

A ZIVATARCELLA AZONOSÍTÓ ÉS KÖVETŐ MÓDSZEREK ALAPPILLÉREI

THE BASICS OF THUNDERSTORM IDENTIFICATION AND TRACKING METHODS

Megyeri Otília Anna

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter stny. 1/A, *otilie3@gmail.com*

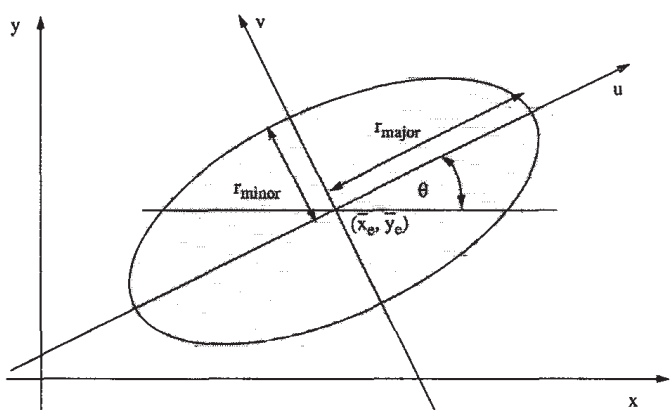
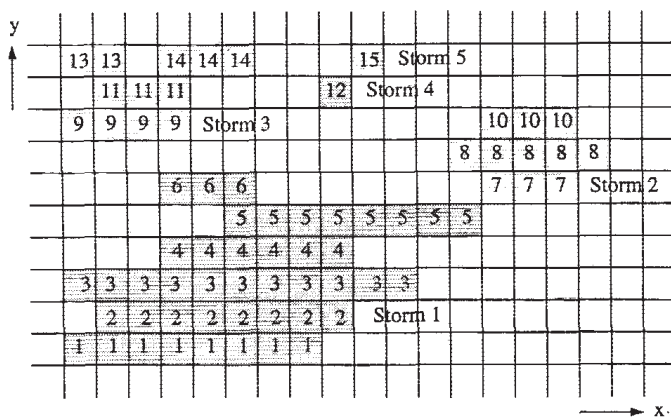
Összefoglalás. A zivatarok azonosítása és követése mindig fontos volt a meteorológiában. Ez többnyire radar méréseken alapuló algoritmusok használatával lehetséges, melyeket nowcasting rendszerekbe építenek be. Az alábbiakban röviden áttekintjük a nemzetközi és hazai gyakorlatban legtöbbször használt, legismertebb radar alapú algoritmusokat.

Abstract. Thunderstorm identification and tracking has always been important in the meteorology. These procedures are often based on algorithms constructed for analysing weather radar measurements for nowcasting purposes. The paper shortly reviews the most common and well-known methods, which are used in both international and national practice.

Bevezetés. A heves konvektív légköri képződmények mindig nagy kihívást jelentenek az előrejelzők számára, nyomon követésük kulcsfontosságú az emberi életék, természeti kincsek és az anyagi javak megőrzésében. Az első radar adatokon alapuló algoritmust 1953-ban fejlesztették ki a csapadékgócok követéséhez, amelyben extrapolációval végeztek pozíció előrejelzést (Ligda, 1953). Ahogy egyre fontosabb lett az előrejelzések pontosítása, úgy fejlődtek a zivatarkövető algoritmusok is (Crane, 1979; Rosenfeld, 1987; Chen és Kavvas, 1992; Dixon és Wiener, 1993). 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

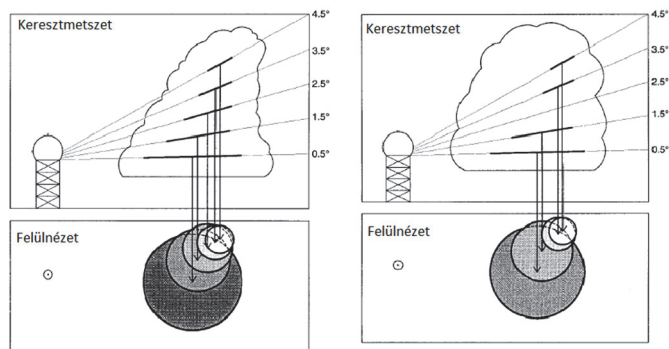
maximális reflektivitási értéket, megkapjuk a 2D-s kompozit radar képet. A cella-azonosítás során olyan területeket, területelemeket keresünk egy radarképen, melyek reflektivitása meghalad egy adott küszöbértéket. Az egyes algoritmusok mind a küszöbértékek nagyságában és számában, mind a viharcella pontos definiálásában eltérnek egymástól. Ezek után a cella időbeni követése a feladat, melynek során két vagy több egymás utáni radarmérést hasonlítunk össze. A két lépés közül a követés a nehezebb feladat. A cellák elkülönítésére, összeolvadásai, avagy szétválásai követésére mindegyik módszer egyedi megoldást javasol. Az alábbiakban ezeket röviden ismertetjük.

TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking Analysis and Nowcasting). A TITAN a legismertebb zivatarcella felismerő és -követő módszer (Dixon és Wiener, 1993), melyet, vagy annak továbbfejlesztett változatát világszerte alkalmazzák a gyakorlatban, így a hazai meteorológiai elemzésekben is (Horváth et al., 2008; Seres 2015; Seres és Horváth, 2015; Mona et al., 2016). Ezt az eljárást eredetileg nyers, 3D-os radar adatok felhasználására tervezték, de a számítások egyszerűsítése miatt e nyers adatokból először kompozit radarképeket szerkesztenek. Magát a cellát egy olyan egybefüggő területként jellemezzük, ahol a reflektivitás értékek meghaladnak egy adott küszöbértéket (1.a ábra). 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 (1.b ábra). Értelmszerűen 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 hasonlóbbak 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 vihar(ok)ra és ha ez egybeesik a párosítással kapott pozícióval, kijelenthetjük, hogy valóban összeolvadás, vagy szétválás következett be.

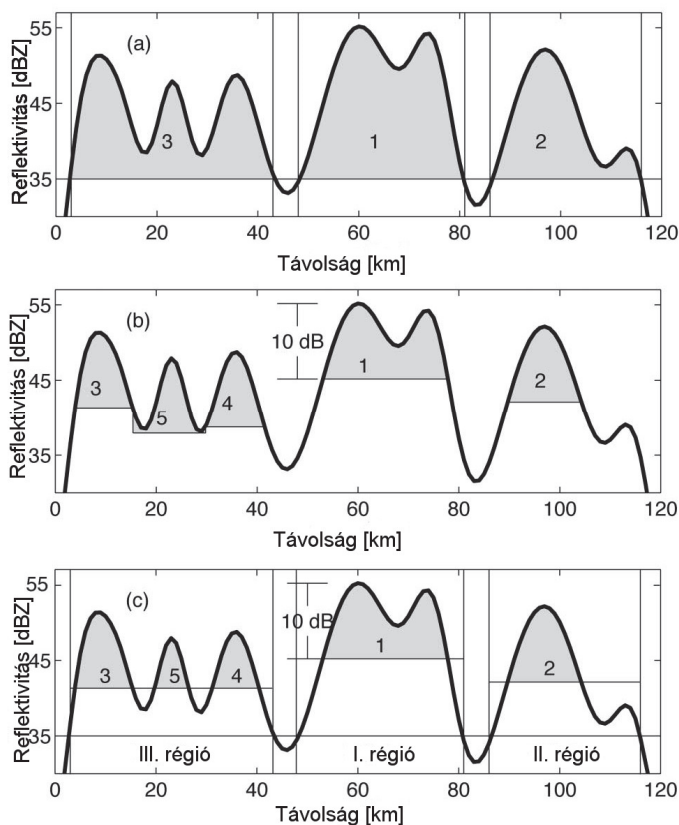


1. ábra: (a – felül) Példa összefüggő pixelsorokra, ahol a detektált reflektivitás a T_z küszöb fölött van (szürke területek), (b – alul) az ellipszis jellemzői (Dixon és Wiener, 1993)

SCIT (Storm Cell Identification and Tracking). A TITAN hátrányát javítandó *Johnson et al.* (1998) egy háromdimenziós cella-azonosító és követő módszert fejleszt



2. 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).



