

Mikrohullámú tartományú műholdas mérések használata medikánok esetén

Hérincs Dávid, Dezső Zsuzsanna

HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt, herincs.d@met.hu

DOI:10.56474/legkor.2024.3.2

A trópusi ciklonok esetében régóta alkalmaznak a hagyományos (infravörös, látható) spektrumtartományokban mért műholdadatokat kiegészítésére mikrohullámú tartományú műholdas méréseket. Ezeket kvázipoláris műholdakra szerelt szenzorok szolgáltatják, melyeknél általában csak napi két mérés áll rendelkezésre, de több műhold adatának felhasználásával az időbeli lefedettség is növelhető. A mikrohullámú mérések segíthetnek feltárni a ciklonok belső struktúráját, a meleg mag jelenlétét, illetve bizonyos szenzorokkal a szélereősség is meghatározható, ami különösen akkor hasznos, amikor egyéb, például hajókról, bójákról, speciális repülőgépekről végzett közvetlen mérés nem áll rendelkezésre. Jelen írásban a módszerben rejlő lehetőségeket mutatjuk be medikánok esetén, egy 2022. októberi példán keresztül.

Use of microwave satellite measurements in case of medicanes

The analysis of tropical cyclones with microwave satellite measurements is a common method in the tropical meteorology, supplementing the 'classical' satellite channels (infrared, visible). Nowadays, many polar orbiting satellites have microwave sensors that provide high quality measurements, however, mostly only twice a day. These data facilitate the analysis of the cyclone's structure and strength: for example, the warm core, the cloudiness at different atmospheric levels, the precipitation and the wind speed can be determined. In this article, we present the use of the microwave products in case of the medicanes with an example from October 2022.

A Földközi-tenger felett létrejövő mediterrán ciklonok speciális légörvények, melyek keletkezését és életciklusát a környező domborzat, a viszonylag meleg tengerből származó látens hő, valamint a magassági (baroklin) hatások együttesen befolyásolják, és ezáltal többféle típusuk ismert. A mediterrán ciklonok egy csoportját alkotják az úgynevezett medikánok, melyek az angol Mediterranean hurricane szavak összevonásából (medicane) kapták a nevüket. Ezek kis méretű, de jól fejlett, többnyire frontmentes ciklonok, melyek

kinézetre nagyban hasonlítanak a trópusi ciklonokra: többször megfigyelhető a központjukban egy felhőmentes szem, az ezt körülvevő, olykor teljesen zárt és vastag konvektív felhőzet alkotta szemfal, valamint a külső, spirálisan tekeredő felhő- és csapadékkarok is (Miglietta and Rotunno, 2019). Apró méretük ellenére hasonló károkozásra képesek, mint trópusi társaik, kiemelten a kiadós csapadék által előidézett áradások, földcsuszamlások révén (Zekkos et al., 2020). Időnként ugyanakkor a szélesebesség is elérheti bennük

a Saffir-Simpson hurrikánskála 1-es (119–153 km/h közötti 1 perces átlagszél), esetleg a 2-es (154–177 km/h közötti 1 perces átlagszél) kategóriájának megfelelő értékeket, ahogy ez például a 2020 szeptemberében Görögországot sújtó Ianos ciklon esetében történt (Lagouvardos et al., 2022).

A medikánok leggyakrabban az őszi és a téli hónapokban jönnek létre, amikor a tenger még viszonylag meleg. Ilyenkor a nyugati áramlásról leszakadó (cut-off) ciklonok egy tartós blocking helyzet esetén több napig is a víz felett vesztegelhetnek, miközben fokozatosan elvesztik kezdeti mérsékelt övi jellegüket, és egy kisebb méretű, konvektív örvénnyé alakulnak át, hasonlóan az Atlanti-óceán szubtrópusi övezetének északi, északkeleti részén létrejövő szubtrópusi és trópusi ciklonokhoz (González-Alemán et al., 2015, Tang et al., 2020). Ehhez részben a látens hőből, részben a tenger és a felső-troposzféra közötti hőmérséklet-különbségből eredő instabilitásból merítik az energiát (Cavicchia et al., 2014). Ugyanakkor a folyamatot segítheti az is, ha a mérsékelt övi ciklon a Shapiro-Keyser féle ciklonfejlődést követve már eleve meleg magvúként okkludálódik (Shapiro and Keyser, 1990). A medikánokat az utóbbi években egyre intenzívebben kutatják, mind szinoptikai, mind éghajlati szempontból. Kimutatták például, hogy a magassági potenciális örvényességi szalagok és a környező nedvesség jelentős szerepet játszhat a fejlődésükben (Fita and Flaounas, 2018). Vizsgálták a mélykonvekció tartósságát és annak térbeli eloszlását a vertikális szélnyírás függvényében, melynek eredményeképp a medikánok a trópusi ciklonokhoz hasonlóan gyengébb nyírási környezetben tudnak a leginkább megerősödni, mivel ilyenkor a konvekció szervezettebb lesz, illetve kevésbé tud bekeveredni a ciklon áramlási rendszerébe a környező, közép-troposzférikus szárazabb levegő (Dafis et al., 2020). A jövőbeli tendenciák vizsgálata alapján a ciklonok darabszámában nem mutatkozott határozott trend, viszont a melegedő tenger hatására gyakoribbá válhatnak az erősebb példányok (González-Alemán et al., 2019). Szinoptikai szempontból kiemelendő még Flaounas et al. (2021) munkája, melyben 100 múltbeli ciklonra vonatkozóan határozták meg a potenciális örvényesség – szétválasztva a magasban érkező örvényességi mezőket és a ciklonok által a látens hőfelszabadulás révén „alulról” építkező örvényességi „oszlopot” –, a szél és az ekvivalens potenciális hőmérséklet átlagos megjelenését különböző nyomási szintekre, mely alapján elkülöníthetők voltak a medikánok a hagyományos, frontokkal rendelkező, hideg magvú mediterrán ciklonoktól.

Mikrohullámú műholdas megfigyelések

A trópusi ciklonok megfigyelésében régóta használják a különböző passzív és aktív mikrohullámú méréseket (Fontan et al., 2019; Qian et al., 2020). A legtöbb trópusi ciklonokat megfigyelő szervezetnél ezeket már operatíván, valós időben használják, és segítségükkel jó közelítéssel becsülhető a szárazföldről távoli, így közvetlen mérésekkel kevésbé elérhető ciklonok erőssége. E méréseknek két fő típusát különböztethetjük meg: passzív és aktív. Előbbi esetben a műszer a felszín felől érkező sugárzást érzékeli, míg utóbbinál egy jelet bocsát ki, és annak visszaverődéséből számít adatokat.

