

Földbázisú távérzékelés a meteorológiában

Budai Olivér

III. éves földtudomány BSc szakos, meteorológia szakirányos hallgató

**Témavezető:
Mészáros Róbert
adjunktus**

*Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék*



Budapest, 2009.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. A villámlokalizáció	4
2.1 A villámlokalizáció története	4
2.2 A jelenlegi magyarországi helyzet	9
2.3 Villámlokalizációs módszerek	11
3. Az időjárásiradar	14
3.1 Az időjárásiradar története	14
3.2 A Doppler-radar	17
3.3 A polarizációs radar	19
3.4 Magyarországi helyzet	20
4. Egyéb távérzékelési eszközök	23
4.1 Windprofiler	23
4.2 Sodar.....	26
4.3 Lidar	27
4.4 Rass	28
5. Összefoglalás.....	29
Köszönetnyilvánítás	29
Irodalomjegyzék.....	30

1. Bevezetés

A XXI. században a távérzékelési eszközöknek egyre fontosabb szerepe van a meteorológiában. Ezeknek két fő típusát különböztetjük meg. Az első fő típust passzív távérzékelési eszközöknek nevezzük, melyeknél a környezetből érkező elektromágneses jeleket detektáljuk, ilyenek például a különböző villámlokalizációs berendezések. A másik fő típus, az aktív távérzékelési eszközök. Ez esetben a műszer bocsát ki valamilyen sugárzást, mely a légkörben szóródik, visszaverődik. A visszaérkező jelet a távérzékelési eszköz érzékeli, és ezekből tudunk következtetéseket levonni. Ilyen távérzékelési eszköz például a radar, a windprofiler, a sodar, a lidar és a Rass.

Az elmúlt években több munka is született az egyes eszközök hazai alkalmazásairól, felhasználási lehetőségeiről, a mérések korrekcióiról, és a mért adatok feldolgozásából. Horváth (2001) a duál polarizációs radar mérések alapján a csapadék halmazállapot szerinti osztályozását adta meg. Wantuch (2004) a Kárpát-medencében 1999 és 2003 között előforduló villámok statisztikáit és azok jellemző fizikai paramétereit, valamint a SAFIR villámlokalizációs rendszer nowcasting célú alkalmazásának módszerét adta meg. Fülöp (2004) a zivatarfelhő elektromos tulajdonságai és a kihullott jégtartalom közti összefüggéseket elemezte. A villámlokalizációs rendszer adatainak radarmérések általi pontosításával foglalkozott Ádám (2007). A hazai villámlokalizációs rendszer és a radarmérések közötti átfogó összehasonlításokat és elemzéseket készített Dombai (2007).

Szakedolgozatom célja átfogó képet adni a hazai távérzékelési eszközökről és azok alkalmazási lehetőségeiről, kitekintéssel egyéb, a nemzetközi gyakorlatban használt mérési módszerekre is. Munkám során összegyűjtöttem a legfontosabb – elsősorban a hazai gyakorlatban is használt – mérőeszközöket és bemutatom ezek történetét, működési elvüket valamint magyarországi helyzetüket.

A dolgozat 3 nagyobb témakört mutat be: ezek a villámlokalizációs mérések, a radarmérések valamint az egyéb távérzékelési eszközök.

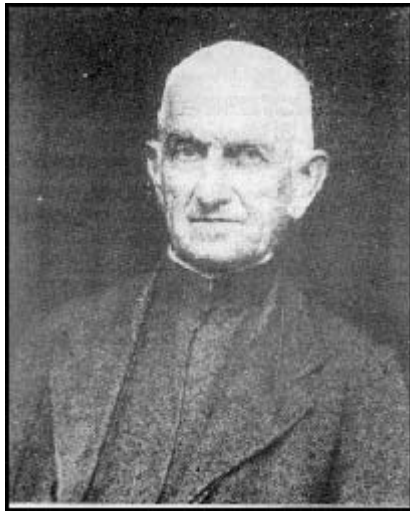
2. A villámlokalizáció

2.1 A villámlokalizáció története:

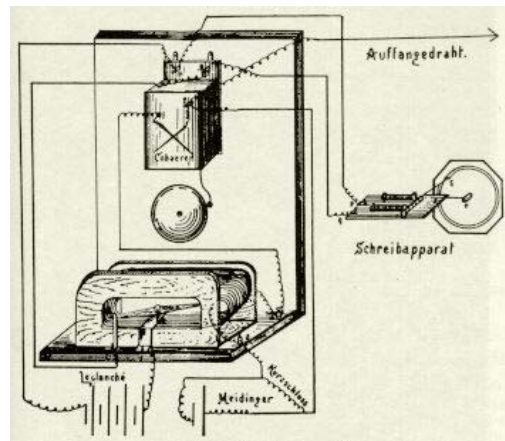
A villám, mint egy óriási rádióantenna, rádióhullámokat szór szét a térben. Ezeket a rádióhullámokat általában mint „légköri zavarokat” észlelhetjük rádiónkban. A légköri zavarokat görög-angol kifejezéssel „atmospharics”-nek, rövidítve „spherics”-nek nevezzük. A szférickszek detektálása már viszonylag korán megtörtént. A zivatarok villámainak ezeket a nagyon erős rádióhullámait igen egyszerű eszközökkel észlelték már a 19. században is, így pl. Szentpétervárott a szerencsétlenül járt Richmann, akit az „antennával” felfogott villám csapott agyon, majd Popov és sokan mások, akik mind a közeledő zivatar jeleit kívánták észlelni.

Készülékük néhány alkatrészből állt: egy antennából, amely a szférickszek okozta váltófeszültséget egy „koherer”-be, majd onnan a földbe vezette. A koherert ma egyenirányítónak nevezhetnénk. A koherer egy üvegcső, melyben finomra reszelt vaspor van, a cső két végén elvezető huzalok voltak. Ha elég nagy áram folyt át rajta, a vasszemecskék összeálltak és vezették egy galván elem egyenáramát is. Ez az egyenáram egy villamos csengőt működtetett, amelynek karja egyrészt a csengőt ütötte meg az egyenáram áthaladásakor, másrészt a vasport tartó üvegcsövet. Az ütésre a csőben ismét széthullottak a vasszemek és így a koherer alkalmassá vált újabb jel közvetítésére. A csengő pedig jelezte, hogy valahol villámlott.

Egy év múlva Fényi Gyula (1. ábra) a kalocsai rendház főnöke és az ugyanott működő Haynald csillagvizsgáló igazgatója a náluk összeállított zivatarjelző készüléket ismertette (2. ábra). Ezt a koherert nem üvegcsőbe zárt vasporból készítették, hanem saját elgondolásból egyszerűen két összeszorított varrótűből. A rozsdamentes acéltűk egymásranyomásának mértékével szabályozni tudták a „koherer” és így az egész zivatarjelző készülék érzékenységét is.



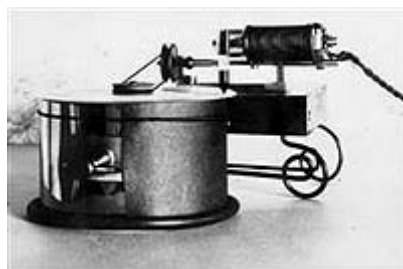
1. ábra. Fényi Gyula



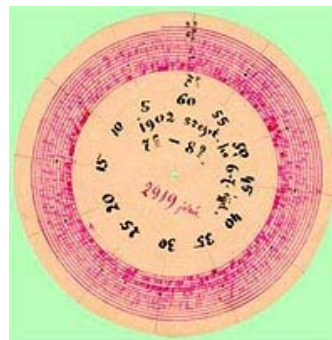
2. ábra. A Fényi-féle viharjelző

Fényi és Schreiber az 1900-as évek első évtizedében vezető szerepet vitt a zivatarjelző készülékek szerkesztése és zivatarmegfigyelések terén. Berendezésük egyszerű volt, olcsó és biztonsággal működött. Fényi 1901-ben számolt be a Kalocsán műszerrel észlelt zivatarok évi- és napi periódusairól (Fényi, 1901a,b,c). Az általuk kifejlesztett eszközzel 110 km távolságból is észleltek zivatart és a műszerrel kapott adatokat a zivatarészlelő hálózat adataival összehasonlítva ellenőrizték. A Fényi-féle viharjelző külföldön is elterjedt.

Ebben az időben készült el Kalocsán a Haynald-obszervatóriumban az első zivatarregisztráló készülék (3. ábra). A csengőkarra írórt szereltek fel és ez jeleket írt egy óra tengelyére erősített, körben forgó, kemény papírkorongra (4. ábra). Így egyrészt mentesültek az állandó személyes ügyeletről, másrészt pontosabb zivatarsztatisztikákat készíthettek az íróműszer adataiból. Mivel három ilyen műszer működött, fokozott érzékenységgel, a zivatarok távolságára is következtethettek a jelekből.



