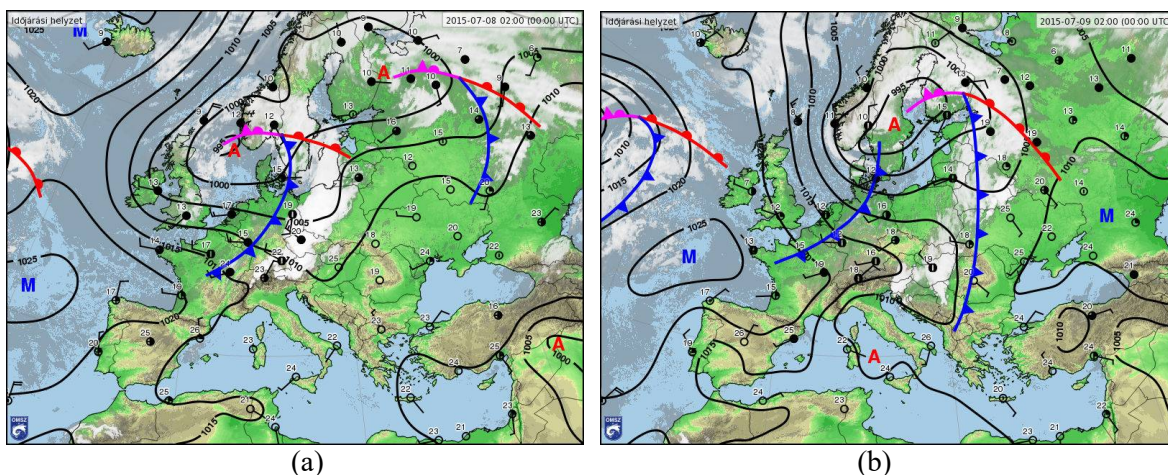
(b)

16. ábra. A felső (a) képen láthatjuk a program által azonosított cellákat, az alsó (b) ábrán láthatjuk a kompozit radarképet (Hungarian Advanced Workstation, OMSZ), melyen feltüntetésre kerültek a MeMoRIaTrack által azonosított és követett cellamagok *realID*-je.

A MeMoRIaTrack azonosítási- és cellakövetési verifikációját vizuálisan végeztem el. Ehhez a program által azonosított cellamagok képét (16.a ábra), a TRACK és STAT fájlokat,

illetve az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK (Hungarian Advanced WorKstation) szinoptikus megjelenítő rendszerén keresztül készült radar képeket használtam fel. A hatékonyabb és gyorsabb munka érdekében, a képekre rákerült az adott radarképen azonosított cellamagok *realID*-je (16.b. ábra).

#### 4.1. 2015. július 8-ai zivataros helyzet elemzése

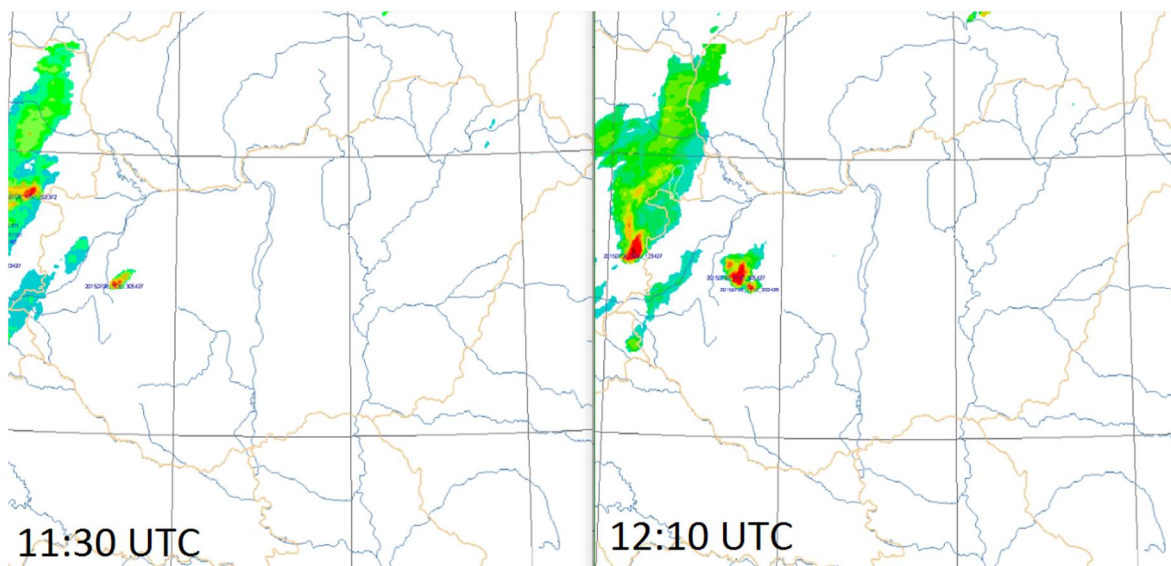


17. ábra. Fronttérkép (a) július 8-án és (b) július 9-én 00 UTC-kor. Jól megfigyelhető a hidegfront átvonulása [4 – OMSZ, <http://met.hu/>].

2015 júliusában Európa nagy részén anticiklonális hatás uralkodott és a délről érkező, forró, szaharai levegő kedvezett az extrém meleg időjárás kialakulásának (17.a. és b. ábra). Július 7-én Európa északnyugati felén hűvösebb levegő áramlott be az Atlanti-óceán felől. A nagy hőmérséklet- és nedvességkülönbség Európa több részén is heves zivatarok kiváltó oka volt.

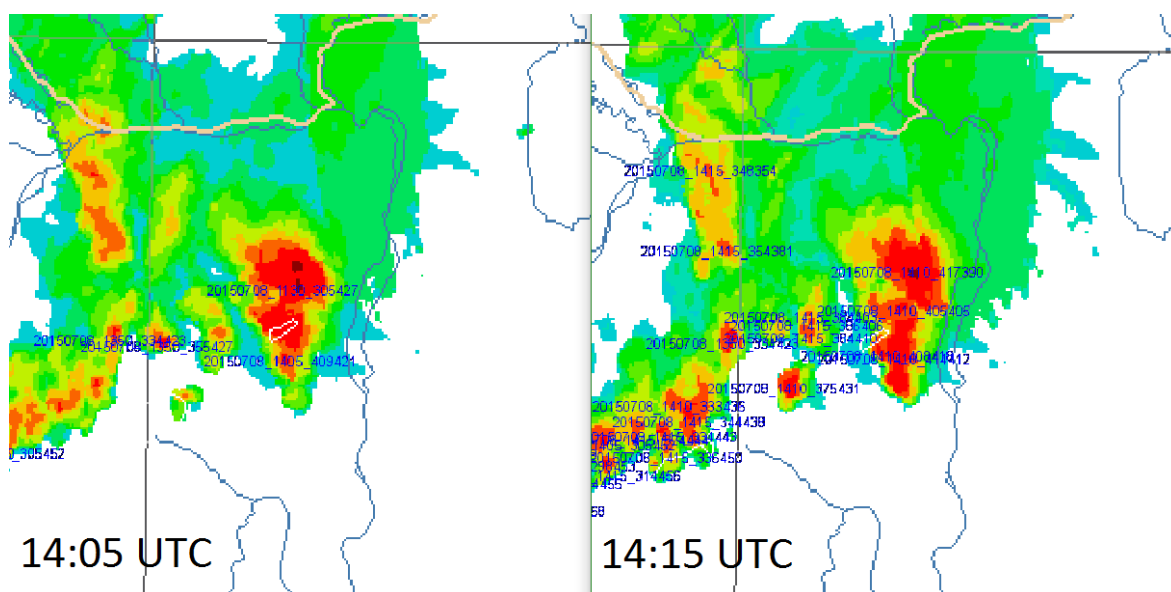
A Dunántúl több pontján is rövid idő alatt sok csapadék hullott le, ami a több hullámban érkező hidegfrontnak következménye volt. A lassan mozgó, hullámzó frontrendszer július 8-án délelőtt lépett be az ország területére, mely előtt a labilis meleg légtömegben a Bakonynál alakult ki elsőként egy intenzív zivatargóc (18. ábra). Ez a jelentős szélnyírás és a Balaton térségében felszívott meleg nedves levegő hatására forgásba kezdett, szupercellává alakult. A szupercella vonulását orkán erejű szél és jégeső is kísérte. A Velencei-tónál Agárdon 35 m/s-os szelet mért az Országos Meteorológiai Szolgálat műszere, míg Aszódon 36,3 m/s volt a regisztrált maximum [5 - <http://met.hu/>]. A képződmény helyi idő szerint 16:30-körül (14:30 UTC) érte el Budapest térségét, a szél és a jelentős mennyiségű csapadék nagy pusztítást, anyagi kárt okozott. Érdeemes megfigyelni a radarképeken is, hogy a forgó

zivatar a természetes tavainkat elérve, ill. a Duna vonalát átlépve hogyan erősödött meg (20. ábra).