A passzív méréseket a leképező és szondázó műszerek végzik. A szondázó berendezésekkel leggyakrabban az oxigén egy markáns elnyelési sávjához kapcsolódó, 50 és 58 GHz közötti tartományban végeznek méréseket, és az egyes csatornák adatait felhasználva több magassági szinten kiszámítható a légoszlop hőmérséklete és nedvessége, hasonlóan a földfelszínről indított rádiószondás mérésekhez. Ezt elsősorban a trópusi ciklonok meleg magjának detektálására használják, mellyel mérhető annak erőssége és vertikális kiterjedése (mélysége) is. A leképezésnél leggyakrabban a 19 GHz, a 37 GHz és a 89 GHz körüli tartományokon végeznek méréseket vertikális és horizontális polarizációval, majd ezeket kombinálják. A mikrohullámú mérések nagy előnye, hogy láthatóvá tehető a ciklonok belső strukturális felépítése – így például egy kialakulóban lévő vagy éppen leépülő szemfal, esetleg a meglévő szem körül keletkező új, mely az úgynevezett szemfal-kicserélődési folyamat és a ciklon ezzel együtt járó átmeneti gyengülésének előfutára lehet –, melyeket a hagyományos infravörös vagy látható tartományú műholdas csatornákkal nézve általában eltakarnak a vastag, vagy magasabb szintű felhők. A ~19 és a ~37 GHz-es frekvenciákon a szárazföldrök, valamint a tenger feletti, alacsonyabb szintű (pozitív hőmérsékletű) csapadékelemek és felhőelemek mutatják a legmagasabb fényességi hőmérséklet értékeket, mivel ezek emissziója nagy, így ez a két frekvenciasáv a ciklonok alacsony- és középszintű struktúrájának feltérképezésére szolgál. A ~89 GHz-es frekvencián szintén a szárazföldrök és az alacsonyabb felhőelemek a legmelegebbek. Itt azonban a magasabb (konvektív) felhőkben található jéggrszecskék nagy mértékben szórják, gyengítik a sugárzást, emiatt ezek alacsonyabb fényességi hőmérsékletű területekként jelennek meg, így ez a sáv elsősorban a ciklonok konvektív fejlettségének meghatározására használható.

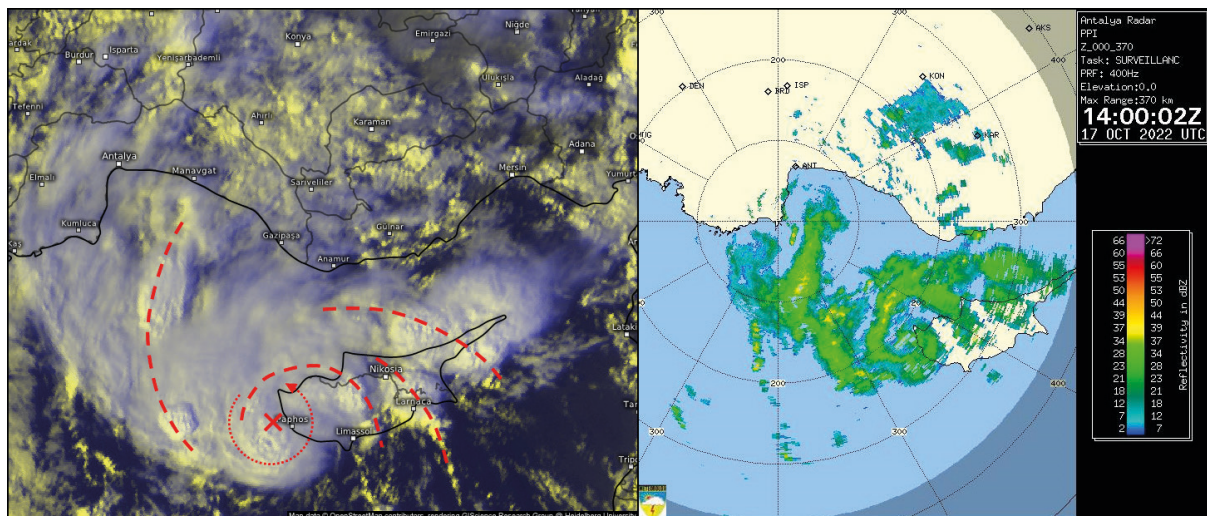
Az aktív mérések közül a szélsébség és a csapadék-intenzitás meghatározására képes berendezések emelendők ki. Előbbiek közül a legelterjedtebben az európai MetOp műholdcsaládon elhelyezett ASCAT (Advanced Scatterometer) szenzorok és az SMAP (Soil Moisture Active Passive) műhold mérései használtak. Előbbi mérésekből a tengerfelszíni szélirányt és a szélérősséget határozzák meg, de nagyobb sebességeknél egyre pontatlanabbá válnak, illetve a medikánokhoz hasonló, kisebb méretű trópusi ciklonokban is sokszor jelentkeznek esetükben alulbecslés az egyéb elérhető mérésekkel (például hajók) összehasonlítva. Az utóbbit – ahogy a neve is utal rá – elsősorban a talaj nedvességtartalmának mérésére tervezték, de található rajta olyan szenzor is, amely képes a tenger sótartalmát és a vízfelszín feletti szélérősséget meghatározni. Itt szélirány detektálás nem történik, viszont a nagyobb szélsébségek esetén pontosabb, mint az ASCAT. Csapadékként tekintetében jelenleg a DPR (Dual-frequency Precipitation Radar) szenzor biztosítja a legjobb, 5×5 km-es horizontális és 125 m-es vertikális felbontású adatokat, mely egy Ku- és Ka-sávban (13,6 és 35,5 GHz-en) mérő, kettős frekvenciájú berendezés. Ez az aktív műszer 3-dimenziós információt nyújt a csapadék elemekről. A műszer mérési nyalábjában azonban keskeny, mindössze 245 km-es, így ritkábban érinti egy-egy ciklon központi régióját, mint az eddig felsorolt szenzorok.

