

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Meteorológiai Tanszék



Diplomamunka

Készítette:

Perlai Katalin

Meteorológus MSc hallgató, előrejelző szakirány

**Zivatarcella-áthelyeződési vizsgálatok a kombinált
módszerrel korrigált, rekonstruált villámadatbázis
segítségével**

Témavezető: **Varga Bálint**

OMSZ Marczell György Főobszervatórium

Tanszéki konzulens: **dr. Mészáros Róbert**

ELTE Meteorológiai Tanszék

Budapest

2014

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	3
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	5
2.1. A villámlás története.....	5
2.2. Villámlás kialakulása.....	5
2.2.1. A zivatarfelhők töltése	7
2.2.2. Zivatarrendszerekben fellépő villámlás feltételei	9
2.2.3. Konvektív paraméterek vizsgálata.....	9
2.3. Módszerek a villám helyének meghatározására.....	10
2.4. Földbázisú villámdetektáló rendszerek.....	13
2.5. Hazai villámláslokalizáló rendszerek: SAFIR és LINET	15
2.5.1. SAFIR	15
2.5.2. LINET	18
2.6. Közép-Európa villámérzékelő rendszere: a F.L.A.S.H. projekt	20
2.7. Villámképek hibaszűrésének módszeréről.....	21
3. A MÓDSZER LEÍRÁSA	23
3.1. Az iránykorrekciós módszer elve	23
3.2. Az iránykorrekciós módszer megvalósítása.....	26
4. A KIDOLGOZOTT MÓDSZER ALKALMAZÁSA.....	29
4.1. Napi összegek készítése 2 km felbontású rácson	29
4.2. Negyedórás villámösszegek készítése	29
4.3. A korrigált adatsorok létrehozása lineáris interpolációval.....	31
4.4. A „vágási értékek” meghatározása	33
4.5. A cellaáthelyeződési-vektorok kiszámítása	39
4.6. A kapott eredmények kiértékelése.....	39
4.7. Hiba összehasonlítás.....	43
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	44
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	45
IRODALOMJEGYZÉK.....	46
MELLÉKLET.....	49

1. BEVEZETÉS

Az Országos Meteorológiai Szolgálat által jelenleg alkalmazott két villámdetektáló rendszer a SAFIR és a LINET. A SAFIR rendszer nagy előnye, hogy VHF (magas frekvencia) és LF (alacsony frekvencia) tartományban is végez méréseket, míg a LINET kizárólag az LF sávban detektálja a kisüléseket. Az alacsony frekvenciasáv előnyét képezi, hogy itt nagyobb távolságból érzékelhetők a jelek, magas frekvenciasávban viszont jóval több felhővillám detektálható. A két rendszer helymeghatározási pontossága eltérő mértékű. Korábban több tanulmány is kimutatta (lásd pl. *Dombai, 2007; Ádám, 2008*) hogy a SAFIR iránymérési eljárása az elméleti 1–2 km-es pontosságot nem adja vissza, a gyakorlatban akár 10–20 km-es hibákat is véthet. A LINET rendszer esetén egy másfajta technikát alkalmaznak a villámok helyének meghatározására, a kisugárzott jel beérkezési időkülönbségei alapján állapítják meg a pozíciót (a két módszer a 2.3. fejezetben kerül részletes bemutatásra). *Betz et al. (2009)* szerint a LINET rendszer pontossága hozzávetőlegesen 150 m. Mivel a két rendszer eltérő pontosságú, így a két módszer kombinálásával szeretnénk pontosabb villámpozíció eredményeket kapni.

A SAFIR és a LINET rendszer villám adatait feldolgozó lokalizációs algoritmusok fejlesztése lehetővé teszi, hogy a korábbi mérési eredményekből alkotott adatbázison egy új, kombinált eljárást alkalmazzunk. Az új technika már az LF csatorna adatait is felhasználja, ezáltal jóval pontosabban határozza meg a felhőn belüli, illetve a földbeeső villámok pozícióját.

Diplomamunkám elsődleges célja e kombinált eljárás kidolgozása és bemutatása, ami alkalmas lehet az Országos Meteorológiai Szolgálatnál történő gyakorlati alkalmazásra a SAFIR adatok utófeldolgozása során.

Mivel a villámadatokat feldolgozó központi egység zárt, így az új módszer nem integrálható real-time módon a rendszerbe. Ebből kifolyólag csupán archív adatok esetében alkalmazható, azonban villámklimatológiai, cellaazonosítási és cellakövetési szempontból fontos információt szolgáltat, valamint esettanulmányok elemzésénél is hasznosítható.

A munka során első lépésben a LINET adatokból minden egyes hazai SAFIR állomásra korrekciós görbéket szerkesztettünk, melyek segítségével pontosítottuk a SAFIR VHF irányméréseit, majd újra elvégeztük a SAFIR lokalizációt. A SAFIR VHF méréseket a SAFIR LF mérések alapján is korrigáltuk. Vizsgálataink során a cél a zivatarcellák elmozdulásának minél pontosabb nyomon követése és nem pusztán a villámok

helymeghatározása (ez esetben a LINET által használt beérkezési időkülönbségen alapuló módszer alkalmazásával pontosabb eredményeket kapnánk).

Ezután a SAFIR rendszer kétfajta korrekciójával kapott képeket összevettem a radargócokkal, így megkaptam, hogy melyik rendszer módosított eredményei hasonlítanak jobban a valósághoz.

Ádám (2008) kimutatta, hogy a radarképeknek nem a legintenzívebb részén van a legtöbb villámtevékenység, ezért nem a maximumokat hasonlítottam össze, hanem a zivatargócok haladását. Végeredményül egy radar és két villámlási (SAFIR VHF irányadatok korrekciója LINET (1) és SAFIR LF (2) adatokból) áthelyeződési sebességet kaptam, amelyek alapján világossá vált, hogy melyik módosított eredmény ad valósabb képet az eseményekről (radargócok mozgásáról).

E több lépésből álló folyamatot 3 esettanulmányra végeztem el (2009.07.18., 2010.08.13., 2010.08.15.). A bemutatott módszer azonban további archív adatbázisok pontosításához is alkalmazható lehet.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Habár főként hazai kutatási projektek számára lehet fontos a dolgozat eredménye, a nemzetközi szakirodalom is rendkívül fontos szerepet játszott a munka elkészítése során. Ennek egyik fő oka, hogy a helymeghatározási módszerek sikerességéhez minél több állomás adata szükséges. Így a Magyarország területére eső lokalizációba sokszor Szlovákia mérőhálózataival nyújtott információkat is beépítettünk.

2.1. A villámlás története

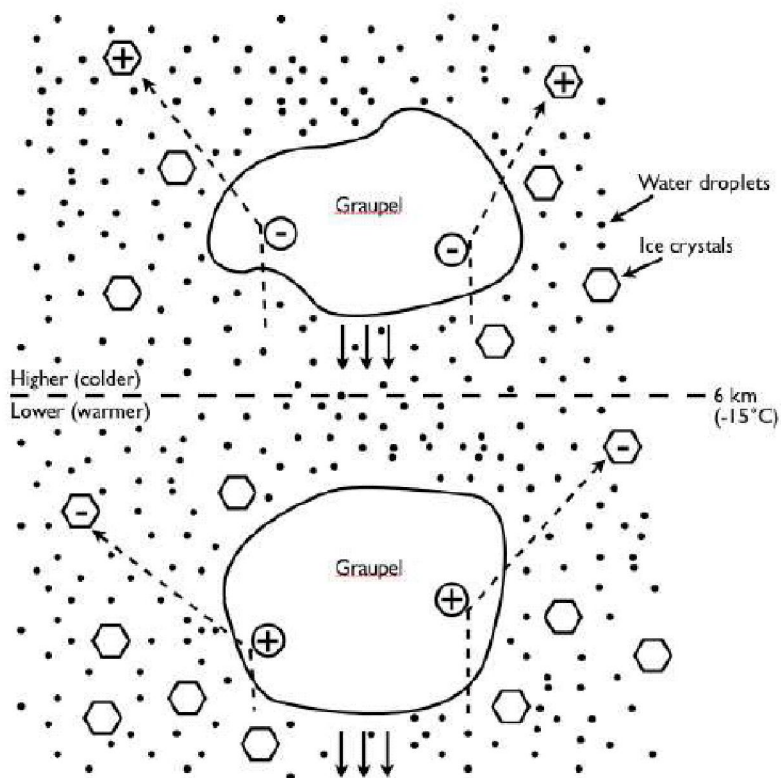
A különböző mitológiákban a mennydörgést és az időjárást istenként tisztelték (az ősi Egyiptomban Typhon, Kínában Tien Mu és Indiában Indra, de az egyik leghíresebb a görögöknél Zeusz, akit a villám szimbolizált). A villámlást, mint olyant, az emberiség történelmének egésze során már rengeteg civilizáció ismerte. Ráadásul megkövesedett bizonyítékok támasztják alá, hogy 250 millió éve is volt a Földön villámtevékenység. Ennél fogva ez egy ősidők óta jelen lévő jelenség, aminek hosszú életútjából és temérdek esetszámából arra következtethetünk, hogy a villámlás a molekulák kialakulásán keresztül vezetett az élet fejlődéséhez (*Poelman, 2010*).

A villámokkal foglalkozó kutatók még napjainkban is számos neves tudós úttörő munkájának eredményeit használják fel (pl. Franklin, Lemonnier és Wilson), melyek a viharok elektromos természetének mai megértéséhez vezettek. A következőkben egy rövid betekintést nyerhetünk a tudomány eme rendkívüli tevékenységi területébe (*Poelman, 2010*).

2.2. Villámlás kialakulása

Egy kisülés kialakulása igen összetett folyamat, mely különböző tényezőket foglal magába. A villámok felépítését illetően még ma is számos kérdés megválaszolatlan. Mindamellett a tudósok abban egyetértenek, hogy a villámlás létrejöttéhez a felhőn belül a töltött részecskéknak (negatív és pozitív) el kell különülniük egymástól, hogy egy erős elektromos mező keletkezhesen. Kérdés, hogy hogyan szerez a felhő töltést? A felhő elektromos töltöttségét az ún. graupel-jég folyamat magyarázza, miszerint a felhő előteremti a pozitív és negatív szemcséket. Röviden ez a mechanizmus azt állítja, hogy a

jobban zúzmarásodó graupel és a kevésbé zúzmarásodó jégkristályok ütköznek egymással és ezek a kolloid méretű részecskék felcserélik elektromos töltéseiket. Az 1. ábra szemlélteti, hogy a visszapattanó jégkristályok pozitív (negatív) töltésűvé, míg a graupel részecskék negatív (pozitív) töltésűvé válnak az ún. megfordítási hőmérséklet alatt (felett). Majd ezek a töltött részecskék a gravitáció szerint szeparálódnak, azaz a nehezebb csapadékszemcse (graupel) távolabb kerül a felhőtől, míg a könnyebb jégkristályok a feláramlás következtében a felhőben maradnak. A villámlás megkezdődésének előfeltételeként egy felső pozitív és egy alsó negatív tartomány jön létre (Poelman, 2010).



1. ábra. Töltéscicserélődés (ütközés által) a felhő elektromos töltöttségének graupel-jég mechanizmusában. Feltételezve, hogy 6 km magasan -15°C a megfordítási hőmérséklet (Rakov and Uman, 2003).

Ahogy az elektromosan töltött ajtókilincs érintése során egy kisebb áramütést tapasztalhatunk, ugyanúgy a szétválasztott pozitív és negatív részecskék között fellépő elektromos tér is kisülést okoz a felhő alja és a földfelszín közötti tér áthidalásával, csak figyelemre méltóbb az ereje. Amikor az elektromos erőter elér egy kritikus értéket, akkor hatalmas mennyiségű szabad elektron gyűlik össze, melyek egy elektronsugarat formálnak; ez a villámkisülés kezdete (Poelman, 2010).

2.2.1. A zivatarfelhők töltése

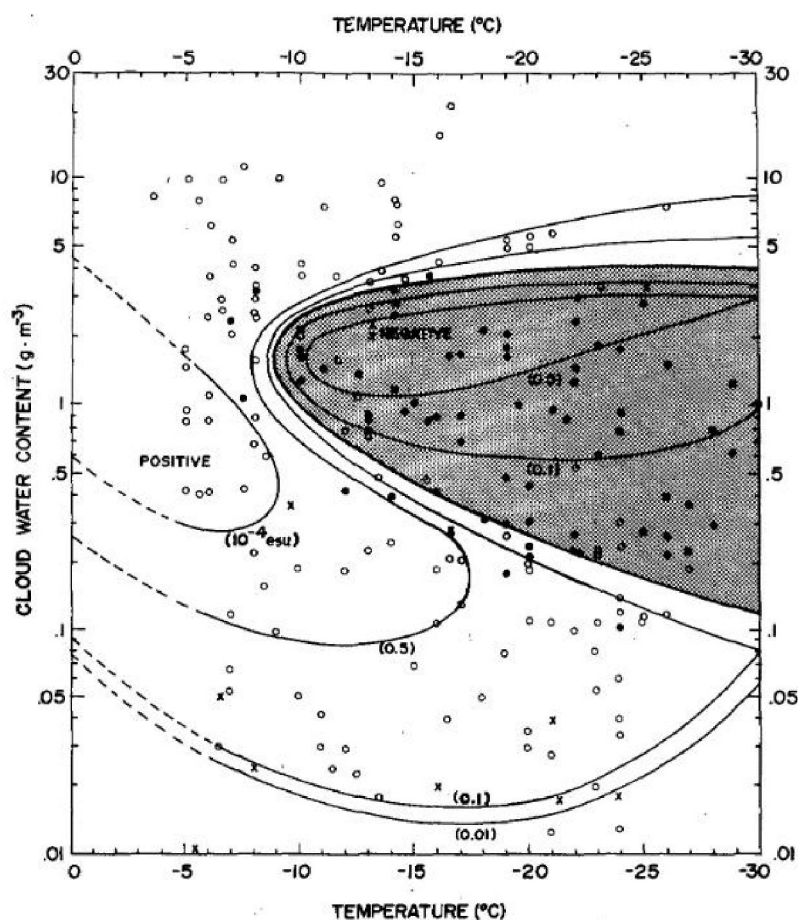
A zivatarfelhők elektromos töltését a vízcseppek és jégkristályok ütközései során bekövetkező töltésszétválasztódás, valamint a nem egyenletes feláramlás miatti részecskeszeparálódás (feltöltődő részecskék) okozza. Összességében a zivatarfelhőkben egy hármass elektromos pólus alakul ki, mely a következőképpen néz ki:

- gyenge pozitív réteg a felhőalap szintjén
- erős negatív töltésű zóna kb. 6 km-es magasságban
- pozitív töltésű zóna 8–12 km-es magasságban.

A leírak miatt a zivatarfelhők alján kicsi, a magasban pedig néhány 100 kV/m erősségű elektromos tér jön létre. A feltöltődés folyamata egy konvektív cella esetében nem tart tíz percig sem (*Szonda és Wantuch, 2001*).

Az egycellás zivatarok karakterisztikus ideje kevesebb, mint 30 perc, ami abból a szempontból jó, hogy hamar leépülnek, azonban ez sajnos azt is jelenti, hogy ennyi idő alatt szinte a semmiből képesek felépülni. Emellett, mivel a villámnak nincs konkrét előjele, nem határozható meg, hogy hol fog kipattanni, ezért a veszélyjelzők munkáját nagymértékben megnehezíti.

A zivatarfelhő tripólusos szerkezetét az ún. neminduktív töltésszétválasztódási elmélettel magyarázhatjuk (*2. ábra*), miszerint a jégzemcsék és jégkristályok ütközéseikor kialakuló töltésváltozás előjele a hőmérséklet és a vízgőztartam függvénye. Hidegebb zónában a lefelé hulló nagyméretű jégzemcsék a $-10 - -20$ °C-os kritikus hőmérsékleti értéknél negatív töltésűvé válnak, a felfelé sodródó kicsiny jégkristályok pedig pozitív töltésűek lesznek (melegebb zónában fordítva). A kritikus hőmérsékleti szinten negatív töltés halmozódik fel. Megfigyelések szerint az intenzív feláramlás biztosítja a túlhűlt vízcseppek utánpótlását, így a jégzemcsék növekedését valamint szaporodását is, ezért ebben a rétegben alakul ki a legtöbb villámlás (*Takahashi, 1978*).



2. ábra. A zivatarfelhő tripólusos szerkezetét magyarázó neminduktív töltésszétválasztódási elmélet. A felhő vízgőztartamának változása a hőmérséklet függvényében (Takahashi, 1978).

A villámlási adatok jelentősége abban rejlik, hogy a zivatarok legaktívabb részének kirajzolásával elősegítik a potenciálisan veszélyes zónák azonosítását. Ezen kívül folyamatosan elérhetőek, így a periodikus megfigyelőrendszerek mérései között is rendelkezésünkre áll valamilyen információ. Ez a tulajdonság a zivatarok fejlődésénél kiemelt jelentőségű, mivel a villámlási adatok a növekedési szakaszban a leggyorsabban fejlődő cellákat segítenek beazonosítani, míg a mature szakaszban a kiterjedt felhőzet esetén a még aktív zónákat képesek kirajzolni számunkra (Richard and Kononov, 2001).

Érdekességgént célszerű megemlíteni, hogy a villám színe segít meghatározni a környezet légköri viszonyait. A vörös szín azt jelzi, hogy a felhő esőt hordoz, a kék szín hasonlóképpen a jégeső jelenlétére utal. Ha a villám sárga, akkor a légkör porral telített, ha pedig fehér, akkor alacsony a levegő páratartalma (ilyenkor a felszínbe csapó villámok gyakran tüzeket okoznak) (Buckley et al., 2005).

2.2.2. Zivatarrendszerekben fellépő villámlás feltételei

Egy zivatarfelhő (Cb) kialakulásához alapvetően 3 dolog szükséges: a levegő instabilitása, nagymértékű páratartalom és valamilyen trigger hatás, ami a légrésezecskét arra készíti, hogy felemelkedjen. Ez utóbbi lehet például orografikus emelés, frontális növekedés illetve a napsugárzás hatására beinduló konvekciós folyamat is.

Mona (2013) ismertette, hogy milyen meteorológiai paraméterek idézik elő a fent említett feltételeket. A magas szinteken megjelenő nagymértékű divergencia értékek, a közepes magasságban kialakuló pozitív örvényességi advekció és az alacsony szinteken jelentkező erőteljes melegadvekció együttes hatásaként létrejön a konvekció, ami a zivatarfelhő kifejlődésében triggerként vesz részt. A hidegfrontok előtti labilis helyzet hatására lokálisan zivatargócok pattanhatnak ki. A zivatarcella előtt elhelyezkedő konvergencia vonal elszívja a zivatarcellát fenntartó energiát, aminek eredményeképp a Cb leépülése következik be. Szupercellák esetében a villámlási csúcs elérése után jóval csekélyebb elektromos aktivitás tapasztalható. A villámok száma éves periodicitást mutat, miszerint télen a lecsapó villámok aránya jóval alacsonyabb, mint a zivataros nyári időszakban.

2.2.3. Konvektív paraméterek vizsgálata

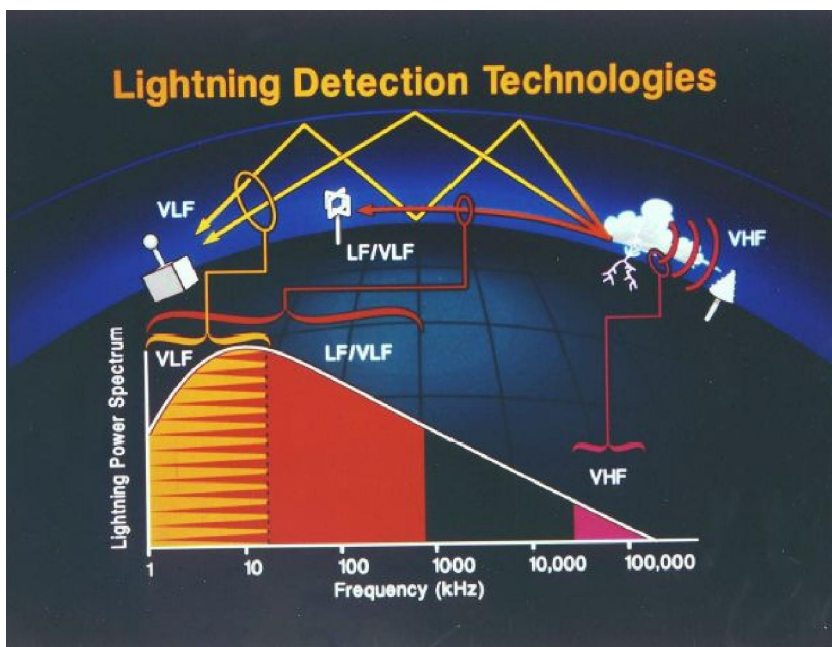
Mivel a vagyoni károk jelentős részét a konvektív időjárási jelenségekhez kapcsolódó viharos szellőkések (70 illetve 90 km/h-nál nagyobb erejű) okozzák, így igen fontos ezeket megvizsgálni közelebbről. A zivatarrendszer sebessége maximális, ha a cellamozgást vezérlő magassági áramlatok és a rendszer terjedéséért felelős alacsonyszintű szélnyírás-vektor egybeesik. Ennek a gyors terjedésnek a minél pontosabb meghatározása a cél, hiszen mindenki arra kíváncsi, mikor fog egy adott terület fölé érni a zivatarcella. Az 1980-as években *Rasmussen and Wilhelmson (1983)* megállapították, hogy a nem forgó jellegű zivatarok kis CAPE (konvektív hasznosítható potenciális energia) és szélnyírás értékekkel bírnak, míg a forgó (tornádókat eredményező) zivatarok nagy CAPE és szélnyírás értékeket vesznek fel. A zivatarok horizontálisan inhomogén környezetben fejlődnek. A zivatartevékenység során a nedvesség függőleges rétegződése teljes egészében átalakul, a labilitás mértéke (időnként csupán ideiglenesen) lecsökken, akárcsak a felszíni hőmérséklet értéke, a konvektív paraméterek értékei módosulnak stb. Így tehát

abban sem lehetünk biztosak, hogy az általunk vizsgált légtömeg volt-e az, amelyből a zivatar kifejlődött. Továbbá mivel a zivatarrendszerek a mezoskála meteorológiai objektumai és a rádiószondás mérések csupán a szinoptikus skálájú folyamatokat képesek leírni, így a rádiószondás vizsgálatok nem tekinthetők reprezentatívnak ebben a témában (Kohlmann, 2013).

Diplomamunkám célja ennek a problémának a kiküszöbölése a radarmérések áthelyeződés-vektorainak vizsgálatával.

2.3. Módszerek a villám helyének meghatározására

A villámcsatorna egy sugárforrás, mely egy rádióadóhoz hasonlóan működik, így alacsony (LF) és magas (VHF) frekvenciákon is sugároz jeleket (a 3. ábrán szemléltetve), amiket speciális mérőeszközökkel detektálnak, így tudják meghatározni a villámlások helyét.



3. ábra. A villám által kisugározható jelek spektruma a frekvencia függvényében (www.aldis.at).

A helymeghatározás két alapvető típusát az alábbiakban mutatom be röviden.

