

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Meteorológiai Tanszék

# Zivatarcellák mozgásának és fejlődésének nyomonkövetési módszerei

SZAKDOLGOZAT  
FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK  
METEOROLÓGUS SZAKIRÁNY



Készítette:

**Megyeri Otilia Anna**

Témavezetők:

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

**Mona Tamás** – ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2015

## TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS.....	3
2. RADAR ADATOKON ALAPULÓ ALGORITMUSOK.....	3
2.1. TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting) .....	5
2.2. COTREC (COntinuity of TREC vectors).....	9
2.3. SCIT (Storm Cell Identification and Tracking) .....	11
2.4. TRT (Thunderstorms Radar Tracking).....	15
2.5. TRACE3D.....	17
2.6. ETITAN (Enhanced TITAN).....	19
3. MŰHOLD ADATOKON ALAPULÓ ALGORITMUSOK .....	22
3.1. RDT (Rapid Developing Thunderstorms) .....	22
3.2. ForTraCC (Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters) .....	23
4. VILLÁM ADATOKON ALAPULÓ ALGORITMUSOK.....	24
4.1. Cellsearch.....	24
4.2. Betz et al. cellakövető algoritmus.....	25
5. KOMBINÁLT ADATOKON ALAPULÓ ALGORITMUSOK.....	26
5.1. Lakshmanan et al. módszere .....	26
5.2. Cb-TRAM .....	26
5.3. Steinecker et al. módszere.....	26
5.4. Bonelli és Marcacci módszere.....	27
5.5. ec-TRAM .....	28
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	30
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS .....	33
IRODALOMJEGYZÉK.....	34

## 1. BEVEZETÉS

A heves zivatarok nyomon követése kulcsfontosságú az emberi életek, természeti kincsek és az anyagi javak megőrzéséhez. 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 zivatar követési programok is (*Crane, 1979; Rosenfeld, 1987; Chen és Kavvas, 1992; Dixon és Wiener, 1993*). A villám lokalizációs rendszerek kiépítésével és fejlesztésével újabb lehetőség nyílt a prognosztika számára (*Finke et al., 1999; Betz et al., 2004, 2008; Lang et al., 2004; Tuomi és Larjavaara, 2005*).

A zivatarkövető algoritmusokat a gyakorlatban nowcasting rendszerekben használják, melyekkel nyomon követhető az aktuális időjárás, valamint ultra-rövid távú előrejelzést készíthetünk. Nowcasting rendszerek például: GANDOLF (Met Office, UK), Auto-Nowcast System és TITAN (NCAR, USA), SWIRLIS (HKO, Hong-Kong), FLASH (Délkelet-Európa és Közép-Kelet, *Demetriades et al., 2006*), INCA (Közép-Európa).

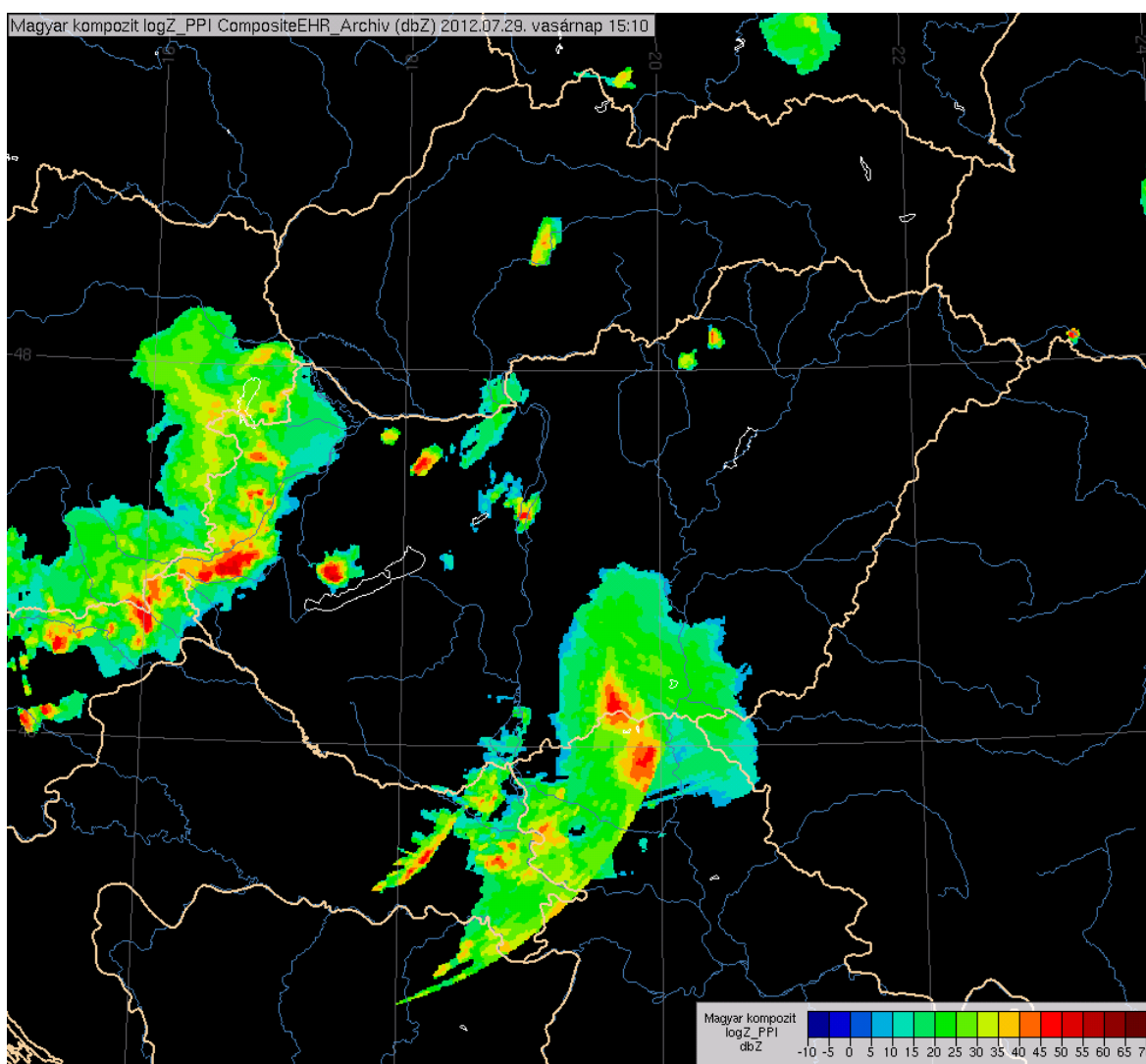
A különböző – radar, villám, és műhold alapú – módszerek közös pontja, hogy a viharok azonosításához objektív küszöb(ke)t használnak (reflektivitási, villámgyakorisági, hőmérsékleti) és meghatározott területi minimummal kell rendelkezniük. A követési módszerek legfontosabb eleme a mozgás vektor kiszámítása. 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.

Dolgozatomban elsősorban azon, radar adatokon alapuló algoritmusokat fogom bemutatni, melyeket részben vagy egészben ma is alkalmaznak a világon. Ezután kivonatos betekintést nyújtok a műhold- és villám adatokon alapuló módszerekre.

## 2. RADAR ADATOKON ALAPULÓ ALGORITMUSOK

A radar adatokon alapuló algoritmusok esetében kétféle adatformát különböztetünk meg: a nyers- és a kompozit radar adatokat. Ez utóbbit a nyers adatok Descartes-i koordináta-rendszerbe történő transzformálásával kapjuk meg. A nyers radar kép magassági szögenként mutatja az összes detektált reflektivitási értéket, ami egy 3D-s képet eredményez. Ha ezen a képen pixelenként oszlop maximum szelekciót végzünk, megkapjuk a 2D-s kompozit radar képet (1. ábra).



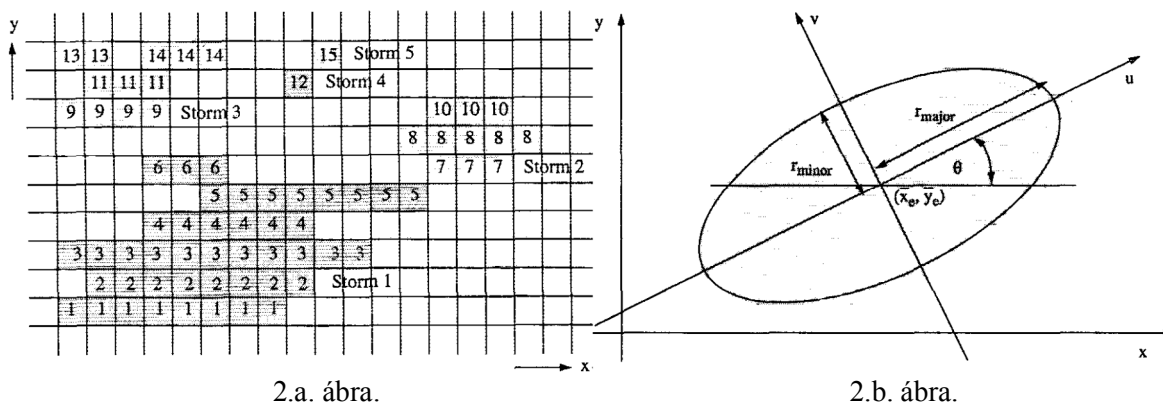
1. ábra. Kompozit radar kép (OMSZ)

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

A TITAN a legismertebb zivatarfelismerő és – követő módszer (*Dixon és Wiener, 1993*), melyet – és annak továbbfejlesztett változatait – aktívan alkalmaznak mind a külföldi (*Han et al., 2009*) mind a hazai meteorológiai munkában (*Horváth et al., 2008; Mona, 2013; Seres 2014*). Ez egy matematikai összefüggéseken alapuló programozási eljárás, mely a Descartes-rendszerbe transzformált radar adatokat használja fel.

Magát a vihart egy olyan folyamatos területként jellemezzük, ahol a reflektivitási értékek meghaladnak egy adott  $T_z$  küszöbértéket, a térfogat pedig egy adott  $T_v$  értéket. Utóbbira a környezeti zajok kiszűrése miatt van szükség, a  $T_z$  érték megválasztása pedig meghatározza a detektált vihar típusát. Itt a konvektív viharok lesznek vizsgálatunk tárgyai. Dixon és Wiener több kísérleti futtatás után a  $T_z=35$  dBZ és  $T_v=50$  km<sup>3</sup> küszöbértékeket tartották ehhez megfelelőnek, azonban ennek következtében az eljárás érzékenysége csökkent: a program az egymáshoz közeli zivatarcellákat egy nagy cellává fűzheti össze. Természetesen más  $T_z$  küszöbérték is alkalmazható, de az algoritmus fejlesztése szempontjából ez tűnt a legmegfelelőbbnek.

Az egyszerűség kedvéért a fent definiált folyamatos területet két dimenzióban ( $x, y$ ) írjuk le, de ez gond nélkül kiterjeszthető később a harmadik dimenzióra ( $z$ ) is.