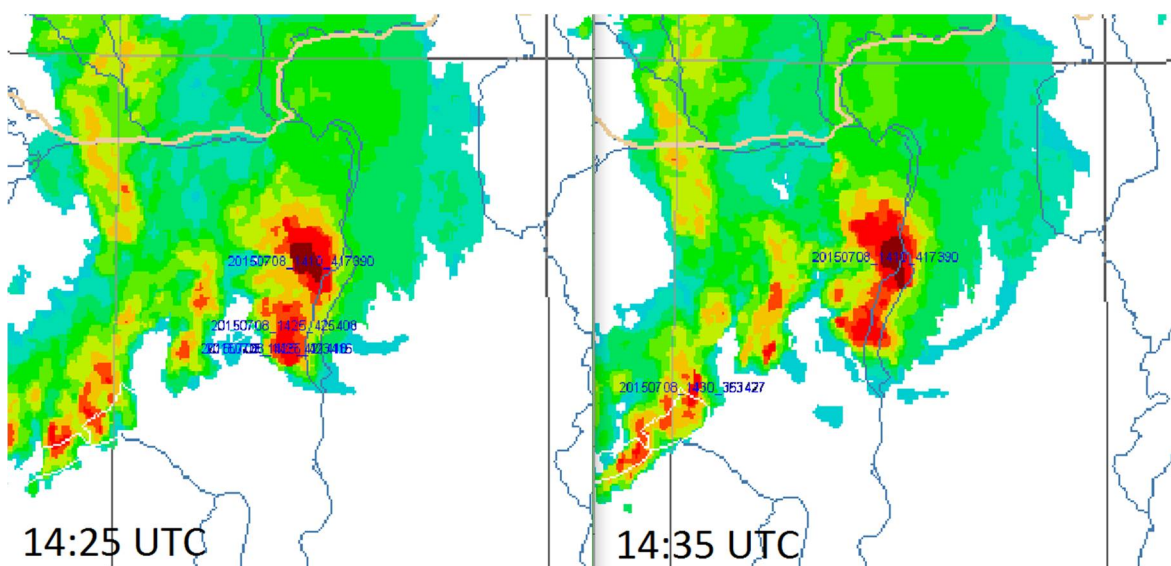


18. ábra. A Bakony fölött kialakuló, később forgásba jövő zivatarcella (*realID*:20150708\_1130\_305427) keletkezése 11:30 UTC-kor és „kísérőcellák” megjelenése 12:10-kor a felnagyított radarképeken, ahol ábrázolva van a MeMoRIaTrack által azonosított és követett cellamagok *realID*-ja. (Eredeti kép: OMSZ, HAWK-Hungarian Advanced WorkStation).

A MeMoRIaTrack mind az azonosítás, mind a követés terén tökéletesen teljesített a zivatar életének első 2,5 órájában. A 20150708\_1130\_305427 *realID*-vel rendelkező szupercellát egészen 14:10 UTC-ig sikerült helyesen lekövetnie a programnak (19. ábra bal oldala). Ennek során a cellának időnként megerősödő vagy elgyengülő részeit, folyamodványait újabb, kísérőcellaként azonosított/követett a program. Ez alatt több esetben összeolvadást, avagy szétválást érthetünk, mely helyzetek kezelésére ez idáig nem készítettük fel a programot. Ezért ezek minden esetben új cellaként jelennek meg, nem a fő cella egyik „gyermekéeként”. A cella követése során, 14:15-kor a szétválás megzavarta a MeMoRIaTrack-et és a már ismert cellát is újként regisztrálta (19. ábra jobb oldala). Ezt a 20150708\_1410\_417390 jelű cellamagot aztán sikerrel követte a program 15:15-ig, hogy aztán később ismét új ID-t adjon a cellának. A szupercella vizuális követése során 16:40 UTC-t állapítottam meg, mint a cella megszűnésének időpontját. A teljes életútja során a cella több cellamag ID-t is kapott, szám szerint 6-t, nem számítva a kisebb kiterjedésű, elszigetelődött cellamagokat. Itt fontos megemlíteni, hogy mivel csak az intenzív cellacsúcsokat detektálja a program, ezért a nagyobb kiterjedésű szupercellát helyenként több részre „szakította” szét.



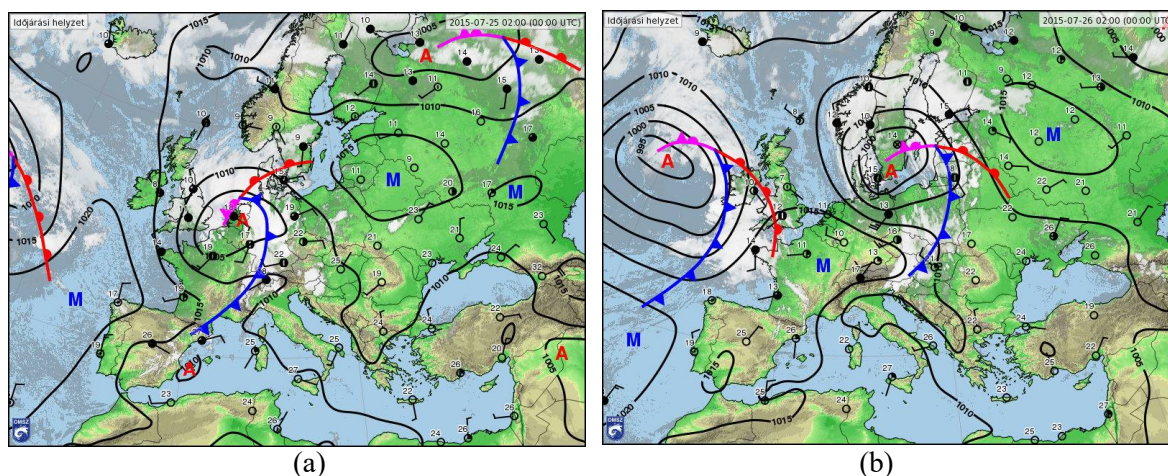
19. ábra. A 20150708\_1130\_305427-es cellát 14:10-ig sikerült követnie a programnak, majd a szétválás után nem sikerült továbbkövetnie. (Az ábrán a 14:05-es kép szerepel, mert itt tisztán olvasható a *realID*). A korábban ismert cellát is újként detektálja, 20150708\_1410\_417390 jelű cellaként. (Eredeti kép: OMSZ, HAWK).



20. ábra. A Budapestet elérő szupercella a Duna vonalánál megerősödik, a korábban detektált „mellékcillák” egybeolvadnak vele. (Eredeti kép: OMSZ, HAWK).



## 4.2. 2015. július 25-ei zivataros helyzet elemzése

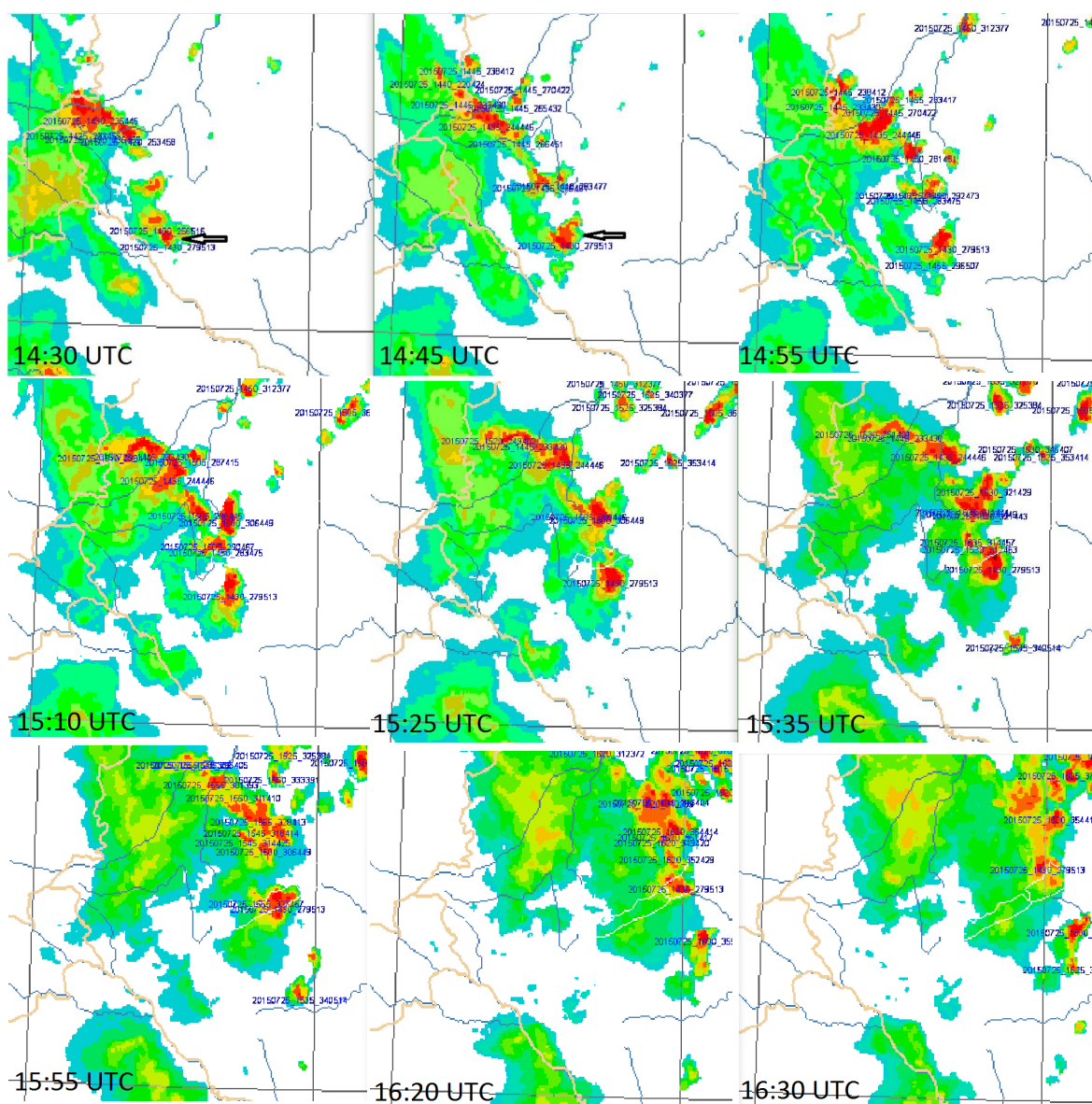


21. ábra. Fronttérkép (a) július 25-én és (b) július 26-án 0 UTC-kor. Jól megfigyelhető a hidegfront közeledése. [4 – OMSZ, <http://met.hu/>].

