Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar

Vörös lidérceket kiváltó zivatarok meteorológiai tulajdonságainak vizsgálata



Készítette: Brockhauser Barbara METEOROLÓGUS MSc HALLGATÓ

Témavezető: BÓR JÓZSEF, PhD, MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet, Sopron

Tanszéki Konzulens: DR. ÁCS FERENC, ELTE, TTK, Meteorológiai Tanszék, Budapest Budapest, 2013

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	5
2. A ZIVATAR MINT IDŐJÁRÁSI ELEM	6
3. A ZIVATAROK TÍPUSAI	11
4. A ZIVATAROK ÉS A LÉGKÖRI ELEKTROMOSSÁG	15
4.1 Töltések a zivatarfelhőn belül	16
4.2 A villámlás	19
4.2.1 A villámok típusai és ezek egymáshoz viszonyított előfordulási	
gyakorisága	20
4.2.2 A villámlás fő fázisai, a főkisülés jellemző néhány fizikai paramétere	21
4.2.3 A villámok észlelése	22
4.3 A zivatarok szerepe a globális elektromos áramkörben	24
5. A VÖRÖS LIDÉRCEK	25
5.1 A felsőlégköri kisülések	25
5.2 A vörös lidércek kialakulása és tulajdonságaik	28
6. A VÖRÖS LIDÉRCEKET KELTŐ ZIVATAROK TULAJDONSÁGAI	30
6.1 Vörös lidérceket kiváltó konvektív rendszerek	31
6.2 A radarintenzitás kapcsolata a vörös lidércekkel	32
6.3 A felhőtető hőmérséklet és a vörös lidércek kapcsolata	32
6.4 A felhőtető magasság és a vörös lidércek kapcsolata	33
6.5 A vörös lidércek és a villámok kapcsolata	33
7. FELHASZNÁLT ADATOK	35
8. AZ ELEMZÉS MÓDSZERE	38
8.1 A terület kiválasztásának stratégiája	38
8.2 A eljáráskor felhasznált programok	39
9. EREDMÉNYEK	39
9.1 Elemzett zivatarok bemutatása	39
9.2 A 2012. június 9–10 zivatar	39
9.3 A 2011. június 7–8 zivatar	46
9.4 A 2010. augusztus 12–13 zivatar	51
9.5 A 2007. augusztus 10–11 zivatar	60
10. KIÉRTÉKELÉS	69
11. ÖSSZEFOGLALÁS	79

11.1 A munka folytatásának lehetőségei	79
12. FÜGGELÉK	80
12.1 Kék nyalábok és Óriás nyalábok	80
12.2 A gyűrűlidércek	82
12.3 Lidércudvarok	83
12.4 Egyéb felsőlégköri kisülések	83
12.5 Összefoglaló táblázat	84
13. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	85
14. IRODALOMJEGYZÉK	85

A dolgozatban előforduló rövidítések:

CB: Zivatarfelhő (cumulonimbus)
CC: Felhő–felhő villám (cloud to cloud)
CG: Felhő-föld villám, polaritás szerint lehet + vagy - (cloud to ground)
dBZ: decibel z, a radarintenzitás mértékegysége
DWSR: Doppler weather surveillance radar
ELTE: Eötvös Lóránd Tudomány Egyetem
ELVES: gyűrűlidérc, FEOEM típus, (Emissions of Light and Very Low Frequency
Perturbations From Electromagnetic Pulse Sources)
EM: Elektromágneses
EUMETSAT: European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
FEOEM: felsőlégköri elektro-optikai emissziókat
GPS: globális műholdas helymeghatározó rendszer, időszinkronizálásra is
alkalmazható (Global Positioning System)
HAWK: Az OMSZ meteorológiai adatokat megjelenítő szoftvere Hungarian Advanced
Workstation)
LDN: Lightning DetectionNetwork
LF: Alacsony frekvencia (Low Frequenty)
LINET: európai villámmegfigyelő hálózat (lightning detection network)
LIS: Lightning Imaging Sensor
LPCC: zivatarfelhőben megfigyelhető alsó pozitív töltés tartomány (lower positive charge)
MDF: magnetic fielddirection finding

MetOp: Polar orbiting meteorological satelites

MKK: Mezoléptékű konvektív komplexum

MKR: Mezoléptékű konvektív rendszer

MSG: Meteosat Second Generation

MTA CSKI: Magyar Tudományos Akadémia Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet (MTA CSFK CSI)

MTA CSFK GGI: Magyar Tudományos Akadémia Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézet

NASA: Nemzeti repülési és űrhajózási hivatal (National Aeronautics and Space Administration)

NLDN: az Egyesült Államok villámfigyelő hálózata (National Lightning Detection Network)

NOAA: Amerikai Nemzeti Óceán és Atmoszféra kutató intézet (National Oceanic and Atmospheric Administration)

OMSZ: Országos Meteorológiai Szolgálat

OTD: műholdon alkalmazott villámészlelő egység (Optical Transient Detector)

SAFIR: VHF sávú villámészlelésben alkalmazott interferometrikus érzékelő típus

(Surveillance et Alerte Foudre par Interferometrie Radioelectrique)

STEPS: Észak-Amerikaban folytatott zivatar megfigyelési kampány (Severe Storm

Electrification and Precipitation Study)

TLE: felső légköri kisülés (transient luminous event)

TOA: Villám helymeghatározó (Time of Arrival módszer)

TROLL: FEOEM tipus (Transient Red Optical Luminous Lineament)

UFO: Azonosítatlan repülő tárgy (Unidentified Flying Object)

USA: Amerikai Egyesült Államok (United States of Amerca)

UTC: világidő, az angol "Coordinated Universal Time" es a francia "Tempse

Universel Coordonne" összevonásából

VLF: nagyon alacsony frekvencia (Very Low Frequency, 3-30 kHz)

WWLLN: World Wide Lightning Location Network

1. BEVEZETÉS

Földünk időjárásának meghatározó elemei a zivatarok, melyeket látványos természeti jelenség kísér, a villámlás. "Az égi háború" mindenkor félelemmel és csodálattal töltötte el az embert. A fényjelenség és a mennydörgés az ősemberben is ijedséget keltett. Mivel nem ismerte a villámlás kiváltó okait, isteni hatalmak haragjaként fogta fel (Puskás, 1998–99). Az 1700-as években Benjamin Franklinnek sikerült igazolnia, hogy a villámlás légköri elektromos kisülés. Híres "sárkány" kísérleteivel bebizonyította, hogy a villámlás segítségével is lehet szikrát előállítani akárcsak egy dörzs–elektromos géppel. Ez a kísérlet meggyőző bizonyíték volt arra, hogy a villámlás a légkörben létrejövő szikrakisülés, mely a felhők között vagy a felhő és a földfelszín között alakulhat ki. A villám egy fény – és hanghatással járó légköri elektromos kisülés. Emellett a villámlásnak számos utóhatása is van. Például biológiai (közvetlen vagy közeli villámcsapás esetén), és fizikai (fény, hő, hang) hatások.

A villámok ionizáló röntgen-sugárzást (Mallick et. al., 2012) és gamma-sugárzást (Carlson et. al, 2010) is kibocsátanak. A villámlások további elektromos kisüléseket is kiválthatnak a troposzférában (Yair et. al., 2009), valamint nagy magasságokban a zivatarfelhők fölött. A felsőlégköri elektromos kisülések optikai kísérőjelenségei a FEOEM–ek (felsőlégköri elektro-optikai emissziók). Ezekkel csak néhány évtizede foglalkozik komolyan a tudomány (Pasko et al, 2012). A FEOEM jelenségek szabad szemmel alig, vagy egyáltalán nem láthatók. Napjainkban egyre többen kutatják őket, mert jelentőségük a zivatartevékenységben még jórészt felderítetlen. A földfelszínről végzett optikai megfigyelések során a leggyakrabban észlelt FEOEM a vörös lidérc. Ez a titokzatos jelenség a zivatarok során a felső légkörben, kb. 60–80 km-es magasságban keletkezik. Számos kutatás kimutatta, hogy a vörös lidércek főként a zivatar végfázisában jelennek meg, és erős pozitív felhő–föld villámokhoz (a dolgozatban a +CG–vel jelölve) kapcsolhatók (Pasko et al, 2012).

Ebben a dolgozatban a Magyarország területe fölött átvonuló olyan zivatarok meteorológiai paramétereit tanulmányoztam, amelyek fölött vörös lidérceket figyeltek meg. Arra a kérdésre keresem a választ, hogy van-e olyan meteorológiai paraméter, amellyel a zivatarok vörös lidérceket generáló időszaka jól jellemezhető.

5

2. A ZIVATAR MINT IDŐJÁRÁSI ELEM

Zivatarnak hívjuk azokat a felhőrendszereket, melyekben villámlás is előfordul. Ezek a jelenségek természetes részei a környezetünknek, jellemzően a nap melegítésének, a föld topográfiájának és forgásának következményeként alakulnak ki. Leginkább a nyári félévben keletkeznek zivatarok, elsősorban a délutáni órákban. Jellemzően koncentráltan fordulnak elő, kb. 25km az átmérőjük és minimum fél óráig "élnek". Földünkön óránként 760 zivatar zajlik, ezt több mint 40 állomás adatai alapján számolták ki. Ez a szám kisebb, mint az 1925-ös becslések szerint megállapított 1800, ám az akkor alkalmazott modellben, azóta számos hibát fedeztek fel (Ivády, 2011). A zivatarok a trópusokon fordulnak elő a legnagyobb számban, azon belül is a kongói medencében, Ugandában, Afrikában. Kampalában átlagosan évente 242 napon van zivatar, legfőképpen a Viktória tó felett (Burt, 2012). Ennek okát F.E. Lumb a brit "Weather" folyóiratban a következőképen magyarázta: a parti szél okozta konvergencia az éjszaka folyamán látens hőfelszabadulást eredményez a nedvesebb tófeletti levegőrétegből, ez közreműködik a parti cirkuláció keletkezésében, ami segíti a zivatarfelhők kialakulását a tó felett. (Burt, 2012).



1. ábra: A Viktória tó

A leglátványosabb, színes fényű villámlás a venezuelai Maracaibo tó felett figyelhető meg, amelynek elnevezése: 'Catatumbo Lightning'. (Arról a folyóról nevezték el, amely a tóba ömlik és ahol a leggyakrabbak a zivatarok.) Itt évente átlagosan 140–160 éjszakán alakul ki zivatar. (Burt, 2012). A zivatarok élettartalma akár 10 óra is lehet. Itt keletkezik a világon a legtöbb troposzférikus ózon a villámlásoknak köszönhetően. Az Andok felöl érkező hideg szél, és a Maracaiboi mocsaras területeiről áramló meleg, nedves levegő a jelenség fő

okozója. A vörös, narancssárga, sárga és fehér villámokat a mocsárból származó ionizált gázok (pl. metán) okozzák (Davenport, 2007).



2. ábra: A "Catatumbo lightning" jelenség (national-geographic)

A villámok globális előfordulását tekintve látható, hogy Európában jóval kevesebb villámlás alakul ki, mint az Egyenlítő környékén. Leggyakrabban az Alpok peremén, Olaszországban és az Adrián. A következő ábra a villámok éves sűrűségeloszlását mutatja Európában, 2002-ben.



3. ábra: A villámok előfordulásának eloszlása Közép–Európa felett

Minden zivatar generál villámokat, amelyek több ember életét veszik évente, mint a szintén zivatarok által létrejött tornádók. Amerikában a villámlások évente 93 halálesetet és 300 sérülést okoznak, valamint milliódolláros károkat. (NOAA). Egyes zivatarok rövid idő alatt annyi esőt produkálnak egy koncentrált helyen, hogy az hirtelen, erős árvizet (flash flood) okozhat. Az árvíz károkozását befolyásolja, hogy hegyvidéki vagy városi területről van

szó. A hegyvidékről lezúduló víz kimossa a talajt és az építményeket, valamint a vízzel érkező hordalék, és uszadék további károkat okoz. A városi csatornarendszer pedig képtelen hirtelen ennyi vizet elvezetni. 2005. március 27-én történt a "győri özönvíz", amikor azonos terület felett váltak éretté az újabb viharcellák, így ugyanarra a helyre hullott a csapadékuk (Csík, 2012). Egy másik ilyen esemény szintén 2005-ben, április 18-án történt Mátrakeresztesen, ahol 2 óra alatt 110 mm csapadék hullott, ebből 45 percen keresztül jégeső. Első eset volt, hogy áprilisban a napi csapadék összeg 110 mm feletti értéket ért el. Hatalmas köveket és sziklákat mozgatott meg a gyorsan lezúduló víz, mely számos hidat, házat, utat rongált meg (4. ábra) (Csík, 2012). Kialakulásáért a nedves szállítószalag mögötti egymást gerjesztő zivatarok voltak a felelősek (Horváth, 2012).



4. ábra: A Mátrakeresztesi "flash flood" okozta kár (Horváth, 2012; Csík, 2012)

Mádon is hasonló esemény történt 2005. május 4-én, ahol egy elöregedett okkludált ciklonban jöttek létre a zivatarok. Több mint egy órán keresztül nagyon intenzív csapadék hullott, jégesővel. A cellák itt is ugyanazon pont felett keletkeztek (Csík, 2012). A zivatarok számos más veszélyforrást is hordoznak, ilyen például az erős szél, amely elérheti akár a 160 km/h sebességet (NOAA) is. Egyik jellemző típusa a downburst, más néven légzuhatag, amely a repülők le és felszállását veszélyeztetheti (5. ábra). A légzuhatag nagy sebességű légáramlás. A zivatarban jelentkező csapadék lehűti a zivatarban található légrész

egy részét, ami nagyobb sűrűségű lesz, mint a környezete, ennek következtében ez a légtömeg a zivatar peremén lezuhan a talaj felé. Minél szárazabb a levegő annál nagyobb lehet ez a sebesség, amely elérheti akár a 118 km/h-át is, vagyis orkánerősségű (viharcentrum.hu).



5. ábra: A downburst jelenség miatt a repülő a kifutó előtt éri el a talajt. 1971. augusztus 28án Koppenhágában egy Malév repülőgép a léghuzat hatására tengerbe csapódott, amelynek során 31 ember vesztette az életét (Földesi,2011).

Jelentős veszélyforrásnak tekinthető a jégeső is. Ennek kialakulásához a zivatarfelhőkben erős feláramlás, kellően hideg légrétegek, megfelelő jégcsírák, illetve túlhűlt vízcseppek szükségesek. A zivatarláncok (Squall Line-ok) és a szupercellák produkálnak a leggyakrabban jégesőt. Ez utóbbiak a heves feláramlások miatt. A legkisebb jégszemcsék kialakulásához 36–54 km/h sebességű feláramlás kell, míg a golflabda (~4cm átmérőjű) nagyságúhoz 88km/h szükséges. A softlabda (~11cm átmérőjű) jégesőhöz 160 km/h sebességet meghaladó feláramlás szükséges. A számítások azt mutatják, hogy a jégszemek 40–70%-a még a földet érés előtt elolvad (Keith, 2002). Az USA-ban 2010. július 23-án a dél dakotai Vivian városban hullottak az eddigi legnagyobb, közel 20 cm-es átmérővel rendelkező jégszemek, melyeknek tömege 0,88 kg volt. Számos tetőt átszakítottak, autószélvédőket törtek be, és 5 személyt megsebesítettek. A Guiness rekordot, az 1986. április 14-én, a bangladesi Gogalpanj településen hullott, 1 kg tömegű jégdarab tartja. A hatalmas jégszemek akkor 92 ember halálát okozták (Orr, 2004).

Magyarországon jelentős károkat az 1987. július 25-i jégverés okozott, amely Baranya, Somogy, Tolna, Bács–Kiskun, Csongrád, Veszprém és Szolnok megyét sújtotta. A 3 és 5cm átmérőjű jégszemek letarolták a gyümölcsösöket, zöldségeskerteket, valamint gépkocsikat és épületeket rongáltak meg. Baranyában a károk elérték a 700 millió forintot (Molnár, 2012). A

jelenségért egy észak Európa felett örvénylő ciklon volt a felelős, amelynek következtében heves zivatarláncok alakultak ki az országban. Két, egymástól 50 km–re elhelyezkedő, és 100 km/h sebességgel haladó szupercella haladt nyugat–kelet irányba. Később egy harmadik szupercella is kialakult, ami a legerősebbnek bizonyult és Baranya megyét érintette (Molnár, 2012)

Végül, de nem utolsó sorban a zivatarokból kiakulhatnak a tornádók. Ezek közül megkülönböztetünk szupercellás, és nem szupercellás tornádókat. A szupercellás tornádókra jellemző, hogy a felhőből (wall cloud, lásd később a 12. oldalon) nyúlik le, hosszabb élettartamú, többször is elérheti a földet és felemelkedhet. Pusztítóak. A nem szupercellás tornádó a kifutószél front felhőjéből (lásd később a 11.0ldalon) alakul ki, rövidebb élettartamú, és kisebb károkat okoz. Nyomvonaluk hosszabb, keskeny a pusztító sávjuk, káruk általában a downburst károkhoz mérhető. (Horváth, 2012). A tornádók életciklusa 4 lépésben írható le. A kialakuló fázisban a falfelhőből egy lelógó tuba (tölcsérfelhő) keletkezik, amely akkor válik tornádóvá, ha eléri a földet (touch down). A második a fejlett fázis, amelyben a tornádó a legnagyobb kiterjedését éri el, ez 400-500m-es átmérő is lehet, de nem feltétlen ebben a szakaszban éri el a maximális szélsebességét. A harmadik fázis a zsugorodás, ahol az átmérő lecsökken, és a szélerősség a maximálisra növekszik. Az utolsó fázis a leépülő, amikor a tornádó elkezd emelkedni, esetleg kettészakadhat. Néha később is, szupercella esetén, újra lecsaphat (Horváth, 2012). A tornádó erősségét a Fujita skála határozza meg. A skála F0-tól (ahol a szélsebesség 65–115 km/h közötti) -F5-ig (ahol a szélsebesség meghaladja a 421-510km/h-t) terjed. A legutóbbi F5-ös tornádó Parkersbourgban (Iowa állam USA) 2008 május 25-én keletkezett, és letarolta a fél várost (6. ábra) (Ramsay, 2008).



6. ábra: Parkersbourg a tornádó után

Bár a tornádók legtöbbször az USA-ban fordulnak elő, meteorológusok szerint Magyarországon is évente nagyjából 20–30 alkalommal keletkezik tornádó. Ennek csak a töredékét sikerül megfigyelni, regisztrálni. A legerősebb hazai tornádót 1924-ben Biatorbágyon regisztrálták, valószínűleg egy F4-es lehetett. Korabeli jelentések szerint Biatorbágyon 450 házból 400 esett áldozatul a viharnak (Tordai, 2010).