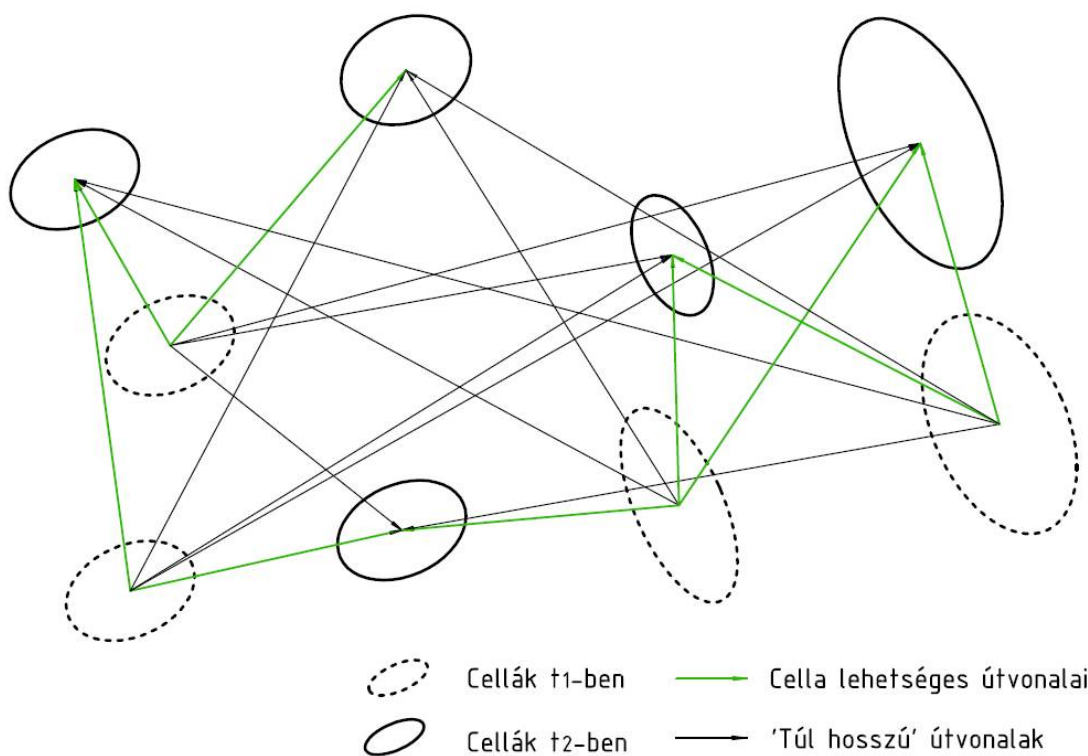


2. ábra. (a) Példa összefüggő pixelsorokra, ahol a reflektivitás a  $T_z$  küszöb fölött van (szürke területek), (b) Az ellipszis jellemzői (*Dixon és Wiener, 1993*)

Az 2.a ábrán szürkével jelölt területek mindegyik pixele meghaladja az adott küszöbértéket. Ezen területek felismerése két lépésben történik. Az elsődleges irányban – itt az  $x$  irányban – azonosítjuk azon pixelek sorát, ahol a reflektivitás meghaladja a beállított küszöbértéket, ehhez pedig egy számot rendelünk. Fontos, hogy csak egymással

oldalszomszédos pixelek számítanak sornak (2.a. ábra). Második lépésként csoportokba rendezzük ezeket a sorokat, s ahogy az előző lépésben láttuk, csak oldalszomszédos pixelek sorai számítanak egy csoportba. A fenti ábrán például az 1-6 számú pixelsorok számítanak egy csoportba, ez a csoport lesz az első azonosított vihar. Jól látható, hogy az említett szomszédosság feltétele miatt az 5 és 7 sorok nem tartoznak egy csoportba, ahogy a 12 és 15 sem.

A második lépést 3 dimenziós esetben mind az  $y$ , mind a  $z$  irányban el kell végezni. A két lépéses módszer előnye, hogy csökkenti a három dimenzióból fakadó számítási igényt, ezért ebben az esetben, a sorok azonosítása után két dimenziósra redukálja a feladatot.



3. ábra. Cellák lehetséges útvonalai

Ezután következik a vihar elemzése. A nowcasting rendszerek a zivatarok számos jellemzőjét detektálják és számítják ki, azonban ennél a módszernél elegendő az alábbi tulajdonságok ismerete:

- a reflektivitással súlyozott középpont koordinátája ( $x_z, y_z, z_z$ ) (azaz a  $Z$  reflektivitás segítségével kiszámítható a vihar középpontja),
- a  $V$  térfogat,
- a horizontális síkra vetített vihar területének mérete és alakja.

A vihar alakját egy ellipszissel közelítjük, mert a két dimenzióba vetített területet ez fedi le leginkább (2.b. ábra). Ezen kívül a számításokat is egyszerűbbé teszi, hiszen az ellipszis tulajdonságai, mint a középpont  $(x_e, y_e)$ , a fő – és melléksugarak hossza  $(r_{\text{major}}, r_{\text{minor}})$ , illetve a főtengely és a koordinátarendszer  $x$  iránya által bezárt szög  $(\Theta)$  könnyen kiszámíthatóak.

A következőkben megnézzük, hogy mi módon lehet követni a zivatarcellák mozgását. A 3. ábrán a  $t_1$  és  $t_2$  időlépcsőben azonosított viharok vetített területét és középpontját láthatjuk, valamint a közöttük lehetséges útvonalakat. Ahogy az ábrán látható, a párosítás sikerének nem feltétele, hogy  $t_1$ -ben és  $t_2$ -ben azonos számú vihar legyen. A  $t_1$  és  $t_2$  közötti  $\Delta t$  a radar két pásztázása között eltelt idő (5-10 perc). A párosítás nehézsége abban rejlik, hogy megtaláljuk az összes lehetséges útvonal közül azt az egyet, ami az igazi. Ehhez az alábbi szempontokat kell figyelembe venni:

1. Két időpillanat között inkább a rövidebb útvonalak lesznek helyesek, ez különösen igaz a zivatarokra, melyek gyors megfigyelést igényelnek ( $\Delta t \sim 5$  perc) méretük ( $d=3-10$  km) és  $\Delta t$  alatti elmozdulásuk (1-10 km) aránya miatt.
2. A párosított csoportba hasonló karakterisztikájú (méret, alak... stb.) viharok tartoznak.
3. A  $\Delta t$  időkülönbség alatti maximális elmozdulásnak van egy felső határa, amit a vihar várható maximális sebessége jellemez.

A megfelelő útvonalcsoport megtalálása kombinatorikai optimalizációval történik: azt az optimális útvonalcsoportot keressük, mely minimalizálja a  $Q$  veszteségfüggvényt:

$$Q = \sum C_{ij} \quad (1)$$

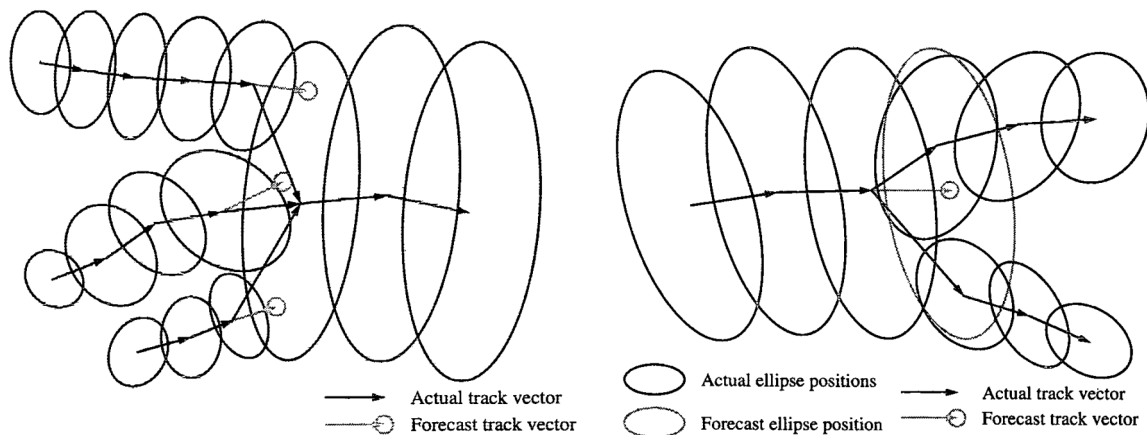
ahol 
$$C_{ij} = w_1 d_p + w_2 d_v, \quad (2)$$

$$d_p = \left[ (\overline{x_{z1i}} - \overline{x_{z2j}})^2 + (\overline{y_{z1i}} - \overline{y_{z2j}})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

és 
$$d_v = |V_{1i}^{1/3} - V_{2j}^{1/3}|. \quad (4)$$

Itt  $C_{ij}$  a veszteség,  $d_p$  az euklideszi-távolság,  $d_v$  a térfogat-különbség,  $i$  egy  $t_1$ -beli vihar az  $S_{1i} = (\overline{x_{z1i}}, \overline{y_{z1i}}, V_{1i})$  helyen,  $j$  pedig egy  $t_2$ -beli vihar az  $S_{2j} = (\overline{x_{z2j}}, \overline{y_{z2j}}, V_{2j})$  helyen. A módszer pontos leírását Dixon és Wiener (1993) tanulmánya részletesen tartalmazza.

Fontos megemlíteni még, hogy a TITAN milyen módon kezeli a cellák összeolvadását és szétválását.



4.a. ábra. Cellák összeolvadása

4.b. ábra. Cella szétválása

(Dixon és Wiener, 1993)

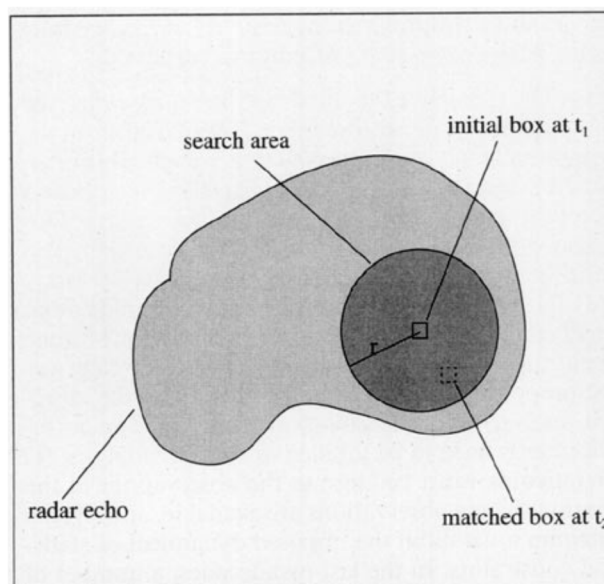
Ha két szomszédos vihar között a terület egy rövid időre meghaladja a küszöbértéket, úgy tűnik, hogy a viharok összeolvadtak, majd később szétváltak. Elsősorban itt jelenik meg a fent vázolt probléma, hogy az algoritmus nehezen különíti el az egymáshoz közeli viharokat, ezért nehezen megállapítható, mikor történt valódi összeolvadás és szétválás. A probléma az összeolvadásnál, hogy a korábbi viharok útvonalai azon a ponton látszólag véget érnek, és egy új vihar jelenik meg a párkereséssel feltételezett helyükön – vagy ahhoz közel (4.a. ábra). Sok esetben a maximális sebességük alapján túl hosszú az útvonal a  $t_1$ -beli viharok és a  $t_2$ -beli összeolvadt vihar között. Szétválásnál hasonlóan, a  $t_1$ -beli vihar párosítása sikertelen lesz, hiszen látszólag eltűnik a  $t_2$ -beli képről (4.b. ábra). Mindkét esetben pozíció előrejelzést készítünk a  $t_1$ -ben azonosított vihar(ok)ra és ha ez egybeesik a párosítással feltételezett pozícióval – azaz a vihar(ok) vetített ellipszisével kijelenthetjük, hogy valóban összeolvadás, avagy szétválás következett be.