Iránymérés (háromszögeléses módszer):

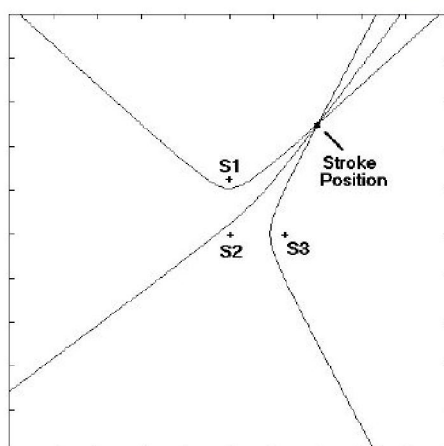
A felszín felett nagyobb magasságban elhelyezett 3, 4 vagy 5 ágú antennarendszerek interferometrikus mérési elven működnek. VHF tartományban (ahol nincs zavaró jelforrás) mérik a beérkező jel fáziskülönbségét a jel irányával arányosan. Az adatokat a központi

egységben gyűjtik, melyek alapján háromszögeléses módszerrel számítható az irányok metszéspontja $0,35^\circ$ pontossággal. Egy adott állomás hatótávolsága mintegy 250 km (http://www.met.hu/ismertetok/OMSZ_villamlokalizacios_rendszere.pdf).

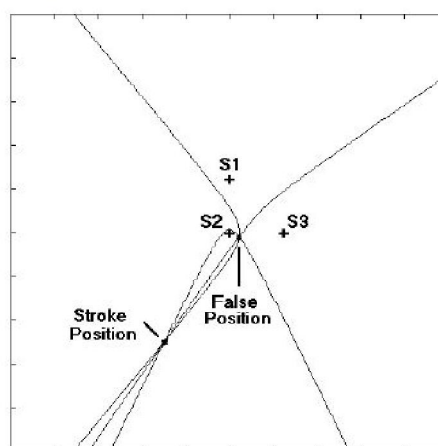
TOA módszer (beérkezési időkülönbség):

Ezen állomások rendkívül pontosan tárolják a villámlás időpontját (GPS segítségével szinkronizálva). Mivel a rádiójel az adott állomásokra különböző időpontokban érkezik, így a jelek közötti időkülönbségek alapján kapott – az állomások közé illesztett – hiperbolák metszéspontja határozza meg a villám pozícióját. „A hiperbola azon pontok mértani helye a síkon, melyeknek két rögzített ponttól vett távolságai különbségének abszolút értéke a két pont távolságánál kisebb állandó” (Kiss, 2004). Tehát a TOA eljárás lényege, hogy az időkülönbségekből számított terjedés távolságkülönbséget is jelent. Elsősorban nagy energiájú kisüléseket detektálnak ezzel a technikával. A 4. ábrán jól látható, hogy a TOA módszer alkalmazása során 3 állomás nem elegendő az egzakt méréshez, mivel 3 állomás esetén az illesztett hiperbolák két metszéspontot is meghatározhatnak (4. ábra jobb oldali kép). Ahhoz, hogy az eredmény ne lehessen kétértelmű (a hiperbolák csak egyetlen metszéspontot határozzanak meg) legalább 4 állomás mérésére van szükség (http://www.met.hu/ismertetok/OMSZ_villamlokalizacios_rendszere.pdf).

A TOA módszert regionális hálózatokban Bent and Lyons (1984) illetve nagy-távolságú villámdetektálás Lee (1986. a, b; 1989) alkalmával is igénybe veszik.



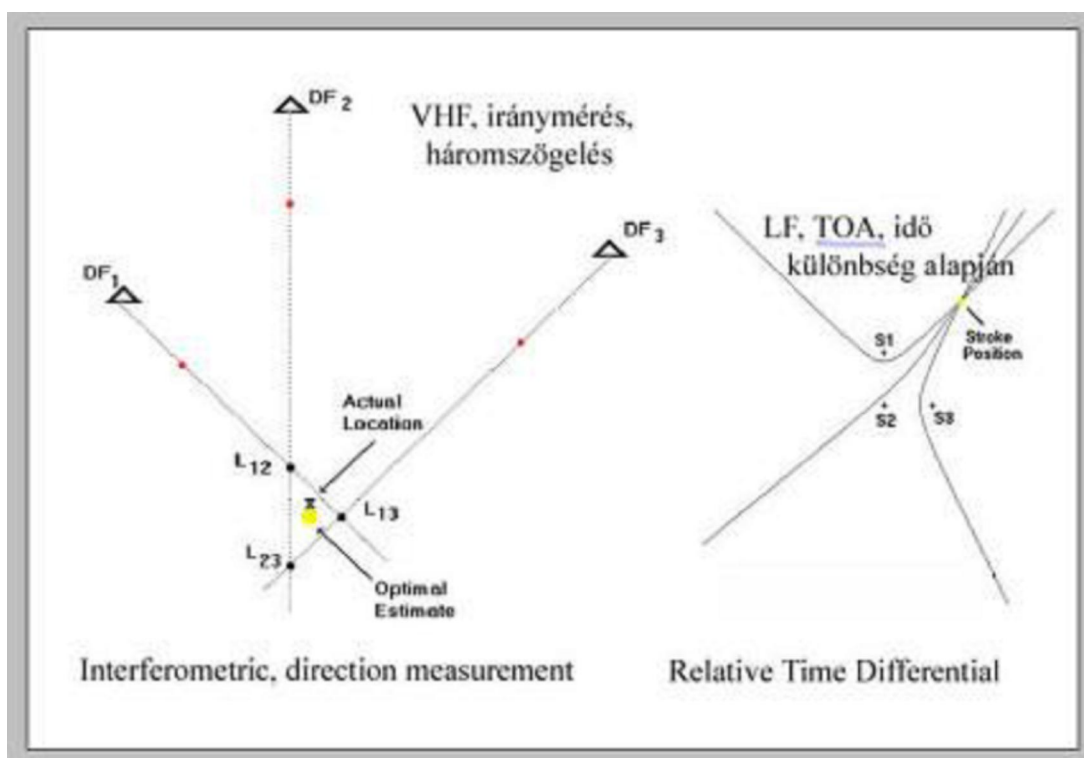
Hyperbolic intersection method for locating lightning using three sensors.



Example of an ambiguous location for a three-sensor hyperbolic intersection.

4. ábra. A TOA módszer során alkalmazott hiperbolák metszéspontja 3 állomás esetében. Részletes leírás a szövegben (<http://www.aldis.at/en/>).

Az iránymérésen és az időkülönbségen alapuló lokalizációs módszerek sematikus összehasonlítását az 5. ábra mutatja be.



5. ábra. A háromszögeléses és a TOA módszer összehasonlítása (<http://www.met.hu/>).

Mivel a villámok mérésére nehéz felkészülni, hiszen a térben szinte véletlenszerűen bárhol megjelenhetnek, így sosem lehet tudni mikor és hol bukkannak majd fel. Szerencsére a villámnak azonban van egy olyan tulajdonsága, amit jól lehet mérni, ez pedig az elektromágneses sugárzás, mely egy adott frekvencián történik. A kisülésnek ezt a sajátosságát jól ki lehet használni a mérések hatékonyabbá tételében, ezzel kiküszöbölve a „meglepetés erejét”. Mivel a háromszögeléses illetve a TOA módszerrel egy adott pontot szeretnénk meghatározni, így eme technikák segítségével remek módon meg lehet közelíteni a villámok fent említett attribútumát.

A villámlás helyének és alapvető elektromágneses paramétereinek (térerősség, csúcásáram, energia, időbeli lefolyás, polaritás stb.) meghatározása a kibocsátott elektromágneses sugárzás (villamos és mágneses tér érzékelése) alapján történik. A helymeghatározás pontosságát nem csak az eszközök mérési hibája ronthatja, hanem a villámlási csatorna több kilométer hosszú, szerteágazó léte is (mivel az elektromágneses jelek terjedés közben torzulnak, így a villámlás elektromágneses paramétereinek meghatározása nehézkessé válik). A sugárzás detektálására két frekvenciatartományt alkalmaznak: alacsonyabb (LF, hurokantennák segítségével) illetve magasabb (VHF, dipól antennákkal). Csak az utóbbi eset biztosítja megfelelően a zivatarok teljes elektromos aktivitásának hatékony megfigyelését. A villámfigyelő rendszer az alábbi részekből épül fel:

- szenzor (antenna, vevő és jelfeldolgozó egységek), mely érzékeli a kisülések által keltett elektromágneses hullámokat, rögzíti az időbeli lefolyást és megadja a jelforrás irányát;
- a vevőegységet és a központi egységet összekötő adatátviteli vonal;
- központi számítógép, mely a kapott adatok alapján képes meghatározni a kisülés helyét és a villámlás elektromos paramétereit, illetve az eredmények megjelenítése után minden információt elment (*Dombai, 1998*).

2.4. Földbázisú villámdetektáló rendszerek

Mivel a villámtevékenység sok – a földi életet befolyásoló – folyamattal áll kapcsolatban, így minél pontosabb meghatározása a célunk. Többek között intenzív felhőcellák és időjárási frontok helyét mutatják meg, valamint a klímaváltozásra utal a villámaktivitás módosulása is (<http://www.sgo.fomi.hu>).

A villámok vizsgálata és folyamatos megfigyelése elengedhetetlen:

- zivatarok villámtevékenységének detektálásából és előrejelzéséből származó balesetveszélyes időjárás esetén fennálló általános figyelmeztetések kiadásánál (beleértve a légi közlekedést és a reptér épségét);
- a villámlás által létrehozott nitrogén-oxidok klímára gyakorolt hatásának összehasonlításánál a földi életből eredő forrásokkal vagy a légi közlekedés által termelt mennyiséggel az űrbéli villámlás mértékének meghatározásánál (<http://www.pa.op.dlr.de>).

A villámok detektálásának két fő típusa: az optikai megfigyelés (műholddal) és a villamos jel rögzítése. Az optikai monitorozás fő előnye a kalibrált átlag-gyakoriság eloszlási kép, nagy hátránya viszont, hogy a műhold pályához kötöttsége miatt térben korlátozott képet kapunk (amelyen az egyedi villámok azonosítása nehézkes), és ennek a képnek a létrejöttét jelentősen korlátozza még a felhők takaró hatása is. Az ún. szférikusz a földfelszín mentén haladó szélessávú elektromágneses impulzus, amit a kisülések gerjesztenek. Ennek a jelnek az alacsonyfrekvenciás része a Föld és az ionoszféra közötti térben több, mint tízezer kilométerre is eljuthat, míg a 100 kHz-nél nagyobb frekvenciás részét az állomástól csupán kevesebb, mint 1000 kilométerre tudjuk detektálni. Eme paraméterek befolyásolják a mérőhálózat sűrűségét. A különböző mérőrendszerek megbízhatósága a villámot jellemző paramétereket (kisülés típusa, magassága, földrajzi koordinátái) illetően igencsak változó (<http://www.sgo.fomi.hu>).

Ebben a fejezetben rövid áttekintést adok az Európában működő különböző villámlás lokalizációs rendszerekről és azok pontosságáról. Az Athéni Nemzeti Observatórium által üzemeltetett nagy hatótávolságú ZEUS rendszer adatait *Lagouvardos et al. (2009)* összehasonlította Közép-Nyugat-Európa LINET adataival (itt mutatják a legnagyobb megbízhatóságot). A munka eredményeként azt kapták, hogy a rendszer villám lokalizációs pontossága 7 km, ezáltal a detektálási hatékonyság csupán 25%. Az 1980-as években szerveződött ATDNET rendszer (az Egyesült Királyság Meteorológiai Szervezete üzemelteti) megtalálható egész Európában, Észak-Afrikában, az észak-atlanti térségben, valamint Dél-Amerika nagy részén. Számos tanulmány (köztük *Keogh et al., 2006*) kimutatta, hogy míg Európa területén megközelítőleg 2–3 km-es pontossággal detektálja a rendszer a villámok pozícióját, addig Afrikában csupán 5 km-es precizitást képes produkálni a beérkezési időkülönbségen alapuló ATDNET hálózat. Az Észak-Spanyolország területén használatban lévő METEOCAT/SMC rendszer térbeli pontossága 1–2 km-esnek becsült, ami *Montanya et al. (2006)* tanulmánya alapján 86–92%-ban

elegendő a földvillámok sikeres meghatározására. Az osztrák meteorológiai szolgálat által üzemeltetett villámlásdetektáló és információs rendszer (ALDIS) kizárólag földbeecsapó villámokat érzékel. *Diendorfer et al. (1992)* munkája alapján azt mondhatjuk, hogy az ALDIS hálózat átlagosan 1 km-es pontosságot meghaladva képes meghatározni a villámlások helyét. *Betz et al. (2009)* számos eseten keresztül bebizonyította, hogy a LINET rendszer helymeghatározási pontossága hozzávetőlegesen 150 m (ami által az eddigi legmegbízhatóbb lokalizációs rendszernek számít) (*Poelman, 2010*).

2.5. Hazai villámláslokalizáló rendszerek: SAFIR és LINET

A két rendszer közti fő különbség, hogy míg a SAFIR VHF és LF tartományban is végez méréseket, addig a LINET kizárólag az LF sávban detektálja a kisüléseket. Az alacsony frekvenciasáv előnyét képezi, hogy itt nagyobb távolságból érzékelhetőek a jelek, mint a VHF tartományban, valamint a lecsapó villámok jellemzően az LF sávban detektálhatók.

2.5.1. SAFIR

A SAFIR (Surveillance et d'Alerte Foudre par Interferométrie Radioélectrique) villámláslokalizáló rendszer 1998-ban az előrejelzési célú megfigyelőhálózat harmadik tagjaként (a másik kettő a műhold és a radar) épült ki. Adatai többek közt az OMSZ-nél található HAWK (Hungarian Advanced Workstation, Meteorológiai Munkaállomás) program segítségével érhetők el. Feladata a veszélyjelzések és előrejelzések segítése, valamint a zivatarok villámtevékenységének kiterjedt és nagy pontosságú lokalizációs vizsgálata volt, azonban működésével kapcsolatban rengeteg probléma merült fel. Többek között a SAFIR szisztematikus hibája miatt sokszor akár 15–25 km-es különbségek is tapasztalhatók a radar reflektivitási gócai és a villámlási gócok között. Mérési adatainak megkérdőjelezhetősége miatt komoly kérdésként merült fel, hogy leállítsák-e, amire végül is a 2.6. fejezetben részletesen bemutatott F.L.A.S.H. projektbe való csatlakozás (Vaisala cég támogatta) miatt nem került sor. Ugyanis az imént említett munkafolyamat eredményeképp a mérések megbízhatósága javulni látszott (*Dombai, 2007*).

A SAFIR a VHF és LF sávban is folyamatosan érzékeli a jeleket, és tudjuk, hogy a lecsapó villámok jellemzően az LF sávban detektálhatók, így ha a magas frekvencia

mellett az alacsonyban is látható jel, akkor a rendszer földvillámnak tekinti az adott kisülést. Tehát a SAFIR két érzékelője különböző feladatokat lát el: a VHF a mérő szenzor, az LF pedig az ún. diszkriminációs szenzor (ez dönt arról, hogy egy bizonyos kisülést felhő- vagy földvillámként regisztrál-e a rendszer)

(http://www.met.hu/ismertetok/OMSZ_villamlokalizacios_rendszere.pdf).

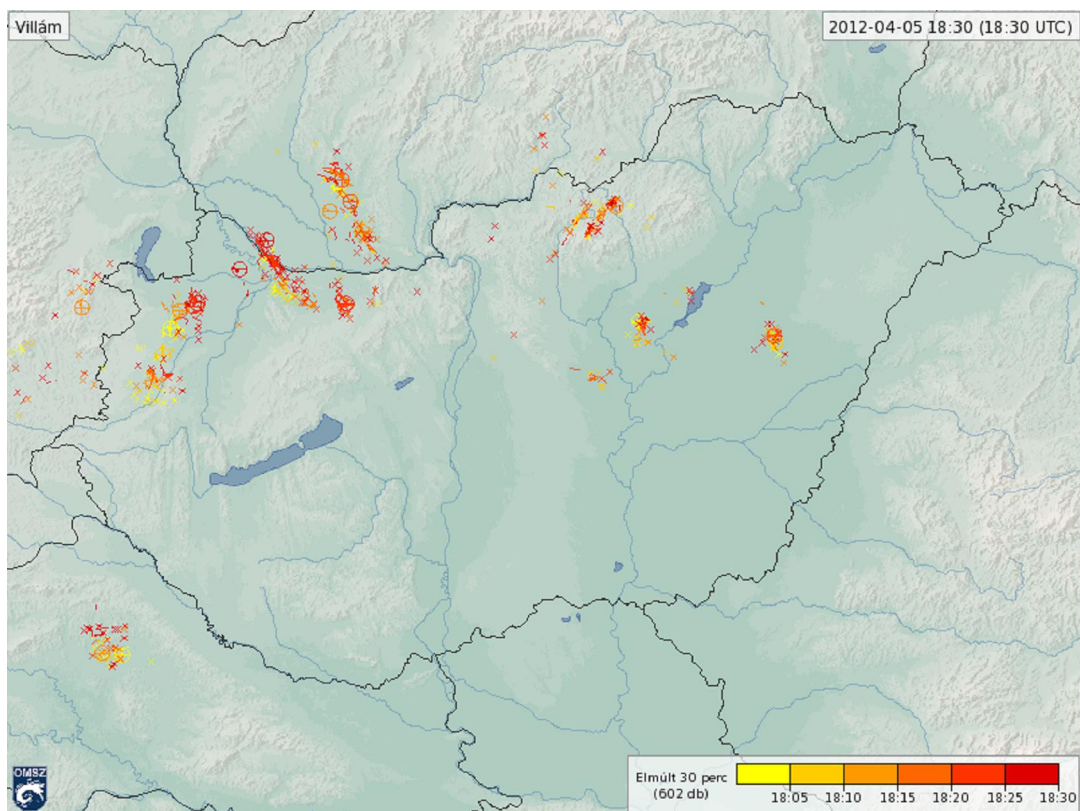
A villámklimatológiai vizsgálatok esetében nagy változékonyságra kell számítani, mivel a villámlás fellépése egy nap folyamán meglehetősen koncentrált, így a statisztikailag szignifikáns eredmények eléréséhez igen nagy megfigyelési periódus szükséges. A SAFIR méréseire vonatkozó villámklimatológiai elemzéseket végzett *Wantuch (2004)*. A tébeli és időbeli egyenletesség hiánya miatt a különböző hálózatok detektálási hatékonysága más és más, ami nem teszi lehetővé a szakszerű összehasonlíthatóságot, így a reprezentatív statisztikai eredményeket sem. Azonban a rendszerek integrálása javít ezen a helyzeten, e célkitűzések mentén indult kezdeményezés a F.L.A.S.H. projektre (mely eleinte hatékonyan működött, ám hosszútávon sikertelennek bizonyult) és a LINET hálózat kiépítésére (*Dombai, 2007*).

A SAFIR adatok megbízhatósági kérdéseiről, valamint mérési hibáinak részletes elemzéséről *Dombai (2007)* nyújt bővebb információt. A HAWK program – melyet az OMSZ 2000-ben fejlesztett ki – a villámlási adatok integrálásával többek között a villámértékek operatív megjelenítő eszközévé is vált. Ezen jól látták az előrejelzők, hogy sokszor nem szolgáltat megfelelő megbízhatóságú adatokat. *Dombai and Richard (1998)* igazolták, hogy a felhővillámok aktivitási csúcsa időben előbb jelenik meg, mint a radaron a csapadékintenzitás maximumértéke. Mivel azt is tapasztalták, hogy a budapesti állomás környékén sokszor tapasztalható a magas frekvencián zaj érték, ezért a budapesti antennát áttelepítették Bugyi település mellé. Ezen felül 2001-ben két szlovákiai állomást is a rendszerbe kapcsoltak (Maly Javornik, Losonc), azonban ennek ellenére sem növekedett a SAFIR megbízhatósága kellő mértékben. 2004. nyarán működése rendkívül megbízhatatlanná vált, ezért az év végén le akarták állítani a méréseket, amit végül a 2005-ben indult F.L.A.S.H. projekt mentett meg (*Dombai, 2007*).

Dombai (2007) vizsgálatai azt mutatták, hogy számos esetben a SAFIR és a meteorológiai radar mérései nagyon eltérőek a gócok helymeghatározásának tekintetében. Ezért kell nagy hangsúlyt fektetni a mérési pontatlanságok kiküszöbölésére, amit e dolgozat keretében módszerfejlesztéssel igyekszem korrigálni. A SAFIR fent említett problémái miatt, valamint a rendszerek integrálása – és így a szakszerűbb összehasonlíthatóság elérése – érdekében a LINET rendszer villámadatait is bevontam a

vizsgálatomba. Habár tudjuk, hogy a SAFIR megbízhatósága többek között *Dombai (2007)* művének köszönhetően jelentősen javult a szisztematikus lokalizációs hiba korrigálható volta miatt (munkája során a SAFIR korrekcióját végezte el), azonban fontos vizsgálati tárgy lehet más rendszerek bevonása is. Jelen dolgozatban tehát egy új módszer kifejlesztéseként a SAFIR VHF irányadatait nem csupán a SAFIR LF hibaértékeivel korrigálom, hanem a LINET LF eltéréseivel is.

Egy átlagos villámtérkép negyedóránként készül és az elmúlt 30 perces időszakot mutatja. A kép jobb alsó sarkában látható színskála megmutatja a villám észlelési idejét (citromsárga a legrégebbi és piros a legfrissebb), ennek segítségével nyomon lehet követni egy zivatarcella mozgását. A villámtérképen megtalálható az utóbbi 30 percben előforduló villámlások összege (felhő- illetve földvillám együttvéve). A kép jobb felső sarkában a legutóbbi frissítés időpontja található. A felhővillámokat pont vagy X jelöli, míg a földvillámokat polaritásuknak megfelelően bekarikázott + illetve – jel. A vázolt jelölések alkalmazására egy példát a 6. ábrán láthatunk (http://www.met.hu/ismertetok/OMSZ_villamlokalizacios_rendszere.pdf).



6. ábra. A villámtérképek használata során alkalmazott jelölések (<http://www.met.hu/>).

2.5.2. LINET

2008. februárjában az ELTE Űrkutató Csoportja Pencre (Váctól keletre) telepített egy LINET (Lightning Detection Network, német villámdetektáló hálózat) mérőállomást (<http://www.sgo.fomi.hu>).

A LINET rendszer VLF-LF tartományban végez méréseket és Dél-Németország, valamint Közép-Európa térségét fedi le. Magyarországon a penci állomáson kívül a későbbiekben Pécsen, Szegeden, Sopronban és Debrecenben telepítettek LINET antennákat. A mérőállomások érzékelői keresztthurkolt mágneses antennák, melyek szélessávú jelét és a szférikusz időtartományát egy DSP HW (Digital Signal Processing Hardware) érzékeli. A szférikusz jeléből kapott paraméterek automatikusan a feldolgozóközpontba futnak be a hálózaton keresztül. A szférikusz által nyújtott TOA adatokból (beérkezési idők, a 2.3. fejezetben részletesen tárgyalva) megkapjuk a kisülés idejét és annak háromdimenziós koordinátáit. A magasság koordinátából a villám típusát állapítja meg, azonban polaritását, áramértékét és tagoltságát még nem képes azonosítani a rendszer. A LINET rendszer kis sávszélességen (és folyamatosan) üzemel (max. 128 kbit/s) és közel real-time (nowcasting) üzemű (<http://www.sgo.fomi.hu>).

