

# ORSZÁGOS METEOROLÓGIA SZOLGÁLAT IDŐJÁRÁSI RADARHÁLÓZATÁNAK MÉRÉSEI

Szegedi Csaba, Dombai Ferenc, Csirmaz Kálmán, Németh Péter

*Országos Meteorológiai Szolgálat*



**SZENTES-LAPISTÓ**

**BUDAPEST**

**POGÁNYVÁR**

**NAPKOR**

Budapest, 2014.

# Tartalomjegyzék

1. Időjárási radarokról röviden.....	3
2. Az OMSZ radarhálózata, mérései és radarproduktumai .....	5
2.1 Doppler-féle sebességmérés .....	6
2.2 Polarizációs mérések .....	7
2.3 Országos kompozit radarkép .....	8
2.4 Radar méréseken alapuló csapadékösszegzés .....	10
3. A radarmérések pontosságát, megbízhatóságát rontó hatások .....	12
3.1 Föld görbülete okozta hatás.....	12
3.2 Olvadási réteg megjelenése a radarképeken.....	13
3.3 WLAN zavarok .....	16
3.4 Mikroturbulenciák okozta jelek .....	17
3.5 Rendellenes terjedés (anaprop) .....	17
3.6 Domborzat árnyékoló hatása .....	18
3.7 Intenzív csapadékmezők árnyékoló hatása (gyengítés).....	18
4. A leggyakoribb csapadéktípusok főbb radar jellemzői .....	19

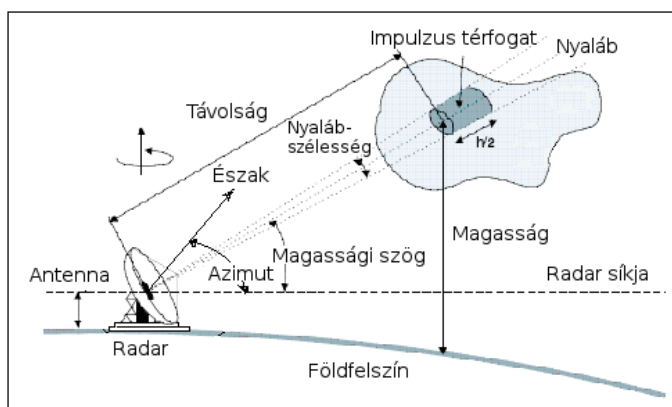
## 1. Időjárási radarokról röviden

A RADAR olyan mikrohullámú tartományban működő adó-vevő-antenna és megjelenítő berendezésből álló rádiótechnikai rendszer, amely képes nagy teljesítményű rádió (elektromágneses) hullámok koncentrált kisugárzására, majd azt követően a környezetből érkező visszaverődések detektálásával a visszaverődést okozó tárgyak helyzetének és visszaverődési tulajdonságainak meghatározására. Az időjárási radar másodpercenként néhány száz alkalommal néhány száz méter hosszú keskeny kb. 1 fokos nyílás szélességű nagyfrekvenciás több GHz-es impulzusokat bocsát ki fénysebességgel a térbe a folyamatosan mozgó antennájával. A nyaláb útjába kerülő csapadékelemek, tárgyak egyrészt elnyelik, másrészt minden irányba, de nem egyenletes eloszlással szétszórják a sugárzást. A radarantenna irányába szórt (visszavert) sugárzást a radar képes detektálni. Két impulzus kibocsátása közötti időben a radar vevőként működik, azaz fogadja az előző impulzus visszavert részét. Ez az időtartam határozza meg a radar maximális

hatótávolságát, mivel az onnan visszavert, fénysebességgel haladó sugárzás még éppen beérkezik a vevő berendezéshez, mielőtt a radar egy újabb impulzust bocsátana ki. Az időjárási radarok a mikrohullámú sugárzás majd minden elektromos jellemzőjét képesek detektálni és a mérések során hasznosítani (intenzitás, frekvencia, polarizáció). A vett jel szintjéből a radar műszaki paraméterek segítségével meghatározható a cél visszaverő képessége más szóval reflektivitása. A radar a

meteorológiai célok közül csak a csapadékelemeket (esőcseppek, hókristályok, hópelyhek, hódara- és jégzemek) megfigyelését teszi lehetővé, az apró jégkristályokat, felhőcseppeket, amelyek a felhőket alkotják a radar nem "látja". A visszaverődés mértéke függ az impulzus térfogatban lévő csapadékelemek méretétől, számától, halmazállapotától és egyéb fizikai tulajdonságaitól. Minél nagyobb átmérőjű esőcsepp van a térfogatban, annál nagyobb a visszaverő képesség. Tekintve e mennyiség igen nagy változékonyságát, gyakorlatilag annak 10-es alapú logaritmusának 10-zel való szorzásával kapott dBZ (decibel Z) értékeit használjuk a meteorológiai célok jellemzőinek megadásakor. A radarmérések legfontosabb tulajdonságait az 1. ábra mutatja.

Meg kell jegyezni, hogy radar sugárnyaláb keresztmetszete a távolság növekedésével négyzetesen nő és így csökken az egységnyi felületre eső energia sűrűsége, ami által radarállomástól távolodva egyre kisebb intenzitással tudja besugározni az útjába kerülő csapadékelemeket. Az ugyanolyan reflektivitású, radarhoz közelebbi cél nagyobb visszaverődést és nagyobb radarjelet okoz, mint a távolabbi. Ez jelentősen torzíthatja megfigyeléseinket, ezért szükség van a mérések standardizálására, amit a távolsági korrekcióval tudunk megoldani.



1. ábra. Az időjárási radarmérések legfontosabb sajátosságai.

A radar adott vevőérzékenység esetén a távolság szerint csökkenő sugárzás miatt a távolság növekedésével egyre nagyobb intenzitású csapadékokat képes csak felderíteni. A radar érzékenysége hullámhossztól is függ, mennél rövidebb a hullámhossza annál érzékenyebb a berendezés. A közeli zónában a szitáló csapadék detektálására is képes a radar, de a távolság növekedésével csak az intenzívebb csapadék detektálására alkalmas.

A radarral mért Z reflektivitásból elfogadható pontossággal un. ekvivalens csapadékinintenzitást lehet számolni, ami egy pillanatnyi érték mm/h egységben. A pillanatnyi intenzitásértékekből az 1 óra alatt lehullott területi csapadékmennyiség eloszlás is megbecsülhető. A Z radar reflektivitásnak megfelelő ekvivalens csapadékinintenzitás függ a csapadék típusától. Az 1. Táblázatban a -10 dBZ és a 60 dBZ reflektivitási értékeknek megfelelő pillanatnyi intenzitás értékek találhatók 5 dBZ-enként, eső, záporosó és havazás esetén. Az eltérés oka a csapadékelemek méretében, alakjában és halmazállapotában keresendő. A visszavert energia a csapadékelemek méretének hatodik hatványával arányosan növekszik, ugyanakkor az azonos méretű hópelyhek és esőcseppek közül az esőcseppek 5-ször nagyobb energiát vernek vissza. Továbbá a csapadékelemek alakja sohasem tekinthető szabályos gömbnek, ezért a különböző polarizáltságú mikrohullámú energia eltérő mértékben verődik vissza, a különbség elérheti a 2 nagyságrendet is.

1. Táblázat. A különböző reflektivitási értékekhez tartozó csapadékinintenzitás eső, záporosó, illetve havazás esetén.

Radar (dBz)	Ekvivalens csapadékinintenzitás (mm/h)		
	Eső	Záporosó	Havazás
- 10.0	0.01	0.00	0.01
- 5.0	0.02	0.01	0.01
0.0	0.04	0.02	0.02
5.0	0.07	0.04	0.04
10.0	0.15	0.08	0.07
15.0	0.30	0.17	0.13
20.0	0.70	0.40	0.20
25.0	1.30	0.80	0.40
30.0	2.70	1.70	0.70
35.0	5.60	3.70	1.30
40.0	11.50	7.90	2.20
45.0	24.00	17.0	4.00
50.0	48.00	37.0	7.00
55.0	100.00	79.0	12.60
60.0	205.00	170.0	22.00

Miután a radar másodpercenként néhány száz impulzust bocsát ki, a folyamatos antennamozgatás mellett alkalmas adott távolsághatáron belül a csapadék idő- és térbeli eloszlásáról folyamatos információt szolgáltatni.