## 2.2. COTREC (COntinuity of TREC vectors)

A COTREC a TREC (Tracking Radar Echoes by Correlation, *Rinehart és Garvey, 1978*). egy továbbfejlesztett változata, mely korrigálja a radar mérésekből fakadó hibákat, zajokat. A technika alapja azonban változatlan, így a továbbiakban a COTREC kerül bemutatásra (*Li et al., 1995*).

Ez a módszer ún. területkövető technika, szemben a TITAN-nal és SCIT-tel, melyek cellakövető technikák. Eredetileg a széladatok radar mérésekből való kinyerésére fejlesztették ki. A különbség, hogy nem azonosítjuk külön az egész cellát és követjük azt a középpontja alapján, hanem egy a reflektivitási küszöböt elért pixel-csoportban kijelölünk több, adott nagyságú területet és annak mozgását követjük.



9. ábra. A  $t_1$ -beli terület párosítása  $t_2$ -beli helyzetével

A módszer során a  $t_1$  és  $t_2$  időpillanatokban készült radarképeket felosztjuk egymástól adott távolságra lévő kis területekre, melyeknek ajánlott nagyságrendje 5-15 km. Ezután a  $t_1$  területeit összepárosítjuk a  $t_2$  azonos nagyságú területeivel és az összes párra kiszámoljuk a reflektivitási értékek közötti korrelációs együtthatót. Az a párosítás lesz az igazi melynek a legnagyobb a korrelációs együtthatója, így a program kiszámolja az eltolási vektort a  $t_1$ -beli területre. Ez jelzi az eredeti terület mozgását  $\Delta t$  idő alatt (a két mérés között eltelt idő, ~5 perc). Fontos, hogy nem minden esetben szükséges az egész adatbázisra kiszámolni a párosításokat, célszerű megadni egy  $r$  sugarat a  $t_1$ -beli terület körül, melyen belül keresendő a  $t_2$ -beli párja (9. ábra). A sugár nagysága:

$$r = V_{max}\Delta t \quad (5)$$

ahol  $V_{max}$  a maximális sebesség,  $\Delta t$  a két mérés ( $t_1, t_2$ ) között eltelt idő. A módszer fontos mennyiségei:

- terület nagysága (5-15 km),
- radar adatok rácsmérete (0,5-1 km),
- mozgásvektorok rácsmérete (4-16 km),
- a két mérés között eltelt idő ( $\Delta t \leq 5$  perc),
- reflektivitási küszöbérték (20 dBZ).

A vektorok gyakran mutatnak valamilyen környezeti zajra, ezeket a helyeket a TREC - 90 dBZ értékkel jelöli, melynek eredményeként 0 sebességgel rendelkező vektorokat kapunk. Ennek kiküszöbölésére jött létre a COTREC módszer. Első lépésként minimalizáljuk az inkorrekt vektorok előfordulását variációs analízissel. A 0 sebességű és a fő iránytól  $25^\circ$ -kal eltérő vektorokat kicseréljük a szomszédos vektorok átlagára. Másodszor a mozgás vektorok folytonosságát kell biztosítani variációs módszerrel. Ennek klasszikus megoldása egy veszteség függvény ( $J$ ) minimalizálása, a TITAN – hoz hasonlóan:

$$J(u, v) = \int_{\Sigma} [(u - u^0)^2 + (v - v^0)^2] dx dy, \quad (6)$$

Illetve teljesülnie kell a tömeg megmaradásának is, melyet a kontinuitási egyenlet fejez ki. Ez stacionárius, összenyomhatatlan közegre:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (7)$$

A fenti két egyenletben az  $x$  és  $y$  a detektált mozgásvektorok (TREC – vektorok),  $u^0(x,y)$  és  $v^0(x,y)$  koordinátái,  $u(x,y)$  és  $v(x,y)$  pedig a variációs analízis megoldásai. A fentiek alapján a probléma megoldása ekvivalens az alábbi skaláris függvénnyel:

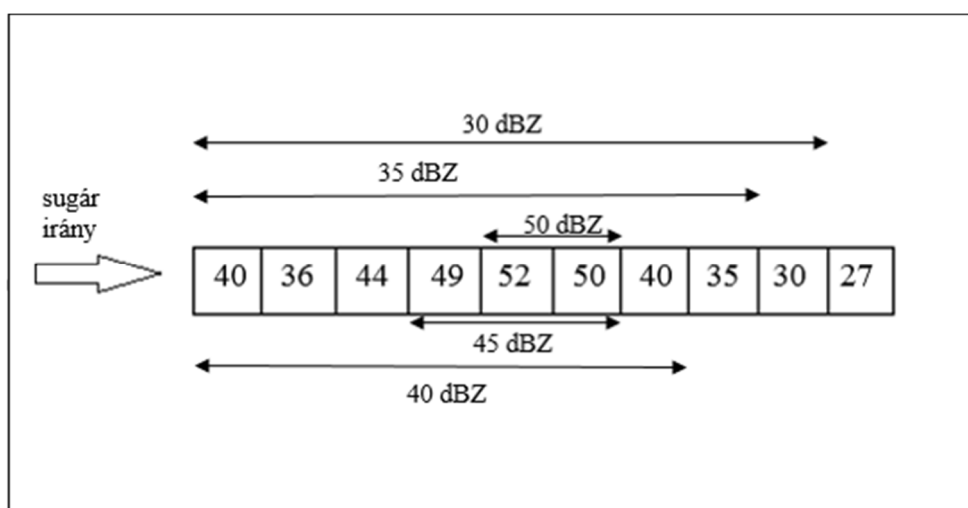
$$F(u, v, \gamma) = \int_{\Sigma} \left[ (u - u^0)^2 + (v - v^0)^2 + \lambda \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] dx dy, \quad (8)$$

ahol  $\lambda(x,y)$  Lagrange-szorzó.

A COTREC használata során felmerül, hogy mi történik akkor amikor  $t_2$ -ben nem találunk párosítható területet a  $t_1$ -es területhez, mivel annak környezetében egyetlen pixel sem éri el a reflektivitási küszöböt. Másik eset, amikor  $t_2$ -ben ott is találunk küszöböt meghaladó pixelt, ahol  $t_1$ -ben még nem volt. Ezekben az esetekben a módszer hibára futhat, ha csak nem teszünk bizonyos megköötéseket. A megoldás, hogy kiszámoljuk a  $t_2$ -beli terület és a hozzá kapcsolható  $t_1$ -beli terület átlagos reflektivitási különbségét. Ezután a  $t_2$ -beli terület helyzetét adott COTREC vektormezővel jellemezzük. Ezt minden területre elvégezzük  $t_1$ -ben. Azon területek, melyeknek pozitív lesz a reflektivitás különbsége a vihar erősödését jelzik, a negatív értékkel rendelkezők pedig a vihar gyengülését

### 2.3. SCIT (Storm Cell Identification and Tracking)

A SCIT algoritmust azért fejlesztették ki, hogy kiküszöbölje a TITAN egyik hibáját, azaz az egymáshoz közeli zivatarok (pl. zivatarláncok) külön-külön azonosításának és követésének hiányát (*Johnson et al., 1998*). Ezen kívül, a módszer a TITAN-nal szemben nyers radar adatokkal dolgozik, valamint nem használ ellipszist a zivatarcella alakjának közelítésére. Az algoritmus az adatok szűrésénél csak a környezeti zajokat és mérési hibákat szűri ki, és ahogy korábban említettem, csak a nyers térfogati reflektivitási adatokkal dolgozik.

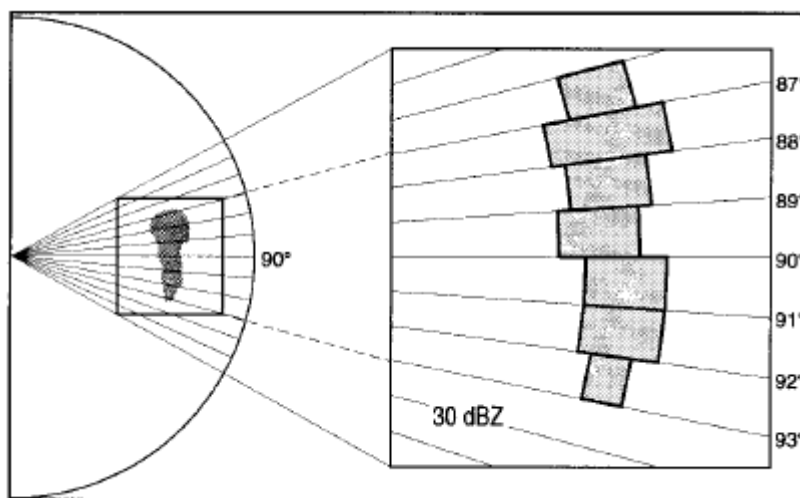


5. ábra. Vihar-szegmensek meghatározása különböző küszöbértékek használatával

A 3D cella azonosítás itt is lépésenként történik. Elsőnek egy 1D-s pixel-sort hozunk létre azokból a területekből, melyek reflektivitása meghalad egy adott küszöbértéket. Ez hasonló

a TITAN-hoz, azonban itt 7 különböző küszöbértéket használunk (30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 dBZ) és az előbbi lépést mindegyik küszöbre egyenként, minden magassági szögön elvégezzük. A folyamat végén minden küszöbre kapunk egy-egy pixel-sort, melyet Johnsonék „viharszegmens”-nek neveztek. (5. ábra). Érdeemes megemlíteni, hogy amennyiben kiugró érték jelenik meg a pixel-sorban, az is mentésre kerül, hiszen fontos az adott küszöbérték feletti területeket együtt tartani (5. ábra, 40 dBZ küszöbű pixel-sor). Egy vihar-szegmens akkor kerül mentésre, ha hossza eléri az 1,9 km-t.

Miután egy adott magassági szögön sugár irányban elkészült az összes vihar-szegmens, ezeket térbeli szomszédosságuk alapján csoportosítjuk. Két ilyen pixel-sor akkor alkot egy vihar-komponenst, ha egymáshoz képest  $1,5^\circ$ -ra helyezkednek el, és legalább 2 km hosszan érintkeznek egymással (6. ábra). Természetesen a 2D vihar kép azonos küszöbértékű sorok összekapcsolásával jön létre. Egy vihar-komponens legalább 2 vihar-szegmenst foglal magába, területe pedig meghaladja a  $10 \text{ km}^2$ -t. A 6. ábrán látható komponens 7 vihar-szegmenst tartalmaz és jól láthatóak szomszédosságuk feltételei.