A LINET antenna két merőlegesen tájolt fémgyűrűből áll, ezek mérik a villámlás által kibocsátott mágneses mezőt. A légköri villámlás a konvektív felhőkben lévő töltési folyamatok következtében fejlődik ki. A kisüléseket alapvetően az az egy dolog különbözteti meg, hogy amíg a földvillámok töltést cserélnek a felhő és a földfelszín között, addig a felhővillámok nem teremtenek kapcsolatot a földfelszínnel. A folyamat során a villámcsatorna elektromágneses hullámokat emittál. A LINET rendszer a spektrum VLF és LF frekvenciatartományában tud detektálni felhő- illetve földvillámokat (<http://www.pa.op.dlr.de>).

A LINET egy rendkívül érzékeny hálózat, amely háromdimenziós felbontóképességgel dolgozik. A rendszer hatékonysága lehetővé teszi, hogy szokatlanul kis amplitúdójú érzékelési teljesítménnyel rendelkezzen. Kb. 10 kA alatt egy nagyságrenddel több jelet képes azonosítani, mint a hagyományos rendszerek azonos feltételek mellett. Amióta nagy mennyiségű felhővillámot észlelnek, a felhővillámok hatékony megkülönböztetése szükségsszerűvé vált. A választott megoldás az új 3D technikát alkalmazza, mely független a beállítható paraméterektől. A villámcsapások horizontális és vertikális pozíciójának meghatározására elsősorban a TOA módszert

alkalmazzák. A rendszert az LMU (Ludwig-Maximilian Universität, München) fejlesztette ki. A hálózatot a DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Német Légiirányítási Központ) üzemelteti az LMU-val összefogva (<http://www.pa.op.dlr.de>).

A LINET villámdetektáló rendszer kifejlesztésének köszönhetően az előrejelzés kivételesen eredményessé és precízzé vált. A minőségi előrejelzésben vezetőként szolgáltat adatokat meteorológiai szolgálatoknak, energiaszolgáltatóknak, biztosítóknak valamint számos más villámadatot széles körben alkalmazó megbízható ágazatnak is (<https://www.nowcast.de>).

A LINET rendszerből származó nyers real-time villámlási adatokat a felhasználói rendszerekbe lehet integrálni és információit további forrásadatokkal lehet kombinálni. Az interneten keresztül a felhasználók különböző formátumú real-time fájlokhoz férhetnek hozzá. Ezen túlmenően az észleléshez hozzátartoznak standard információk, mint az idő és a villámáram. A LINET megbízhatóan meg tudja különböztetni a felhővillámokat a földvillámoktól, és még akár a felhővillámok kisülésének magasságát is képes megállapítani.

A LINET rendszer előnyei:

- számszerű real-time adatok,
- könnyen kezelhető formátumok,
- lényeges részletek minden egyes villámeseményről:
 - dátum és idő (μ s),
 - földrajzi koordináták,
 - villámáram,
 - kisülés típusa: felhővillám vagy földvillám,
 - felhővillámok kibocsátási magassága,
 - a helymeghatározás pontosságának becslése.

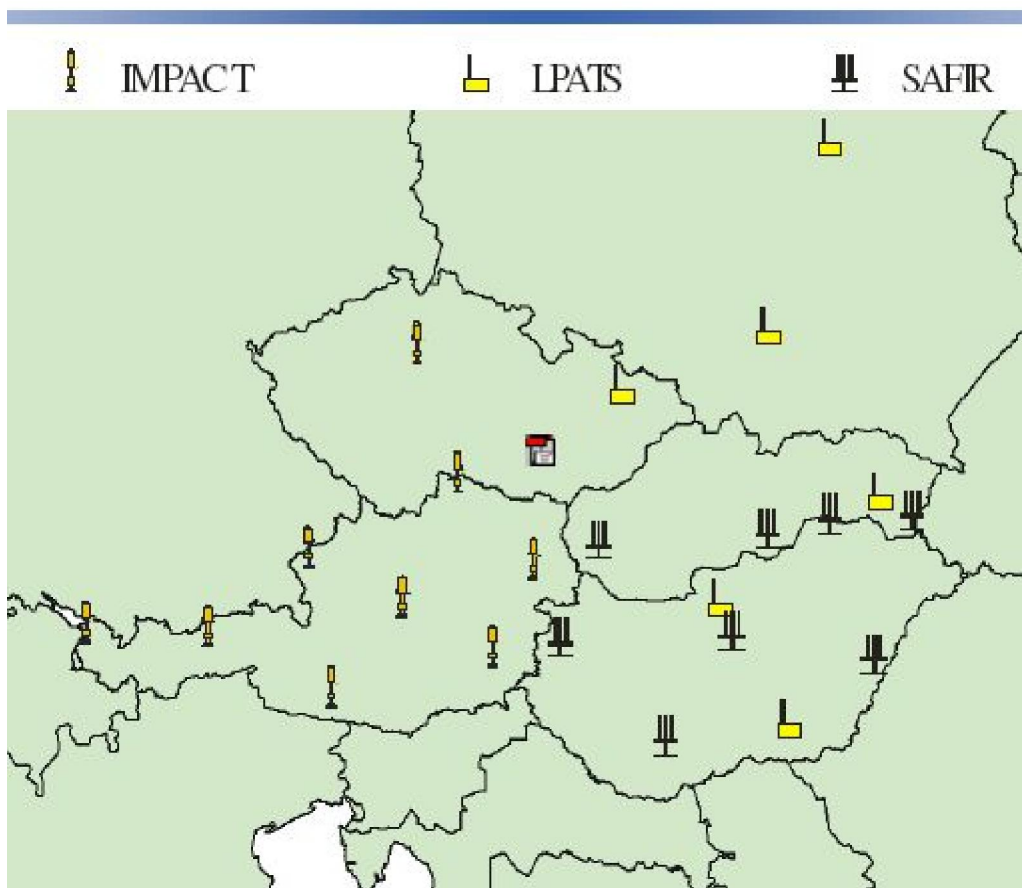
Ezen adatokat például független meteorológiai szolgálatok és állami tulajdonú szolgáltatók integrálják a saját időjárási adataikba, továbbá megjelenítő programjaikba. Egyéb meteorológiai adatokkal (mint például radar) kombinálva – különösen a villámfigyelő rendszer real-time kijelzője – ad valódi becslést, amikor az időjárás észleléséhez kockázati lehetőséget is hozzárendel. Az energiaszolgáltatók a real-time típusú numerikus villámadatokat a saját ellenőrző programjukba építik be. Üzemzavar esetén automatikusan ellenőrzik, hogy a szóban forgó időpontban az érintett távvezeték vagy csővezeték közelében történt-e kisülés. Ily módon a meghibásodás eme gyakori oka hitelesen igazolható, és amennyiben szükséges, az üzemelés azonnali újrakezdése is lehetséges.

Minden időjárásfüggő részleg számára hasznosak a LINET által nyújtott adatok. Legyen szó akár a várható terhelések becsléséről, a kültéri működés biztosításáról, vagy a villám okozta kár analizálásáról: az előrejelzés LINET adatai valódi lehetőséget kínálnak a folyamatok optimalizálására és a költségek csökkentésére. További felhasználói csoportok: vasúttársaságok, szél erőművek, olajvezetékek vagy nagyfeszültségű hálózatok üzemeltetői, szabadtéri és beltéri rendezvények szervezői, és minden egyéb időjárásfüggő ágazat, ami ellenőrzi az időjárásra érzékeny berendezéseket (<https://www.nowcast.de>).

2.6. Közép-Európa villámérzékelő rendszere: A F.L.A.S.H. projekt

Ausztria, Szlovákia és Magyarország lefedettségét 2004-ig két regionális villámfigyelő (SAFIR: föld- és felhővillámok is) és egy földvillám-érzékelő hálózat (EUCLID hálózat része) biztosította. 2005. januárjában azonban megkezdődött az ún. F.L.A.S.H. (Full Lightning detection Austria Slovakia Hungary) projekt (Ausztria, Szlovákia és Magyarország teljes területére kiterjedő villámérzékelés). A projekt egyik célja a különböző hálózatok egyesítése és a Vaisala új központi processzorának (CP8000, amit az ALDIS üzemeltet) használatba vétele volt. A munka során egy VHF szenzort (LS8000) is üzembe helyeztek (Bad Vöslau-ban, Ausztria), hogy Kelet-Ausztria felé kiterjesszék a lefedettséget. A hálózat 9 VHF szenzorból (8 különböző SAFIR verzió és egy LS8000) és 24 LF szenzorból (8 IMPACT, 7 LPATS, egy LS7000 és 8 SAFIR LF szenzor) állt (*Schulz and Lojou, 2005*). A lefedett terület térképes vázlatát a 7. ábra mutatja. Az ábrán feltüntetett szenzortípusok: IMPACT, LPATS (Lightning Position and Tracking System) és SAFIR. A F.L.A.S.H. projektben csak Ausztria, Szlovákia és Magyarország vett részt, a 7. ábrán Lengyelország és Csehország csupán azért van feltüntetve, mert a projektet koordináló Ausztriába futnak be ezen országok villámadatai is (ezek azonban nem képezik a F.L.A.S.H. projekt részét).

FLASH Network



7. ábra. A F.L.A.S.H. projekt által lefedett terület (Schulz and Lojou, 2005).

A F.L.A.S.H. projekt hibája az volt, hogy a hangsúlyt az LF TOA módszerre fektették, és egy adatbázisból kétféle eredményt (LF TOA-val kapott és SAFIR VHF-el kapott adatokat) ábrázoltak, ami a megjelenítés során rendkívül zavaró volt. A projekt jól rámutatott a rendszer hibáira, azonban azokat kezelni nem tudta, így szignifikáns eredménye mindeddig nincsen. Jelenleg ezen hibák kiküszöbölésén dolgozunk.

2.7. Villámképek hibaszűrésének módszeréről

Olykor-olykor a villámképekben hamis villámkisülések jelenhetnek meg, melynek két oka lehet:

1. A rendszer hibás beállítása következtében egyenes vonal mentén jelennek meg a hamis villámok. Ezt interferencia hibának nevezzük.

2. Amennyiben az elektromágneses sugárzást nem a villám bocsátja ki. Ez abban az esetben fordulhat elő, ha a védett tartományban (amelyet vizsgálunk) egy adó jele jelenik meg (pl. katonai zavarás). Az említett jelenség akkor is tapasztalható, ha a háttér elektromágneses zaj magas, vagy a vételi frekvencia rosszul van beállítva (*Ádám, 2008*).

A hamis villámok kiszűréséhez fel kell tennünk, hogy a radarhálózat tagjai hibamentesen és folyamatosan mérnek, valamint a villám lokalizációs rendszer megállás nélkül működik, a radar pedig negyed óránként 4–5 percig mérést végez. Az időjárási radar által mért nagy reflektivitás értékű területek a zivatarfelhőkön belüli intenzív feláramlási zónákhoz köthetők, amelyek egyben a villámok keletkezését előidéző töltésszétválasztódási mechanizmusok színterei is. Azonban a zivatarfelhő elektromosan aktív része nem szükségszerűen esik egybe a legaktívabb radar echo-t adó szegmenssel, következésképpen ahhoz, hogy egy adott villámról azonnal meg tudjuk mondani, hogy valódi villám-e, a radarkép adatait tágabb környezetben kell vizsgálnunk. Az elmondottakat figyelembe véve tehát az ország és az időjárási radar megfigyelési területén kívül eső villámokról az ismertetett módszerrel nem mondhatunk biztosat. A radar által mért maximális reflektivitású gócok és a villámgóccok pozíciójában gyakran szignifikáns, szélsőséges esetben akár 15–20 km-es eltérés is megfigyelhető. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alkalmazott szűrést megvalósító módszer kb. 2x2 km-es felbontású kompozit radar mérési adatokat (archív adatok) használ, mely C-nyelven íródott, és az alábbi lépésekből épül fel:

1. A megjelenítendő villámokat tartalmazó bináris fájl (T\$) adatainak (villámok pozícióját, időpontját és típusát tartalmazza) beolvasása ASCII formátumban.
2. Az általunk kiválasztott időpontok közti kisülések külön fájlba rendezése a program segítségével.
3. Az archív radar adatok eredeti formátumba való visszaállítása.
4. A bináris radar adatok NETCDF formátumba való átírása.
5. Minden egyes kisüléshez meg kell határozni a neki megfelelő radarpontot, illetve az ennek megfelelő tér- és időbeli környezetét (szabadon választható).
6. Az így kapott radarpont halmazból meghatározzuk a maximális dBz-s jelet (reflektivitás mértéke). Ha ezen jel szintje egy adott (tetszőleges) szint felett van, akkor valódi villámról beszélünk, egyébként pedig hamisról (*Ádám, 2008*).

3. A MÓDSZER LEÍRÁSA

Jelen dolgozat a villám lokalizációs mérések pontosságán kíván javítani, mivel az elméleti és a gyakorlatban tapasztalható helymeghatározási pontosságok közti különbség egy nagyságrendbeli is lehet. Ez pedig – főként hazánk kicsiny területére nézve – nem elfogadható, hiszen lényegesen rontja a vizsgálatok hitelességét. Emellett az sem mindegy, hogy a használatban lévő két helymeghatározási módszer közül melyiket alkalmazzuk egy elemzés során. A régebb óta üzemben lévő SAFIR villámfigyelő rendszer ugyanis az iránymérés elvét alkalmazza, míg az újabb fejlesztésű LINET a TOA módszeren alapszik (az említett módszereket a 2.3. fejezetben mutatom be részletesen). Céлом egy olyan kombinált eljárás kidolgozása, amely mindkét technikát figyelembe veszi, valamint a vizsgált időszakban működő 5 magyarországi állomás mindegyikére külön-külön korrekciót végez (jelenleg már csak 4 van üzemben és azóta áttelepítések is történtek). A vizsgálat során az alábbi állomások szolgáltatott adatokat használtam fel: Bugyi, Sárvár, Véménd, Zsadány, Varbóc, Maly Javornik valamint Milhostov (utóbbi kettő szlovákiai állomások).

A mérőterületek szükségszerű áthelyezése következtében napjainkban a villámadatokat Siófok, Szeged, Napkor, Budapest-Lőrinc, Maly Javornik, Milhostov és Lucenec állomások nyújtják. A folyamat során archív adatokat vizsgálva egy-egy állomás iránymérési hibáit állapítjuk meg, vagyis hogy egy adott irányszögben mekkorát téved a rendszer (milyen nagy és milyen irányú a hiba). Ezen technika alkalmazása során az LF által TOA módszerrel számított irányt fogjuk referencia irányként felhasználni, vagyis az időjárási radar áthelyeződés-vektorait összehasonlítjuk a SAFIR LF valamint a LINET LF által korrigált adatokkal is, és megvizsgáljuk, hogy melyik korrekció közelíti jobban a radarképeken a mozgást. Az archív adatbázis pontosításával kapott eredmények remélhetőleg a jövőbeli mérések megbízhatóságát is javíthatják.

3.1. Az iránykorrekciós módszer elve

Az iránykorrekciós elv lényege, hogy a SAFIR VHF adatait korrigáljuk a SAFIR LF adataival (első eredmény), valamint a LINET adataival is (tudjuk, hogy a LINET-nek csak LF szenzora van), így kapjuk meg a második eredményt. A cél a két villámlási rendszer korrekciós értékeinek összehasonlítása az időjárási radar által mért értékekkel, valamint

azon eljárás kiválasztása, amelyik pontosabban adja vissza a radarmérések által szolgáltatott áthelyeződés-vektorokat. Mivel a villámfigyelő rendszerek folyamatosan mérnek, a radar azonban csak bizonyos időközönként végez mérést, majd „pihen”, így nem célszerű a pillanatnyi radarképet használni összehasonlítási alapnak, hiszen a villámlási rendszerek akkor is frissítik az adatbázisukat, amikor a radar még a pár perccel ezelőtti képet mutatja. Ebből kifolyólag a munka során nem a pillanatnyi radarképpel fogok dolgozni, hanem a radargóc elmozdulás-vektorral, amely nagysággal és iránnyal rendelkezik. Egy másik ok pedig – amiért az elmozdulás-vektort használok referenciának a vizsgálat során – hogy a maximális villámszám nem szükségszerűen esik egybe a radarkép legintenzívebb területével (*Ádám, 2008*).

A villámfigyelő rendszer nyújtotta adatbázisban az ún. B\$ adathalmazból származtatott adatállománnyal dolgoztam. A B\$ fájlok számos villámtulajdonságot tartalmaznak (pl. amplitúdó, felfutási ill. lefutási idő, azimut stb.), melyek közül a munka során csak az azimuttal (irányszög) foglalkoztam. Fontos megjegyezni azonban, hogy az általam figyelmen kívül hagyott villámtulajdonságok felhasználása számos más kutatás alapját képezheti (például a villámáram csúcsérték adatainak alkalmazásával különféle – a polarításra vonatkozó – vizsgálatok végezhetők). Amennyiben a B\$ adatsorban a következő futás alkalmával csak az azimut értékét cseréljük ki (minden más adat változatlan marad), akkor a megváltoztatott B\$ fájlból már egy új adathalmazt nyerünk, amiben immáron a statisztikailag korrigált irányszög értékek jelennek meg. Ezt a folyamatot a SAFIR és a LINET esetében is el kell végezni, így a B\$ adatokból két különböző adatállományt nyerünk.

A villám egzakt pontos helyét a TOA módszerrel lehet meghatározni. Amíg a VHF szenzorból csak a villám irányára vonatkozó értékeket kapunk, addig a négy LF érzékelőből a beérkezési időt tudhatjuk meg μs pontossággal, ez a kétféle információ azonban ugyanarra a villámra vonatkozik egy adott időpillanatban (az iránymérés hibája azonban körülbelül tízszerese a TOA tévedésének). A GPS antenna mérései alapján ismerjük az egyes állomások (φ_1, λ_1) pozícióját (földrajzi szélesség és hosszúság koordináta-pár). Ezt elegendő egyszer megmérni, mivel ezután a központi egységbe (CPS) már bele van kódolva minden állomás koordinátája. Így, amikor később a központi egységbe érkezik a VHF illetve az LF mérés, akkor GPS adatokat már nem kap a CPS. Tehát ismerjük a VHF szenzor által mért irányt, továbbá az LF érzékelők által végzett mérésekből (TOA módszerrel kapott) a villám (φ_0, λ_0) érték-párját. Így egy geodéziai képlet segítségével ezen két pont alapján kiszámítható az irányszög korrigált értéke (pl. 60°

helyett $63,5^\circ$, ekkor azt mondjuk, hogy az 1-es szenzor a 60° -os irányban $-3,5^\circ$ -ot téved). Ha az állomás körül 0° – 360° -ig terjedő teljes tartományban elegendő adat áll rendelkezésre, akkor kiszámolhatjuk minden irányszögre a korrigált értéket. Ezt a vizsgálatba bevont hét (a vizsgált időszakban öt magyarországi és két szlovákiai) állomásra vonatkozóan ábrázolni is lehet egy olyan diagramon, ahol a vízszintes tengelyen a VHF konkrét mérési értékei (fokokban) függvényében a függőleges tengelyen az LF-ből számított mérési hibaértékeket (LF-VHF) ábrázoljuk. A SAFIR esetében ezeket a továbbiak során koherencia görbéknek, a LINET esetében pedig hibagörbéknek hívom. Ideális esetben a 0° – 360° -ig terjedő skálán minden egész fokszámhoz egy konkrét értéket lehet társítani, de amennyiben ez nem megoldható, úgy lineáris interpoláció is végezhető.

Fontos megjegyezni, hogy ha a SAFIR VHF szenzora regisztrál egy villámot és ahhoz időben közel az LF szenzora is érzékeltette ezt a kisülést, akkor ezt lecsapó villámnak minősíti a rendszer, egyébként pedig felhővillámnak. A korrekciós eljárás után a nagy villámsűrűségű részek (góccok) szűkebb területet fognak lefedni. Célszerű azt is megemlíteni, hogy a földrajzi szélesség illetve hosszúság értékekből alkotott rácshálózat – amit használunk – ekvidisztáns. Miután a gyengébb intenzitású értékeket „levágtuk” a radar- illetve villámképekből, a cellák segítségével nyomon követjük a szignifikáns értékek elmozdulását. Ily módon meghatározhatóvá válik egy-egy zivatarcella terjedési sebessége és annak haladási iránya is. Néhány esemény analizálása után választ kaphatunk arra a kérdésre, hogy a SAFIR LF vagy a LINET korrekciójával kapott adatsor illik-e jobban a radargócok áthelyeződés-vektorára.

A dolgozat további részében néhány esettanulmányt fogok bemutatni. Az elmozdulások számításához elengedhetetlen a cellák definiálása, amelyek mentén vizsgálni tudjuk a vektort. Ehhez a radarból jövő adatok csonkítása szükséges, vagyis ahhoz, hogy csak a legintenzívebb részek maradjanak meg – amelyeket a későbbiek során majd vizsgálunk – egy bizonyos érték (általunk választott, dBz-ben) alatti részeket „le kell vágni” az adatsorból.