A medikánok esetében – hivatalos monitorozó szervezet híján – operatíván nem használják ezeket a produktumokat, bár a már említett 2020-as Ianos ciklonhoz

a CIMSS (Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies) készített valós idejű intenzitásbecsléseket a passzív szenzorok adatait felhasználva, melyek megtekinthetők az [1] linken. Ehhez a ciklonhoz kapcsolódóan Panegrossi et al. (2023) elsőként elemezte a mikrohullámú szondázó berendezések adatait is, mellyel sikerült egy gyengébb, néhány °C-os anomáliájú meleg magot kimutatni. Emellett a 2011-es Rolf (Dafis et al., 2018) és a 2017-es Numa (Marra et al., 2019) ciklonokról készült tanulmányokban a passzív méréseket felhasználva vizsgálták a mélykonvekció tér- és időbeli megjelenését a ciklonok központja körül, illetve a Numa esetében a csapadék- és szélviszonyokat is az aktív szenzorok mérései által, mindkét esetben a trópusi ciklonokéhoz hasonló tulajdonságokat kapva. Jelen írásban a mikrohullámú mérések medikánok esetében történő lehetséges felhasználásáról nyújtunk összefoglalást egy 2022. októberi példán keresztül, ami hazai viszonylatban még viszonylag ismeretlennek számít. Mivel a kiválasztott ciklon viszonylag szervezetlen és sekély volt, az elemzés mellőzi a szondázó szenzorok adatainak bemutatását.

A Ciprian ciklon rövid áttekintése

Az említett medikánt ezúttal egyik amatőr meteorológiai szervezet vagy hivatalos szolgálat sem nevezte el, így a Ciprian saját névadás. A ciklon előzménye egy, a Földközi-tenger nyugati medencéje felett létrejött ciklonális mező volt, mely már a kezdeti időszakban sem rendelkezett határozott frontális struktúrával



1. ábra. A Ciprián ciklon legfejlettebb állapotában, 2022. október 17-én délután – a műholdképen piros szaggatott vonalak jelzik a műholdas- és radaradatok segítségével azonosítható spirális csapadékkarokat, míg az X a körbefutó nyílval a ciklon központját és belső magját (Meteosat műholdkép: 13:05 UTC, radarkép: 14:00 UTC).

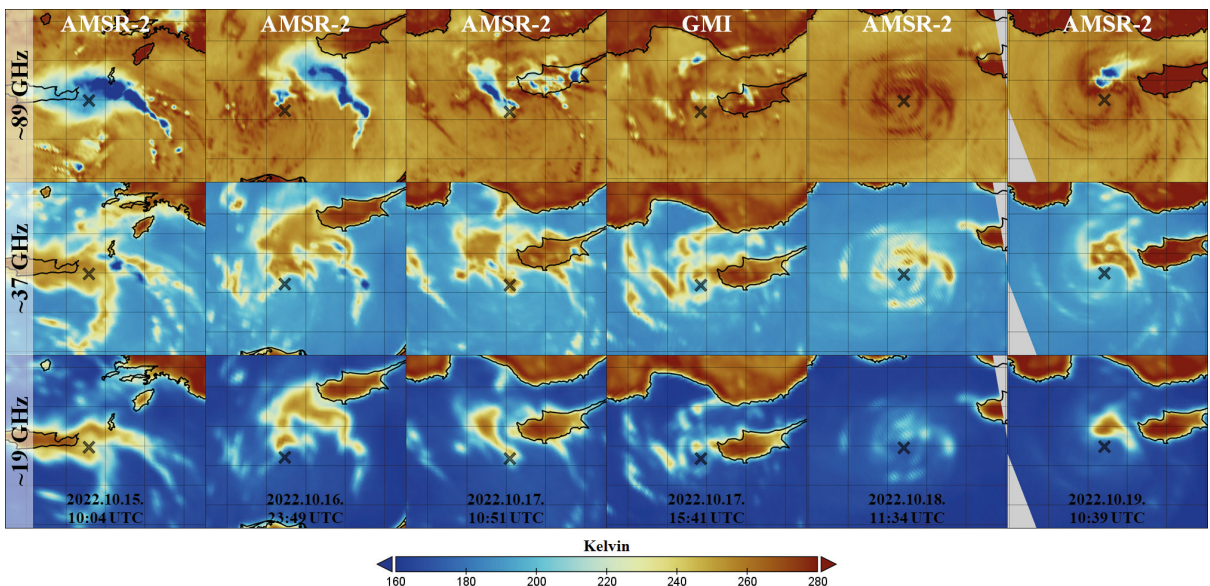
Források: EUMETSAT / Kachelmannwetter, illetve Turkish State Meteorological Service.

és középponttal, ugyanakkor jelentős konvekció zajlott hozzá kapcsolódva. Október 15-én Kréta keleti felét és a környező kisebb görög szigeteket, illetve Törökország délnyugati határvidékét érintve egy kiterjedt zivatarrendszer alakult ki, melyhez kapcsolódva egy új ciklonális örvény fejlődött ki, mely végül domináns lett. A zivatarrendszer este legyengült, 16-ára virradó éjszaka azonban egy újabb keletkezett a ciklon központi részétől északkeletre, keletre, melyet délutántól kezdve egy újabb követett a centruma közelében, jelezve, hogy a légörvény szubtrópusi jelleget öltött. 17-én reggeltől a konvekció már közvetlenül a ciklonközpont körül zajlott, és délutánra fokozatosan körbe is csavarodott körülötte, miközben az időközben Ciprust megközelítő ciklon felett és attól északra jellegzetes, kiterjedt és szétterülő cirrus-ernyő alakult ki, jelezve a magassági szétáramlás létrejöttét (1. ábra). A törökországi Antalya radarmérései ekkor már „elérték” a ciklont, a radarképeken a délután közepén egy trópusi ciklonokra jellemző struktúra rajzolódott ki spirálisan felcsavarodó csapadékkarokkal. Ciprustól alig nyugatra pedig rövid időre egy kisebb, nyugat-északnyugat felé nyitott szemszerű képződmény is megjelent. Ezzel a légörvény trópusi viharra alakult. Jelentősen erősödni azonban már nem tudott, mivel késő délutántól középszinten szárazabb levegő keveredett az áramlási rendszerébe, majd éjjel a magassági szél is megerősödött felette, megnövelve a vertikális szélnyírást, és e két hatás együttesen tartósan korlátozta a konvekciót. A ciklon 18-án egy kisebb hurkot írt le

Ciprustól délnyugatra, és 19-én északkelet felé indult meg, így ismét közeledni kezdett Ciprushoz. Ezzel együtt a kora délelőtti óráktól tartós mélykonvekció zajlott az északi, északkeleti oldalán erős zivatarokkal, az antalyai radarmérések többször is detektáltak 50–60 dBz-s intenzitású cellákat. Ám a továbbra is fennálló szélnyírás megakadályozta, hogy a ciklon struktúrája újra szervezettebbé váljon. A központja este érte el a szigetet, de mivel az intenzívebb csapadéggócok továbbra is ettől északra maradtak, azok nagyrészt a tengert érintették. A ciklon 20-án reggelre áthaladt Cipruson, és eközben legyengült, végül napközben fel is oszlott. A medikán gyenge volta ellenére kiadós csapadékot okozott az érintett területeken, Krétán és Cipruson helyenként elérte a 100–200 mm-t a teljes csapadékösszeg. Előbbi szigeten a keleti területeken 15-én néhol a napi csapadékösszeg is 100–150 mm között alakult, míg utóbbin 17-én fordultak elő néhol 70–80 mm-es napi összegek. 19-én a sziget északnyugati csücskében, melyet még éppen érintettek az intenzív csapadéggócok, szintén mértek hasonló értékeket.