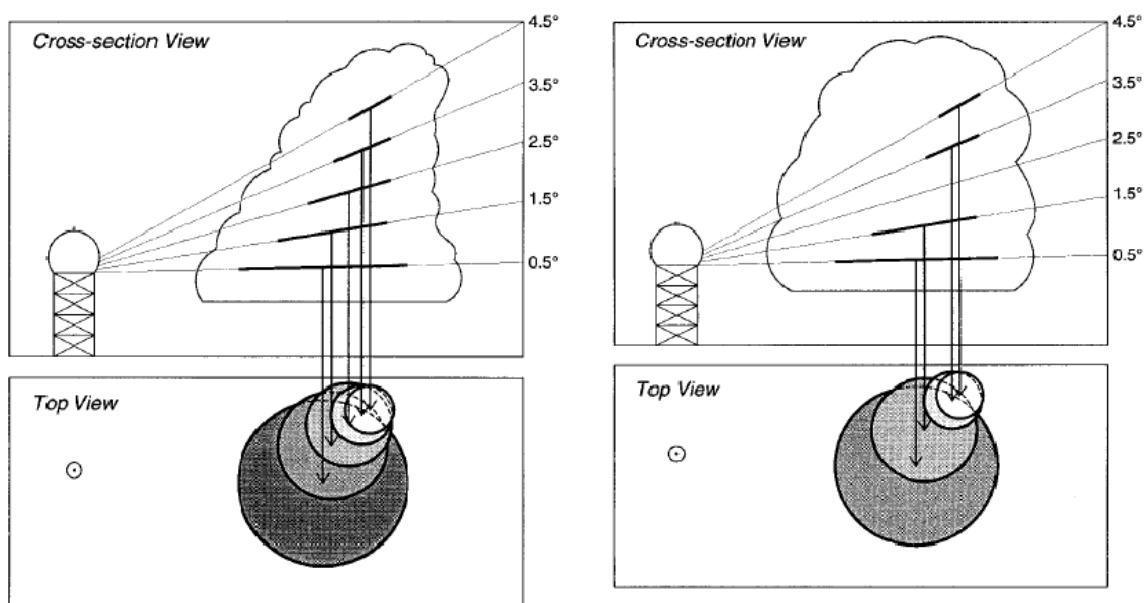
6. ábra. Vihar-komponens, mely hét vihar szegmensből tevődik össze (Johnson et al., 1998)

A fenti eljárást elvégezzük az összes magassági szögre, majd a komponenseket tömeg szerint csökkenő sorrendbe rendezzük és meghatározzuk a vertikális helyzetüket.

Minden 3D vihar cella legalább két, az egymást követő magassági szögeken elhelyezkedő 2D komponensből áll. Az eljárást a legalacsonyabb magassági szögön kezdjük. Először azokat a komponenseket társítjuk egymással – az egymást követő magassági szögeken –, melyek középpontjának távolsága 5 km-en belül van egymáshoz képest (7.a. ábra). Amennyiben marad nem párosított komponens, a folyamatot megismételjük először  $7,5 \text{ km}$ -

es, majd 10 km-es távolsággal. A továbbra is párosíthatatlan komponenseket az algoritmus nem használja fel. A 7.a. ábrán láthatjuk az elkészült 3D vihar cella keresztmetszetét, illetve a komponensek egymáshoz képest való elhelyezkedését felülnézetből. A végső eredmény egy a 2D és 3D cellákból álló pillanatkép.

Az algoritmus egymáshoz közel elhelyezkedő cellák esetében nehezen különíti el az egyes cellák 2D komponenseit a magassági szögeken, ezért előfordulhat, hogy egy egyszerű cellát két (vagy több) 3D vihar cellaként azonosít. Ennek oka, hogy bár horizontálisan ugyanott helyezkednek el, mégis van közöttük egy vertikális rés (7.b. ábra).



7.a. ábra

7.b. ábra

7. ábra. (a) 3D vihar cella keresztmetszete és a vihar-komponensek vertikális helyzete felülnézetből  
 (b) 3D vihar cella keresztmetszete vertikális réssel, vihar-komponensek vertikális helyzete felülnézetből (Johnson et al., 1998)

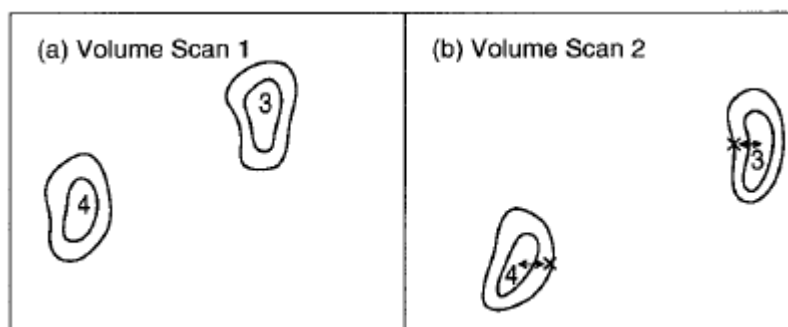
Ahhoz, hogy az algoritmus a látszólag két külön 3D cellát egynek tekintse, három feltételnek kell teljesülnie:

- azonos magassági szögön nem lehet mindkét cellának 2D komponense,
- a cellák középpontjainak távolsága nem haladhatja meg a 10 km-t,
- a vertikális rés nagysága nem haladhatja meg a 4 km-t, a magassági szög különbség pedig a 3°-ot.

Előfordulhat, hogy az azonosítási folyamat sok egymáshoz közeli vihart azonosít. Ebben az esetben – adott küszöbértékek figyelembe vételével –, az algoritmus csak az erősebb, nagyobb cellákat használja fel a további számításokhoz.

A viharok mozgásának követéséhez két, egymás utáni térfogati mérésből azonosított vihar cellát párosítunk össze időben. Ehhez szükséges a két térfogati mérés között eltelt idő ellenőrzése, a beállított küszöbérték pedig 20 perc. Nagyobb időkülönbségű mérések párosítása számtalan hibalehetőséget hordoz magában.

A követési módszer első lépése, hogy megkeressük  $t_{-1}$  időpillanatban hol volt a cella középpontja, majd egy elsődleges becslést adjunk a jelenlegi ( $t_0$ ) pozíciójára. A becslést vagy a cella  $t_{-1}$ -beli mozgásvektorának, vagy az alapértelmezett mozgásvektorának felhasználásával számoljuk. Utóbbit az összes korábbi mozgásvektor átlagolásával kapjuk, vagy ha nem áll rendelkezésre (elég) korábbi adat, az értéket a felhasználó adja meg. A következő lépés, hogy kiszámoljuk minden egyes  $t_0$ -ban detektált vihar és az elsődleges becslése közötti távolságot. Ha ez a távolság kisebb, mint egy küszöbérték, a  $t_{-1}$  pillanatbeli cellát összepárosítjuk az elsődleges becslés cellájával. Ez lesz a vihar egy lehetséges útja a két időpillanat között. Ahogy a TITAN-ban is tettük, az összes lehetséges útvonal közül itt is a legrövidebb utat választjuk meg az egyetlen helyes útnak. Utolsó lépésként kiszámítjuk az új mozgás vektorokat az összes – utóbbi két mérésben detektált – viharra.



8. ábra. A követési módszer lépései. Az x a vihar középpontjának elsődlegesen becsült pozíciója a  $t_0$  pillanatban, a nyíl pedig a becsült és a tényleges közötti távolságot mutatja. (Johnson et al., 1998)

A 8.a. ábrán két,  $t_{-1}$ -ben detektált vihart láthatunk, a 8.b. ábrán pedig két  $t_0$ -ban detektált vihart. Az x az (a) celláinak  $t_0$ -beli helyzetére készített elsődleges becslés, az összekötő nyíl pedig a középpont becsült és detektált helyzete közötti távolság. Ha feltételezzük, hogy ez a

távolság a küszöbértéken belül van, akkor az 8.a. és 8.b. ábrán lévő viharokat összepárosítjuk egymással.

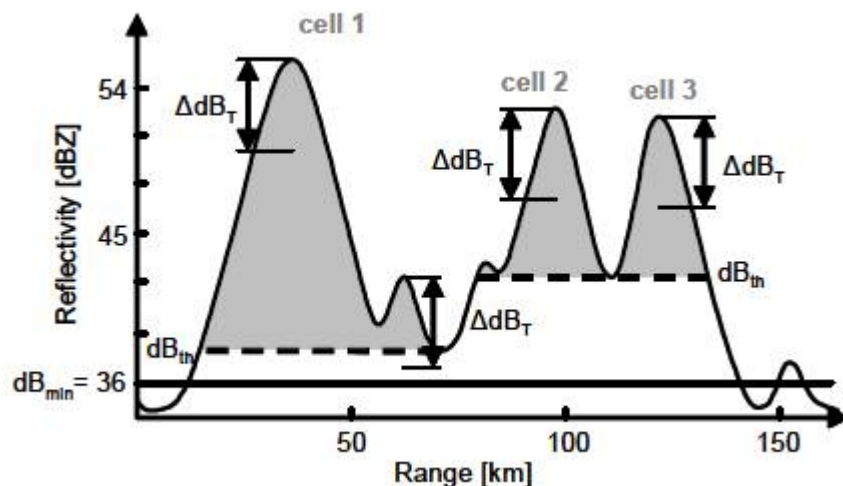
A párosítások elvégzése után a program kiszámítja a cella tulajdonságait és karakterisztikáit.

## 2.4. TRT (Thunderstorms Radar Tracking)

Ezt a módszert az RDT (Rapid Developing Thunderstorms)-ből fejlesztették ki, hogy hitelesebb követőrendszert kapjanak az Alpok hegyvidékére (*Hering et al.*, 2004). Az RDT egy olyan követési algoritmus, ami a műholdas adatokat használja fel a konvektív cellák felismerésére (*Morel et al.*, 2000, 2002).

A TRT 2D-s Descartes-i radar kompozit képek adatait használja fel, egy szigorú 7 lépcsős szűrési eljárást követően. Ez utóbbi miatt alkalmazható jól a módszer hegyvidékeken. A detektáló algoritmus célja, hogy konvektív cellákat azonosítson csapadékrendszerekben. Ehhez több, adaptív reflektivitási küszöbértéket használnak, melyet az RDT-ben alkalmaztak először. Az 10. 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 ( $\geq 4$  pixel  $\sim 16$  km<sup>2</sup>), illetve a pixelek reflektivitása elér egy adaptív  $dB_{th}$  küszöböt. Utóbbinak meg kell haladnia a  $dB_{min}$  minimum értéket (36 dBZ). A kiválasztott érték előnye, hogy a potenciálisan veszélyes konvektív viharok már a kialakulási fázisban azonosíthatóak. A  $\Delta dB_T$  küszöbérték a maximum reflektivitás és a cella alapjánál lévő reflektivitás közötti különbség (10. ábra). Ennek nagyobbak kell lennie 6 dBZ-nél, ekkor elegendő nagyságú a vertikális kiterjedés egy cellához. A  $dB_{th}$  értéket úgy választjuk meg, hogy kielégüljön az összes említett feltétel. Minden egyes cellánál egyéni küszöböt használunk fejlettségi állapotától függően. Az 10. 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 a vertikális kiterjedésük nem éri el 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 vertikális küszöböt, valamint nem egy nagyobb cella közvetlen szomszédságában helyezkedik el, így elvetjük.