Ezen a napon a szakirodalomban szlovéniai instabilitási vonalnak nevezett squall line vonult végig az országon, nagy kárt okozva. Az eseményt megelőzően forró, saharai légtömegek uralták Európa nagy részét, míg Észak-Európában a hűvösebb légtömegek adtak hőmérsékleti ellenpontot. Ennek a felállásnak köszönhetően a Brit-szigetek délkeleti oldalán egy igen gyorsan mélyülő ciklon fejlődött ki, a középpontjában 994 hPa-ig süllyedt a légnyomás (21. ábra). Az évszaknak szokatlanul intenzív ciklogenezis következményeként több országban is, így Hollandiában, Belgiumban és Észak-Németországban is súlyos károkat okozott a ciklon hátoldalán kialakult szélvihar. A hidegfront előtti meleg légtömegben több konvergencia vonal is kialakult, ezek a könnyen labilizálódó légtömegben remek gócpontokat adtak a zivatarok kialakulásának. Az országban több helyen rövid idő alatt jelentős csapadék hullott. A Sopron közelében kialakult konvergencia vonal a Bakony vonaláig, majd az Északi-khg-ig vezette a kipattanó zivatarokat. Egy 12:55 UTC-kor, Sopron térségében képződött cellát szépen végig követett a MeMoRIaTrack. A detektált cellamag a 20150725\_1255\_232373 *realID*-t kapta és egészen 14:50 UTC-ig fennmaradt a radarképen (22. ábra).

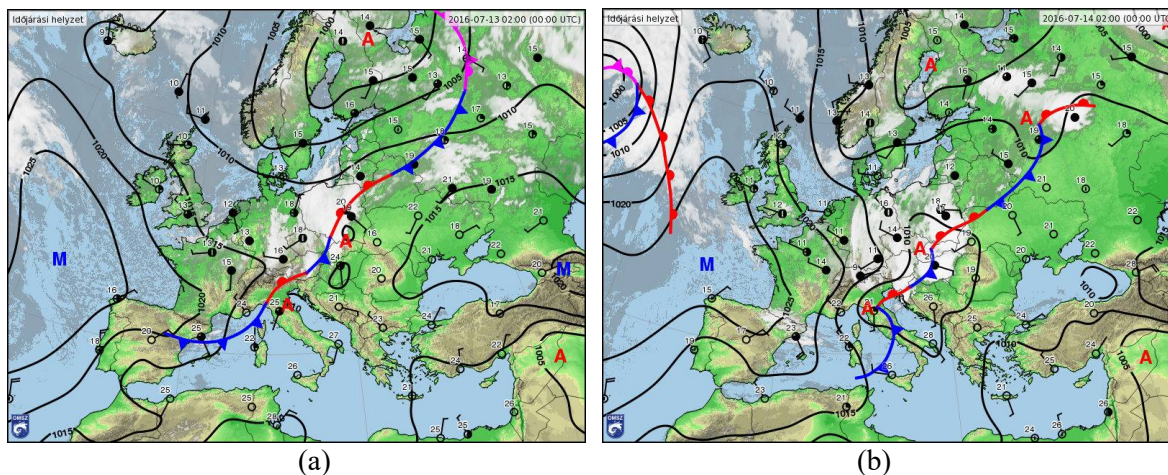
A gyorsabb, délnyugati konvergencia vonal, mely Horvátország és Szlovénia felől közelítette meg hazánkat, viharos széllel érkezett a Balatonhoz, ahol 30,8 m/s-os szélökés maximumot regisztrált az Országos Meteorológiai Szolgálat a középső medencében [6 - <http://met.hu/>]. Kidőlt fákat, megtépázott vitorlákat hagyott maga után a térségben a zivatar vonal. A domináns cella (20150725\_1430\_279513), mely végigsöpört a Balaton déli partján 14:30 UTC-kor keletkezett a délnyugati határunk közelében (23. ábra). A labilis légkörben





23. ábra. A délnyugati határnál képződött 20150725\_1430\_279513 jelű cellamag elérve a Balaton térségét nagy pusztítást okozott, majd a tó északkeleti sarkánál elgyengült (OMSZ, HAWK).

### 4.3. 2016. július 13-14-ei zivataros helyzetek elemzése



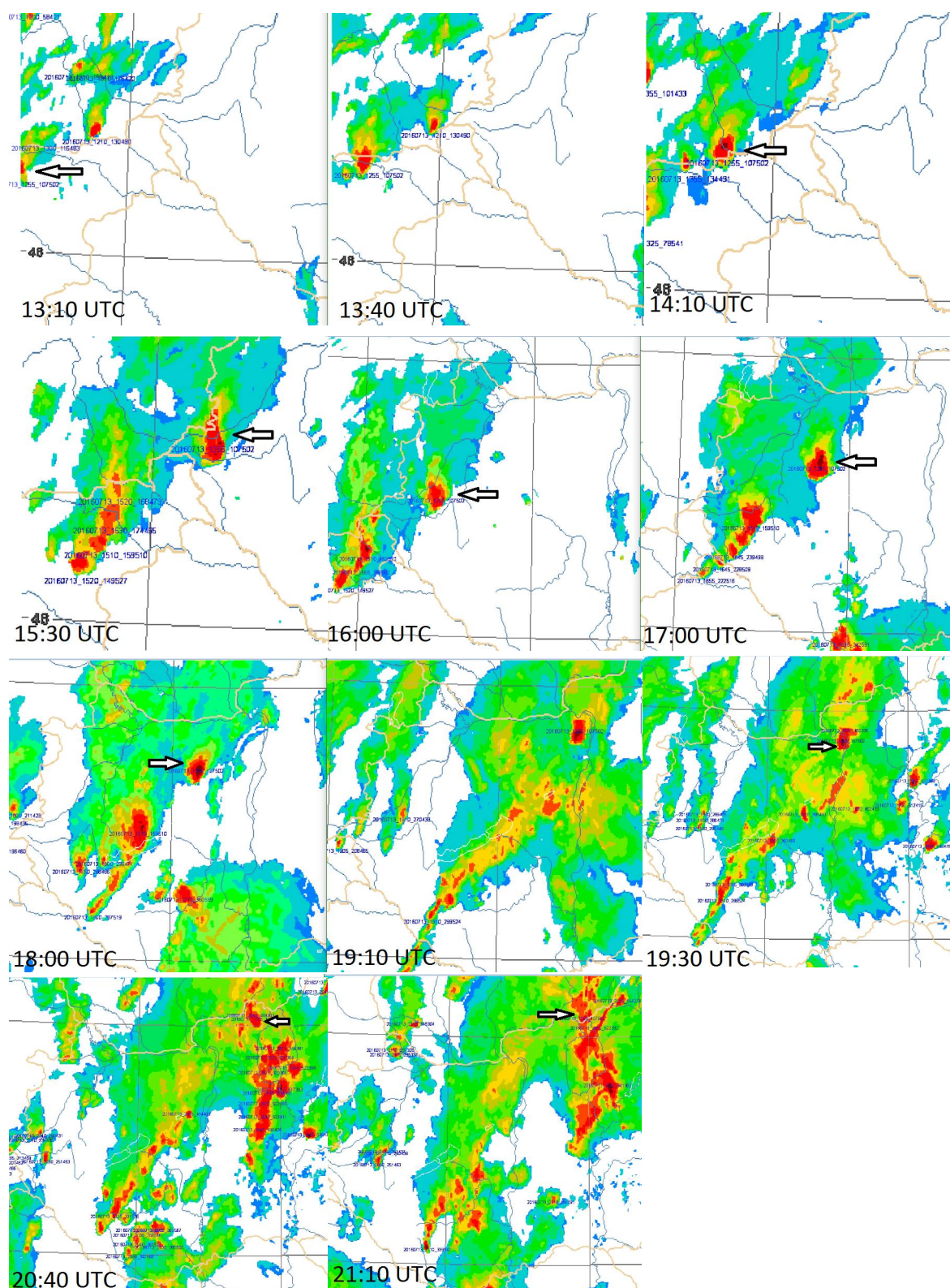
24. ábra. Fronttérkép (a) július 13-án és (b) július 14-én 0 UTC-kor. [4 – OMSZ, <http://met.hu/>].

Ez a két nap a 2016-os év első olyan heves zivatarokkal tarkított időszaka volt, ami az ország nagy területét érintette. A megelőző időszakban száraz, meleg levegő töltötte ki Európa kontinentális részét, míg északon és nyugaton hidegebb, nedves léghullámok voltak jelen. Nyugat-Európa felől lassan mozgó hidegfront indult meg, ami előtt több országban is heves zivatarok alakultak ki (24. ábra). Ahogy a korábban tárgyalt eseteknél, úgy itt is több hullámban érkezett meg a front. A felsőbb rétegekben az alap áramlási sebességgel tovább mozgó hidegebb levegő labilizálta a légkört, melyhez a front nedvességtartalma megfelelő üzemanyagot adott a heves konvektív cellák kialakulásához. Az első hullám 12-én érkezett meg az országba, de a kisebb cellák mellett csak egy forgó zivatarfelhőt eredményezett, kevés csapadékkal.

Július 13-án délelőtt érkezett a hidegfront második hulláma, mely a Miskolc-Tisza-tó vonalon és a Bácskában eredményezett heves, egymást erősítő, vonalba rendeződött zivatarokat. A Tisza-tó közelében fekvő Poroszlón néhány óra alatt 120 mm eső hullott le [7 - <http://met.hu/>]. A front harmadik hulláma délután érkezett meg a nyugati határainknál, ahonnan egy zivatarvonal indult el.