## 2. Az OMSZ radarhálózata, mérései és radarproduktumai

Magyarországon a radar adatok felhasználására a közúti közlekedés biztosításában már a radarhálózat 1980-évekbeli telepítését követően jelentkezett igény, amikor is az Országos Meteorológiai Szolgálat Napkoron, Budapesten, és Farkasfán működtetett két hullámsávon is mérni tudó analóg, MRL-5 típusú radarokat. Az igények növekedtek a MRL-5 típusú radarok 90-es évek elején végrehajtott automatizálása után, amikor lehetővé vált a digitális radar képek eljuttatása a közúti igazgatóságokhoz. Az automatizálás időjárási helyzet függvényében, radaronként a 256, 128, 64 és 32 km sugarú körzetben 15 percenként szolgáltatott új információt, amelyekből válogathattak a felhasználók. A kisebb hatósugárban készült mérés a csapadékeloszlás finomabb szerkezetét mutatta. Az egyes radarok méréseit országos kompozitba is szerkesztettük és a kihelyezett radar terminálon lehetőség volt műholdas képekkel és hőmérsékleti eloszlás képeivel is kombinálni a radar mérések képeit.

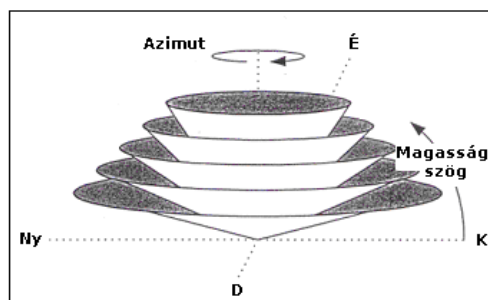
Időjárási radarok esetén a leggyakrabban alkalmazott hullámhosszak a 10 cm (S-sáv), az 5 cm (C-sáv) illetve a 3,2 cm (X-sáv). A Magyarországon korábban használt, orosz típusú MRL-5 radarok S- illetve X-sávban is mértek, amelyeket az OMSZ 2000-től kezdődően fokozatosan lecserélt EEC gyártmányú 5 cm-es hullámhosszon működő Doppler, duál-polarizációs DWSR radarokra. Az első ilyen radar Budapesten kezdte meg működését 2000-ben, Napkoron 2003-ban került sor a korszerűsítésre, végül a harmadik új típusú radar a farkasfai állomás helyett a Balatonhoz közelebb, Pogányváron épült és 2004-től működik operatíván. Ezt követően 2013-ban a korszerűsítettük a budapesti radar vevőegységét és jelfeldolgozását.

Az Országos Meteorológiai Szolgálat az "Új Magyarország Fejlesztési Terv" (NFT II.) részét képező Környezet és Energia Operatív Program (KEOP) keretében pályázatot nyert el új időjárási radar beszerzésére és Szentes közelében történő telepítésére. Az új radar 2014-ben állt operatív üzembe. Az Országos Meteorológiai Szolgálat által üzemeltetett időjárási radarok helyét a 2. ábra mutatja.



2. ábra. Az Országos Meteorológiai Szolgálat időjárási radarhálózatának tagjai.

A radar antenna körbefordulása során egy kúpfelületről lesz információnk, de a mérést újabb magassági szögeken megismételve (3. ábra) a légkör alsó néhány km-es rétegéből lesznek információink. Az országos kompozit radarkép készítéséhez a mérések a 240 km sugarú méréstartományban folynak 10 magassági szöggel 10 perces mérési ciklusokban. Ezen mérések között, 15 percenként, 120 km sugarú tartományban szélméreés történik. A 2. Táblázatban a ma használatos mérési paramétereket mutatjuk be.



3. ábra. Az alkalmazott, több magassági szögű letapogatások geometriai sajátosságai.

2. Táblázat. Az OMSZ radarhálózatának mérési programja.

Mérési feladat	Csapadékmérés	Szélméreés
<b>Mérési ciklus</b>	10 percenként	15 percenként
<b>Hullámhossz</b>	5,5 cm	5,5 cm
<b>Impulzusismétlési frekvencia</b>	600 Hz	1180 Hz
<b>Impulzushossz</b>	0,8 ms	0,8 ms
<b>Max. mérési távolság</b>	240 km	120 km
<b>Minta szám</b>	36	70
<b>Doppler mérés</b>	Igen	Igen
<b>Polarizáció</b>	Duál polarizációs	Horizontális
<b>Mért adatok</b>	$Z, V_r, Z_{DR}, K_{DP}, \Phi_{DP}$	$Z, V_r$
<b>Magassági szög (°)</b>	0,0; 0,5; 1,1; 1,9; 3,0; 4,7; 7,0; 10,0; 14,2; 20,0	1,1; 1,9; 3,0; 6,5; 14,0

## 2.1 Doppler-féle sebességmérés

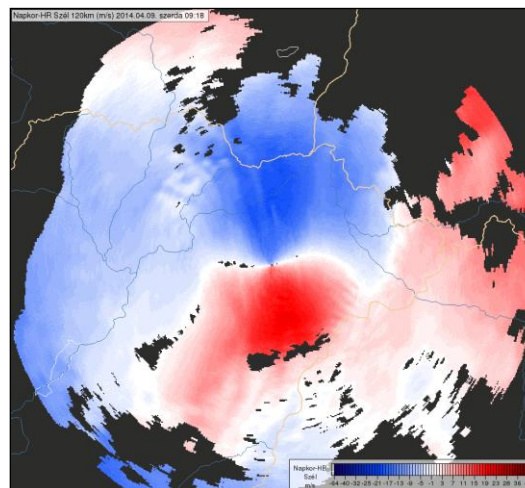
A Doppler-féle radarok alkalmasak a visszaérkező elektromágneses hullámok közötti fáziskülönbség mérésére. Ez a különbség a Doppler-elmélet alapján arányos a visszaverő objektum radarhoz képesti sebességével (mivel az objektum a visszasugárzások között elmozdul). Problémaként jelentkezik a mérésnél, hogy ha a visszaverő test túl nagy sebességgel mozog, akkor a kapott fáziskülönbség túllépi a  $2\pi$ -t, azaz nem lehet eldönteni, hogy a mért fáziskülönbség szimplán veendő vagy meghaladja a teljes periódus valamely egész számú többszörösét. Ezt a határozatlanságot úgy lehet kiküszöbölni, hogy csökkentjük az impulzusok közötti kibocsátási időt (azaz növeljük az impulzusismétlési frekvenciát), mivel ekkor a nagyobb sebességgel mozgó objektumról is a visszaérkező sugárzások fáziskülönbsége garantáltan  $2\pi$  alá fog esni. A maximális detektálható sebesség és az impulzusismétlési frekvencia között egyértelmű kapcsolat, egyenes arányosság áll fenn: minél kisebb ez a frekvencia, annál nagyobb sebességeket képes detektálni a radar. Ugyanakkor, minél kisebb az impulzusismétlés gyakorisága, annál nagyobb a mérés hatósugara.

A két ellentétes hatású feltétel egyidejű figyelembevétele (minél nagyobb hatósugár és maximálisan mérhető sebesség) a frekvencia kompromisszumos megválasztását teszi szükségessé (Doppler dilemma). Ez azt jelenti, hogy 150 km-es hatótávolságban a maximális érzékelhető sebesség már csak 12 m/s körüli lenne. Ugyanakkor megfelelő mérési eljárással (kettős impulzus ismétlési frekvencia) egy 120 km-es sugarú körben a hazai radarok  $\pm 48$  m/s maximális szélsősebességeket képesek detektálni. Az így létrejövő radiális szélsősebesség mezőre láthatunk példát a 4. ábrán. Ha a reflexió csapadékelemekről történik, akkor az így kapott sebességinformáció alkalmas lehet a csapadékot produkáló képződmény (pl. zivatar) áramlási rendszerének feltérképezésére, vagy a szupercellák mezociklonjának az azonosítására. Ugyanakkor a 3-10 cm-es hullámhosszú sugárzás egyes esetekben a tiszta levegőről is visszaverődhet, főként olyankor, amikor a turbulens levegő reflexiós mutatója hirtelen változik, ez leginkább a felszín feletti, kb. 1500 m vastag határrétegben teljesül. Ezáltal lehetőség nyílik pl. a zivatar környezetét jellemző szélprofil előállítására, ennek az ultrarövidtávú előrejelzésben és a kutatásban igen nagy szerepe van.

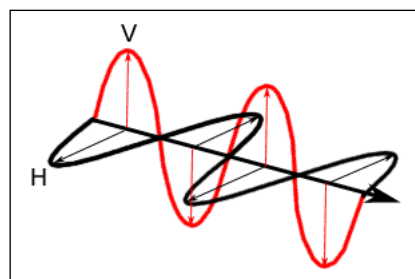
A Doppler elv alkalmazásával készült szélméresek legnagyobb előnye, hogy alkalmazásával a nem mozgó talajcélok reflexióitól mentesíteni tudjuk a mért intenzitás adatokat, vagyis magas toronyok vagy hegyek okozta jeleket ki tudunk szűrni.