Egy amerikai kimutatás szerint az évi 100 ezer zivatarnak, szerencsére csak a 10%–a bizonyul veszélyesen erősnek (NOAA).

3. ZIVATAROK TÍPUSAI

Három fontos esemény játszik szerepet a zivatarok kialakulásában: az erős feláramlás (mely létrejöhet konvekció, orográfiai akadály és frontális emelés hatására (7. ábra)), elegendő nedvesség, és megfelelő labilitás (a labilisan rétegzett légtömegnél a magasság növekedésével a hőmérséklet több mint 1 fokot csökken 100 méterenként). Ilyen körülményeknél a talaj közeli felmelegedett levegő nagy magasságokba képes emelkedni, ezzel erős konvekciót létrehozva. (viharcentrum.hu). Nyáron kedvezőbbek a feltételek ahhoz, hogy a gomolyfelhők zivatarfelhővé (cumulonimbussá (CB)) fejlődjenek. Ezen felhők teteje 8–12 km magasságban üllő alakot kezd ölteni (vagyis képtelen áttörni a tropopauzát, ezért elnyúlik azzal párhuzamosan), majd megkezdődik a csapadék, és villámtevékenység.





7. ábra: Az első képen egy hő-feláramlás általi felhőképződés látható, ahol a kék vonal a kondenzációs szintet jelöli. A második képen egy orográfiai emelés látható, míg a harmadikon egy hidegfont által kiváltott feláramlás figyelhető meg (zivipotty.hu).

A zivatarok között három altípust különböztetünk meg: egycellás, multicellás és szupercellás zivatart. Az adott típusok kialakulásában jelentős szerepet játszik a szélnyírás (vagyis a szél sebességének változása a magassággal) és a labilitás. Minél erősebb a szélnyírás annál könnyebben alakulnak ki pusztító zivatarok.

Az egycellás (8. ábra) zivatarok általában nyáron alakulnak ki, csekély szélnyírás mellett, és kevesebb, mint 1 óráig élnek. Egyszerű felszíni konvekciós folyamatok alakítják őket. A zivataroknak három életfázisa különíthető el. A kialakulás során megkezdődik a gomolyképződés, és erőteljes a feláramlás. Az érett fázisban elektromosan aktivá válik a felhő, és az eső hatására megindul a leáramlás, amely kifutószelet generál. Ez megakadályozza, a további meleg levegő beáramlást, és bekövetkezik az utolsó stádium, amelyre az erőteljes leáramlás a jellemző.



8. ábra: Az egycellás zivatar életének három fázisa (zivapotty.hu)

Amikor megerősödik a szélnyírás akkor a talajon haladó kifutószél (gust wind) képes megemelni az előtte haladó meleg levegőt, mely újabb zivatarcellákat generál. Így alakulnak ki a multicellás rendszerek (9. ábra). A zivatarok többsége 3–4 cellából áll, haladási irányukat nézve, elől találhatók a kialakulók, középen az érettek, hátul pedig az elhaló stádiumban lévők.



9. ábra: Egy multicellás zivatar sematikus ábrája. 1: a fejlődő, 2: a kifejlett, 3: az elhaló stádium (zivapotty.hu)

Amikor a szélnyírás eléri a 15–20 m/s–os értéket, akkor a multicellás zivatarok nem képesek fennmaradni, mert az erős szél széttépi őket. Ha viszont megfelelően nagy a labilitás, akkor olyan feláramlás jöhet létre, amely a talaj menti horizontális örvényeket (10. ábra) vertikális tengelyű örvényekké alakítja. Ebben az esetben beszélünk szupercelláról (10. ábra). A cella önmagában is forog a benne fellépő mezociklontól, melynek középpontjában található az okklúziós pont, ahol a legintenzívebb a beáramlás. Ekörül alakul ki a szupercellák jellegzetes felhőtípusa a falfelhő (wall cloud), illetve ilyenkor jöhet létre a tornádó. Élettartamuk legalább 1,5 óra.



10. ábra: Baloldalt: a horizontális örvények vertikálissá válása. Jobboldalt: a szupercella térbeli modellje. A zöld nyilak a szélnyírást mutatják. (1: mezociklon, 2: beáramlási terület, 3: előoldali leáramlás, 4: hátoldali leáramlás, 5: beáramlási alap, 6: fő feláramlási torony, 7: túlnyúló csúcs, 8: üllő, 9: szárnyfelhő tornyok, 10: beáramlási sáv, 11: falfelhő) (zivapotty.hu).

A multicellás illetve szupercellás zivatarok leginkább viharláncokban (Squall Line), vagy zivatarrendszerekben jelennek meg. A zivatarrendszereknek két fő csoportját különítjük el:

 a mezoléptékű konvektív rendszerek (MKR – angolul: MCS) olyan zivatarláncolatok, amelyek akár több órán keresztül fönnmaradnak. A műholdképen legtöbbször kör alakúak. Ide soroljuk még a fent említett zivatarláncokat, illetve a trópusi ciklonokat is.

2) Nagyobbak a mezoléptékű konvektív komplexumok (11. ábra) (MKK – angolul: MCC), amelyek a műholdképen kör vagy ovális alakúak, és általában éjszaka érik el az intenzitásuk maximumát. Kialakulásuk kritériuma a –32°C vagy annál hidegebb felhőtető, melynek kiterjedése legalább 100.000 km² illetve a –52°C vagy annál hidegebb felhőtető, melynek kiterjedése minimum 50.000 km². Élettartamuk legalább hat óra. Ezekben a rendszerekben az összefüggő rétegfelhők csapadékzónája legalább 20.000 km² (nyugatmet.hu, szupercella.hu).



11. ábra: Egy MKK Magyarország felett 2006. június 29-én (EUMETSAT)

4. A ZIVATAROK ÉS A LÉGKÖRI ELEKTROMOSSÁG

Egyszerű kísérletek bizonyítják, hogy a légkörben állandóan elektromos tér van jelen. Ez egy lángszondás kísérlettel igazolható. A 2–3 méter hosszú fémrúd egyik végére, alkoholba mártott vattacsomót rögzítünk. A vízszintesen elhelyezkedő fémrúd szabad végét egy földelt elektrométerhez kötjük, a vattás végét pedig a szabad légkörbe helyezzük (12. ábra). Meggyújtjuk a vattacsomót, és amíg az lánggal ég, addig az elektrométer pozitív töltésekkel töltődik fel. A feltöltődés a légköri elektromos tér létezésére utal. A jelenség úgy magyarázható, hogy a légköri elektromos tér, a fémrúdban elektromos megosztást (influencia) okoz, és ennek megfelelően a fémrúd külső végében negatív, a belső végében pozitív töltés halmozódik fel (Puskás, 1998–99). Az égő láng ionizálja a körülötte lévő levegőt, ami a rúd végén felhalmozódott negatív töltések kiáramlását okozza. Ez a töltéskiáramlás a fém rudat pozitív töltésekkel tölti fel, amelyet elektrométerrel ki lehet mutatni (Puskás, 1998–99)



12. ábra: A légkör elektromos tere a fémrúdban (lángszonda) töltéseket indukál (Puskás, 1998–99)

4.1. Töltések a zivatarfelhőben

A felhőkben nem az ionok vagy az aeroszolok a töltéshordozók, hanem a hidrometeorok. Így a töltésszétválasztódás a hidrometeorok mikrofizikájával és mozgásával kapcsolatos. Előbbiről igen keveset tudunk, azonban a mozgás szerepe már ismert. Ezt a következő erők határozzák meg: Coulomb erő, felületi feszültség, gravitáció, felhajtó erő, súrlódási erő (Ács, 2011). A Coulomb erő és a felületi feszültség viszonya meghatározza a tárolt töltésmennyiséget a hidrometeorokon, míg a Coulomb erő és a mechanikai erők (gravitációs, konvekció,súrlódási) viszonya a hidrometeorok mozgását jellemzi (Ács, 2011). A hidrometeoron belüli egynemű töltések ellentétesek a felületi feszültséggel, ezért ha növelem a töltésmennyiséget az a hidrometeor szétrobbanásához vezet. Az a kritikus töltésmennyiség, ahol ez a robbanás megtörténne a Rayleigh féle határérték (q_{ray}) (Ács, 2011). A megfigyelések azt mutatják, hogy a q_{ray} értéknél sokkal kisebb a hidrometeorokon található töltésmennyiség értéke. Ezért a q_{ray} értéke nem limitálja a hidrometeorokon lévő maximális töltésmennyiség értékét (Ács, 2011).

A Coulomb erő és a mechanikai erők aránya a nagy térerősségben lévő pici hidrometeorokon a legnagyobb. Látható tehát, hogy a felhőkben a töltésszétválasztási folyamatot, nagyrészt a mechanikai erők szabályozzák, a mikrofizikai folyamatokkal együttesen (Ács, 2011). Maga a szétválasztódás a hidrometeorok kölcsönhatásával működik. A töltésszétválás hatásfoka függ az elektromos térerősség nagyságától, és a részecskék típusától. Megkülönböztetünk induktív, és nem induktív típusú mechanizmust. Amikor az elektromos térerősség (E) létezése elengedhetetlen ahhoz, hogy a hidrometeorok töltést kapjanak, vagy veszítsenek, akkor induktív mechanizmusról beszélünk. Viszont ha ez a folyamat független az elektromos térerősségről, akkor nem-induktív a mechanizmus (Ács, 2011). Induktív mechanizmusok ott érvényesülnek jobban, ahol kis részecskék vesznek részt a kölcsönhatásban, pl. ion-részecske kölcsönhatás esetén. Itt a kölcsönhatás módját az ionok mobilitása, és a részecskék esési sebessége határozza meg. Ahhoz, hogy ez a mechanizmus hatékony legyen, a következő három feltételnek kell teljesülnie: Az összeütköző részecskék nem olvadhatnak össze, a részecskék hosszú ideig érintkezzenek, hogy a töltéscsere megtörténhessen, és a részecskéknek ellentétes irányban kell mozogniuk (a nagy lefelé, a kicsi felfelé).



13. ábra. Az induktív típusú gyors és lassú ionkölcsönhatás folyamata (Ács, 2011)

A nem–induktív részecske–részecske kölcsönhatás mikrofizikai vonatkozásai ismeretlenek, ezért a kölcsönhatásokat empirikusan a környezetállapot függvényében jellemzik. A jégkristály–jégkristály közötti kölcsönhatást a hőmérséklet és a víztartalom befolyásolja. A jégkristály polaritását ez határozza meg (Ács, 2011).

Egy másik feltételezés a töltések szétválasztására a konvekciós hipotézis, mely szerint a talaj közelben felhalmozódó töltéseket a konvekció felrepíti.



14. ábra: A konvektiv mechanizmus

A zivatarfelhők elektromos szerkezetét legegyszerűbben dipólusként jellemezhetjük (felül a pozitív töltések, alul pedig a negatív töltések dominálnak). Egy cumulonimbus azonban tripólusként is közelíthető, ahol megfigyelhető egy alsó pozitív tartomány (lower positive charge, LPCC) (Ács, 2011).



15. ábra: A tripólus szerkezet egy alsó LPCC-vel (Ács, 2011)

A negatív töltéstartomány általában addig tart, ahol a hőmérséklet még nagyobb, mint – 25°C. A pozitív töltésréteg közvetlen a negatív réteg felett helyezkedik el. A zivatarfelhő (cumulonimbus) elektromos feltöltődését több elmélet is magyarázza. Az egyik lehetséges feltöltődési mechanizmus a Lénárd–effektuson alapszik. A levegővel érintkező vízcseppek a felületi erők hatására, gömb alakzatot vesznek fel. A kialakult elektromos kettősréteg miatt, a csepp külső felületén negatív töltések, a néhány mikron vastagságú felületi réteg belsejében pedig pozitív töltések helyezkednek el (16. ábra). Ha az ilyen vízcseppek nagy sebességgel mozognak, és ütköznek, akkor szétporladnak, és a porladó vízcsepp felületéről apró méretű cseppecskék válnak le, amelyek negatív töltést visznek magukkal. Vízesések, szökőkutak körül a levegőben nagy mennyiségű negatív elektromos töltés mutatható ki. Ez a jelenség akkor is bekövetkezik, ha heves légáram porlasztja a vízcseppeket. Ez az úgynevezett Lénárd effektus (Puskás, 1998–99).

A 16. ábra alapján a zivatar heves légárama az (l)-es cseppet hozzácsapja a (3)-as csepphez. Az (l)-es részben szétporlad, leválnak róla a mikroszkopikus cseppek, (2), amelyek a (3)-as cseppre esnek. Így keletkezik a nagyobb tömegű (4)-es csepp, amely negatív töltésű, a tömege nagyobb, és az ütközéskor szerzett impulzus miatt lefelé mozog. Az (l)-es csepp elveszítve negatív töltéseit, egy felfelé mozgó (5)-ös cseppé alakul, mely pozitív töltést visz magával. Végeredményként létrejött egy negatív, és egy pozitív töltésű vízcsepp. Az ellenkező előjelű töltéseknek, e nagy távolságra való szétválasztása, nagy munkát igényel, ami a rendszer elektromos energiáját növeli. Így ez a töltés–szétválasztás, nagy potenciálkülönbségeket okoz a töltésrendszeren belül, amely millió–voltos nagyságrendű feszültségekhez vezet (Puskás, 1998–99).



16. ábra: A Lénárd effektus mechanizmusa (Puskás, 1998–99).

4.2. A villámlás

A villámok, a felhőkben szétválasztott elektrosztatikus töltések gócainak hirtelen kisülései (17. ábra). A felhő alja általában negatív töltésű, míg a teteje pozitív. Ha már annyi töltés halmozódott fel, hogy a potenciálkülönbség a föld és a felhő, vagy felhő és felhő között meghalad egy kritikus értéket, elektromos kisülés formájában töltéskiegyenlítődés zajlik le. A villámok 80%-a a felhőn belüli, vagy a felhők közötti úgynevezett felhővillám.



17. ábra: Töltések elrendeződése egy zivatarfelhő belsejében

Amikor a negatív töltések felgyülemlenek a felhők aljában, a semleges földből leszorítják a negatív töltéseket, így a föld felszínén a pozitív töltések lesznek többségben. Ezáltal a felszín vonzza a felhők aljában összegyűlt negatív ionokat. Amikor a két ellentétes töltésű terület összekapcsolódik, egy nagy vezetőképességű csatorna nyílik meg a töltések számára, amelyek ezen keresztül áramolhatnak a földre. Ezt a jelenséget villámlásnak nevezzük. A sebesen áramló elektronok fényjelenséget okoznak, és akkora hőt termelnek, hogy a levegő felmelegszik, több mint ezer °C-ra. Ez hirtelen, robbanásszerű kitágulást okoz, ezt halljuk égdörgésként. Léteznek olyan felhők is, amelyekben alul nem negatív, hanem pozitív töltés gyülemlik fel, ilyenkor pozitív ionok mennek a felszín felé. Ezeket pozitív polaritású villámoknak nevezzük.

A villám azért a magányosan álló fába csap bele a réten, mert minél közelebb van a felhő alja és a célpont egymáshoz, annál nagyobb lesz közöttük a feszültség. Ezáltal megnő a kisülés valószínűsége.

4.2.1. A villámok típusai és ezek egymáshoz viszonyított előfordulási gyakorisága

A villámokat több szempontból is csoportosíthatjuk. Lehet aszerint, hogy mik töltik be az elektródák szerepét a kisülésben. Ebből a szempontból megkülönböztetünk földvillámokat (a dolgozat további részében CG-vel jelölve) és felhővillámokat (a dolgozat további részében CC-vel jelölve). A földvillámnál az elővillám a felhőből a földfelszín irányába tart (a zivatarban létrejövő földvillámok 95%-a ilyen), vagy az elővillám a földfelszíntől a felhő irányába tart (a maradék 5%). A CC létrejöhet felhőn belül, felhő és felhő között, illetve felhő és felhőn kívüli légréteg között. Típusát tekintve lehet szétágazó, és szerteszét terülő (spider) (Ács, 2011). A CG villámok csak a zivatarban előforduló összes villám 20%-át teszik ki. Sokkal gyakoribbak (80%) a CC (más elnevezéssel IC, azaz Intra/inter cloud) villámok.

Másik csoportosítási szempont a polaritás. Aszerint, hogy a felhő a katód, vagy az anód szerepét tölti be, megkülönböztethetünk negatív és pozitív polaritású villámokat. A földfelszín irányába szállított töltés előjele szerint is megkülönböztethetjük a villámokat (Ács, 2011).

Több helyen lehet már olvasni egy új villámfajtáról, a sötét villámról. Ezek hasonlóak a zivatarokban kialakult "normális" villámokhoz, de nem kíséri őket látható fényjelenség. Ezért Joseph Dwyer villámkutató sötét villámnak nevezte el őket. A sötét villámok röntgen– és gammasugárzást bocsátanak ki. Ez a fajta villám a hagyományoshoz képest, egymilliószor nagyobb sugárdózist tartalmaz. Ez az energia, nagyon gyorsan szétterjed, gömbszerűen,

minden irányba. A kutatók szerint az űrből érkező kozmikus sugárzás, gerjeszti a viharfelhőben lévő extrém, nagy sebességű elektronokat, és ezek normálállapotú atomokkal ütközve, láncreakciót keltenek. Így keletkezik a rövid, de nagy energiájú sugárimpulzus. De a jelenség pontos kialakulását még kutatják (Berceli, 2013). Ezzel a fajta villámlással leginkább akkor találkozhat az embert, amikor repülőn utazik. Elvileg a sötét villám becsapása után, pár pillanatig kékeslila derengés veszi körbe a gépet. A kutatók szerint minden 1000. hagyományos villámcsapásra jut egy sötétvillám.

4.2.2. A villámlás fő fázisai, a főkisülés néhány jellemző fizikai paramétere

A villámlás szakaszai (18. ábra) a következők:

1) lépcsős előkisülés (step leader): inicializálásának folyamata mai napig nem teljesen tisztázott (Rakoy, 2013 kiadás alatt). Szaggatott, mind térben mind időben, szökellésekben halad előre, vagyis a majdani csatorna mentén hosszabbodik. A felhőből lefelé halad a legkisebb elektromos ellenállás irányába kb. 10–100 m-es lépésekben, melyeket 1–2 mikro–szekundum alatt tesz meg. A lépések között szünetek is megfigyelhetők. Az előkisülés csatornájában a hidrometeorokból összegyűjtött töltött részecskék találhatók. A lefelé terjeszkedő előkisülés, a földről, egy fölfelé tartó előkisülést hoz létre. Amikor a két csatorna összeér, akkor keletkezik a kisülési csatorna. Az elővillám szerepe a kisülési csatorna kialakítása. Gyenge, csekély fénnyel jelentkezik, sőt néha nem is látható. Előkészíti a kisülési pályát, ahol majd az fővillám végighalad.