Egy a Balatont elérő és az északi part felett áthaladó szupercellából végig 30 m/s körüli szélsebességeket mértek. A túlnyúló felhőcsúcs az OMSZ radar mérései szerint 14 km-es magasságba is kinyúlt. Egy másik forgó zivatar a határtól a Bakonyig, majd késő este Budapestig is eljutott, útját orkán erejű szél, erős elektromos aktivitás és jégeső kísérte. Ezt az igen hosszú életű cellát több, mint 8 órán keresztül követte a MeMoRiaTrack. Először

12:55 UTC-kor tűnt fel a radarkép bal szélén és a 20160713\_1255\_107502 *realID*-t kapta meg a cellamag.



25. ábra. Szlovéniától egészen a Tisza vonaláig lehetett követni azt a szupercellát (nyíllal jelölve), melynek cellamagja a 20160713\_1255\_107502 azonosítót kapta. (OMSZ, HAWK).

Ebben az időszakban olyannyira nyugatra helyezkedett el országunktól, hogy a HAWK-ban készült kivágaton még nem szerepel. Itt először 13:05 UTC-kor figyelhetjük meg (24. ábra). A cella egészen 21:00 UTC-ig határozottan elkülönült a radarképen, utána egybeolvadt a Tiszánál vonalba rendeződő zivatarokkal. Ezután a program új azonosítót adott a már igen kiterjedt cellá(k)nak, melyek a gyors konvektív változások miatt sűrűn szétváltak és ismét összeolvadtak. Itt is feltehetőleg több önálló forgású cella keletkezett. Egyelőre nem világos, hogy utóbbi okok, vagy a cellalimit beállítása és a képek korlátozott felbontása miatt, de 22:00 UTC-kor és 23:00 UTC-kor a program nem tudott cellamagot azonosítani a kiterjedt squall line összefüggő területén belül. Ezeknek a hibáknak a kiküszöbölése további kutatást és az adatokon belüli újrafuttatást igényel.

Estefelé a nyugatról mozgó zivatarvonalhoz becsatlakozott egy délről érkező újabb konvektív hullám, mely további üzemanyagot jelentett a Közép-Magyarország térségében kialakult squall line-hoz. A zivatarrendszer az Alföld középső részétől egészen Lengyelországig átívelt, jelentős csapadék és szél kíséretében. A negyedik hullám 14-én kora hajnalban érte el a nyugati határunkat. A Dél-Dunántúlról egy zivatarlánc indult el délnyugat-északkelet irányban ismételten sok csapadékkal és viharos széllel. A több hullámban áthaladt hidegfront kapcsán, a Dunántúlon több helyen is 100 mm-t meghaladó csapadékot regisztráltak, Poroszlón a Tisza-tónál ez 143 mm volt, illetve jég- és szélkárról is érkezett jelentés.

## 5. STATISZTIKAI VIZSGÁLATOK

A program azonosítási és követési jóságának ellenőrzése után az adatok statisztikai elemzésére került sor. Ennek során az általános statisztikai jellemzők mellett (pl. legnagyobb méretű cella, legerősebb reflektivitású cella, stb.) arra kerestem a választ, hogy az intenzív cellamagok csoportosított kezelése (csapadékrégió, 3.2-es fejezet) igazolható előnyt jelenthet-e, kimutatható-e egyértelmű kapcsolat a cellamagok hovatartozása tekintetében.

### 5.1. Vizsgálatok korreláció-számítással

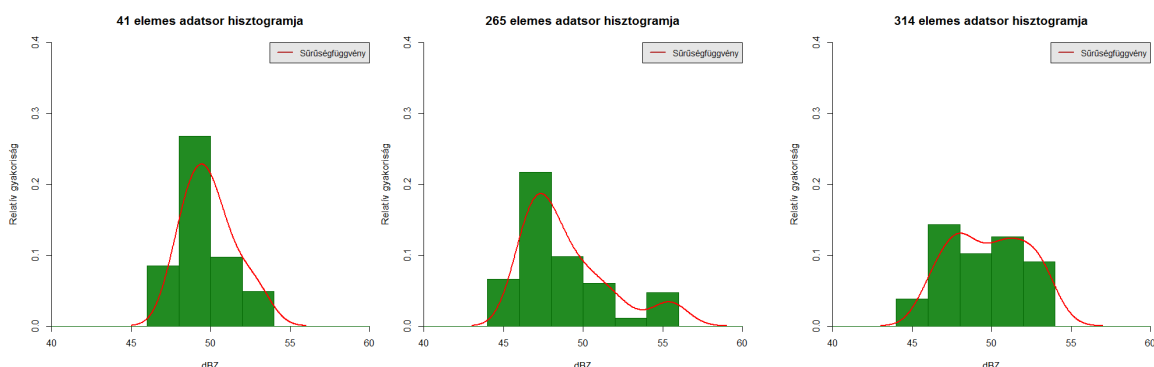
A MeMoRIaTrack első lépésként csapadékrégiókat azonosított viszonylag alacsony, minimum 20 dBZ-s reflektivitás értékkel. Ezután a program a már detektált régiókon belül megkereste az intenzív és a környezetére potenciálisan veszélyes cellamagokat. Ez az azonosítási módszer arra az alapelvre épül, hogy az azonos csapadékrégióon belüli cellamagok/cellák hasonló karakterisztikával (pl. intenzitás, sebesség, stb.) rendelkeznek. Ennek előnyét a követésben kihasználtuk a sebességek átadásánál.

4. táblázat. A 2015. 07.08 15:35-kor detektált, egymással összemérhető cellamagok reflektivitásának Pearson- és Spearman-féle korrelációja. Az elemszám a cellamagot alkotó pixelek száma, az A és B a kivett elemek változtatásával nyert kétféle eredmény. Amint látható, a cellamagok reflektivitása között gyenge a korreláció.

|         | Korreláció              |          |                         |          |
|---------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|
|         | Régióon belüli cellával |          | Régióon kívüli cellával |          |
| Elemzés | Pearson                 | Spearman | Pearson                 | Spearman |
| 16      | 0.361                   |          |                         |          |
| 16      | 0.398                   | 0.404    |                         |          |
| 17      | 0.165                   | 0.159    | 0.044                   | -0.026   |
| 17      |                         |          | 0.285                   | 0.390    |
| 15      |                         |          | 0.280                   | 0.305    |
| 15      |                         |          | -0.215                  | -0.165   |
| 41      | 0.201                   | 0.218    | 0.306                   | 0.354    |
| 41      | 0.218                   | 0.226    | 0.242                   | 0.195    |
| 41      | 0.083                   | 0.047    | 0.251                   | 0.278    |
| 41      |                         |          | 0.233                   | 0.232    |
| 265A    | 0.191                   | 0.215    |                         |          |
| 265B    | 0.192                   | 0.221    |                         |          |
| 314A    |                         |          | -0.077                  | -0.045   |
| 314B    |                         |          | -0.087                  | -0.056   |

Először Pearson-korreláció kiszámításával vizsgáltam az azonos régió belüli cellák közötti lineáris kapcsolat szorosságát (*Dévényi and Gulyás, 1988*). A kiválasztott, 2015.07.08 15:35 perckor azonosított cellamagok adatsoraira R programnyelv alkalmazásával végeztem el a számításokat. Amint az a 4. táblázatban látható, az egyes cellák reflektivitása közötti korrelációra 0 körüli értékeket kaptam, melyek alapján feltételezhető, hogy nem áll fenn a minták között lineáris kapcsolat.

Mint ismeretes, a korreláció számításához azonos elemszámú mintákra van szükség. Az azonosított cellamagokat alkotó pixelek száma azonban igen széles skálán mozog és igen ritkán egyeznek meg. Ezért a vizsgálathoz a kiválasztott cellamag elemszámára csökkentettem az ezzel összemérni kívánt cellamag(ok) elemszámát. Ezt ellenőrizendő a számításokat többféleképpen is elvégeztem, mindig más-más elemeket leválogatva. Az elhagyott elemek száma a teljes elemszám 2,5 – 15,6 %-a között mozgott. A vizsgálat során a kivett elemek változtatásával csak százados (néhány esetben egy tized) pontossággal változott az eredmény, így az elemek egy részének kihagyása nem vezetett jelentősen eltérő eredményekhez. Az elemszám nagyságrendje megszabja a kivehető elemek számát, így a probléma ezzel a módszerrel sem küszöbölhető ki teljesen. A problémát jól érzékelteti a 4. táblázatban látható 17/2, 314A és 314B elemszámú, régió kívüli cellával végzett vizsgálatok eredménye, ahol a 15 ill. 15,6%-os adatcsökkentés igen gyenge korrelációt okozott a minták között.



26. ábra. Három, 2015. 07. 08-án 13:15-kor detektált cella vizsgálata. Az elemzést a cellát alkotó pixelek (41, 265 és 314 db) reflektivitás elemein végeztem el. A minták alapján becsült sűrűségfüggvény eltér a normális eloszlás sűrűségfüggvényének alakjától, vagyis a haranggörbétől.

Ezután vizuális normalitás vizsgálatot végeztem a cellákat alkotó pixelek reflektivitása alapján, relatív gyakorisági hisztogramok készítésével. Látható, hogy az adatsorok eltérnek



Gauss-eloszlástól (26. ábra), ami arra utal, hogy feltehetőleg nemlineáris folyamatok is szerepet játszhatnak. A nemlineáris hatások figyelembevételéhez ezért kiszámoltam a Spearman-korrelációt is (*Taylor, 1987*), mely a változók monoton kapcsolatának szorosságát méri. A Spearman-korreláció értékei a Pearson-korreláció értékeihez hasonlóan 0 körüliek, vagyis sem lineáris, sem monoton kapcsolat nem azonosítható az adatsorok között. Az eredmények alapján a konvektív cellák reflektivitása között látszólag nem figyelhető meg szoros kapcsolat egyik fenti módszerrel sem. Ez arra utal, hogy az összetett felhőfizikai folyamatokból származó reflektivitás mérések nem alkalmasak ilyen jellegű összefüggések, kapcsolatok feltárására. Más jellegű, a fenti módszer használatához alkalmas mért mennyiség nem áll rendelkezésre, ezért további adatsorokon már nem végeztem el a vizsgálatot.