## 2.2 Polarizációs mérések

Az utóbbi évtizedekben a radargyártási technológia jelentős fejlődésen ment keresztül, ezáltal korszerűsödött a radar adó-vevő és a jelfeldolgozás. A radarmeteorológiában a polarizációs radarmérések egy viszonylag új kutatási irány, amely plusz információkat biztosít a csapadéktömbök tulajdonságainak megismeréséhez. Megkülönböztethetünk lineáris- és cirkulációs polarizációs radart. Az előbbi típusnál a lineáris szó arra utal, hogy az elektromos erővonalak egyenesen futnak és a földfelszínhez képest egy meghatározott irányuk van. A két leggyakrabban használt polarizációs irány a horizontális (földfelszínre párhuzamos) és a vertikális (földfelszínre merőleges) (5. ábrán). Ha a kibocsátás az előbb említett módon történik, akkor duál-polarizációs technikáról beszélünk. Cirkulációs polarizációnál az elektromos térerősség vektor egy csavarvonalat ír le. Az Országos Meteorológiai Szolgálat folyamatosan lépést tart az új mérési technikákkal, így jelenleg három duál-polarizációs, Doppler radart üzemeltet.



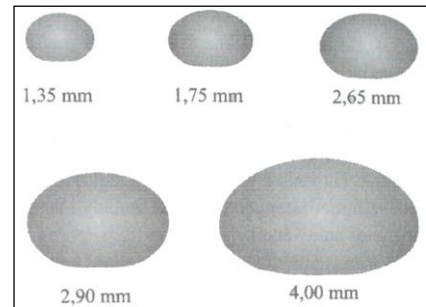
4. ábra. Doppler radiális szélméresek  $1,1^\circ$ -os magassági szögön. Kék szín a radarhoz közeledő, a piros a radartól távolodó mozgásra utal. Jelen esetben északias irányú a szél a radar szűk környezetében, de ahogy egyre magasabban mérünk (távolodva a radartól) szélfordulás figyelhető meg.



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



Polarizált impulzust alkalmazva az eltérő szórási tulajdonságokkal rendelkező részecskék a különböző irányokban polarizált sugárzást eltérő módon verik vissza, így a polarizáció iránya megváltozhat és fáziseltolódások léphetnek fel, amelyet a radarral mérni lehet. A részecskék szórási tulajdonságait, azok mérete, alakja, a polarizációs irányhoz való relatív irányítottság és dielektromos állandóik határozzák meg, amelyeket azonban a termodinamikai fázis jelentősen befolyásol. Folyékony halmazállapot esetén a cseppek lapultsága döntően meghatározza a polarizációs karakterisztikákat, ugyanis a kis cseppek szinte tökéletesen gömb alakúak, míg a nagyobb cseppek már lapultak (vízszintes tengelyük hosszabb), így utóbbiak a horizontálisan polarizált sugárzást jobban verik vissza (6. ábra.). A polarizációs mérések felhasználhatóak a hidrometeorok osztályozására, csapadékintenzitás becslésre (vagy annak pontosítására) és a csapadékmezőben történő gyengülés korrekciójára is. A csapadéktömbök részletesebb feltérképezésével pontosabb képet kaphatunk a különböző időjárási rendszerek, például konvektív cellák felépítéséről, ezáltal a polarizációs mérések a veszélyes időjárási helyzetek előrejelzésében is használhatóak. Több polarizációs paramétert is mérünk, amelyek közül most részletesebben a differenciális terjedési fázisszög változást említjük meg, mert ennek segítségével jelentős mértékben korrigálni lehet a csapadék mezők okozta gyengülést.



6. ábra. Az esőcsepp alakja a méretének függvényében.

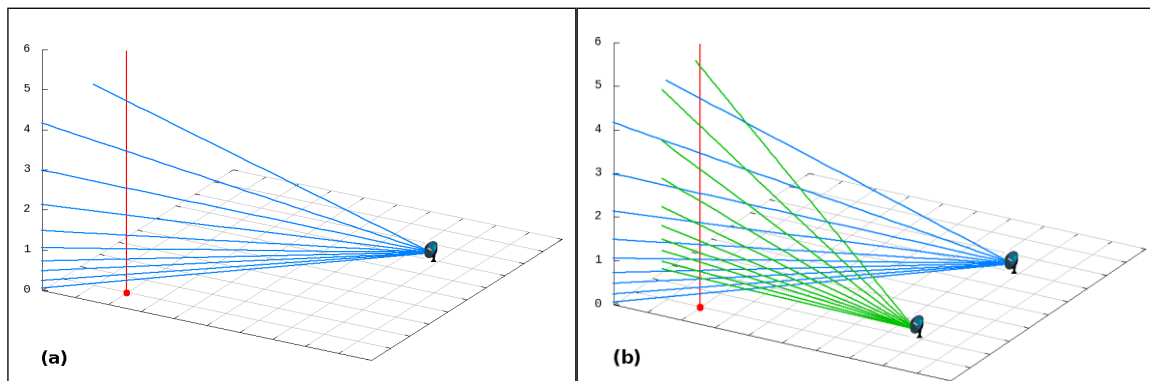
A kibocsátott sugárzás a különböző polarizációs irányokban fázisszög változást szenved, ugyanis az elektromágneses sugárzás a vízben lassabban halad, mint levegőben. A horizontális ( $\Phi_H$ ) és vertikális ( $\Phi_V$ ) polarizációs irány esetén bekövetkező fázisszög változások különbsége a differenciális terjedési fázisszög ( $\Phi_{DP} = \Phi_H - \Phi_V$ ). A horizontálisan kibocsátott sugárzás esetén mindig nagyobb a fázisszög változás a cseppek lapultsága miatt, mint a vertikálisan kibocsátott sugárzás esetében, így  $\Phi_{DP}$  monoton növekvő, ahogy távolodunk a radartól. A  $\Phi_{DP}$  növekedésének mértékéből következtetni lehet a radar jel csapadék okozta gyengülésének nagyságára.

### 2.3 Országos kompozit radarkép

A radar antenna körbefordulása során egy adott magassági szögön a korábban említett radarnyalábbal pásztázzuk, hogy hol hullik éppen csapadék, majd több magassági szögön megismételjük a mérést, így a légkör alsó néhány kilométeres rétegéből lesz információnk. Az általunk használt magassági szögeken kibocsátott radarnyalábok helyzetét jelölik a 7.a ábrán a kék vonalak. Egy adott felszíni pont felett több magasságból lesz reflektivitás adatunk, amelyekből a lehető legpontosabban kell kiszámítani a felszíni csapadék intenzitást. A gyakorlatban a különböző szögeken mért reflektivitás értékek adott pont feletti maximumát használjuk a felszíni csapadékintenzitás számításához. A 7. ábrán a piros vonal és a különböző magassági szögek metszéspontjai mutatják, hogy a jelen esetben kiválasztott pont felett milyen magasságából lesznek adataink, amelyek közül végül a maximális értéket, vagyis az oszlopmaximumot alkalmazzuk.

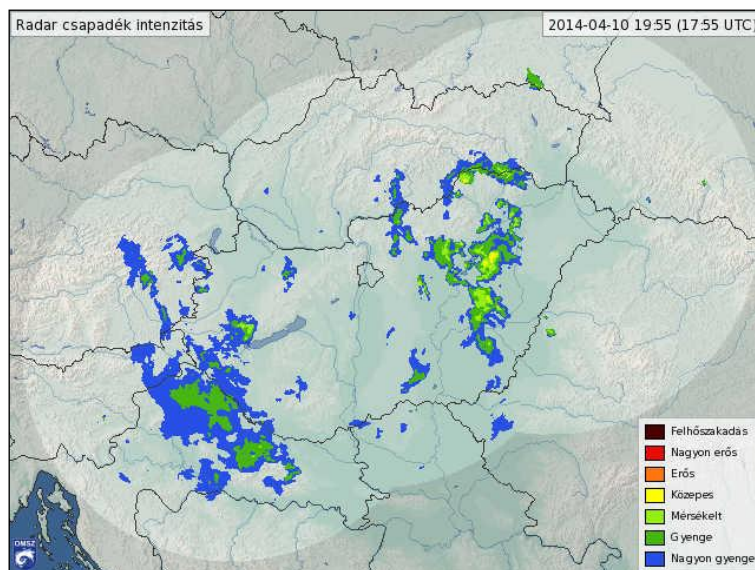


Ahogy korábban említettük az országban jelenleg három helyen üzemeltet az OMSZ időjárási radarokat, amelyek 240 km sugarú körben mérnek, így majdnem teljes rálátást biztosítanak a szomszédos radar feletti térrészre. Az átfedésben lévő területeken még több magasságban van mérésünk egy adott pont felett (7.b ábra), így az oszlopmaximum értéket még pontosabban határozhatjuk meg. Több radar mérésének felhasználásával készített kompozit képpel csökkenthetők az egyes radarmérésekben rejlő hiányosságok hatása is, mint pl. a talajcélok takarása, a csapadék okozta gyengülés, mert korrigálódik a másik radar adatával.