 Első főkisülés (return stroke): az előkisülés csatornájában lévő töltések semlegesítése, és elszállítás alkotja a fővillámot. Ez a legnagyobb áramú és fényintenzitású kisülés.

3) Folytonos előkisülés (dart leader): ez előzi meg a második és további fővillámot többszörös kisülésekben. Mielőtt a folytonos előkisülés létrejön, töltésátrendeződés megy végbe a kisülési csatorna tájékán.

4) Második főkisülés (return stroke): További többszörös kisülések keletkeznek, melyek együttese alkotja a fővillámot. Ennek sebessége 10⁸ m/s, maximális áramerőssége 10–30kA, és a töltésáramlás időtartama 40–70 milliszekundum. Belső hőmérséklete 30.000 Kelvin, összenergiája 300–3000kWh. A villámcsatorna hossza kb. 5km és átmérője kb. 15cm.

A megfigyelések szerint akár 20 főkisülés is lehet, de átlagosan 3-4 szokott lenni (Ács,2011).



18. ábra. Villámfázisok: (a) elő kisülés, (b) ellenkisülés, (c) főkisülés (Lakotár)

4.2.3. A villámok észlelése

A legegyszerűbb módja annak, hogy meghatározzuk a villámcsatorna tőlünk vett távolságát, ha megmérjük a villámlás és a menydörgés közötti időtartamot. A villámcsatorna tőlünk vett távolsága, egyenlő a villámlás és a menydörgés közötti időtartam (s) szorozva a menydörgés sebességével (~0,33 kms⁻¹). A villámlás nem csak hanghullámot, hanem elektromágneses (EM) hullámokat is kibocsát. Az emittált EM hullámok hullámhosszai a rádió hullámhossz tartományába esnek (Ács, 2011). Különösen az alacsonyabb frekvenciájú hullámok jól visszaverődnek, mind a talajfelszínről, mind az ionoszféráról, ezért a talajfelszín és az ionoszféra közötti tartomány jó hullámvezető, amelyben az EM hullám a terjedése során viszonylag keveset gyengül. A zivatartevékenység megfigyelése alapvetően két módon történik: műholdakról optikai észleléssel (pl. OTD: Optical Transient Detector, LIS: Lightning Imaging Sensor) illetve a villámok által kisugárzott alacsony frekvenciájú (LF) EM hullámok földfelszíni állomásokon való regisztrálásával. Az optikai monitorozás hátránya a műhold pályához kötöttsége, amely térbeli korlátozottságot okoz a detektálásban, és az egyedi villámok azonosításában, valamint a felhőtető erős takarása, mely a felvillanások helymeghatározását korlátozza (www.sgo.fomi.hu).

Az első +CG villámot detektáló lokalizáló rendszer az LDN volt (Kinder et. al., 1980). Az 1980-as évektől az MDF (VLF mágneses lokátort) használták (Lyons et. al., 2006a). 1980 második felében megjelenik a TOA (Time of arrival) módszer (Lyons, et al., 1989). Ezután a 90'-es években a TOA és az MDF rendszereket ötvözték, és eredményképpen kialakult a NLDN (Cummins et. al., 1998). Magyarországon a System d'Alerte Foudre par Interferometrie Radioelectrique rendszert használják a villámok lokalizálására, ez rövidítve a SAFIR. Ennek 5 hazai állomásból álló alhálózatát az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) működteti. A pontos helymeghatározáshoz minimum 3 állomás kell. Az 5 magyar mérőállomás helye: Bugyi település (2002-ben váltotta fel a budapesti állomást), Sárvár, Véménd, Zsadány, Varbóc. Emellett 3 szlovákiai detektor (Maly Javornik, Lucenec és Milhostov) adatait használja az OMSZ a villámok helymeghatározásához (19. ábra).



19. ábra. A magyarországi illetve szlovákiai villám lokalizációs állomások földrajzi elhelyezkedése (Budai, 2009)

A távolsági villám lokalizáció elve tulajdonképpen nem bonyolult (Kiss et. al, 2009). A kisülések, jelentős amplitúdójú elektromágneses zavarjeleket sugároznak ki az alacsony rádiófrekvenciás sávban is (1–25 kHz). Ezek speciális tulajdonsága, hogy a földfelszín és az ionoszféra közti "üregrezonátorban" csekély csillapodásuk miatt nagyon nagy távolságra eljutnak. Extrém alacsony frekvenciákon – 1 kHz alatt – ahol a csillapodásuk különösen alacsony, akár a teljes Földet megkerülhetik. Már egy egyszerű rádióvevő is alkalmas a villámok által gerjesztett impulzussorozatok vételére. Ha van legalább 3, nagy pontossággal szinkronizált, nagy távolságban elhelyezkedő vevőnk, akkor a jelek beérkezési idejének különbségeiből egy nem túl bonyolult algoritmus segítségével, meghatározható a villámforrás helye. Amikor a műszer érzékel egy jelet, akkor 1 µsec pontossággal meghatározza a beérkezés idejét (GPS időinformáció alapján), amit továbbít a központnak. Ha a többi állomásról is beérkezik a jel, egy időtartományon belül, akkor a központi egység számolni

kezd. A módszer neve: Time–of–Arrival (TOA). Az idő függvényében egy hiperbolát illeszt az állomások köré, és ennek metszéspontja adja a villám helyét (20. ábra). Ehhez persze ismerni kell a rádiójel terjedési sebességét, a csillapodás mértékét, be kell azonosítani az ugyanazon eseményhez tartozó impulzusokat, és egy sor más részletre is figyelni kell. Nem véletlen, hogy a WWLLN (globális villám lokalizációs hálózat) adatbázisba, csak azok a villámkisülések kerülnek rögzítésre, melyeket legalább 5 állomás párhuzamos észlelése alapján lehetett azonosítani.



20. ábra. Villám lokalizáció segítségével (a kék folt) 3 állomás (S1, S2, S3) detektorainak segítségével a TOA (Time of Arrival) módszerrel. A detektorok az alacsony frekvenciás (LF) tartományban érzékelik az elektromágneses sugárzást.

2008–ban, az ELTE Űrkutató csoportja Pencre telepítette a német LINET mérőhálózat egyik magyarországi észlelőállomását. Ez a rendszer a VLF–LF tartományban mér. További hazai állomások működnek még Pécsett és Szegeden (OMSZ), Sopronban (MTA CSFK GGI) és Debrecenben (MTA CSKI). A rendszer úgy működik, hogy kereszthurkolt mágneses antennák az érzékelők. Az antennán a mintavételezést és detektálást egy erre a célra kifejlesztett DSP HW végzi (www.sgo.fomi.hu).

4.3. A zivatarok szerepe a globális elektromos áramkörben

Tudományos feltételezések szerint, a légköri elektromos töltések elsődleges forrásai a zivatarok, amelyek leggyakrabban szárazföldek fölött, az egyenlítő környékén alakulnak ki, és az úgynevezett légköri elektromos áramkör (Rycroft et. al, 2008) működtetői. Azon

területeket, melyek zivatarmentesek, "szép idő" zónának hívják. A globális áramkör a földfelszín, és az ionoszféra között záródik. Az ionoszféra a légkör azon tartománya, amelyben az ionok és a szabad elektronok koncentrációja olyan mértékű, hogy az a rádióhullámok terjedését számottevően befolyásolja. Az ionoszférában pozitív töltésmező keletkezik, a földfelszínen pedig negatív. A kettő közötti elektromos térerősség vektor (E), a földfelületre lényegében merőleges, és lefelé irányul. Negatív értékű, mivel ellentétes a fölfelé mutató z koordinátával. Ennek megfelelően a szép idő területen a pozitív töltések lefelé, míg a negatív töltések fölfelé mozdulnak el (21. ábra).



21. ábra: Légköri elektromos áramkör (Ács, 2011)

A zivataros területeken különböző időskálájú, a fentivel ellentétes irányú töltésszállító folyamatok zajlanak. A zivatarok tehát a légköri elektromos áramkör fenntartói.

5. A VÖRÖS LIDÉRCEK

5.1. A felsőlégköri kisülések

Már 120 évvel a vörös lidércek felfedezése előtt készültek irodalmi feljegyzések a zivatarfelhők felett észlelt, titokzatos fényjelenségekről. Két szemtanú MacKenzie és Toynbee 1886-ban, vélhetően egy óriás nyalábot figyeltek meg (Füllekrug, 2006, Chapter 2). Számos más beszámoló is létezik ezekről a gyors lefolyású, magaslégköri felvillanásokról. Kézzel

fogható bizonyítékok hiányában, ezek a jelenségek nem kaptak nagy figyelmet a tudományban. 1989. július 6-án, Észak Amerikában a Minnesotai Egyetemen John Winckler, és két tudóstársa Robert Franz és Robert Nemzek, minden kétséget kizáróan megörökítettek egy ilyen jelenséget (Franz et. al., 1990). Egy távoli mezoskálájú, konvektív rendszer (MKR) zivatarfelhője felett véletlenül fényképeztek le egy felsőlégköri kisülést, amit ma már vörös lidérc (red sprite) néven ismerünk (22. ábra). A meteorológiai értelemben vett felsőlégkör, az atmoszférának, a tropopauzától, az ionoszféra aljáig terjedő (kb. 20–90 km közötti) magasságtartománya. Később a NASA is felfigyelt arra, hogy ugyanazokat a típusú kamerákat használják az űrszondákon a zivatarok fényképezésére, mint amilyennel Winckler is rögzítette a lidércet. Előkeresték a 1989–1991 között készített felvételeiket, és 18 olyan eseményt találtak, amit lidérceknek véltek. 1993. július 7-én Fort Collinsnál, Colorado térségében, pár óra alatt, közel 250 esetet sikerült detektálni egy mezoskálájú konvektív komplexum (MKK) felett. Egy évvel később az Alaszkai Egyetemnek sikerült elkészítenie az első színes fényképet egy vörös lidércről, és egy kék nyalábról (Füllekrug, 2006).



22. ábra: Winckler és társai által fényképezett 1989-es vörös lidérc (Barta, 2011)

A következő évtizedekben a vörös lidérchez hasonló, számos más felsőlégköri kisülést (angolul Transient Luminous Events: TLE) is sikerült regisztrálniuk a kutatóknak. Például 1990-ben a gyűrűlidérceket, 1994-ben a kék nyalábokat, 2000-ben a törpéket. A 23. ábrán ezek a kisülések láthatók az atmoszférában.



23. ábra: A felsőlégköri kisülések eddig ismert típusai, megjelenésük, magasságuk, illetve átmérőjük nagysága szerint. a) közönséges felfele irányuló villámkisülés (upward flash); b) felfelé irányuló óriás kisülés (upward superbolt); c) vörös lidérc (red sprite); d) lidércudvar (sprite halo); e) gyűrűlidérc (ELVES); f) kis kék nyaláb (blue starter); g) kék nyaláb (blue jet); h) óriás nyaláb (gigantic jet); i) törpe (gnome); j) tündérkék (pixies); k) TROLL; l) pálma lidércek (palm trees). Ezekről bővebb beszámoló a függelékben található (Bór, 2010).

Ezek a felsőlégköri kisülések, csak heves zivatartevékenység esetén jelentkeznek. Többségük szabad szemmel szinte megfigyelhetetlen, nagyon rövid élettartamuk miatt (egyes FEOMEK optikai élettartama 1 milliszekundumnál is rövidebb). A FEOEM-ek egy része a troposzférában bekövetkező + CG hatására keletkezik. Műholdas képek azt mutatják, hogy a negatív villámokhoz társuló felsőlégköri kisülések inkább sós vízréteg felett keletkeznek, ugyanis itt a negatív CG-k jóval impulzívabbak, mint a szárazföld felett. A szárazföld felett, csak egyes zivatarcellák képeznek lidérceket, és ezek sem fordulnak elő a zivatarfelhő fejlődésének minden szakaszában. (Lyons et. al., 2006b)

5.2. Vörös lidércek kialakulása és tulajdonságaik (Red Sprites)

A leggyakrabban megfigyelt felsőlégköri kisülési típus a vörös lidérc. A jelenséget először John Winckler és két tudós társa Robert Franz és Robert Nemzek igazolta hiteles felvételekkel 1989. július 6-án Észak Amerikában a Minnesotai Egyetemen (Franz et. al, 1990). A vörös lidércek főként 50-80 km-es magasságtartományban figyelhetők meg. Ennél a kisülési formánál fontos a villám polaritása. Javarészt pozitív CG villám szükséges (de ritka esetekben a negatív CG és felhővillám (CC/IC) is előidézheti) (Bór, 2010). Az 1994–1995-ös amerikai felsőlégköri megfigyelési kampány során, kimutatták a korrelációt a pozitív CG villámok, és a lidércek keletkezése között (Füllekrug, 2006, Chapter 2). Egy pozitív CG villám lecsapása után a felhőben maradó negatív töltések, és a szabad töltésekkel rendelkező ionoszféra között, létrejön egy kvázi-stacionárius elektromos tér. Ez a tér felgyorsítja a szabad elektronokat, amelyek az ionoszféra alatt tartózkodnak (24. ábra). A felgyorsult elektronok összeütköznek a felső légkörben tartózkodó molekulákkal (főként a nitrogénnel), és ezen ütközések miatt ezek a molekulák gerjesztődnek, és fényt bocsátanak ki, amíg visszatérnek az alapállapotukba. Ez adja a lidérc vörös színét. A lidércek lefelé, és felfelé is terjedhetnek. Extrém esetekben egészen a felhőtetőig is leérhetnek. Lehetnek egyedülállóak, de csoportosan is jelentkezhetnek. Az utóbbi esetben a csoport átmérője, akár 50 km is lehet. Több formát is felvehetnek (fa, medúza, stb.), de leggyakrabban oszlop formájúak. Élettartamuk összességében néhány századmásodperc, ezért legjobban speciális kamerákkal figyelhetők meg.



24. ábra: Az a) képen a zivatarfelhőben lévő töltések helyzete, a b) ábrán egy +CG villám utáni állapot, míg a c) ábrán a töltés újrarendeződés utáni kvázistacionárius elektromos tér látható. (Bór- és Barta, 2010)

A vörös lidércek szárazföld feletti aktív zivataros területeknél fordulnak elő a leggyakrabban, de kialakulhatnak tengerek és óceánok felett is, ahol akár negatív CG is előidézheti őket (Chen et. al., 2008; Hsu et. al., 2009). Általában néhány tucat lidérc keletkezhet egy adott vihar esetében, azonban lehetnek olyan extrém viharok, melyekben akár 400–750 lidérc is feltűnhet 4–5 órás időszakban (Barta, 2011). A vörös lidércekhez társulhatnak még másodlagos elektrooptikai emissziók, az úgynevezett TROLL-ok (25. ábra).



25. ábra: Vörös lidérc és a TROLL. A képeken jól látszik a lidérc alsó nyúlványán felfelé haladó fényes jelenség (lila nyilak mutatják) (Barta, 2011).

2012 áprilisában a NASA-nak sikerült az űrből látványos színes képet készítenie, egy zivatarfelhő felett megjelenő, vörös lidércről (26. ábra)



26. ábra: A NASA által készített vörös lidérc a fénylő zivatarfelhő felett (http://earthobservatory.nasa.gov)

6. A VÖRÖS LIDÉRCEKET KELTŐ ZIVATAROK TULAJDONSÁGAI (Kutatási Előzmények)

Ebben a fejezetben bemutatom azokat a zivatarjellemzőket, amelyeket más kutatók is vizsgáltak a vörös lidércek keletkezésével kapcsolatban. A TLE kisülések területi sűrűsége valamelyest követi a globális villám eloszlás területi képét (27. ábra) (Füllekrug et. al., 2006).



27. ábra: Globális villámeloszlás (http://upload.wikimedia.org). Itt látható a venezuelai és kongói maximum.

6.1. Vörös lidérceket kiváltható konvektív rendszerek

A világon mindenütt megjelenhetnek felsőlégköri kisülések, kivéve az Antarktiszon (Lyons et. al., 2006a). Lidérceket csak néhány konvektív jelenség idéz elő:

 1) stratiform felhőréteg: azok a konvektív felhőzetek, melyekben a vertikális mozgás eléri az 5 és 10 m/s közötti értéket, továbbá a néhány kilométer vastagságú, vegyes fázisú réteg hőmérséklete –10 és –40°C közötti, ott keletkezhet villám, és felsőlégköri kisülés (Lyons et. al., 2006a).

2) Multicellás zivatarok (cumolonimbusok): ezek átlagos terjedelme 10 és 100 km közötti, élettartamuk nem hosszú. Produkálnak ugyan CC és CG villámokat, de ezek nem érik el azt az erősséget, hogy felsőlégköri kisüléseket indukáljanak. Ezért csak ritka esetekben képeznek vörös lidérceket (Lyons et. al., 2006a).

3) Szupercellás zivatarok: erős +CG villámok ugyan megjelennek, de mégis kevés lidérc fedezhető fel a szupercella felett. Ezek is inkább jellemzően a cella haldokló fázisában mutatkoznak, amikor a sztratiform felhőréteg eléri, az 5 és 10 ezer km² közötti területet. Ritkán azonban képes, az érett fázisban is produkálni lidérceket (Lyons et. al., 2006a). Külön szupercellás lidérceket vizsgáltak a STEPS (Severe Thunderstorm Electrification and Precipitation Study = Veszélyes zivatarok elektromosság és csapadék vizsgálata) program keretében. Két szupercellát figyeltek meg, az elsőt 2000. június 29–30-án, amikor egy nagy MKR szupercellával alakult Kansas felett, és 18 lidércet produkált. Mindegyik lidérckeltő villám, a sztratiform régióban helyezkedett el (Lyons et. al., 2008). A +CG villámok erősségének átlaga 42 kA. A második eset az volt, amikor a 2000. június 25-i szupercella haldokló fázisában jelentek meg a lidércek. A vizsgálat 02:00 és 05:30 UTC között zajlott. 03:00 és04:00 UTC között regisztráltak 3 lidércet, majd két lidércet a zivatar legvégén. Az utolsó két lidércet, melyek a sztratiform régióban keletkeztek egy nagyon erős 112 kA-es +CG villám váltotta ki, míg az első hármat egy ennél jóval gyengébb (Lyons et. al., 2008).

4) Squall Line: ha a folytonos felhőzóna mérete eléri a 20.000 km²-t, akkor a lidércek megjelenése gyakori (Lyons et. al., 2006a).