A ciklon elemzése mikrohullámú tartományú műholdas adatokkal

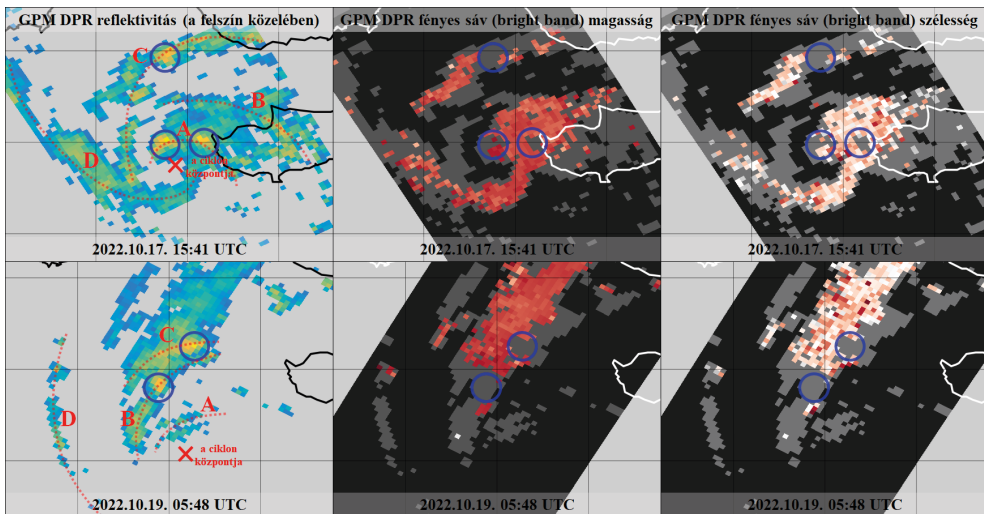
A trópusi ciklonok struktúrájának vizsgálatokor a leghatékonyabban a már említett három frekvenciát (~19 GHz, ~37 GHz és ~89 GHz) alkalmazzák. A jelenleg elérhető adatok közül a GCOM-W1 (Global Change Observation Mission - Water) műhold



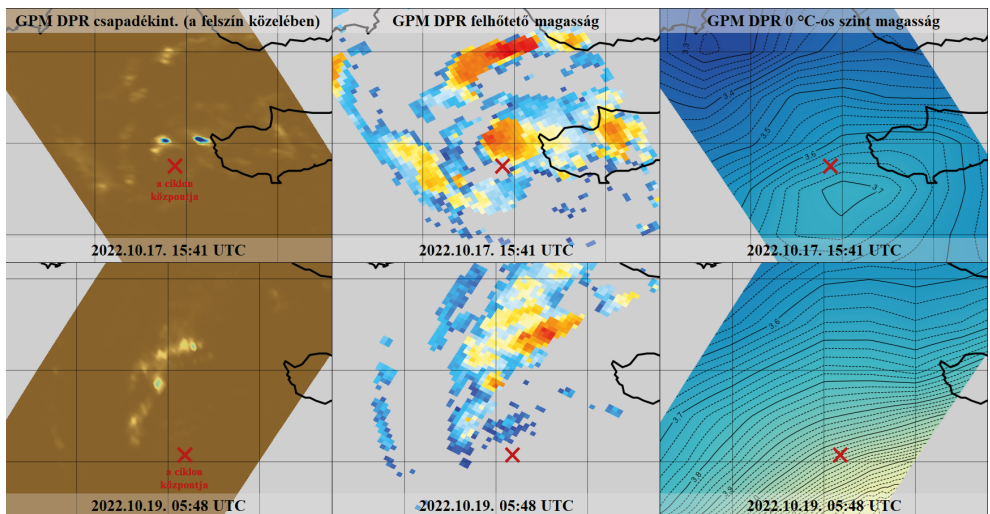
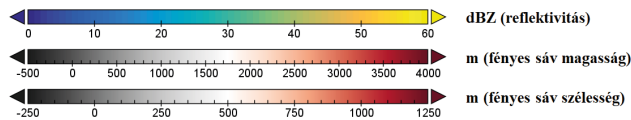
2. ábra. A Ciprián ciklon fejlődése különböző frekvenciájú fényességi hőmérséklet méréseken a jelzett időpontokban, az X-ek jelölik a ciklonközpontot (Berg, 2022a, 2022b). Források: EUMETSAT / Kachelmannetter; illetve Turkish State Meteorological Service.

AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer) szenzora, valamint a GPM (Global Precipitation Measurement) műhold GMI (GPM Microwave Imager) szenzora rendelkezik a legjobb felbontással, melyekkel már a kisebb méretű medikánok is jól analizálhatók. A 2. ábrán a Ciprian ciklon fejlődése követhető végig az elérhető mérési időpontokban, a jelölt szenzorok vertikális és horizontális polarizáltságú méréseit kombinálva. A már említett 15-ei és 16-ai kiterjedt zivatarrendszerek vezető éle mentén a ~89 GHz-es frekvencián egy hosszan elnyúló, a környezeténél jóval hidegebb terület volt látható, mely nagy jégtartalmú, intenzív zivatarfelhőkre utalt. A ~37 GHz-es frekvencián kiterjedtebb melegebb területek viszont inkább a zivartartömbök nyugati, északnyugati oldalán voltak detektálhatóak, melyek a rendszerek kevésbé aktív, de még így is jelentősebb csapadékot produkáló hátoldali, sztratiform jellegű területét jelezték. 15-én a mérés idején a ciklon még nem rendelkezett jól behatárolható középponttal, de főként az alacsonyabb frekvenciákon már látható volt a spirálisan csavarodó struktúra. Ennek központja Krétától kissé keletre volt, ahol néhány órával később már a hagyományos infravörös és látható tartományú műholdképeken, valamint a törökországi Mugla radarmérésein is megjelent a centrum. 16-ától a ~89 GHz-es frekvencián a magas fényességi hőmérséklet értékekkel megmutatkozó alacsony szintű felhőmező alapján már jól beazonosítható volt a ciklonközpont. 17-én az első mérés éppen abban az időpontban történt, amikor ennek közvetlen közelében erőteljes konvekció indult meg, míg a második már akkor, amikor a zivatarok elkezdtek gyengülni. A két időpont között azonban egyértelmű különbség mutatkozott a struktúrában, ugyanis a második időpontra sokkal szimmetrikusabb elrendeződésű felhő- és csapadékkarok alakultak ki, közvetlenül a ciklonközpont körül pedig főleg a ~37 GHz-es mérésen egy kezdetleges, nem zárt szemszerű képződmény is létrejött. 18-án a déli órákra átmenetileg teljesen megszűnt a mélykonvekció a ciklon környezetében, ezért akkor mind a ~89 GHz-es, mind a ~37 GHz-es frekvenciákon csak az alacsony szintű felhőörvény lehetett megfigyelni, míg a ~19 GHz-es frekvencián a többi időponttal összehasonlítva jóval gyengébb jel mutatkozott, mely arra utalt, hogy ebben az időszakban kevesebb alacsony szintű felhő- és esőcseppel tartalmazott a légörvény, vagyis jóval gyengébb csapadékot produkált. 19-én viszont a ciklonközponttól északra, északkeletre kialakuló intenzív zivatarok határozottan megjelentek mindhárom frekvencián.

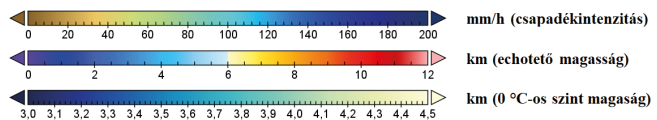
A GPM műhold rendelkezik a már említett DPR szenzorral is, mely 3-dimenziós információkat nyújt a csapadékelemekről. Ennek pásztája kétszer is érintette a ciklont, először október 17-én délután, majd 19-én reggel. A 3. ábra a felszín közeli reflektivitás méréseket és a fényes sávhoz kapcsolódó adatokat, míg a 4. ábra a felszín közeli csapadékintenzitást, a legmagasabb detektált radarjel szintét (echotető) és a 0 °C-os szint magasságát mutatja. A fényes sáv a vertikális radarmérésekben megjelenő, vertikálisan keskeny, de horizontálisan gyakran hosszan elnyúló, a környezeténél magasabb reflektivitással jellemezhető terület. Ez rendszerint a 0 °C-os szint közelében mutatható ki, ahol a felhőzet magasabb részéből aláhulló hópelyhek megolvadnak, összetapadnak, és ez által nagyobb mértékben verik vissza a radar felől érkező jelet. A fényes sáv leginkább réteges vagy már átalakuló (sztratiform) konvektív felhőzetben jelenik meg, ahol a jelenséget kiváltó szilárd- és folyékony csapadékelemek közötti olvadási határ egyenletesebb, mivel az erős konvekcióval járó heves fel- és leáramlások ezt vertikálisan kis területen belül is jelentősen eltolhatják (Geresdi, 2004). Megjegyzendő, hogy a felszín közeli reflektivitási értékek mindkét esetben jól egyeztek a török radarmérésekkel, mely igazolta a műholdas mérés nagy pontosságát. 17-én 4 spirális csapadéksávot lehetett azonosítani a ciklonban, melyek erősen felcsavarodtak a centrum körül, egy nyitott szemszerű képződményt létrehozva. A legintenzívebb csapadékgócok az „A” jelű sávban voltak 50–60 dBz közötti reflektivitással, emellett még északabbra, a „C” jelű sávban fordult elő egy erősebb, 50 dBz körüli cella, melyeket kék körök jelölnek. A Blitzortung villámlokalizációs hálózata [2] az „A” sáv nyugatabbi cellájában a műholdas mérést megelőzően 30–40 perccel, míg a keletebbiben a mérés ideje körül detektált néhány villámot, az északabbra lévő harmadik gócban pedig ekkor és a megelőző órában is aktívabb zivatarvekenység zajlott. Hasonló – a középpont körül ritkább, távolabbra gyakoribb – villámoszlást már más medikánok esetén is dokumentáltak (Dafis et al., 2018; Lagouvardos et al., 2022; D’Adderio et al., 2022), mely nagy hasonlóságot mutat a trópusi ciklonokkal, és összefüggésbe hozható a ciklonok meleg magjával, aminek következtében a központ környékén inkább a fagyhatár alatt keletkező és gyorsan ki is hulló, úgynevezett meleg eső dominál. Jelen esetben a ciklon csak gyenge meleg maggal rendelkezett, ami egyrészt a 0 °C-os szint, másrészt az ezzel összefüggésbe hozható fényes sáv környezetéhez képest némileg nagyobb magasságában mutatkozott meg. Ezzel összefüggésben a már említett három intenzívebb cellában (kék jelölés) nem, vagy



3. ábra. A DPR szenzor mérései a jelzett időpontokban – a fényes sávnál a fekete alapon szürke területek jelzik azokat a térségeket, ahol a műhold ugyan detektált reflektív-tási jelet legalább egy magasságban, de ott a fényes sáv nem volt meghatározható (Iguchi and Meneghini, 2021).



4. ábra: A DPR szenzor csapadékkintenzitás, radarecho-magasság és 0 °C-os szint magasság (a vertikális profil modul (angol rövidítéssel VER) felhasználásával számítva) mérései a jelzett időpontokban (Iguchi and Meneghini, 2021).



csak alig tudta detektálni a műhold a fényes sávot. Hasonlóképp nem jelent meg a fényes sáv a „C” jelű csapadékkar délebbi részén sem, mely a török radarmérések alapján egy éppen fejlődőben lévő konvektív vonal volt. Fontos még megemlíteni, hogy a pásztázási sáv szélein már csökken a fényes sáv detektálhatósága, így ezeken a területeken mindkét időpontban jóval ritkábbak, illetve pontatlanabbak (nagyobb szórásúak) a mérések. A villámeloszlás magyarázható továbbá

az ehotető-magassággal is, ugyanis a mérések alapján az északabbi góccok magasabb tetővel rendelkeztek a ciklonközponthoz közelihez képest, ráadásul előbbieknél a 0 °C szintje is alacsonyabban volt, tehát a felhő nagyobb része lógott bele a negatív hőmérsékletű tartományba. Csapadékkintenzitás szempontjából kiemelkedett az „A” sáv két cellája 200 mm/h feletti csúcsintenzitással, melyek meleg eső jellegét a következő szakaszban bemutatandó vertikális radarmetszetek

