

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Meteorológiai Tanszék

Villámlás vizsgálata a radar- és a numerikus meteorológia eszközeivel

Tudományos diákköri dolgozat



Készítette: Mona Tamás

Meteorológus MSc.

Témavezetők: Dr. Horváth Ákos

OMSZ Siófoki Viharjelző Obszervatórium

Tanszéki konzulens: Dr. hab. Ács Ferenc

ELTE Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2013.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1. A villámlásról röviden	4
2. Alapötlet	7
3. Adathalmaz és eszközök	9
3.1. RADAR adatok	9
3.2. LINET adatok	9
3.3. TITAN	10
4. Munkamenet	11
4.1. Villám csatolás	11
4.2. Cella követés	11
4.3. Cella statisztika	12
5. Esettanulmányok	14
5.1. Június 9.	14
5.2. Július 19.	17
5.3. Július 29.	19
6. Összefoglalás	24
A. Függelék	25
Hivatkozások	28
Internetes hivatkozások	28

1. Bevezetés

A villámlás talán a Föld legextrémebb természeti jelensége, ezért érdemes megvizsgálni, hogy vajon egy zivatar cella elektromos aktivitása milyen meteorológiai tényezőktől függ. A zivatar felhők egy-fajta zárt cirkulációs rendszert alkotnak a légköri jelenségek között. Mindenki számára szembetűnő a hatásuk a környezetükre. A csapadék és a kifutó szél, csökkentik a cella energiáját. Ezen kibocsájtási tagok utánpótlását szolgálják a cella feláramlási zónájában beszívott légtömegek. Nagyon fontos a zivatar élete szempontjából, hogy a környezetéhez képest, milyen is a cellát alkotó légtömeg, hiszen egy száraz és hideg légréz nem pozitív hatással a cella erejére, de egy meleg és nedves levegő már erősítheti a zivatart. Kiindulásképpen reális feltételezés, hogy a zivatarok elektromos aktivitása nagyban függ attól, hogy az adott cella milyen utat jár be élete során. Tételezzük fel, hogy a zivatar villám produktuma szoros összefüggésben áll az általa begyűjtött levegő fajtájával, típusával. Egy meleg és nedves légterületen belül azok lesznek az erős cellák, amelyek képesek ebből a tartományból minél többet magukba szívni. Logikus feltevés, hogy azok lesznek ilyen cellák, amelyek nagyobb területet voltak képesek bejárni a megfelelő tartományon. Ilyenek lehetnek az elől halad vagy olyan hátrébb haladó cellák, amelyek esetében a mezőnek volt elég ideje helyre állni; zivatarok számára potenciálisan alkalmas nyersanyagi tartománnyá.

Ezen gondolatmenet alapján érdemes megvizsgálni, hogy egy cella élete során milyen elektromos aktivitással rendelkezett és milyen úton haladt, milyen hatásokat szedhetett össze a környezetéből. Ilyen elemzéshez első lépésként egzakt módon kell meghatároznunk a zivatarcellákat. Erre alkalmas a TITAN cella azonosító algoritmus, amely a megfelelő feltételek mellett képes ellipsziszekkel közelíteni a cellákat, a bemenetként használt meteorológiai radar fájlok alapján. Ha már rendelkezünk a cellákkal, akkor a LINET villámlokalizációs rendszer által detektált villámokat könnyen az egyes cellákhoz rendelhetjük, így megkapjuk az adott időlépcsőre a cella villám-tulajdonságait. Mindezt még tovább fejleszthetjük azzal, hogy megvizsgáljuk az egyes időpillanatban elkészült cellák egymás utániségét, vagyis elkészítünk egy cellakövető rendszert. Ennek köszönhetően már az egyes cellák teljes élettartamán vizsgálhatjuk az elektromos tulajdonságokat. Ha ezeket összevetjük a cella által bejárt területekkel, akkor tapasztalnunk kell, hogy az előnyösebb úton és helyen haladó zivatarok aktívabbak, mint társaik.

A dolgozatban az imént vázoltakat követve vizsgáltuk meg a 2012. év zivatarjait, és a fentebb bemutatott elméletet alátámasztó eredményekre jutottunk, vagyis az előrébb haladó cellák elektromosan aktívabbak, mint a későbbi, őket követő cellák.

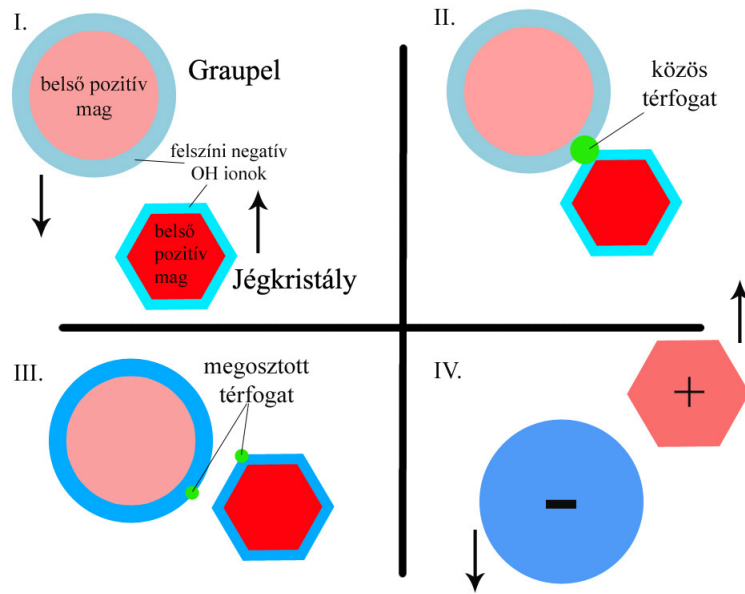
1.1. A villámlásról röviden

Mielőtt elmerülnénk az elemzés sűrűjében, érdemes áttekinteni, miből is származik valójában a villámlás. Mi indokolja azt a kezdeti potenciál különbséget a felhőben, aminek kiegyenlítését végül a villámok valósítják meg?

A felhőben a felhőelemek a töltéshordozók. A töltések többnyire egyszeresen pozitív (pl. egy pozitív töltésű ion) vagy negatív (pl. e^- vagy OH^-) töltésű részecskék. A felhőelemek között három alapvető felhőelemet különböztetünk meg: a vízcseppet, a hódarát vagy graupelt, és a jégkristályt. Ezek közül számunkra a cseppek a legérdektelenebbek, mert a nem induktív típusú töltésszétválasztódási folyamatokban kevésbé vesznek részt. Ennek magyarázata, hogy az ütközések során inkább összeolvadnak, mintsem szétpattannak. Ellenben a hódara és a jégkristály ütközéseik során inkább szétpattannak, mintsem összeolvadnak. Ugyanakkor e részecskék felszíni töltéssűrűsége jelentős lehet, még akkor is, ha a nettó töltésük nulla, azaz semlegesek. A felszínen levő negatív töltések OH^- ionok formájában vannak jelen. A felszíni töltéssűrűség függ a depozíció sebességétől ($\frac{dm}{dt}$). Tehát, ahol nagy a relatív depozíció mértéke ($\frac{1}{m} \frac{dm}{dt}$), ott nagy a felszíni töltéssűrűség is. Ezek alapján nyilvánvaló, hogy a kicsi részecskék relatív depozíciós mértéke általában nagyobb, mint a nagyobb részecskéké. Ennek következménye az, hogy a kicsi részecskék negatív felszíni töltéssűrűsége általában nagyobb, mint a nagyobb részecskéké. Persze ha a részecske semleges, akkor a nagyobb felszíni töltéssűrűséghez tartozó belső pozitív mag szintén nagyobb.

Az emelkedő légáramban a méretben és tömegben egyaránt kisebb jégkristályok felfelé mozognak, míg a graupelek viszonylag egyenletesen esnek a nagyobb tömegük miatt. A töltésszétválasztódás a részecskék ütközése során zajlik le (1. ábra). *Dash et al.* (2001) és *Saunders* (2008) eredményei alapján a következőképpen: a jégkristály és a hódara ütközési pontjában hó szabadul fel a súrlódás miatt (1. ábra I.), ezért egy kis olvadékvíz keletkezik (1. ábra II.). Ez az olvadékvíz az egyetlen kapocs a részecskék között. E térfogatot megosztják, azaz e térfogatba gyűlnek a mozgékony OH^- ionok mindaddig, amíg a két részecske felszíni töltéssűrűsége ki nem egyenlítődik. Hangsúlyozzuk ki azt is, hogy az olvadékvízben levő OH^- ionok térbeli eloszlása egyenletes, elsősorban az OH^- ionok nagy mozgékonyasága miatt.

A hódara és a jégkristály szétválásának pillanatában az olvadékvíz is ketté válik (1. ábra III.), megközelítően 50-50%-ban. A jégkristály ugyan egy kicsit többet visz magával, mint amennyi marad a graupelnél, de e tény nem meghatározó a szétválasztott töltések mennyiségét illetően. A szétpattanás után a hódara negatív felületi töltéssűrűsége egyértelműen nagyobb, míg a jégkristályé egyértelműen kisebb, mint az a felületi töltéssűrűség, amivel az ütközés előtt rendelkeztek (1. ábra IV.). A jégkristály "pozitív töltéseket" vett fel, azaz OH^- ionokat veszített, míg a hódara „negatív töltéseket”, azaz OH^- ionokat vett fel.



1. ábra. A graupel és a jégkristály töltéstranszportja.

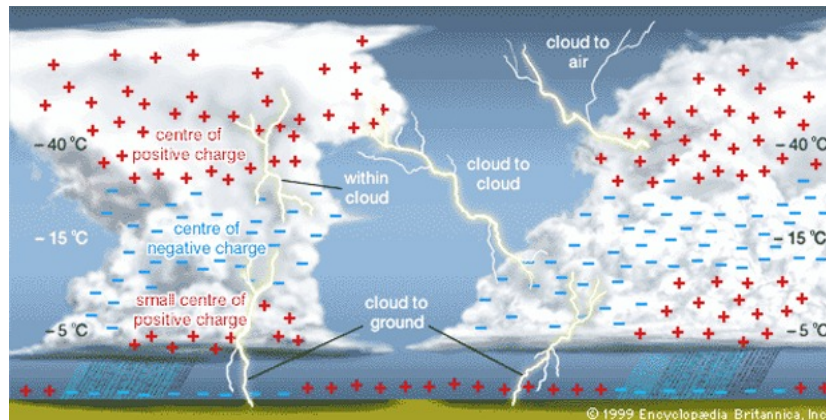
I. közeledés, II. közös olvadék kialakítása,
III. töltés megosztás, IV. szétválás.