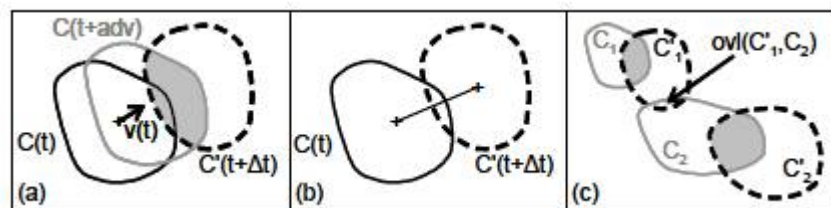
10. ábra. Egy idealizált csapadékrendszer vertikális reflektivitási keresztmetszete. (Hering et al., 2004)

Az azonosított cella követése hasonló a korábbi módszerekhez: egy  $t_1$  időpontban azonosított cellához párosítunk egy  $t_2$ -beli cellát bizonyos feltételek alapján. Először az eredeti cellához társítjuk a becsült mozgási sebességét, majd ennek alapján kiszámítjuk, hogy  $t_2$ -ben hol helyezkedne el. A sebességet a korábbi radarképeken látható cella elmozdulások alapján számoljuk ki, amennyiben ez nem áll rendelkezésre, kereszt-korrelációs módszerrel becsüljük meg. Ezután megnézzük, hogy a becsült pozíciójú ( $C(t+adv)$ ) és a tényleges  $t_2$ -beli cella ( $C'(t+\Delta t)$ ) hány százalékban fedik egymást (11.a. ábra). Amennyiben ez meghalad egy előre beállított értéket, a párosítás megtörtént és a két cellát összekötjük (11.b. ábra).

Többcellás helyzetekben ugyanezt az analógiát követjük, az átfedési százalék határozza meg az eredeti vihar párját. A 11.c. ábrán láthatunk egy példát, mely szerint bár a  $C_1$  cella becsült helyzete átfedésben van két másik  $t_2$ -beli cellával is, a nagyobb átfedés meghatározza az egyetlen helyes párt. Az ábrán látható, hogy az  $ovl(C'_1, C_2)$  nem éri el a kívánt átfedési küszöböt.

Cellák szétválásánál és összeolvadásánál több detektált cella lesz egymással összekötve. Ekkor a nagyobb cellákban a trajektória folytatódik, de a kis celláknál véget ér (avagy elkezdődik egy „új”), mintha a kisebbek megszűnnének (avagy kisebbek születnének). A kis cellák problémáját ún. pseudo pixelek (fiktív, elméleti pixelek) hozzáadásával oldjuk meg. Így megkapjuk a kívánt átfedési arányt.





11. ábra. Cellák párosítása  $t_1$  és  $t_2$  időlépcső között.  $C(t)$  jelöli a  $t_1$ -beli cellát,  $C(t+adv)$  a sebesség vektor segítségével kiszámolt becslült pozíció  $t_2$ -ben,  $C'(t+\Delta t)$  a  $t_2$ -ben azonosított cella. A (b) ábrán látható „+” a cella középpontját jelöli. (Hering et al., 2004)

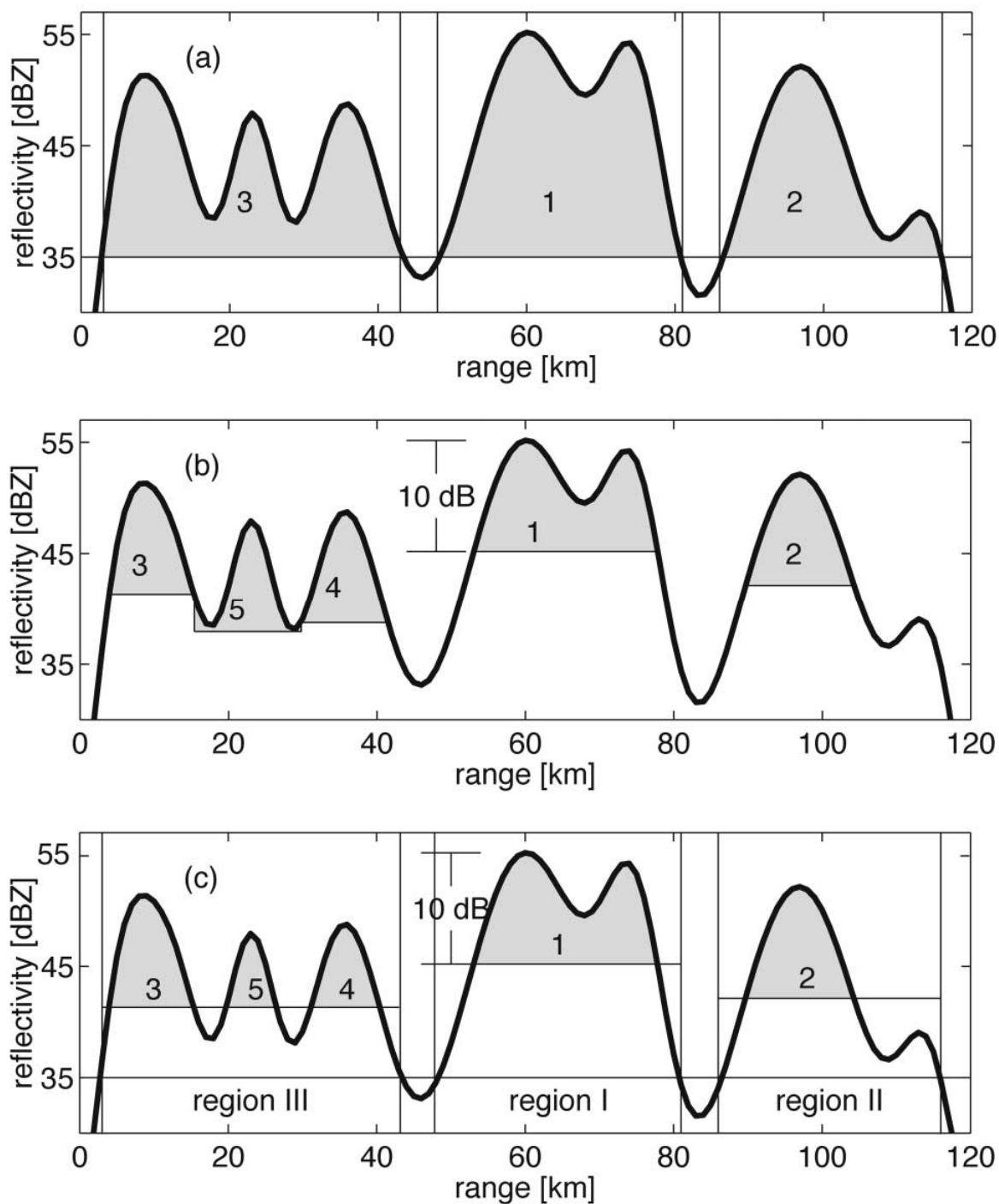
## 2.5. TRACE3D

Ez a módszer nyers radar adatokat használ fel, melyek még a számítások előtt több szűrési eljárásen esnek át (Handwerker, 2002).

A definíció szerint cellának nevezzük azon összefüggő területet, mely a küszöbértéket ( $dBZ_{limit} = 35$  dBZ) meghaladó pixelek egy csoportja (12.a. ábra). Ezt az egyszerű küszöböt használja például a TITAN.

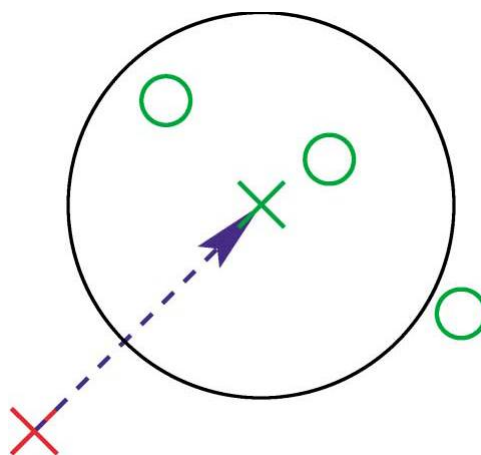
Probléma lehet, hogy a második küszöbérték miatt az egyik cella maximum beleér a másikba, mint azt az 12.b. ábra 5. cellamaximumánál láthatjuk. A TRACE3D erre a problémára ad egy megoldást. Ennek során a cella azonosítás első lépéseként felosztjuk a radarképet intenzív csapadék régiókra az első küszöb alkalmazásával, és ezeket azonosnak tekintjük azokkal a cella magokkal, melyeket az egyszerű küszöb módszerével azonosítanánk. Ezután megkeressük a maximális reflektivitási értéket, és azokat az összefüggő területeket, melyekben a reflektivitási érték nem alacsonyabb, mint a maximum és a  $dBZ_{diff}$  különbsége, cella magoknak definiáljuk (12.c. ábra). Ez azt jelenti, hogy az összes cella magot azonos küszöbvel határozzuk meg, nem egyedi értékek alapján. Értelmszerűen a reflektivitási maximumnak meg kell haladnia a  $dBZ_{limit} + dBZ_{diff}$  értéket.

Következő lépésként a program kiszámítja az azonosított cellák (cella magok) tulajdonságait, mint például a cella középpontját. A továbbiakban ezeket fogja használni az algoritmus a követési eljárásnál. Ez hasonló a SCIT-ben bemutatott módszerhez, azaz a cella következő,  $t_2$ -beli helyzetére egy becslést készítünk, melyet a  $t_1$ -beli pozíció és a mért vagy számított mozgás vektor segítségével számítunk ki.



12. ábra. A cella azonosítási módjai, a küszöbértékek használata: (a)  $\text{dBZ}_{\text{limit}}$  (35 dBZ), (b)  $\text{dBZ}_{\text{limit}} + \text{dBZ}_{\text{diff}}$  (10 dBZ) (c) Régiókra bontás +  $\text{dBZ}_{\text{limit}} + \text{dBZ}_{\text{diff}}$  (Handwerker, 2002)

A becsült pozíció köré egy  $r$  sugarú kört húzunk, melyen belül keresendő a ténylegesen detektálható  $t_2$ -beli párja (13. ábra). A mozgás vektor és az  $r$  sugár megadásának módját Handwerker munkája részletesen tartalmazza.