5) MKR és MKK: ezeknek két típusát különítették el. Először a közepes szélességeken előforduló rendszereket mutatom be. Itt a nagy sztratiform régió felett, gyakoriak a lidérc jelenségek. Minél intenzívebb a rendszer, annál gyakoribb a lidércek megjelenésének valószínűsége. Ezek a rendszerek rendszerint este érik el érett fázisukat. A nagy MKK–ek a világ legnagyobb lidérc gyártói (Lyons et. al., 2006a). Ezen rendszerek trópusi változata kicsit

más. Itt a –CG villámok is keltenek lidérceket, ugyanis ezek áramerőssége a vízfelszín felett nagyobb, mint a szárazföld felett (Lyons et. al., 2006a).

6) Trópusi ciklonok: a hurrikánok és tájfunok jellemzően nem generálnak lidérceket. Előfordul, hogy a rendszer örvénylő kar részében, ahol a villámlás gyakoribb, mint a szem felé, keletkeznek lidércek, vagy a szem körül kialakult szupercella generál lidérceket. Összességében elmondható, hogy ritka esetben idéznek elő vörös lidérceket.

7) Téli monszun: a hideg kontinentális levegő beáramlik a meleg tenger fölé, és ez kedvez az erős nedves konvekcióhoz. Itt keletkeznek erős +CG villámok. Lidérceket figyeltek meg Japán (Fukunishi et. al., 1999), a Golf áramlat (Price et. al., 2002) illetve, a Nagy Tavak és más nyitott vízfelületek felett, ahova extrém hideg levegő áramolhat be.

Összességében látható, hogy a legtöbb vörös lidércet a MKR és az MKK rendszerek sztratiform régiója hozza létre (Lyons et. al., 2006a).

6.2. A radarintenzitás kapcsolata a vörös lidércekkel

Több lidércvizsgálat során is kimutatták, hogy a lidércek a gyengébb reflektivitású sztratiform régiókban keletkeznek. Savtchenko et. al. (2009) két MKR felett figyelt meg lidérceket. 2005-ben kimutatta, hogy fél órával a lidérckeletkezés előtt a radarintnezitás értéke 65 dBZ körüli volt. Az érték a lidércek keletkezésének idejére 55 dBZ-re esett vissza. Ez időben egy sztratiform felhőzet is kialakult, 30 és 40 dBZ közötti radarintenzitással. A másik megfigyelését 2006-ban tette. Itt a lidérckeletkezés idejében a radarintenzitás nem haladta meg a 35 dBZ-t. Hasonló eredményre jutott Lyons et. al. (2009). Szintén egy MKR felett figyelt meg lidérceket, és ezek is a sztratiform régió felett keletkeztek, 20 és 45 közötti dBZ érték mellett. Lyons et. al. (2006b) leírta, hogy a lidérckeltésnél tapasztalt radarintenzitások 25 és 45 dBZ közöttiek.

6.3. A felhőtető hőmérséklet és a vörös lidércek kapcsolata

Többen megvizsgálták még a felhőtető hőmérsékleteket. Ganot et. al. (2006), négy téli zivatart figyelt meg Izraelből. Összesen 40 felsőlégköri kisülést regisztrált és ezeknél a felhőtető hőmérséklet –36°C és –43°C között volt. A leghidegebb felhőtető esetében keletkezett a legtöbb, míg a legmelegebb felhőtető esetében a legkevesebb lidérc. Lyons et. el. (2006b) szerint lidérc ott jelenhet meg, ahol a felhőtető hőmérséklet átlagosan –65°C. A –55°C-nál melegebb értékek tartományában már nemigen jelentkeznek lidércek. Így a

következő kritériumot adta: legalább –50°C és –55°C kell a lidérckeletkezéshez. Ez első pillantásra ellentmondásos Ganot et. al. (2006) fentebb leírt megfigyelésével, valójában azonban a nyári kontinentális, és a téli mediterrán időszakban előforduló lidércek megjelenését kiváltani képes zivatarok jellemzőinek különbségére mutat rá. Mind Yair et. al. (2009) és Savtchenko et. al. (2009) megfigyelése, a felhőtető hőmérséklettel kapcsolatban, a Lyons et. al. (2006b) által felállított kritériuma alá esik. Yair et. al. (2009) két téli zivatar felett összesen 56 db. lidércet regisztrált. A felhőtető hőmérséklet –36°C és –61,5°C fok között mozgott, és amikor a két legtöbb lidércet (17db. és 16db.) regisztrálta akkor –43°C és – 45°C közötti értéket kapott. Savtchenko et. al. (2009) fentebb említett két MKR felett regisztrált lidérceinél a felhőtető hőmérséklet –45°C és –55°C közötti érték volt, a lidércek keletkezésének helyénél, a konvektív régiónál pedig –60°C. A második téli zivatarnál a lidércek idejében a felhőtető hőmérséklet –40°C és –50°C között alakult. Ez mind jóval alacsonyabb, mint a Lyons et. al. (2006b) által felállított értékek.

6.4. A felhőtető magasság és a vörös lidércek kapcsolata

Ganot et. al. (2006) megvizsgálta a felhőtető hőmérsékleteket is. Azt tapasztalta, hogy a legtöbb lidérc (17db.) akkor keletkezett, amikor a felhőtető magassága 8–9 km között alakult, amikor a legkevesebb lidérc keletkezett (2db.) akkor ~7,5km volt. Az összes lidérc vizsgálatát tekintve, a felhőtető magassága 6,8 és 9 km között alakult.

6.5. A vörös lidércek és a villámok kapcsolata

Ganot et. al. (2006) vizsgálata során a lidércek 87%-át +CG váltotta ki. Knutsson (2004) a –CG és +CG villám gyakoriságot ábrázolta az idő függvényében, és bejelölte rajta a lidércek keletkezésének idejét. Összesen 13 db. vörös lidércet figyelt meg. Ő is hasonló eredményre jutott, mint Ganot et. al. (2006). Ennek ábrái alább láthatók.



28. ábra: A felső ábrán a -CG villámok száma látható, az alsó ábrán pedig a +CG villámok százalékos aránya. A piros x–ek minden esetben a lidércek keletkezésének idejét jelölik.

Látható, hogy a lidércek akkor keletkeztek leginkább, amikor a –CG villámok száma csökken, és a +CG villámok száma növekszik. Lyons et. al. (2006b) arra a következtetésre jutott, hogy a lidércek keletkezéséhez a villám erősségének 60 +/– 35 kA-nek kell lennie. Makela et. al. (2010) ennek ellenkezőjét tapasztalta, mérésénél a lidércet egy gyenge áramerősségű –9,2 kA-es –CG váltotta ki. Ebből arra következtetett, hogy a lidércek keletkezéséhez nem feltétlenül szükségszerű az erős áramerősségű +CG villám. Pinto et. al. (2004) brazíliai mérése során 18 esetet regisztrált, hat zivatar során. Ezek mindegyike 26 és

150 kA közötti áramerősségű villámoktól származtak. Összesen négy esetnél volt az áramerősség 100 kA felett. Átlagosan, a lidércek keletkezésének idején, a +CG villámok áramerőssége 21 és 68 kA között alakult. A lidérceket keltő villámok áramerőssége 27 és 146 kA közötti volt. Savtchenko et. al. (2009) két vizsgált zivataránál azt detektálta, hogy a zivatarok során keletkezett legerősebb áramerősségű + CG (152 kA és 248 kA) és legerősebb áramerősségű –CG (–122 kA és –150 kA) villámok nem akkor keletkeztek, amikor a lidércek. A lidérceket keltő +CG villámok áramerősségének átlaga a két zivatarra 56 kA és 26 kA volt.

7. FELHASZNÁLT ADATOK

A vizsgálatomhoz felhasznált adataim egy részét az Országos Meteorológiai Szolgálattól kaptam. Ezek: műholddal detektált felhőtető magasság és felhőtető hőmérséklet, illetve radarral regisztrált radarintenzitás, bináris fájlokban és HAWK rendszerből kinyert képekben. A villámok adatait a LINET szolgáltatta txt-formátumban. Ezek részletes információk, a zivatarok alatt regisztrált villámokról. Sorrendben: dátum (ÉÉÉÉ.HH.NN), időpont UTC-ben (HH:MM:SS. tört másodperc), földrajzi szélesség (fok), földrajzi hosszúság (fok), forrás magassága (km), típus (1:CG, 2: CC, 0: nem meghatározott), becsült maximális áramerősség előjelesen (kA, az előjel megadja a villám polaritását), és a meghatározott földrajzi hely pontossága (km).

Az adatok kiértékelését Fortran nyelven írt, saját programokkal, valamint MS Excel segítségével végezetem el, 15 perces időfelbontással. Segítségemre volt a kamerák látószöge, melyekkel a lidérceket keltő zivatarokat tudtam azonosítani. Az egyik kamera Sopronban (47.6837N, 16.5830E, 234m m.s.l.) helyezkedik el (29. ábra) típusa Watec 902H2 Ultimate. Az alkalmazott Computar optika főkusztávolsága (8mm), meghatározza a kép látószögét, ami jelen esetben kb. 45 fok vízszintesen, és kb. 34 fok vertikálisan. Az objektív f/0.8-as, azaz jó fénygyűjtő képességű. A felsőlégkörben bekövetkező felvillanásokat regisztráló szoftvert típusa, UFO Capture. Ez egy eseményvezérelt rögzítő program. Eseménynek tekinti, ha egy beállított számnál (Sopronban ez 15) több pixel egyszerre felfényesedik, vagy ha kevesebb pixel fényesedik fel, de ezek fényessége legalább két további képkockáig fennmarad. Felfényesedésnek az esemény nélküli átlagos fényességszint 105%-át meghaladó fényességnövekedés számít (soproni beállítás). A felvett események időpontját GPS alapú, felvételen rögzített időjelek segítségével lehet megállapítani. Ha ez az időjel nem áll rendelkezésre, a PC rendszeridejét lehet erre a célra használni. A villámokról az információt a

LINET (Nowcast GmbH) származtatja. Az eredményül kapott videó 720x576 pixeles felbontású, tömörítetlen avi-formátumú.



29. ábra: A soproni kamera

A másik kamera Nydekben, Csehországban (49.6682N, 18.7692E, 482m m.s.l.) helyezkedik el (30. ábra). A rendszer a sopronihoz nagyon hasonló. A kamera és a rögzítőszoftver is ugyanaz, és az objektív is hasonló tulajdonságú, látószöge pedig teljesen azonos a sopronival. Ebben a rendszerben nincs GPS időinformációt szolgáltató eszköz, így a felvételek PC rendszerideje ismert, amelynek a pontossága egy internetes időszerverrel való szinkronizálásnak köszönhetően, néhány másodpercen belüli. A villáminformációt a CELDN (EUCLID) szolgáltatja. Az eseményekről rögzített videó formátuma itt is 720x576 pixel felbontású, tömörítetlen avi-formátumú.



30. ábra: A nydeki kamera helye
Az OMSZ-tól kapott radar és műhold képek 250 sorból és 400 oszlopból állnak. Itt egy rácspont 1 byte-nak felel meg, értéke 0–255 között változhat. A radar földrajzi koordinátáit a következő képletekkel számoltam:

$$NROW = \frac{\frac{11901,8 * tg\left(\frac{90^{\circ} - \varphi}{2}\right)}{\sqrt{1 + tg^{2}(\lambda - 18^{\circ})}} - 4688,2}{2} + 151,5$$

$$NCOL = \frac{\frac{11901,8 * tg\left(\frac{90^{\circ} - \varphi}{2}\right)}{\sqrt{1 + tg^{2}(\lambda - 18^{\circ})}} * tg(\lambda - 18^{\circ})}{2} + 151,5$$

Az NROW a sor, az NCOL pedig az oszlop száma. Az α a földrajzi hosszúságokat a φ pedig a földrajzi szélességeket jelöli. A számozás a kép bal felső sarkából indul, ennek koordinátái α =14,04° és φ =49,54°. A rácstávolság 2 km.

Az OMSZ-ban 2000-től kezdődően fokozatosan lecserélték az MRL–5 radarokat, EEC gyártmányú 5 cm-es hullámhosszon működő C sávú Doppler, duál–polarizációs DWSR radarokra. A korszerűsítés 2004-ben fejeződött be. Az országos radar kompozit kép elkészítéséhez, a mérések egy 240 km sugarú méréstartományban folynak, 9 magassági szöggel, 15 perces mérési ciklusokban. (Dombai, 2009). Az OMSZ–ban kétféle pályájú meteorológiai műhold adatait használják fel. Az egyik egy geostacionárius pályájú METEOSAT, melyet egy európai szervezet az EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites – Meteorológiai Műholdak Hasznosításának Európai Szervezete) működtet. A másik pályatípus úgynevezett kvázipoláris. Ilyen pályájú MetOp és NOAA műholdak adatait dolgozzák fel. A NOAA műholdakat az Amerikai Egyesült Államok a MetOp-ot pedig szintén az EUMETSAT működteti. Az időjárás megfigyelése szempontjából a METEOSAT műholdak fontosabbak, mert időben sűrű (15, illetve 5 perces) képeket készítenek, ezért segítségükkel igen jól nyomon követhető a felhőalakzatok mozgása.

A jelenlegi második generációs METEOSAT-on (MSG) elhelyezett SEVIRI leképező műszer az egyik legfejlettebb geostacionárius műhold, amely 1–3 km-es felbontásban, és 12 spektrális sávban készít képeket. A nyers adatokat automatikus programok (kalibrálás, európai terület kivágása, konvertálások, stb.) rendszere alakítja át, és több helyre továbbítja, ahol képként jelennek meg: az OMSZ nyilvános és belső portálján, illetve a *HAWK* (Hungarian Advanced Workstation) rendszerben. A HAWK egy olyan megjelenítő szoftver, amely többféle meteorológiai adat együttes megjelenítésére képes. Elsősorban az időjárás előrejelzéshez használják. A MetOp és a NOAA műholdak AVHRR leképező berendezése egy-egy adott területről csak naponta kétszer készít képet, jó területi felbontással (valamennyi sávban ~1 km). A MetOp és a NOAA műholdakon szondázó berendezések is működnek, melyek fő célja a magassági adatok előállítása: a légköri hőmérséklet és vízgőz koncentrációjának háromdimenziós eloszlása, valamint egyéb nyomgázoknak a vertikálisan integrált összmennyiség horizontális eloszlása (OMSZ, www.met.hu).

8. AZ ELEMZÉS MÓDSZERE

8.1. A területek kiválasztásának stratégiája

A terület kiválasztásánál az alábbi tényezők játszottak fontos szerepet: a lidérckeltés tekintetében optikailag megfigyelt zivatar, a kamera látószöge alapján, a LINET villámtérképek, és a HAWK radartérképek. Megnéztem, hogy a radartérképeken milyen irányba mozog a zivatar, és ezt hasonlítottam a LINET térképen látott villámokhoz. Fontos szempontot játszott, hogy a vizsgálat teljes idején, a vizsgált területek lefedjék az egész zivatarrendszert. Volt olyan eset, ahol több kijelölt területet is alkalmazni kellett ahhoz, hogy a zivatart végig tudjam követni. Ilyen például a 2012-es eset, ahol a zivatar dél–nyugat irányból, észak-kelet irányba vonult végig Magyarországon. Néhány esetben ketté kellett bontanom a zivatarrendszert, mert a radar és villámtérképeken, jól elkülöníthető, két intenzív régió volt megfigyelhető (ilyen eset volt például a 2007-es és a 2010-es). Sajnos, nem minden zivatar tartózkodott a kamera látószögén belül. Így lehetett olyan eset, hogy keletkeztek lidércek, de a kamera már nem látta, vagy működött a kamera, és a zivatar benne volt a látószögben, de a láthatósági viszonyok annyira rosszak voltak, hogy ha keletkezett is lidérc, azt nem látta. Ilyen pl. a 2012-es eset, ahol a megfigyelési pont fölé húzódó felhőzet, egy idő

után lehetetlenné tette a megfigyelést. A 2011-es zivatar viszont túlnyomórészt a kamera látószögön belül maradt az egész vizsgálat során.

8.2. Az eljáráskor felhasznált programok

Az adatok kiértékelésében Fortran nyelven írt saját programokat használtam. Ezeket Putty terminál hozzáférésen keresztül, LINUX operációs rendszer alatt írtam, a nimbus.elte.hu felületén. A kinyert eredményeket Microsoft Excel programban ábrázoltam. Segítségemre volt még az ábraszerkesztésben az Adobe Photoshop Elements, illetve a Paint is.

9.EREDMÉNYEK

9.1. Elemzett zivatarok bemutatása

Négy zivatart vizsgáltam meg. Ebből kettő zivatarnál két külön régióra bontottam a vizsgált területet, ezáltal végeredményben hat analízis található. Ebből egy olyan eset fordul elő, ahol nem volt lidércészlelés. A vizsgálatom abból állt, hogy kijelöltem az időben egy kezdőpontot, ahonnan az elemzést indítottam, illetve egy végpontot ameddig ez tartott. Ezeket aszerint választottam ki, hogy a zivatar mikor lépett be hazánkba, vagy lépett ki onnan, mennyire volt benne a látószögben, a radarképek alapján mikor erősödött fel, vagy gyengült el teljesen, illetve a lidércvizsgálatok időtartama mikor kezdődött. Fontos szerepet játszott még a záró időpont kiválasztásában, hogy meddig álltak rendelkezésre az adatok, amelyeket vizsgáltam. Például volt olyan eset, amikor az optikai detektálás ~05:00 UTC-ig tartott (a továbbiakban is az idő mindenütt UTC-ben értetendő), de a legtöbb adatom csak~02:00 UTC-ig volt meg. Mivel a felhőtető hőmérséklet, felhőtető magasság és a radarintenzitás 15 perces bontásban volt meg, ezért az időbeosztásom a diagramokon is 15 perces. A zivatarokat dátum szerint, csökkenő sorrendben mutatom be.

9.2. A 2012. június 09-10 zivatar

A zivatar kialakulását egy lassan mozgó hidegfront, és az azon megjelenő hullám okozta. A front több konvergencia vonalra szakadt fel. A 700 hPa-os szinten erős, 15 m/s

sebességgel nedvesség beáramlás zajlott, az 500 hPa-on 25 m/s körüli viharos széllel, hideg levegő áramlott az ország déli része fölé (met.hu). Az alsó meleg beáramlás, és a magassági hidegáramlás együttesen rendkívül labilissá tette a légkört. Az erős magassági szél okozta szélnyírás, illetve a szélfordulás kedvezett a miniatűr ciklonként örvénylő, és órákon keresztül fennmaradó szupercellák kialakulásához. A lassú mozgású hidegfront hosszan fenntartotta a talajközeli összeáramlást (konvergenciát) és a zivatarcellák e konvergencia vonalakban mozogva, bőségesen juthattak a fennmaradásukhoz szükséges meleg, nedves levegőhöz. Az első markáns zivatarcellák Horvátországban alakultak ki (31. ábra). Az alábbi kép a kifejlődött szupercellát mutatja Magyarország felett.