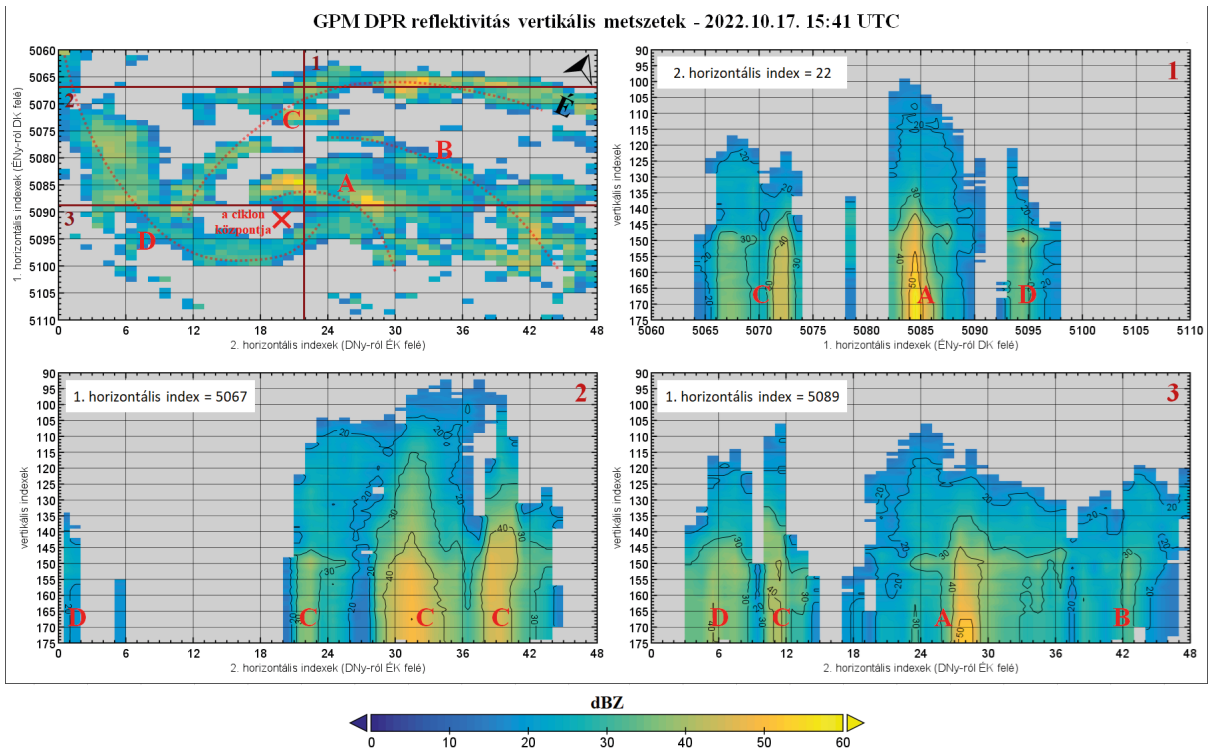
is igazolnak. A többi területen azonban meglehetősen gyengének bizonyult a csapadékhullás, még a harmadik jelölt, nagyobb reflektivitású gócban is csak 40–50 mm/h körül alakult a maximális intenzitás.

A 19-ei csapadékeloszlást már nagy mértékben befolyásolta az erős délnyugati irányú magassági szél (és szélnyírás). Az aznapi tartósabb, intenzív konvekció a szélnyírásvektor irányultságának megfelelően a központtól észak-északkeletre zajlott, mely jellegzetes a hasonló környezetben kialakuló trópusi ciklonoknál, illetve medikánok esetében is kimutattak hasonló elrendeződést (Dafis et al., 2020). A műhold áthaladásának idején a konvektív klaszter még fejlődőben volt, két erősebb, egymással kis mértékben összekapcsolódó („B” és „C”), illetve két gyengébb („A” és „D”) csapadéksávval. Ekkor két, szintén két körrel jelölt intenzív góc volt azonosítható, az egyik a „C” jelű sáv keleti, míg a másik a „B” jelű középső részén. Zivatarvekenységet csak az előbbi produkált, a mérés idején váltakozó intenzitással már kissé több, mint 2,5 órája, amint a szélnyírásvektorral átellenesen fejlődve, közel ugyanazon pont felett rendre újabb és újabb cellák pattantak ki a korábbiak legyengülésével. A különbség oka itt is a hőmérsékleti rétegződésre és a két góc eltérő vertikális fejlettségére vezethető vissza: a dinamikusabb légköri környezetben immár markáns ÉNy-DK irányú gradiens mutatkozott a 0 °C-os szint magasságában, utóbbi irányba növekvő értékekkel, és ennek megfelelően a fényes sáv magasságában is megfigyelhető volt egy fokozatos északról délre történő növekedés, továbbá az északabbi, kissé hidegebb környezetben elhelyezkedő cella némileg magasabb echotetővel rendelkezett. A villámtevékenység rövidesen az északabbi cellában is megszűnt, majd egy körülbelül 1,5 órás szünetet követően késő délelőttől intenzívebb és elektromosan aktívabb zivatarok keletkeztek, melyek estig fennmaradtak. A fényes sávot az erős konvektív gócokban ezúttal sem detektálta a szenzor, illetve a délebbre eső csapadéggócokban szintén nem volt ez érzékelhető, köszönhetően annak, hogy ott jóval sekélyebb konvekció fordult elő, melyet az echotető mérés is megerősített. A csapadékintenzitás a „B” és „C” sávok sekélyebb celláiban több helyen elérte a 30–50 mm/h értéket, a két legerősebb gócban viszont ezúttal csak 80–90 mm/h körül alakult.