7. ábra. A kék és zöld vonalak a radar sugárnyalábokat jelölik különböző magassági szögeken. A piros vonal mutatja az oszlopmaximum számításának elvét, az (a) esetben egyetlen, a (b) esetben két radar esetén.

Az egyedi radarmérésekből tehát úgynevezett kompozit radarképeket készítünk, majd a reflektivitás értékekből (oszlopmaximumokból) számítunk felszíni csapadék intenzitást (mm/h), amelyeket mindenki megtekinthet az Országos Meteorológiai Szolgálat honlapján. Az országos kompozit radarkép (8. ábra) 961 km x 813 km nagyságú területet fed le, a képek elemi képpont mérete körülbelül 1x1 km<sup>2</sup>, a feltüntetett időpont a mérés kezdetét jelöli. A mérés néhány perccel később, majd szintén néhány percet vesz igénybe, amíg a nyers mérésekből elkészül a kompozit kép és kikerül a honlapra. A csapadék intenzitás ábrázolására 7 db kifejezést (színt) alkalmazunk az országos kompozit radarképeken, amelyek jelentését a csapadékintenzitásra vonatkozóan a 3. Táblázat tartalmazza. Havazás, illetve bármely szilárd halmazállapotú csapadék esetén a feltüntetett csapadék intenzitás értékektől mindenképpen gyengébbre kell számítanunk, mert azonos víztartalmú hópelyhek, jégszemek és esőcseppek közül előbbiek jobb visszaverők, így magasabb reflektivitási értékeket okoznak.



8. ábra. Országos kompozit radarkép, amelyen az oszlopmaximum értékekből számított csapadékintenzitás kerül ábrázolásra.

3. Táblázat. Az országos kompozit radarképen feltüntetett csapadékintenzitás kategóriák.

Csapadékintenzitás (mm/h)	
	Felhőszakadás
	Nagyon erős
	Erős
	Közepes
	Mérsékelt
	Gyenge
	Nagyon gyenge

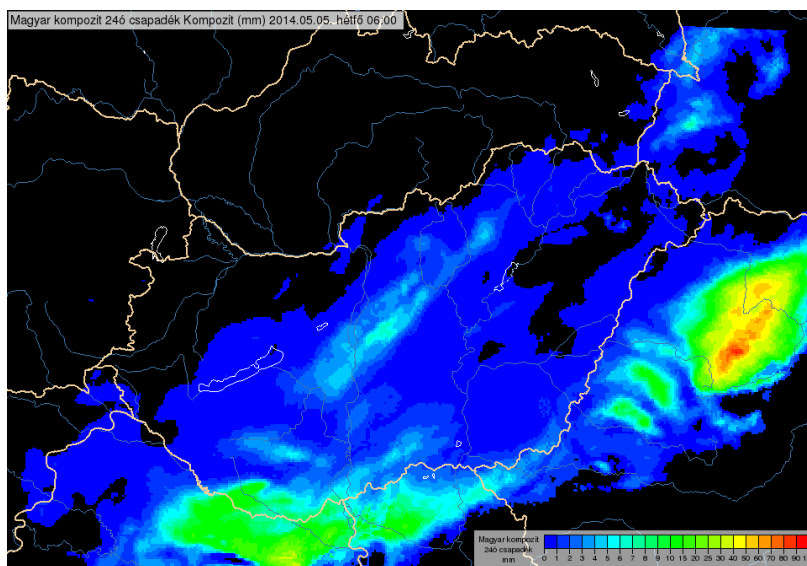
## 2.4 Radarméréseken alapuló csapadékösszegzés

Az időjárási radarok nagy területről, igen jó felbontással szolgáltatnak információt a csapadékintenzitásról, így rendkívül fontosak a csapadékösszeg térképek elkészítésénél, azonban a mért reklevititás értékekből csupán a pillanatnyi csapadék intenzitásra (mm/h) következtethetünk. A hosszabb időintervallumban lehullott csapadék mennyiségére (mm) a csapadék intenzitás időbeli összegzésével juthatunk. A radarmérések természetéből adódóan az intenzitás értékek csak diszkrét időpontokban, a hazai gyakorlatban 10 percenként állnak, rendelkezésre.

Az intenzitás numerikus összegzése a diszkretizációból eredően, szükségképpen bizonyos hibával terhelt. A hiba nagysága nagymértékben függ a csapadékrendszer: (i) időbeli fejlődésének ütemétől, (ii) térbeli tagoltságától, valamint (iii) térbeli mozgásának sebességétől. Különösen nagy összegzési hibák adódhatnak az olyan gyorsan mozgó konvektív rendszerek esetében, amelyeknél a csapadék celláknak a diszkretizációs időlépcső alatt történő térbeli elmozdulása, áthelyeződése meghaladja a cellák karakterisztikus átmérőjét. A „hiba” a csapadékösszeg mezőnek a fizikailag teljesen indokolatlan és valótlan „bordázott” térszerkezetében nyilvánul meg.

Az említett hiba eliminálásának vagy legalábbis jelentős mértékű csökkentésére az OMSZ szakemberei által kidolgozott módszert alkalmazzuk. Ennek lényege, hogy miután meghatároztuk a csapadékrendszer áthelyeződési sebességét, már figyelembe tudjuk venni az áthelyeződő rendszernek a diszkretizációs időlépcső alatt történő időbeli megváltozását. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy időben tetszőlegesen sűrűn tudunk előállítani csapadékinintenzitás térképeket két mérés között. Ezáltal a diszkrét időpontbeli mérések miatt kialakult bordázott csapadékösszeg térképek helyett, a valóságot jól közelítő képet kapunk.

A radarmérésekben esetlegesen előforduló hibák miatt a kapott csapadékösszeg mezőt utolsó lépésként korrigáljuk a felszíni csapadékmérőkkel. Az így kapott csapadékösszeg térképre látható példa a 9. ábrán.



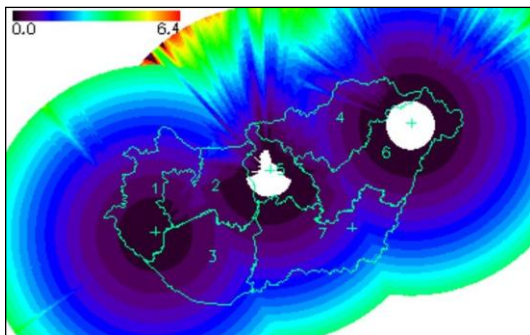
9. ábra. Radarméréseken alapuló csapadékösszeg térkép.

### 3. A radarmérések pontosságát, megbízhatóságát rontó hatások

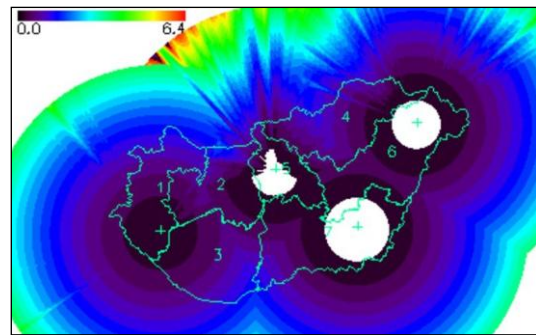
A radarmegfigyelés, mint a légkört szondázó tevékenység fizikájából és törvényszerűségeiből adódóan sajnos a mérések kisebb - nagyobb hibákkal terheltek, amelyek ismerete szükséges a helyes értelmezésükhöz, megfelelő felhasználói döntésekhez.