3. ábra. Regisztráló készülék



4. ábra. Regisztrátum

A első világháború zavaraiban háttérbe szorult az érdeklődés a zivatarok és villámok egyszerű és műszeres észlelése iránt. A második világháború során a szövetségi hatalmak tettek kísérleteket az Atlanti-óceánon közlő zivatarfrontok helyzetének megállapítására. Angliai és marokkói támaszpontokon vették a szférikus jeleket, iránymutató rádiókészülékekkel. E készülékek megszerkesztésénél már figyelembe vették azt is, hogy ezek a zörejek igen hosszú, leginkább 50-60 km-es hullámhosszon jelentkeznek a legerősebben. A hosszúhullámhosszon biztosabban elvégezhető iránymérés, továbbá a nagy bázistávolság adta biztonság igen előnyös volt erre a helymeghatározó mérésre és az angolok valóban jelentős eredményeket mutattak fel az óceán felől jövő hidegfrontok előrejelzése terén.

Hasonló irányú tevékenységre intézett felhívást a magyar kutatókhoz Berkes Zoltán 1956-ban. A felhívásban figyelmeztetett a légköri elektromosság, az ionoszféra és a légköri zavarok adatainak, meneteinek az időjárás kutatásában is felhasználható voltára. Később, 1958-ban Flórián Endre a Magyar Meteorológiai Társaság és a Híradástechnikai Tudományos Egyesület egyesített előadásán magnetofonnal bemutatta a különböző típusú szférikus hangokat és elmondta a meteorológiában elképzelhető jelentőségüket. Az előadást Dési Frigyes igazgató is hallotta, hozzászólásában érdekesnek és hasznosnak vallotta a szférikusokkal történő kísérleteket. Hamarosan megbízta Mezősi Miklóst a szférikusokkal való kísérletezésre és az ilyen méréseknek a hazai meteorológia szolgálatába való bevezetésére. Mezősi Miklós ismertette a légköri zörejek bemérését, a zörejek hullámalakjának és irányának egyidejű vizsgálatát (Mezősi, 1958). Az Országos Meteorológia Intézet ezután rövidesen vásárolt egy német gyártmányú szférikus iránymérő készüléket és így már vállalkozhatott arra, hogy részt vesz a közép-európai szférikus-észlelésben. 1965 tavaszán Potsdamban volt az első közép-európai „szférikus munkaértekezlet”, amelyen magyar részről Mezősi Miklós vett részt. A szférikus észlelésekre mint legalkalmasabb helyet, a siófoki obszervatóriumot jelölték ki (5. ábra).

Nemsokára meg is kezdődött a munka. A szférikus észlelése és az időjárás előrejelzésében történő felhasználása a következőképpen zajlott le: Minszkben és Potsdamban, a két vezető központi szférikus állomáson, rádiójelet sugároztak adott hullámhosszon és időben. A jel vételekor Siófokon, Potsdamban, Varsóban, valamint Minszkben is a szférikus kereső berendezés oszcilloszkóp ernyőjén lemérték az északi iránytól számított fokokban, az abban a pillanatban észlelhető szférikus-irányt és távgepíron megtáviratozták a központi állomásoknak. Itt egy nagy térképen meghúzták a kapott irányok vonalát és látták, hogy a vonalak vagy egy pontban, vagy egy háromszöget alkotva, egy kis

terület bezárásával találkozhatnak. Ebben a pontban, illetve helyen történt a szféríkszet okozó villámlás. A villám és így a zivatar helyét többször is meghatározták, majd az adatokat távgépíron közvetítették az észlelő állomásokra, illetve az érdeklődő intézményeknek, amelyek a helyi időjárási előrejelzésekhez használták fel a zivatarok vonulásának ismereteit. Ez a munka délelőtt és a déli órákban szolgálatyszerűen folyt. A nagy bázistávolságok elég pontos helymeghatározást engedtek meg, még hosszabb méretű hidegfrontok esetén is.



5. ábra. A siófoki obszervatórium

A nemzetközi helymeghatározó, műszeres zivatarészlelés hosszú ideig a fenti módon folyt Közép-Európában, magyar közreműködéssel és nagyban hozzájárult az európai zivatarelőjelzéshez, és egyben a siófoki meteorológiai obszervatórium nyári, balatoni veszélyjelentő szolgálatának sikeréhez. A régi kohereres vagy Fényi-féle tús zivatarjelző berendezések a hatvanas években új köntösben éledtek fel. Az a körülmény, hogy a villámok igen nagy térerősségű szféríkszekkel jelentkeznek, lehetővé tette a viszonylag egyszerű felépítésű tranzistoros vevőkészülékek használatát, amelyek a szféríkszeket irány jelzése nélkül veszik. Ezek a készülékek vagy íróműszeren jelzik a villámok jelentkezését, vagy egy számoló tárcsa tengelyét forgatjuk el az egyes villámok észlelése alkalmával és így „megszámoljuk” a villámok számát. Eközben, mint a régi műszereken a csengő, itt a villamos relék kattánásával jelzik a szféríkszek megérkezését.

Ilyen műszerek használatára a Meteorológiai Világszervezet 1961-ben Zürichben tartott szféríksz-munkacsoportja hívta fel az egész világ figyelmét. Itt szó volt arról is, hogy nem jelent nagy hibát a villám „teljesítményének” figyelemen kívül hagyása. A meteorológiai célból végzett vizsgálatok esetében ugyanis, amikor a legnagyobb távolság legfeljebb 160 km, még nem kell a szféríkszek hullámterjedési lehetőségeire gondolnunk. Ezért a villámnak, mint „rádió-adó-berendezésnek” a teljesítménye nem feltétlenül fontos tényező a statisztikai átlagtávolságok megállapítása esetén. Ezeket a berendezéseket tehát azzal a megfontolással készítették, hogy kis térerősség távoli, míg nagy térerősség közeli villám-, illetve zivatar jeleként detektálódik. A készülék érzékenységének változtatásával tehát a zivatar távolságára is következtetni lehetett.

A hazai szolgálatnál 1963-tól már ötcsatornás műszer működött a Marczell György obszervatóriumban. Ez egy ötféle érzékenységgű, illetve öt fokozatosan közelebbi körzetből érkező villámjeleket regisztráló berendezés (Galló, 1964). A tranzisztoros, ötcsatornás készüléket négy csatornája fokozatosan 160, 80, 50 és 20 km-es sugarú körzetből érkező szféríkszekre érzékeny, olyan zörejekre, amelyeket zömében a felhőből a talajra irányuló kisülés okoz. Az ötödik csatorna a felhő- és a talaj között vagy csupán a felhőben lezajló villámok jeleire is reagált. A szétválasztást a fenti villámok által keltett szféríksz jelek különbözősége, eltérő frekvenciatartalma, illetve a berendezésben erre a célra alkalmazott szétválasztó fokozatok tették lehetővé.

A villámok prognosztikai hasznosítása a fejlett országokban az 50-es évek végén kezdődött meg. A szinoptikus meteorológia számára ugyanis a villámok nyomjelzőnek tekinthetők: a frontális és lokális zivatargóccok helyét pontosan megállapítjuk, ha valamilyen rádiótechnikai módszerrel bemérjük a kisülések távolságát, irányát. A góc intenzitására az időegység alatt észlelt kisülések száma ad információt. Erre szolgáló, viszonylag egyszerű műszer a villámszámláló. Működési elve igen egyszerű: a villámcsapás elektromágneses teret kelt, amelyet irányfüggetlen antennára kapcsolt elektronikus számláló jelez, vagy regisztrál. A számláló érzékenységét szabályozva változik a hatósugár is: ezen alapszik a villámszámlálókkal végzett közelítő pontosságú távolságmérés is. Hazánkban 1962-ben indult meg a villámszámlálók fejlesztése, először egy ötcsatornás (azaz öt, különböző érzékenységgű számláló egy dobozban) műszer alakjában, még elektroncsövekkel, majd hamarosan megkezdődtek a tranzisztoros számlálók építése, amelyekkel azután – együttműködve a Villamos Energiaipari Kutató Intézettel – 5 állomásból álló hálózatot állítottak fel. Az e hálózattal végzett adatgyűjtés nemcsak aeroklimatológiai, hanem szinoptikus célokat is szolgált, konkrétan pl. a Balatoni Viharjelző Szolgálatnál.