Mivel a felhőn belül a hódara lefelé, a jégkristályok pedig felfelé mozognak, „lent” egy negatív, míg „fent” egy pozitív töltéscentrum alakul ki. Ezek alapján célszerű a Cb-ok dipólussal való közelítése.

Ha már kialakult a Cb megfelelő elektromos szerkezete (2. ábra), és jelentős a potenciál különbség, akkor „elkezdődik” a potenciál különbség kiegyenlítődése. E „kiegyenlítődé” gigantikus kisülések, azaz villámok formájában történik. A villámok között megkülönböztetünk ún. felhő-felhő (cloud to cloud, CC, vagy intracloud, IC) villámokat – ezek felhőkön belül vagy felhők között zajlanak – valamint lecsapó földvillámokat (cloud to ground, CG). Általában a teljes villámlásnak mindössze 10-20%-a CG.

A lecsapó villám lépcsőzetesen haladó elő-kisülésekkel kezdődik (Geresdi, 2004). E lépcsős elő-kisülések hossza 10-200 m. E hossz megtétele után 10-100 μs -ig megállnak. Sebességük $10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, az áramerősségük pedig 10-100 A. Az elő-kisülések szétágazóak. Valamelyikük véletlenszerűen összekapcsolódik a földfelszínről induló ún. ellenkisülés valamelyikével. Ezáltal létrejön egy folytonos villámcsatorna a felhő és a talaj között. Ennek fala plazma állapotú, a felhőelemekről „begyűjtött” töltött részecskék sokasága alkotja. Ebben a csatornában zajlik le a főkisülés, ami nagyságrendileg $10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességű és 10^3 - 10^5 A áramerősségű. Egy villámcsatornában átlagosan három-négy, de akár harminc főkisülés is történhet. Ehhez minden esetben egy új „folytonos elő-kisülés” szükséges, ami a felhőelemeken történő töltésátrendeződés következménye. Mindez 1-2 másodperc alatt lezajlik, ezért szabad szemmel csak a főkisüléseket látjuk, ám fényképeken az elő- és az ellenkisülések is megfigyel-

hetőek. A CG villámok 5 %-a nem a felhő, hanem a talaj felől indul.



2. ábra. Cb elektromos szerkezete és a különböző villámlási típusok

A villámlás során transzportált töltésmennyiség óriási. Ez hirtelen megemeli a környező levegő hőmérsékletét több ezer fokkal, aminek hatására a levegő is tágulni kénytelen, ami végül is egy lökeshullám kialakulásával jár. E lökeshullám a térbeli terjedés hatására hanghullámmá gyengül. E hanghullámot *mennydörgésnek* nevezzük.

2. Alapötlet

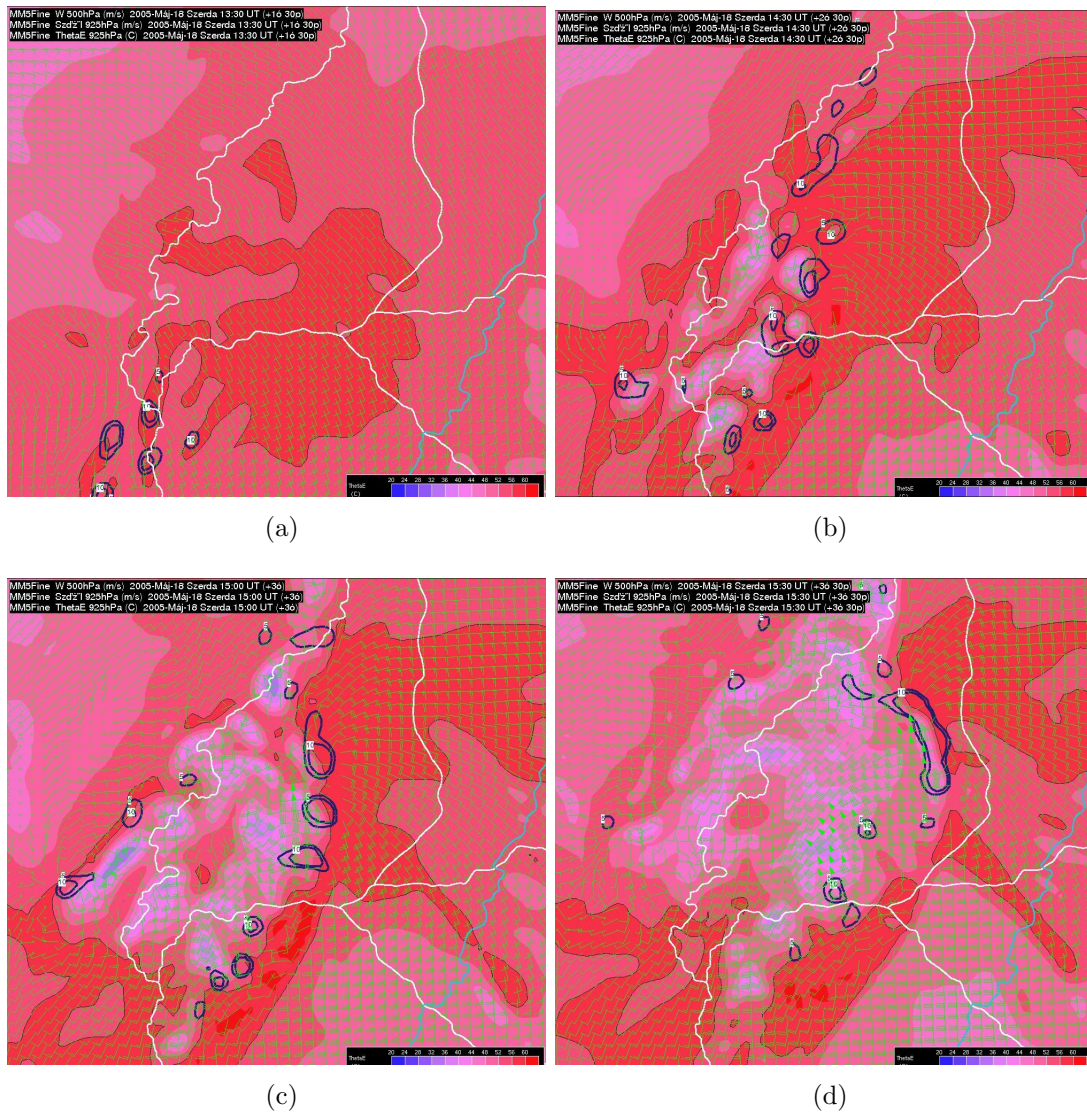
Az 1.1. rész alapján adódik, minél több a töltéshordozó, annál több ütközés zajlik le, így egyre nagyobb és nagyobb potenciál különbség halmozódik fel a felhőben. A töltéshordozók számát pedig a zivatarba áramló anyag mennyisége határozza meg. A beáramló levegőnek nem csak a mennyisége, de a konvektív szempontból tekintett instabilitása is lényeges. Amennyiben az alsó szinteken beáramló levegő jelentős felhajtóerőt képes kiváltani a zivatarfelhő környezetéhez képest, akkor a felhőn belül erősebb feláramlás is indul meg. Ilyen tulajdonságú légtömegeknek megfelelően magas hőmérséklettel és kellő nedvességgel kell rendelkezni. Vagyis hideg és száraz beáramoltatott anyag nem segíti a töltés felhalmozódást, hiszen gyengíti a felhőben a konvekció mértékét.

A meteorológiában az ekvivalens potenciális hőmérséklet (EPT) a legalkalmasabb a légtömegek hőmérsékletének és nedvességtartalmának együttes összehasonlítására és elemzésére. Ha az EPT értéke kicsi, hideg és száraz, ha magas, meleg és nedves légtömeget reprezentál.

Az MM5 (nem-hidrosztatikus időjárás előrejelző modell) segítségével végzett korábbi vizsgálatok alapján (3. ábra) jól kivehető, hogy a zivatarok magukba szívják a magas EPT értékű területeket, miközben alacsonyabb EPT tartományt hagynak maguk után. A cellák elnyelő hatása a bennük lezajló intenzív feláramlás következtében kialakuló alacsony szintű konvergencia eredménye. A konvergencia a szélmezőben markánsan meg is jelenik.

Az is látható, hogy a kezdetben északra haladó cellák (3. ábra (a) rész) miként alakítanak ki észak-déli kiterjedésű zivatar vonalat (3. ábra (b) rész), ami feltűnően keleties irányba mozdul (3. ábra (c) rész). Pontosan úgy, mint ha cellák *tudatosan keresnék* a magas EPT értékű területeket. Továbbá az is szembeűnő, hogy végül az a cella erősödik meg igazán, akinek a legtöbb magas EPT sikerült magába szívni (3. ábra (d) rész északi cellája). Ezt azzal magyarázhatjuk, hogy ez a cella volt a legideálisabb helyzetben a mozgás során, mert semelyik másik nem nyelte el előle a hasznos *üzemanyagot*. A cella megerősödése és feltűnő dominanciája tehát abból ered, hogy a zivatar-rendszer mozgása során ő haladt legelől. A többi cella fokozatosan gyengül, majd teljesen elhal, ahogy egyre kevesebb felhasználható nyersanyagot képes magába szívni. Figyelemre méltó, hogy néhány cella nyugati irányba indul el (3. ábra (c) rész), amerre szabadon begyűjthető EPT mező áll rendelkezésre. Ám ez csupán egy keskeny sávban biztosítja a továbbélést ezen zivatarok számára, így végül elenyésznek.