3. ábra: A cellaazonosítás módjai, a küszöbértékek használata: (a) dBZ_{limi} (35 dBZ), csapadékrégiók azonosítása cellaként (3 db cella) (b) $dBZ_{limi} + dBZ_{diff}$ (10 dBZ), intenzív cellamagok azonosítása cellaként (5 db cella) (c) Régiókra bontás + $dBZ_{limi} + dBZ_{diff}$, intenzív cellák azonosítása a legintenzívebb cella alsó határa alapján (5 db kisebb cella; *Handwerker*, 2002).

tettek ki. A háromdimenziós radar adatokból (2.a ábra) csak a környezeti zajokat és egyéb mérési hibákat szűrték ki. Láthatjuk, hogy az idealizált cellaazonosítást bemutató ábrán a megfigyelés öt magassági szögön zajlik. A cellaazonosításhoz 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 itt nem fogjuk részle-

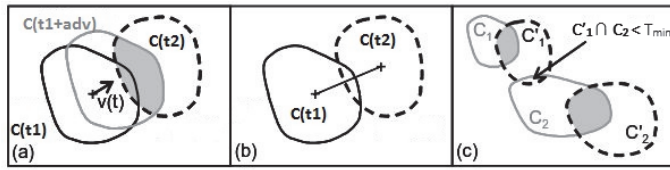
tezni), ami látható a 2.a. ábrán is, ahol az adott magassági szögekhez tartozó viharterületeket a nyilak jelölik. E viharterületek területi elrendeződése megadja a vihar horizontális vetületét (2.a ábra bal alsó része), azaz a cellát. Egy-máshoz közeli cellák egynek tekintendők, ha nem rendelkeznek különálló vihar-területekkel ugyanazon magassági szögön, illetve a cellák középpontjai horizontálisan és vertikálisan is adott távolságon belül vannak. Amennyiben az azonosítási folyamat túl sok egymáshoz közeli cellát azonosít, az algoritmus csak az erősebb, nagyobb cellákat használja fel a további számításokhoz. 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 becslött pozíciótól és a legközelebbit rendeljük a vizsgált cellához. A párosítások elvégzése után a program kiszámítja a cella tulajdonságait és karakterisztikáit.

TRACE3D. A módszer nyers radar adatokat használ (*Handwerker*, 2002). A korábbi algoritmusoknál a cellát egy olyan összefüggő területként (térfogatként) definiáltuk, mely egy adott küszöbértéket meghaladó pixelek csoportja (3.a ábra). Mint azt láhattuk, ebben az esetben nagyon nehéz egymástól elkülöníteni a szomszédos, közeli cellákat, azonban kiválóan alkalmas intenzív csapadékrégiók meghatározására (3.c ábra). Ezeken belül további cellamagokat különíthetünk el egymástól adaptív küszöbérték bevezetésével (3.b ábra), amit a program minden egyes cella adott fejlettségi állapotának megfelelően határoz meg. Ehhez megkeressük a csapadékrégiókban a maximális reflektivitás értékeket (dBZ_{max}) és alkalmazunk egy dBZ_{diff} különbség küszöböt (itt: 10 dBZ), ahol a dBZ_{max} és a dBZ_{diff} különbsége nem lehet kisebb, mint egy meghatározott minimum (dBZ_{limit} , itt: 35 dBZ, 3.b ábra). Ez garantálja, hogy csak a valóban intenzív cellamagokat azonosítjuk. Ezt tovább pontosítja, hogy egy adott csapadékrégióon belül minden cella határát a legintenzívebb cella $dBZ_{max} - dBZ_{diff}$ értékénél húzzuk meg (3.c ábra). Miután a program kiszámolta a detektált cellák tulajdonságait (pl. középpont), a számított mozgásvektor alapján becslést készítünk a középpontjának t_2 -beli pozíciójára, mely köré egy r sugarú kört húzzunk. A t_1 -beli cella valódi, t_2 -ben detektált párját a húzott körön belül fogjuk megtalálni, értelemszerűen a legrövidebb távolság alapján.

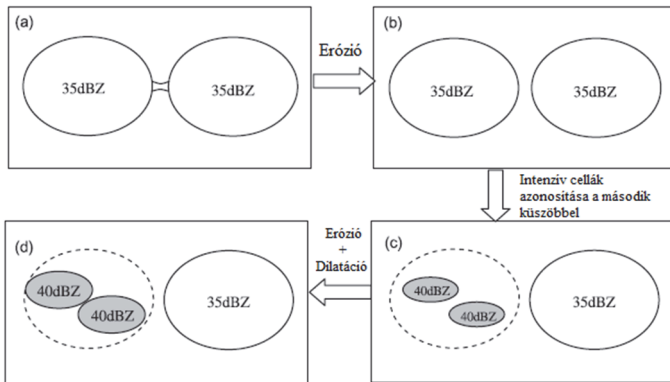
TRT (Thunderstorm Radar Tracking). A TRT módszer kompozit radar adatokat használ fel egy szigorú, létepcsős szűrést követően, ami így pontosabb előrejelzést tett lehetővé az Alpokban (*Hering et al.*, 2004). A cellaazonosítás menete hasonló, mint az előző módszernél: a cella magok azonosítása csapadékrégiókon belül történik adaptív küszöbök használatával. 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 becslött cella átfedésének mértékét (4.a ábra).