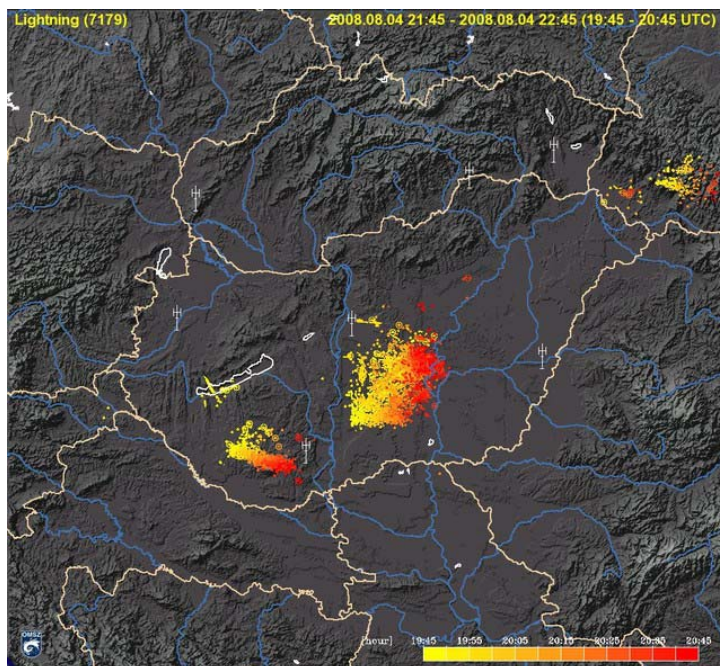
2.2 A jelenlegi magyarországi helyzet:

A Magyarországon jelenleg működtetett SAFIR (System d'Alerte Foudre par Interferometrie Radioelectrique) rendszerrel a villám helymeghatározását több pontból történő irányméréssel oldják meg. A rendszer kiépítésének ötlete 1995-ben vetődött fel, és 1997-ben megkezdődött kísérleti működése három magyarországi állomással (Budapest, Sárvár, Véménd), de ez mindössze az ország 60%-os lefedettségét biztosította. 1998 végén történt meg a teljes villámfigyelőrendszer kiépítése, öt detektáló állomás üzembe helyezésével. 2002-ben az OMSZ a jelentős zavarszinttel rendelkező budapesti detektáló állomást Bugyiba helyezte át, a sáravári állomás új és korszerű berendezéseket kapott, valamint Szlovákiából további két detektáló állomást integráltak a mérő-rendszerbe. Így az öt magyarországi állomással és a két szlovákiai állomással (6.ábra) a villámdetektáló hálózat Magyarország teljes területét és a szomszédos országok területének egy részét is lefedti.



6. ábra. A SAFIR rendszer villámdetektorai

A rendszer a villámlás helyét 100 μ sec-onként 2 km-nél kisebb pontossággal észleli. A villámok detektálásának elvi pontossága 98% felett van. A 7. ábrán egy villámtérképet láthatunk, mely a 2008 augusztus 4-ei 19.45-től 20.45-ig (UTC) detektált villámokat mutatja.



7. ábra. Villámtérkép

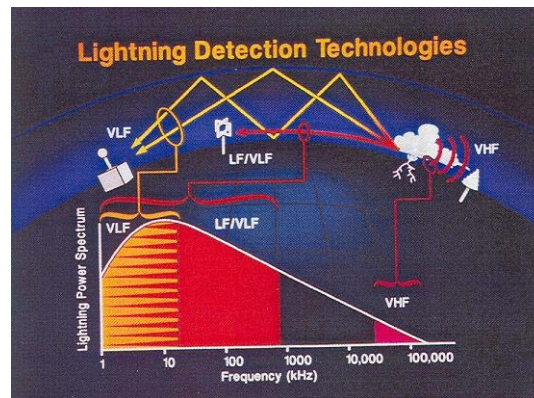
Az első néhány évben gyakoriak voltak a szenzorhibák, hosszantartó állomáskiesések okoztak problémát, az ország lefedettsége nem mindig volt biztosított. 2003-ban a sárvári állomást villámcsapás érte, ezért szükség volt a műszerek teljes cseréjére. 2005 júniusában az Országos Meteorológiai Szolgálat bekapcsolódott a FLASH (Full Lightning Detection Austria, Slovakia, Hungary) projektbe, melynek során a SAFIR rendszeren műszaki felülvizsgálatot végeztek. Ebben a közép-európai egyesített villámlokalizációs programban a Vaisala, az ALDIS, a ZAMG, az Austro-Control, az SHMI és az OMSZ vesz részt. Az adatfeldolgozó számítógéppel a különböző típusú érzékelők adatait tudjuk együttesen feldolgozni. A FLASH program fő célja a különböző adatok integrálása, a közép-európai hálózat kialakítása. A FLASH létrejöttével hozzájutunk a szomszédos országok alacsony frekvenciás villámadataihoz is. Így a szélső állomások ideiglenes kiesésekor nem maradunk adat nélkül. Az együttműködés célja a már létező többfajta szenzort és szoftvert összefogni egy egységes egészé, egy új közös központi egység valamint megjelenítő rendszer segítségével. Azért is fontos az együttműködés, mert a heves nyári zivatarok gyakran nem határon belül alakulnak ki, így a radar mérések mellett a villámkisülések érzékelése is információval szolgál a közelgő zivatarról. Erre jó példa a 2006 augusztus 20-i vihar, amikor az osztrák mérések már 16 UTC előtt jól kirajzolták a fejlődő zivatargócot Ausztria területén (Ádám, 2007).

2006-tól az Országos Meteorológiai Szolgálat Távérzékelési Osztálya az irányméréssel kapcsolatos fejlesztések keretében a mérőállomásokat rendszeresen, minden

korábbinál gyakoribban ellenőrzi, a különböző problémákat a lehető leggyorsabban orvosolják. A rendszer komolyabb fennakadás nélkül szolgáltat adatokat.

2.3 Villámlokalizációs módszerek:

A villámlást többféle képen tudjuk detektálni, valamint többféle módszer létezik pozíciójuk meghatározására. A detektálás a villámkisülés által kibocsátott elektromágneses sugárzás érzékelésén alapul. A villámlás keltette sugárzás széles frekvencia spektrumot fog át. A legáltalánosabban használt az LF (low frequency) és a VHF (very high frequency) frekvencia sávokon történő érzékelés. A VHF frekvencia sáv 30–300 MHz-es tartományt jelenti, az LF a 30–300 kHz közötti frekvencia sáv (8. ábra).



8. ábra. A villámok frekvencia sávjai

Az LF detektálás a lecsapó villámok érzékelésére jó módszer, mivel a lecsapó villámok nagyobb intenzitással sugároznak alacsony frekvenciájú elektromágneses hullámokat. Ehhez kétféle helymeghatározási módszert fejlesztettek ki (Fülöp, 2004).

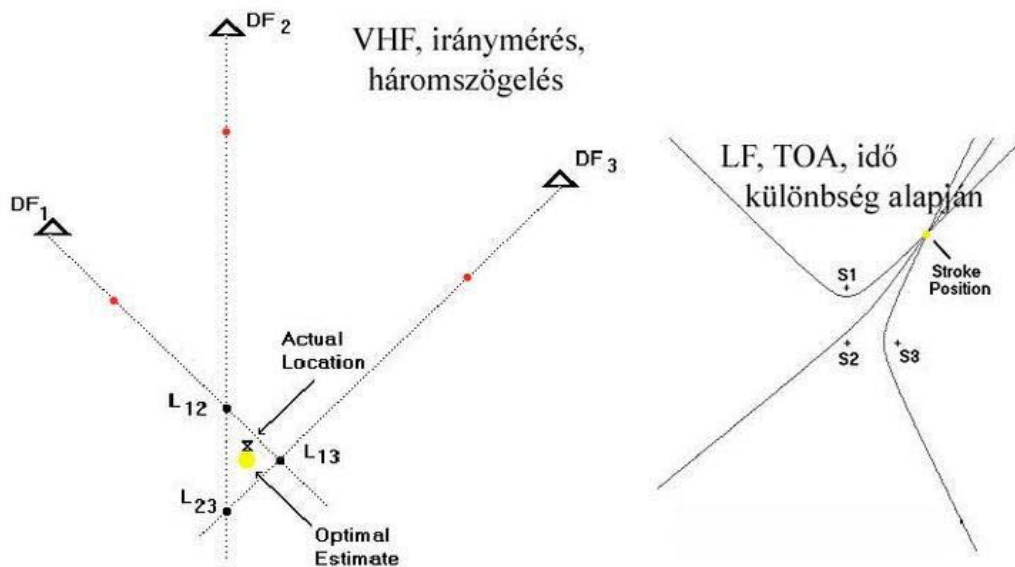
Az egyik módszer a mágneses helymeghatározás (MDF – Magnetic Direction Finder). Itt a szenzor két tekercsből áll, melyek egymásra merőlegesek (észak-dél, és kelet-nyugat irányba mutatnak). Ezek a tekercsek az elektromágneses hullám mágneses mezőjének alapján adják meg a hullám érkezésének irányát. A helymeghatározás ezután minimum két szenzor adataiból történik háromszögeléssel.