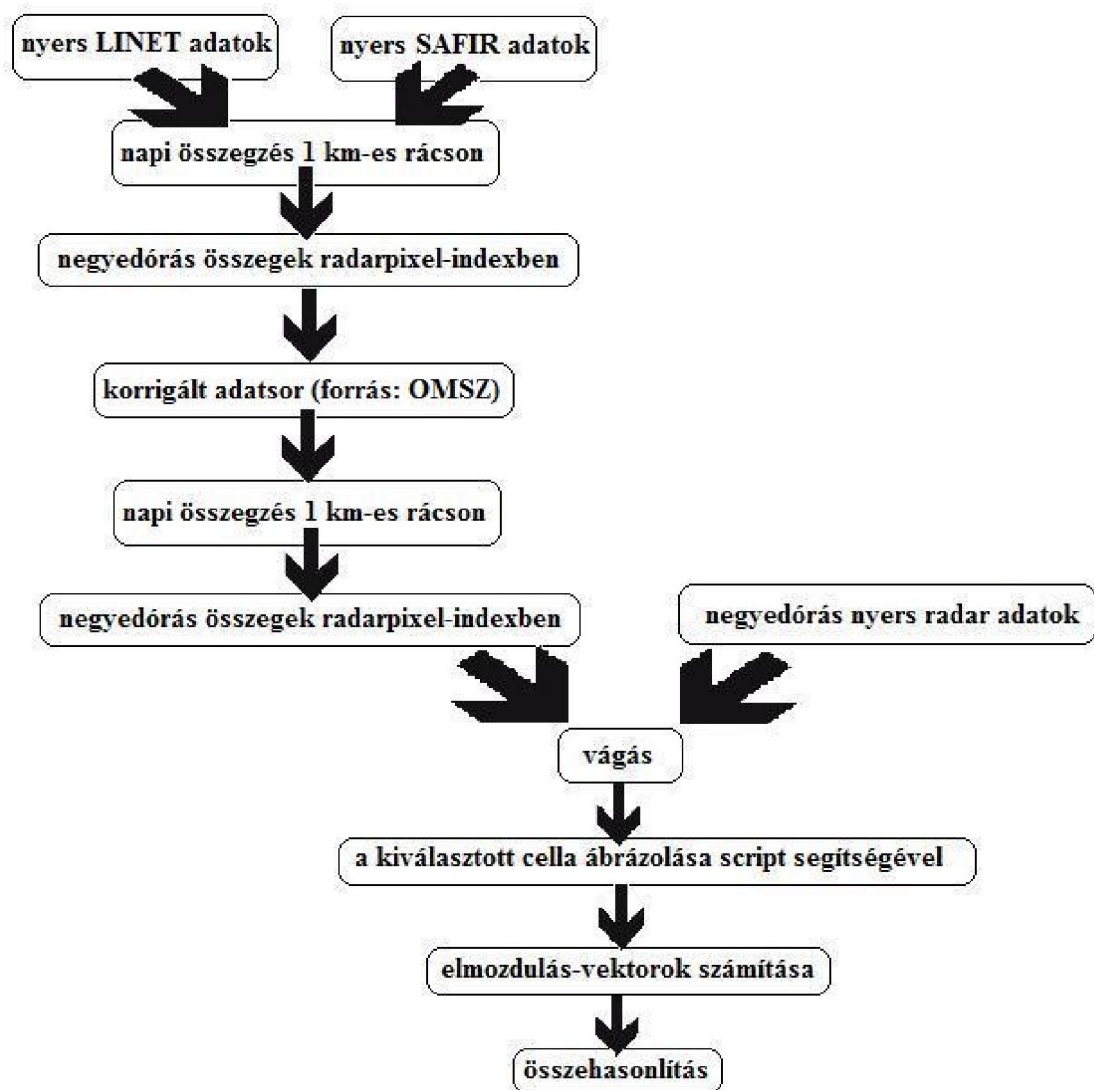
Az eljárás során a SAFIR VHF detektorából kapott értékeket két részre osztjuk: egyszer a LINET LF alapján korrigáljuk az adatokat és kapunk egy SAFIR VHF MOD_L adatbázist (1), majd pedig ezzel párhuzamosan a SAFIR LF szerint is elvégezzük az értékek korrekcióját, így kapjuk a SAFIR VHF MOD_S adattömböt (2). Az időjárás-radar által mért értékek (3) eközben meghatározott időközönként rögzítésre kerülnek a mérőhálózatok segítségével. Ezt követően a feldolgozott időszakból néhány kiragadott nap és időpont alapján mindhárom adatsort szemlélve követünk egy cellát, így 3 vektort fogunk

kapni az elmozdulások szerint (v_L , v_S , v_R). Mivel a v_R vektor értéke nem változik a folyamat során (hiszen azt nem módosítjuk), ezért ez fogja képezni az összehasonlítás alapját. Tehát a folyamat során a v_L valamint a v_S elmozdulás-vektort is összehasonlítjuk a radar áthelyeződés-vektorával (v_R), majd valamennyi esettanulmánnyal elvégzünk egy számszerű vizsgálatot, miszerint a LINET vagy a SAFIR LF adatsorával korrigált értékekből kapott elmozdulás-vektor közelíti-e jobban az időjárási radarét. Nevezetesen ha például 10 esetet vizsgálunk, és ebből 4 alkalommal a LINET közelítette jobban a radar értékét, a SAFIR pedig hatszor, akkor a SAFIR általi korrekciót tekintjük pontosabbnak. Lényegében tehát azt kell eldöntenünk, hogy a SAFIR LF korrekciója van-e olyan jó, mint a LINET-é (hiszen tudjuk, hogy a LINET egy rendkívül pontos rendszer). Mindent összevetve az eljárás lényege, hogy VHF adatokból indulunk, melyeken elvégezzük a szükséges korrekciókat, és végül a korrigált VHF értékeket hasonlítjuk össze a radareredményekkel, hogy megtudjuk, melyik adatsor a pontosabb a kiválasztott napok illetve cellák esetében.

3.2. Az iránykorrekciós módszer megvalósítása

Mivel diplomamunkám fő célja egy úttörő, kombinált módszer kidolgozása és fejlesztése, mely rengeteg újítást követelt, így az alábbiakban általánosan leírva mutatom be a technika fő lépéseit. Ezen irányadó lépések alkalmazásával a későbbiek során az operatív munkában rendkívül hasznos eredményekhez juthatunk. 2007–2011-ig bármelyik adatsorra alkalmazható lenne az általam kidolgozott módszer, jelen dolgozatban azonban konkrétan három esettanulmányon mutatom be a technika alkalmazási lehetőségeit és korlátait (mivel e mű érdemi részét az új módszer megalkotása képezi), azonban a leírtak alapján nagy mennyiségű esetszámmal dolgozva statisztikai értékelések is készíthetők a jövőben. *Wantuch (2004)* tapasztalatai alapján villámlás tekintetében a három nyári hónap a legaktívabb. Így az általam választott három konvektív zivataros nyári nap: 2009.07.18., 2010.08.13. és 2010.08.15.

A szűrést megvalósító módszer 1850 x 1850 méteres felbontású kompozit radar mérési adatokat (archív adatok) használ. Az eljárás lépéseinek – melyek Fortran nyelven íródtak – vázlatos leírása a következő (melyet a 8. ábra szemléltet):



8. ábra. A kidolgozott kombinált módszer lépéseinek vázlata.

1. A „nyers” fájlok (LINET esetén .hun kiterjesztésű, SAFIR esetén a T\$ fájlok, melyeket a gép automatikusan .txt kiterjesztésűvé alakított át) beolvasása, valamint villámértékeikből napi összegek készítése 2 km felbontású szélességi illetve hosszúsági rácstra. Fontos megemlíteni, hogy a földvillámokat és a felhővillámokat a vizsgálat során végig külön-külön eredménytömbben vizsgálom.
2. A hosszúsági és szélességi értékek radarpixel-indexbe való átszámításával negyed órás villámösszegek megadása.
3. A koherencia görbék (a VHF konkrét mérési értékeinek függvényében az LF-ből számított mérési hibaértékek ábrázolása) értékeire alkalmazott lineáris interpoláció elvégzése, majd az adatsor újrafuttatása, melynek eredménye a korrigált adathalmaz.

4. A korrigált adattömbökkel az 1. valamint a 2. lépés megismétlése, az adatsorok megjelenítése Gnuplot programmal.
5. A korrigált fájlok negyed órás villámértékeire egy maximumszámító továbbá egy hisztogram előkészítő program futtatása, ezek eredményeinek függvényében a „vágási érték” eldöntése. Majd a nem szignifikáns értékek „levágása” az adatsorból. Ezután egy script segítségével már csak a kiválasztott cella mozgásának ábrázolása Gnuplot programmal.
6. Az elmozdulás-vektorok kiszámítása (számértékekkel megadva a zonális és meridionális irányú sebességkomponenseket).
7. A korrigált LINET, a korrigált SAFIR valamint az időjárási radar cellaáthelyeződési-vektorainak összehasonlítása és a kapott eredmények kiértékelése.

4. A KIDOLGOZOTT MÓDSZER ALKALMAZÁSA

4.1. Napi összegek készítése 2 km felbontású rácson

Az Országos Meteorológiai Szolgálattól (OMSZ) kapott „nyers” fájlok (a villámérzékelő rendszer által mért adatokat foglalja magába) sokféle információt tartalmaznak (pl. a villámlás magasságát km-ben, a villámlás típusát (1: földvillám, 2: felhővillám), a villámáram csúcserőértékét kA-ben, a becsült lokalizációs hibát km-ben stb.), melyek közül először csak a hosszúsági-, szélességi- és villámértékekkel foglalkoztam. Az első lépés elvégzéséhez írt Fortran program a LINET rendszer .hun kiterjesztésű napi adatsorát olvassa be (már .txt formátumba alakítva). Ezután létrehoztam egy olyan köztes eredményfájlt, amiben a hosszúság- és szélesség értékekből (általam megadott határokon belül) 2 km felbontású ekvidisztáns rácshálózatot alkot, melynek minden pontjában nulla értékű a felhő- illetve a földvillámok száma (ez az üres eredménytömb). Ugyanazon koordináta-párok által meghatározott pontokba eső villámok számát összegzi, majd a szélesség szerint sorba rendezett tömböt feltölti ezen elemekkel, így kapjuk meg, hogy egy adott nap során melyik pontban hány villámot detektált a rendszer összesen. SAFIR adatsor esetén a program ugyanígy működik. A LINET-tel való jobb összehasonlíthatóság érdekében a SAFIR esetében a rendszerből jövő eredeti nyers B\$ adatokból készített adatsorokkal dolgoztam, mert ezekben is 1 illetve 2 jelöli a villámok típusát, míg a T\$ adatsorok esetében szöveges karakterek jelzik a villám kezdő- illetve végpontját (pl. IC Start és IC End), ami a munka további részében pontatlansághoz vezetne. Az általam használt B\$ adatokat bináris alakról .txt formátumra a rendszer alakította át, majd az Országos Meteorológiai Szolgálat lokalizációs algoritmusával (Varga Bálint, személyes konzultáció) futtatva az eredeti nyers B\$ adatsorral tudtam dolgozni, de T\$-hoz hasonló alakban, ami az adattömbök kezelhetőségét lényegesen leegyszerűsítette.

4.2. Negyedórás villámösszegek készítése

A villám detektálásának időpontját is figyelembe véve (óra, perc, másodperc), valamint egy geodéziai képletet (*1. melléklet*) alkalmazva – mely a földrajzi koordináta értékeket (φ_0, λ_0) radarpixel-indexbe (i, j) számítja át – meghatározható a villámok negyed órás összege is. Erre azért van szükség, mert az időjárás-radar is 15 percenként végez

méréseket, így könnyebb elvégezni az összehasonlítást, mely ezáltal pontosabb eredményt szolgáltat. Természetesen a felhő- illetve földvillámokat itt is külön kimeneti fájlban tárolom. Mivel nem a pillanatnyi radarképekkel dolgozom, hanem a radargócok elmozdulás-vektorait tekintem referenciának a vizsgálat során, így egy ekvidisztáns rácshálózat megalkotása elengedhetetlen volt a munka során. Ezért volt szükséges a földrajzi koordináta értékek radarpixel-indexbe történő átszámítása, hiszen így a számításokat egy szabályos rácshálózaton végezhettem, melynek felbontása 1850 m x 1850 m. A cellák könnyebb azonosításához Magyarország földrajzi koordinátáit is szükséges volt átalakítani radarpixel értékké. Ehhez a földrajzi koordináta értékek a <http://www.naturearthdata.com/downloads/> honlapon érhetők el. Innen a Large scale data 1:10 m adatbázissal dolgoztam, mely földrajzi (szög)percet jelent ($1:10 \text{ m} = (1/6)^\circ$ -os felbontású). Ezekből a shape fájlokból egy átalakítás segítségével nyertük ki a szükséges adatokat (Mona Tamás, személyes konzultáció). Így a fent megjelölt koordináta értékekből született meg az országhatár ábrázolására alkalmas .txt fájl. Ezeket a pontokat egy folytonos – a vizsgált adatok színétől eltérő színű – vonallal ábrázolva megjelenik a képeken Magyarország határa.

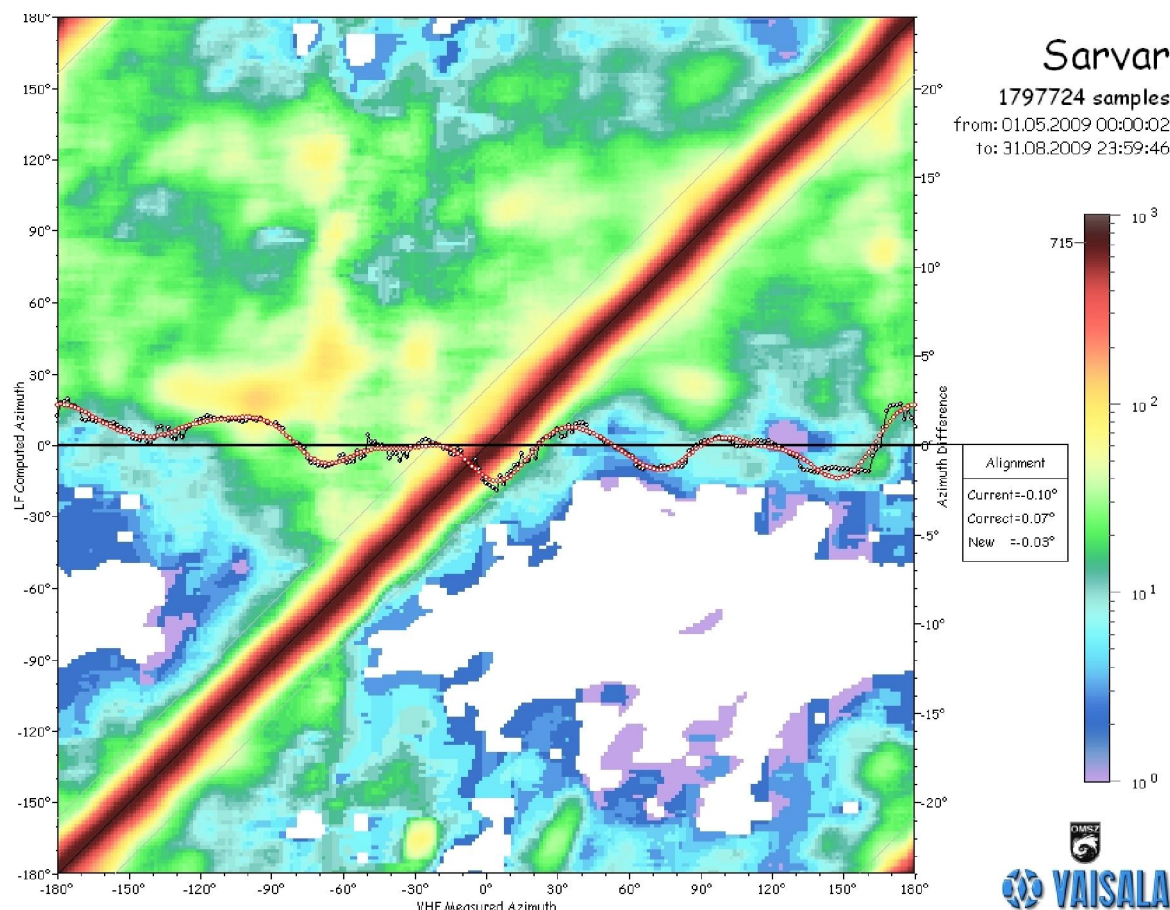
Habár a villámfigyelő rendszerek mérése permanens, a radar csupán bizonyos időközönként végez mérést, majd „pihen”, tehát a villámlási rendszerek olyankor is aktualizálják az adatbázisukat, amikor a radar átmenetileg még a pár perccel korábbi képet prezentálja. Ahhoz, hogy az adatokat úgy tudjuk párhuzamosan szemlélni, hogy az összevethetőség biztos alapokon nyugodjék, a villámlási adatokat 10 perccel el kellett tolni. Azaz egy adott órában 10–24, 25–39, 40–54 és 55–09 percre definiáltam a negyed órás határokat, így egy nap folyamán az első 10 perc és az utolsó 5 perc adatai nem kerültek feldolgozásra (de ez nem szignifikáns a vizsgálat szempontjából, hiszen a későbbiek során vizsgált cellák nem ezen időintervallumokból kerültek ki). Az így kapott eredményfájlok tehát az időlépcső sorszámát (egy napban 96 darab negyed óra van), az (i,j) radarpixel-indexeket és az adott villámtípus negyed órás összegét tartalmazzák. Ellenőrzésképp a Gnuplot programmal ábrázoltam is ezeket a 15 perces képeket, hogy meggyőződjek róla, hogy jól működik a program (a HAWK program által nyújtott negyed órás kompozit képekkel összevetve).

4.3. A korrigált adatsorok létrehozása lineáris interpolációval

A B\$ adathalmazból szöveges fájlkká konvertált adatállománnyal dolgozva korrigáltuk az irányszögek értékét, hiszen a módszerfejlesztésünk lényege ezen a korrekciós lépésen alapszik.

A SAFIR irányméréseiből azimut értékek kerülnek a CPS-be, ami az irányszög értékeket egy ún. NA (North Alignment) értékkel módosítja, mely állomásonként változó. A rendszer SAFIR DAM nevű programja képes ezeket a tájolási korrekciós értékeket optimalizálni a koherencia vizsgálat segítségével (*Dombai, 2007*).

Az általam használt koherencia görbék vízszintes tengelyén a földvillámok VHF által detektált irányai találhatók, míg a bal oldali függőleges tengelyén az LF sávban érzékelt adatokból, TOA módszerrel meghatározott pozíciók adott állomáshoz képest számított azimut értékei vannak feltüntetve. Példaképp a 9. ábra a VHF (vízszintes tengely) és LF TOA (bal oldali függőleges tengely) azimut értékpárok (színezés kéktől sötétpirosig, a színskála logaritmikus és darabszámot jelöl) eloszlását mutatja a 2009-es évre vonatkozóan Sárvár állomásra. A piros pöttyökből alkotott görbe a hibaértékeket jelöli (jobb oldali függőleges tengely). Ezek a hibaértékek a VHF által mért irányok és az LF sávban detektált adatokból számított értékek adott állomáshoz képest kiszámított irányszög értékei közti különbséget mutatják meg. Ideális esetben a középső ferde fekete vonal körül nem lehetne „kilengés” (a piros sáv). Tehát az OMSZ-től kapott koherencia görbék adataiból megkapjuk, hogy a VHF konkrét mérési értékeihez mekkora mérési hibaértékek (LF-ből számított) tartoznak (tehát például, ha a 2-es szenzoron a 150° -hoz $-2,4^\circ$ -os hibaérték tartozik, akkor a korrigált érték $147,6^\circ$). A hibaértékek azt mutatják meg, hogy a mért (VHF) és az LF adatokból számított értékek mekkora mértékben térnek el egymástól. A SAFIR VHF által detektált irányok -180° és $+180^\circ$ között mozognak (-180° – 0° : nyugati tartomány, 0° – $+180^\circ$: keleti tartomány).



9. ábra. A SAFIR rendszer Sárvár állomásra vonatkozó koherencia görbéje a 2009. év adatbázisa alapján (Az ábrát készítette: Varga Bálint).

Fontos megemlíteni, hogy az eredeti irányértékhez az eltérés értékét mindig hozzáadni kell az előjelek megtartása miatt. A görbék információit a WebPlotDigitizer program segítségével nyertem ki, mely a megfelelő beállítások alkalmazásával 1–1 megfeleltetésű tömböt eredményez, amelyben az eredeti irányokhoz tartozó előjeles hibaértékek szerepelnek. A program online elérhető az alábbi címen: <http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/app/>. Mivel a görbén szereplő értékek meghatározásához a pontokat kézzel kellett megadni, így fennáll a minimális hiba lehetősége, de ez a vizsgálat szempontjából csupán elenyésző mértékű lehet. Ugyanezen okból kifolyólag minden görbéhez más-más méretű eredménytömb tartozik a pontok számától függően, így a lineáris interpolációt végző program bemeneti fájljának nagyságát kézzel kell változtatni minden görbe esetében. A görbék a vizsgált hét állomásra állnak rendelkezésre évenkénti bontásban. Tehát ha például a görbe leolvasásából kapott eredménytömbünk 183 soros, akkor a lineáris interpolációt végző program bemeneti adatsorát is ekkora méretűnek kell megadni. A program a rendelkezésre álló, pl. 183 érték

közötti szakaszokon végez lineáris interpolációt, hiszen lehet, hogy két pont közt negatív irányba tér ki a görbe az ideálistól, a következő két pont közt pedig pozitív irányba, így nem illeszthető egyetlen egyenes a teljes adatsorra. Minden görbe esetében 4096 sorosra kell „nyújtanunk” a kezdeti tömböt (méretétől függetlenül), mert a SAFIR rendszer felbontása nagyon finom: $(360/4096)^\circ$ -os. Az összehasonlíthatóság érdekében a SAFIR érzékenységének megfelelő finomságú adatsorral kell dolgoznunk.

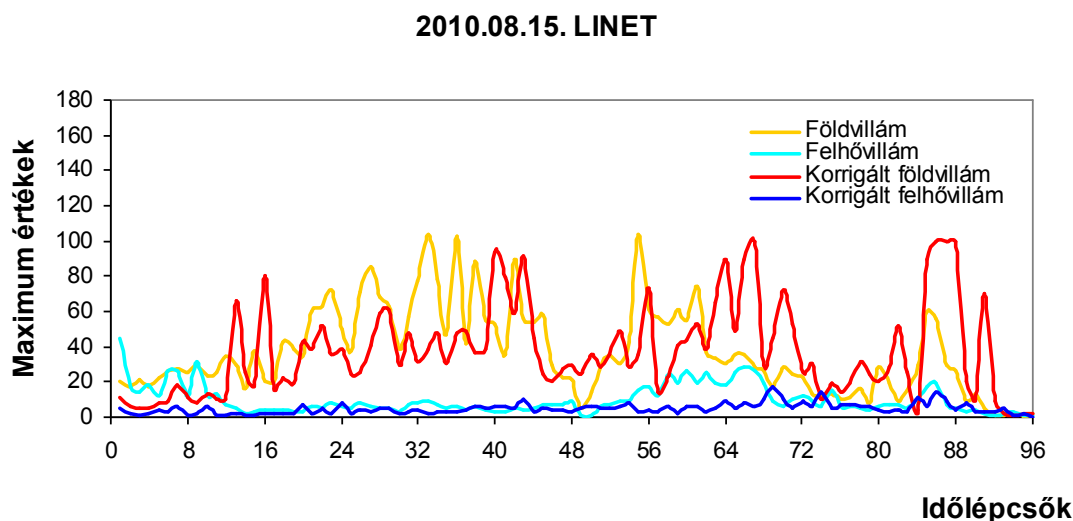
A lineáris interpoláció után kapott értékekből az Országos Meteorológiai Szolgálat évenként újrafuttatta az adatsorokat, így kaptuk meg az új, korrigált adattáblákat. A LINET rendszer esetében a hibagörbék hasonló érték-párokat tartalmaznak, mint a SAFIR-nál bemutatottak, annyi különbséggel, hogy itt nem a SAFIR LF által detektált azimut értékek szerepelnek, hanem a LINET (tudjuk, hogy csak LF érzékelője van) által észlelték. A LINET-ből számított hibagörbék értékeit (táblázatos formában) készen kaptam Varga Bálinttól, aki egy külön koherencia görbe számító programot írt és futtatott a nyers LINET adatsorokra. Ezeken is elvégeztem az interpolációt, majd az eredményfájlokat visszajuttattam neki, ezután a SAFIR adatokhoz hasonlóan ezeken is elvégezte az adatsorok újrafuttatását egy általa C nyelven írt program segítségével. Végül visszajuttatta hozzám az immáron korrigált adatsorokat, melyekkel tovább tudtam dolgozni. A korrigált adatsorok is mind a LINET adattömbök formájában készültek, mivel könnyebben kezelhetők, mint a T\$ adatok (a 4.1. fejezetben részletezve olvasható, hogy miért).

Ezután a fent leírtakhoz hasonlóan a SAFIR LF által és a LINET LF által korrigált SAFIR VHF adatsoron is elvégeztem a villámok napi, valamint a már radarpixel-indexbe átszámított negyedórás összegzését. Ezzel egy időben a radaradatokat is feldolgoztam és a Gnuplot program segítségével meg is jelenítettem őket, akárcsak a negyedórás villámösszegeket. Azt tapasztaltam, hogy a korrigált adatsorokban kevesebb villám található, mint a nyers adatsorokban, azonban ez a vizsgálat szempontjából irreleváns, mivel a villámok pozíciója fontosabb, mint a darabszámuk.

4.4. A „vágási értékek” meghatározása

A korrigált negyedórás adatsorokra írt maximumszámító program futtatása után eredményként kapott tömböt Microsoft Excel programban megjelenítve olyan görbét kaptam, mely kirajzolja egy nap folyamán mind a 96 negyedórában detektált maximális értékű villámszámot (föld- illetve felhővillámokra külön-külön). Egy ilyen görbét mutat be

a 10. ábra, mely 2010.08.15. LINET adatsorának maximum értékeit szemlélteti (a többi – általam vizsgált – esetre vonatkozó ábrát a 2.–6. melléklet illusztrálja).