#### 3.1 Föld görbülete okozta hatás

Különösen a téli hónapokban gyakori, amikor a felhők nem nyúlnak nagyon magasra, hogy bár a radaroktól távoli területeken esik az eső, vagy hull a hó, mégsem látunk csapadékot a radarképen vagy csak nagyon keveset. Ennek a jelenségnek egyszerű geometriai oka van, nevezetesen a Föld görbülete. A 0 fokos magassági szögön köröző radarnyaláb, a radartól távolodva egyre magasabban halad a felszín fölött. A földgörbület hatását a refrakció (radarhullám elhajlás) valamelyest mérsékli, de a radartól 240 km távolságban a radarnyaláb magassága már meghaladja a 3,3 km-t. Ha a 0 fokos nyaláb útjába például egy hegység kerül, akkor a hegyek mögé, csak a következő (0,5 fokos) nyaláb "lát" be, természetesen magasabban. A radarhullám terjedés törvényszerűségei és a domborzati adatok alapján a radarok hatókörében bármely földrajzi pontra meghatározhatjuk azt a legalacsonyabb magasságot, amelyet radarhullámokkal még el tudunk érni, ott mérést tudunk végezni. Ezen minimális mérési magasságok térképe látható a 10. és 11. ábrán, a szentes-lapistói radar telepítését megelőzően és azt követően. Ezen ábrák igazolják, hogy a Szentes közelébe telepített új időjárási radarra nagy szükség volt.



10. ábra. A korábban csak három radart magába foglaló hálózat esetén a minimális mérési magasság. A fehér szín azt a területet jelöli, ahol a legalacsonyabban detektálható jel 250 méter alatt van, a sötétlila a 250-500 méter közötti magasságot ábrázolja. A színek 250 méterenként követik egymást.



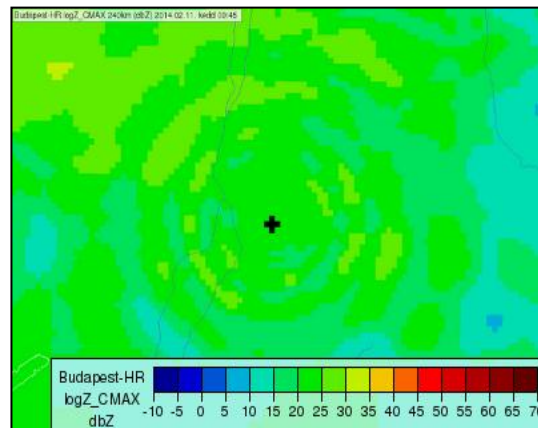
11. ábra. Az új radar belépésével a déli országrészben bekövetkező minőségi javulás a minimális mérési magasságban. A fehér szín azt a területet jelöli, ahol a legalacsonyabban detektálható jel 250 méter alatt van, a sötétlila a 250-500 méter közötti magasságot ábrázolja. A színek 250 méterenként követik egymást.

A 11. ábrán látható, hogy néhány kisebb területen, különösen a dél-délnyugati országrészben, a minimális mérési magasság mintegy 1500 méterre emelkedik (kék szín). A csapadék zónák függőleges irányú kiterjedése tág határok között mozoghat, térben és időben változatosan alakulhat, de előfordulhat, hogy a radaroktól távoli területeken csapadékszónák közül csak a magasra nyúló felhőket tudjuk érzékelni, az alacsonyakat azonban nem.

### 3.2 Olvadási réteg megjelenése a radarképeken

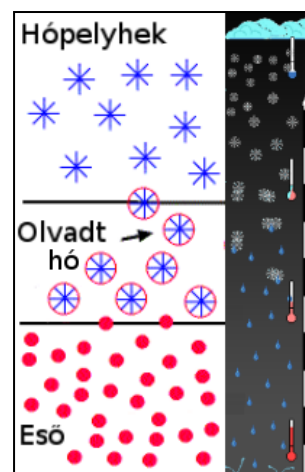
Az Országos Meteorológiai Szolgálat radarképein nagyobb területre kiterjedő, réteg felhőzetből hulló csapadék idején alkalmanként megfigyelhető, a radarok környezetében gyűrűs szerkezetben a reflektivitási értékek megnövekedése, ahogy ezt a 12. ábra mutatja. A következőkben ezt a jelenséget magyarázzuk meg.

Az általunk használt magassági szögeken kibocsátott radarnyalábok helyzetét jelölik a 4.a ábrán a kék vonalak. Ahogy korábban említettük az alkalmazott hullámhossz a meteorológiai célokat tekintve a csapadékelemek (esőcseppek, hókristályok, hópelyhek, hódara- és jégzemek) megfigyelését teszi lehetővé, az apró jégkristályokat, felhőcseppeket, amelyek a felhőket alkotják a radar nem "látja". A gyakorlatban a különböző szögeken mért reflektivitás értékek adott pont feletti maximumát használjuk a felszíni csapadékkintenzitás számításához (oszlopmaximum, 4. ábra).



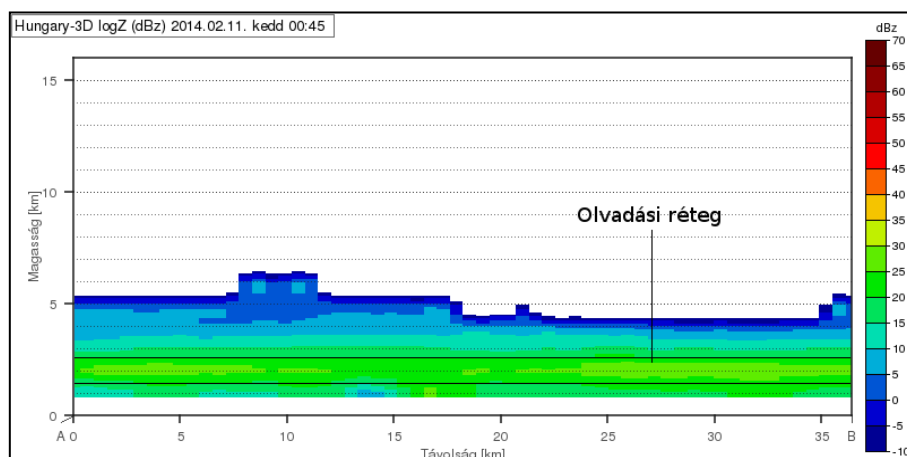
12. ábra. A 2014.02.11. 00:45 UTC-kor a budapesti radar által mért reflektivitási mező.

Azt a részét a légkörnek, amelyből egy adott pillanatban egyszerre érkeznek vissza a csapadékelemek által visszavert sugárzás, mérési térfogatnak nevezzük. Az, hogy a csapadékelemek milyen mértékű visszaverődést okoznak, függ attól, hogy milyen a csapadékelemek méreteloszlása és halmazállapota a mérési térfogaton belül. A reflektivitás a csapadékelemek méretének hatodik hatványával arányosan növekszik. Azonos méreteloszlás esetén az esőcseppek 5-ször jobb visszaverők, mint a fagyott halmazállapotú csapadékelemek. A légkörre általánosan jellemző, hogy a földfelszín fölötti 10-15 km vastag rétegében a hőmérséklet a magassággal fokozatosan csökken, egészen  $-50 - -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig. Így a nagyobb magasságokban keletkező csapadék szilárd halmazállapotban, jégzemek, illetve azokból kialakult hópelyhek formájában van jelen. Lefelé történő hullásuk során, a pozitív hőmérsékletű rétegbe érve megolvadnak, vízcseppekké alakulnak (13. ábra). Az olvadás kezdetén a hópelyheknek még csak a felszínét borítja vékony vízréteg, így azok a radar számára nagyméretű vízcseppeknek „látszanak”, lényegesen nagyobbaknak, mint az olvadás befejeztével létrejövő valódi vízcseppek. A tipikusan mindössze néhány száz méter vastag olvadási rétegben a látszólagosan nagyobb cseppek nagyobb radar reflektivitási értéket produkálnak, mint a közvetlenül ezen réteg fölötti, illetve alatti rétegek. A szakirodalomban „bright band”-nek (fényes sávnak) nevezik ezt a jelenséget, mert a vertikális radarkép metszeteken a reflektivitási értékek megnövekedését eredményezi egy keskeny sávban. Erre láthatunk példát a 14. ábrán, ahol körülbelül 2 km-es magasságban húzódott az a szint, amely felett már  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  alá csökkent a hőmérséklet. Konvektív csapadék idején nem figyelhető meg jól elkülöníthető sávban az olvadási réteg, mert az intenzív fel- és leáramlás széttöredezi.



13. ábra. Az olvadási rétegben a hópelyhek elkezdnek megolvadni, így vízréteg burkolja őket, azonban méretük ekkor még nagyobb, mint a teljes megolvadás után az esőcseppeké.