A másik módszerben az időmérés elve alapján határozzuk meg a pozíciót (TOA – Time of Arrival). Ezt a 9. ábra jobb oldali képe ábrázolja. A villámból származó elektromágneses sugárzás a különböző szenzorokat más-más időpontban éri el. A pontos helymeghatározáshoz a beérkezési idő μ s-os pontossággal való mérése szükséges. Az

időkülönbség összefügg a forrásnak a szenzortól való távolságával (az elektromágneses jel fénysebességgel terjed), tehát ismerjük az időkülönbséget és a terjedési sebességet, ezáltal ki tudjuk számolni a távolságkülönbséget. Azon pontok halmaza a síkban, melyeknek távolságkülönbsége két ponttól állandó, hiperbolát alkotnak. Több állomás méréséből készített hiperbolák metszéspontja adja a villámlás helyét. Ez a módszer sokkal kevésbé érzékeny a környező terep tulajdonságaira, mint az iránymérési módszer, így a villámlás helyét pontosabban tudjuk megadni.

A felhőn belüli villámlás főként nagyon magas frekvenciás sugárzást (VHF) bocsát ki gyors impulzusok formájában. Itt is két féle helyzetmeghatározási módszer létezik.

Érkezési idő alapján történő helyzetmeghatározás (TOA): A mérés ugyanazon az elven alapul, mint az alacsony frekvencián történő érzékelés esetén, azzal a különbséggel, hogy itt a beeső sugárzást dipólantráknak veszik.



9. ábra. Az interferometriás iránymérés és az érkezési idő alapján történő helyzetmeghatározás

A másik módszer az interferometriás iránymérés. Itt a helyzetmeghatározás a fáziskülönbség elvén történik. Ezt a módszert a 9. ábra bal oldali képe szemlélteti. A detektálást az állomás iránymérő szenzora végzi, amely 5 darab függőleges dipólantrából áll, melyek egymástól 72 fokra helyezkednek el. A módszer azon alapul, hogy az antennapárokra érkező elektromágneses sugárzást az antennák fáziskülönbséggel detektálják. A fáziskülönbségből kiszámítható a jelforrás azimutja, tehát egy szöveget kapunk, amely az

északi irányhoz képest megadja a villámlás irányát. A SAFIR rendszer is ezen az elven működik (Dombai, 2006).

3. Az időjárás radar

Az időjárás radar (Radio Detection And Ranging) egy olyan rádiótechnikai rendszer, mely adó-vevő-antenna és megjelenítő berendezésből áll. A radar nagy energiájú, mikrohullámú rádióhullámokat sugároz ki, majd a környezetből érkező visszaverődések detektálásával információt nyerhetünk a visszaverődést okozó objektumok helyzetéről és tulajdonságairól. A kibocsátott rádióhullámok a felhő részecskéiről visszaverődnek, szóródnak. Ezt a visszavert sugárzást nevezzük echonak (visszhang). Az echo 10^{10} nagyságrenddel kisebb intenzitású, ezt a jelet kell felerősítenünk, hogy információt kapjunk az időjárás helyzetről (Nagy et al., 1998).

Az időjárás radar másodpercenként legalább 250 alkalommal, maximum 600 m hosszú, $0,5^\circ$ és $1,5^\circ$ közötti nyalábszélességű impulzusokat bocsát ki fénysebességgel. A sugárnyaláb keresztmetszete a távolsággal négyzetesen nő, tehát az egységnyi felületre eső energia sűrűsége csökken, így a radarállomástól távolodva egyre kisebb intenzitással tudja besugározni az útjába kerülő felhő- és csapadékelemeket, valamint a földfelszíni tereptárgyakat. A radarhoz közelebbi cél nagyobb visszaverődést, nagyobb radarjelet okoz, mint a távolabbi, ez jelentősen torzíthatja a megfigyelést, ezért szükséges távolsági korrekciót alkalmazni (Sándor és Wantuch, 2004).

A radarba érkező jelek erőssége függ a radarkarakteristikáktól, a vizsgált objektum távolságától, valamint a csapadékelemek karakterisztikájától. Ezeknek a paramétereknek a segítségével felírható a visszaérkező elektromágneses sugárzás teljesítményét megadó meteorológiai radaregyenlet:

$$P_V = \frac{P_K G_M^2 \lambda^2 \theta^2 h}{B r^2} \eta \quad (1)$$

ahol P_V a vett jel teljesítménye, P_K a kibocsátott impulzus teljesítménye. G_M az antenna erősítési tényező, λ a hullámhossz, θ a nyalábszélesség, h az impulzushossz, B konstans, r a radartól vett távolság, η pedig a reflektivitási tényező (részletesen l. pl. Horváth, 2001).

3.1 Az időjárás radar története:

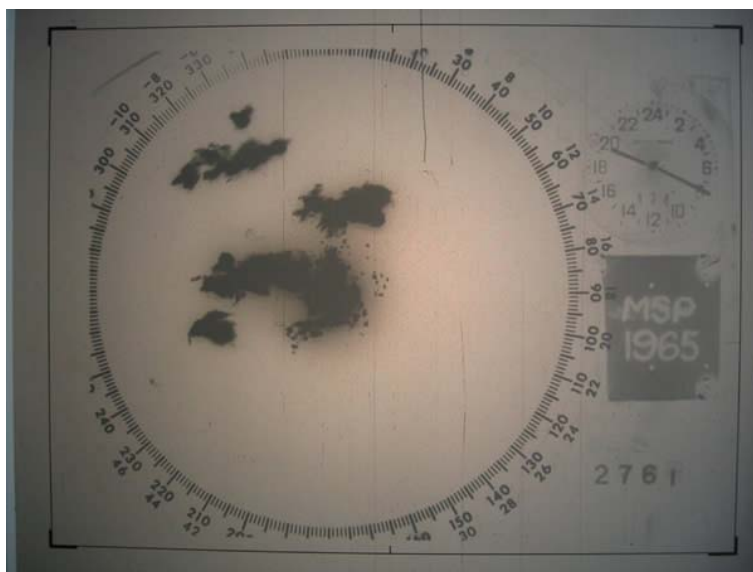
A II. Világháború alatt a katonai radarokat repülőgépek és hajók felderítésére használták, de a radarok képernyőjén észrevették, hogy a csapadékot okozó felhők zavarták a detektálást. Az

első ilyen dokumentált zivatargóc-megfigyelés 1941. február 20-án történt Angliában. 1943-ban helyezték üzembe az első, meteorológiai radart az USA-ban. A világháború után a tudósok elkezdtek dolgozni, hogy a radart hatékonyabbá fejleszthessék és a visszavert jelekből minél több információt nyerhessünk. Az USA-ban David Atlas (10. ábra), aki a MIT-nél (Massachusetts Institute of Technology) dolgozott, fejlesztette ki az első időjárás-radart az amerikai légierő részére (Atlas, 1990).



10. ábra. David Atlas

Az 50-es években radarmeteorológiai központok alakultak ki az Egyesült Államokban, Kanadában, Angliában és Szovjetunióban. 1950 és 1980 között az egész világon elterjedtek a meteorológiai radarok, melyek nélkül az előrejelzés, a veszélyjelzés és a repülésmeteorológia elképzelhetetlen lenne. A 11. ábrán egy 1960-as évek-beli radarképet láthatunk, amelyen jól láthatóak a zivatargócok.