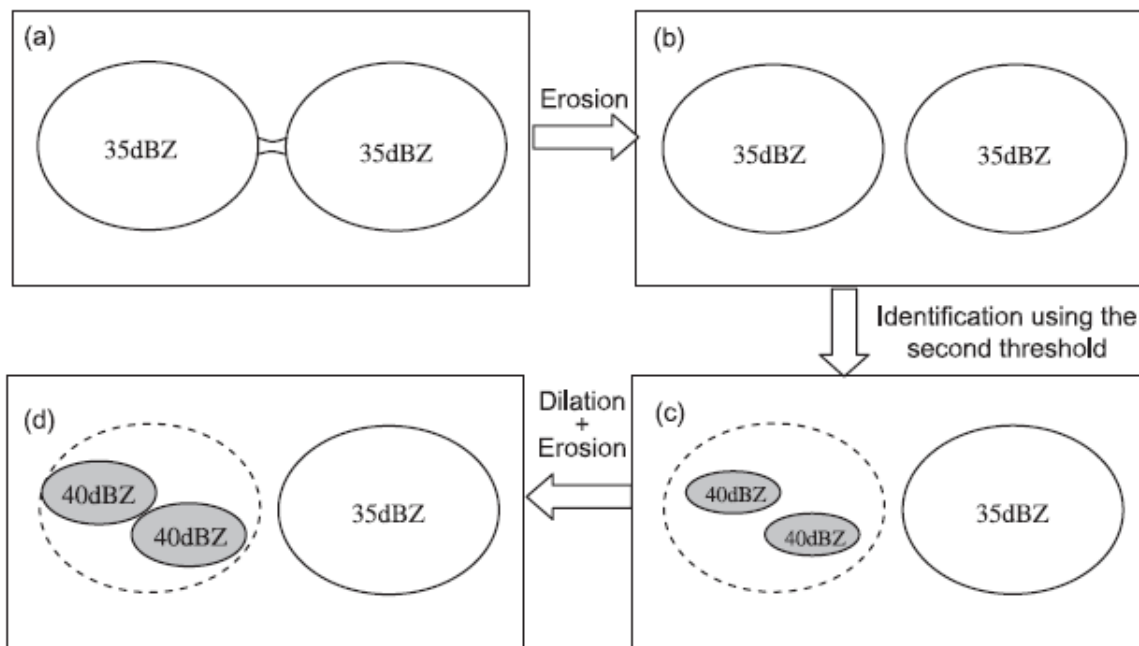
13. ábra. A cella követés menete. A piros kereszt jelöli a cella  $t_1$ -beli helyzetét, a zöld kereszt a  $t_2$ -re becsült pozíciót. A fekete kör azt a régiót jelöli, melyen belül keresendő a cella  $t_2$  – ben, a zöld körök pedig a  $t_2$ -ben detektált lehetséges párok. (Handwerker, 2002)

## 2.6. ETITAN (Enhanced TITAN)

A TITAN egyik problémája, hogy nem kielégítően kezeli az összeolvadásokat. A másik, hogy az egymáshoz közeli viharokat egyként azonosítja (Dixon és Wiener, 1993; Johnson et al., 1998). Ezeknek a problémáknak megoldására több módszert is kifejlesztettek, néhányat ezek közül már korábban bemutatam. Ezek hibája, hogy bár a szomszédos cellákat külön-külön azonosítják, a belső struktúra elveszik a módszer során. Az ETITAN megoldást nyújt mindezen problémákra (Han et al., 2009).

Gyakorlatilag ugyanazt a matematikai algoritmust alkalmazza, mint az elődje (TITAN), azonban több küszöbértéket használ, illetve további két alapvető lépést is tartalmaz az azonosítási módszer. Az első lépés megegyezik a TITAN-éval: egy  $T_{z,min}$  (30-40 dBZ) reflektivitási küszöbvel meghatározunk egy a küszöböt meghaladó reflektivitású pixelekből álló összefüggő sort, majd ezeket szomszédosság alapján csoportokba rendezzük. Ezt minden magassági szögön elvégezve 3D képet kapunk a celláról (14.a. ábra). A számításokat megkönnyítendő természetesen 2D-s képeken végezzük el az eljárást.

A következő lépésben alkalmazzuk az ún. eróziós módszert. Ezzel szétválasztjuk a látszólag összeolvadt cellákat két különálló cellára (14.b. ábra). A művelet lényege, hogy a cellákat összezsugorítjuk, így eltűnik az őket összekötő terület. Az új, kisebb cellák tartalmazzák az eredeti minden fontos részét, paraméterét. Ezután elkülönítjük az egyes cellákon belüli szubcellákat, azaz a magasabb reflektivitású területeket.



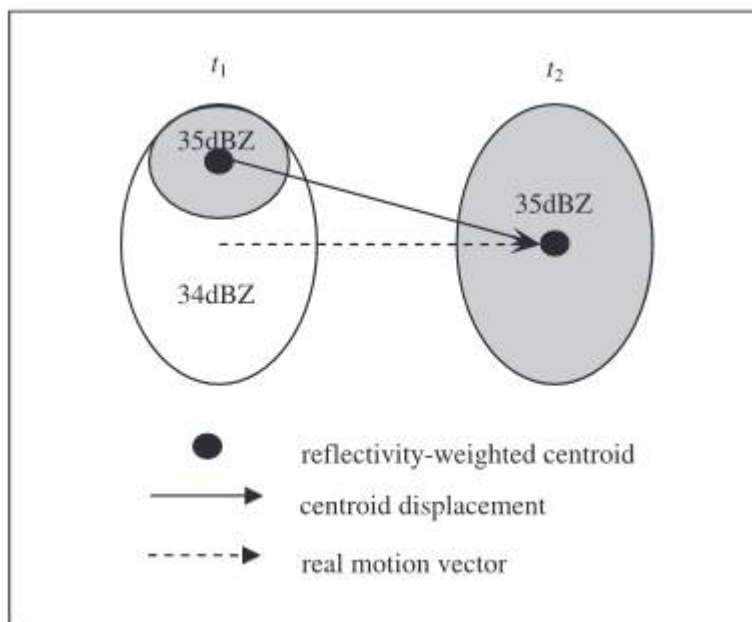
14. ábra. (a) Tévesen detektált összeolvadás (b) az eróziós módszert alkalmazva megkapjuk a két különálló cellát, (c) A második küszöböt használva mindkét cellára elkülönülnek az intenzív cella magok, (d) végül alkalmazzuk a tágítási módszert, hogy megkapjuk az eredeti struktúrát.

Ezt egy újabb küszöbértékkal tesszük, jelen példában  $T_{z,min}=35$  dBZ, a második küszöb,  $i_2=40$  dBZ. Az ETITAN lényeges különbsége a többi technikához képest, hogy  $i$  db küszöböt használ a közeli cellák elkülönítésére, ahol  $i=2, \dots, N_{k\ddot{u}sz\ddot{o}b}$ ,  $N_{k\ddot{u}sz\ddot{o}b}$  pedig a felhasználó által megadott küszöbök száma (2-6 db általában). Az  $i$ . küszöb meghatározásának módja:

$$T_{z,min} + (i - 1) \times 5 \text{ dBZ} \quad (9)$$

Az 14.c. ábrán láthatjuk, hogy a 35 dBZ minimumú cellában két 40 dBZ értékű intenzív cella mag különíthető el. Utolsó lépés, hogy a cella struktúrájának megőrzése érdekében felnagyítjuk a két szubvihar, hogy azok határa érintkezzen az „elvetett” cella határával (14.d. ábra).

A cellakövetési procedúra részben megegyezik a SCIT átfedéssel, ezt korábban részletesen leírtam. A különbség azonban, hogy amennyiben az átfedés nem éri el a megválasztott határértéket – azaz nem talál párt az eredeti cellának –, a párosítást a TITAN-nál megismert kombinatorikai optimalizációval végzi el a program. A feladat megoldási menete megegyezik a korábban ismertetettel, azonban az elmozdulási vektor számítása során egy a cella nagyságától függő maximális sebességet adunk meg.



15. ábra. A cella alakváltozásából fakadó téves elmozdulás vektor (folyamatos vonal), és a valós (szaggatott).

A 15. ábrán látható példában, a  $t_1$ -ben,  $T_{z,\min} = 35$  dBZ küszöbvel detektált cella (szürke terület) középpontját a szokásos módon határoztuk meg. Felmerül a kérdés, hogy mi történik, ha  $t_2$ -ben nem találunk neki megfelelő párt, a maximális sebesség által számított maximális elmozdulás alapján. Mint az az ábrán is látszik, a probléma gyökere, hogy  $t_1$ -ben a vihar egy része még nem éri el a beállított minimum küszöböt,  $t_2$ -ben azonban igen, így a középpont elmozdulási vektora alapján irreálisan nagy sebesség adódik. Ezt elkerülendő, az alábbi sebességmaximumokat ( $S_{\max}$ ) alkalmazzuk a párosítás során:

Ha a vihar területe:

- $\leq 300 \text{ km}^2$ ,  $S_{\max} = 100 \text{ km/h}$ ,
- $300 \text{ km}^2$  és  $500 \text{ km}^2$  közötti,  $S_{\max} = 150 \text{ km/h}$ ,
- $\geq 500 \text{ km}^2$ ,  $S_{\max} = 200 \text{ km/h}$ .

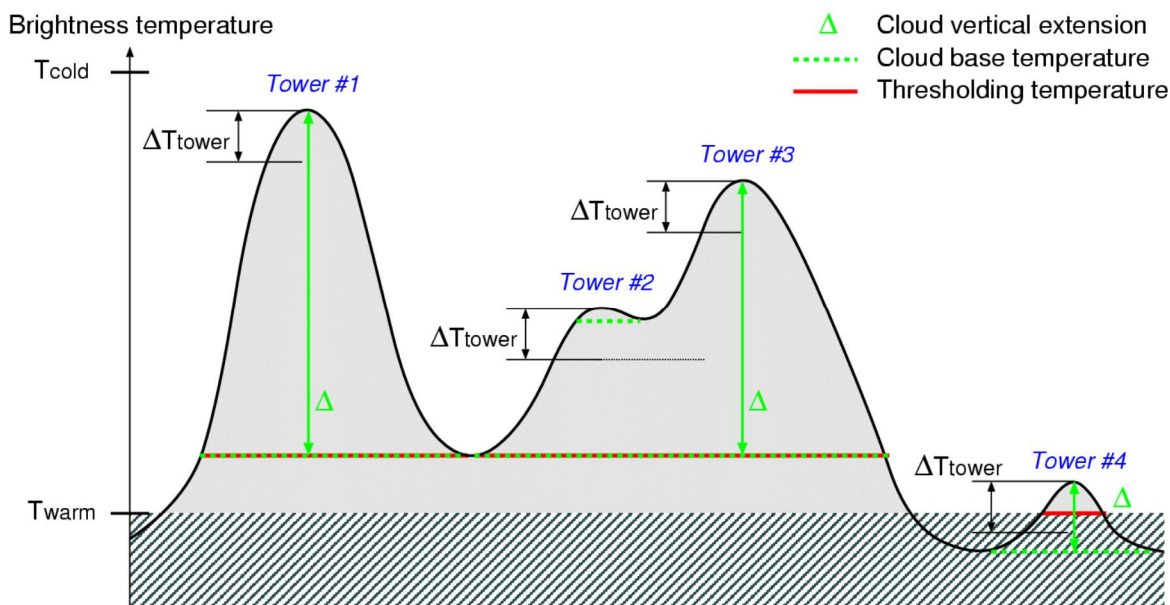
Az ETITAN további érdekessége, hogy az előrejelzés során a (CO)TREC által használt kereszt-korrelációs módszert kombinálja a TITAN-ban használt egyéb paraméterek kiszámítására alkalmas algoritmussal.