A modell eredmények alapján már kialakulhat a sejtésünk, miszerint azok a zivatar cellák lesznek a legaktívabbak villámtanilag, amelyek elől haladnak. Élén haladó cella alatt azt értjük, hogy az adott cella a zivatar rendszer haladási irányához és pozíciójához képest előrébb helyezkedett el és haladt élete során. Így értékesebb *tüzelőanyagot* halmozhatnak fel magukban, mint hátrébb haladó társaik. A fenti gondolatmenet alapján adódik, a magas EPT értékű légtömegek nagyobb potenciál



3. ábra. A zivatarok felemészti az alacsony szintű EPT mezőt (925 hPa)

különbséghez, ez által több villámláshoz vezethetnek.

Vizsgálatunk tárgya, a zivataros cellák villám aktivitásának elemzése a cellák mozgásának és haladásának függvényében. Célunk, hogy esettanulmányok segítségével belássuk, az elől haladó zivatar cellák elektromos szempontból kitüntetettebbek, mint a tőlük lemaradva mozgó többi zivatar.

3. Adathalmaz és eszközök

Az elmélet igazolására radar képek, illetve villámadatok segítségével megvizsgáljuk a 2012-es év nyarának három zivataros napját, esettanulmányokon keresztül, de előbb ismerkedjünk meg a felhasznált adatokkal és a munka során használt eszköztárral.

3.1. RADAR adatok

A RADAR olyan mikrohullámú tartományban működő adó-vevő-antenna és megjelenítő berendezésből álló rádiótechnikai rendszer, amely képes nagy teljesítményű rádió (elektromágneses) hullámok koncentrált kisugárzására, majd azt követően a környezetből érkező visszaverődések detektálásával a visszaverődést okozó tárgyak helyzetének és visszaverődési tulajdonságainak meghatározására. A visszaverődés mértéke függ az impulzus térfogatban lévő felhő és csapadékelemek méretétől, számától, összességében a felhő víztartalmától továbbá egyéb fizikai tulajdonságaitól, halmazállapot összetétel, stb. Minél nagyobb átmérőjű esőcsepp van a térfogatban, annál nagyobb a visszaverő képesség. Tekintve e mennyiség igen nagy – $10^5 \div 8$ nagyságrendű – változékonyságát, gyakorlatilag annak 10-es alapú logaritmusának 10-zel való szorzásával kapott dBZ (decibel Z) értékeit használjuk a meteorológiai célok jellemzőinek megadásakor (<http://www.met.hu/>).

A felhasznált radar-reflektivitási képek *RccD* típusú bináris fájlokból származnak. Melyek 5 perces időléptékben tartalmazzák a radar-echo értékeket, a teljes Kárpát-medencére vonatkozó kivágaton, melynek területi felbontása $1 \times 1 \text{ km}^2$. A meteorológiai gyakorlatban nem az *RccD* állományokban tárolt értékeket szokás megjeleníteni, hanem a fent említett dBZ-ben kifejezett megfelelőjét. Az átszámítási képlet a két mértékegység között a következő:

$$\frac{x}{2} - 30 \text{ dBZ} \quad (1)$$

ahol x a radar-reflektivitás *RccD* fájlokban tárolt értéke. A számítások során végig az átszámítatlan értékeket használjuk, csupán az érthetőség kedvéért szerepel párhelyen a dBZ-ben megadott számok.

3.2. LINET adatok

A LINET egy időmérésen alapuló villámlokalizációs rendszer (<https://www.nowcast.de/en.html>). Lényege, hogy a megfigyelő antennák regisztrálják a villámlás keltette elektromágneses-hullámok beérkezésének idejét. Egy állomás több ágú antennája képes meghatározni, hogy *pontosan* mikor történt a villámlás. Ha több állomás együtt dolgozik, akkor az ismert villámlási idők alapján parabólák illesztésével már térben is képesek elhelyezni a villámlást.

A LINET regisztrálja a villámlás idejét μs -os, és helyét ezred fokos pontossággal. Kísérletet tesz a villámlás kiindulási magasságának meghatározására. Beazonosítja, hogy lecsapó (CG) vagy felhő (CC) villámról van-e szó. Illetve megadja, mekkora és milyen irányú kA -ben megadott áram folyt keresztül a csatornán az adott pillanatban. És végül földrajzi hely meghatározáshoz még egy deviációt is társít.

Ezek az adatok minden napra vonatkozóan rendelkezésre állnak, könnyen kezelhető szöveges állományok formájában.

3.3. TITAN

A TITAN egy zivatar cellák meghatározására szolgáló, részben matematikai, részben programozási eljárás (*Dixon-Wiener*, 1993). Ennek segítségével könnyen elkülöníthetjük a radar-reflektivitási képek zivataros helyeit. Az eljárása a következő elven alapul; két fontos paramétert vizsgál, mégpedig az egymás mellett lévő pixelek számát, amelyeknek értéke meghalad egy bizonyos küszöbszámot. Vagyis, ha talál olyan összefüggő tartományokat amelyekben a radar-reflektivitás eléri vagy átlépi a minimális értéket, és ezek a tartományok megfelelően sok pixelből állnak, akkor egy ellipszist illeszt a tartományra. Bemeneti fájlként a bináris radar adatokat használja fel.

A TITAN segítségével megadhatók a zivatar cellák középpontjainak koordinátái, az ellipszisek kis és nagy tengelyei, az őket alkotó pixelek darabszámai, illetve sok esetben hasznosnak bizonyult a cellában bizonyult legmagasabb radar-echó regisztrálása is.

Fontos, hogy tisztában legyünk a TITAN érzékenységgel. Rosszul vagy elnagyoltan megadott küszöbértékek megtévesztő cellákat eredményezhetnek. Ha nem választunk kellően magas radar-reflektivitási határt, akkor a TITAN könnyen összefűzheti az egymáshoz közeli zivatar cellákat. Viszont, ha túl magasra tesszük ezt az értéket akkor már nagyon kicsik lesznek az ellipszisek és kezelhetetlenné válnak. A minimális pixel szám meghatározása problémamentesebb. Ez leginkább a radar téves beütéseit hivatott kiszűrni, tehát arra szolgál, ne legyenek használhatatlanul kicsi celláink a későbbi vizsgálatok során. Természetesen, ha ezt az értéket túl nagyra állítjuk, akkor elveszíthetünk figyelemre méltó zivatar gócokat is. Érdemes tehát alacsony pixel minimumot és magas radar-echó értékeket választani a TITAN gyakorlati alkalmazása során.

A számítások során 40 vagy 45 dBZ-s küszöbértékeket, és 8-as, illetve 10-es minimális pixel számokat használtunk.

4. Munkamenet

A következőkben ismertetjük az általános eljárást, amit minden későbbi esettanulmány készítése során alkalmaztunk. A leírás és a részletes megjegyzések alapján a munkamenet akár reprodukálható is. Lényege egy olyan összetett program megkonstruálása, amellyel bármely összefüggő zivataros időszak elemzése gombnyomásra elkészíthetővé válik. A részfolyamatok eredményei önmagukban is érdekfeszítőek lehetnek.

4.1. Villám csatolás

Első lépésként a TITAN segítségével meghatározott cellákhoz hozzárendeltük a LINET villám adatait. A TITAN-t a 3.1. részben ismertetett 5 perces *RccD* típusú bináris állományokkal hajtottuk meg. A dBZ-re **45** lett a küszöb ($x=150$, (1) összefüggés alapján), a pixel számra **8**. Ennek köszönhetően már vannak celláink, amik jól reprezentálják az adott időlépcső zivatarait, mind számban, mind méretben. Ezek után C programozás alkalmazásával hozzárendeltük a cellákhoz a 3.2. részről leírt struktúrával rendelkező *alol* szöveges állományokból a villámokat.

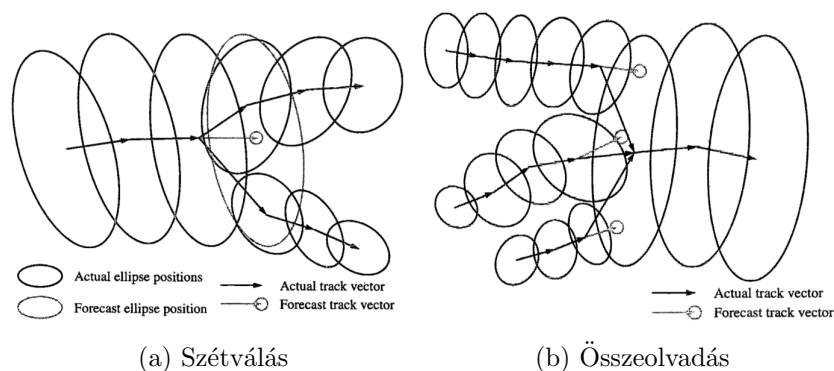
A program minden villám esetében először megvizsgálja, hogy időben megfelel-e a kiválasztott radarképből származó cellához. Azokat a villámokat tekintettük a cellákhoz rendelhetőeknek, amelyek időpontjai a radarkép $\pm 2,5$ perces környezetébe estek. Ezek után megkerestük az egyes villámokhoz legközelebb található cellát és ahhoz csatoltuk hozzá. A csatolás során nem csak a villámlás tényét, hanem az adott villám összes tulajdonságait is átadtuk a cellának. Fontos, hogy nem kényszerítettünk minden villámot valamely cellához, mert ha csak egy bizonyos távolságnál (30 pixel) messzebb található cella, akkor az adott villám nem csatolódik hozzá. Ezzel némileg kiküszöböltük, hogy radar hiba következtében a tartomány másik végéből is cellákhoz rendeljen villámokat a program. A besorolás hatékonyságának mérésére bevezethetjük tehát az adott időpillanatban cellához csatolt és az adott időpillanatba beletartozó össz villám arányát, nevezzük ezt *csatolási hatékonyságnak*. A csatolási hatékonyság jónak tekinthető, ha a villámok legalább 80%-át sikerült besorolni valamely cellába. Ha ez az érték ennél kevesebb, akkor sejthetjük, hogy a LINET látott ugyan villámokat, de azokat nem tudta cellához rendelni. Amiből triviálisan következik, hogy ott nem volt cella, vagyis a radarkép hibás volt az adott részen. Ezt a radar mérés kimaradása, korlátozott látási hatótávolsága, vagy csupán valamely terepakadály (akár a Föld görbülete) is eredményezheti.