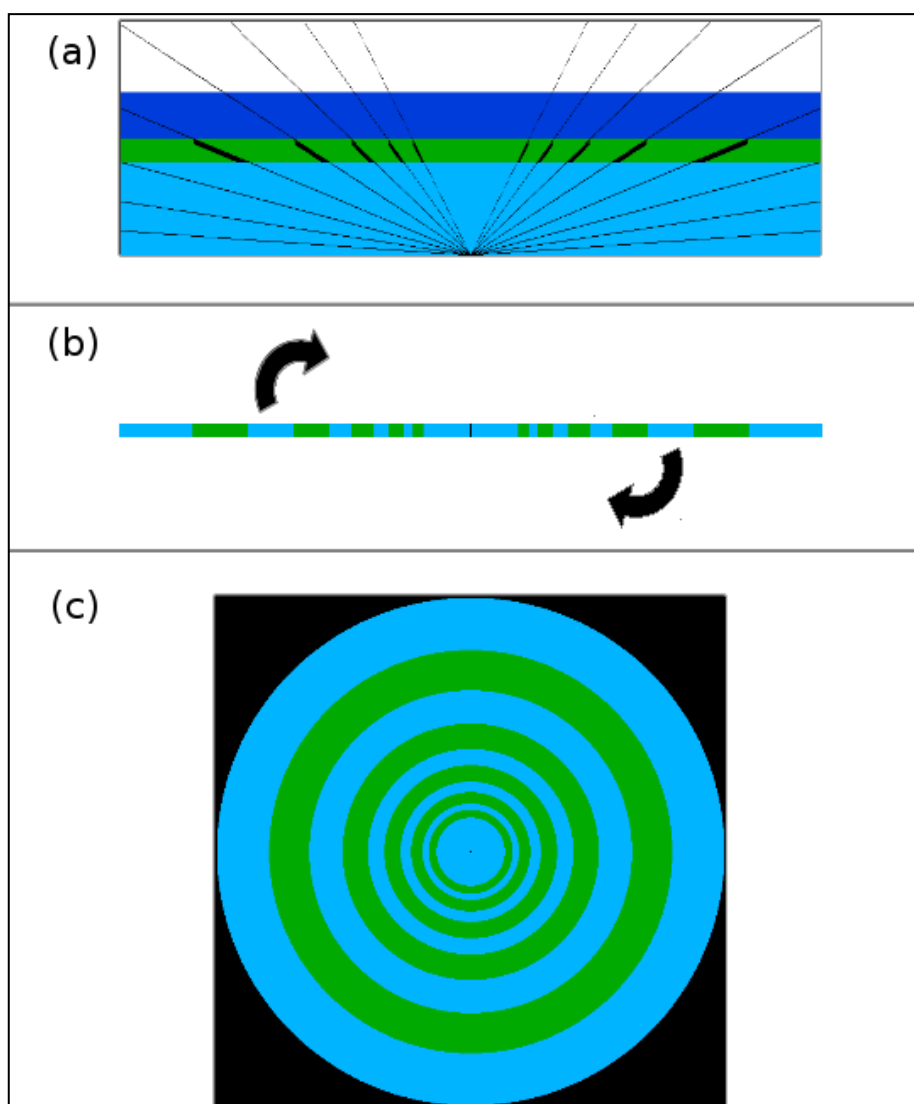


14. ábra. 2014.02.11. 00:45 UTC-kor készült radarkép metszet, amelyen 2 km-es magasságban megfigyelhető a reflektivitási értékek megnövekedése az olvadási réteg következtében.

A radarmérések során a radarnyaláb belemetsz az olvadási rétegbe és ekkor egy adott felszíni pont felett nagy valószínűséggel ez a réteg adja a legmagasabb reflektivitást. Az 1° széles nyalábok azonban nem zárnak össze teljesen, így vannak olyan pontok a felszínen, amelyek fölött egyik radarnyaláb sem érinti az olvadási réteget. Ezt szemlélteti a 15.a ábra, ahol egy idealizált vertikális radarkép metszet látható, berajzolva rajta a radarnyalábok helyzete a különböző magassági szögeken, valamint feketével kiemelve a nyalábok azon része, amely belemetsz az olvadási rétegbe.

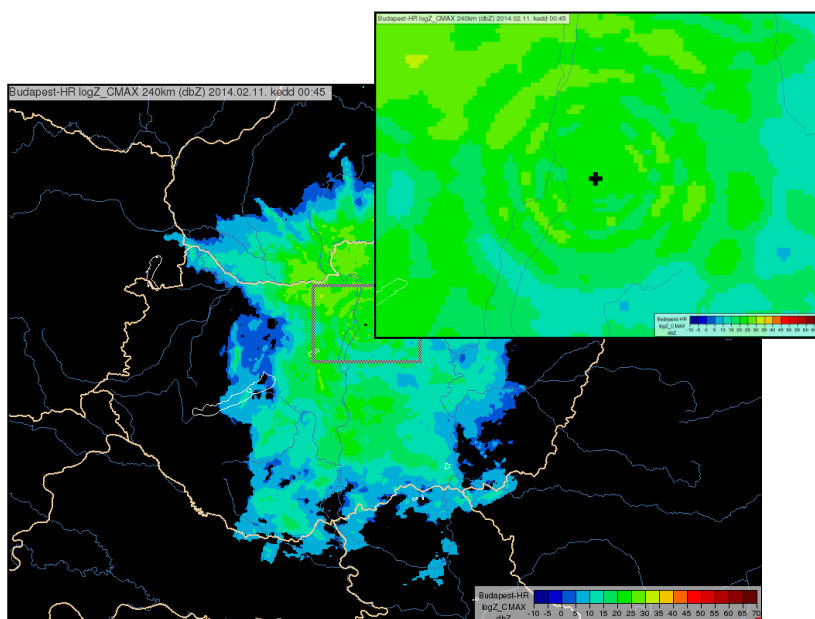
A 15.b ábrán láthatóak a metszet mentén az oszlopmaximum értékek. Azokon a helyeken, ahol valamelyik radarnyaláb belemetsz az olvadási rétegbe a zölddel jelölt, legmagasabb reflektivitási értékeket tartalmazó rétegből, míg minden más pontban a világos kékkel jelölt, kevésbé magas reflektivitást magába foglaló rétegből kerül ki az oszlopmaximum. A legalacsonyabb reflektivitást tartalmazó sötét kékkel jelölt réteg a felszín egyetlen pontja felett sem ad maximális értéket egy adott oszlopon belül. Természetesen a radar antenna folyamatosan forog, ennek következtében, ha a csapadékos terület kiterjedése kellően nagy, akkor szabályos gyűrűként jelennek meg azok a részek, ahol a nyalábok belemetszenek az olvadási rétegbe, ezt szemlélteti a 15.c ábra. Előfordulhat olyan helyzet is, amikor csak a gyűrűk mentén detektálunk csapadékot, vagyis csak az itt jelenlevő csapadékelemek okoznak mérhető reflektivitást. Ilyen helyzetben a csapadék elpárolog mielőtt elérné a felszínt.





15. ábra. Egy idealizált helyzetet mutat a fenti három ábra, ahol a mért reflektivitás nagyságára utalnak a színek, a zöld a legmagasabb, a világoskék kevésbé magas, a sötétkék a legalacsonyabb reflektivitási értékeket jelenti (a fehér szín jelzi a csapadékmentes területeket). Zöld színnel jelölve az olvadási réteg. Az (a) egy vertikális radarkép metszetet mutat, jelölve rajta a nyalábok helyzetét, valamint azt a részt, ahol belemetszenek az olvadási rétegbe. A (b) ábrán az (a) metszetből számított oszlopmaximum értékek láthatóak, majd a (c) egy teljes mérési ciklus után ábrázolt radarképet mutat, amelyen jól kivehető az olvadási réteg okozta szabályos gyűrűs szerkezet.

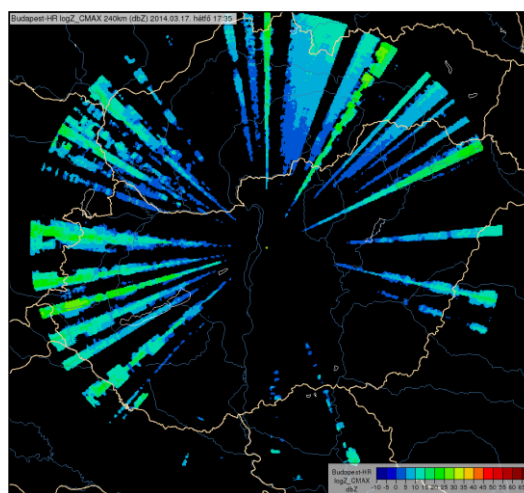
Budapest környékén 2014.02.11. 00:45 UTC-kor az olvadási réteg következtében kialakult gyűrűket mutatja a 16. ábra. Az olvadási réteget ősszel és tavasszal lehet a leggyakrabban megfigyelni mert, ekkor fordul elő legtöbbször réteges felhőzetből hulló csapadék és a 0 °C-os izoterma magassága is ekkor a legmegfelelőbb.