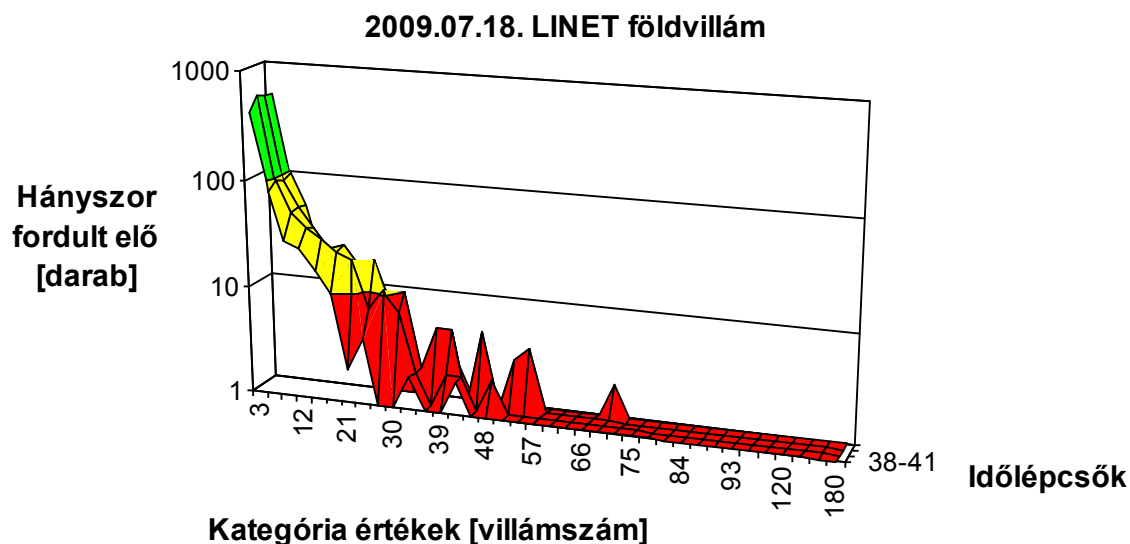


10. ábra. A LINET nyers és korrigált adatsoraira vonatkozó maximum értékek (darab villám mértékegységben kifejezve) a negyedórás időlépcsők sorszámainak függvényében 2010.08.15. napra vonatkozóan.

Ennek segítségével, illetve a Gnuplotban ábrázolt negyedórás képek alapján választottam ki a vizsgálni kívánt cella mozgásához tartozó szignifikáns negyedórák sorszámát. Ez nem feltétlenül a legmagasabb maximum értéket jelentette a görbén, mivel az csupán egy-egy kiugró értéket is mutathat. E probléma kiküszöbölésére olyan időpontot választottam, ahol a kimagasló érték körüli maximumok is viszonylag magasak voltak tartósabban (nem pedig hirtelen ugrottak át kis értékekre). A 10. ábrán például a 84–89. időlépcsőig tartó szakasz ilyen. A vizsgált cellák kiválasztása során az alábbi szempontok is fontos szerepet játszottak: a cella nagy része Magyarország határán belül található (jobban látható a mozgása), különálló cella legyen (tehát körülötte lehetőleg ne legyen zavaró tényezőként másik cella, mert így könnyebb vizsgálni) és gyors, határozott irányú mozgással rendelkezzen.

A korrigált negyedórás villám adatsorokra egy hisztogram előkészítő programot is írtam, melynek kimeneti tömbjét három dimenzióban ábrázolva egy olyan síkot kaptam eredményül, ami megmutatja, hogy a vizsgált negyedórában melyik villámszám érték hányszor fordult elő. A program logikai kifejezését úgy állítottam be, hogy a nullás értékeket hagyja figyelmen kívül, így ezeket eleve kiküszöböltem. Mivel a kis villám értékek sokkal többször figyelhetők meg, így ezt a skálát logaritmikusnak vettem és a

különböző nagyságrendű értékeket más-más színnel ábrázoltam az áttekinthetőség kedvéért. A 11. ábra a LINET 2009.07.18. napjára vonatkozó földvillám adatok hisztogramját mutatja be (a többi – általam vizsgált – esetre vonatkozó ábrát a 7.–11. melléklet illusztrálja).

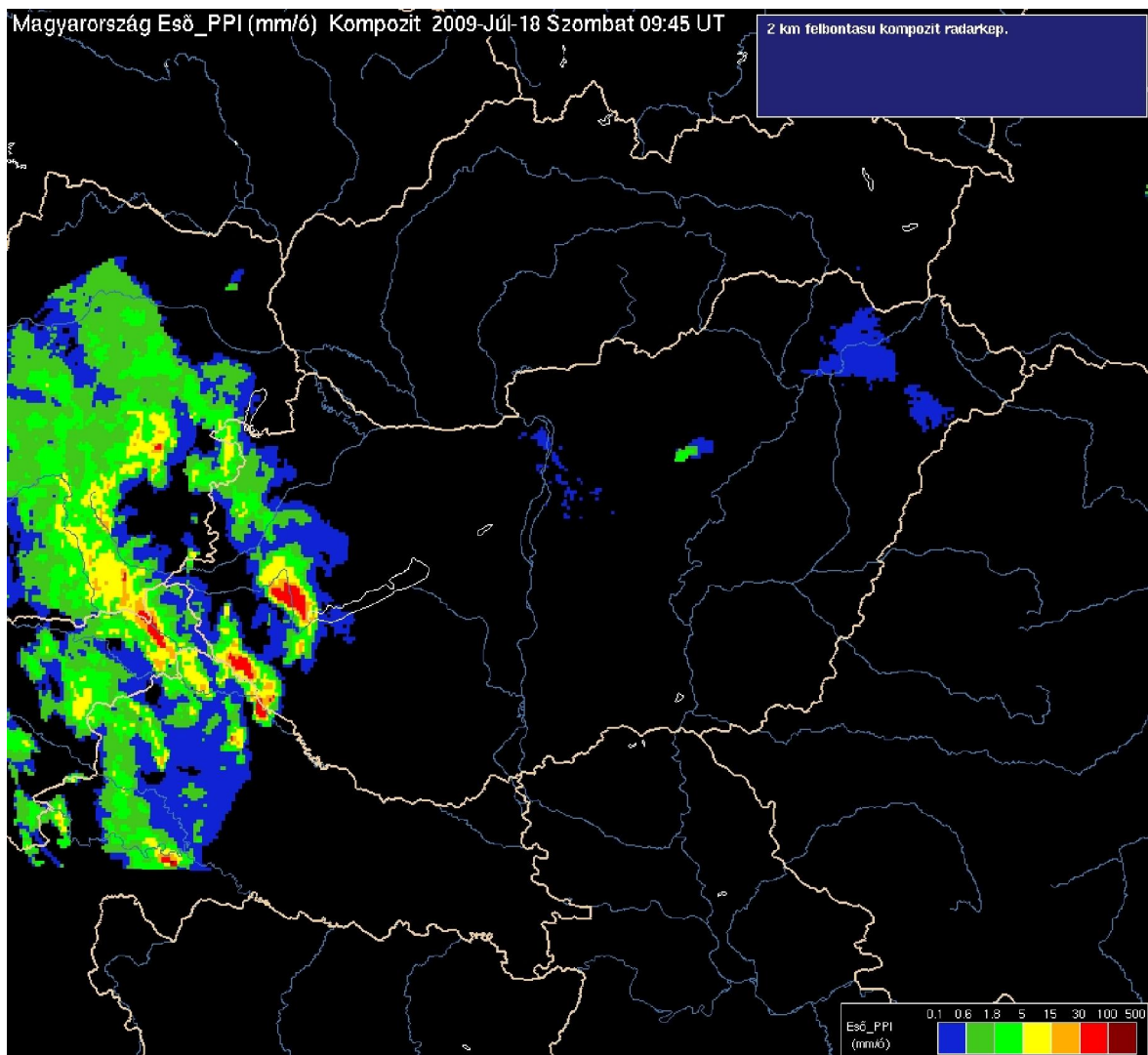


11. ábra. A kiválasztott cella földvillám adatainak hisztogramja korrigált negyedórás LINET adatsorból 2009.07.18. napjára vonatkozóan. Megmutatja, hogy melyik időlépcsőben melyik villámérték hányszor fordult elő.

A „vágási érték” eldöntése során azt tartottam szem előtt, hogy a hisztogramon a 10-es nagyságrendben előforduló értékek domináljanak, ugyanakkor minél feljebb toljam a kategória értékét. Erre az elhatározásra az alapján jutottam, miszerint a 100-as nagyságrendben előforduló értékekből túl sok van (és kategória értékük túl kicsi, így nem meghatározóak), az 1-es nagyságrendben előfordulók pedig csupán néhány kiugró értéket mutatnak meg számunkra. Tehát a 11. ábra alapján nem választhatjuk „vágási értéknek” a 48-at, de a 20-at igen.

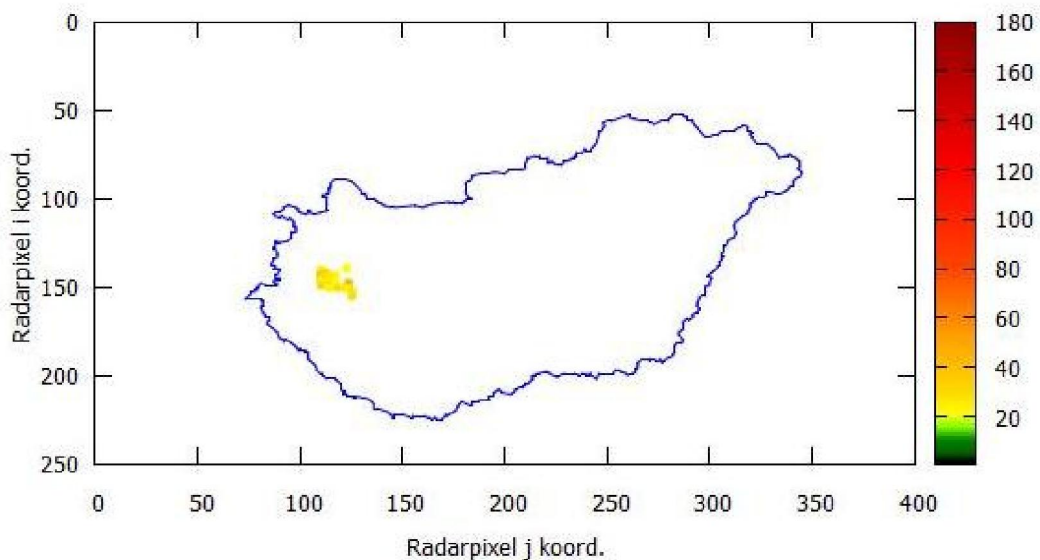
A radar adatok esetében nincs szükség a maximumok meghatározására és a hisztogramok vizsgálatára, hiszen a HAWK képek segítenek a „vágási érték” meghatározásában, mivel a villámképekkel azonosan mozgó cellákat kell vizsgálnunk (a negyedórák sorszámát pedig a fenti vizsgálatokból már ismerjük). Mivel az időjárási radar reflektivitás értéket mér, a vizsgálatok során pedig villámszám értékekkel dolgoztam, így a radar esetében a „vágási érték” természetesen nem kell, hogy egybeessen a villámadatok „vágási határértékével”. A vágást csak alulról kell elvégezni, hiszen a kicsi – a vizsgálatot zavaró – értékeket szeretnénk kiszűrni. Ahhoz, hogy a villámlási gócokhoz tartozó

radargócokat azonosítani tudjam, a HAWK programot használtam. Ezt a programcsomagot az előrejelzők széles körben használják mind az OMSZ, mind a Magyar Honvédség keretein belül. Jelen vizsgálataimhoz a HAWK 2.10.r0. verziójával dolgoztam (radar neve: Magyarország, adat típusa: ESŐ_PPI, archív kompozit képek, mértékegysége: mm/h), melyet negyedórás radar adatok képi megjelenítésére használtam. A HAWK-ból nyert képeken (melyre egy példát a 12. ábra mutat be) a kék és a sötétzöld színnel jelölt értékeket mindenképp le kellett vágni, hiszen a piros illetve sárga színű értékekre koncentráltam. Mivel a HAWK és a Gnuplot azonban csak szemléltető eszközök, az adatok egzaktabb elemzéséhez saját programok készítésére volt szükség, melyeket Fortran programnyelven készítettem el, ez lehetőséget nyújtott a nagymennyiségű adat könnyebb kezelhetőségére.



12. ábra. A HAWK kompozit radarképe 2009.07.18. napra 9:45 órakor

Ezután a fent említett feltételeket megvizsgálva és azok eredményeit mérlegelve, a kutatásom szempontjából nem szignifikáns adatokat „levágtam”. Erre a műveletre egy bash scriptet alkalmaztam, amely a kiválasztott határértéknél kisebb értékeket nullára cseréli a kimeneti fájlban, így a megjelenítés után már csak a kiválasztott cella mozgása figyelhető meg (minden más villámadat eltűnik). A 12. ábrához időpontban tartozó vágás utáni LINET adatsor Gnuplot-ban megjelenített képét a 13. ábrán mutatom be.



13. ábra. A 2009.07.18. nap 9:45 órára vonatkozó LINET adatsor vágás utáni megjelenítése Gnuplot-ban. A földrajzi szélesség és hosszúság koordináták radarpixel-indexben vannak megadva, a skála pedig darab villámszámot jelöl.

A korrigált villámértékek közt sokkal több földvillámmal találkozhatunk, mint felhővillámmal, mert a korrekciós algoritmus egyik beállítása miatt a rendszer a VHF és LF közt nagy időablakot hagy (sok időt tűr el, amíg találhat a VHF mellé LF jelet, így földvillámnak tekinti). Így a vágás után már csak a földvillámokat jelenítettem meg. Mivel a módszer még tesztfázisban van, ezen a jövőben lehet változtatni majd. A leírt kritériumok alapos vizsgálata után az 1. illetve 2. táblázatban részletezett döntésre jutottam.

1. táblázat. A korrigált negyedórás villámadatbázisok alapján kiválasztott cellák időlépcsőinek és „vágási értékeinek” (villámszám mértékegysége: darab) bemutatása a három esettanulmányon keresztül.

2009. 07. 18.	
Kiválasztott időlépcsők sorszáma	38 – 41
Kiválasztott időlépcsők időpontja	9:25 – 10:24
„Vágási érték”	20
2010. 08. 13.	
Kiválasztott időlépcsők sorszáma	78 – 81
Kiválasztott időlépcsők időpontja	19:25 – 20:24
„Vágási érték”	25
2010. 08. 15.	
Kiválasztott időlépcsők sorszáma	84 – 87
Kiválasztott időlépcsők időpontja	20:55 – 21:54
„Vágási érték”	15

2. táblázat. A radar adatsorok alapján kiválasztott cellák időlépcsőinek és „vágási értékeinek” (csapadékkintenzitás mértékegysége: mm/h) bemutatása a három esettanulmányon keresztül.

2009. 07. 18.	
Kiválasztott időlépcsők időpontja	9:30 – 10:15
„Vágási érték”	40
2010. 08. 13.	
Kiválasztott időlépcsők időpontja	19:30 – 20:15
„Vágási érték”	25
2010. 08. 15.	
Kiválasztott időlépcsők időpontja	21:00 – 21:45
„Vágási érték”	30

4.5. A cellaáthelyeződési-vektorok kiszámítása

A vizsgálat szempontjából nem szignifikáns értékek „levágása” és a kapott adatsor Gnuplot-ban való megjelenítése után olyan képet kaptam, amelyen már kizárólag a vizsgált cella mozgását tudtam nyomon követni. A program segítségével a cellák kellő mértékűre nagyíthatók, így pontosan kinyerhető azon i - j határpontok értéke, amelyek közrezárják a megfigyelt cellánkat. E végpontokat a Fortran programunk logikai kifejezésében használjuk fel, melynek bemeneti adatai a korrigált negyedórás villámfájlok illetve a radar adattömbök. A program a határpontok alapján kijelöl egy négyzetet, amelyben tovább vizsgálódik, és ha ezen a négyzeten belül a villámszám illetve a csapadékintenzitás értéke nagyobb vagy egyenlő a „vágási értékkel”, akkor az adott értékes sort szignifikánsnak tekinthetjük. Ezt követően a szignifikáns i illetve j értékeket kiíratjuk egy-egy tömbbe, majd külön-külön vesszük ezek átlagát. Így tehát megkapjuk a cella középpontjának i , valamint j koordinátáját radarpixel-indexben kifejezve. Ezt a folyamatot minden kiválasztott időlépcsőre végigcsináltam. Két egymást követő időlépcső közötti elmozdulás-vektor meghatározását a Pithagorasz-tétellel végeztem, ahol a derékszögű háromszög befogóit az i illetve j irányú elmozdulások nagysága jelenti, míg az átfogót maga a keresett áthelyeződés-vektor. Tehát nem csak azt tudhatjuk meg, hogy az adott cella milyen gyorsan mozgott a haladási irányában, hanem azt is, hogy mekkora volt a meridionális valamint a zonális irányú sebességkomponense (melyik irány dominált). A számításokat 3 tizedesjegy pontossáig végeztem el, ez a rácsfelbontásnak megfelelően 10 méteres precizitásnak felel meg.

4.6. A kapott eredmények kiértékelése

A számítások elvégzése után lehetőség nyílik a cellaáthelyeződési-vektorok összehasonlítására, mely a kidolgozott módszer lényegi eredménye. Az elmozdulás-vektorok jelölései a következők: v_S – a SAFIR VHF iránymérési adatainak a SAFIR LF általi korrekciójával kapott adattömbre vonatkozó elmozdulás-vektor, v_L – a SAFIR VHF LINET LF által korrigált adathalmazára vonatkozó elmozdulás-vektor, v_R – az időjárási radar adatokra vonatkozó cellaáthelyeződési-vektor. A számításokból kapott eredményeket a 3. táblázat mutatja be.

3. táblázat. A vizsgált cellák mozgási irányának megfelelő elmozdulás-vektorok km/h-ban illetve a zonális és meridionális sebességkomponensek nagysága km/h-ban, feltüntetve, hogy az egyes esetekben melyik rendszer közelítette jobban az időjárási radar értékeiből számított vektorokat (referencia). A vastagabb vonalak az adott napok adatainak elkülönítésére szolgálnak, a vizsgált napok rendre: 2009.07.18., 2010.08.13., 2010.08.15.

j irányú (zonális) sebességkomponens [km/h]			
v _L	v _S	v _R	Jobb közelítést adta
28,246	2,657	18,004	LINET
31,413	42,143	30,917	LINET
27,750	22,555	34,292	LINET
0,548	4,107	1,450	LINET
12,521	2,087	8,776	LINET
10,345	0,503	0,821	SAFIR
26,189	34,144	20,017	LINET
51,386	37,348	26,788	SAFIR
25,737	16,206	32,301	LINET
i irányú (meridionális) sebességkomponens [km/h]			
v _L	v _S	v _R	Jobb közelítést adta
37,770	38,177	42,261	SAFIR
25,323	15,799	33,263	LINET
37,932	73,230	53,398	LINET
26,566	19,529	35,357	LINET
29,030	51,637	31,243	LINET
35,831	48,085	59,814	SAFIR
28,349	28,571	33,618	SAFIR
31,221	34,351	41,677	SAFIR
26,633	25,308	29,822	LINET

A cella mozgási irányának sebessége [km/h]			
v_L	v_S	v_R	Jobb közelítést adta
47,163	38,269	45,937	LINET
40,349	45,007	45,413	SAFIR
46,999	76,625	63,461	SAFIR
26,572	19,956	35,387	LINET
31,615	51,679	32,452	LINET
37,294	48,088	59,820	SAFIR
38,594	44,521	39,126	LINET
60,127	50,743	49,543	SAFIR
37,036	30,052	43,963	LINET

A kapott eredményekből azt láthatjuk, hogy a zonális sebességkomponensek esetén kilenc esetből hétszer a LINET adta vissza jobban a radarmérések eredményeit, míg a SAFIR csupán kétszer. A meridionális sebességkomponensek vizsgálata során már kiegyenlítettebb a két rendszer viszonya, mivel kilenc esetből ötször volt megbízhatóbb a LINET és négyszer a SAFIR. Ha az i illetve j irányú elmozdulások szemlélésétől eltekintünk, és csak a cella mozgási irányát figyeljük, akkor ugyanezt az arányt kapjuk eredményül (miszerint kilenc esetből ötször a LINET és négyszer a SAFIR szolgáltatott pontosabb eredményt). Érdekes azonban szem előtt tartani, hogy az összesített adatok hiába a LINET javára döntenek, volt olyan nap, amikor a SAFIR összességében jobban lekövette az adott cellát, mint a LINET. Fontos kiemelni, hogy jelen dolgozat célja azonban nem egy statisztika készítése volt, hanem az irányt mutató módszer kidolgozása, mely későbbi vizsgálatok alapját képezheti. További kutatási témaként felmerülhet a két rendszer precizitásának összehasonlítása nagymennyiségű zivataros napot vizsgálva, illetve egyéb villámklimatológiai vizsgálatok elvégzése.

Geresdi (2004) alapján tudjuk, hogy egy zivatarfelhő átlagos horizontális kiterjedése 3–50 km, élettartama pedig 1–3 óra. Az általam vizsgált időtartamok 1–1 órát ölelnek fel, melynek során a fenti kitétel teljesülését is láthattuk. A 12.–14. mellékletekben példaképp

mutatom be a LINET, SAFIR valamint a radar adatokból vágás után kapott cellák mozgását.

Kohlmann (2013) megfigyelései alapján elmondható, hogy az intenzív zivataros események zömében délies, délnyugati áramlásban jelentkeznek. Az általam vizsgált cellák haladási iránya is az említett irányokba esett, melyet részletesen a 4. táblázat mutat be.

4. táblázat. A kiválasztott cellák haladási irányának (azimut) összehasonlítása a LINET, a SAFIR valamint a RADAR adatok esetében. A cellák haladási irányát a valós 0° – 360° -os kör irányainak valamint a SAFIR detektálásának megfelelő -180° – $+180^{\circ}$ -os kör irányainak feltüntetésével. Jelölve, hogy mely jellemző égtáj irányában történt az elmozdulás.

2009. 07. 18.								
LINET			SAFIR			RADAR		
Valós irány	SAFIR irány	Jellemző égtáj	Valós irány	SAFIR irány	Jellemző égtáj	Valós irány	SAFIR irány	Jellemző égtáj
35°	35°	ÉK	5°	5°	É	23°	23°	É-ÉK
52°	52°	ÉK	69°	69°	K-ÉK	43°	43°	ÉK
35°	35°	ÉK	343°	-17°	É-ÉNY	32°	32°	ÉK
2010. 08. 13.								
LINET			SAFIR			RADAR		
Valós irány	SAFIR irány	Jellemző égtáj	Valós irány	SAFIR irány	Jellemző égtáj	Valós irány	SAFIR irány	Jellemző égtáj
354°	-6°	É	12°	12°	É-ÉK	2°	2°	É
23°	23°	É-ÉK	3°	3°	É	17°	17°	É-ÉK
18°	18°	É-ÉK	359°	-1°	É	2°	2°	É
2010. 08. 15.								
LINET			SAFIR			RADAR		
Valós irány	SAFIR irány	Jellemző égtáj	Valós irány	SAFIR irány	Jellemző égtáj	Valós irány	SAFIR irány	Jellemző égtáj
45°	45°	ÉK	51°	51°	ÉK	31°	31°	ÉK
58°	58°	ÉK	48°	48°	ÉK	34°	34°	ÉK
45°	45°	ÉK	31°	31°	ÉK	47°	47°	ÉK

A 4. táblázat eredményei alapján megfigyelhető, hogy a kiválasztott cellák zömében északkeleti irányban mozdultak el, tehát délnyugati áramlás hajtotta őket. A kilenc esetből hétszer a LINET mérései közelítették meg jobban az időjárási radar adatait, kétszer pedig a SAFIR bizonyult pontosabbnak. Tehát az irányszögek vizsgálata során ugyanazt az eredményt kaptuk, mint a zonális sebességkomponensek elemzésekor.