### 3. MŰHOLD ADATOKON ALAPULÓ ALGORITMUSOK

A műholdas cella azonosítási módszerek menete részben megegyezik, csupán néhány adatszűrési algoritmusban, illetve a felhasznált műholdképekben különböznek. Ezek közül mutatok be néhányat dolgozatomban.

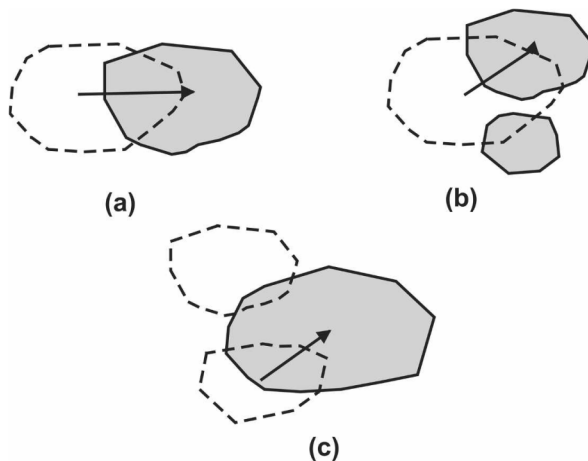
#### 3.1. RDT (Rapid Developing Thunderstorms)

Az egyik legismertebb műholdas zivatarcella követő rendszer a korábban már említett RDT. Az algoritmus a geostacionárius műholdak IR 10.8  $\mu\text{m}$  hullámhosszú képeit használja fel a konvektív cellák azonosításához (Morel *et al.*, 2000, 2002). Úgy fejlesztették ki, hogy már olyan kezdődő konvektív cellák észleléséhez is alkalmas legyen, melyek néhány pixel nagyságúak. Definíció szerint cellának tekinti azt az összefüggő pixel halmazt, melyben az abszolút 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. Ez hasonló logikát követ, mint a TRT radar algoritmus, hiszen ez utóbbit az RDT-ből fejlesztették ki (16. ábra).



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

A követési rendszer a már ismert területi átfedései módszert használja, tehát a detektált cellára készít egy elsődleges pozíció becslést annak sebessége alapján. Amennyiben ez a becslött pozíciójú cella megfelelő százalékban fedi a  $t_2$ -ben detektált cellát, a párosítás megtörténik.



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

### 3.2. 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  $\mu\text{m}$  műholdképeket használ fel a mezoskálájú konvektív rendszerek azonosításához és követéséhez. A cella azonosítási módszer hőmérsékleti küszöbértéke 235 K, mert Dél-Amerika területén – ahol a módszert aktívan használják – a kísérletek során ez vált be leginkább. A meghatározott területi minimum 2400  $\text{m}^2$ . A követési algoritmus átfedései módszert használ, ami feltételezi, hogy a  $t_1$ -beli és  $t_2$ -beli pozíciójú cellák néhány pixelben fedik egymást a műholdképen, illetve hasonló alakkal, mérettel rendelkeznek. Ha az eredeti és jövőbeli pozíció 25%-ban fedik egymást, akkor a cellákat összepárosítjuk (17.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 (17.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 utódjának, a kisebb átfedésűt pedig eltűnő cellaként értelmezi (17.c. ábra).

## 4. VILLÁM ADATOKON ALAPULÓ ALGORITMUSOK

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

A villámlás jellemzésére gyakran használják a villámgyakoriságot – vagy villámsűrűséget –, melyet egy  $(4 \times 4)$  km<sup>2</sup>-es vagy nagyobb felbontású rácshálózat segítségével adnak meg és az adott grid területén lévő villámok számát jelenti. A radar  $(1 \times 1)$  km<sup>2</sup>-es felbontásánál azért adnak meg nagyobbat, mert ilyen kis területen a számítások szempontjából elhanyagolható számú villám van.

### 4.1. Cellsearch

A Cellsearch-t Finnországban fejlesztettek ki (*Tuomi és Larjavaara, 1998*), mely kizárólag 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 cella mag azonosítása után a detektált egyedüli 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,
- ha több, mint egy cella esetében igaz a villámra az első három tulajdonság, a legközelebbi cellához társítjuk,
- ha nem találunk megfelelő cellát, a villámot egy új cella részének tekintjük.



## 4.2. Betz et al. cellakövető algoritmus

2006-ban üzemelték be a LINET időmérésen alapuló villámlokalizációs rendszerét, melyhez egy követő algoritmust is fejlesztettek (Betz et al., 2008). A módszer kezdetleges, de a LINET adatok felhasználásával tökéletesen alkalmas a villámkarakterisztikák megfigyelésére, hiszen a lokalizációs rendszer képes a IG (in cloud, felhőn belüli) villámok detektálására is. Az azonosítási módszer egyszerű: amennyiben a villámsűrűség eléri egy minimum küszöbértéket, feltételezzük, hogy az adott helyen cella van. A cella határát a villámok számának minimum alá csökkenése húzza meg. A követési algoritmus egyszerű extrapolációval számol a korábbi 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.

## 5. KOMBINÁLT ADATOKON ALAPULÓ ALGORITMUSOK

### 5.1. Lakshmanan et al. módszere

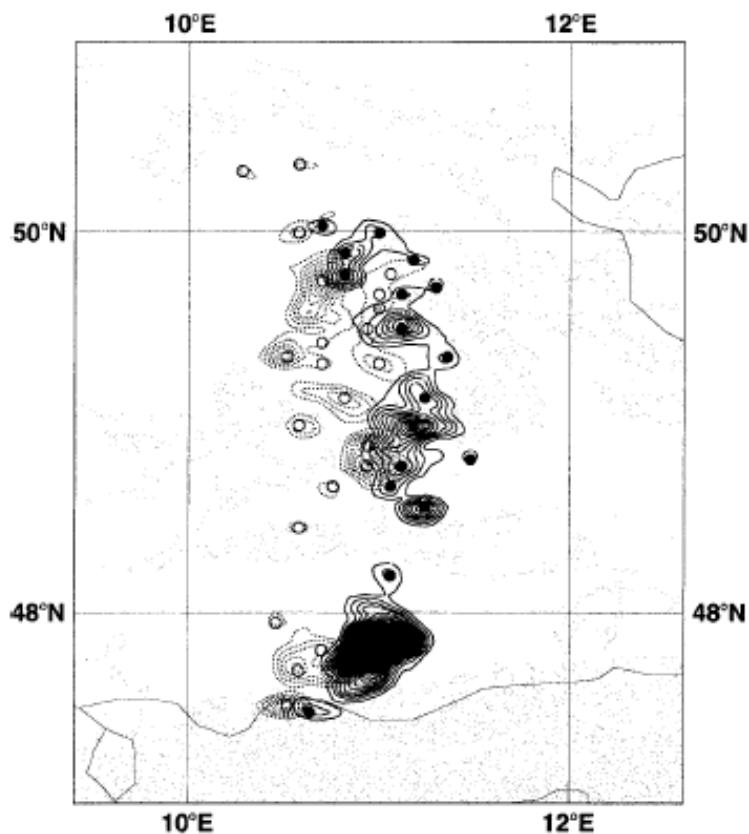
Ez egy műhold- és radar adatokat felhasználó algoritmus, mely speciális K-közép klaszterelemzést használ a cellák különböző léptékű azonosításhoz (*Lakshmanan et al., 2003*). Utóbbi eljárást felhasználja a követési algoritmusban is, hogy minimalizálja a párosítási hibákat. A sebességek becsléséhez mind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

### 5.2. Cb-TRAM

A Cb-TRAM intenzív konvektív cellák azonosításához és követéséhez METEOSAT-8 SEVIRI 6.2  $\mu\text{m}$  és 10.8  $\mu\text{m}$  hullámsávú adatokat használ fel (*Zinner et al., 2008*). Ezen felül a cella azonosításnál figyelembe veszi az ECMWF modell tropopauza hőmérsékleti adatait is. A követési algoritmus a sebesség vektor becslésén alapuló előrejelzett és a tényleges pozíció átfedésén alapul.

### 5.3. Steinecker et al. módszere

Ez az algoritmus villám és radar adatokat egyaránt felhasznál, mely konvektív cellák és cella rendszerek követésére egyaránt alkalmas. A villám adatokat (4x4)  $\text{km}^2$ -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 maximumokat, melyeknek egy bizonyos küszöb-intervallumba kell esniük. Ezek lesznek az azonosított cellák, melyekhez a reflektivitás adatok esetében a szomszédos 8 pixelt is elmentjük (18. ábra). A követési algoritmus ezután több lépcsős kritérium rendszerrel állapítja meg a cellák elmozdulás vektorát.

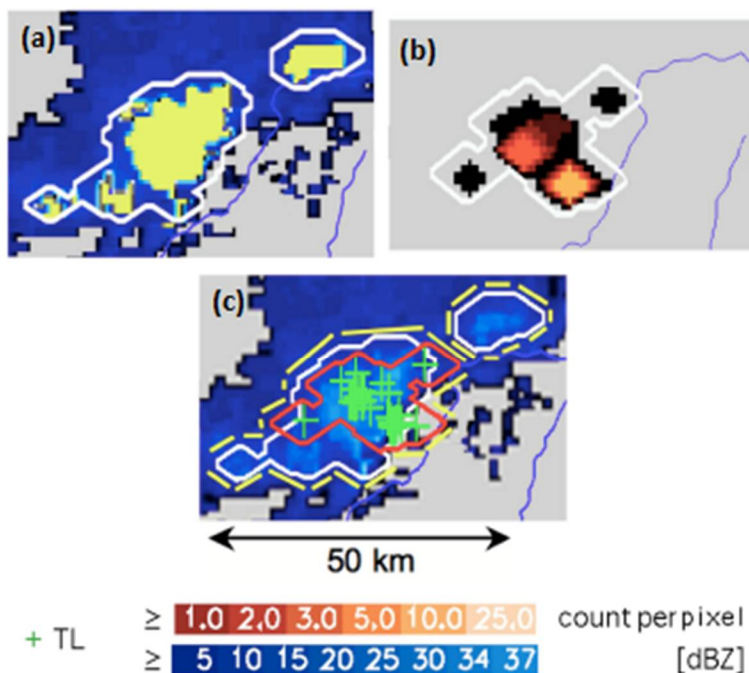


18. ábra. Gauss-filterrel simított villám sűrűség adatok az izolált maximumokkal. Az üres körök a  $t_1$ -beli pozíciót, a feketék a  $t_2$ -beli pozíciót jelölik. (Steinecker *et al.*, 2000)

#### 5.4. Bonelli és Marcacci módszere

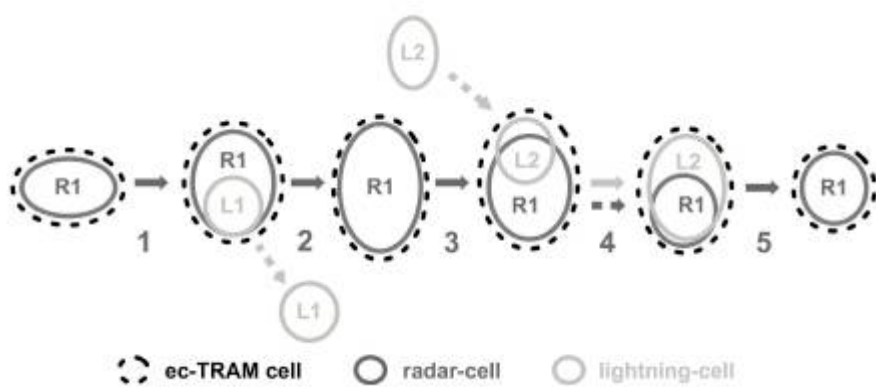
Bonelli és Marcacci (2008) szintén radar és villám adatokkal dolgozik, azonban itt eltérő rácsméretet használnak a maximumok keresésénél. A villám sűrűséget ( $5 \times 5$ ) km<sup>2</sup>-es gridekben, a reflektivitási adatokat pedig a szokásos (1x1) km<sup>2</sup>-en vizsgálja meg, 15 perces intervallumokban. Ez a módszer is fix küszöböt használ a maximumok keresésére, a radar adatoknál megszokott 44 dBZ-s értékkel. 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 írunk fel, mely megmutatja, hogy melyik a nekünk megfelelő párosítás.