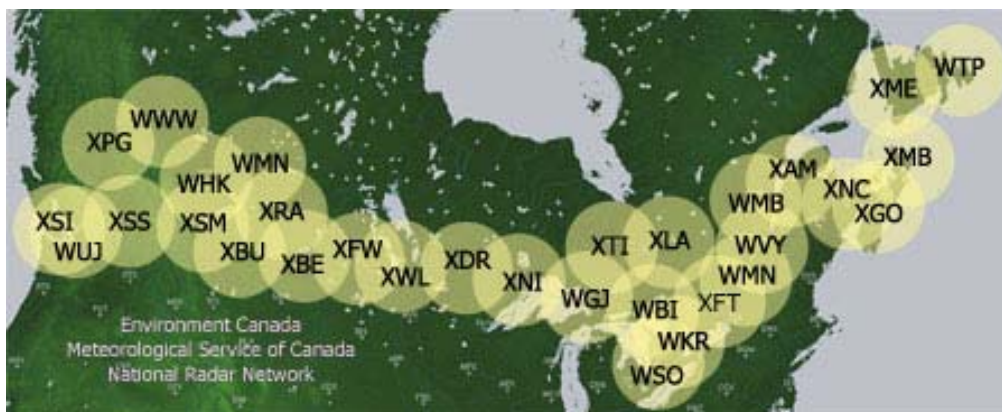
11. ábra. Radarkép az 1960-as évekből

Az NSSL (National Severe Storms Laboratory) 1964-ben megkezdte a kísérletezéseket a polarizációs és a doppler-effektuson alapuló radarok kifejlesztésén. 1973 májusában egy tornádó pusztított Oklahomában, és ez volt ez első alkalom, amikor egy doppler-radar dokumentálta egy tornádó teljes életciklusát (Cobb, 2004). A kutatásoknak köszönhetően felfedezték a mezoskálájú rotációt a felhőkben, amely tornádó kialakulásakor jelenik meg. Az NSSL kutatások segítettek meggyőzni a National Weather Service-t arról, hogy a doppler-radar nagyon hasznos eszköz az időjárás előrejelzésében. A 80-as években kezdtek elterjedni a doppler-, és a polarizációs mérésekre is alkalmas időjárás radarok, valamint a kis teljesítményű, folyamatosan sugárzó FM-CW elven működő radarok is. 1980 és 2000 között radar-hálózatok alakultak ki Észak-Amerikában, Európában, Japánban és több fejlődő országban. A hagyományos, kizárólag impulzusos üzemű és csak a meteorológiai célok intenzitásának detektálására alkalmas radarokat lecserélték doppler-radarokra, melyek összegezték a felhő pozícióját és viszonylagos sebességét. Az Egyesült Államokban a hálózatkiépítés során 10 cm hullámhosszúságú radarokat tartalmazott, melyek a NEXRAD-ok (Next-Generation Radar) voltak, ilyen például a WSR-88D radar (Weather Service Radar 1988 Doppler). A 12. ábrán egy NEXRAD-ot láthatunk.



12. ábra. NEXRAD (Next-Generation Radar) az USA-ban

Kanadában 5 cm hullámhosszúságú radarokat használtak, melyeket MRO-ban (J. S. Marshall Radar Observatory) fejlesztettek ki. Ezek a radarok vezették a teljes kanadai radarhálózatot 1998 és 2004 között. A kanadai radarhálózat 31 időjárás radar tartalmaz (13. ábra).

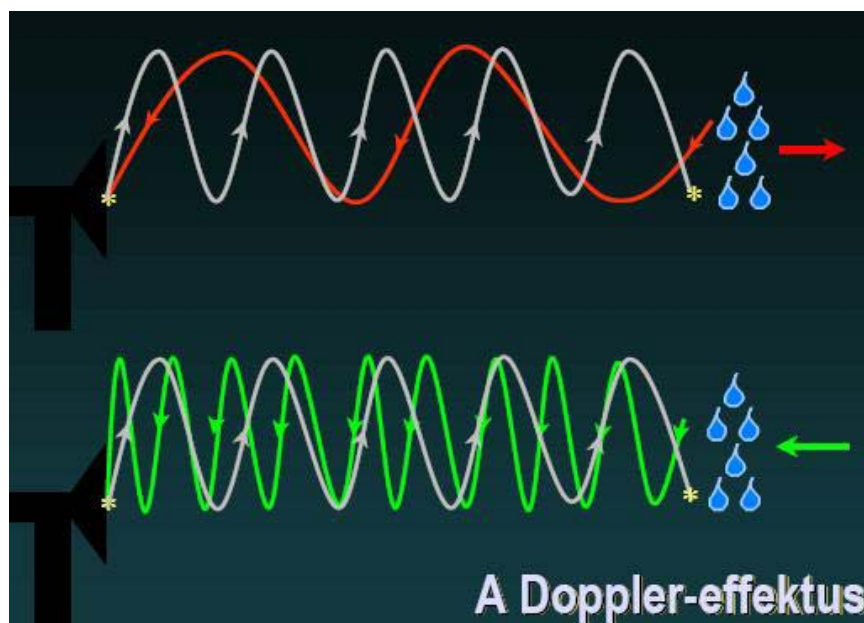


13. ábra. A kanadai radarhálózat

Az európai országok a 90-es évek végén kapcsolódtak radarhálózatba. Ezalatt a számítógépes technológia gyors fejlődésnek indult, melynek köszönhetően több és pontosabb információt kaphatunk a radarmérésekből.

3.2 A Doppler-radar:

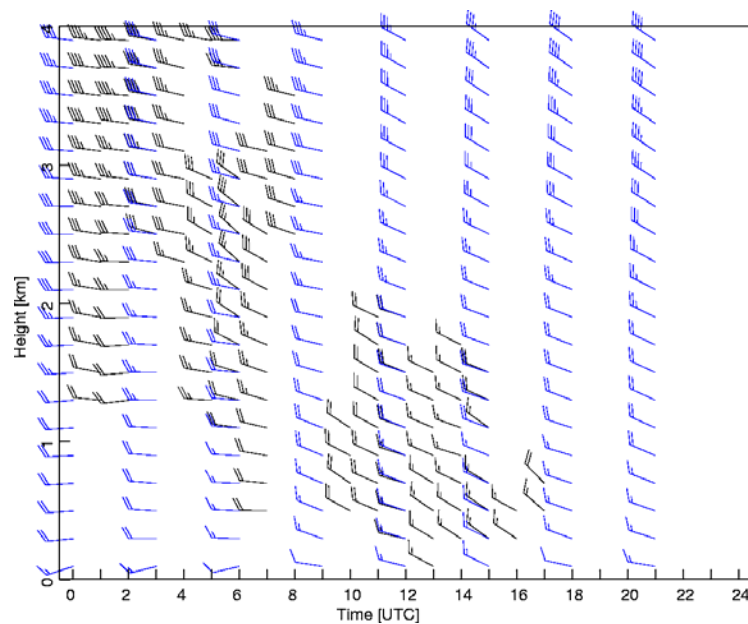
A doppler-radar segítségével meghatározható a csapadékintenzitás, valamint a légkörben zajló áramlások iránya és sebessége is. Ennek a radartípusnak a Doppler-effektus az alapelve, melyet a 14. ábra szemléltet. A Doppler-radar a visszaverődést okozó csapadékelemek mozgásából származó frekvenciaeltolódás alapján képes meghatározni a csapadékintenzitást.



14. ábra. A Doppler-effektus

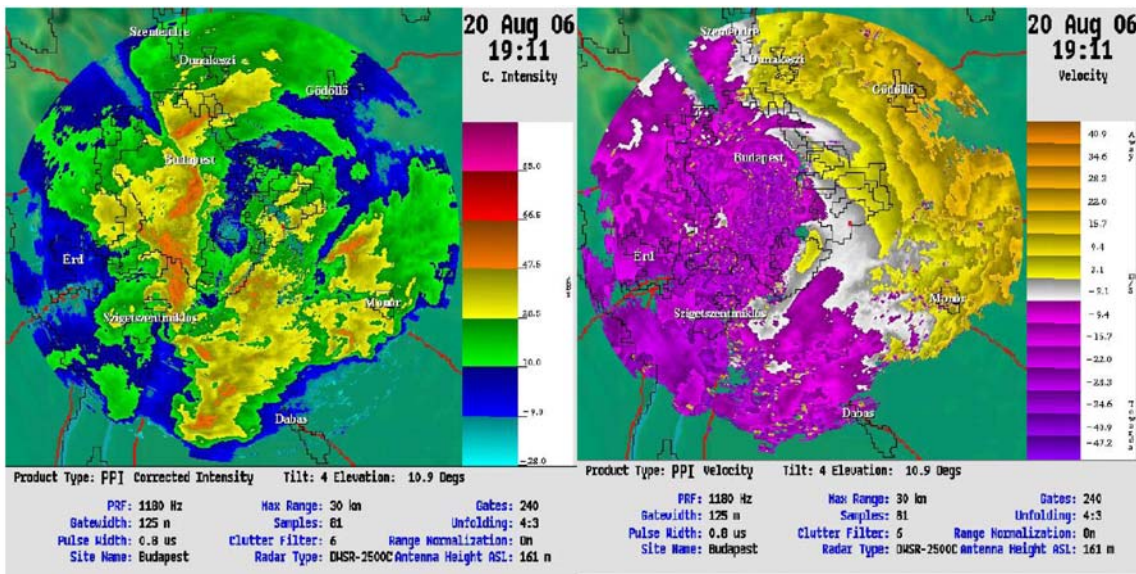
Annak érdekében, hogy a fénysebességnél összehasonlíthatatlanul lassúbb csapadékrészecskék mozgásából adódó, igen kicsi frekvenciaeltolódást detektálni lehessen, a Doppler-radarok a visszavert jelek fázisának változását hasznosítják információhordozóként. Ehhez nagyon pontosan kell ismerni a kisugárzott impulzus frekvenciáját. A Doppler-elvnek megfelelően a mozgó célról visszaverődő elektromágneses hullám frekvenciája eltolódik az álló célról visszaverődő célhoz képest, az eltolódás alapján kiszámítható a cél sugár irányú (radiális) mozgása. A radarnyalábra merőleges sebesség-összetevő közvetlenül nem mérhető, de bizonyos fizikai közelítések alapján a kétdimenziós sebességvektorok meghatározhatók.