4.7. Hiba összehasonlítás

A SAFIR VHF konkrét mérési értékeihez tartozó (SAFIR LF-ből számított) hibaértékeket a 4.3. fejezetben bemutatott koherencia görbék mutatják meg számunkra. A LINET-hez tartozó hibagörbék pedig a SAFIR VHF irányaihoz tartozó (LINET LF-ből számított) hibaadatokat tartalmazzák. A hibaértékek azt mutatják meg, hogy a SAFIR VHF iránymérésének a SAFIR LF-ből számolt TOA-hoz képesti illetve a LINET-ből számolt TOA-hoz képesti „tévesztései” hogyan viszonyulnak egymáshoz. Az összehasonlítás során a SAFIR finom felbontásával dolgoztam, tehát az irányokhoz tartozó hiba adatsorokat 4096 sorosra „nyújtottam” lineáris interpoláció segítségével. Mivel a SAFIR a valós 0° – 360° -os kör irányait -180° – $+180^{\circ}$ -nak érzékeli, a LINET pedig megtartja a 0° – 360° -os értéktartományt, így az adatok összevetéséhez az adatsorokat egymás mellé kellett rendezni az irányoknak megfelelően. Nevezetesen a LINET 180° – 360° -ig tartó szegmensét kiemeltem az adatsor elejére (SAFIR -180° – 0° -ig tartó része mellé került). Így az azonos irányskálán (-180° – $+180^{\circ}$) a hibaadatok összevetése már lehetségessé vált.

Az összehasonlítást évenként (2009, 2010) végeztem el a két rendszer (SAFIR, LINET) között hét állomásra (öt magyarországi és két szlovákiai) vonatkozóan. A kapott eredményeket a 15.–28. melléklet illusztrálja. A magyarországi állomások hibagörbéi 2009-ről 2010-re némiképp módosultak, míg a két szlovákiai állomáson ez kevésbé tapasztalható. Ennek oka, hogy a szakemberek a magyar rendszer beállításain kis mértékben változtattak, míg a szlovák állomások beállításait változatlanul hagyták, hiszen azokra nincs rálátásunk. Varbóc és Milhostov állomások esetében a hosszabb „üres” (nulla értékű) szakaszokat a korrigált adatsorokhoz szükséges újrafuttatás egyik beállítása eredményezte, miszerint az 50 km-nél közelebbi villámokat nem vette figyelembe a program az adott állomás iránytévesztésének számításakor. Milhostov állomás esetében a -10° – $+60^{\circ}$ -ig tartó részen megfigyelhető jelentős kilengéseket egy hardverhiba okozta, így ezen a részen a hibaértékeket nullának tekintettük. Általánosan azt mondhatjuk, hogy a vizsgált állomások hibagörbéinek menete hasonló, de a SAFIR rendszerre vonatkozó adatsor kisimultabb, míg a LINET esetén több a „fűrészfogas” rész. A 29. és 30. mellékletek az adatpontok átlaguktól való abszolút átlagos eltérését mutatják be évenkénti bontásban. Tehát míg a 15.–28. mellékletek esetében a relatív hibákat ábrázoltam (az eltérés irányát is feltüntettem), addig itt a rendszerek abszolút hibáit (csak az eltérés nagyságát) mutatom be az egyes állomásokra vonatkozóan.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Számos korábbi munka (többek között pl. *Dombai, 2007; Ádám, 2008*) felveti a problémát, miszerint a radar által mért reflektivitási gócok és a villámlási cellák pozíciójában sokszor számottevő (15–20 km-es) eltérés is megfigyelhető. Jelen mű e probléma kiküszöbölésére tett kísérletet, törekedve az elméleti 1–2 km-es pontosságú helymeghatározás elérésére.

Az általam kidolgozott módszer azáltal válik kombinálttá, hogy a LINET rendszer adataiból minden SAFIR állomásra konstruáltunk egy-egy korrekciós görbét. Tehát a SAFIR állomások iránymérési adatait (VHF) egyszer a rendszer saját LF hibaértékei alapján korrigáltuk, egyszer pedig a LINET LF adatok szerint, és így futtattuk újra a SAFIR lokalizációját. Mindent összevetve a vizsgálatom fő kérdése az volt, hogy a SAFIR rendszert a saját LF adataival tudjuk-e annyira korrigálni, mint a LINET LF értékeivel. Azaz szükséges-e egy másik rendszer a korrekcióhoz, vagy a rendszerünk (SAFIR) képes saját magát korrigálni (mivel tudjuk, hogy a LINET egy rendkívül pontos rendszer, így ennek precizitása számunkra a referencia)?

Célunk természetesen a SAFIR precizitásának növelése, hiszen akkor nem lenne szükség egy másik rendszer bevonására is a vizsgálatok egzaktta tételéhez. Mivel tudjuk, hogy a SAFIR a felhővillámokra sokkal érzékenyebb, mint a földvillámokra, ezért ha a pontosságát sikerülne feljavítanunk, akkor a felhővillámokat is sokkal precízebben tudnánk vizsgálgatni.

A központi egység zárt volta miatt ez az új módszer nem integrálható real-time módon a rendszerbe, csak archív adatokon alkalmazható. Mivel a technika főként villámklimatológiai, cellaazonosítási és cellakövetési szempontból fontos vizsgálatok során alkalmazható, így jelen dolgozatban három konkrét esettanulmányon mutattam be lehetőségeit és korlátait. Mivel azonban nem elegendők statisztikai vizsgálatok elvégzéséhez, így ezen felmérések további kutatási témák tárgyát képezik.

A munka során a SAFIR és a LINET villám lokalizációs hálózatok adatait mélyrehatóan tanulmányoztam, illetve azok kezelési technikáit sikeresen elsajátítottam. A dolgozat fő céljaként pedig egy új, kombinált eljárást dolgoztam ki, melynek segítségével – mivel az LF csatorna adatait is felhasználja – a felhőn belüli és a földbe csapó villámok pozíciói sokkal pontosabban nyerhetők ki, mint eddig.

Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretném megköszönni témavezetőmnek, Varga Bálintnak a munka során nyújtott segítségét, valamint a rengeteg hasznos szakmai tanácsot, melyekkel a dolgozat elkészítése során ellátott, ezáltal sokat tanulhattam tőle. Szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek, Dr. habil. Mészáros Róbertnek biztatásáért. Hálával tartozom Pátkai Zsoltnak és Décsei Annának a programozásban nyújtott segítségükért. Külön köszönöm Mona Tamásnak a programozás és a megjelenítés terén nyújtott számos gyakorlati tanácsát. Végül szeretném megköszönni a családomnak és a barátaimnak, hogy mindvégig mellettem álltak és lelki támaszt nyújtottak nekem.

IRODALOMJEGYZÉK

Ádám, R., 2008: A SAFIR villámlokalizációs rendszer pontosságának vizsgálata. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

Bent, R. B., Lyons W. A., 1984: Theoretical evaluations and initial operational experiences of LPATS (Lightning Position and Tracking System) to monitor lightning ground strikes using a time-of-arrival (TOA) technique. Proc. Int. Conf. Atmos. Electricity, Albany.

Betz, H. D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W. P., 2009: LINET - An international lightning detection network in Europe. Atmospheric Research, **91**, 564-573.

Buckley, B., Hopkins, E. J., Whitaker, R., 2005: Szélsőséges időjárás. In: A klímakutatás enciklopédiája (szerk.: Kertész, E.). Jászöveg Műhely Kiadó, Budapest. 118.

Diendorfer, G., Hofbauer, F., Stimmer, A., 1992: ALDIS – Das österreichische Blitzortungssystem, e & i, 109, H5, 261–266.

Dombai, F., 1998: SAFIR – villámlás lokalizációs hálózat Magyarországon. Léggör, 18. évfolyam, 16-22.

Dombai, F., Richard, P., 1998: SAFIR HMS Results – Comparisons between HMS Lightning Data and Radar Data. Study for references, Dimensions, Meyreuil, 1-27.

Dombai, F., 2007: Hazai villámlás lokalizációs és radar adatok összehasonlító elemzése. Doktori (PhD) értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (Témavezető: Dr. Weidinger Tamás)

Geresdi, I., 2004: Felhőfizika. Dialóg Campus Kiadó.

Kiss, Gy., 2004: Amit jó tudni a kúpszeletekről, I. rész. KöMaL, 54. évf., 1.

Keogh, S.J., Hibbett, E., Nash, J., Eyre, J., 2006: The Met Office Arrival Time Difference (ATD) system for thunderstorms detection and lightning location. Forecasting Research Tech. Rep. 488, 22.

Kohlmann, M., 2013: Konvektív paraméterek vizsgálata modellanalízisek alapján. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Kolláth Kornél)

Lagouvardos, K., Kotroni, V., Betz, H. D., Schmidt, K., 2009: A comparison of lightning data provided by ZEUS and LINET networks over Western Europe. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9, 1713–1717.

Lee, A. C. L., 1986a: An experimental study of the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique. Q. J. R. Meteor. Soc. **112**, 203-29.

Lee, A. C. L., 1986b: An operational system for the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique. J. Atmos. Ocean. Tech. **3**, 630-42.

Lee, A. C. L., 1989: The limiting accuracy of long wavelength lightning flash location. J. Atmos. Ocean. Tech. **6**, 43-9.

Mona, T., 2013: Zivatar rendszerekben fellépő villámlási anomáliák vizsgálata. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Dr. Horváth Ákos)

Montanyà, J., Pineda, N., March, V., Illa, A., Romero, D, Solà, G., 2006: Experimental evaluation of the Catalan Lightning Detection Network. 19th International Lightning Detection Conference, Tucson

Poelman, D., 2010: On the Science of Lightning: An Overview, Royal Meteorological Institute of Belgium 2010/0526/56.

Rakov, V. A., Uman M. A., 2003: Lightning: Physics and Effects. Cambridge University Press

Rasmussen, E.N., R.B. Wilhelmson, 1983: Relationships between storm characteristics and 1200 GMT hodographs, low level shear, and stability. Perprints, 13th Conf. On Severe Local Storms, Tulsa, OK, Amer.Meteo. Soc., J5-J8.

Richard, P., Kononov, I., 2001: Total lightning characteristics of thunderstorm contribution to storm nowcasting applications. In 5th European Conference on Applications of Meteorology, September 24-28, Budapest, 2001.

Szonda, S., Wantuch, F., 2001: A SAFIR villámfigyelő rendszer által 1999-ben regisztrált adatok. Elektrotechnika, 54-58.

Takahashi, T., 1978: Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. J. Atmos. Sci. 35, 1536-1548.

Wantuch, F., 2004: A Kárpát medence villámainak meteorológiai vizsgálata objektív mérések alapján. PhD disszertáció, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

W. Schulz, J-Y. Lojou, 2005: Total Lightning Detection Network in Central Europe: The F.L.A.S.H. Project.

Internetes hivatkozások:

<http://www.aldis.at/en/>

<http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/app/>

http://www.met.hu/ismertetok/OMSZ_villamlokalizacios_rendszere.pdf

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

<https://www.nowcast.de/en/lightning-detection-products/real-time-lightning-data.html>

<http://www.pa.op.dlr.de/linet/Overview/overview.html>

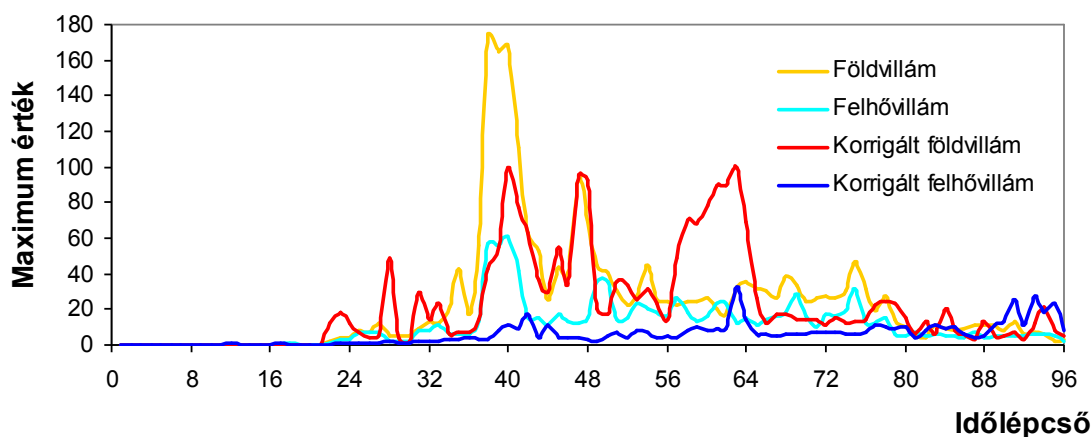
<http://www.sgo.fomi.hu/villam.php>

MELLÉKLET

1. melléklet. Az alkalmazott geodéziai képletet, mely a földrajzi koordináta értékeket (lat,lon) radarpixel-indexbe (i,j) számítja át. (Forrás: Varga Bálint)

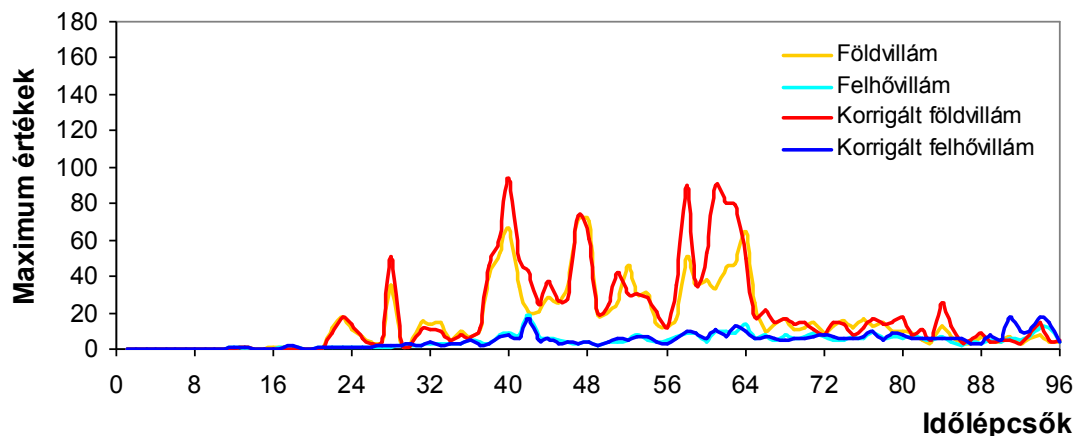
```
row1=11901.8*tan(((90.0-lat)/2.0)*PI/180.0)
row2=sqrt(1+pow(tan((lon-18.0)*PI/180.0),2))
ii=(int)((((row1/row2)-4688.2)/2)+151.5)
jj=(int)((((row1/row2)*tan((lon-18.0)*PI/180.0))/2)+151.5)
```

2009.07.18. LINET



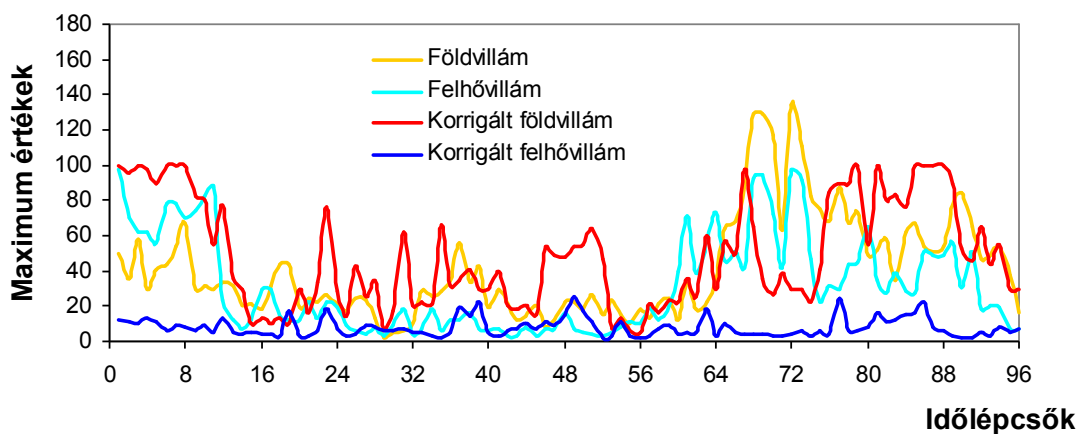
2. melléklet. A LINET nyers és a SAFIR VHF LINET LF-el korrigált adatsoraira vonatkozó maximum értékek (darab villám mértékegységben kifejezve) a negyedórás időlépcsők sorszámainak függvényében 2009.07.18. napra vonatkozóan.

2009.07.18. SAFIR



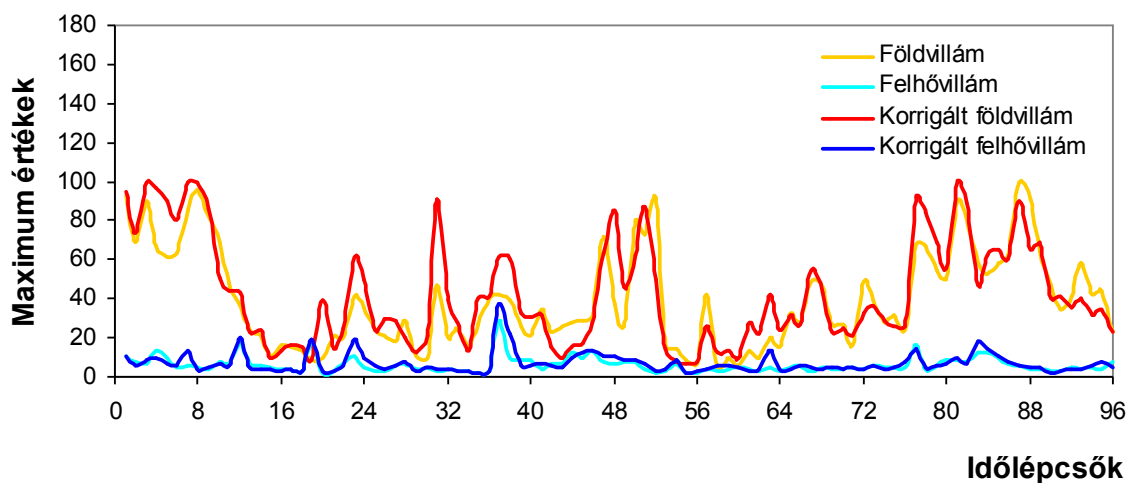
3. melléklet. A SAFIR nyers és korrigált adatsoraira vonatkozó maximum értékek (darab villám mértékegységben kifejezve) a negyedórás időlépcsők sorszámainak függvényében 2009.07.18. napra vonatkozóan.

2010.08.13. LINET



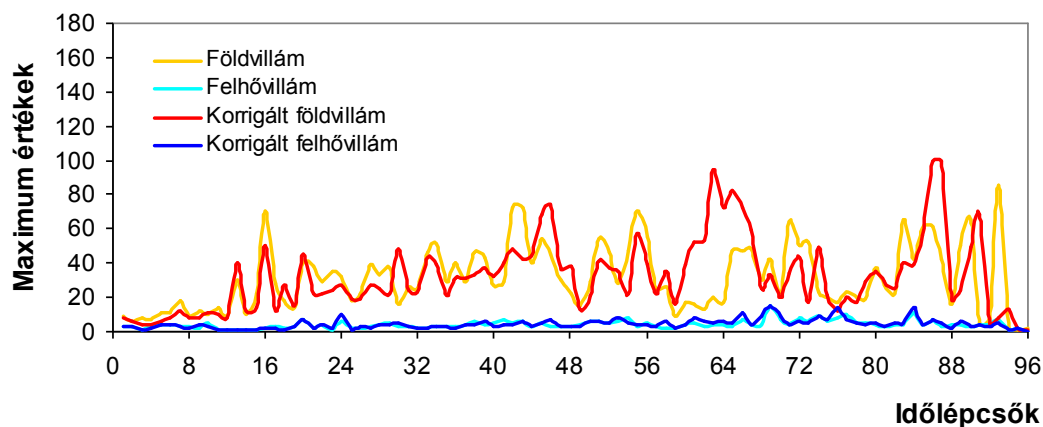
4. melléklet. A LINET nyers és a SAFIR VHF LINET LF-el korrigált adatsoraira vonatkozó maximum értékek (darab villám mértékegységben kifejezve) a negyedórás időlépcsők sorszámainak függvényében 2010.08.13. napra vonatkozóan.

2010.08.13. SAFIR

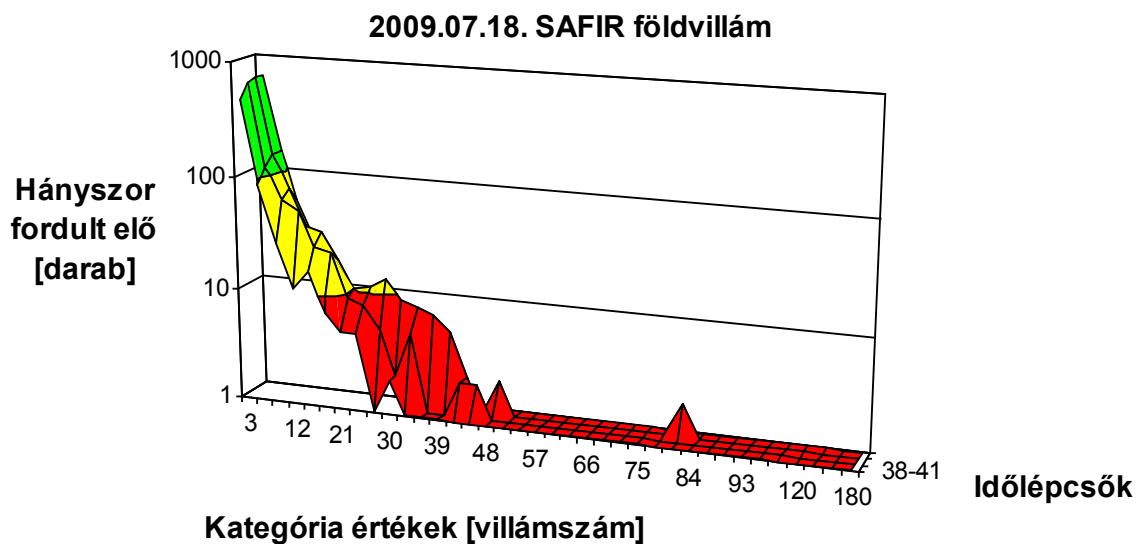


5. melléklet. A SAFIR nyers és korrigált adatsoraira vonatkozó maximum értékek (darab villám mértékegységben kifejezve) a negyedórás időlépcsők sorszámainak függvényében 2010.08.13. napra vonatkozóan.