16. ábra. A 2014.02.11. 00:45 UTC-kor a budapesti radar által mért reflektivitási mező.

### 3.3 WLAN zavarok

A hazai mérési gyakorlatban jelenleg a legtöbb fejtörést az ún. WLAN zavarok okozzák. A probléma oka, hogy a radarnyaláb frekvenciáján (budapesti radarnál ~5625 MHz, vidéki radaroknál ~5610 MHz) számos vezeték nélküli helyi hálózat, WLAN (Wireless Local Area Network) is sugároz. Ha frekvenciaforrások közel vannak a műszerhez (egy hozzávetőlegesen 30 km-es sugáron belül), akkor a mérést komolyan zavarhatják. A hatályos szabályozás szerint Európában az említett csatornák szabadon használhatók, ugyanakkor a Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóság (NMHH) ajánlása szerint a radarvétel zavarása szigorúan tilos, a radar 30 km-es körzetében a szolgáltatók, és a berendezések üzemeltetői kötelesek arról gondoskodni, hogy a sugárzás ne zavarja a meteorológiai mérést. Ellenkező esetben az NMHH intézkedik a probléma megszüntetéséről. Mindezek ellenére mégis igen gyakran történik zavarás a fenti frekvenciákon, ami radarképeken általában sugárirányú, hosszúkás, mérsékelt reflektivitású echo formájában jelentkezik.

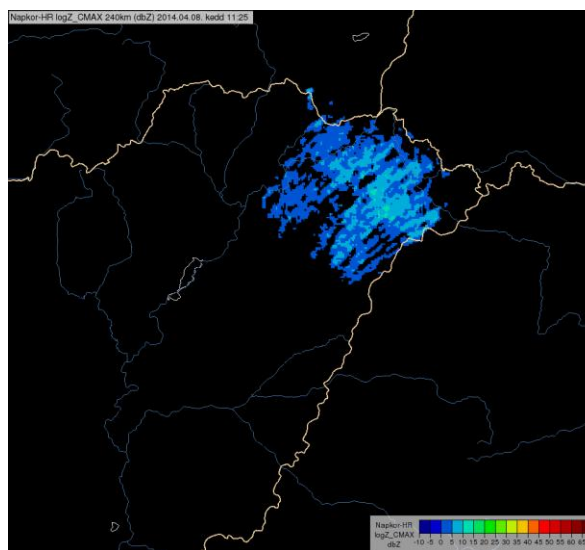


17. ábra. Az WLAN zavarok hatása a budapesti radar mérésére egy extrém esetben. A képen látható jeleket egyedül WLAN zavarok okozzák, ebben az időpontban csapadék nem volt a térségben.

A hosszúkás alakú jelek oka az, hogy a nyaláb kibocsátása után az WLAN berendezésről folyamatosan érkeznek be a jelek a vevőbe, amit a műszer természetesen egy elnyújtott térbeli echóként érzékel. A 17. ábrán láthatjuk az WLAN zavarás hatását a Budapesten egy extrém esetben. Az OMSZ szakemberei különféle szűrő eljárásokkal a zavarok többségét ki tudják küszöbölni, ugyanakkor még ennek ellenére is előfordulhatnak WLAN hibák a végső képeken.

### 3.4 Mikroturbulenciák okozta jelek

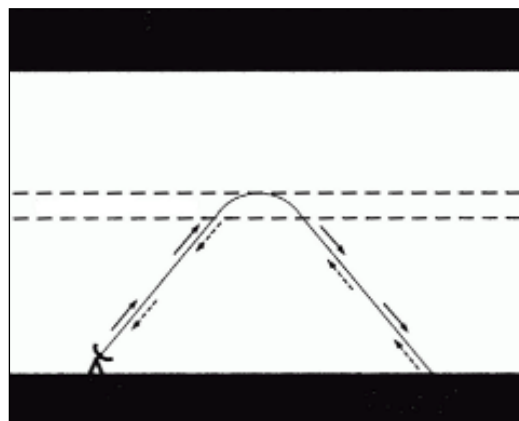
A kibocsátott sugárzás visszaverődhet hidrometeorokról (esőcsepp, hópehely, jégszem), por-szemekről, mikroturbulenciákról, nagyon ritkán akár rovarok vagy madarak is képesek olyan visszaverődést okozni, amelyet már képes mérni a radar. A mikroturbulenciák olyan területek a légkörben, ahol változik annak nedvessége, hőmérséklete ezáltal pedig változik a légkör törésmutató indexe, amely a kibocsátott sugárzás egy részének visszaverődését okozza. Jellemzően nem okoznak erős jeleket. Legfeljebb a radarok 70-80 km sugarú környezetében figyelhetőek meg, mert egyrészt "ellátunk" felettük, ugyanis vertikálisan legfeljebb 1,5 km-es magasságig vannak jelen olyan méretben, amelyet a radarok érzékelni tudnak, illetve nagy távolságban az általuk okozott visszaverődéseket a radar már nem képes mérni. A nem hidrometeorok okozta jelek szűrése többnyire megoldott probléma, azonban a mikroturbulenciák okozta jelek, tulajdonságaikban nagy hasonlóságot mutatnak a valós csapadékhhoz, így előfordul, hogy nem tudjuk kiszűrni azokat. Ilyen esetre láthatunk példát a 18. ábrán.



18. ábra. Mikroturbulenciák okozta jelek Napkor közelében.

### 3.5 Rendellenes terjedés (anaprop)

A radarmérések során a rendellenes terjedés vagy más néven anaprop (anomalous propagation angol elnevezés rövidítése) erősen inverziós időjárási helyzetekben következik be. A 19. ábrán látható módon a radarnyaláb az inverziós rétegen megtörik, visszaverődik a felszínről, a visszainduló jel ismét megtörik a rétegen, és így kerül a vevőbe, ennek következtében a radar tulajdonképpen a felszín reflektivitását méri meg. Az anaprop terjedés kaotikus, sugárirányban hosszan elnyúló foltokkal tarkított radarképet produkál, nagy intenzitásváltozásokkal.

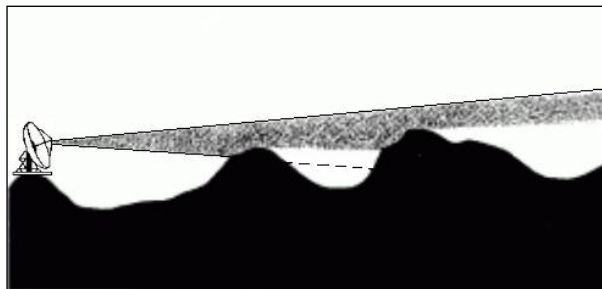


19. ábra. Anaprop terjedés.

Leggyakrabban anticiklonális helyzetben fordul elő, amikor különösen éjszaka 100-200 m vastag inverziós réteg alakulhat ki az erősen lehűlt felszínközeli réteg tetején. Az anaprop ilyen esetekben gyakran hirtelen jelenik meg és tűnhet el az inverzió gyors kialakulása illetve összeomlása következtében.

### 3.6 Domborzat árnyékoló hatása

Ha a radarnyaláb útjába egy domb vagy egy hegy esik (20. ábra), akkor az magától értetődően kitakarja a mögötte elhelyezkedő csapadékcélt. Olyan helyzet is előfordulhat, hogy csak a nyaláb egy része kerül kitakarásra, ilyen esetben a nyalábszélesség kitakart hányadának ismeretében megfelelő korrekciókkal a csapadékinтенzitás becslése javítható.



20. ábra. Nyaláb blokkolódás.

### 3.7 Intenzív csapadékmezők árnyékoló hatása (gyengítés)

Ha a radarnyaláb útjába erősebb zivatar kerül, akkor a nyaláb energiája oly mértékben gyengülhet a cella nagy koncentrációjú és méretű csapadékelemein, hogy a zivatar mögötti térrészben tartózkodó objektumok a kisugárzott impulzus töredékét képesek csak visszaverni. Ilyenkor az intenzív echó mögötti területekről kapott reflektivitási értékek jóval alacsonyabbak a tényleges intenzitástól, a radar alábecsül. A gyengítés jelentősen korrigálható például polarizációs mérésekből származó paraméterekkel (2.2 fejezet) vagy több radar egyidejű alkalmazásával.