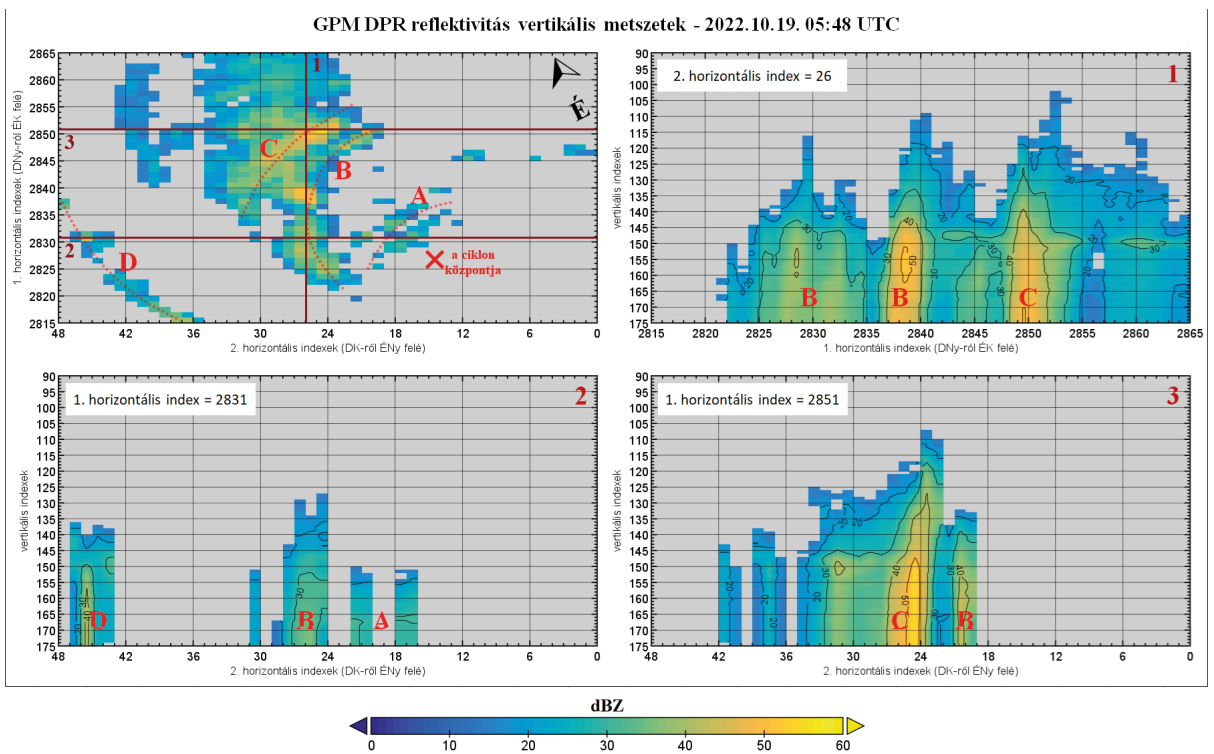
A DPR szenzor 17-ei reflektivitás méréseiből készített vertikális metszetek az 5. ábrán, míg a 19-eiből készítették a 6. ábrán láthatók. A bal felső negyedben mindkét esetben a műhold haladásával párhuzamos (1. horizontális indexek) és arra merőleges (2. horizontális indexek) irányok által előállított horizontális

alapréteg található a felszín közeli reflektivitási mezőt ábrázolva, melyen szerepelnek a vertikális metszetek helyei és sorszámai, a korábban meghatározott csapadéksávok, valamint a földrajzi északi irány is, mivel a műhold haladási iránya nem esett egybe a fő égtájakkal. Ahogy a bevezetőben már említettük, a vertikális indexeknél egy lépésköz 125 m-es távolságnak felel meg – értelemszerűen mivel a műhold felülről mér, ezért az indexelés is onnan kezdődik, de egy egyszerű kivonással majd szorzással könnyedén meghatározható az egyes objektumok magassága –, míg a horizontális indexek közötti távolság 5 km-nek felel meg.

17-én az 1-es metszet hozzávetőlegesen ÉNy-DK irányban haladva a „C” csapadéksáv két közepesen erős celláját, az „A” sáv legintenzívebb (nyugatabbi) celláját és a „D” sáv szélét, a 2-es hozzávetőlegesen DNy-ÉK irányban haladva döntően a „C” sávot, míg a 3-as ugyanilyen irányultsággal a „D” és „C” sávok találkozásához közeli területet, az „A” sáv másik (keletbibi) erős celláját és a „B” sávot érintette. Főként az 1-es és 2-es metszeteken még jól analizálható volt az egyes csapadékelemek elkülönülő, cellás jellege, a 3-on viszont az „A” és „B” sávok már kiterjedtebb, sztratiform jellegűek voltak, az „A” sávban a beágyazott erős góccal. A fényes sáv mentén fellépő reflektivitás-növekedés a 145-150 körüli vertikális indexeknél elsősorban ebben az összefüggőbb csapadékmezőben volt detektálható, de az 1-es és 3-as metszeteken is megjelent az „A” sáv erős celláinak peremén, továbbá az 1-es metszeten a „D” sávban, illetve kisebb mértékben a 2-es metszeten a „C” sáv gyengébb celláiban is. A korábban azonosított három legintenzívebb gócban – az 1-es és a 3-as metszeteken az „A” sávban, valamint a 2-es metszeten a „C”-hez tartozó középső cellában – azonban valóban nem mutatkozott meg a fényes sáv. A már említetteknek megfelelően az „A” sávhoz tartozó két intenzív cellában az alsóbb, nagyobbrészt pozitív hőmérsékletű rétegekre korlátozódott az erős, 40-50 dBz feletti reflektivitás, és a 30 dBz feletti terület is alig nyúlt e fölé, éppen elérte a 135-ös vertikális indexet, vagyis az 5 km-t. Ezzel szemben a „C” csapadéksáv legerősebb cellájában jóval magasabbra, a 115-ös vertikális indexig, vagyis 7,5 km-ig nyúlt fel a 30 dBz-s reflektivitás, vagyis itt sokkal több csapadékelem volt a magasabb, fagypon alatti hőmérsékletű légrétegben, ami az érintett cellák közötti magasságbeli különbséggel együtt már egyértelműen magyarázza a villámaktivitásban tapasztalt eltéréseket. Érdemes még megjegyezni, hogy az egyes konvektív gócok ebben az esetben viszonylag egyenes tengellyel rendelkeztek, ami az akkori modellfutásokkal és analízissel egybevágóan gyenge szélnyírás jelenlétére utalt.



5. ábra. A DPR szenzor által mért reflektivitás vertikális metszetei a Ciprián ciklonról október 17-én (Iguchi and Meneghini, 2021).