4.2. Cella követés

A 4.1. részben leírtakat a vizsgált zivataros időszak minden időpontjára alkalmaztuk. Ezzel rendelkezésünkre álltak a cellák információi minden időlépcsőben. A folytatásban a kezdeti időpillanatban

meghatározott cellákhoz megkerestük a következő időlépcsőben szereplő megfelelőjüket, létrehozva a cellák időbeli követését.

Az eljárás alapját az képezte, hogy megvizsgáltuk az adott időlépcső és az őt megelőző pillanat celláinak helyét és azok méretét. Segítségünkre volt a cella elmozdulásából számított sebesség vektor is. Ha egy cella szűk környezetében megfigyelhető volt egy hozzá nagyon hasonló mérettartományba tartozó cella a következő időpillanatban, akkor a cellákat összekötöttük. Ennek érdekében bevezettük az egyes cellákat megszemélyesítő *cella ID* fogalmát. Az első időlépcsőben kiosztottunk minden cellának egy egész számot, ez lett az egyes cellák ID-ja. Ezek után megnéztük, hogy a következő időlépcsőben melyik cella feleltethető meg egy egyel korábbi cellának. Ha megtaláltuk a megfelelést, akkor az új cella is megkapta a régi ID-ját. Ha nem találtunk hozzátartozót akkor a cella egy eddig még nem használt ID-t kapott, és ezzel új cella jelent meg. Természetesen azt is figyeltük, hogy a korábbi cellákhoz hozzáfűződik e újabb cella. Ha nem, akkor a cellát lezártuk tekintettük és hozzá már nem illesztettünk további cellákat a későbbiekben sem.



4. ábra. Cella követés speciális esetei (*Dixon-Wiener*, 1993)

Nagyon fontos volt arra figyelni, hogy egy cellát csak egyetlenegy korábbihoz rendeljünk hozzá. Ebben segítséget jelentett, hogy a hozzáfűzés megkezdése előtt nagyság szerint rendeztük a felfűzni kívánt cellákat. Ez azért volt lényeges, mert az azonosítás során egy szétváló cella esetében (4. ábra (a) része), mindig a nagyobb cella kapta meg az addigi ID-t, míg a kisebb egy új cellaként jelent meg, új ID-t kapva. Hasonló elvet alkalmaztunk az összeolvadó cellák esetében is (4. ábra (b) része). Ez esetben a kisebb cellát (vagy cellákat) lezártuk és a nagyobb ID-ját kapta meg az egyesült cella.

4.3. Cella statisztika

Eljutottunk odáig, hogy már vannak celláink, melyekbe be tudtuk sorolni a villámokat kielégítő pontossággal és ezeket a cellákat időben követni is tudtuk. Ez által minden egyes cellánál meg tudtuk vizsgálni az elektromos tulajdonságok időbeli menetét. A következő lépésben elkészítettük a

cellákra és az adott időlépcsőre vonatkozó villám adatok statisztikáit.

Kiszámítottuk az egyes cellákban, hány villám volt összesen, ezek mennyi abszolút áramot termeltek és milyen arányban voltak ezek lecsapó villámok ($CG \text{ arány} = \frac{CG}{CG+CC}$) az adott időlépcsőben, illetve összességében. Illetve kiszámítottuk a cella össz áramának és teljes pixelben mért méretének arányát, amit *fajlagos áramnak* kereszteltünk el.

A cellákra vonatkozó villám statisztikák elkészítése mellett megkonstruáltuk ugyanezeket az adott időlépcsőre vonatkozóan is. Vagyis, vajon az adott 5 perces időtartamon a cellák együttesen mennyi villámot és mekkora árammal produkáltak, illetve milyen CG arány mellett tették ezt. Ez esetben is meghatároztuk az adott időlépcsőre vonatkozó fajlagos áramot is. Mindezek mellett bevezettünk még egy arányszámot, amit nagyvonalúan aktivitásnak neveztünk el. Az aktivitást úgy kaptuk meg, hogy a cella össz áramát elosztottuk a cellát alkotó pixelek radar-reflektivitási értékének összegével.

Lényeges kihangsúlyozni, hogy itt most nem a dBZ-ben mért értékekről beszélünk, hanem a nyers radar adatokról. Ezt azért választottuk, mert a dBZ skála csupán a szemléletesebb ábrázolás miatt terjedt el, ám a számításokban legtöbb helyen nem ezt, hanem az (1) képletben szereplő átszámítatlan értéket használják.

5. Esettanulmányok

A következőkben az előző részekben ismertetett adatok és módszerek felhasználásával igazoljuk a 2. részben leírt feltevést. Ezt három esettanulmányon keresztül tettük meg, melyek kiinduló adatai 2012 nyarának három eltérő szinoptikus jellegű zivataros periódusából származtak.

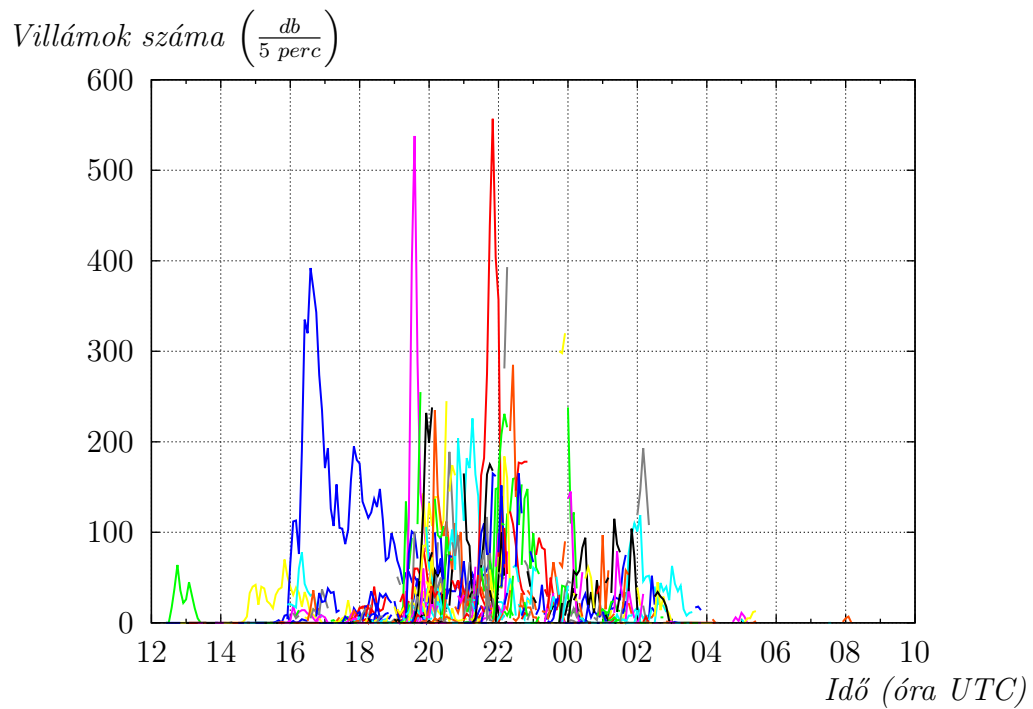
Egy zivataros periódus, az adott nap azon időszakától kezdődik, amikor a zivatarok nem egy előző nap hatására jelennek meg vagy maradnak vissza, hanem külön egységet alkotnak. Természetesen a periódus végét is ennek szellemében határoztuk meg, hogy így ténylegesen egy töretlen és teljes zivataros időszakot kapjunk. Két esetben előfordult, hogy a periódus zárása a következő napra tolódott át, de a megnevezés során ezt még az előző naphoz társítottuk, hiszen ekkor kezdődött maga a jelenség és a folyamat zöme is ezen a napon zajlott le.

5.1. Június 9.

Az időszak kezdete Június 9. 12:15 UTC, és vége Június 10. 05:30 UTC. Az OMSZ napi jelentésében, a periódusra vonatkozóan a következő szerepelt (<http://www.met.hu/>): *az északi, északnyugati országrészben jobbra erősen felhős vagy borult volt az ég, és több alkalommal fordult elő zápor, néhol zivatar is kialakult. Másutt 9-14 órára kisütött a nap, viszont késő délutántól délnyugat felől egyre több helyen fordultak elő záporok, zivatarok. A hőmérséklet csúcsértéke északnyugaton 19, 24, másutt 25 és 33 fok között változott. Éjszaka délnyugatról északkelet felé több hullámban zivatarláncok vonultak végig az országon, a déli megyékben pattantak ki a leghevesebb gócok. Hajnalra 13 és 18 fok közé hűlt le a levegő. A reggelig lehullott csapadék mennyisége többnyire csapadéknym és 20 mm között alakult, de a Kab-hegyen 30, Orosházán 36 mm esett.*