## 5.2. Belső távolságokon alapuló vizsgálatok

A továbbiakban a csapadékrégiókon belüli távolságok kiszámításával értékeltük az osztályozás jóságát. A hipotézis az volt, hogy adott csapadékrégióban detektált cellamagok középpontjai,  $(jCenter, iCenter)$  közelebb esnek a saját régióközepontjukhoz  $(jRegio, iRegio)$ , mint a szomszédos, vagy közeli csapadékrégiók középpontjaihoz. Mivel mind a cellamagok, mind az ezeket tartalmazó csapadékrégiók középpontját a képződményt alkotó pixelek reflektivitásával súlyoztuk, ezért kézenfekvőnek tűnik, hogy a régióközepontok az erősebb reflektivitású területekhez, azaz a cellamagokhoz lesznek közelebb, így fordított megközelítésben igazolva a fenti állítást. A teória bizonyítására az esettanulmányok napjain kiválasztottam összesen 27 időlépcsőre a MeMoRIaTrack azonosítási eredményfájlját (output) és a vizsgálat érdekében utólag kiegészítettem a cellamag adatokat a *regioID*-vel. Készítettem egy C-nyelvű programot, mely kiszámolja az egyes cellamagok és a régióközepontok távolságát. A program a bemeneti fájlokra minden számítás után, a radarfájl nevének megfelelően, külön-külön fájlba írta ki a cellamag adatait, a saját régióközepontjától vett távolságot és a többi régióközeponttól számított távolságot. Ezen kívül készült egy ellenőrző kiírás, mely azokat az eseteket listázza ki, amikor a cella egy másik régióközeponthez esett közelebb. Az előbbieken alapján kapott eredményeket az 5. táblázat tartalmazza. A táblázatban látható, hogy az azonosított cellák ötöde volt közelebb másik/szomszédos régióközeponthez. A vizsgált napi esetszámok eltérésnek oka, hogy az előzetes vizsgálatok alapján nem voltak nagy eltérések a napi adatok

között, mindenhol hasonló értékek fordultak elő, így a hatékonyabb adatfeldolgozás érdekében aznapra kevesebb adaton futtattam a programot.

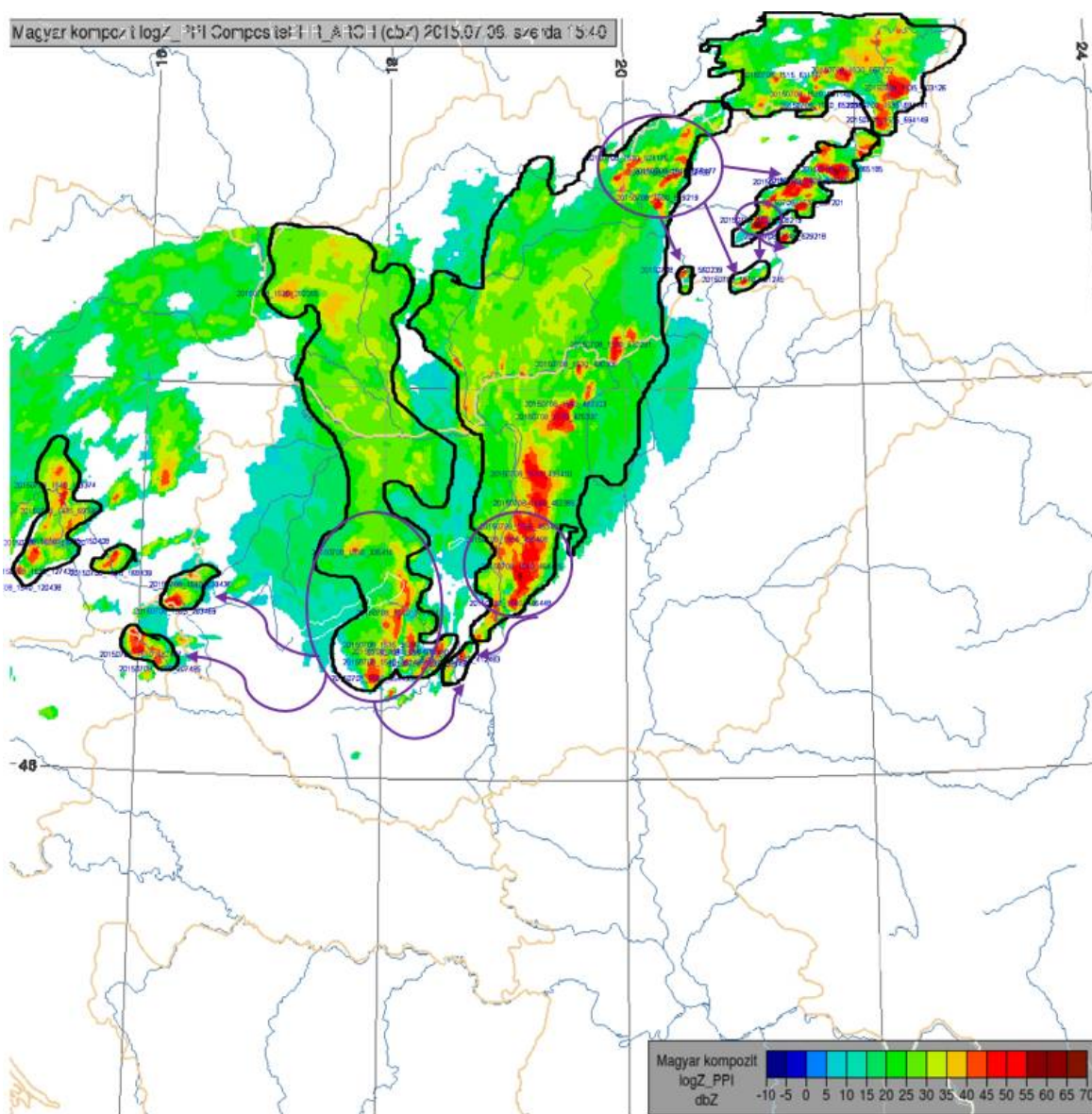
5. táblázat. A belső távolságokon alapuló vizsgálat eredménye. Az egyes napokhoz a vizsgált időlépcső, a radarképen detektált cellák darabszáma, a másik/szomszédos régióközépponthoz közelebb eső cellák száma és százalékos aránya került feltüntetésre.

| Dátum      |                      |                                  |                                 |            |                      |                                  |                                 |            |                      |                                  |                                 |
|------------|----------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------|----------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------|----------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 2015.07.08 |                      |                                  |                                 | 2016.07.13 |                      |                                  |                                 | 2015.07.25 |                      |                                  |                                 |
| Idő        | Detektált cella [db] | Másik régióhoz közelebb eső [db] | Másik régióhoz közelebb eső [%] | Idő        | Detektált cella [db] | Másik régióhoz közelebb eső [db] | Másik régióhoz közelebb eső [%] | Idő        | Detektált cella [db] | Másik régióhoz közelebb eső [db] | Másik régióhoz közelebb eső [%] |
| 13:15      | 32                   | 4                                | 12,5                            | 19:50      | 38                   | 5                                | 13,16                           | 14:40      | 51                   | 1                                | 1,96                            |
| 13:20      | 30                   | 4                                | 13,33                           | 19:55      | 41                   | 10                               | 24,39                           | 14:45      | 56                   | 12                               | 21,43                           |
| 13:25      | 39                   | 7                                | 21,88                           | 20:00      | 45                   | 8                                | 17,78                           | 14:50      | 74                   | 16                               | 21,62                           |
| 13:40      | 41                   | 9                                | 21,95                           | 20:30      | 51                   | 20                               | 39,22                           |            |                      |                                  |                                 |
| 13:45      | 34                   | 10                               | 29,41                           | 20:35      | 69                   | 25                               | 36,23                           |            |                      |                                  |                                 |
| 15:30      | 44                   | 13                               | 29,55                           | 20:40      | 46                   | 15                               | 32,61                           |            |                      |                                  |                                 |
| 15:35      | 62                   | 16                               | 25,81                           | 20:45      | 62                   | 16                               | 25,81                           |            |                      |                                  |                                 |
| 15:40      | 58                   | 18                               | 31                              | 22:10      | 65                   | 14                               | 21,54                           |            |                      |                                  |                                 |
| 19:00      | 65                   | 14                               | 21,54                           | 22:15      | 88                   | 14                               | 15,91                           |            |                      |                                  |                                 |
| 19:05      | 56                   | 9                                | 16,07                           | 22:20      | 91                   | 13                               | 14,29                           |            |                      |                                  |                                 |
| 19:10      | 79                   | 14                               | 17,72                           | 22:25      | 114                  | 12                               | 10,53                           |            |                      |                                  |                                 |
| 19:15      | 98                   | 16                               | 16,33                           |            |                      |                                  |                                 |            |                      |                                  |                                 |
| 19:20      | 67                   | 11                               | 16,42                           |            |                      |                                  |                                 |            |                      |                                  |                                 |

Ennek alapján elmondható, hogy a három nap alatt azonosított, összesen 1596 db cellamag közül 1270 db a saját régióközéppontjához esett legközelebb, ami a cellamagok 79,6%-a. A 20,4%-os hibaérték elsősorban annak következménye, hogy bár a reflektivitás alapján súlyozott középpontok némileg a magasabb értékű pixelek felé tolják el a régió középpontját, az alacsonyan meghatározott reflektivitási limit, amivel a régiót definiáltuk, jelentős méretű, összefüggő csapadékmezőket hozott létre. Az ezeket alkotó pixelek nagy része 20-30 dBZ közötti érték, ezért a fenti esetekben jellemzően a celláktól távolabbi, alacsony reflektivitású területek fölé esnek a régióközéppontok. Főleg azokban a helyzetekben jelentkezhethet ez a probléma, ahol kiterjedt és szabálytalan alakú csapadékrégiók alakulnak ki (27. ábra), így természetes, hogy egyes cellamag csoportok közelebb helyezkednek el más régiókhoz. A MeMoRIaTrack követési algoritmusának kidolgozásakor felmerült, hogy egy cellamag következő időlépcsőbeni utódjának a következő képen legközelebb eső régió, legközelebbi celláját válasszuk. Itt ugyan az időbeliség tovább árnyalja a képet, de a gyakorlat azt mutatta, hogy a régióközéppontok és cellák távolságára nem lehetséges felépíteni a követési algoritmust.