31. ábra: A szupercella jellegzetes csúccsal rendelkező műholdképe 18:50 UTC (met.hu)

Az OMSZ kompozit radarképe szerint a szupercella állapotban lévő zivatar 18:50-kor érte el az országhatárt. A legerősebb cella a vonalba rendeződött zivatartól elkülönülve 21:30-kor érte el a Duna vonalát (32. ábra)



32. ábra: Baloldalt: a 18:50-es radarkép, jobboldalt: a 21:30 radarkép. Az utóbbin jól kivehető a szupercella jellegzetes, kampós radarkép alakja (met.hu).

A lidércmegfigyelés egy időintervallumban zajlott. A kamera Nydekben, Csehországban helyezkedett el. Látószöge 205,5 (+/– 20) fok azimut. A megfigyelés naplementétől (kb. 18:52 UTC) 23:29 UTC-ig tartott. Nyolc lidérc eseményt regisztráltak a következő időpontokban:

20:39:18 UTC-s vörös lidérc kacsokkal,

21:29:24 UTC-s vörös lidérc kacsokkal,

21:09:50 UTC-s vörös lidérc,

21:12:18 UTC-s vörös lidérc,

21:15:39 UTC-s vörös lidérc kacsokkal,

21:19:23 UTC-s két vörös lidérc esemény sorozatosan,

21:25:30 UTC-s két vörös lidérc esemény sorozatosan,

21:29:03 UTC-s két vörös lidérc esemény sorozatosan, kacsokkal.

Vizsgálatom a fekete négyzettel jelzett területekre vonatkozik. Öt területet különítettem el, a vihar vonulását követve. Ebből hármat a 33. ábra mutat be. A kiválasztott területeket a kamera látószöge, mely a két piros vonal közötti terület, a villámtérképek, radarképek és a műholdképek alapján helyeztem el. Az elemzést 19.25-tól kezdtem, amikor a délen átvonuló szupercella már átlépte a Dunát, így nem zavar bele a vizsgálatba. A 33. ábrán látható is, hogy már javában tombolt a zivatar. Az öt terület koordinátái, és időintervallumai a következők:

19:30–20:30, koordinátái: 15–18,4°E; 44,5–48,5°N,

20:30–21:30, koordinátái: 15–19,4°E; 45–48,5°N,

21:30-22:30, koordinátái: 16,6-20,3°E; 45,5-48,8°N,

22:30-23:30, koordinátái: 17,5-21°E; 46-49,2°N,

23:30-00:30, koordinátái: 19,3-22°E, 46-48,8°N.

A 33. ábrán mutatom be a LINET és radarképeken kijelölt területet és látószöget:





33. ábra: Baloldalt: a LINET villámtérképeken ábrázolt kamera látószöge pirossal, feketével a vizsgált terület. Jobboldalt: ugyanezek fehérrel a radarképeken. Ahol már nem volt detektálás, ott nem tűntettem fel a látószöget.

A vizsgált területek összes villámszáma 19:25–0:25 között 20663 db. A következő 34. ábra a felhő–felhő (CC) villámok. és a felhő föld (CG) villámok számának időbeli változását mutatja. A vonal a kamera működésének időszakát jelöli. A fekete része azt jelzi, ahol a zivatar teljesen benne van a látószögben, a zöld pedig azt, ahol már csak egy része van a látószögben. Megfigyelhető, hogy a legtöbb lidérc akkor keletkezett, amikor a CG villámok száma megint kicsit megnőtt. Itt elkülönítettem a lidércek keletkezésének időszakát a detektálási időszaktól, mert a lidércek nem oszlanak el egyenletesen a detektálási időszakban úgy, mint pl. a következő 2011-es esetben, ahol a lidércidőszak és a detektálási időszak



34. ábra: A CC és CG villámok időbeli alakulása. A piros pontok a lidércek megjelenésének idejét jelölik.

Először a lidércintervallumra vonatkozó villámkarakterisztikákat írom le. Ez az időszak kb. 20:40–21:40 közé tehető. Ezen időtartomány alatt a vizsgált zivatar nagy része még a kamera látószögén belül található. A lidércesemények főként az erős +CG villámláshoz kapcsolhatóak. A lidércintervallumban a legerősebb +CG villám áramerőssége +109,2 kA. A 15 perces időszakonként legerősebb +CG villámok áramerősségének átlaga pedig +93,3 kA. A –CG villámokat tekintve a legerősebb a lidércidőszakban –156,3 kA volt, a legerősebb értékek áremerősségének átlaga pedig –122,42 kA.

A detektálási időben 19:40–23:30-ig (a kamera működésének ideje) a legerősebb +CG villámok erősségének átlaga +85,89 kA, és a legerősebb villám pedig +128,2 kA. A legerősebb –CG villámok átlaga erre az időszakra –121,35 kA, és a legerősebb villám pedig – 221,3 kA. A detektálási időszakon kívüli tartományra a legerősebb +CG villám +179,1 kA (mely a teljes időintervallumra is a legnagyobb), a legerősebb +CG villámok átlaga pedig +99,85 kA. A legerősebb –CG ebben az időszakban –125,1 kA, és ezen értékek átlaga pedig –85,57 kA. A következő ábrán bemutatom a pozitív és negatív CG villámok számbeli változását az idő függvényében (35. ábra). Megfigyelhető, hogy a lidércek akkor keletkeztek, amikor mind a pozitív mind a negatív villámok száma újra megemelkedett.



35. ábra: A +/–CG villámok számának időbeli változása. A piros pöttyök a lidércek megjelenésének idejét jelölik.

Lidérckeletkezéskor megvizsgáltam a zivatar más meteorológiai paramétereit is, nevezetesen a műholddal detektált felhőtető hőmérséklet, és felhőtető magasság értékeit, valamint a radarintenzitás értékeket. Ezeket a paramétereket is a fentebb említett fekete négyzet által körülvett területen belül vizsgáltam, és az idő függvényében az előbb leírt három csoportba osztottam.

A lidércidőszakban a felhőtető hőmérséklet átlagolt értékeinek átlaga –46,4°C, a leghidegebb érték pedig –66°C. A detektálási időt tekintve az átlagolt értékek átlaga –47°C és a leghidegebb felhőtető hőmérséklet –66°C, illetve a leghidegebb értékek átlaga –64°C.

A detektálási időszakon kívül az átlagolt értékek átlaga –48,48°C, a leghidegebb felhőtető –66°C, és a leghidegebb felhőtetők hőmérsékletének átlaga pedig –63,75°C. A felhőtető hőmérsékletnél (36. ábra) látható, hogy az átlagolt értékek időbeli változása 22:25 és 22:40 között veszi fel globális maximumát, ami –52,2°C. Megfigyelhető, hogy a lidércek keletkezésének időpontjaiban a felhőtető hőmérséklet átlagolt értékei soha nem emelkednek –43°C fölé.



36. ábra: A felhőtető hőmérsékletek időbeli változása, a piros pontok a lidércek keletkezésének időpontjait jelölik.

A felhőtető hőmérséklet minimum értéke –66°C körüli, ezt 00:10 és 00:25 között veszi fel. Elmondható, hogy a lidérckeletkezés időintervallumában a felhőtető hőmérséklet minimuma –66°C, vagyis a vihar teljes idejéhez viszonyítva az egyik leghidegebb érték. Ebből feltételezhető, hogy a felhőtető magasság is ilyenkor volt az egyik legnagyobb. Ez megfigyelhető a következő ábrán (37. ábra).



37. ábra: A felhőtető magasság időbeli változása, a piros pontok a lidércek keletkezésének időpontjait jelölik

A lidérckeletkezés időszakában az 15 perces időszakokban kapott átlagos felhőtető hőmérsékletek közös átlaga 9,6 km. A detektálási időben ugyanez 9,83 km. A detektálási idő után az átlagolt értékek átlaga 10,25 km. A legmagasabb felhőtető érték ugyanakkor a teljes vizsgált időszakban 12,2 km volt.

A radarintenzitás maximális értékei a lidércidőszak intervallumban soha nem kisebbek, mint 48 dBZ. A detektálás ideje alatt a radarintenzitás átlagolt értékeinek átlaga 21,56, a lidércek ideje alatt 22,34 dBZ és a detektálás után pedig 24,78 dBZ. A maximális értékek 48 és 48,5 dBZ között mozognak. Ezek átlaga a lidércek keletkezésének ideje alatt 48,1 dBZ. Az ekkor fotózott egyik lidérc a következő 38. ábrán figyelhető meg.



38. ábra: A 2012-es 21:09-kor fényképezett vörös lidérc

9.3. A 2011. június 07-08 zivatar

A zivatar kialakulását egy Szlovénia felöli heves, mezoskálájú konvektív rendszerbe beépülve érkező, Squall Line okozta, köszönve a több napja tartó hőségnek. Ez az észak–keleties mozgású rendszer, 20:15–20:30 UTC között érte el a keleti határt (39. ábra).

Dél–nyugat felől trópusi meleg levegőt szállított egy ciklon előoldalán. Megfigyelhető volt, egy erős, alacsony szintű konvergencia. A magasban megfigyelhető a jet, bal kilépő zónája okozta divergencia, és örvényességi advekció, mely a kialakult zivatarrendszer fő triggere. A labilitási értékek is megfelelőek voltak a rendszer kialakulásához. A labilitásra utaló LI index is 0 alatti értéket vett föl, ami zivatar kialakulását jósolja (–4, –6).



39. ábra: A 20:30-as radarkép, amikor a zivatarlánc eléri az országhatárt. A színek a dBZ értékeket jelölik, minél vörösebb annál intenzívebb a zivatar.

A lidércmegfigyelés egyetlen folytonos időintervallumban zajlott. A kamera Nydekban, Csehországban helyezkedett el. Látószöge 220,3 (+/– 20) fok azimut. A vörös lidérc észlelés 20:58–23:39 UTC-ig tartott, és 37 lidérceseményt regisztráltak. A lidércek ezen időintervallumban átlagosan 5 percenként fordultak elő. Három olyan esetet is regisztráltak, ahol egyszerre több lidérc is keletkezett.

Itt elegendőnek bizonyult egy kijelölt terület a vizsgálathoz, mert nem voltak más jelentős aktív zivatarcellák, amelyek indokolták a vizsgált terület korlátozását (40. ábra). Itt is a kamera látószöge, mely a két piros vonal közötti terület, a villámtérképek, radarképek és a műholdképek alapján tájoltam be a kiválasztott területet. A vizsgálatot 19:40-től kezdtem. Koordinátáit tekintve: 15–19°E, és 45–50°N. Ezt a következő ábrasorozat szemlélteti.



23:30-00:30

23:00



40. ábra: Baloldalt: a LINET képek, Jobboldalt: a radarkép, rajtuk a látószög és a kijelölt terület

A négyzetben a vizsgált időszak alatt (19:40–01:25) keletkező villámok száma 33514 db. A következő 41. ábrán a felhő–felhő (CC) villámok és a felhő föld (CG) villámok számának időbeli alakulása tekinthető meg.



41. ábra: A CC és CG villámok időbeli változása. A piros pontok a lidércek időpontjait jelölik, a fekete vonal a detektálási időt.

A 20:58–23:40 tartó időintervallumban, amikor a detektálás folyt (ez ebben az esetben megegyezik a lidércintervallummal is, mivel a lidércek kitöltötték az egész intervallumot) átlagosan 5 percenként keletkeztek lidércek. A 15 perces, időszakonkénti legerősebb villámok átlaga +106,17kA, a legerősebb +CG villám pedig +156,8 kA volt. A detektáláson kívüli időszakra a legerősebb +CG villámok áramerősségének átlaga +69,76 kA, és a legerősebb +CG pedig +103 kA. A –CG villámoknál a detektáláson kívüli időszakra a legerősebb negatív villámok átlagolva –117,75 kA, és a legerősebb –CG pedig –164 kA. A detektálás ideje alatt ez az átlag –123,88 kA, a legerősebb villám pedig ebben az időszakban –163,8 kA. A következő ábrán bemutatom a pozitív és negatív CG villámok számbeli változását az idő függvényében (42. ábra).



42. ábra: A +/–CG villámok számának időbeli változása. A piros pontok a lidércek keletkezésének időpontjait jelölik.

A további meteorológiai tényezőket is a fentebb leírt területen belül számoltam, és az idő függvényében ábrázoltam. A felhőtető hőmérsékletnél (43. ábra) látható, hogy az átlagolt értékek 21:25 és 21:40 között érik el a leghidegebb értéket, –50,5°C-ot, amely már a lidércek megjelenésekor fordult elő. A detektálás intervallumában a felhőtető hőmérséklet átlagának értéke, soha nem emelkedik –47,4°C fölé, és átlagolva ezen értékeket –48,8°C fokot kapunk. A detektáláson kívüli időszakra ezen átlagolt értékek átlaga –47,57°C.

A felhőtető hőmérsékletváltozását a 43. ábra mutatja.



43. ábra: A felhőtető hőmérséklet időbeli változása, a piros pontok a lidércek időpontjait jelölik

A minimum értékek 19:25 és 19:40 között érik el a leghidegebb állapotukat, ami –68°C, de ez még a detektálási időszak előtt következett be. A detektálási idő alatt a leghidegebb érték –67°C, a 15 perces időszakonként mért leghidegebb értékek átlaga pedig –65,6°C. A detektálási időszakon kívül ugyanez az átlag –64,75°C.

A felhőtető magasságának változását a következő ábra szemlélteti (44. ábra).



44. ábra: Az átlagos és a legnagyobb felhőtető magasságok időbeli változása. A piros pontok a lidércek keletkezésének időpontjait jelölik.

Ezen az ábrán is a kék vonal az átlagolt értékeket mutatja, míg a piros a maximum értékek időbeli változása. A kék vonal globális maximumát 21:10 és 21:25 között vette fel, amely 10,25 km. Ez már beleesik a lidércek keletkezésének idejébe. A detektálási időszakban

az átlagolt felhőtető magasság értékek átlaga 10,07 km, a detektálási időszakon kívül pedig 10,04 km.

A radarintenzitás 15 percenkénti maximális és átlagolt értékeinek átlaga a detektálási időszakban 48,5 dBZ, illetve 24,07dBZ. A detektálási időn kívül pedig e két érték 48,5 dBZ és 20,76 dBZ.

Néhány lidérc képe ebből a zivatarból (45. ábra).



45. ábra: A 2011-es lidércek közül néhány fényképen

9.4. A 2010. augusztus 12–13 zivatar

2010. augusztus 12-én tőlünk nyugatra, egy hosszan elnyúló, hullámzó frontzóna helyezkedett el, melynek előterében meleg, nedves, labilis levegő áramlott hazánk fölé déldélkelet felől. A dél felől érkező meleg nedves szállítószalag, kedvezett a zivatarok kialakulásához. A szignifikáns megjelenésű jet, egyik magassági szinten sem jelentkezett, ugyanakkor a szélsebesség 500 hPa-on 12–14 m/sec-os volt. A teknő előoldalán az estiéjszakai órákban 500 hPa-on, átmenetileg hideg advekció zajlott le a magasban, és kisebb rövidhullámú teknők is azonosíthatóak voltak, az előbb említett szállítószalag tengelyével átfedésben. A szállítószalag mentén, a benedvesedett és labilis környezetben, Szerbia felől nagy kiterjedésű, mezoléptékű, konvektív rendszer alakult ki, a keleti országrész felett. Térségünk konvektív eseményeit vélhetően inkább a Fekete–tenger felől kanyarodó szállítószalag, és a teknő előoldalán dél felől érkező örvényesség advekció együttese alakította ki.

A 2010-es zivatart két részre bontottam. Az első rész beleesett a kamera látószögébe, amely Sopronban helyezkedett el, és többé–kevésbé követte a zivatar észak felé történő fejlődését, a második rész azonban már kimozdult a véges látószögből. Az elsőnél észleltek lidérceket, a másodiknál nem. A lidércmonitorozás 4 időintervallumban történt. Az egyes intervallumokban a kamera iránya állandó. Az első időszak 20:09 és 23:57 közé esett, itt nem észleltek lidérceket. A második időintervallum 00:05 és 01:22 közötti, itt 4 db. lidércet detektáltak. A harmadik 01:26 és 02:35 majd a negyedik 02:38 és 02:51 időszakok között, egyiknél sem figyeltek meg lidérceket. A négy kamera állás: 22:20–23:57 (kb. 125.6 +/– 20 fok azimut), 00:00–01:22 (kb. 115.4 +/– 20 fok azimut), 01:26–02:35 (kb. 105.7 +/– 20 fok azimut), és 02:38–0251 (kb. 80.3 +/– 20 fok azimut). Az első vizsgált zivatarterület, ahol észleltek vörös lidérceket, a következő koordinátákkal rendelkezik: 19–22°E és 45–46,8°N.

Az első rész kijelölése, és látószöge a következő képeken látható:





46. ábra: Baloldalt: a LINET térképek, rajtuk a látószög és a kiválasztott terület, jobboldalt: ugyanezek a radarképeken

A 4 lidérc eseményt a következő időpontokban regisztrálták: 00:09 UTC-kor jelentkező vörös lidércet keltő villám koordinátái: 46,72°N; 20,54°E, 00:38 UTC-kor jelentkező vörös lidércet keltő villám koordinátái: 46,51°N; 20,57°E, 00:42 UTC-kor jelentkező vörös lidércet keltő villám koordinátái: 46,53°N; 20,61°E, 00:57 UTC-kor jelentkező vörös lidércet keltő villám koordinátái: 46,41°N; 20,76°E.

A kijelölt területen a teljes vizsgálat alatt (19:25–02:10) keletkező villámok száma 84493 db. A következő 47. ábra a felhő–felhő (CC) villámok, és a felhő föld (CG) villámok számának időbeli alakulását szemlélteti. A három fekete vonal a detektálási időket jelöli. Mivel a vizsgálat az adatok korlátozottsága miatt, 02:10-kor véget ért, így az ábrára csak az első két vizsgálat intervalluma fért fel teljesen, illetve a harmadiknak az eleje. A lidérceket a piros pontok jelölik. A villámszámok maximuma a lidércidőszak előtt figyelhető meg. A 22:40 körüli villámszám megugrás, a radarképek, és a LINET képek alapján, egy újabb, különálló, kialakuló zivatargóc kialakulásának a következménye.



47. ábra: A CC és CG villámok időbeli alakulása. A piros pontok a lidércek keletkezésének időpontjait jelölik.

A detektálási időszakok nagyrészt lefedik a vizsgált időszakot. Itt két külön részre bontottam a vizsgálatot. Az első detektálási időszakban nem keletkeztek lidércek, míg a második detektálási időszakban (23:55–01:10) igen, így itt ez a lidércidőszak.