Amennyiben ez meghalad egy előre beállított értéket, a t_1 -ben és t_2 -ben detektált cella párosítása megtörtént (4.b

ún. pszeudopixelet (fiktív, elméleti pixeleket) adunk megfelelő átfedési nagyság eléréséhez.



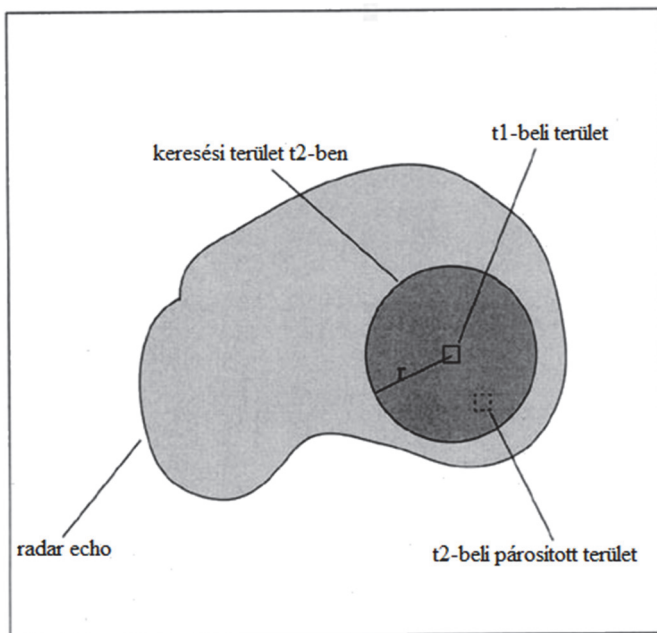
4. ábra: (a)(b) Cellák párosítása t_1 és t_2 időlépcső között. $C(t_1)$ jelöli a t_1 -beli cellát, $C(t+adv)$ a sebesség vektor segítségével kiszámolt becült pozíció t_2 -ben, $C(t_2)$ a t_2 -ben azonosított cella. A (b) ábrán látható „+” a cella középpontját jelöli, (c) a két időlépcsőbeli cellaterületek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



5. 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)

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 háromdimenziós képet kapunk a celláról, melynek kompozit vetületével dolgozunk tovább. A következő lépésben a látszólag egybeolvadt cellákat különálló cellákra bontjuk (5.a és b ábra). Az így kapott kisebb cellákra (5.b. ábra két cellája) egy újabb, magasabb küszöbértéket definiálunk, hogy azonosítsuk a cella magokat (5.c ábra baloldali cella). Ezt az eljárást további küszöb értékekkel is bővíthetjük az intenzitástól függően. Az utolsó lépésben az azonosított cella magok az eredeti cella határáig tágítandók (5.d ábra). A követési algoritmus részben megegyezik a TRT-nél megismert átfedések 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, melynek lényegét az alább következő módszernél mutatjuk meg.

COTREC (COntinuity of TREC vectors). A program a TREC (Trecking Radar Echoes by Correlation, Rinehart és Garvey, 1978) algoritmus egy továbbfejlesztett változata, mely korrigálja a sebességmező radar mérésekből fakadó hibáit (Li et al., 1995). A korábban bemutatott cellakövető módszerekkel ellentétben ez ún. területkövető technika és a Doppler-mérésekből származó szél adatokat is felhasználja. A módszerben nem azonosítjuk a teljes zivatarcellát, hanem egy adott reflektivitási küszöbvel detektált radar echón 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. 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 területnövekedés 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.