Összefoglalásként megállapítható, hogy a fenti, távolságon alapuló statisztikai vizsgálat az esetek közel 80%-ban igazolta az alapfeltevést a régiók és celláik kapcsolatáról. Ez a

kapcsolat mindenképpen előnyösnek mutatkozik a megalkotott követési algoritmusban, hiszen lehetővé teszi a régióban uralkodó átlagsebesség számítását és átadását a születő celláknak. A gyakorlat azt mutatta, hogy ezzel pontosabb cellakövetést lehet elérni, mint a következő radarképen detektált legközelebbi cella választásával.



27. ábra. 2015.07.08-ai 15:40-es radarkép a követett cellák azonosító jelével (*realID*). Jól megfigyelhető a kiterjedt csapadékmezők feketével határolt szabálytalan alakja. Lila ellipszissel/körrel láthatóak a cellamagok, melyek egy szomszédos régió kp-hoz esnek közelebb (nyilak). (Eredeti kép: OMSZ, HAWK).

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatom elején röviden bemutattam a hazai- és nemzetközi szakirodalomban legismertebb cellaazonosító és -követő algoritmusokat, melyek különféle adattípusokat használnak fel. A radar alapú módszerek közül a TRT és TRACE3D cellaazonosító módszere bizonyult a legérdekesebbnek, hiszen az egyes intenzív cellamagokat egy-egy nagyobb kiterjedésű csapadékrégióon belül különíti el. További vizsgálatokra és egy saját algoritmus létrehozásához a TRACE3D többlépcsős, adaptív küszöbökkel használó azonosító technikáját választottuk. A MeMoRIaTrack (Megyeri-Mona Radarcell Identification and Tracking) minden radarképen azonosítja a 20 dBZ érték feletti, összefüggő csapadékrégiókat, majd ezen belül, lokális maximum kereséssel reflektivitási csúcsokat (maximumokat) regisztrál. A lokális maximumok körül mindig az adott régió maximális intenzitásának megfelelően, adaptív küszöbökkel határozza meg az erős reflektivitású cellamagok határát. A program a cellakövetésnél mindig két radarkép azonosított celláival dolgozik: az előző időlépcsőben regisztrált radarcellákkal (cellamagokkal) és az aktuálisan vizsgált radarkép cellamagaival. Az algoritmus az előző időlépcsőben regisztrált cellamag  $u$ ,  $v$  sebességkomponense alapján határozza meg az aktuális radarképen detektált helyzetét. Továbbá, képes átadni a sebességgel nem rendelkező, születő celláknak a csapadékrégióban uralkodó átlagos cellamag-sebességet. A detektált cellákat vizuálisan, külön is megjelenítettük, illetve a cellakövetés során saját azonosítóval láttuk el a már ismert cellákat a HAWK (Hungarian Advanced Workstation) szinoptikus megjelenítőn készült radarképeken. Ezáltal lehetővé vált a program cellakövetési algoritmusának vizuális verifikációja.

A MeMoRIaTrack működésének verifikációját 3 nap futtatásának eredményén keresztül mutattam be, melyből jelen munkában négy cella életútját emeltem ki. A vizsgálat során bebizonyosodott, hogy a program helyesen azonosítja a csapadékrégiókat, ill. cellamagokat és igen pontosan meg tudja határozni a következő időlépcsőbeni pozíciójukat. A bemutatott négy cellamag életútja közül egynél jelentkezett a cellaszétválás és/vagy -összeolvadás problémája, ami miatt megszakadt a követés és új cellamagként regisztrálta a már ismert cellamagot. Az összeolvadás és szétválás kezelésére eddig nem lett felkészítve a program, ezért ez egy további fejlesztési irányt jelenthet, mellyel pontosabbá válhat a konvektív cellák követése. A bemutatott másik három esetben a MeMoRIaTrack tökéletesen követte végig a cellákat teljes életútjuk során és a korábban említett problémák sem jelentek meg.

A program további lehetséges fejlesztési lehetősége, az eredmények vizuális megjelenítése lenne a HAWK megjelenítő programban. Ehhez a program végén már rendelkezésre áll egy bináris kiíratás, melybe az azonosított régiók és cellák képe van elmentve időbélyegzővel, *regioID*-vel és *cellID*-vel. Hurokfilm lejátszás esetén a program segítségével egyszerűbbé válhat a cellamagok és régiók vizuális követése és könnyen verifikálható a módszer jósága. A program finomhangolása után, egy becslésen alapuló előrejelző modul lehetővé tenné a régiók és cellamagok mozgásának előrejelzését.

Összefoglalásként megállapítható, hogy a cellamagok csapadékrégióban való csoportosítása jó alapot jelent a cellakövetéshez. A cellamagok és régióközéppontjaik távolságán alapuló statisztikai vizsgálat igazolta, hogy a cellamagok 80%-a a saját régióközéppontjához van a legközelebb. A régió átlagos cellamag-sebességének átadása pedig pontosabbá tette a születő cellák követését és ezt a program kalibrálása során a gyakorlati tapasztalatok is igazolták. Ezek az összefüggések egyértelműen mutatják, hogy fontos kapcsolat van a cellamagok és az ezeket tartalmazó csapadékrégiók tulajdonságai, paramétereit között, ami a konvektív cellaazonosító és -követő módszerek kiaknázandó alappillére lehet.

## 7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Mindenek előtt, köszönöm témavezetőmnek, Mona Tamásnak, hogy töretlen lelkesedéssel segítette munkámat, időt és energiát nem kímélve vezetett rá az egyes problémák (C) programozással történő megvalósítására. Köszönöm továbbá az azonosítási- és követési ábrák elkészítésében nyújtott áldozatos segítségét és a találó névadást a MeMoRIaTrack-nek. Örömmel tölt el, hogy ez a projekt mindkettőnk nevét viseli.

Köszönöm belső konzulensemnek, Dr. Ács Ferencnek, hogy szabadidejét rám áldozva tanított a tudományos írás alapjaira. Köszönöm az elgondolkodtató és memóriafrissítő szakmai vitákat, beszélgetéseket, melyekkel közvetetten elősegítette, hogy diplomamunkám minél közérthetőbb, ugyanakkor szakmailag helytálló lehessen.

Ezúton szeretném megköszönni Dr. Jan Handwerker-nek, az Institute of Meteorology and Climate Research – Karlsruhe Institute of Technology (KIT) tudományos munkatársának, hogy egy esetleges összehasonlító munkához elküldte a TRACE3D eredeti MATLAB kódját. Ezt végül az eltérő programozási környezet és bemeneti adatformátumok miatt nem valósítottuk meg.

A statisztikai és R-programozási kérdésekben nyújtott tanácsadásáért köszönet illeti Kristóf Erzsébet doktoranduszt.

Hálával tartozom továbbá Családomnak, és Barátaimnak, hogy elviseltek ebben a nehéz időszakban és hittel bátorítottak az idevezető úton.

Végül, de nem utolsó sorban, köszönöm az Országos Meteorológiai Szolgálatnak, hogy rendelkezésemre bocsátották az adatokat a MeMoRIaTrack futtatásának idejére és lehetővé tették, hogy ez a diplomamunka elkészüljön. Külön köszönet illeti Dr. Horváth Ákost, a Siófoki Viharjelző Obszervatórium vezetőjét a technikai segítségnyújtásért.

## 8. FELHASZNÁLT IRODALOM

Betz, H. D.; Schmidt, K.; Oettinger, W. P.; Montag, B., 2008: Cell-tracking with lightning data from LINET. *Advances in Geosciences.*, **17**, 55–61

Betz, H. D.; Schmidt, K.; Oettinger, W. P., 2009: LINET-An international VLF/LF lightning detection network in Europe. *Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research.*, **91**, 115–140

Bonelli, P.; Marcacci, P., 2008: Thunderstorm nowcasting by means of lightning and radar data: Algorithms and applications in northern Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences.*, **8**, 1187–1198

Chen, Z. Q.; Kavvas, M. L., 1992: An automated method for representing, tracking and forecasting rain fields of severe storms by Doppler weather radars. *Journal of Hydrology.*, **132**, 179–200

Crane, R. K., 1979: Automatic Cell Detection and Tracking. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics.*, **17**, 250–262

Dévényi, D.; Gulyás, O., 1988: Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában. Tankönyvkiadó Vállalat, Budapest, 443 p.

Dixon, M.; Wiener, G., 1993: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting—A Radar-based Methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.*, **10**, 785–797

Fekete, D. Z., 2014: *A földfelszíni csapadékmérő hálózat adataiból származtatott és a radaros csapadékbecslés által készített csapadékmezők összehasonlító elemzése.* Eötvös Loránd University, Budapest, HU. (témavezetők: Dr. Dombai Ferenc és Dr. Ács Ferenc)., 58 p.