Az első detektálási időszakban, amikor nem volt lidérc, 15 perces időszakonkénti legnagyobb +CG villámok áramerősségének átlaga +39,34 kA, és a legerősebb +CG villám +98,2 kA volt. A –CG villámoknál ebben a detektálási időszakban a 15 percenként legerősebb negatív áramerősségű villámok átlaga –89,81 kA, és a legerősebb –CG villám pedig –134,6 kA-es volt. A lidércintervallumban a legerősebb áramerősségű +CG +136,5kA, és a 15 percenként legerősebb +CG villámok áramerősségének átlaga +74,05 kA. A legerősebb –CG villám ebben az időszakban –108,7 kA-es. A 15 perces időfelbontás szerinti legerősebbek villámok átlaga pedig –75,96 kA. A következő ábrán bemutatom a pozitív és negatív CG villámok számbeli változását az idő függvényében (48. ábra).



48. ábra: A +/–CG villámok darabszámának időbeli változása. A piros pontok a lidércek időpontjait jelölik.

A felhőtető hőmérsékletnél (49. ábra) megfigyelhető, hogy a lidércek keletkezésének időpontjaiban a felhőtető hőmérséklet átlagának értéke soha nem nő –51°C fölé. A lidérckeletkezések időintervallumában ezen átlagértékek átlaga –51,98°C, az első detektálási időszakra pedig –52,28°C.



49. ábra: A felhőtető hőmérsékletek időbeli változása. A piros pontok a lidércek keletkezésének időpontjait jelölik.

A minimum hőmérsékletek időbeli változása 19:25 és 19:40 között veszi fel a leghidegebb értékeket, –72°C, ez még a lidérckeletkezések előtt következett be. A lidércidőszak alatt a leghidegebb érték –62°C és a leghidegebb értékek átlaga pedig –60,83°C. Az első detektálási időszakban a leghidegebb értékek átlaga –62,73°C.

A felhőtető magasságának változását a következő ábra szemlélteti (50. ábra).



50. ábra: A felhőtető magasságok időbeli változása, a piros pontok a lidércek keletkezésének időpontjait jelölik

Ezen az ábrán is a kék vonal mutatja az átlagolt értékeket, míg a piros szaggatott a maximum értékek időbeli változása. A lidérckeletkezés időszakában a maximális és az átlagolt értékek átlaga 14,23 km, és 11,67 km, míg az első detektálási időszakban 14,84 km és 12,14 km volt.

A radarintenzitás maximális és áltagolt értékeinek átlaga a lidércidőszakban 48,5 dBZ és 19,28 dBZ. Az első detektálási időszakban pedig 48,42 dBZ és 17,56 dBZ.

A zivatar másik része, ahol nem történt lidércészlelés, 00:00–02:10-ig tartott. A kiválasztott terület koordinátái: 19–22°E, és 46,8–48,7°N. Látható tehát, hogy az előzőekben ismertetett lidércek, a keltővillámuk koordinátái szerint az előző négyszögbe esnek. A vizsgált területet a következő képsorozaton mutatom be. Itt látszik, hogy a zivatarrendszer nincs végig a látószögön belül.



60. ábra: Baloldalt: a LINET térképek, jobboldalt: a radar térképek, a jelzett területtel és látószöggel

Ebben a vizsgált területben a 00:00–02:10 között keletkező villámok darabszáma 16582. A következő 61. ábrán a felhő–felhő (CC) villámok, és a felhő- föld (CG) villámok számának időbeli változása látható. A két zöld vonal a második és harmadik detektálási időszakot jelöli. Azért zöld színűek, mert ugyan be volt kapcsolva a kamera, és folyt a detektálás, de a zivatar egy része már nem tartózkodott a látószögön belül. A harmadik detektálási időszak nem teljesen fér a 61. ábrára, mert tovább tartott, mint 02:10. Az 01:55 utáni növekedés oka, a radarképeken megfigyelhető ~01:30 körül fejlődő góc elkülönülve a zivatarlánctól.



61. ábra: A CC és CG villámok időbeli alakulása. A zöld vonal a detektálást jelöli, mely nem fért bele teljesen a látószögbe.

A két vizsgált időszakban legerősebb +CG villám áramerőssége +95,5 kA, a negyedóránként mért legerősebb +CG villámok erősségének átlaga pedig +57,32 kA. A –CG villámoknál a két időintervallumot tekintve a legerősebb negatív villám –133,9 kA. A negyedóránként mért legerősebb villámok átlaga pedig –102,3 kA. A következő ábrán bemutatom a pozitív és negatív CG villámok darabszámbeli változását, az idő függvényében (62. ábra).



62. ábra: A +/-CG villámok darabszámának időbeli változása

A fentebb vizsgált meteorológiai tényezők kiértékelését is elvégeztem, ezekre az időszakokra. A felhőtető hőmérsékletnél (63. ábra) megfigyelhető, hogy az átlagolt értékek soha nem nőnek –53°C fölé. Az átlagolt értékek maximuma –53,76°C, ami 00:10 és 00:25 között jelentkezik. A minimum értékek intervalluma –58 és –63°C között mozog. A leghidegebb értékét 00:00 és 00:10 között veszi fel, amely –63°C.



63. ábra: A felhőtető hőmérsékletek időbeli változása

A felhőtető magasságának változását a következő ábra szemlélteti (64. ábra).



64. ábra: A felhőtető átlagos és maximális értékeinek időbeli változása

Ezen az ábrán is a kék vonal az átlagolt értékeket mutatja, míg a piros szaggatott vonal a maximum értékek időbeli változása. Az ábra alapján elmondható, hogy az átlagolt értékek 11,6 km és 12,33 km között mozognak. Legnagyobb értékét 00:25 és 00:40 között veszi fel. A maximum értékek függvénye 13,4 km és 14,4 km közötti. Ezt 00:55 és 01:10 között éri el. A radarintenzitás átlagolt értéke17,96 dBZ, míg maximális értéke 48,5 dBZ Az ekkor készült lidércek fényképei (65. ábra).



65. ábra: Néhány a 2010-es lidércek közül

9.5. A 2007. augusztus 10-11 zivatar

Egy mezoléptékű konvektív rendszerbe ágyazott, vonalba rendeződött zivatarlánc érkezett dél–nyugat felől, északias mozgással, nedves labilis légáramlással. A magassági, sekély nyomási mezőben hidegörvény, az alacsonyabb szinteken pedig, meleg, nedves advekció zajlott. A hidegörvény előoldalán képződött örvényességi advekció trigger hatású, jellemző az erős labilitás, az Li index -2 értékű, ami kedvez a zivatarok kialakulásának. A szélnyírás értékek is megfelelőek az ilyen típusú rendszerek kialakulásához. Ekkor történt az első vörös lidérc megfigyelése Magyarországon (66. ábra).



66. ábra: 22:48-kor fényképezett vörös lidérc Sopronból

Ezt a zivatart is két területen vizsgáltam, ugyanis a lidércmegfigyelés különböző kamera állásszögekből történt, és a radarképek alapján az első két lidércet kiváltó zivatargóc elkülöníthető a nagyobb, többi lidércet kiváltó zivatartól. Először a kisebb területen lezajlott zivatar vizsgálatát mutatom be.

A kamera Sopronban, helyezkedett el. Látószöge 167,6 (+/- 20) fok azimut. A vörös lidérc észlelés 19:44–20:19 UTC-ig tartott, és 2 lidérc eseményt regisztráltak a következő időpontokban:

20:00 UTC-kor jelentkező vörös lidércet keltő villám koordinátái: 46,15°N; 16,39°E,

20:16 UTC-kor jelentkező vörös lidércet keltő villám koordinátái: 46,59 °N; 16,39°E.

Vizsgálatom 18:30 és 20:45 között a négyzettel körülvett területre vonatkozik. A terület koordinátái: 46-47,1°N és 16,1-17,7°E (67. ábra).



67. ábra: Baloldalt: a LINET térképek, jobboldalt: a radartérképek, a kamera látószögével (piros) és a vizsgált négyzettel

A vizsgált területen az összes villám darabszáma mindössze 818 darab volt. A következő 68. ábrán a felhő–felhő (CC) villámok, és a felhő föld (CG) villámok számának időbeli változása látható. A lidércek észlelésének idejét a két piros pont jelöli. A detektálási időszakot, azonosnak tekintettem a lidércészlelési időszakkal, az időbeli felbontáshoz képest a lidérc monitorozási–időszak nagyon rövid volt. A lidércészleléskor tehát a zivatargóc a látószögön belül helyezkedett el.



68. ábra: A CC és CG villámok számának időbeli alakulása. A piros pontok a lidércek keletkezésének időpontjait mutatják.

A 19:44–20:19 tartó detektálási időszakban, amikor a lidérceket is észlelték, a legnagyobb +CG villám áramerőssége +190,8 kA volt, ez 20:10 és 20:25 között keletkezett. Emellett a negyedóránként mért legerősebb áramerősségű villámok átlagának értéke 110,5 kA. A detektálási időszakon kívül, a 15 percenként mért legerősebb +CG villámok áramerősségének átlaga +43,6 kA, és a legerősebb +CG villám +57 kAes áramerősségű volt. A –CG villámoknál a detektálási időben a legerősebb áramerősségű negatív polaritású villám –157,2 kA. A legerősebb negatív polaritású villámok átlaga ugyanebben az időszakban –91,27 kA. A detektálási időn kívül pedig ezen értékek átlaga –45,14 kA, és a legerősebb –CG villám áramerőssége –106 kA. A következő ábrán bemutatom a pozitív és negatív CG villámok számának időbeli változását (69. ábra).



69. ábra: A +/–CG villámok számának időbeli változása. A piros pontok a lidércek időpontjait jelölik.

A meteorológiai tényezők a következőképpen alakultak a vizsgált területen (fekete négyzeten) belül. A felhőtető hőmérséklet időbeni változását a 70. ábra szemlélteti. A lidércdetektálási időben a felhőtető hőmérséklet átlagértékei soha nem nőnek –45,9°C fölé. Átlagolva az értékeket –46,83°C-ot kaptam. A lidércdetektálási időn kívül az átlagolt értékek átlaga –47,13°C.



70. ábra: A felhőtető hőmérsékletek időbeli változása, a piros pontok a lidércek keletkezésének időpontjait jelölik.

A minimum értékek a detektálási időszakban –52 és –55°C között mozognak. A minimum értékek átlaga ekkor –53,5°C fok, és a detektálási időszakon kívül pedig –55,2°C. A felhőtető magasságának időbeli változását a következő ábra szemlélteti (71. ábra).



71. ábra: A felhőtető magasságok időbeli változása. A piros pontok a lidércek keletkezésének időpontjait jelölik.

A kék vonal, a vizsgált területen az átlagolt értékeket mutatja, míg a piros szaggatott vonal a maximum értékek időbeli változása. Az ábra alapján elmondható, hogy a detektálási

időszakban a maximális, és átlagolt felhőtető értékek átlagai 10,7 km és 9,94 km. A detektálási időszakon kívül pedig 10,95 km és 9,96 km.

A radarintenzitás átlagolt és maximális értékeinek átlaga, mind a detektálási időszakban, mind azon kívül 22,77 és 48,5 dBZ között van.

A zivatar nagyobbik részének vizsgálatánál, több négyszögre bontottam fel a vizsgált területet, követve a vihar vonulását. A kamera Sopronban helyezkedett el. Két látószöget is használtak, az egyik 148,52 (+/–20) fok azimut, a második pedig 137,48 (+/– 20) fok azimut volt. Az első látószöggel a lidércmegfigyelés 20:44 és 20:58 között zajlott, 2 lidércet detektáltak a következő időpontokban: 20:48-kor és 20:56-kor.

A második látószögnél a lidércmegfigyelés 20:58 és 23:35 között történt, 6 lidércet detektáltak a következő időpontokban: 21:36-kor, 21:42-kor, 21:51-kor, 22:22-kor, 22:35-kor és 22:44-kor.

Megfigyelés zajlott még 20:44–20:58-ig kb. 148 fok azimut irányban, majd 20:58-tól lényegében 22:22-ig kb. 137 fok azimut irányban. A kamera működött ugyan 23:35-ig, de már 22:22-kor Sopron közelében a felhők annyira elfedték a kilátást, hogy nem lehetünk biztosak, hogy az észlelés hiánya a lidércek megjelenésének a hiányát is jelenti. A 22:30 után látható néhány lidércet, csak a felhőzeten átjutó erős fényük miatt észlelte a soproni rendszer.

A három részre felbontott elemzés során az első területet 18:30 és 20:30 között vizsgáltam, ennek koordinátái: 17,5–21°E és 44,6–48°N. A második területen 20:30 és 22:30 időpontok között néztem a paraméterek változását, ennek koordinátái: 17,5–21°E és 45,6–48,7°N. A harmadik egyben utolsó terület fölött 22:30 és 23:55 között elemeztem az adatokat, ennek koordinátái: 17,5–22°E és 46,3–48,7°N. Ezeket a területeket a következő képsorozatokon tűntetem fel.





72. ábra: Baloldalt: a LINET képek, jobboldalt: a radar képek. Az első sorban a 148,52 azimutos látószög, a második és harmadik sorban pedig a 137,48 azimutos látószög a területekkel.

Az elemzett tartományokban az összes villám száma a vizsgált időszakra (18:30–23:55) 43026 db. A következő ábra a felhő–felhő (CC) villámok, és a felhő -föld (CG) villámok számának időbeli változását mutatja. A lidérceket a piros pontok jelölik. A zöld vonal a detektálást jelöli (melyet itt is ugyanannak vettem mit a lidércidőszak). Itt két detektálási idő szerepel, két látószöggel, de a két intervallum között összesen 14 másodperc volt a különbség, így egy vonallal tüntettem fel, és egy intervallumnak vettem.



73. ábra: A CC és CG villámok időbeli változása. A piros pontok a lidércek keletkezésének időpontjait jelölik.

A 20:44–23:35-ig tartó detektálási időben a legnagyobb +CG villám áramerőssége +123,4 kA, a negyedóránként legerősebb villámok átlaga pedig +83,76 kA volt. A detektálási időszakon kívül a 15 percenként mért legerősebb villámok átlaga 104,08 kA, és a legerősebb +CG villám ereje pedig +161 kA. A –CG villámoknál a detektálási időszakban a legerősebb villám –108,2 kA, és a legerősebb villámok átlagolt értéke pedig –78,81 kA. A detektálási időszakon kívül a legerősebb –CG villámok áramerősségének átlaga –76,52 kA. A legerősebb –CG villámok áramerősségének átlaga –76,52 kA. A legerősebb –CG villám áramerőssége pedig –116,7 kA. A következő ábrán bemutatom, a pozitív és negatív CG villámok darabszámbeli változását az idő függvényében (74. ábra).



74. ábra: A +/–CG villámok számának időbeli változása. A piros pontok a lidércek keletkezésének időpontjait jelölik.

A felhőtető hőmérsékletnél (75. ábra) megfigyelhető, hogy a detektálási időben a felhőtető hőmérséklet átlagának értéke, soha nem nő –44,6°C fölé. A mért értékek átlaga – 46,5°C. A detektálási időszakon kívül ez az átlag –47,78°C.



75. ábra: A felhőtető hőmérsékletek változása, a piros pontok a lidércek keletkezésének időpontjait jelölik.

A maximum értékek a detektálási időszak alatt –60 és –61°C közöttiek, ezen értékek átlaga –60,4°C. A detektálási időszakon kívül, a negyedóránként mért maximum értékek átlaga –59,84°C. A felhőtető magasságának változását a következő ábra szemlélteti (76. ábra).



76. ábra: A felhőtető magasság időbeli változása, a piros pontok a lidércek keletkezésének időpontjait jelölik.

A kék vonal az átlagolt értékeket mutatja, míg a szaggatott piros vonal a maximum értékek időbeli változása. Az átlagolt értékek átlaga a detektálási időben 9,92 km. A detektálási időszakon kívül pedig 10,04 km. A maximális felhőtető magasság a vizsgált időszakban végig 11,4 km. A radarintenzitás maximális, és átlagolt értékei a detektálási időszakban 48,5 dBZ és 24,59 dBZ voltak. A 2007-ben készült lidérc fényképek a 77. ábrán láthatók.



77. ábra: A nagy terület felett keletkezett lidércek

10. KIÉRTÉKELÉS

Először a hat esetet mutatom be villámparamétereik szerint, külön-külön táblázatban.

2012	legerősebb	legerősebb	legerősebb	legerősebb
	+CG	+CG-k átlaga	-CG	–CG-k átlaga
lidércidő	+109,2 kA	+93,3 kA	–156,3 kA	–122,42 kA
intervallumban				
detektálási	+128,2 kA	+85,89 kA	–221,3 kA	–121,35 kA
időben				
detektálási idő	+179,1 kA	+99,85 kA	–125,1 kA	–85,5 kA
után				

A 2012-es esetnél megfigyelhető, hogy a detektálási időszakon kívül is nagy áramerősségű villámok szerepeltek. Ott már a zivatar kilépett a látószögön kívülre, de nem kizárt a lidércek keletkezése.

2011	legerősebb	legerősebb	legerősebb	legerősebb
	+CG	+CG-k átlaga	-CG	–CG-k átlaga
lidércidő	+156,8 kA	+106,17 kA	–163,8 kA	–123,88 kA
intervallumban				
(detektálási				
idő)				
detektálási idő	+103 kA	+69,76 kA	-164 kA	–117,75 kA
után				

A 2011-es esetben a zivatar nagyrészt a látószögön belül helyezkedett el. A +CG villámoknál megfigyelhető, hogy a lidércidőszak után az átlaguk jobban leesik, mint a –CG villámoké. Ez arra utal, hogy a +CG villámok kelthették a lidérceket.

2010 lidérccel	legerősebb	legerősebb	legerősebb	legerősebb
	+CG	+CG-k átlaga	-CG	–CG-k átlaga
lidércidő	+136,5 kA	+74,05 kA	–108,7 kA	-75,96kA
intervallumban				
(detektálási				
idő)				
az első detek–	+98,2 kA	+39,34 kA	–134,6 kA	–89,81 kA
tálási idő után				

A 2010-es lidérceket detektált esetnél, a LINET képek alapján látható, hogy a zivatar a látószögön belül helyezkedett el. Itt az első detektálási időszakban nem észleltek lidérceket, így ez jó összehasonlítási minta, mivel a zivatar a látószögön belül volt, és a kamera is működött. A táblázatban megfigyelhető, hogy az első detektálási időszakban a +CG villámok erősségének átlaga mennyire alacsony, illetve a maximális +CG villám értéke sem éri el a 100 kA-t. Ez megint arra utal, hogy a +CG villámok fontos szerepet játszanak a lidércek keletkezésében.