A Doppler-radarok nagy érzékenységének köszönhetően a tiszta légköri inhomogenitásokat és turbulenciákat is fel tudjuk térképezni a törésmutató-változásokból származó reflexiók révén. Így a Doppler-radarokat a zenithez közeli magassági szögön körülforgatva windprofilerként működtethetők és meghatározó velük a szélesebb magassági eloszlása (15. ábra).



15. ábra. A szélesebb magasság szerinti eloszlása, Doppler-radar alapján

A Doppler-radarral különböző magasságokban tudjuk megfigyelni az áramlási mezőt, mint, ahogy ezt a 16. ábra szemlélteti. A Doppler-radar által mért 30 km méréshatárú reflektivitás (balra) és Doppler szélesebb adatok (jobbra) láthatók. Az ábrán jól megfigyelhető a nyugatról keletre történő légáramlás.

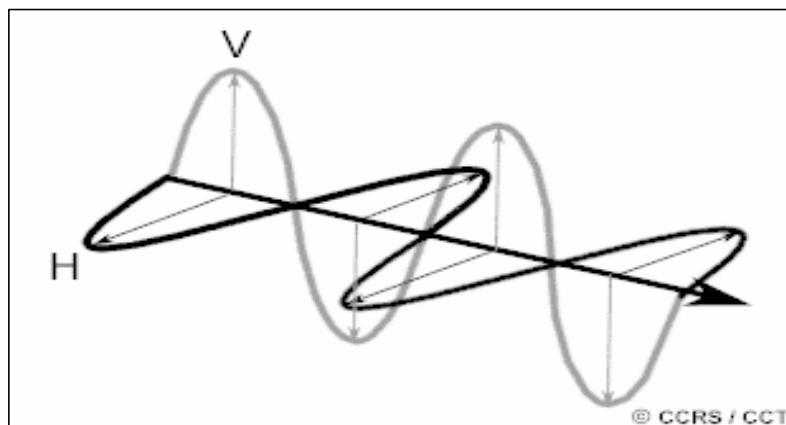


16. ábra. A Doppler-radar alkalmazási lehetősége: a szélmező feltérképezése

3.3 A polarizációs radar:

A polarizációs mérések alapelve az, hogy a felhőrészecskék különböző szórási tulajdonsággal rendelkeznek, így a polarizált sugárzást máshogy verik vissza. Tehát a visszaverődés során változik a kisugárzott hullám polarizációja, mégpedig a felhőt alkotó cseppek geometriai és fizikai tulajdonságainak függvényében. A polarizáció változásának köszönhetően, meg tudjuk állapítani a cseppek méretét, alakját, térbeli eloszlását, illetve a részecskék halmazállapotára is lehet következtetni.

A duál-polarizációs mérések alapelve, hogy két különböző, egymásra merőleges irányban polarizált sugárzást bocsátunk ki a mérési térfogat vizsgálatára. Mint ahogy a 17. ábra is mutatja, a meteorológiában leggyakrabban a horizontális és a vertikális irányt használjuk.



17. ábra. Horizontálisan (H) és vertikálisan (V) polarizált elektromágneses hullám

Annak érdekében, hogy pontosan ismerjük a kisugárzott, a visszavert jelek horizontális és vertikális komponensét, két adó-vevő rendszert használnak polarizációs radaroknál. Ennek segítségével a differenciális reflektivitást is meghatározhatjuk. A differenciális reflektivitás (Z_{DR}) megmutatja az egyidejűleg vett horizontális polarizációs síkban kisugárzott, valamint a vertikális és horizontális polarizációs síkokban kisugárzott jelek arányát:

$$Z_{DR} = 10 \log \frac{Z_{HH}}{Z_{VV}} \quad (2)$$

ahol Z_{HH} és Z_{VV} a horizontális illetve a vertikális reflektivitásfaktor, a Z_{DR} differenciális reflektivitás logaritmikusan arányos a két paraméter különbségével. A differenciális reflektivitás jó mérőszám a nem gömbölyű részecskék aszimmetrikusságának meghatározására, aminek az értéke eltérő különböző halmazállapotú részecskék esetében. Különösen horizontális irányban lapult esőcseppek tűnnek ki pozitív Z_{DR} értékekkel. A jég szemek és a graupelek erősen rotálnak, imbolyognak, ezért kis differenciális reflektivitás értékekkel rendelkeznek. A pozitív Z_{DR} értékek az esőcseppek lapultságával együtt jelennek meg.

3.4 Magyarországi helyzet:

A magyarországi radarhálózatot három MRL-5 típusú impulzus üzemű radar alkotta az 1990-es években Szentgotthárd-Farkasfán, Budapest-Pestlőrincen, és Nyíregyháza-Napkoron. Ezek a radarok egyszerre két hullámhosszon működtek, 3 és 10 cm-es hullámhosszúságú sugárzást bocsátva ki. A radar főbb egységei duplikálva voltak. Az MRL-5 radarnak 300 km a felderítési hatótávolsága, 100–150 km-ig minőségi információt, azon túl csak tájékoztató jellegű információt szolgáltatott. A radarral PPI és RHI méréseket is lehetett végezni. A PPI olyan mérés, ahol adott magassági szögön körkörös mintavételezés történik. Az RHI mérés pedig adott oldalszögön 0° és 90° magassági szög között végez mérést. A 90-es évek első felében automatizálták hazánk radarjait. Az automatizálási rendszer egy ipari kivitelű PC/AT számítógépből és egy nagy teljesítményű processzorból állt. A mérések 32/64/128/256 km-es méréshatárig 0,25/0,5/1/2 km-es térbeli felbontással és 0,5 dBZ mérési pontossággal történtek. A PPI- és RHI-mérések mellett a felhőzet jobb feltérképezése érdekében ún. HY-SCAN képeket készítettek. Ezeket a méréseket 0° , $0,3^\circ$, $0,7^\circ$, $1,2^\circ$ és $1,8^\circ$ -os magassági szögeken készített PPI típusú mérések kombinációjából állították elő. Ilyen méréseket 5–15

percenként végeztek csapadékos időjárás esetén. A zivatarfelhőkről gyakran készítettek nagy felbontású PPI képeket, melyek elősegítik a zivatarfelhő fejlődésének vizsgálatát.

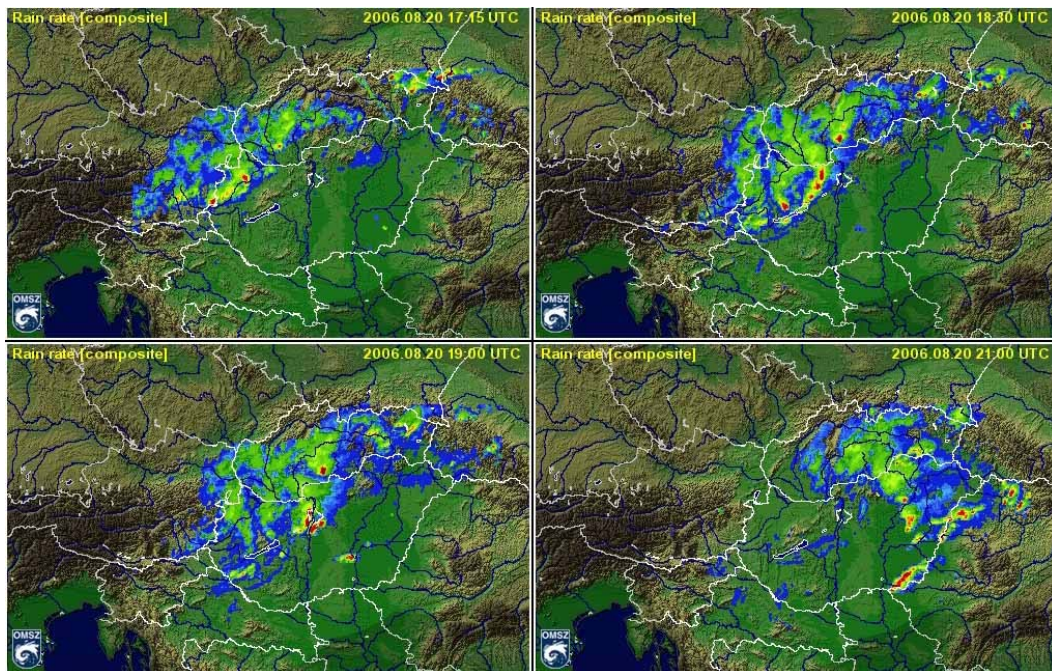
1995 decemberétől a Közép-európai Radar Együttműködés (CERAD) keretében az országok között kölcsönös adatcsere folyik, ennek köszönhetően egy közép-európai kompozitkép is elérhető. A következő években sokat fejlődött az ultrarövidtávú előrejelzés (2–4 óra), valamint a veszélyjelzés.