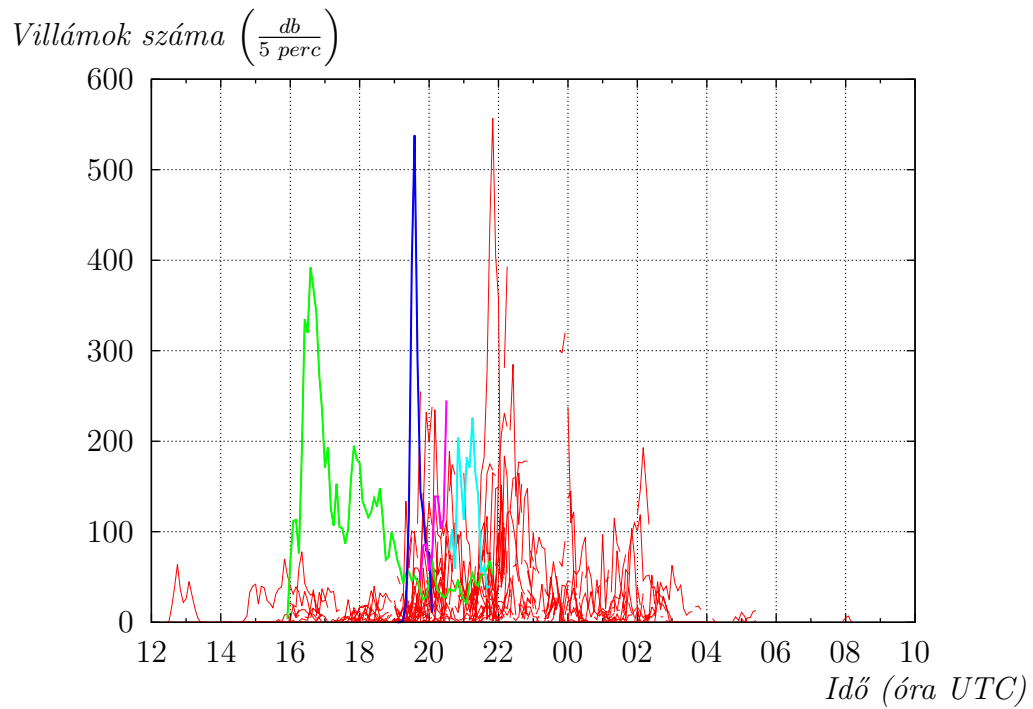
Az 5. ábrán az időszak összes cellájának villám száma látható. Mivel az alapfeltételezésünk az volt, hogy az elől haladó cellák elektromos szempontból erőteljesebbek társaiknál, ezért az elemzés során azokat a cellákat néztük meg részletesen, amely cellák valamely időpillanatban vezető szerepet töltöttek be a periódus során. Mindegyik ilyen zivatar cella esetében megvizsgáltuk, hogy vajon előrébb halad-e a többihez képest. Ezeket a cellákat ID szerint az A.1. táblázat tartalmazza. A táblázatban szerepel továbbá, hogy a cella elől haladónak nevezhető-e vagy sem, mekkora a többiekhez viszonyított mérete (kicsi, közepes, nagy), illetve villámlásának időbeli menete milyen típusúnak mondható:

- *kezdetben:* a cella villámlási csúcsa a cella életének első szakaszában következett be,
- *végén:* a cella villámlási csúcsa a cella életének vége felé következett be,
- *két csúcs:* a cellának két jól elkülöníthető villámlási csúcsa van.



5. ábra. Cellák villámlása a periódus során (Június 9.)

Az A.1. táblázatból kitűnik, hogy az időszak alatt 25 cella nevezhető elektromos szempontból vezércellának. Ebből 13 élen haladó. Ezek közül egyet megvizsgálunk alaposabban is. Mégpedig az 57-es ID-vel rendelkező cellát.

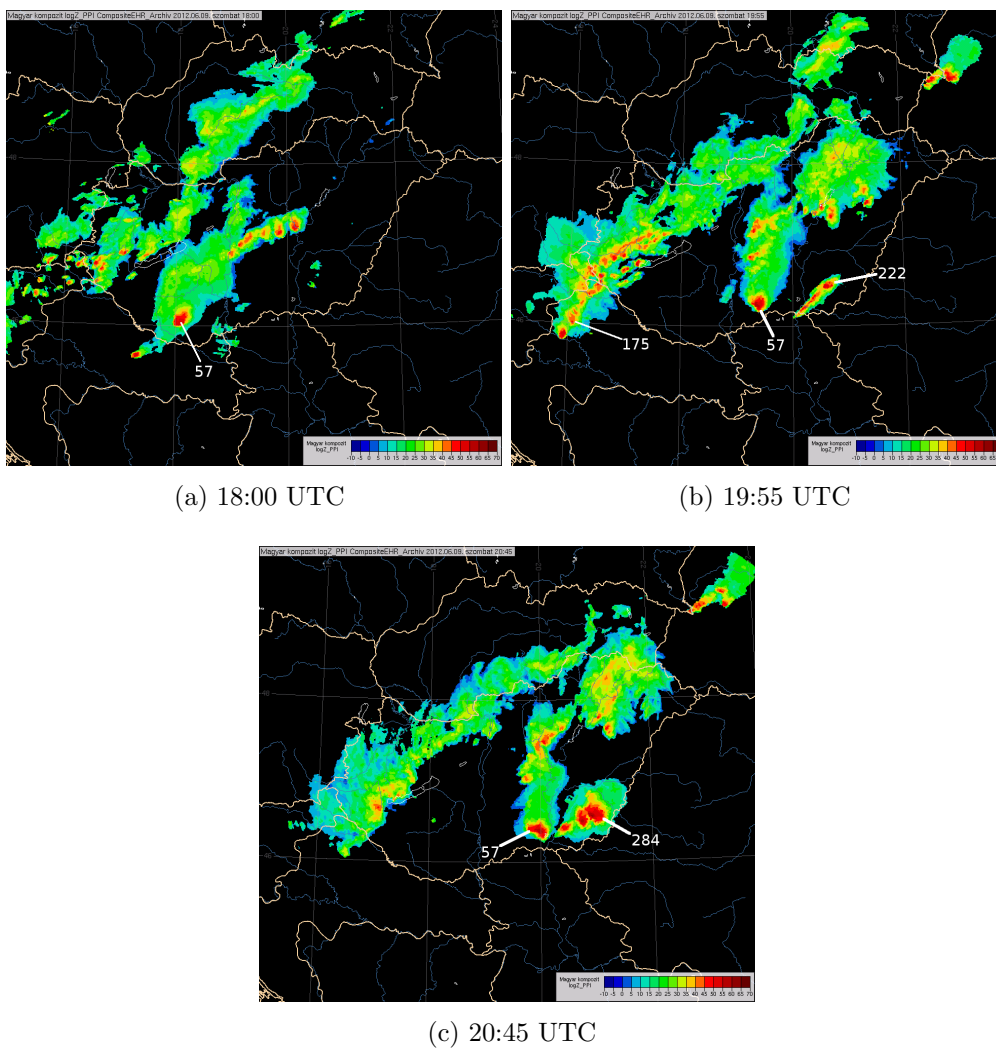


6. ábra. Vizsgált cellák villámlása

A 6. ábrán zöld színnel van jelölve az 57-es cella, kékkel a 175-ös, magentával a 222-es, és ciánnal a 284-es. A 7. ábrán pedig ezeknek a celláknak az elhelyezkedését követhetjük nyomon.

Az 57-es cellát *szegedi supercellának* kereszteltük el, mivel korai életstádiumában, mert supercellaként viselkedett és Szeged felett haladt el a későbbiekben. A radarképeken látható, hogy sokáig teljesen magányosan vonult a cella. Egészen addig míg a 222-es cella vezetésével ki nem pattant néhány zivatar a *szegedi* útjában. Ezek a cellák nem is engedték tovább fejlődni és élni az 57-es zivatart. A 222-es cella elektromos vezér szerepét később ez az egyben a 284-es veszi át. Valójában ezt a kettőt akár egy cellának is kezelhetjük, mert ténylegesen egymás folytatásai.

A szegedi supercella villámlási csúcsa a kezdeti életszakaszban figyelhető meg. Ebből nem vonhatunk le határozott következtetéseket, de a július 29.-ei balatoni supercellának is nagyon hasonló villámlási menete volt. A villámlási csúcs után sokkal kisebb elektromos aktivitást mutat a cella.



7. ábra. Radarképek és a cella azonosítók

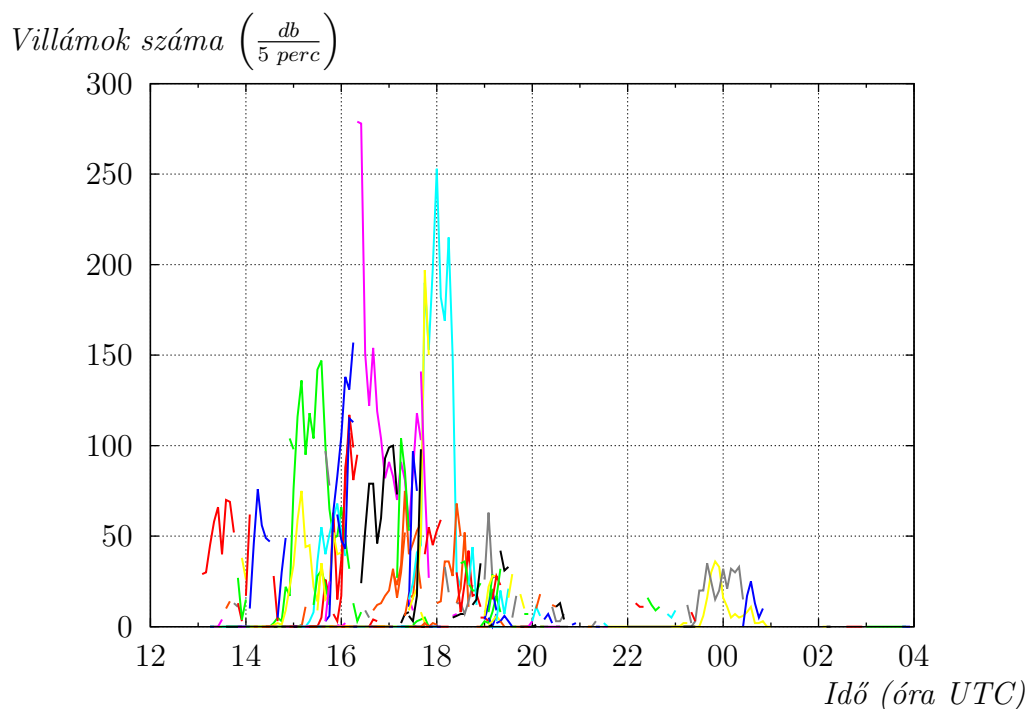
A másik érdekesség a 175-ös cella, amely szintén teljesen szabad úton haladhatott élete során.

A villámlás viszont amit hozzá csatolt a program, kissé túlzás, nagy valószínűséggel több kisebb közeli cella villámait is ehhez a zivatarhoz rendelte a program. Ennek köszönhető a kiugró – nem egyenletesen emelkedő – csúcs. Az azonban mindenképp leszögezhetjük, hogy a cella elektromos aktivitása igen nagy volt, nem túl hosszú élte során.