Finke, U., 1999: Space–Time Correlations of Lightning Distributions. *Monthly Weather Review.*, **127**, 1850–1861

Fujita, T., 1969: Present status of cloud velocity computations from the ATS I and ATS III satellites. *Space Research IX (COSPAR), Planery Meeting, Tokyo, Japan.* North-Holland Publishing Co., Amsterdam, United States., p. 557–570.

Hajnal, E. Z., 2015: *Bright band azonosítási módszer kidolgozása az OMSZ radaradatainak felhasználásával.* Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, HU. (témavezetők: Steib Roland, Szegedi Csaba és Dr. Mészáros Róbert). 57 p.

Han, L.; Fu, S.; Zhao, L.; Zheng, Y.; Wang, H.; Lin, Y., 2009: 3D convective storm identification, tracking,

and forecasting - An enhanced TITAN algorithm. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.*, **26**, 719–732

*Handwerker, J.*, 2002: Cell tracking with TRACE3D—a new algorithm. *Atmospheric Research.*, **61**, 15–34

*Hering, a M.; Morel, C.; Galli, G.; Ambrosetti, P.; Boscacci, M.*, 2004: Nowcasting thunderstorms in the Alpine region using a radar based adaptive thresholding scheme. *Proceedings of ERAD (2004).*, 206–211

*Horváth, Á.; Ács, F.; Seres, A. T.*, 2008: Thunderstorm climatology analyses in Hungary using radar observations. *Idojaras.*, **112**, 1–13

*Johnson, J. T.; MacKeen, P. L.; Witt, A.; Mitchell, E. D. W.; Stumpf, G. J.; Eilts, M. D.; Thomas, K. W.*, 1998: The Storm Cell Identification and Tracking Algorithm: An Enhanced WSR-88D Algorithm. *Weather and Forecasting.*, **13**, 263–276

*Kernighan, B. W.; Ritchie, D. M.*, 2008: A C programozási nyelv. Műszaki Könyvkiadó Kft., 292 p.

*Kober, K.; Tafferner, A.*, 2009: Tracking and nowcasting of convective cells using remote sensing data from radar and satellite. *Meteorologische Zeitschrift.*, **18**, 75–84

*Lakshmanan, V.; Rabin, R.; DeBrunner, V.*, 2003: Multiscale storm identification and forecast. *Atmospheric Research.*, **67–68**, 367–380

*Lang, T. J.; Miller, L. J.; Weisman, M.; Rutledge, S. A.; Barker, L. J.; Bringi, V. N.; Chandrasekar, V.; Detwiler, A.; Doesken, N.; Helsdon, J.; Knight, C.; Krehbiel, P.; Lyons, W. A.; MacGorman, D.; Rasmussen, E.; Rison, W.; Rust, W. D.; Thomas, R. J.*, 2004: The severe thunderstorm electrification and precipitation study. *Bulletin of the American Meteorological Society.*, **85**, 1107–1125

*Li, L.; Schmid, W.; Joss, J.*, 1995: Nowcasting of Motion and Growth of Precipitation with Radar over a Complex Orography. *Journal of Applied Meteorology.*, **34**, 1286–1300

*Ligda, M. G. H.*, 1953: *Horizontal Motion of Small Precipitation Areas as Observed by Radar*. Massachusetts Institute of Technology

*Megyeri, O. A.*, 2015: *Zivatarcellák mozgásának és fejlődésének nyomonkövetési módszerei*. Eötvös Loránd University, Budapest HU. (témavezetők: Mona Tamás és Dr. Ács Ferenc), 36 p.

*Meyer, V. K.; Höller, H.; Betz, H. D.*, 2013: Automated thunderstorm tracking: Utilization of three-dimensional lightning and radar data. *Atmospheric Chemistry and Physics.*, **13**, 5137–5150



Mona, T.; Horváth, Á.; Ács, F., 2016: A thunderstorm cell-lightning activity analysis: The new concept of air mass catchment. *Atmospheric Research.*, **169**, 340–344

Morel, C.; Sénési, S.; Autones, F., 2002: Building Upon Saf-Nwc Products : Use of the Rapid Developing Thunderstorms ( Rdt ) Product in Météo-France. *Quality.*, pp. 1–8

Rinehart, R. E.; Garvey, E. T., 1978: Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature.*, **273**, 287–289

Rosenfeld, D., 1987: Objective Method for Analysis and Tracking of Convective Cells as Seen by Radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.*

Seres, A. T., 2014: *Zivatarklimatológiai elemzések és a nagy csapadékhozamú, konvektív jelenségek, időszakok vizsgálata Magyarországon.* Doktori disszertáció (témavezető: Dr. Horváth Ákos), 115 p.

Seres, A. T.; Horváth, Á., 2015: Thunderstorm climatology in Hungary using Doppler radar data. *Időjaras.*, **119**, 143–158

Steinacker, R.; Dorninger, M.; Wolfelmaier, F.; Krennert, T., 2000: Automatic Tracking of Convective Cells and Cell Complexes from Lightning and Radar Data. *Meteorology and Atmospheric Physics.*, **72**, 101–110

Szegedi, C., 2012: *Jégesős folyamatok polarizációs karakterisztikáinak vizsgálata az OMSZ DWSR 2501C időjárásradarral.* Eötvös Loránd University, Budapest, HU. (témavezetők: Dr. Dombai Ferenc és Dr. Mészáros Róbert), 77 p.

Szegedi, C.; Dombai, F.; Csirmaz, K.; Németh, P., 2014: Országos Meteorológiai Szolgálat időjárásradahálózatának mérései. *OMSZ internetes kiadvány.*, 21

Taylor, J. . M. G., 1987: Kendall's and Spearman's correlation coefficients in the presence of a blocking variable. *Biometrics.*, **43**, 409–416

Tuomi, T. J.; Larjavaara, M., 2005: Identification and analysis of flash cells in thunderstorms. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.*, **131**, 1191–1214

Vila, D. A.; Machado, L. A. T.; Laurent, H.; Velasco, I., 2008: Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) Using Satellite Infrared Imagery: Methodology and Validation. *Weather and Forecasting.*, **23**, 233–245

Zinner, T.; Mannstein, H.; Tafferner, A., 2008: Cb-TRAM: Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multi-channel Meteosat-8 SEVIRI data. *Meteorology and*

*Atmospheric Physics.*, **101**, 191–210

### **Internetes hivatkozások:**

[1] - <http://www.ral.ucar.edu/projects/titan/home/>

[2] - [http://www.hko.gov.hk/education/article\\_e.htm?title=ele\\_00448](http://www.hko.gov.hk/education/article_e.htm?title=ele_00448)

[3] - [http://www.eumetsat.int/website/home/Data/Training/TrainingLibrary/DAT\\_2042874.html](http://www.eumetsat.int/website/home/Data/Training/TrainingLibrary/DAT_2042874.html)

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

[5] - <http://met.hu/ismeret->

[tar/erdekessegek\\_tanulmanyok/index.php?id=1350&hir=Forro\\_periodust\\_zaro\\_zivataros\\_hidegfront\\_szuper\\_cellakkal\\_julius\\_8-an](http://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1350&hir=Forro_periodust_zaro_zivataros_hidegfront_szuper_cellakkal_julius_8-an)

[6] - <http://met.hu/ismeret->

[tar/erdekessegek\\_tanulmanyok/index.php?id=1361&hir=Delnyugati\\_instabilitasi\\_vonal\\_%E2%80%93\\_julius\\_25-i\\_vihar\\_meteorologiai\\_elemezese](http://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1361&hir=Delnyugati_instabilitasi_vonal_%E2%80%93_julius_25-i_vihar_meteorologiai_elemezese)

[7] - <http://met.hu/ismeret->

[tar/erdekessegek\\_tanulmanyok/index.php?id=1602&hir=Viharzona\\_Magyarország\\_felett;\\_2016.\\_julius\\_13%E2%80%9314.#h6](http://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1602&hir=Viharzona_Magyarország_felett;_2016._julius_13%E2%80%9314.#h6)

## FÜGGELÉK

1. táblázat. Részlet egy output eredményfájlból (RccD20150520\_0345.txt) a cellaazonosítás és követés után. A következő időlépcsőben „Old” fájlként kerül beolvasásra a cellamag követéséhez.

A *real ID* a szülő cella azonosítója (ééééhnn\_óópp\_ji), *cell ID* a cellamag ID-ja az adott radarképen, *dbPixel* a cellát alkotó pixelek száma, (*j,i*) a cellát alkotó pixelek koordinátája, *dBZ* a pixel reflektivitása, (*jCenter,iCenter*) a cellamag súlyozott középpontjának koordinátája, (*jRegio,iRegio*) a cellamagot tartalmazó régió súlyozott középpontja, (*u,v*) a cellamag sebessége, (*uAvr, vAvr*) a régió belüli átlagos sebesség.