Az OMSZ 1999 novemberétől kezdődően fokozatosan lecserélte az MRL-5 radarokat EEC gyártmányú 5 cm-es hullámhosszon működő C sávú Doppler, duál-polarizációs DWSR-2500C típusú radarra, ezek Pestszentlőrincen, Napkoron és Pogányváron találhatóak. A 18. ábrán a pestszentlőrinci radar látható.



18. ábra. A pestszentlőrinci radar

Az 19. ábrán egy kompozit radartérképet láthatunk, mely a 2006. augusztus 20-i budapesti vihart mutatja be. Az időjárási feltételek kedvezőek voltak ahhoz, hogy extrém erősségű zivatarok, un. szupercellák is létrejöjjenek. A meteorológiai radarmérések szerint legalább három ilyen szupercella is kialakult a front mentén. A 4 radarkép a zivatargócok átvonulását mutatja meg időrendi sorrendben. A rendszer északi része 21 órakor csapott le Budapestre, éppen a tűzijáték kezdetekor, mely azonnal hatalmas pánikot váltott ki. A viharban 4 ember halt meg (Horváth, 2006).



19. ábra. Kompozit radartérkép 2006. augusztus 20-áról

4. Egyéb távérzékelési eszközök

Az egyéb távérzékelési eszközöktől közül dolgozatomban a windprofilert, sodart, lidart és az ún. Rass műszereket mutatom be. E műszerek fontosabb tulajdonságait, mérési programjukat összefoglalóan az 1. táblázat mutatja.

1. táblázat. Egyéb távérzékelési eszközök jellemzői

Eszközök	Mire használják?	Mérési tartomány	Hány db van az OMSZ-nak?	Mit mérnek vele?
Windprofiler	Numerikus modellekbe építik be	Akár 15 km-ig, a magyarországi 3,5–4 km-es magasságig mér	2 db (Budapest, Szeged – a Rass részeként)	Vertikális szélprofil
Sodar	Szélerőmű tervezéseknél	Néhány 100 m-es magasságig	1 db (Budapest)	Vertikális szélprofil
Lidar	Légköri összetevők, mozgások vizsgálatára	Néhány 100 m-es magasságig	Nincs	Légköri összetevőket, koncentrációt, valamint hőmérsékletet és szélprofil mérnek vele
Rass	Numerikus modellekbe építik be	Néhány 100 m-es magasságig	1 db (Szegeden)	Levegőben lévő mikroturbulenciákat és sűrűségváltozások alapján vertikális szél és hőmérsékleti profil

4.1 Windprofiler:

A légkört függőlegesen szondázó mérőeszközök egy új generációja, mely elektromágneses hullámokat küld a magasba. A windprofiler segítségével magassági szélméréseket tudunk végezni, melynek működése a légköri mikroturbulenciákról visszaverődő rádióhullámok Doppler-eltolódásán alapul. A mérési módszer a légkörben előforduló 1 méter nagyságrendű mikroturbulenciák jelenlétét használja ki. A turbulenciákban a sebesség-ingadozások sűrűség-ingadozásokat okoznak, ez pedig a levegő rádióhullámokra vonatkozó törésmutatóját változtatja meg. Tehát a turbulenciák térbeli inhomogenitást eredményeznek. Inhomogén térben az elektromágneses hullámok szóródnak, illetve visszaverődnek.

A Doppler-elvű szélmérés esetén a hullámforrás (radar) impulzusokat bocsát ki. Egy impulzus térben egy adott pillanatban 250–1000 m karakterisztikus élhosszúságú térfogatot (ún. impulzus térfogatot) tölt ki. Az impulzustérfogatban található mikroturbulenciák sokasága az impulzustérfogatra jellemző átlagsebességgel, mint „makroszkopikus szélsébséggel” mozog (Németh, 1998).

Az impulzustérfogatból visszaverődő rádióhullámnak megváltozik a frekvenciája az eredeti, kibocsátott hullám frekvenciájához képest, ez a Doppler-effektusnak köszönhető. A frekvenciaeltolódás arányos a szélsébséggel a hullámterjedés irányába eső komponensével. Így egy Doppler-radarral a szélvektornak csak egy összetevője, a sugárirányú mérhető. A windprofilér végülis olyan, mintha három Doppler-radart használnák egyidejűleg, három különböző irányítású sugárnyalábbal (20. ábra). Magyarországon 2004 első fél évének végére fejeződött be a windprofilerek tesztelési periódusa. Jelenleg az OMSZ 2 db Degre Pcl 1300-as típusú windprofilert használ.

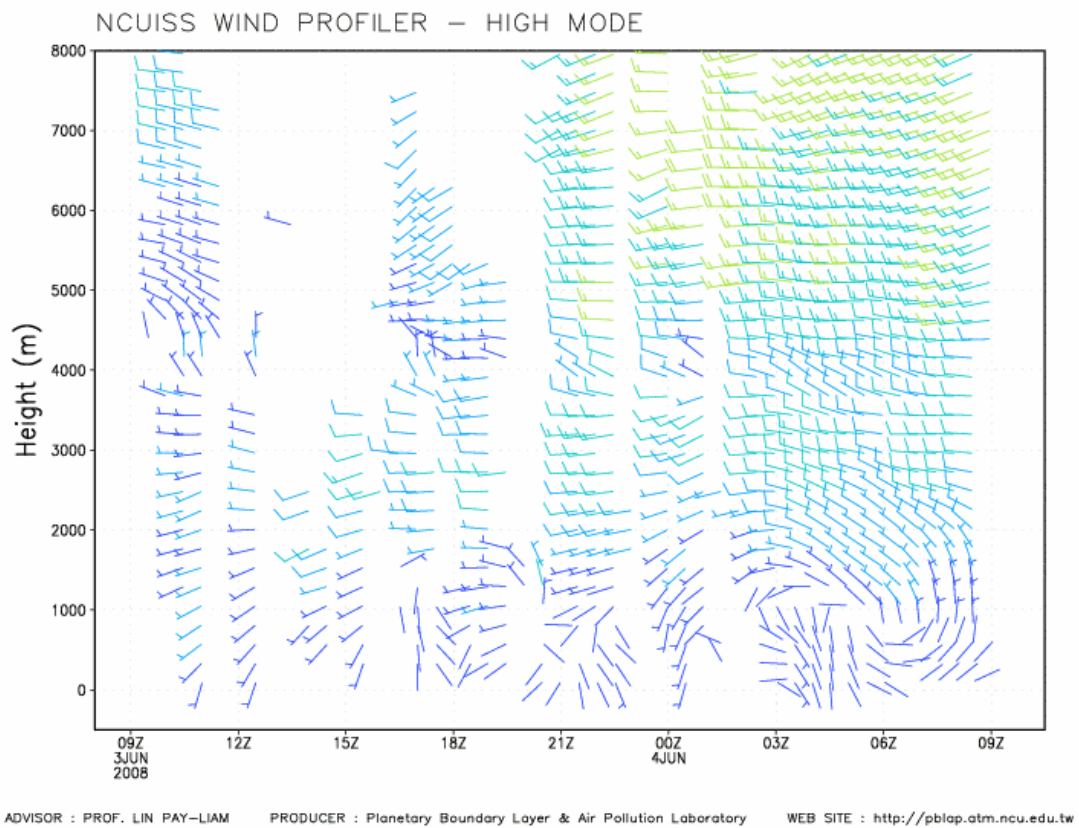


20. ábra. A pestszentlőrinci windprofilér

A windprofilér az egyik nyalábot függőleges irányban bocsátja ki, a másik kettőt pedig a függőlegeshez képest rendszerint 15 fokkal északi, illetve keleti irányba döntve bocsátja ki a

rádióhullámokat. Így három különböző irányú szélesség-komponenset tudunk meghatározni, és ezekből az adatokból meg lehet határozni a szélirányt és szélességet. A hullámkibocsátás egy vízszintes síkú antenaszerkezeten történik meg, amelyeket elemi antennák alkotnak. A kibocsátott hullámok irányítását úgy érik el, hogy az antenasorokra a kimenő jelet fáziseltolással küldik rá.

A windprofilerrel 15 km-es magasságig vagyunk képesek megadni szélprofil, és ez a mérés mindössze néhány percet vesz igénybe, így folyamatos működtetéssel a magassági szél időbeli változását figyelhetjük meg, mint ahogy azt a 21. ábrán láthatjuk, ahol az x tengely az idő változását, az y tengely a magasságot mutatja.