## 4. A leggyakoribb csapadéktípusok főbb radar jellemzői

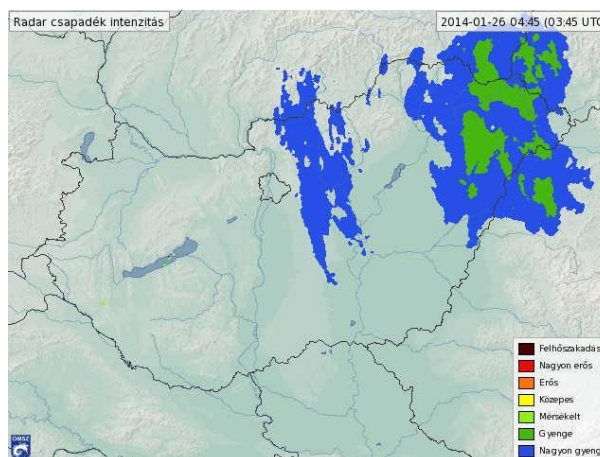
A felhők és csapadékok főbb alkotóelemei a vízcseppek, a túlhűlt vízcseppek, jégkristályok, hópelyhek, a légkörben lejátszódó mikrofizikai (kondenzáció, részecskék ütközése stb.) folyamatok termékei. Csapadéknak a lefelé mozgó, a földfelszín is elérő vízcseppeket, hópelyheket, jégkristályokat és jégzemeket nevezzük. A létrehozó folyamatok igen változatosak lehetnek a hőmérséklettől, nedvességtartalomtól és a lehülés sebességétől függően, ezek egyértelműen meghatározzák a felhőelemek és csapadékelemek halmazállapotát, szerkezetét. Keletkezésük folyamatát tekintve alapvetően kétféle halmazállapotú csapadékról beszélhetünk. Meleg évszakban többnyire folyékony, a hideg évszakban inkább szilárd halmazállapotú csapadék hullik. Emellett természetesen megfigyelhető kevert halmazállapotú csapadék is (jégeső, havas eső), de ezek vízhozama éves szinten nem jelentős. A hópelyhek a kis esési sebessége miatt jelentős horizontális távolságra elsodródhatnak mielőtt elérnék a földfelszín. Az alábbiakban röviden bemutatjuk a leggyakoribb csapadéktípusokat és azok radarmérésekben tükröződő jellegzetességeit. Fontos megjegyeznünk, hogy a felsorolt csapadéktípusok egyértelmű felismeréséhez a radarmérések mellett más meteorológiai paramétereket is ismernünk kell, továbbá megfelelő gyakorlatra is szükség van a radaradatok használatában.

### Hószállingózás, hódara

A pillanatnyi csapadékintenzitás 0,1 mm/h körüli. A 6 óra alatt lehulló csapadék mennyisége nem éri el a 0,5 mm-t, ami 1 cm-nél kisebb hó vastagságot jelent. Az ilyen típusú csapadék felderítése csak a radar közvetlen közelében lehetséges a kis intenzitás és a kis vertikális kiterjedtség miatt.

### Havazás

Nagy területre kiterjedő, kitartó, folyamatos havazás a nagytérségű rendezett feláramlások miatt kialakuló rétegfelhőzetből hullhat. A vertikális kiterjedése a csapadékot okozó felhőknek 2-5 km-nél nem nagyobb, emiatt 100-180 km-en belül detektálható legfeljebb, de ez függ a havazás intenzitásától is (21. ábra).



21. ábra. Gyenge, illetve közepes intenzitású havazás az ÉK-i országrészben, illetve a középső tájakon.

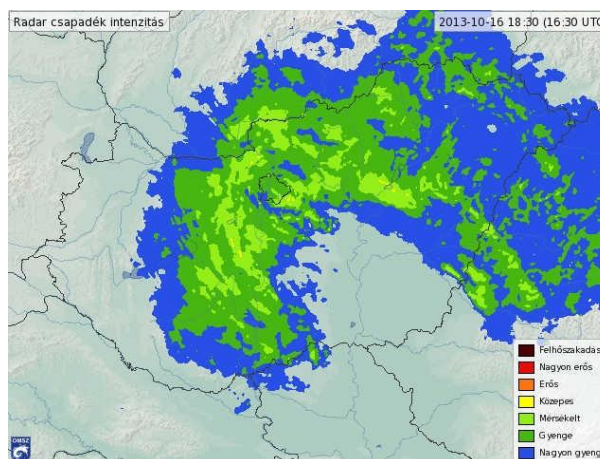


## Szitálás

A pillanatnyi csapadékinintenzitás 0,1 mm/h (7 dBZ) körüli, 6 óra alatt lehulló csapadék mennyisége nem éri el a 0,5 mm-t. A felhőzet vastagsága általában kisebb, mint 2 km. Az ilyen típusú csapadék a radarral ritkán deríthető fel, akkor is csak a közvetlen környezetében.

## Gyenge, mérsékelt intenzitású eső

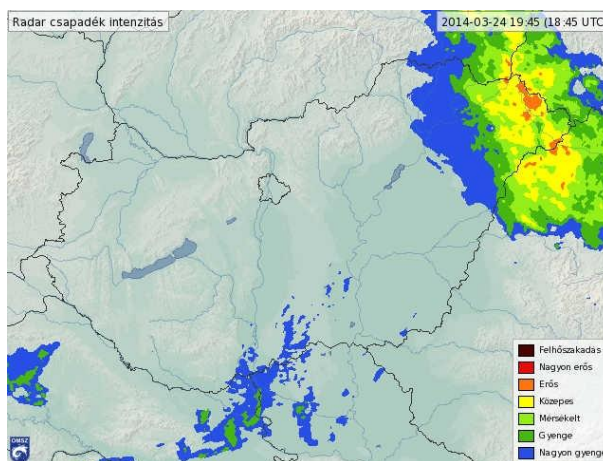
A pillanatnyi csapadékinintenzitás 0,1 - 5 mm/h (7 - 34 dBZ) közötti. A gyenge intenzitás gyakran csak a radarállomás 80 - 120 km-es körzetében detektálható (22. ábra). Továbbá az is előfordulhat, hogy a radar által a magasban észlelt csapadék nem éri el a földfelszínt.



22. ábra. Nagy területre kiterjedő gyenge, illetve mérsékelt intenzitású eső.

## Közepes és nagy intenzitású eső

A pillanatnyi csapadékinintenzitás 5 - 30 mm/h (34 - 47 dBZ) közötti. A radar 180 - 240 km-es körzetén belül detektálható (23. ábra).

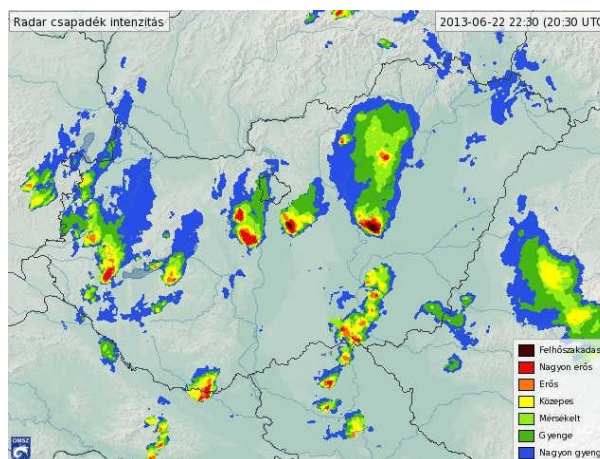


23. ábra. Közepes, illetve erős intenzitású eső az ÉK-i országrészben.



## Zápor, zivatar, jégeső

Fő jellemzője a tér- és időbeli nagy változékonyság. A pillanatnyi csapadékintenzitás igen széles határok között mozoghat, kis területen akár a 100 mm/h (55 dBZ) feletti értékek is előfordulhatnak. Területi átlagban nem adnak nagy csapadékot, de lokálisan komoly problémákat okozhatnak a hirtelen lehulló csapadék, jégeső (legerősebb reflektivitási értékek) és a jelenséget kísérő erős szelek miatt. A radar teljes, 240 km-es mérés tartományában felderíthetők a felhőzetük nagy magassága is intenzitásuk erőssége miatt. Radar echóik cellaszerűek, jellemzően határozott, éles kontúrral rendelkeznek (24. ábra). Az intenzitás térbeli változása nagy.



24. ábra. Az országban többfelé előforduló záporok, zivatarok egy nyári napon.

Az időjárási radarokkal kapcsolatos bármilyen kérdést vagy megjegyzést az OMSZ szakemberei szívesen fogadnak (e-mail: radar@met.hu).

Budapest, 2014. október 14.