2010 nincs	legerősebb	legerősebb	legerősebb	legerősebb
lidérc	+CG	+CG-k átlaga	–CG	–CG-k átlaga
detektálási időszakokban összesítve	+95,5 kA	+57,32 kA	–133,9 kA	-102,3 kA

Ebben az esetben sajnos a zivatar egy jó része már a látószögön kívülre esett. Ez inkább az erős konvektív rész. Mivel a kutatások azt mutatják, hogy a lidércek inkább a konvektív régió után vonuló sztratiform régióban keletkeznek, így ez a vihar is részben lehet viszonyítási alap. Itt is megfigyelhető, hogy a legerősebb +CG villámok áramerősségeinek átlagos értéke is viszonylag kisebb, mint a zivatar lidérceket keltő gócában levő villámoké, illetve itt sem éri el a legerősebb +CG villám áramerőssége a 100 kA-t.

2007 kis terület	legerősebb	legerősebb	legerősebb	legerősebb
	+CG	+CG-k átlaga	-CG	–CG-k átlaga
lidércidő	+190,8 kA	+110,5 kA	–157,2 kA	–91,27 kA
intervallumban				
(detektálási				
idő)				
detektáláson	+57 kA	+43,6 kA	-106 kA	-45,14 kA
kívüli				
időszakban				

A 2007-es, kis területre vonatkozó vizsgálat esetében, két lidércet regisztráltak. A zivatar ezen régiója a látószögön belül tartózkodott. Megfigyelhető, hogy jelentős a különbség a +CG villámok adatainál a lidércidő, és a detektáláson kívüli idő között. Valószínűsíthető, hogy ez a zivatargóc nem produkált több vörös lidércet abban az időszakban sem, amikor már nem volt optikai megfigyelés.

2007 nagy	legerősebb	legerősebb	legerősebb	legerősebb
terület	+CG	+CG-k átlaga	-CG	–CG-k átlaga
lidércidő	+123,4 kA	+83,76 kA	–108,2 kA	–78,81 kA
intervallumban				
(detektálási				
idő)				
detektáláson	+161 kA	+104,08 kA	–116,7 kA	–76,52 kA
kívüli				
időszakban				

Itt sajnos a zivatar egy jó része a látószögön kívül helyezkedett el, és ez látható az értékeken is. Hasonló, mint a 2012-es esetnél, ahol a zivatar nagy része szintén már a látószögön kívül esik. Emiatt nincs ismeretünk arról, hogy volt-e lidérc. A villámerősségeket figyelve, és összehasonlítva a fentebb leírtakkal, feltételezhető, hogy akkor is még keletkeztek lidércek.

Összességében elmondható, hogy a vizsgálataim megerősítik a +CG villámok fontos szerepét a lidércek keletkezésében. Ezen adatokat és a villámok számát a 78. ábra szemlélteti. A piros pontok a lidércek keletkezésnek idejét jelölik.



78. ábra: A hat esettanulmányban jelentkező villámok számának, és áramerősség karakterisztikáinak időbeli változása, valamint a megfigyelt lidércek időpontjai.

Észrevehető, hogy a lidércek a csökkent villámszámú időszakban fordulnak elő, ami megerősíti, hogy ezek a jelenségek gyakrabban figyelhetők meg a zivatarok lecsengő fázisában. Hasonló következtetésre jutott Savtchenko et. al. (2009) a lidércek kialakulásának idejét illetően. A Franciaország feletti lidércek vizsgálatánál (79. ábra) is látszik, hogy a lidércek a villámszám maximuma után keletkeztek.


79. ábra: Savtchenko et. al. (2009) vizsgálata. Az x tengelyen az idő UTC-ben, az y tengelye a villámgyakoriság 5 percenként. A szürke nyilak a lidércek időpontjait jelölik.

A legtöbb esetben akkor fordultak elő lidércek, amikor a + és – polaritású CG villámok maximális áramerőssége megnő, vagy éppen a vizsgált időszakban maximális értékű. Különösen igaz ez a +CG villámok esetében. A 2012-es zivatar esetében látható, hogy a legerősebb + CG villámok globális maximuma után, az értékek lezuhantak, majd újra növekedésnek indultak, és ekkor jelentek meg a lidércek. Hasonló növekedés figyelhető meg a zivatar végén is, bár a kamera már kikapcsolt, feltételezhető, hogy akkor is létrejöttek lidércek. A 2010-es zivatarban tapasztalható a +CG villámok áramerősségének csúcsa, de az még messze nem a zivatar lecsengő fázisában történt. A 2011-es zivatar esetében nagyon sok lidérc keletkezett egymás után. Megfigyelhető, hogy amikor a +CG áramerőssége lecsökkent, akkor a –CG vett fel nagy értéket. Ez a negatív korreláció megfigyelhető mindegyik vizsgálatnál kivéve a 2010-es esetet, ahol nem jelentek meg lidércek, bár a megfigyelt időszakban a zivatar nem mutatott lecsengő jelleget.

A pozitív és negatív CG villámok maximális áramerőssége, negatív korrelációt mutatott 2011ben és 2012-ben a vizsgált időszakok elején is, miközben lidérceket nem figyeltek meg. Ezekben az esetekben azonban figyelembe kell venni, hogy a lidércek által kísért felsőlégköri kisülések, csak az éjszakai, csökkent vezetőképességű mezoszférában tudnak kialakulni. Ezekben a zivatarokban a lidércek megjelenése gyakorlatilag akkor kezdődött el, amikor a nap a mezoszférában, illetve az alsó ionoszférában is lenyugodott, nem csak a felszínen. Azaz, az emissziók előfordulásának a hiánya más zivataron kívüli tényezőn múlt.

A 2007-es zivatarban a kis cella sem mutatja a megfigyelt polaritás szerinti villámerősség negatív korreláció a lidércek keletkezésekor, azonban tekintettel kell lenni itt arra, hogy a megfigyelt villámszámok is egy nagyságrenddel kisebbek, mint a többi esetben, így ez az eset nem mond feltétlenül ellent a megfigyelésnek. Következő két vizsgált paraméterem a felhőtető hőmérséklet és magasság. Lyons et. al. (2006b) szerint ott jelenhet meg lidérc, ahol

a felhőtető hőmérséklete átlagosan –65°C. A –55°C fölötti felhőtetejű zivataroknál már nemigen jelentkeznek lidércek. Yair et. al. (2009) ettől eltérő adatokat kapott, bár figyelembe kell venni, hogy ő téli zivatarokat vizsgált, a Földközi tenger felett. Ezeknek mások a karakterisztikái, mint az én általam vizsgált zivataroknak. Nála, a lidérceknél a felhőtető hőmérséklet –50°C alatt található. Hasonló eredményre jutott Savtchenko et. al. (2009) is. A felhőtető magasságot Ganot et. al. (2006) vizsgálta meg. Azt tapasztalta, hogy a legtöbb lidérc akkor keletkezett, amikor a felhőtető magassága 8–9 km közötti volt, és a legkevesebb pedig, amikor ez az érték 7,5 km volt. Összességében azt mondta el, hogy a lidércek idején a felhőtető 6,8 és 9 km közötti.

Ezeket az adatokat a következő táblázatokban foglalom össze.

2012	a felhőtető hőmérséklet átlagolt értékek átlaga	leghidegebb felhőtető az intervallumban	15 perces átlagolt felhőtető értékek összesített átlaga.	a legmagasabb felhőtető az intervallumban
lidérc időszak	-46,4°C	-66°C	9,6 km	12,2 km
detektálási időszak	–47°C	–66°C	9,8 km	12,2 km
detektáláson kívüli időszak	48,48°C	–66°C	10,25 km	12,2 km

Látható, hogy a felhőtető hőmérséklet és felhőtető magasság 15 perces időnkénti átlagainak átlaga emelkedik a lidércek idejét elhagyva, vagyis a detektálási időszakon kívül figyelhetők meg a legmagasabb értékek. A különbség nem nagy, de mint már írtam, ennél a zivatarnál a látószögön kívülre eső terület is nagy, így nem kizárt, hogy ott is keletkeztek lidércek.

2011	átlagolt értékek átlaga	leghidegebb felhőtető az intervallumban	15 perces átlagolt felhőtető értékek összesített átlaga.	a legmagasabb felhőtető az intervallumban
lidérc időszak (detektálási idő)	-48,8	–67°C	10,07 km	12,2 km
detektálásion kívüli idő	–47,57°C	–67°C	10,04 km	12,2 km

A 2011-es esetnél szinte azonos értékeket kaptam mind két időszakban.

2010 lidérccel	átlagolt	leghidegebb	15 perces	a legmagasabb
	értékek átlaga	felhőtető az	átlagolt	felhőtető az
		intervallumban	felhőtető	intervallumban
			értékek	
			összesített	
			átlaga.	
lidérc időszak	−51,98°C	-62°C	11,67 km	14,2 km
első detektálási	−52,28°C	-72°C	12,15 km	14,2 km
időszak lidérc				
nélkül				

Ennél az esetnél szépen megmutatkozik a különbség a két időszak között. Ezt jó viszonyítási alapnak veszem, mert itt fordul elő az-az eset, hogy a kamera is dolgozik, és a zivatar is végig a látószögön belül van. Látszik, hogy az átlagos felhőtető magasság nagyobb, míg a felhőtető hőmérséklet alacsonyabb ott, ahol nem keletkezett lidérc.

2010 nem volt	átlagolt	leghidegebb	15 perces	a legmagasabb
lidérc	értékek átlaga	felhőtető az	átlagolt	felhőtető az
		intervallumban	felhőtető	intervallumban
			értékek	
			összesített	
			átlaga.	
detektálási	−53,39°C	-63°C	12,17 km	14,02 km
időszakban				

Ebben az esetben, ahol nem detektáltak lidérceket, a felhőtető legmagasabb pontja, és az átlagolt magasság is magasnak számít. Ez utalhat a még ki nem alakult sztratiform régióra, és a lidércek hiányára. Ugyanakkor figyelembe kell venni, hogy a zivatar nagy része ebben az esetben is már a látószögön kívülre esik.

2007 kis terület	átlagolt	leghidegebb	15 perces	a legmagasabb	
	értékek átlaga	felhőtető az	átlagolt	felhőtető az	
		intervallumban	felhőtető	intervallumban	
			értékek		
			összesített		
			átlaga.		
lidérc időszak	-46,83°C	–55°C	9,94 km	11,2 km	
detektálási	–47,13°C	-56°C	9,96 km	11,2 km	
időszakon kívül					

Itt az figyelhető meg, hogy a lidércek keletkezésekor kisebb értékeket kaptam az átlagolt felhőtető hőmérséklet adatokra, mint amikor nem történt lidércdetektálás. Hasonló látható a 2007-es nagy terület vizsgálata esetén is, bár itt a leghidegebb felhőtető már igen alacsony értéknek számít. Megfigyelhető, hogy az átlagolt értékek a minimumnál jóval alacsonyabbak. Ez egy kiterjedtebb sztartiform réteg létezését sejteti az erős konvekció mögött, és a lidércek ott keletkezhettek.

2007 nagy	átlagolt	leghidegebb	15 perces	a legmagasabb
terület	értékek átlaga	felhőtető az	átlagolt	felhőtető az
		intervallumban	felhőtető	intervallumban
			értékek	
			összesített	
			átlaga.	
lidérc időszak	-46,5°C	-61°C	9,91 km	11,4 km
detektálási	−47,73°C	-62°C	10,04 km	11,4 km
időszakon kívül				

Összességében elmondható, hogy a lidércek keletkezésének idején a felhőtető –45 és –52°C között alakult, illetve azokban az esetekben ahol nem keletkezett lidérc, ott ennél hidegebb felhőtető volt a jellemző. Ez azt mutatja, hogy a viszonylag hideg és a konvektív régióban magasra törő felhőtető ugyan szükséges feltétele a lidércek megjelenésének (valószínűleg az intenzív töltésszétválasztás szempontjából), azonban ez a tulajdonság önmagában nem elegendő feltétel. Az alacsonyabb átlagértékek a sztratiform zivatarrész jelenlétének a fontosságára utalnak. Ez részben alátámasztja a többi kutató által kapott eredményeket. A felhőtető magasságokra elmondható, hogy a lidércek keletkezésekor az átlagos értékük ~9–11 km közötti, míg akkor, amikor nem keletkeztek lidércek, ez magasabb.

Azokban az esetekben ahol meg volt adva a lidércet keltő villám koordinátája, megpróbáltam azt ráilleszteni a radarképekre. Ezek alább láthatóak. A fehér pamacsok a koordinátákat jelölik. Először a 2007-es zivatar két részét mutatom be.







80. ábra: Az a) ábra a 2007-es zivatar kis területre eső vizsgálatának képe, míg a b), c), d) ábra a nagy területre eső rész.

Megfigyelhető, hogy a lidércek mindig a kisebb radarintenzitású helyen (zöld) jöttek létre, és nem az erős konvergencia (piros szín) zónában. A radarintenzitás a lidérceket keltő villámoknál ~30–35 dBZ-re tehető. Míg a zivatar maximális radarintenzitása a piros régióknál 48,5 dBZ. A másik eset, ahol a térképes megjelenítést el tudtam készíteni a 2010-es zivatar. Ennek képei alább figyelhetők meg.



81. ábra: a 2010-es zivatar lidérckeltő villámainak helye és ideje.

Itt is látható, hogy a lidércek a gyengébb radarintenzitású helyen jöttek létre, ott ahol a radarintenzitás értéke ~25 és 35 dBZ közötti. Míg az erős konvergencia régióban a radarintenzitás 48,5 dBZ volt. Ezek az értékek megfelelnek Lyons et. al. (2006b)

kritériumának, vagyis annak, hogy a lidérckeltésnél a radarintenzitás általában 25 és 45 dBZ közötti.

11. ÖSSZEFOGLALÁS

Összességében a dolgozatban ismertetett elemzések eredményei megerősítik a korábban publikált tapasztalatokat. A vizsgált esetekben is kimutatható, hogy az erős +CG villámok szorosabb kapcsolatban állnak a lidércek kialakulásával, mint a -CG villámok, és hogy a lidércek a zivatar vége felé, a villámszám maximum után, a csökkenő szakaszban keletkeznek. A zivatar életciklusában ilyenkor alakul ki olyan sztratiform régió, amikor az erős +CG villámok keletkezhetnek, és a legtöbb lidércet figyelik meg. A lidérceket generáló zivatarok haldokló stádiumában a +CG és a -CG maximális áramerősségeinek értékei között megfigyelt antikorrelációval, nem találkoztam a szakirodalomban. A jelenség kapcsolata a vörös lidércek keletkezésével magyarázatra szorul, és további zivatarok vizsgálatával lenne igazolható. A felhőtető magasság, és felhőtető hőmérséklet értékeinél látható, hogy a lidércek inkább akkor keletkeznek, amikor a felhőtető átlagos hőmérséklete valamivel magasabb lesz, átlagos magassága pedig alacsonyabb. Ez a zivatarban egy sztratiform régió megjelenésére utal, ahol már a gyengébb konvekció nem nyomja a felhőtetőt a tropopauzáig. A radarintenzitás térképeken is megfigyelhető, hogy a lidérceket keltő villámok a világosabb, nem olyan erőteljes konvekció zónában helyezkedtek el. Ugyanakkor a vörös lidérceket keltő zivatarok legmagasabb felhőcsúcsai magasak és hidegek, ami intenzív konvekcióra, erős feláramlásra és így hatékony töltésszétválasztási folyamatokra utal, ami a lidérceket produkáló erős +CG villámok kialakulásához szükséges.

Az elemzés során azt a stratégiát követtem, hogy a zivatart jellemző különböző paramétereket a zivatar egészén vizsgáltam a vörös lidércek keletkezésével összefüggésben. Az így kapott eredmények megerősítik a más szerzők által talált eredményeket, amelyek szerint nincs egyértelmű mutatót a vizsgált paraméterek és a vörös lidércek keletkezése között. Eredményeim ellenőrzéséhez további közép-európai és mediterráni zivatarok elemzésére van szükség.

11.1. A munka folytatásának lehetőségei

A dolgozatban kapott eredmények és a szakirodalomban található források is utalnak a zivatarok sztratiform tartományainak a fontos szerepére, a vörös lidércek előidézéseivel

kapcsolatban. Biztosabb eredményeket szolgáltatna egy, az ismertetetthez hasonló vizsgálat, ha külön elemeznénk minden zivatarnál a konvektív régiót, illetve a sztratiform régiót, és ezek eredményeit hasonlítanánk össze. Ezeket a területeket a radarprofilból lehetne kiválogatni. Emellett, ha nem csak a dolgozatban is alkalmazott scanning radarképeket néznénk, hanem a zivatar vertikális metszetéről képet adó ún. profiling radar képet is, akkor belepillantást nyerhetnénk a zivatar belsejében lévő, radarintenzitás eloszlásról. Ha ehhez meghatározzuk a lidérceket keltő villámok helyét, akkor biztosan ki lehetne jelenteni, hogy azok tényleg a sztratiform régióban keletkeztek, ahol alacsonyabb a radarintenzitás. Emellett, ha több esetet is vizsgálnánk, akkor a statisztikai eredmények is biztosabbak lehetnének.

12. FÜGGELÉK

Az egyéb felsőlégköri kisülések részletes bemutatása és táblázatos összefoglalása:

12.1. Kék nyalábok és Óriás nyalábok (Blue and Gigant Jets)

A kék nyalábokat 1994. július 1–én Arkansasban egy extrém heves zivatarfelhő felett figyelték meg. 22 perc alatt 65 db kicsi (néhány km magas) és közönséges (20–25 km magas) kék nyalábot sikerült detektálni egy repülőgépről. A kék nyalábok a zivatarfelhő tetejéről indultak, és emelkedési sebességük 25–150 km/s között mozogott. Élettartamuk általában rövidebb 2 tized másodpercnél (Barta, 2011). Ha a kék nyalábok magassága nem haladja meg a 20 km–t, akkor kis kék nyalábokról beszélünk (Blue Starters), ha elérik a 40–50 km–t, akkor már kék nyalábról beszélünk (Blue Jet) (1f. ábra). Kialakulásukhoz nem szükséges villám lecsapás, inkább a felhőben lezajló töltésszétválasztó folyamatokkal vannak összefüggésben (Bór, 2010). Wescott et al. (1998) kimutatták, hogy a kék nyalábok általában a negatív CG villámokhoz és a felhőben lévő nagy jégszemekhez társulnak. A nyaláb úgy keletkezik, hogy a felhő felső részében lévő pozitív töltésszétválasztó folyamatok a szükséges térerősséget mennyi ideig tudják fenntartani (Barta, 2011).



1f. ábra: Reunion sziget felett, a felhőtetőről kiinduló kék nyaláb (Bailey, 2010).