## 5.5. ec-TRAM



19. 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 LINET villám adatokra épül fel (Meyer *et al.*, 2013). A módszer a külön-külön is működő korábbi rad-TRAM (Kober és Tafferner, 2009) és az új li-TRAM rendszereket kombinálja, felhasználva Zinner *et al.* Cb-TRAM műholdas követő algoritmusát. Az ec-TRAM cella azonosításának első lépése, hogy azonosítsuk a radar cellát 33 dBZ küszöbértékkel (19.a. ábra). Második lépésként azonosítjuk a villám cellákat, melyek a legintenzívebb villámokat tartalmazó legnagyobb villám sűrűségű területek (19.b. ábra). Ezután a két cellát átfedésbe hozzuk egymással, és ez adja meg az ec-TRAM cellát (19.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 (20. ábra).



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

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A heves zivatarok nyomon követése kulcsfontosságú az emberi életek, természeti kincsek és az anyagi javak megőrzéséhez. A cella azonosító és követő algoritmusok sokat fejlődtek 1953-óta, amikor először kísérelték meg előrejelezni egy csapadékgóc jövőbeli helyzetét. Szakdolgozatomban elsősorban a radar adatokon alapuló eljárásokat részleteztem, melyek tulajdonságainak összehasonlítását az 1. táblázat is szemlélteti.

A módszereket megkülönböztethetjük a bemenő adatok típusa alapján, tehát, hogy nyers vagy kompozit radar képet használnak-e fel a számítások során. Az előbbi csoportba a COTREC, SCIT és TRACE3D algoritmusok, az utóbbiba a TITAN, TRT és ETITAN tartoznak bele.

A cella azonosításnál a COTREC-et egyértelműen kivétel, hiszen a módszer nem definiálja a cellát, és ezért nevezzük ezt terület követő technikának, melynek részleteit a 2.2.-es fejezetben kifejtettem. Míg a legtöbb technika pusztán a reflektivitási küszöb(ke)t elért területeket definiálja cellaként, a TRACE3D az azonosítás lépéseként csapadék régiókat keres, és ezen belül azonosítja a cellákat. További előnye, hogy a TRT-hez hasonlóan maximum helyeket keres, és ezeket jelöli meg cellamagként. A használt küszöbértékek tekintetében kiemelhetjük a TITAN-t és az ETITAN-t. Előbbi a felsoroltak közül az egyetlen algoritmus, amelyik csupán egy küszöbértéket használ a cellák azonosításához, utóbbi pedig abban különleges, hogy minden cellánál egyedileg kerül megállapításra a használt küszöbök száma és értéke. A bemutatott algoritmusok egyetlen közös nevezője, hogy terület (pixel) minimumot határoznak meg, elkerülendő a nagyon kicsi, vagy téves cellák követését.

A cella követő technikák esetében különbséget tehetünk, hogy szabályos vagy szabálytalan alakú cellát követünk. A módszerek közül kizárólag a TITAN és annak továbbfejlesztett változata (ETITAN) használ egy szabályos formát – ellipszist – a párosítás megkönnyítése érdekében. A cella követési algoritmusok fontos számolási paramétere a cella középpontja, ami egy szabálytalan alakú cella esetén a reflektivitással súlyozott középpontot jelenti. A számítások fontos alapeleme a mozgás vektor kiszámítása, melyet a vihar korábbi mozgásából számítanak ki. Születő és nagyon fiatal cellák esetében az algoritmusok különféle statisztikai becslésekkel adják meg ezt az értéket. A pozíció következő időlépcsőbeli helyzetének meghatározásához két technika szűkíti le a vizsgálandó terület nagyságát ( $r$  keresési sugárral): a COTREC és a TRACE3D. A párosítás mikéntjében több átfedés is van a módszerek között. A TITAN és az ETITAN kombinatorikai optimalizációt is használ a megfelelő pár megtalálásához, kereszt-korrelációt a COTREC és

az ETITAN. Az átfedés nagysága alapján dönt a TRT és az ETITAN, a legrövidebb távolság alapján a TITAN, COTREC, SCIT és TRACE3D.

A cella összeolvadás és szétválás azonosítása nehéz feladat. A növekedés és a leépülés, illetve a nagyon közeli szomszédos cellák azonosítására, követésére minden algoritmus egyedileg próbált megoldást találni. Azonban ezek a jelenségek még mindig kimeríthetetlen hiba lehetőséget jelentenek a nowcasting során.

A műholdas módszerek közül az RDT-t lehet leginkább kiemelni, hiszen az adaptív küszöbök használata precíz azonosítást tesz lehetővé. Hátránya, hogy a cella vertikális szerkezetéről egyáltalán nem kapunk képet, ehhez radarra és/vagy villámlokalizációs rendszerre van szükség. A villámadatokon alapuló módszerek közül a leghatékonyabbak azok, melyek olyan időkülönbségen alapuló rendszer adatait használják fel, amik az IC villámok detektálására is alkalmasak. Ez utóbbi adatok nagyban elősegítik a zivatarcellák struktúrájának megfigyelését, ami alapján pontosabban következtethetünk mozgására és fejlődésére.

Tapasztalatok alapján a radar, villám és műhold adatok információtartalma kiegészíti egymást, így a gyakorlatban a kombinált módszerek (pl. ec-TRAM) használata pontosabb előrejelzést tesz lehetővé.





## **KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS**

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Mona Tamásnak, hogy türelemmel és lelkesedéssel követte nyomon munkámat. Köszönöm a források fellelésében és a matematikai összefüggések meglátásában nyújtott segítségét.

Köszönöm Dr. Ács Ferencnek, hogy szakmai tudásával, formai és tartalmi észrevételeivel egységes egészé tette szakdolgozatomat.

## IRODALOMJEGYZÉK

Betz, H. D., Schmidt, K., Oettinger, P., Wirz, M., 2004: Lightning Detection with 3D-Discrimination of Intracloud and Cloud-to-Ground Discharges. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L11108, doi: 10.1029/2004GL019821.

Betz, H. D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W. P., Defer, E., Dziewit, Z., Konarski, J., 2008: LINET – An International Lightning Detection Network in Europe. *Atmospheric Research*, **91**, 564-573.

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

Bonelli, P., Marcacci, P., 2008: Thunderstorm nowcasting by means of lightning and radar data: algorithms and applications in northern Italy. *Nat. Haz. and Earth Sys. 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. *J. Hydrol.*, **132**, 179-200.

Crane, R. K., 1979: Automatic Cell Detection and Tracking. *IEEE T. Geosci. Electronics*, GE-17, 250–261.

Dixon, M., and Wiener, G., 1993: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting – A Radar-based Methodology. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **10**, 785-797.

Demetriades, N. W. S., Molinari, J., Holle, R. L., 2006: Long Range Lightning Nowcasting Applications for Tropical Cyclones. *1st International Lightning Meteorology Conference*, USA

Finke, U., 1999: Space-time correlation of lightning distributions, *Mon. Weather Rev.*, **127**, 1850–1861.

Fujita, T., 1969: Present status of cloud velocity computations from ATS-1 and ATS-3 satellites. *COSPAR Space Research IX*, North-Holland, Amsterdam, 557–570.

Han, L., Fu, S., Zhao, L., Zheng, Y., Wang, H., Lin, Y., 2009: 3D Convective Storm Identification, Tracking, and Forecasting – An Enhanced TITAN Algorithm. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **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., Sényesi, S., 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 analysis in Hungary using radar observations. *Időjárás*, **112**, 1-13.

Johnson, J. T., MacKeen, P. L., Witt, A., DeWayne Mitchell, E., 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.

Kober, K. and Tafferner, A., 2009: Tracking and nowcasting of convective cells using remote sensing data from radar and satellite. *Meteorol. Zeitschr.*, **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., Hensdon, J., Knight, Ch., 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, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **85**, 1107–1125.

Li, L., Schmid, W., Joss, J., 1994: Nowcasting of Motion and Growth of Precipitation with Radar over a Complex Orography. *J. Applied Meteorology*, **34**, 1286-1300.

Ligda, M. G. H., 1953: The horizontal motion of small precipitation areas as observed by radar. *PhD thesis, (Wea. Radar. Res., Tech. Rep. 21.)*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA

Mona, T., 2013: Zivatar rendszerekben fellépő villámlási anomáliák vizsgálata. *Diplomamunka*, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Budapest, 54 oldal

Morel, C., Sénési, S., Autones, F., Labatut, L., 2000: The Rapid Developing Thunderstorms (RDT) product of the nowcasting SAF. Prototyping activities and quality assessment using GOES images. *Proc. The 2000 Met. Sat. Data User's Conference*, Bologna, Italy, 698-705.

Morel, C., Sénési, S., Autones, F., 2002: Building upon SAF-NWC products: Use of the Rapid Developing Thunderstorms (RDT) product in Météo-France nowcasting tools. *Proc. The 2002 Met. Sat. Data User's Conference*, Dublin, Ireland, 248-255.

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, *J. Atmos. Ocean. Techn.*, **4**, 422–434.

Seres, A. T., 2014: Zivatarklimatológiai elemzések és a nagy csapadékhozamú, konvektív jelenségek, időszakok vizsgálata Magyarországon. *Doktori értekezés*, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Budapest, 115 oldal

Steinacker R., Dorninger M., Wölfelmaier F., Krennert T., 2000: Automatic Tracking of Convective Cells and Cell Complexes from Lightning and Radar Data. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **72**, 101–110.

Tuomi, T. J., Larjavaara, M., 2005.: Identification and analysis of flash cells in thunderstorms, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **131**, 1191–1214.

Vila, D. A., Machado, L. A. T., Laurent, H., Valesco, 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. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **101**, 191-210.

### **Internetes hivatkozások**

<http://www.met.hu>

<http://www.metoffice.gov.uk>

<http://www.nws.noaa.gov>

<http://www.ral.ucar.edu/projects/titan/home/>

<http://www.hko.gov.hk>