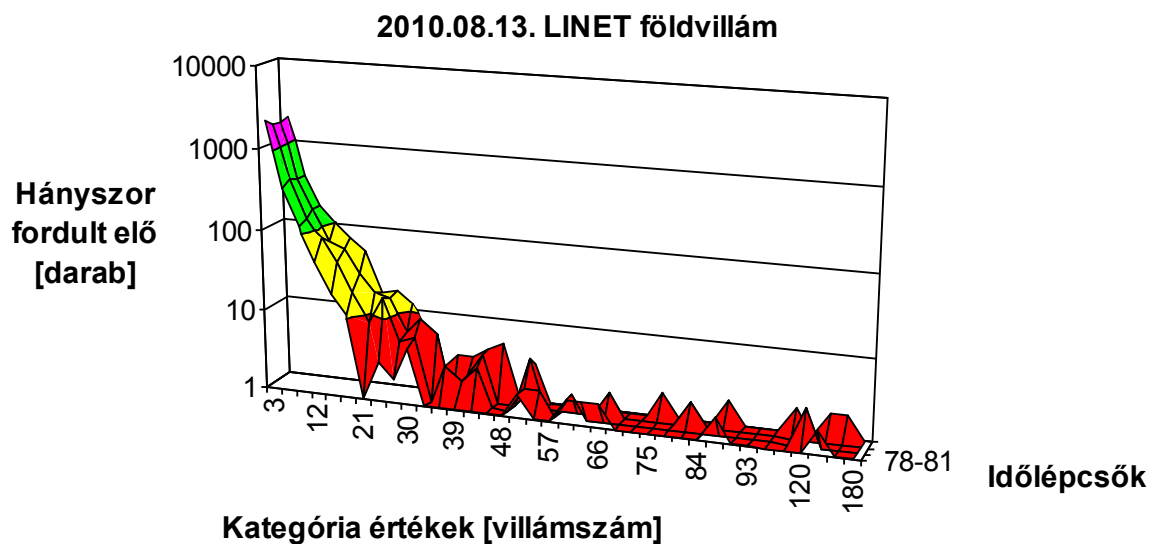
2010.08.15. SAFIR



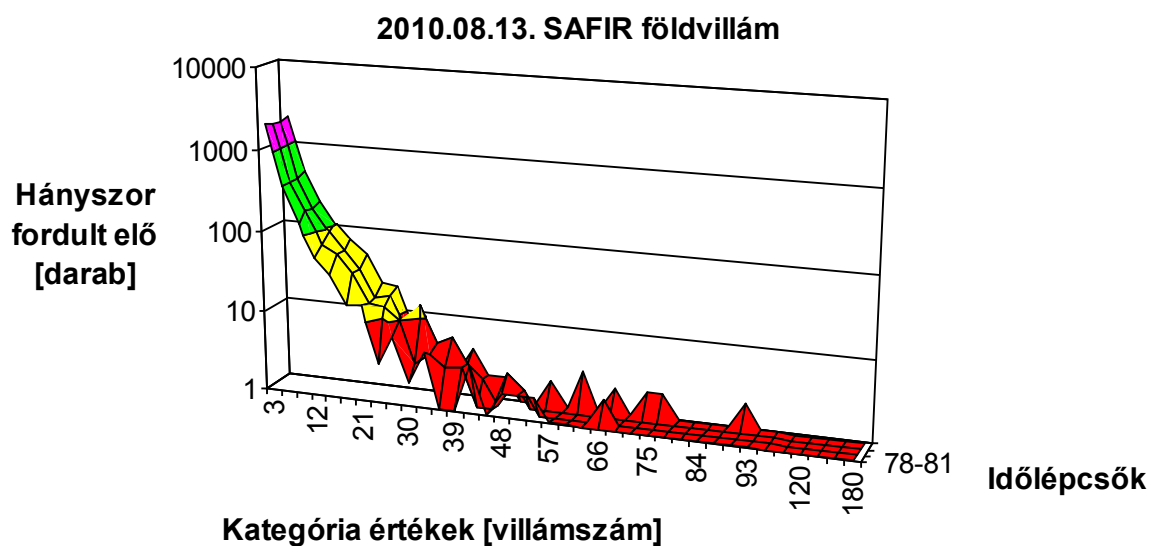
6. melléklet. A SAFIR nyers és korrigált adatsoraira vonatkozó maximum értékek (darab villám mértékegységben kifejezve) a negyedórás időlépcsők sorszámainak függvényében 2010.08.15. napra vonatkozóan.



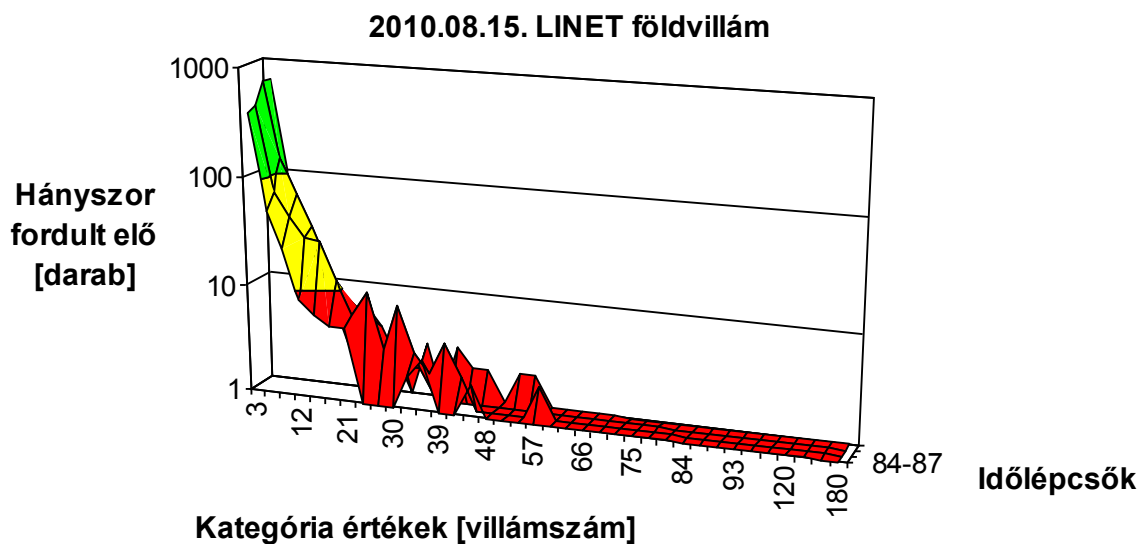
7. melléklet. A kiválasztott cella földvillám adatainak hisztogramja korrigált negyedórás SAFIR adatsorból 2009.07.18. napjára vonatkozóan. Megmutatja, hogy melyik időlépcsőben melyik villámérték hányszor fordult elő.



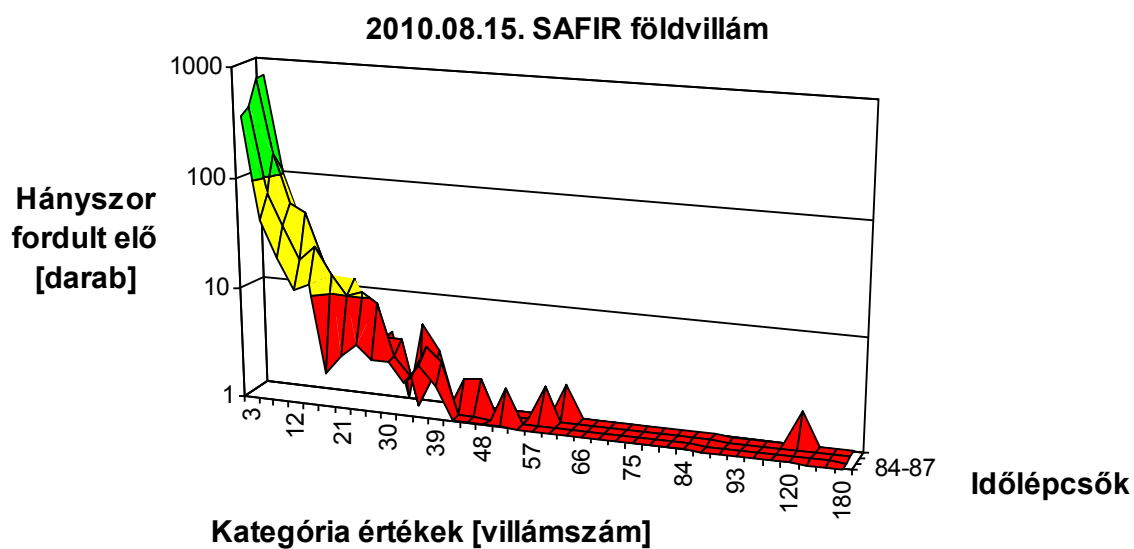
8. melléklet. A kiválasztott cella földvillám adatainak hisztogramja a SAFIR VHF LINET LF-el korrigált negyedórás adatsorából 2010.08.13. napjára vonatkozóan. Megmutatja, hogy melyik időlépcsőben melyik villámérték hányszor fordult elő.



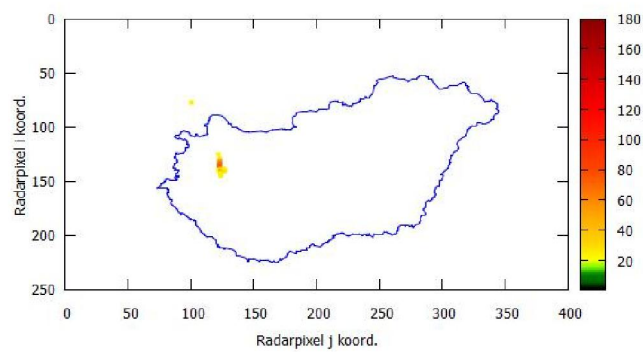
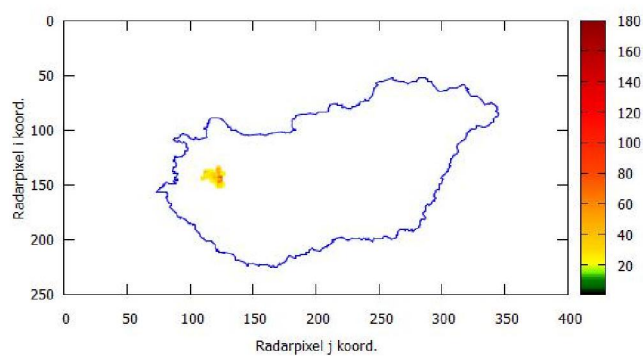
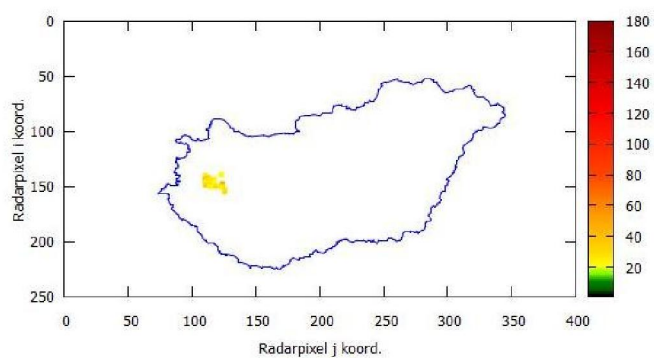
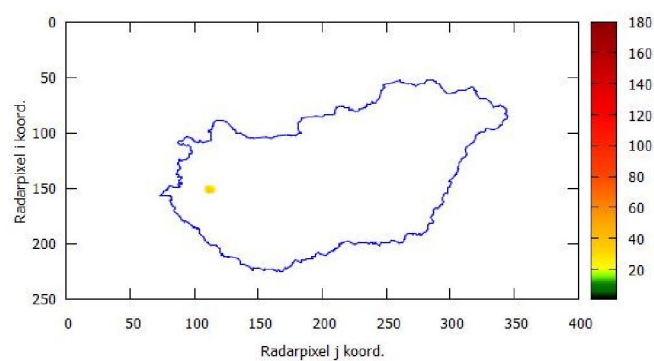
9. melléklet. A kiválasztott cella földvillám adatainak hisztogramja korrigált negyedórás SAFIR adatsorból 2010.08.13. napjára vonatkozóan. Megmutatja, hogy melyik időlépcsőben melyik villámérték hányszor fordult elő.



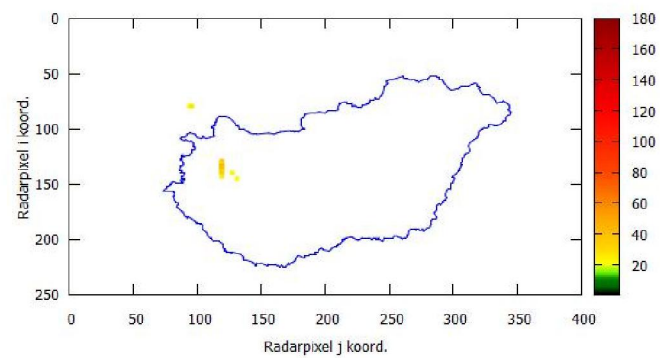
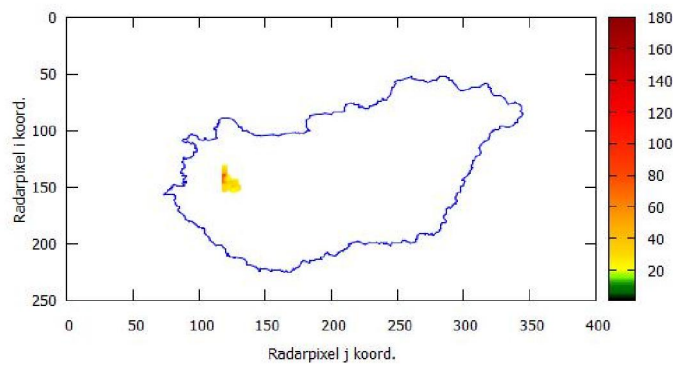
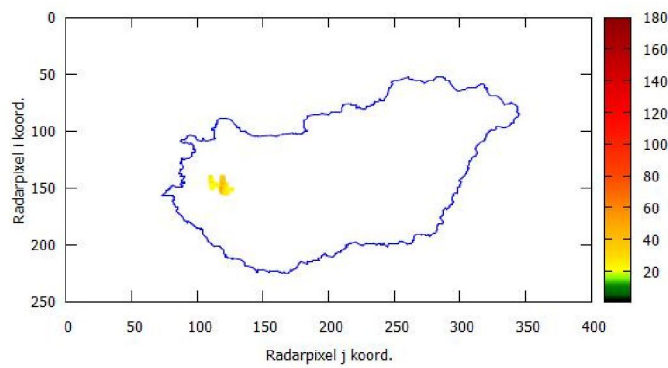
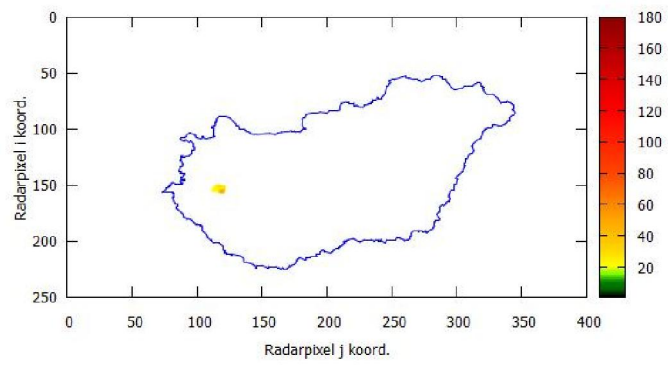
10. melléklet. A kiválasztott cella földvillám adatainak hisztogramja a SAFIR VHF LINET LF-el korrigált negyedórás adatsorából 2010.08.15. napjára vonatkozóan. Megmutatja, hogy melyik időlépcsőben melyik villámérték hányszor fordult elő.



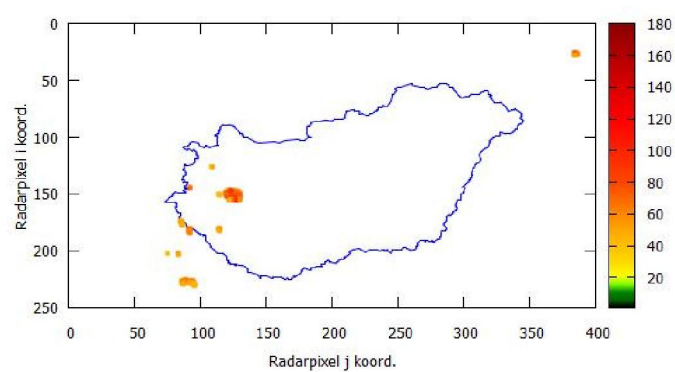
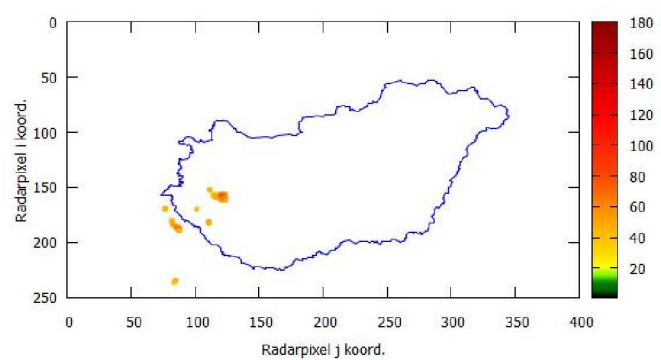
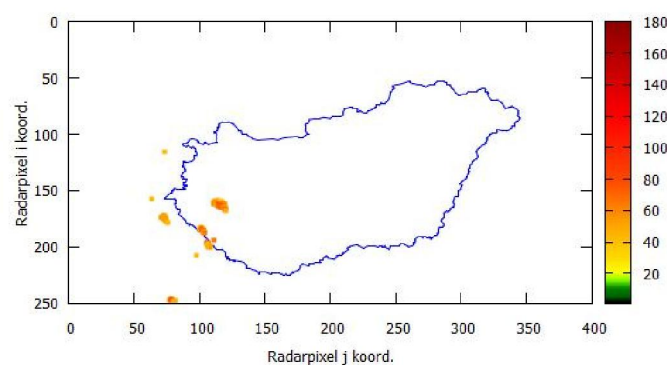
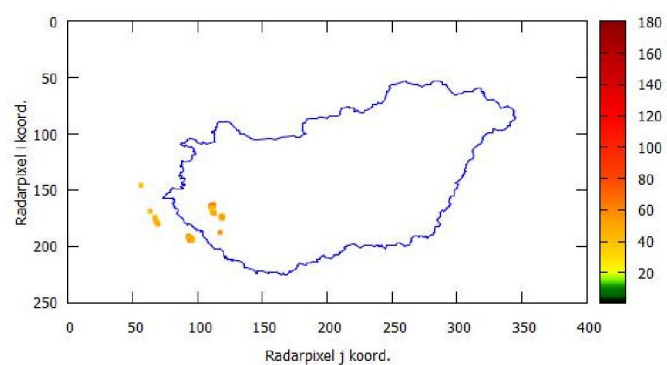
11. melléklet. A kiválasztott cella földvillám adatainak hisztogramja korrigált negyedórás SAFIR adatsorból 2010.08.15. napjára vonatkozóan. Megmutatja, hogy melyik időlépcsőben melyik villámérték hányszor fordult elő.



12. melléklet. A kiválasztott cella földvillámjainak megjelenítése Gnuplot-ban a SAFIR VHF LINET LF-el korrigált negyedórás adatsorából 2009.07.18. napjára vonatkozóan a vágás után.

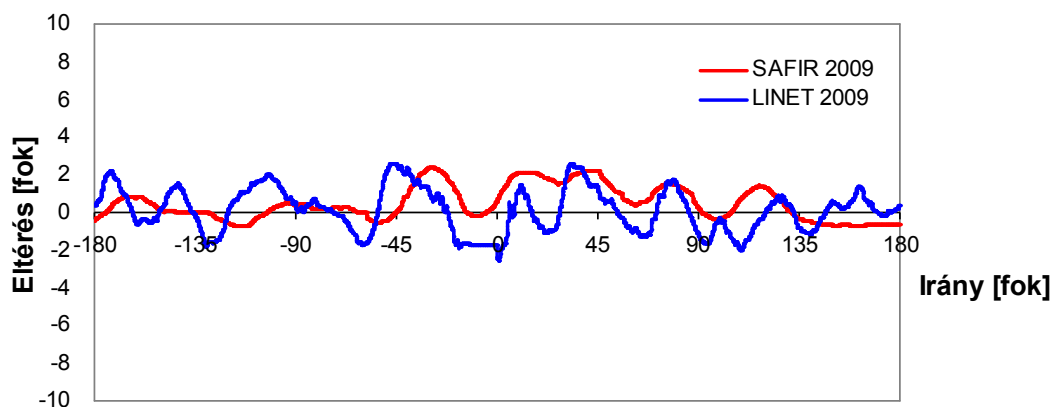


13. melléklet. A kiválasztott cella földvillámjainak megjelenítése Gnuplot-ban korrigált negyedórás SAFIR adatsorból 2009.07.18. napjára vonatkozóan a vágás után.



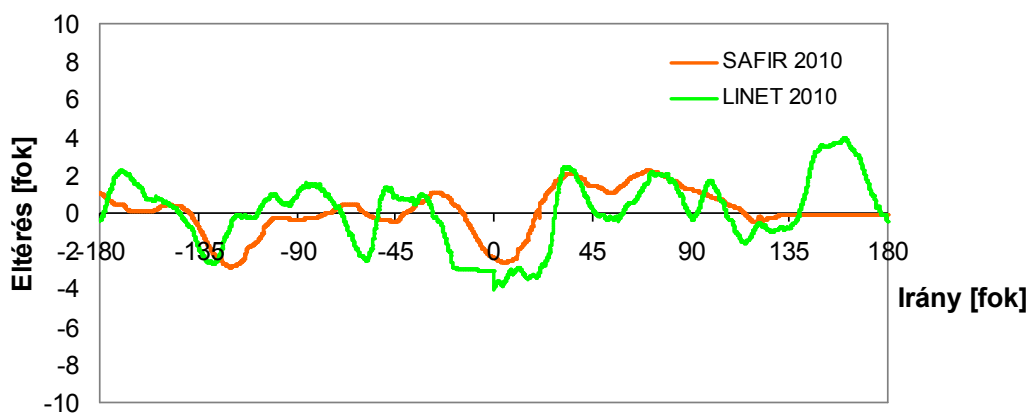
14. melléklet. A kiválasztott cella megjelenítése Gnuplot-ban vágás utáni negyedórás radar adatsorból 2009.07.18. napjára vonatkozóan a vágás után.

Bugyi állomás hiba összehasonlítás 2009.



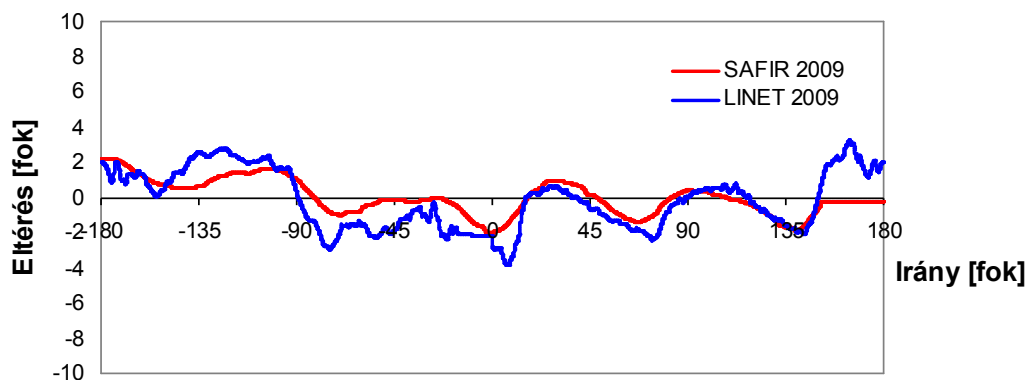
15. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett eltérések (SAFIR LF és LINET LF) összehasonlítása Bugyi állomáson 2009-ben. Megmutatja, hogy egy adott irányban mekkorát téveszt az adott rendszer érzékelője.