Léteznek még óriás nyalábok (Gigantic Jets) is, melyeket először 2002 július 22-én Tajvanban dokumentálták. A megfigyelés során 5 óriás nyalábot figyeltek meg egy zivatarfelhő felett. Az elsőnek (2f/a ábra) és az utolsónak a felső része fa alakú volt, és az alsó részűk pedig egy kék nyalábhoz hasonlított. Ezeket "fa" nyaláboknak nevezték el. A 2., 3. és 4. (2f/b ábra) esetnél a felső rész egy répára emlékeztetett az alsó részük pedig egy kék nyaláboknak nevezték el. A 2., 3. és 4. (2f/b ábra) esetnél a felső rész egy répára emlékeztetett az alsó részük pedig egy kék nyalábhoz, így ezeket "répa" nyaláboknak nevezték el. Az 5 óriás nyaláb mind meghaladta a 85km-es magasságot (90 ±5 km (1 eset), 89 ± 5 km (2 eset), 86 ±5 km (3 eset), 91 ± 5 km (4. eset) 91 ± 5 km (5. eset)) és elérte az ionoszférát. Felfele növekvő sebességük kb. 1000 km/s is lehetett (Su, 2003).



2f. a–b ábra: Baloldalt a "fa" nyaláb keletkezését látjuk. Jobboldalt pedig egy répa nyalábot, konkrétan a 4. esetet, a–b képen a vezető nyaláb, c–g a teljes nyaláb, e–i pedig a záró nyaláb figyelhető meg (Su, 2003).

A nyalábok annyira ritkák, hogy megfigyelésük és kutatásuk nagyon nehéz. Az elképzelések szerint nem csak a felhőtetőről indulhatnak ki, hanem a felhő belsejéből kiindulva és annak tetejét áttörve is feljuthatnak egészen az ionoszféráig (Barta, 2011).

12.2. A Gyűrűlidércek (Elves)

A gyűrűlidérceket (ELVES: Emissions of Light and Very Low Frequency Perturbations from Electromagnetic Pulse Sources) 1990 októberében egy űrsiklóról fedezték fel a Francia Guyana felett, de csak 1995-ben sikerült a kutatóknak a földről is megfigyelniük. Az 1990ben látott gyűrűlidércet egy pozitív CG villám okozta, de később Barrington–Leigh és Inan (1999) kimutatta, hogy ezek a jelenségek függetlenek a villám polaritásától, vagyis mind a pozitív mind a negatív CG villám előidézheti őket. Úgy keletkeznek, hogy egy igen erős vertikális CG villámkisülés következtében, egy elektromágneses lökéshullám indul meg az ionoszféra felé. Ennek az energiája az ionoszféra aljánál nyelődik el legnagyobb részben és ott gerjeszti a felsőlégkörben lévő nitrogén molekulákat, melyek alapállapotukba való visszatérésük következtében vörös fényt sugároznak ki (Barta, 2011). A gyűrűlidércek gyakran társulnak a vörös lidércekhez, de önálló emisszióként is előfordulhatnak. Megjelenési magasságuk az ionoszféra alsó határa 80–100 km, alakjuk pedig gyűrűs (3f. ábra). Szabad szemmel láthatatlanok a gyors, kb. 1 ezred másodperces lefolyásuk következtében, viszont érzékeny kamerákkal rögzíthetők. Az impulzus intenzitásától függően az átmérőjük 400–600 km között változik.



3f. ábra: Egy gyűrűlidérc Kelet Ausztrália felett. A felhőtető magassága ~20km, a kisülés pedig ~90km magasan ment végbe (Sentman, D. D., 2005)

12.3. Lidércudvarok (Sprite Halos)

Ezt a jelenséget a 1996–99-ig tartó Lidérc kampány során figyelték meg először Colorádóban és Wyoming–ban. Mind a pozitív mind a negatív CG villámok kiválthatják. Ezt a jelenséget is, akár a vörös lidércet a villámkisülés után a zivatarfelhő és az ionszféra között kialakult kvázi–stacionárius tér okozza. De a vörös lidércekkel szemben ez homogénebb, diffúz gázkisülés. A jelenség 70–85 km-es magasságban fordul elő, horizontális átmérője elérheti a 100km–t, és vertikális kiterjedése pedig 10 km körüli (Bór, 2010). Színűk vörös, és a felvételeken hasonlítanak a gyűrűlidércekhez. Ennek tudható be, hogy spektrális tulajdonságaik alapján csak 1999-ben ismerték fel, hogy két különböző jelenségről van szó (Barrington–Leigh et al., 1999). Élettartamuk kb. 1 milliszekundum.

12.4. Különféle egyéb felsőlégköri kisülések: Törpék (Gnomes), Tündérek (Pixies) és Trollok (Trolls)

Léteznek olyan felsőlégköri kisülések, amelyek nagyon ritkák és eddig csak néhány alkalommal sikerült megfigyelni őket. Az egyik ilyen a törpék (Gnomes), melyet 2000-ben fedeztek fel az amerikai síkságok felett. 20 perc alatt 17 törpét sikerült észlelni egy viharfelhő felett (Barta, 2011). Ezek a jelenségek rendkívül fényesek, mindössze 200 m szélesek, és 1 km hosszúak. A zivatarfelhő konvektív magja fölött a felhő tetejéről indulnak ki. A 17 megfigyelt törpe élettartama 30-130 milliszekundum közötti volt, a terjedési sebességük pedig 10 km/s körüli lehetett. A másik ilyen jelenség a tündérek (Pixies), nevüket onnan kapták, hogy a képeken csak 1-1 pixel felfénylését okozzák. Csoportban jelennek meg, és szintén a zivatarmag fölötti felhőtetőnél jelentkeznek (Bór, 2010). Ezeket is ugyanabban a zivatarfelhőben fedezték fel 2000-ben mint a fent említett törpéket. Élettartamuk 16 ezred másodperc vagy ennél is kevesebb volt (Barta, 2011). Egy harmadik ilyen ritka jelenség a troll (Transient Red Optical Luminous Lineament, azaz átmeneti optikai, vörös, fénylő "vonás" (Bór, 2010)). A vörös lidércekhez kapcsolódnak, azok alsó szálain figyelhetők meg. Kb 150 km/s sebességgel haladnak felfelé és kb. 50 km-es magasságig terjednek. Élettartamuk 100 milliszekundum (Bór, 2010). A troll egy másodlagos elektrooptikai emisszió, vagyis nem független jelenség, hanem csak vörös lidércekkel együtt illetve azok után figyelhető meg.

12.5. Táblázatos összefoglaló

A felsőlégköri	Magassági	Horizontális	térbeli	Látható	Élettartamuk
kisülés típusa	tartomány	kiterjedésük	karakterisztika	mozgásuk	
Vörös lidércek	~50–90km	~1–20km	teteje (>80km)	lefelé, néha ezt	néhány
(Red Sprites)			szétágazó	követően	milliszekundu
			alja (<70km)	felfelé	m+ néhányszor
			szálas		10ms utólagos
			szerkezetű		felfénylés
					(afterglow)
Gyűrűlidércek	~100km	>100km	gyűrű alak	sugárirányú	~1
(Elves)				terjeszkedés	milliszekundu
				horizontálisan	m
Kék nyalábok	~18–45km	pár km	összetett	Felfelé	néhány
(Blue Jets)					száz100 ms
Óriás	~18–75km	10 km vagy	összetett	Felfelé	néhány 100 ms
nyalábok		kisebb			
(Gigant Jets)					
Trollok	~60–70km	~kms	összetett	Felfelé	néhány 100 ms
Tündérek	~15–18km	néhány	kompakt	mozdulatlan a	néhány 100 ms
(pixies)		tized-		felhőtetőn	
		másodperc			
Lidérc–	~75 km	~50 km	pite alak	Lefelé	néhány
udvarok					milliszekundum
(Halos)					

Táblázatban összefoglalva a felsőlégköri kisülések adatait. (Sentman, D.D., 2005)

13. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A diplomamunkám elkészítésében segítségemre voltak, és ezért köszönetemet fejezem ki: Témavezetőmnek, Bór Józsefnek Ph.D a Magyar Tudományos Akadémia Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézet munkatársának, valamint tanszéki konzulensemnek Dr. Ács Ferencnek, ELTE TTK Meteorológiai tanszék egyetemi docensének. Továbbá köszönetemet fejezem ki az adatszolgáltatást az Országos Meteorológiai Szolgálatnak, és Dr. Hans Dieter Betznek (Nowcast GmbH) és Matrin Popeknek a nydeki lidérc adatokért.

14. IRODALOMJEGYZÉK

Ács F., Légköri elektromosságtan oktatási diasorozat, ELTE TTK, 2011

Bailey A.M., Investigating Characteristics of Lightning–Induced Transient Luminous Event Over South America, *PhD*, Utah State University, 2010

Barrington–Leigh, C.P., and U.S. Inan, Elves triggered by positive and negative lightning discharges, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 683–686, 1999

Barrington–Leigh, C. P., U. S. Inan, and M. Stanley, Elves: Photometric and Video Signatures, in *EOS Supplement*, vol. 80, p. F224, 1999).

Barta V.,2011. Káprázatos jelenségek a viharfelhők fölött. *Természet Világa*, 142. évfolyam, 7.szám

Berceli B., 2013, A sötét villám, www.idokep.hu

Bór J., Barta V., Vörös lidércek – Gigantikus >Tűzijáték< a felsőlégkörben. *Fizikai szemle*, 2010/10, 343–349 o.

Bór J.,2010. Villámkisülésekhez társuló felsőlégköri elektro–optikai emissziók és schumann–rezonancia tranziensek vizsgálata. *Doktori (PhD) értekezés*, Sopron

Budai O., 2009, Földbázisú távérzékelés a meteorológiában, Bsc szakdolgozat

Burt C.C., 2012, Thunderstorms: The 'Stormiest' Places int he U.S.A. and the World, Weather Extremes, *www.wunderground.com*

Carlson B.E., Lehtinen N.G., Inan U.S., 2010, Terrestrial gamma ray flash production by active lightning leader channels

Chen et al., 2008, Chen, Alfred B.; Kuo, Cheng–Ling; Lee, Yi–Jen; Su, Han–Tzong; Hsu, Rue–Ron; Chern, Jyh–Long; Frey, Harald U.; Mende, Stephen B.; Takahashi, Yukihiro; Fukunishi, Hiroshi; Chang, Yeou–Shin; Liu, Tie–Yue; Lee, Lou–Chuang, *Global distributions and occurrence rates of transient luminous events*, J. Geophys. Res., 113, A08306, (2008), doi:10.1029/2008JA013101.

Csík A., 2012, Hirtelenárvizek és egy esettanulmány: árhullám képződése hóolvadás és csapadék együttes hatásából, *oktatási anyag*

Cummins K.L., Murphy M.J., Bardo E.A., Hiscox W.L., Pyle R.B., Pifer A.E., 1998, A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network, J. *Geophys. Res.* 103, pp 9053–9044

Davenport S., 2007, Fire in the Sky, MeteoGroup

Dombai F., 2009, Az országos meteorológiai szolgálat időjárási radarhálózatainak mérései, *OMSZ*

Földesi L., 2011, Katasztrófa Koppenhágában: a gyilkos leáramlás, www.iho.hu

Fukunishi H., Takahasi Y., Uchide A., Sera M., Miyasato K.R., 1999, Occurrences of sprites and elves above the sea of Japan near Hokuriko in winter, *EOS Supplement*, 80(46):F217

Füllekrug, M., Mareev, E. A., and Rycroft, M. J., (Eds), 2006, Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges, vol. 225 of *NATO Science Series II., Mathematics, physics and chemistry*, pp. 191–210, Springer Yerlag, ISBN 978–1–4020–4627

Franz, R. C., R. J. Nemzek, and J. R. Winckler (1990), Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system, *Science*,249,48–51, doi:10.1126/science.249.4964.48

Ganot M., Yair Y., Price C., Ziv B., Sherez Y., Greenberg E., Devir A., Yaniv R., First detection of transient luminous events associated with winter thunderstorms int he eastern Mediterran. *Geophysical researches letters*, 2007, vol. 34,

Hsu et al., 2009, Rue–Ron Hsu, Alfred B. Chen, Cheng–Ling Kuo, Han–Tzong Su, Harald Frey, Stephen Mende, Yukihiro Takahashi, and Lou–Chung Lee, *On the Global Occurrence and Impacts of Transient Luminous Events (TLEs)*, in Norma B. Crosby, Tai– Yin Huang, Michael J. Rycroft,2008, Coupling of Thunderstorms and Lightning Discharges to Near–Earth Space: *Proceedings of the Workshop Corte (France)*, *AIP Conference Proceedings*, Volume 1118, pp. 99–107, ISBN: 978–0–7354–0657–5, ISSN: 0094–243X, doi:10.1063/1.3137720, 20

Horváth Á., 2012, mezoskálájú folyamatok meteorológiája, *ELTE TTK oktatóanyag*, OMSZ

Horváth Á., 2012, Szupercellás zivatarok Dél–Magyarországon: 2012. június 9., met. hu/ismerettár/erdekessegek_tanulmagyok

Ivády A., 2011, A zivatarok előfordulásáról, www.idokep.hu

Keith C. Heidorn, 2012 PhD, THE WEATHER DOCTOR

Kinder E.P., Noggle R.C., Pifer A.E., Vance D.L., 1980, Lightning detection–finding system for forest fire detection, *Bull. Am. Met. Soc 61, pp 980–986*

Kiss P.–Csabai I.– Lichtenberger J.–Jánosi I. 2009: Kozmikus sugárzás, időjárás, éghajlat: hol a hiányzó láncszem? *Fizikai Szemle*, 59, 238–243.

Knutsson L., 2004: Sprite observations over France in relation to their parent thunderstorm system, http://www.geo.uu.se/luva/exarb/2004/Lars_Knutsson.pdf

Lyons W.A., Bauer K.G., Eustis A.C., Moon D.A., Petit N.J., Schuh J.A., 1989, RSCAN's National lightning detection network., In *fifth Intl. Conf. on Interactive Information and Processing System for Meteor., Ocean., and Hydrology*, Boston. American Meteorological Society. The first year progress report.

Lyons A.W., 2006a, The meteorology of transient luminous events – an introduction and overview. "Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges, NATO Science Series, 19– 56 o. csak a piros szövegben

Lyons, W.A., L.M. Andersen, T.E. Nelson and G.R. Huffines, 2006b: Characteristics of spriteproducing electrical storms in the STEPS 2000 domain. *On line summary and CD, 2nd Conference on Meteorological Applications of Lightning Data*, AMS, Atlanta, 19 pp.

Lyons W.A., CCM, Cummer S.A., Stanley M.A., Huffines G.R., Wiens K.C., Nelson T.E., 2008, Supercells and Sprites , *BAMS*, pp 1165–1174

Lyons W.A., CCM, Stanley M.A., Meyer J.D., Nelson T.E., Rutledge S.A., Lang T.L., Cummer S.A., 2009, The Meteorologiacal and Electrical Structure of TLE-Producing Convective Storms, Chapter 19.,

Makela A., Kantola T., Yair Y., Raita T., 2010, Observations of TLEs Above the Baltic Sea on Oct 9 2009, *Geophysica*, pp 79–90

Mallick S., Rakov V.A., Dwyer J.R., 2012, A study of X-ray emissions from thunderstorms with emphasis on subsequent strokes in natural lightning,

Molnár K., 1988: "Az 1987. július 25–i baranyai jégverés története", *Légkör (kiadja: Országos Meteorológiai Szolgálat)*, XXXIII. évfolyam,1988. 1. szám. 33. oldal

NOAA, 1994, thunderstorms and lightning... the underrated killers!, a prepardness guide

Orr D., 2004, Giant hail killed more than 200 in Himalayas, The Telegraph, UK.

Pasko V.P., Yair Y., Kuo C.–L., 2012 Lightning related transient luminous events at high altitude in the Earths Atmosphere: phenomenology, mechanisms and effects, *space science reviews*, vol. 168, issue 1–4, pp 475–516

Pinto O. Jr., Saba M.M.F, Pinto I.R.C.A., Tavares F.S.S., Naccarato K.P., Solorzano N.N., 2004, Thunderstorm and lightning characteristics associated with sprites in Brazin, *Geophysical research letter*, vol 31

Price C., Burrows W., King P., 2002, The likelihood of winter sprites over the Gulf Stream, *Geophys. Res. Lett.* 29

Puskás F., Hogyan keletkezik a villám?, Firka 1998–1999/1, 3-6 o.

Ramsay P., 2008, Parkersbourg's F5 tornado, www.heaven4sure.com

Rycroft M.J., Harrison R.G., Nicoll K.A., Mareev E.A., 2008, An Overview of Eart's Global Electric Circuit and Atmospheric Conductivity, *space science rewiews*, vol 137, issue 1–4, pp 83–105

Savtchenko A., Mitzvea R., Tsenova B., Kolev S., 2009, Analysis of lightning activity in two thunderstorm system producing sprites in France, *Journal of Atmospheric and Solar– Terrestrial Physics* 71, pp 1277–1286

Sentman, D. D., Overview of Transient Luminous Events (Red Sprites, Elves, Blue Jets, Halos, Pixies, Trolls, etc.), *Geophysical Institute University of Alaska*, 2005

Su H.T., Hsu R.R., Chen A.B., Wang Y.C., Hsiao W.S., Lai W.C., Lee L.C., M. Sato, H. Fukunishi, Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere, *Nature, vol 423*, 2003

Tordai J., 2010, Nem mezociklonális tubák és tornádók magyarországon, Bsc szakdolgozat

Wescott, E. Me, D.D. Sentman, M. J, Heavner, D. L. Hampton, and O. H. Vaughan, Jr. (1998), Blue jets: their relationship to lightning and very large hailfall, and their physical mechanisms for their production, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 60, 713–724.

Yair Y., Price C., Ganot M., Greenberg E., Yaniv R., Ziv B., Sherez Y., Devir A., Bór J., Sátori G., 2009, Optical observations of transient luminous events associated with winter thunderstorms near the coast os Israel, *Atmospheric Research* 91, pp 529–537

Yair Y.Y., Aviv R., Ravid G., 2009, Clustering and synchronization of lightning flashes in adjacent thunderstorm cells from lightning location networks data

Webes források:

www.sgo.fomi.hu viharcentrum.hu http://earthobservatory.nasa.gov http://ttmk.nyme.hu/fldi/Documents/Lakot%C3%A1r%20Katalin/L%C3%A9gk%C3 %B6rtan/A%20l%C3%A9gk%C3%B6ri%20elektromoss%C3%A1g.pdf, Dr Lakotár Katalin http://nyugatmet.hu/ http://nyugatmet.hu/ http://szupercella.hu/ http://zivipotty.hu http://upload.wikimedia.org www.met.hu, OMSZ