21. ábra. Magassági szélprofil változása az idővel

4.2 Sodar (Sound detection and ranging):

A légköri mikroturbulenciákról a hanghullámok is visszaverődnek. A sodar-nak nagyon hasonló a működési elve a windprofiler-hez képest, csak itt elektromágneses hullámok helyett akusztikus hullámokkal végezzük a szélprofilmérést. A sodar által kiadott hallható rövid hangimpulzusok a légkör különböző magasságában áramló levegőrétegről eltérő idő alatt verődnek vissza, a visszaverődő hangok földfelszínre való visszaérkezésének időtartama és a Doppler-effektus segítségével mérjük a magassági szélprofil. A kibocsátott hanghullámoknak 1875 Hz-es frekvenciájuk és 340 m/s a terjedési sebességük. A sodar lényegesen olcsóbb, mint a windprofiler, de mérési tartománya 15 km helyett, csak 1–3 km magasságig terjed. Mivel a mérési tartomány korlátozva van, ezért legfőbb alkalmazási területe a felszínközeli szennyezőanyag-terjedés vizsgálata, melyet ipari létesítmények, atomerőművek környezetében használnak fel. A 22. ábrán a pestszentlőrinci Metek-típusú sodar-t láthatjuk.



22. ábra. A pestszentlőrinci Sodar

4.3 Lidar (Light detection and ranging):

A lidar egy olyan aktív távérzékelési eszköz, mely a látható valamint a látható melletti ultraibolya és infravörös spektrumba tartozó elektromágneses hullámot bocsát ki. Ez a kibocsátott lézernyaláb a levegő molekuláiról és a lebegő részecskékről verődik vissza, ennek köszönhetően tudjuk meghatározni a felhőalap magasságát vagy tudjuk vizsgálni a légköri összetevőket és szennyezőanyagokat. Fontos a hullámhossz megválasztása, ugyanis amikor a sugárzás hullámhossza egybeesik a molekuláris anyagok egy vagy több jellemző spektrumvonalával, a sugárzás elnyelődik. A visszavert jelekben a hiányzó hullámhosszokból következtethetünk az adott anyag jelenlétére. A kibocsátott hullám energiája néhány mW-tól több 10 W-ig terjed.

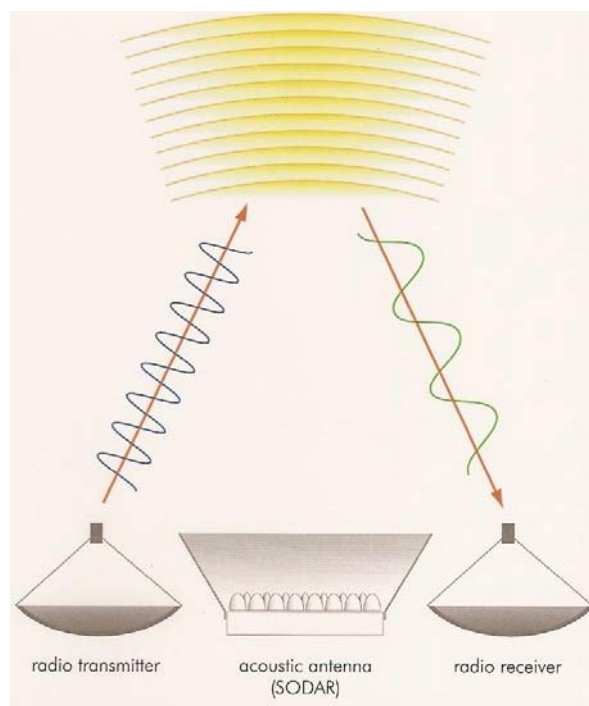


23. ábra. Lidar

A lidar-t három csoportba sorolhatjuk. Az első csoportba azok a lidar-ok tartoznak, amelyek egy hullámhosszat használnak, ezek alkalmasak távolság mérésére. A második csoportba a szelektív elnyelésű lidar-ok tartoznak (Differential Absorption Lidar – DIAL), ezek alkalmasak a légköri összetevő anyagok koncentrációjának és mennyiségének mérésére, ez a berendezés két különböző lézershullámhosszat használ. A harmadik csoportba a Doppler Lidar (Doppler Wind Lidar – DWL) tartozik, mely a légköri mozgások feltérképezésére alkalmas. A 23. ábrán egy LIDAR-t láthatunk működés közben, mely a légköri összetevőket vizsgálja.

4.4 Rass (Radio acoustic sounding system):

A Rass egy windprofiler-ből és egy rádió adó és vevő berendezésből álló aktív távérzékelési eszköz. Működési elvének lényege, hogy a kibocsátott hanghullámok a légkör különböző rétegében eltérő mértékben terjednek, amit elektromágneses hullámokkal tapogathatunk le (24. ábra).



24. ábra. A Rass működése

Ezáltal képet kapunk a vertikális szélprofilról valamint a hőmérsékleti rétegződésről is. Magyarországon jelenleg egy Waisala Lap 3000 típusú Rass üzemel Szegeden.

5. Összefoglalás

Szakedolgozatomban áttekintést adtam a legfontosabb földbázisú távérzékelési eszközökről, melyek többségét hosszabb-rövidebb ideje hazánkban is használják. Áttekintettem az egyes műszerek történetét, valamint bemutattam a jelenlegi magyarországi helyzetet.

A korszerű távérzékelési mérőeszközök segítségével egyre pontosabb képet kaphatunk az aktuális időjárás helyzetről, a mért adatokat numerikus előrejelzési modellekbe építve pedig pontosíthatók a meteorológiai előrejelzések. A távérzékelési eszközök legnagyobb előnye, hogy folyamatos és pontos mérést biztosítanak. Ennek köszönhetően a jövőben várhatóan egyre fontosabb szerepet kapnak az operatív meteorológiai mérésekben.

Köszönetnyilvánítás:

Szakedolgozatom elkészítésében rendkívül nagy szakmai segítséget nyújtott témavezetőm Dr. Mészáros Róbert, melyet ezúton is szeretnék megköszönni. A radar című fejezet megírásában komoly támogatást kaptam Dr. Ács Ferenc docenstől. A távérzékelési osztály vezetője Dr. Dombai Ferenc hasznos tanácsokkal segítette dolgozatom megírását. Mindkettőjük lelkiismeretes munkáját köszönöm.

Irodalomjegyzék

Atlas, D., 1990: Radar in Meteorology. American Meteorological Society

Ádám, R., 2007: A SAFIR villámlokalizációs rendszer pontosságának vizsgálata. Diplomamunka, Budapest

Cobb, S., 2004: Weather radar development highlight of national severe storms laboratory's first 40 years. NOAA Magazine

Dombai, F., 1998: Villámlokalizációs hálózat Magyarországon, A Természet Világa 1998/1. különszáma. 31–34.

Dombai, F., 2006: Magyarországi SAFIR villámlokalizációs mérések megbízhatóságának értékelése és meteorológiai radar adatokkal való összehasonlító elemzéseinek tapasztalatai. Doktori értekezés, ELTE Természettudományi Kar Földtudományi Doktori Iskola

Fényi, Gy., 1901a: Zivatarjelző készülék. Időjárás, 5., 230-234.

Fényi, Gy., 1901b: A zivatarok napi periódusa a kalocsai zivatarjelző alapján. Időjárás, 5., 256-260.

Fényi, Gy., 1901c: A zivatarjelző elméletéhez. Időjárás, 5., 351-352.

Flórián, E., 1970: A légköri elektromosság- és az ionoszféra kutatásának története in Fejezetek A Magyar Meteorológia Történetéből (1870–1970), 443–492.

Fülöp, A., 2004: A SAFIR villámlokalizációs rendszer adatainak meteorológiai alkalmazása. Diplomamunka, Budapest

Galló, V., 1964: Tapasztalatok az ötcsatornás villámszámlálóval. Időjárás, 68., 81-85.

Horváth, Á., 2006: A 2006 augusztus 20-i budapesti vihar időjárási háttere. Légkör 51., 24–27.

Horváth, Gy., 2001: Csapadék halmazállapot osztályozás a duál-polarizációs mérések alapján. Diplomamunka, Budapest

Mezősi, M., 1958: A sferics meteorológiai alkalmazásáról. Időjárás, 62., 228–230.

Nagy, J., 1995: A digitális radarmérések alkalmazásának tapasztalatai. Országos Meteorológiai Szolgálat, Belső kiadvány, Budapest

Németh, P., 1998: A légkör függőleges szondázása, A Természet Világa 1998/1. különszáma. 22–24.

Rajnai, M., 2003: Zivatarrendszerek elektromos aktivitásának követése villám- és radaradatok alapján. Diplomamunka, Budapest

Tompa, E., 2003: A radarhullámok légköri terjedésének hatása a radarmérések pontosságára. Diplomamunka, Budapest

Horváth, Gy. és Nagy, J., 2005: A duál-polarimetrikus mérések alapelve, a paraméterek meteorológiai alkalmazása

Sándor, V. és Wantuch, F., 2004: Repülésmeteorológia. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 272 oldal.

Nagy, J. és Gyarmati, Gy. és Dombai, F., 1998: Radarok az időjárás megfigyelésében, A Természet Világa 1998/1. különszáma. 25–27.