Bugyi állomás hiba összehasonlítás 2010.



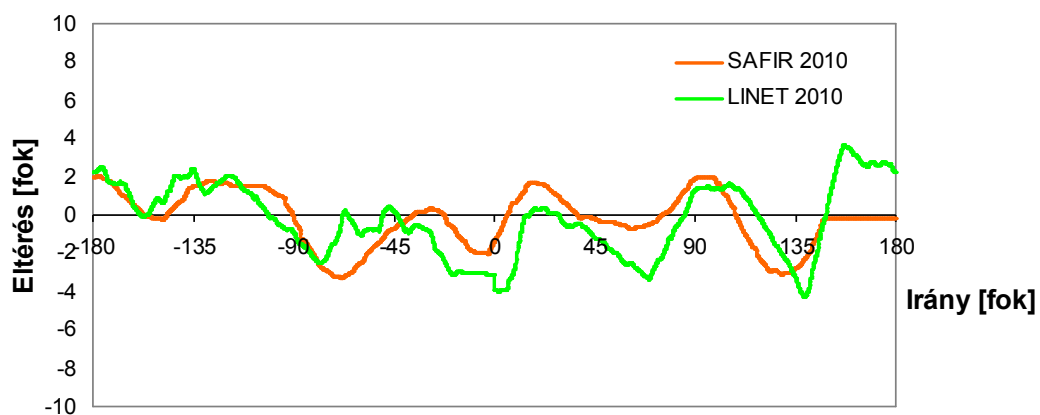
16. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett eltérések (SAFIR LF és LINET LF) összehasonlítása Bugyi állomáson 2010-ben. Megmutatja, hogy egy adott irányban mekkorát téveszt az adott rendszer érzékelője.

Sárvár állomás hiba összehasonlítás 2009.



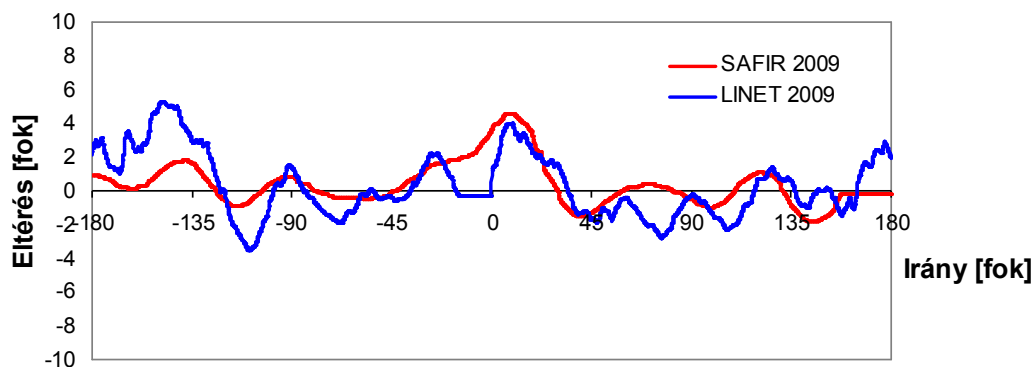
17. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett eltérések (SAFIR LF és LINET LF) összehasonlítása Sárvár állomáson 2009-ben. Megmutatja, hogy egy adott irányban mekkorát téveszt az adott rendszer érzékelője.

Sárvár állomás hiba összehasonlítás 2010.



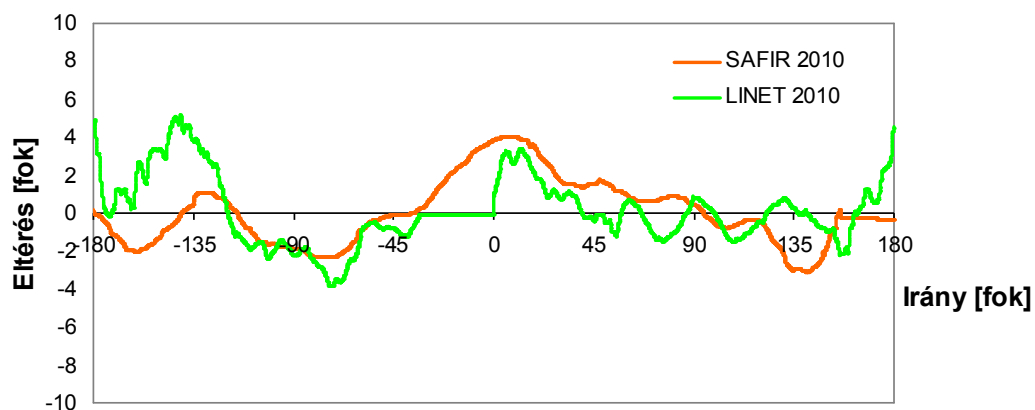
18. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett eltérések (SAFIR LF és LINET LF) összehasonlítása Sárvár állomáson 2010-ben. Megmutatja, hogy egy adott irányban mekkorát téveszt az adott rendszer érzékelője.

Véménd állomás hiba összehasonlítás 2009.



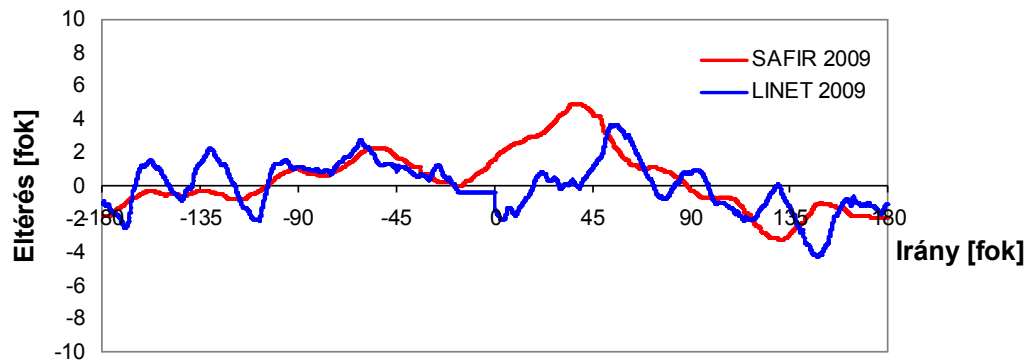
19. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett eltérések (SAFIR LF és LINET LF) összehasonlítása Véménd állomáson 2009-ben. Megmutatja, hogy egy adott irányban mekkorát téveszt az adott rendszer érzékelője.

Véménd állomás hiba összehasonlítás 2010.



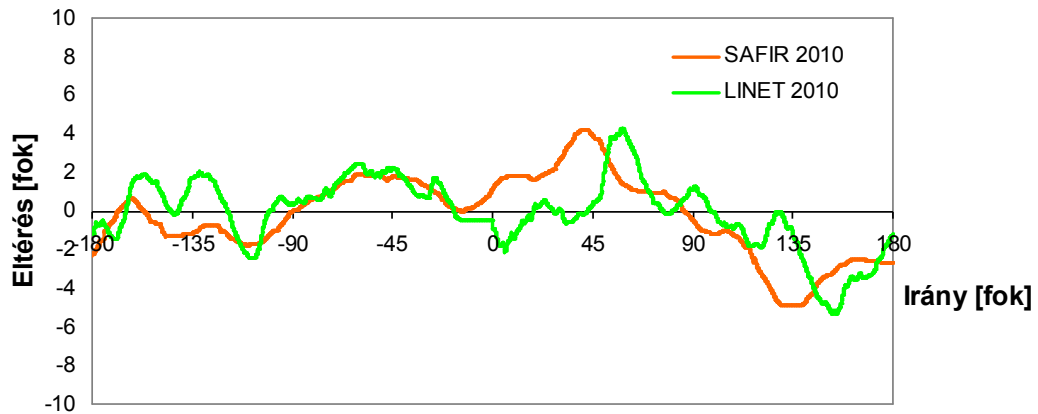
20. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett eltérések (SAFIR LF és LINET LF) összehasonlítása Véménd állomáson 2010-ben. Megmutatja, hogy egy adott irányban mekkorát téveszt az adott rendszer érzékelője.

Zsadány állomás hiba összehasonlítás 2009.



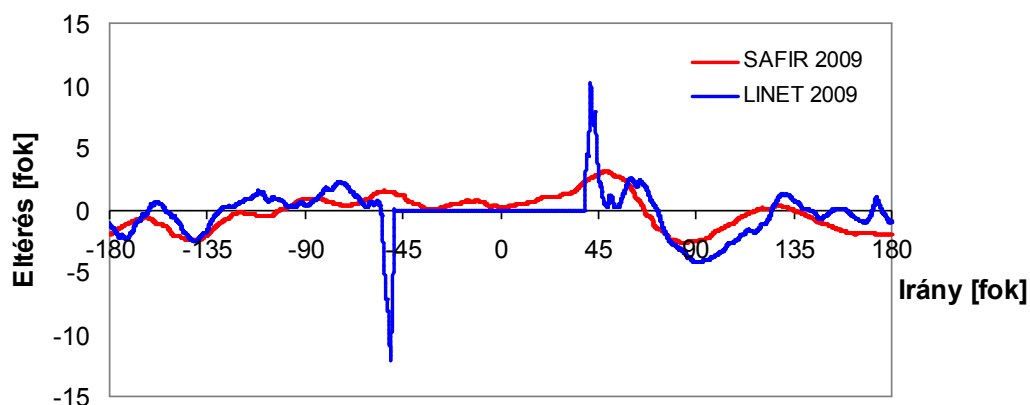
21. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett eltérések (SAFIR LF és LINET LF) összehasonlítása Zsadány állomáson 2009-ben. Megmutatja, hogy egy adott irányban mekkorát téveszt az adott rendszer érzékelője.

Zsadány állomás hiba összehasonlítás 2010.



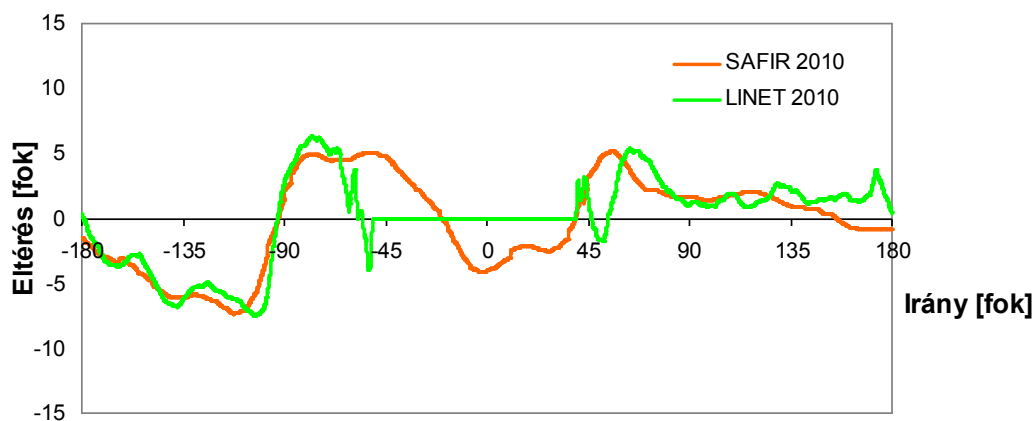
22. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett eltérések (SAFIR LF és LINET LF) összehasonlítása Zsadány állomáson 2010-ben. Megmutatja, hogy egy adott irányban mekkorát téveszt az adott rendszer érzékelője.

Varbóc állomás hiba összehasonlítás 2009.



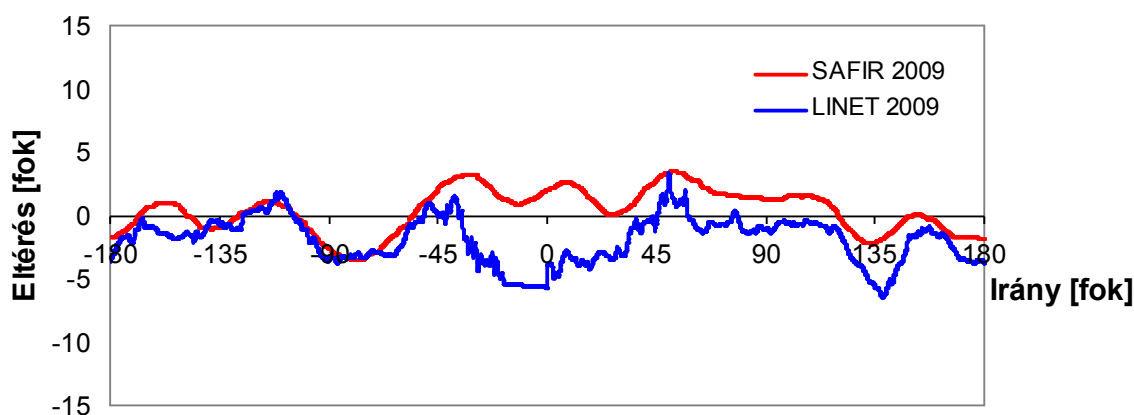
23. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett eltérések (SAFIR LF és LINET LF) összehasonlítása Varbóc állomáson 2009-ben. Megmutatja, hogy egy adott irányban mekkorát téveszt az adott rendszer érzékelője.

Varbóc állomás hiba összehasonlítás 2010.



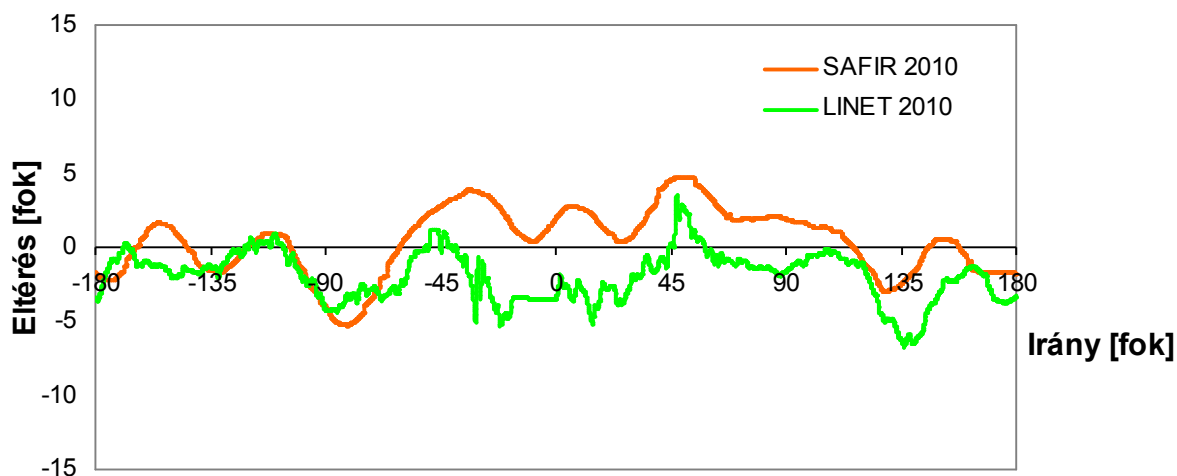
24. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett eltérések (SAFIR LF és LINET LF) összehasonlítása Varbóc állomáson 2010-ben. Megmutatja, hogy egy adott irányban mekkorát téveszt az adott rendszer érzékelője.

Maly Javornik állomás hiba összehasonlítás 2009.



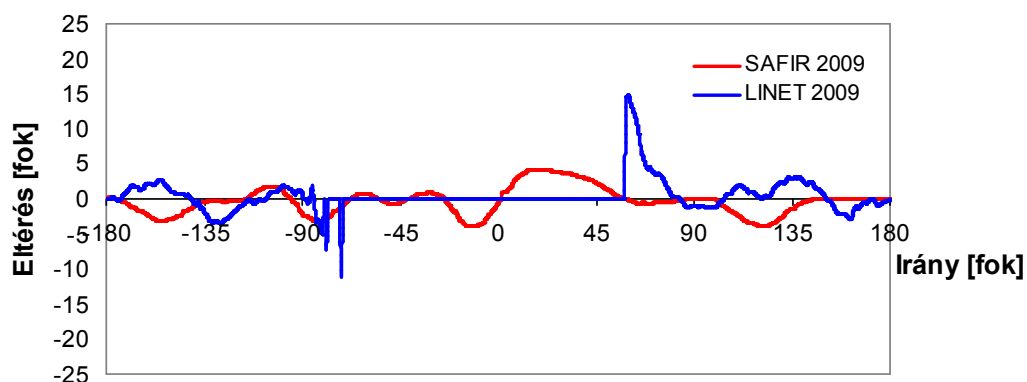
25. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett eltérések (SAFIR LF és LINET LF) összehasonlítása Maly Javornik állomáson 2009-ben. Megmutatja, hogy egy adott irányban mekkorát téveszt az adott rendszer érzékelője.

Maly Javornik állomás hiba összehasonlítás 2010.



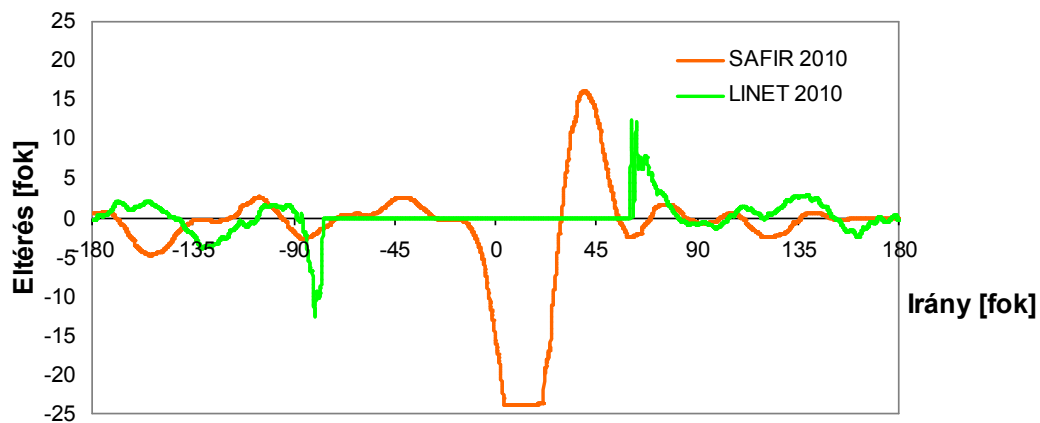
26. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett eltérések (SAFIR LF és LINET LF) összehasonlítása Maly Javornik állomáson 2010-ben. Megmutatja, hogy egy adott irányban mekkorát téveszt az adott rendszer érzékelője.

Milhostov állomás hiba összehasonlítás 2009.

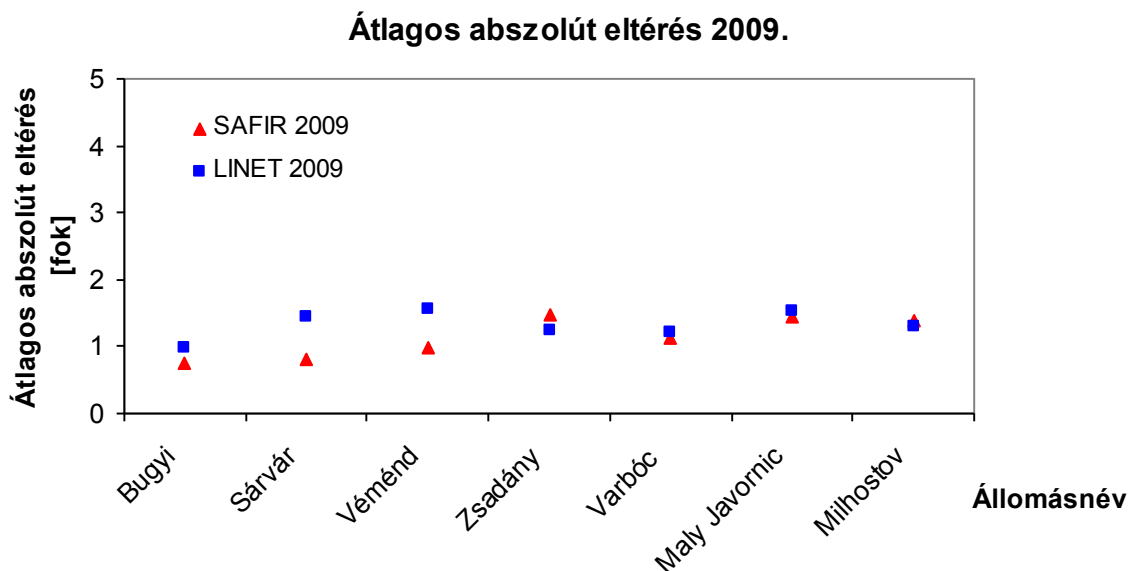


27. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett eltérések (SAFIR LF és LINET LF) összehasonlítása Milhostov állomáson 2009-ben. Megmutatja, hogy egy adott irányban mekkorát téveszt az adott rendszer érzékelője.

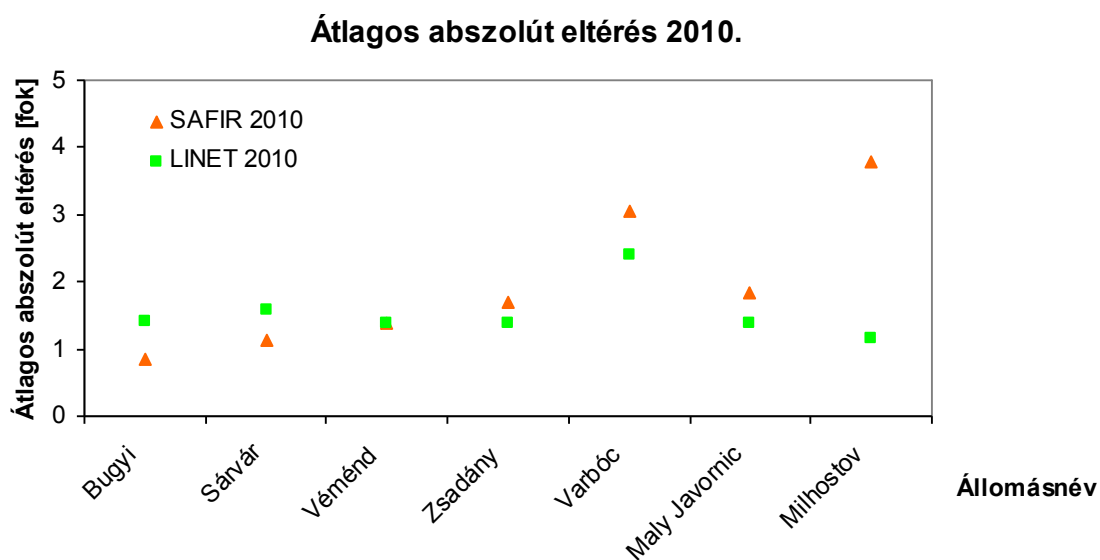
Milhostov állomás hiba összehasonlítás 2010.



28. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett eltérések (SAFIR LF és LINET LF) összehasonlítása Milhostov állomáson 2010-ben. Megmutatja, hogy egy adott irányban mekkorát téveszt az adott rendszer érzékelője.



29. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett hibaértékeinek (SAFIR LF és LINET LF) átlagos abszolút eltérése 2009-ben a vizsgált hét állomáson.



30. melléklet. A SAFIR VHF irányméréseitől vett hibaértékeinek (SAFIR LF és LINET LF) átlagos abszolút eltérése 2010-ben a vizsgált hét állomáson.