Az esettanulmányban leírt eredmények megerősítik 2. részben ismertetett elméletet, egyetlen egy nap vizsgálatait viszont nem bírják bizonyító jelleggel.

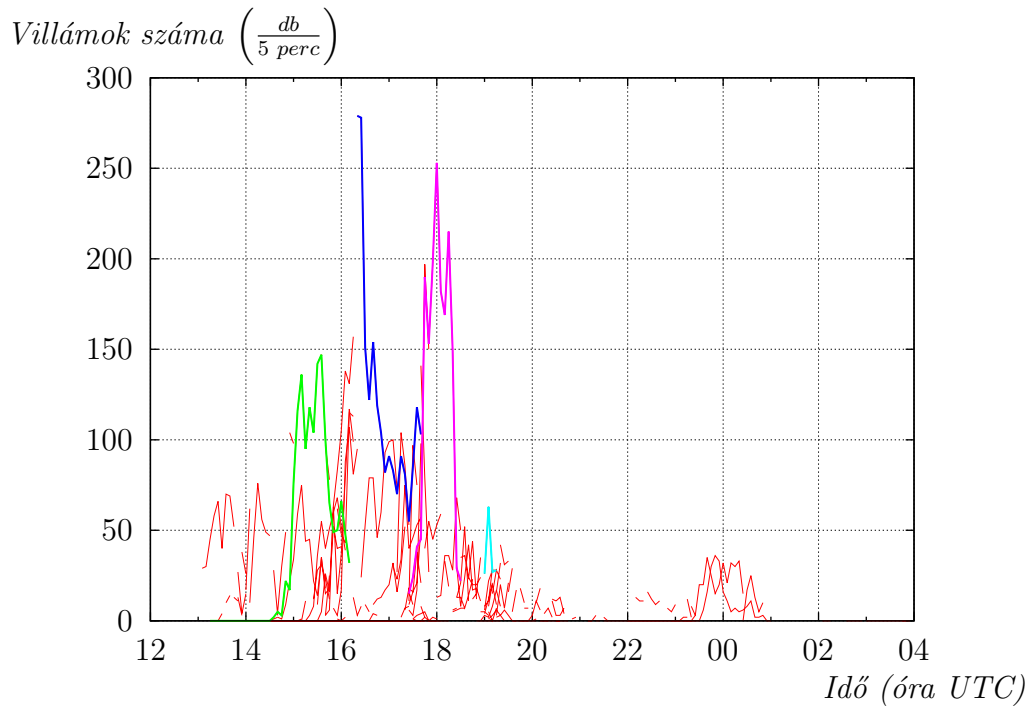
5.2. Július 19.

Az időszak kezdete Július 19. 12:45 UTC, és vége Július 20. 01:05 UTC. Az OMSZ napi jelentésében, a periódusra vonatkozóan a következő szerepelt (<http://www.met.hu/>): *a nap nagy részében derült, napos, száraz idő volt, csak északnyugaton növekedett meg késő délutántól a felhőzet, és ott zápor, zivatar is kialakult. Többfelé megerősödött a délnyugati, déli szél. A hőmérséklet csúcserkéke 30 és 36 fok között változott. Éjszaka az ország északi felén többfelé fordultak elő viharos szellőkésékek kísért zivatarok. Hajnalra 14 és 20 fok közé hűlt le a levegő.*



8. ábra. Cellák villámlása a periódus során (Július 19.)

Az A.2. táblázatból kitűnik, hogy az időszak alatt 12 cella nevezhető elektromos szempontból vezércellának. Ebből 9 élen haladó. Ebben az esetben a 9. ábrán zölddel kiemelt 2-es, a kézzel megjelölt 121-es, a magentával ábrázolt 185-ös, és a ciánra színezett 234-es cellákról szólunk párszót bővebben.



9. ábra. Vizsgált cellák villámlása

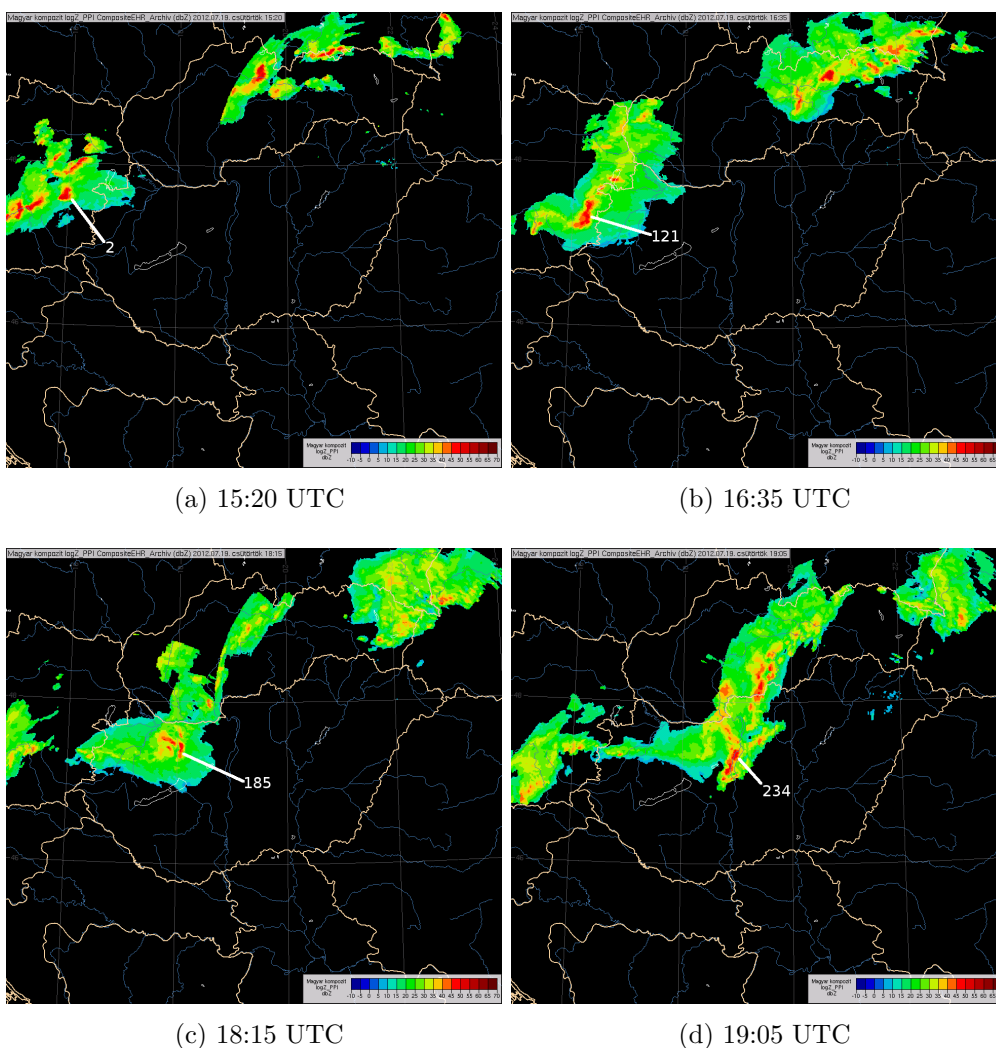
Egy nyugatias squall-line-ba tartozik mind a négy cella. Egymást váltva pattannak ki a rendszeren belül. Mind a négy zivatar határozottan elől haladó. Az első három megállná a helyét az előző esettanulmány zivatarai között is, ám a zivataros szituáció alapvetően gyengébb.

A 2-es cella mozgása során nem kényszerült irány változtatásra. Ez nyomult legelőre a squall-line haladása során. A hozzá képest kezdetben sokkal több villámot termelő 121-es zivatar hátrébb alakul ki a rendszerben. Mozgása nem teljesen nyugatias, kitér délfelé. Inkább kelet-délkelet irányba kanyarodik, olyan területek felé ahol még nem haladt el zivatar.

Számunkra a legkülönlegesebb a 185-ös cella. Méretét tekintve közepes, sokáig inkább kicsi, de az egyenletesen magas villámlás amit produkál figyelemre méltóvá teszi. 18:40 UTC-kor kialakul a squall-line előtt – talán a kifutó szálnak köszönhetően egy rövid életű instabilitási vonal. Ahhoz viszont elég hosszú ideig fenn marad, hogy a 185-ös zivatar elől elnyelje a nyersanyagot, amely ezáltal le is hanyatlik.

A 253-as cella a zivatar rendszer leépülő élet szakaszában jelenik meg, csak a környezetéhez viszonyítva látszik erősnek. Valójában az általa termelt villámlási csúcs jócskán elmarad a másik három cella mögött. Kiemelkedése a többi cella közül, annak köszönhető, hogy az előbb említett instabilitási vonaltól délebre jelenik meg. Ezért az általa bejárt úton még nem haladt másik cella. Maga az alaprendszer viszont elgyengül és hiába halad megfelelő úton a cella, rövid időn belül elhal.

Egyenlőre nem jelenthetjük ki, hogy az eredmények beigazolták az alapötletünket, viszont határozottan tovább erősítették az elméletbe vetett bizalmunkat.