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

ábra). Többcellás esetben mindig a nagyobb átfedéssel rendelkező páros határozza meg a t_1 -beli cella párját (4.c ábra). Összeolvadásnál és szétválásnál a kis cellákhoz

Összefoglalás. Leírásunkban a módszereket a bemenő adatok típusa szerint különböztetjük meg, azaz aszerint, hogy nyers vagy kompozit radar képet használnak-e (1. táblázat). Az előbbi csoportba a COTREC, a SCIT és a TRACE3D algoritmusok, míg az utóbbiba a TITAN, a TRT és az ETITAN tartoznak. A legtöbb algoritmus a reflektivitási küszöb(ke)t elért területeket definiálja cellaként, ezzel szemben a TRACE3D és a TRT az azonosítási folyamatban csapadék régiókat keres, és ezen belül definiálják a követendő cellamagot. A COTREC egyértelműen kivétel, hiszen – területkövető módszerként – nem definiálja a cellát. A használt küszöbértékek tekintetében kiemelhetjük a TITAN-t és az ETITAN-t: az előbbi az egyetlen algoritmus, mely csupán egy küszöbértéket használ a cellák azonosításához, az utóbbi pedig abban különleges, hogy minden cellánál egyedileg kerül megállapításra a használt küszöbök száma és értéke. A bemutatott cellaazonosító algoritmusok egyetlen közös nevezője az, hogy területi és/vagy térfogati minimumot határoznak meg, elkerülendő a nagyon kicsi, vagy téves cellák követését. A módszerek közül kizárólag a TITAN és annak továbbfejlesztett változata (ETITAN) használ egy szabá-

Irodalom

- Chen, Z. Q. and 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.
- Han, L., Fu, S., Zhao, L., Zheng, Y., Wang, H. and 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., Sényi, S., Ambrosetti, P. and Boscacci, M., 2004: Nowcasting thunderstorms in the Alpine region using a radar based adaptive thresholding scheme. *Proceedings of ERAD* 206–211.
- Horváth, Á., Ács, F. and 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.

1. táblázat. A radar alapú zivatarcella követő algoritmusok jellemzőinek összehasonlítása. (Megyeri, 2015)

Módszer neve	Input adatok		Cellaazonosítás					Cellakövetés										
	Kompozit	Nyers	Reflektivitási küszöbök száma	Csapadék régiókra bontás	Reflektivitási max. keresése	Terület minimum	Követés típusa	Cella alakja		Számított értékek			Párosítás					
							Cella követő	Terület követő	Ellipszis	Szabálytalan	Középpont	Mozgás vektor	r keresési sugár	Kombinatorikai optimalizáció	Kereszt-korreláció	Átfedés nagysága	Legrövidebb út	
TITAN			1															
TREC/COTREC			nem definiálja a cellát															
SCIT			7															
TRT			3															
TRACE3D			2															
ETITAN			i															

lyos formát (ellipszist) a zivatarcellák alakjának közelítésére, a többi módszer egy szabálytalan radar echót azonosít cellaként. A reflektivitással súlyozott középpont számítása mindkét esetben kulcsfontosságú. A további lépések alapeleme a mozgásvektor kiszámítása, mely a vihar korábbi elmozdulásából számítható ki, illetve külféle statisztikai becslésekkel adható meg. Párkeresés-kor a COTREC és a TRACE3D keresési sugár bevezetésével szűkíti le a vizsgálandó terület nagyságát. A párosításban több átfedés is van a módszerek között. A TITAN kombinatorikai optimalizációt, míg a COTREC kereszt-korrelációt használ a megfelelő pár megtalálásához. A TRT az átfedés nagysága alapján dönt. Az ETITAN erőssége, hogy mindhárom módszert felhasználja a pontos előrejelzés érdekében. Ezen felül minden módszer a két időpillanat közötti legrövidebb útvonalat tekinti megfelelőnek. A növekedés és a leépülés, illetve a nagyon közeli szomszédos cellák azonosítására, követésére minden algoritmus egyedileg próbált megoldást találni, e jelenségek azonban továbbra is bizonytalanságokat okozhatnak a nowcasting során.

- Li, L., Schmid, W. and 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*
- Megyeri, O. A., 2015: Zivatarcellák mozgásának és fejlődésének nyomkövetési módszerei. *BSc szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest*, pp. 36
- Mona, T., Horváth, Á. and Ács, F., 2016: A thunderstorm cell-lightening activity analysis: The new concept of air mass catchment. *Atmospheric Research* 169, 340–344.
- Rinehart, R. E. and 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: Zivatar-klimatológiai elemzések és a nagy csapadékhozamú, konvektív jelenségek, időszakok vizsgálata Magyarországon. *Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest*, pp. 115
- Seres, A. T. and Horváth, Á., 2015: Thunderstorm climatology in Hungary using Doppler radar data. *Időjárás* 119, 185–196.