| realID               | cellID | dbPixel | j   | i   | dBZ | jCenter | iCenter | jRegio | iRegio | u      | v        | uAvr   | vAvr    |
|----------------------|--------|---------|-----|-----|-----|---------|---------|--------|--------|--------|----------|--------|---------|
| 20150520_0335_573132 | 1      | 6       | 584 | 113 | 42  | 585     | 114     | 550    | 209    | 7.0000 | -10.0000 | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_573132 | 1      | 6       | 585 | 113 | 42  | 585     | 114     | 550    | 209    | 7.0000 | -10.0000 | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_573132 | 1      | 6       | 584 | 114 | 42  | 585     | 114     | 550    | 209    | 7.0000 | -10.0000 | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_573132 | 1      | 6       | 585 | 114 | 42  | 585     | 114     | 550    | 209    | 7.0000 | -10.0000 | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_573132 | 1      | 6       | 584 | 115 | 42  | 585     | 114     | 550    | 209    | 7.0000 | -10.0000 | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_573132 | 1      | 6       | 585 | 115 | 42  | 585     | 114     | 550    | 209    | 7.0000 | -10.0000 | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_486270 | 2      | 11      | 490 | 263 | 43  | 490     | 266     | 550    | 209    | 2.0000 | 0.0000   | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_486270 | 2      | 11      | 489 | 264 | 43  | 490     | 266     | 550    | 209    | 2.0000 | 0.0000   | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_486270 | 2      | 11      | 490 | 264 | 43  | 490     | 266     | 550    | 209    | 2.0000 | 0.0000   | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_486270 | 2      | 11      | 489 | 265 | 43  | 490     | 266     | 550    | 209    | 2.0000 | 0.0000   | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_486270 | 2      | 11      | 490 | 265 | 43  | 490     | 266     | 550    | 209    | 2.0000 | 0.0000   | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_486270 | 2      | 11      | 489 | 266 | 43  | 490     | 266     | 550    | 209    | 2.0000 | 0.0000   | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_486270 | 2      | 11      | 490 | 266 | 43  | 490     | 266     | 550    | 209    | 2.0000 | 0.0000   | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_486270 | 2      | 11      | 489 | 267 | 43  | 490     | 266     | 550    | 209    | 2.0000 | 0.0000   | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_486270 | 2      | 11      | 490 | 267 | 43  | 490     | 266     | 550    | 209    | 2.0000 | 0.0000   | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_486270 | 2      | 11      | 489 | 268 | 43  | 490     | 266     | 550    | 209    | 2.0000 | 0.0000   | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0335_486270 | 2      | 11      | 490 | 268 | 43  | 490     | 266     | 550    | 209    | 2.0000 | 0.0000   | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_549272 | 3      | 3       | 548 | 272 | 43  | 549     | 272     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_549272 | 3      | 3       | 549 | 272 | 43  | 549     | 272     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_549272 | 3      | 3       | 549 | 273 | 43  | 549     | 272     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_551279 | 4      | 39      | 552 | 275 | 42  | 551     | 279     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_551279 | 4      | 39      | 550 | 276 | 42  | 551     | 279     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_551279 | 4      | 39      | 551 | 276 | 44  | 551     | 279     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_551279 | 4      | 39      | 552 | 276 | 45  | 551     | 279     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_551279 | 4      | 39      | 553 | 276 | 50  | 551     | 279     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_551279 | 4      | 39      | 554 | 276 | 42  | 551     | 279     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_551279 | 4      | 39      | 549 | 277 | 43  | 551     | 279     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_551279 | 4      | 39      | 550 | 277 | 47  | 551     | 279     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_551279 | 4      | 39      | 551 | 277 | 49  | 551     | 279     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_551279 | 4      | 39      | 552 | 277 | 50  | 551     | 279     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_551279 | 4      | 39      | 553 | 277 | 52  | 551     | 279     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |
| 20150520_0345_551279 | 4      | 39      | 554 | 277 | 50  | 551     | 279     | 550    | 209    | 5.7500 | -3.3333  | 5.7500 | -3.3333 |

## 2. táblázat. Példa statisztikai output file-ra (STAT\_RccD20150520\_0345.txt).

Csak azon régiók kerülnek kiíratásra, melyek tartalmaznak intenzív cellamagot.

| 1. regio: 6 db cella.                                    | uAtl=5.7500, vAtl=-3.3333 [km/5perc].                 | dBZatl: 26.00 [dBZ]     |                     |  |
|--|---|-------------------------|---------------------|--|
| 1. cella (született: 20150520_0335_573132): 6 db pixel.  | Kp:K.h. 20.8125 E. sz. 49.5880 [fok], (j,i)=(585,114) | V: u=7.0000, v=-10.0000 | dBZatl: 42.00 [dBZ] |  |
| 2. cella (született: 20150520_0335_486270): 11 db pixel. | Kp:K.h. 19.6250 E. sz. 48.3720 [fok], (j,i)=(490,266) | V: u=2.0000, v=0.0000   | dBZatl: 42.00 [dBZ] |  |
| 3. cella (született: 20150520_0345_549272): 3 db pixel.  | Kp:K.h. 20.3625 E. sz. 48.3240 [fok], (j,i)=(549,272) | V: u=5.7500, v=-3.3333  | dBZatl: 42.00 [dBZ] |  |
| 4. cella (született: 20150520_0345_551279): 39 db pixel. | Kp:K.h. 20.3875 E. sz. 48.2680 [fok], (j,i)=(551,279) | V: u=5.7500, v=-3.3333  | dBZatl: 45.00 [dBZ] |  |
| 5. cella (született: 20150520_0340_496282): 2 db pixel.  | Kp:K.h. 19.7250 E. sz. 48.2520 [fok], (j,i)=(498,281) | V: u=2.0000, v=-1.0000  | dBZatl: 45.00 [dBZ] |  |
| 6. cella (született: 20150520_0340_520300): 2 db pixel.  | Kp:K.h. 20.1500 E. sz. 48.0920 [fok], (j,i)=(532,301) | V: u=12.0000, v=1.0000  | dBZatl: 45.00 [dBZ] |  |

3. táblázat. Példa TRACK fájlra, melyben egy adott azonosítójú (*realID*: 20150520\_2210\_721249)

cella életútja követhető végig.

|                   |           |          |               |   |                         |                     |
|-------------------|-----------|----------|---------------|---|-------------------------|---------------------|
| RccD20150520_2210 | 17. regio | 19. cell | 36 db pixel.  | Kp:K.h. 22.5125 E. sz. 48.5080 [fok], (j,i)=(721,249) | V: u=1.5000, v=-4.1111  | dBZatl: 44.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2215 | 27. regio | 21. cell | 25 db pixel.  | Kp:K.h. 22.5375 E. sz. 48.5320 [fok], (j,i)=(723,246) | V: u=2.0000, v=-3.0000  | dBZatl: 52.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2220 | 23. regio | 33. cell | 44 db pixel.  | Kp:K.h. 22.5500 E. sz. 48.5640 [fok], (j,i)=(724,242) | V: u=1.0000, v=-4.0000  | dBZatl: 51.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2225 | 18. regio | 30. cell | 63 db pixel.  | Kp:K.h. 22.5625 E. sz. 48.5880 [fok], (j,i)=(725,239) | V: u=1.0000, v=-3.0000  | dBZatl: 50.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2230 | 28. regio | 27. cell | 97 db pixel.  | Kp:K.h. 22.5375 E. sz. 48.6200 [fok], (j,i)=(723,235) | V: u=-2.0000, v=-4.0000 | dBZatl: 48.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2235 | 30. regio | 32. cell | 78 db pixel.  | Kp:K.h. 22.5375 E. sz. 48.6520 [fok], (j,i)=(723,231) | V: u=0.0000, v=-4.0000  | dBZatl: 49.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2240 | 32. regio | 25. cell | 95 db pixel.  | Kp:K.h. 22.5500 E. sz. 48.6680 [fok], (j,i)=(724,229) | V: u=1.0000, v=-2.0000  | dBZatl: 48.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2245 | 36. regio | 22. cell | 71 db pixel.  | Kp:K.h. 22.5625 E. sz. 48.7000 [fok], (j,i)=(725,225) | V: u=1.0000, v=-4.0000  | dBZatl: 48.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2250 | 25. regio | 26. cell | 70 db pixel.  | Kp:K.h. 22.5750 E. sz. 48.7240 [fok], (j,i)=(726,222) | V: u=1.0000, v=-3.0000  | dBZatl: 47.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2255 | 28. regio | 24. cell | 72 db pixel.  | Kp:K.h. 22.6250 E. sz. 48.7400 [fok], (j,i)=(730,220) | V: u=4.0000, v=-2.0000  | dBZatl: 45.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2300 | 29. regio | 22. cell | 172 db pixel. | Kp:K.h. 22.5750 E. sz. 48.7800 [fok], (j,i)=(726,215) | V: u=-4.0000, v=-5.0000 | dBZatl: 44.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2305 | 18. regio | 23. cell | 95 db pixel.  | Kp:K.h. 22.5750 E. sz. 48.8120 [fok], (j,i)=(726,211) | V: u=0.0000, v=-4.0000  | dBZatl: 45.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2310 | 20. regio | 28. cell | 91 db pixel.  | Kp:K.h. 22.6125 E. sz. 48.8360 [fok], (j,i)=(729,208) | V: u=3.0000, v=-3.0000  | dBZatl: 43.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2315 | 19. regio | 33. cell | 82 db pixel.  | Kp:K.h. 22.6125 E. sz. 48.8760 [fok], (j,i)=(729,203) | V: u=0.0000, v=-5.0000  | dBZatl: 43.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2320 | 27. regio | 27. cell | 67 db pixel.  | Kp:K.h. 22.6500 E. sz. 48.9000 [fok], (j,i)=(732,200) | V: u=3.0000, v=-3.0000  | dBZatl: 43.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2325 | 10. regio | 41. cell | 62 db pixel.  | Kp:K.h. 22.6750 E. sz. 48.9160 [fok], (j,i)=(734,198) | V: u=2.0000, v=-2.0000  | dBZatl: 43.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2330 | 8. regio  | 33. cell | 154 db pixel. | Kp:K.h. 22.6875 E. sz. 48.9560 [fok], (j,i)=(735,193) | V: u=1.0000, v=-5.0000  | dBZatl: 41.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2335 | 11. regio | 38. cell | 99 db pixel.  | Kp:K.h. 22.7250 E. sz. 48.9880 [fok], (j,i)=(738,189) | V: u=3.0000, v=-4.0000  | dBZatl: 42.00 [dBZ] |
| RccD20150520_2340 | 8. regio  | 34. cell | 1 db pixel.   | Kp:K.h. 22.7750 E. sz. 48.9800 [fok], (j,i)=(742,190) | V: u=4.0000, v=1.0000   | dBZatl: 44.00 [dBZ] |