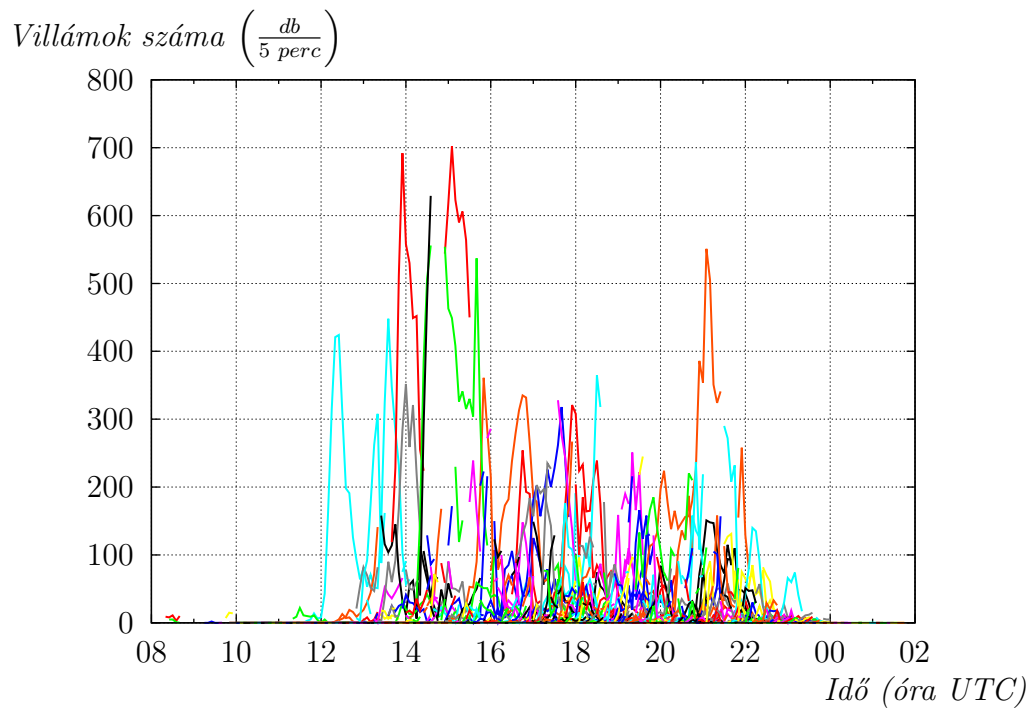


10. ábra. Radarképek és a cella azonosítók

5.3. Július 29.

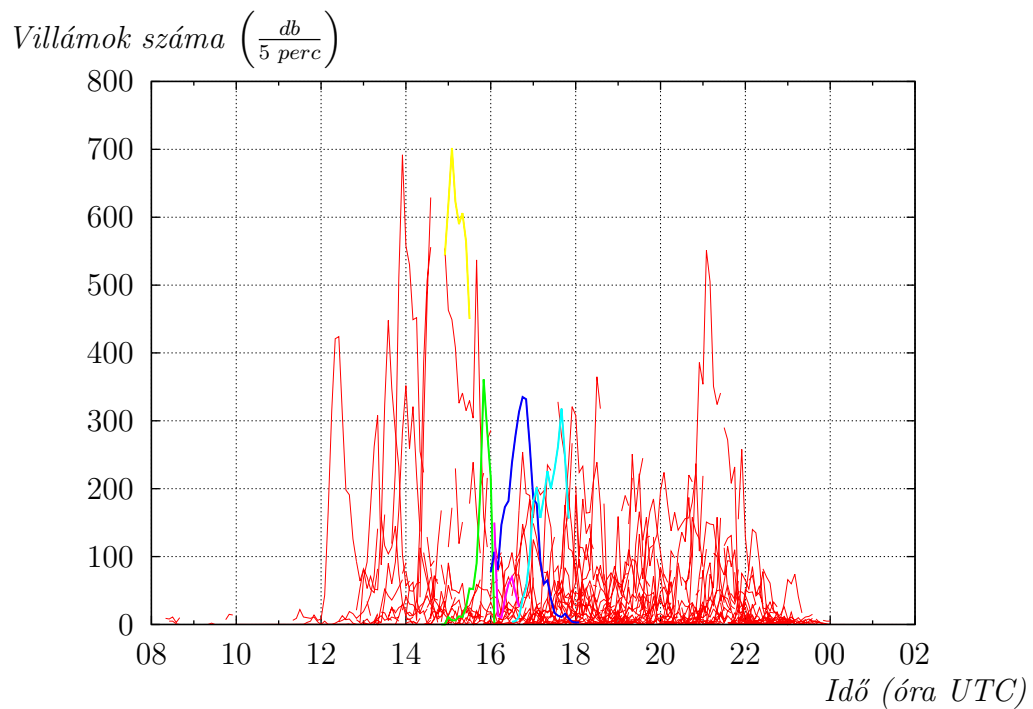
Az időszak kezdete Július 29. 11:00 UTC, és vége Július 29. 23:55 UTC. Az OMSZ napi jelentésében, a periódusra vonatkozóan a következő szerepelt (<http://www.met.hu/>): *a hajnali, reggeli órákban a Dunántúl északi részén, a főváros térségében és attól kissé keletre többfelé alakult ki zápor, zivatar. Ezt követően ott is csökkent a felhőzet, kiderült az ég, 5-12 órára kisütött a nap. Kora délután nyugaton, később másutt is egyre többfelé erős gomolyfelhő-képződés kezdődött, és alakult ki zápor, zivatar. Heves zivatarok is voltak jégesővel, felhőszakadással, szélviharral. A hőmérséklet csúcsértéke 27 és 36 fok között változott. Éjszaka is még többfelé fordult elő zápor, zivatar. Hajnalra 14 és 21 fok közé hűlt le a levegő.*

Az A.3. táblázatból kitűnik, hogy az időszak alatt 22 cella nevezhető elektromos szempontból vezércellának. Ebből 20 élen haladó. A számok magukért beszélnek, de ne siessünk előre, előbb



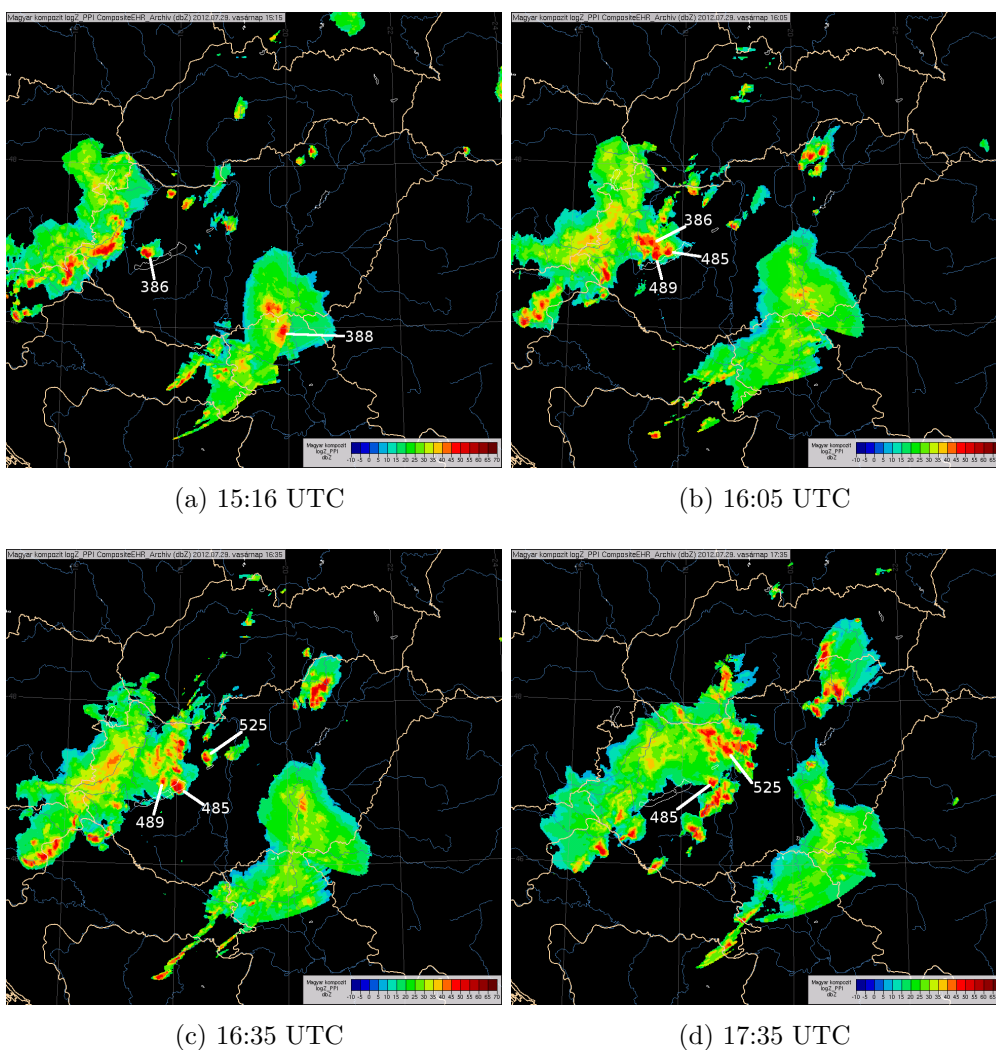
11. ábra. Cellák villámlása a periódus során (Július 29.)

vizsgáljuk meg a 12. ábrán feltüntetett néhány érdekes tulajdonságokkal rendelkező zivatart. Az ábrán zöld színnel a 386-os, késsel a 485-ös, magentával a 489-es, ciánnal az 525-ös, és sárgával a 386-os cellák szerepelnek.



12. ábra. Vizsgált cellák villámlása

A 386-os cella nem volt szupercella, de közel állt hozzá. Megelőzte az összes környező cellát (13. ábra (a) része) és az alapáramlástól kicsit jobbra tért el (dél-keleties irányba). Vesztét a mögötte haladó gyorsabban mozgó squall-line okozta. A találkozás a nagyobb rendszerrel érdekes eredménnyel járt. A cella szétvált három részre (13. ábra (b) része). A két kiszakadó cella a 485-ös és a 489-es. Az *anya cella* háttérbe szorul és teljesen legyengül. Az utódok viszont megindulnak, megörökölve a jobbra térülő jelleget. Mindkettő erőteljes cella, de a 485-ös előrébb halad, ezáltal elszívja a *testvére* elől a tüzelőanyagot (13. ábra (c) része).



13. ábra. Radarképek és a cella azonosítók

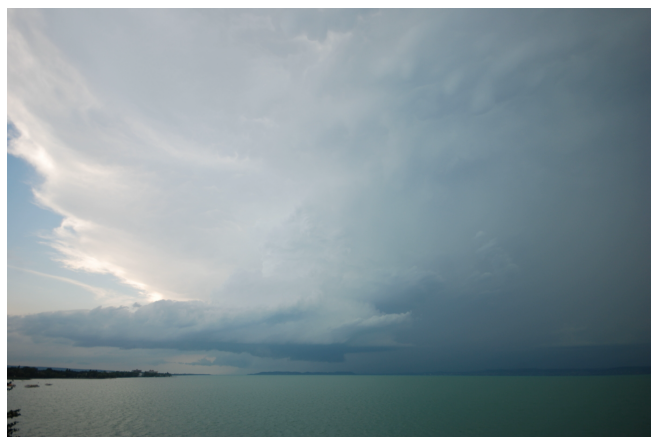
A 485-ös cellát neveztük el *balatoni szupercellának* (14. ábra). A zivatar akadálytalanul vonult egészen addig, míg előtte ki nem alakult egy instabilitási vonal, ami elszívta előle az energiát jelentő üzemanyagot. A cella villámlásának menete nagyon hasonlít a szegedi szupercelláéhoz, habár ennek a zivatarnak nem volt lehetősége olyan hosszan fenn maradni.



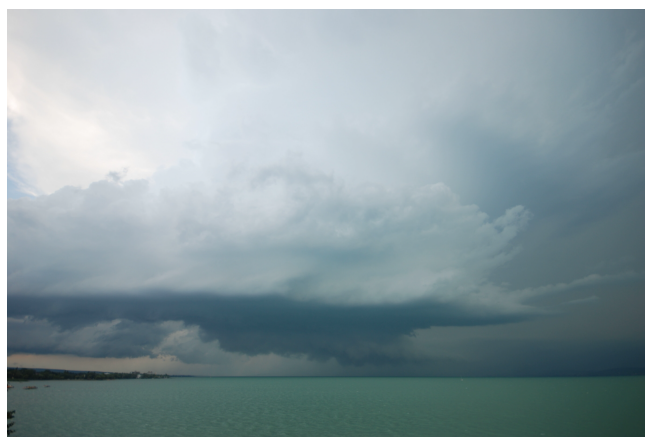
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

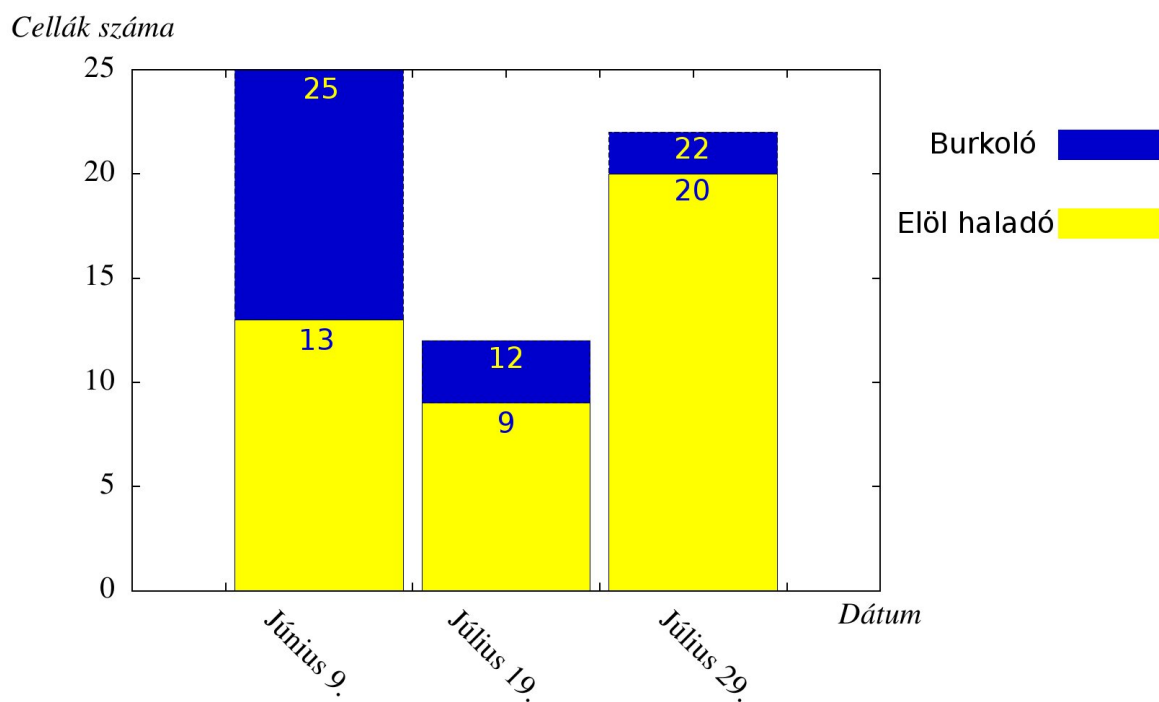


(f)

14. ábra. A balatoni szupercella

Hasonlóan hamar elhalt az 525-ös cella. Kezdetben teljesen magányosnak indult, később viszont beragadt a mögötte haladó squall-line és az előtte hirtelen kipattanó cella közé.

Végezetül, a nap során legmagasabb villámlási csúcsot produkáló 388-es cellát is nézzük meg. Ez a zivatar az előzőektől teljes mértékben független rendszer vezető cellája. Délebben mozog, mint a többi cella. Nagy területről képes akadálytalanul összeszedni a tüzelőanyagot. Mégsem marad fenn extrém hosszú ideig, ebből a szempontból teljesen átlagosnak nevezhető.



15. ábra. Villámlás vezető (kék szín) és élen haladó cellák (sárga szín) száma

Az esettanulmány eredményei alátámasztják a kezdeti hipotézisünket. A nap során a legtöbb vezér cella élen haladó volt. Az esetek többségében csupán akkor indultak hanyatlásnak, amikor újabb rendszerek alakultak ki az útjukban. A három esettanulmány alapján kijelenthetjük, hogy az elektromos szempontból vezető cellák, élen haladó cellák is egyben (15. ábra).

6. Összefoglalás

A dolgozatban ismertettünk egy feltevést, miszerint a zivatarok elektromos aktivitása összefüggésbe hozható a mozgásukkal. Azt állítottuk, hogy a zivatarok által beszívott meleg nedves levegő – magas ekvivalens potenciális hőmérsékletű légrések – segíti a nem induktív típusú töltésszétválasztódást, ez által a felhőben kialakuló potenciál különbséget is megnöveli. Korábbi modell elemzések alapján az mondtuk, hogy azoknak a zivataroknak lesz domináns villámlása, melyek mozgásuk során egy zivatargócban, vagy zivatarláncban a rendszer terjedési irányához képest előrébb haladhattak.

Az elmélet igazolására kidolgoztunk egy *villámlás csatolt zivatarcella követő rendszert*, a TITAN eljárás segítségével. Nagy felbontású radar képeket és villámlokalizációs adatok felhasználásával. Egzaktnak definiált zivatarcella ellipsziseket hozva létre, melyek elektromos tulajdonságaira statisztikákat készítettünk három esettanulmány keretében.

Az eredmények alapján határozottan kijelenthetjük, hogy egy zivataros időszak elektromos szempontból domináns cellái, társaikat megelőzve vagy előnyösebb útvonalon haladnak életük során.

A. Függelék

ID	elől halad	méret	típus
2	igen	közepes	két csúcs
24	igen	közepes	kezdetben
57	igen	nagy	kezdetben
175	igen	kicsi	kezdetben
214	igen	közepes	végén
222	igen	közepes	végén
233	igen	közepes	végén
270	nem	kicsi	két csúcs
284	igen	nagy	végén
325	igen	nagy	végén
380	igen	nagy	végén
384	nem	közepes	két csúcs
389	igen	közepes	végén
433	nem	kicsi	két csúcs
443	nem	kicsi	kezdetben
469	nem	kicsi	kezdetben
476	igen	nagy	kezdetben
504	nem	közepes	végén
506	nem	közepes	két csúcs
533	igen	nagy	kezdetben
538	nem	kicsi	két csúcs
602	nem	kicsi	kezdetben
628	nem	közepes	kezdetben
617	nem	közepes	kezdetben
675	nem	kicsi	kezdetben

A.1. táblázat.

ID	elől halad	méret	típus
1	igen	közepes	végén
2	igen	közepes	kezdetben
21	igen	nagy	kezdetben
93	nem	kicsi	végén
121	igen	nagy	kezdetben
124	nem	kicsi	két csúcs
164	nem	kicsi	kezdetben
185	igen	közepes	végén
234	igen	közepes	kezdetben
321	igen	közepes	kezdetben
324	igen	közepes	két csúcs
336	igen	kicsi	kezdetben

A.2. táblázat.

ID	elől halad	méret	típus
50	igen	nagy	két csúcs
185	igen	közepes	végén
262	igen	közepes	két csúcs
317	igen	közepes	végén
322	igen	nagy	végén
386	igen	nagy	végén
388	igen	nagy	kezdetben
389	igen	nagy	két csúcs
485	igen	nagy	kezdetben
489	nem	nagy	két csúcs
525	igen	nagy	végén
531	igen	nagy	kezdetben
559	igen	nagy	végén
662	igen	nagy	végén
724	nem	közepes	két csúcs
800	igen	nagy	végén
821	igen	nagy	két csúcs
1049	igen	nagy	kezdetben
1097	igen	nagy	kezdetben
1112	igen	nagy	kezdetben
1116	igen	kicsi	két csúcs
1229	igen	közepes	két csúcs

A.3. táblázat.

Hivatkozások

- Dash, J. G., Mason, B. L., and Wettlaufer, J. S.*, 2001: Theory of charge and mass transfer in ice-ice collisions. *J. Geophys. Res.*, **106**, 20395–20402.
- Dixon, M., and Wiener, G.*, 1993: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting – A Radar-based Methodology. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **10**, 785–797.
- Geresdi, I.*, 2004: Felhőfizika. *Dialóg Campus Kiadó*, Budapest-Pécs
- Hess, P., und Brezowsky, H.*, 1977: Katalog der Grosswetterlagen Europas. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, **113**.
- Péczely, Gy.*, 1983: Magyarország makroszinoptikus helyzeteinek katalógusa (1881-1983). *Országos Meteorológiai Szolgálat kisebb kiadványai*, **53**.
- Saunders*, 2008: Charge separation mechanisms in clouds. *Space Sci. Rev.*, **137**, 335–353.

Internetes hivatkozások

<http://www.met.hu/>

<https://www.nowcast.de/en.html>