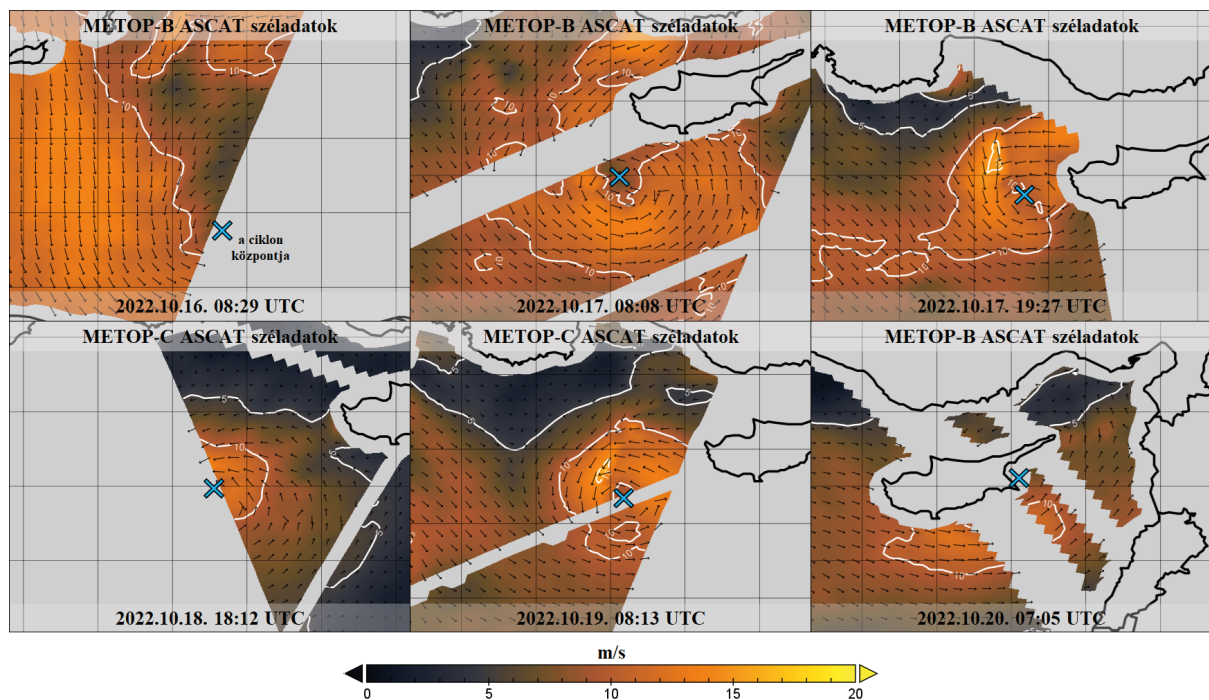


6. ábra. A DPR szenzor által mért reflektivitás vertikális metszetei a Ciprián ciklonról október 19-én (Iguchi and Meneghini, 2021).

19-én az 1-es metszet hozzávetőlegesen DNy-ÉK irányban (az alaprétegen letről fölfelé) haladva a „B” és „C” sávokat, a 2-es metszet hozzávetőlegesen DK-ÉNy irányban (az alaprétegen jobbról balra) haladva az „A”, „B” és „D” csapadéksávok gyengébb részeit, míg a 3-as metszet ugyanilyen irányultsággal a „B” sáv szélét és a „C” legerősebb részét érintette. A különálló, cellás jelleg itt is jól látható, kivéve a „B” sáv délebbi részét az 1-es metszeten, ahol egy összefüggőbb, de alacsony magasságú és csupán 30-40 dBz-s maximális reflektivitást produkáló zóna helyezkedett el. Ezen a metszeten analizálható legjobban a fényes sáv is, elsősorban a „C” sávtól északkeletre lévő gyenge, sztratiform csapadékmezőben egy 30 dBz feletti zónaként a 150-es vertikális index környékén, de hasonló reflektivitással megjelenik a „C” és „B” csapadéksávok között is, ott már kissé magasabban, megközelítve a 145-ös vertikális indexet. A reflektivitás vertikális eloszlásában hasonló különbség látható a „C” és a „B” sáv legerősebb cellái között, mint az előzőleg leírt esetben. A „C”-hez kapcsolódó intenzívebb, zivatarvekenységgel is kísért gócban jóval magasabbra nyúlt a nagyobb reflektivitású terület, a 3-as metszeten még a 40 dBz-s terület teteje is elérte a 127-es vertikális indexet, vagyis a 6 km-t, a 30 dBz-s pedig a 118-as indexet, azaz a körülbelül

7,1 km-es magasságot. Ezzel szemben az „B”-hez tartozó cellában az 1-es metszeten a 40 dBz-s reflektivitás a nagyjából a fényes sáv szintjéig ért, és a 30 dBz-s terület is alig haladta meg ezt. Az ekkor már erős, dél-nyugatias irányú szélnyírás hatására az erősebb cellák a magassággal láthatóan egyre jobban északkeleties irányba – az 1-es és a 3-as metszeten jobbra – dőltek, a 2-es metszeten megjelenő sekély, záporos góccokra azonban nem volt érdemi hatással a nyírás.

Az aktív mikrohullámú mérések közül a szélmerések emelendők még ki. A 7. ábrán a MetOp-B és MetOp-C műholdakon lévő ASCAT szenzorok adatai láthatóak, melyekkel jól végig követhető volt a ciklon átalakulási folyamata. Ezek előnye, hogy a (tengerfelszíni) szélirány és a szélsébség is származtatható a mérésekből. A medikánokhoz hasonló kis méretű ciklonok esetén, illetve nagyobb szélsébségeknél a szenzor azonban már némileg alulbecsli a szélsébséget, ezért az intenzitás becsléséhez általában további adatokat is fel szoktak használni. Ennek egyik lehetséges módja a SMAP műhold, mely pontosabban képes detektálni a szélsébséget, hátránya viszont, hogy szélirány meghatározására nem alkalmas. 16-án még egyértelműen a mérsékelt övi ciklonokra jellemző, aszimmetrikus szélsémező rajzolódott ki, a ciklon hátoldalán, a központtól nyugatra nagy területen élénk északias széllel,



7. ábra. Az ASCAT szenzorok széladatai a Ciprián ciklonhoz kapcsolódóan október 16-ától 20-áig (EUMETSAT/OSI SAF, 2013, 2019).

míg a központtól északra egy hosszán elnyúló, gyengén szeles, konvergencia zóna mutatkozott. 17-én reggel azonban a ciklon már átmenetet képzett a szubtrópusi és a trópusi stádium között. Ekkorra a szélmező jóval szimmetrikusabb lett, az erősebb – jelen esetben 10 m/s feletti – szelek zónája már szinte teljesen körbe zárta a központot, ám még viszonylag kiterjedt maradt körülötte. Az átalakulás 17-én napközben zárult le, így az esti, továbbá a 18-ai és a 19-ei méréseknél már kompakt, teljesen szimmetrikus szélmezővel rendelkezett a ciklon, ahol a legnagyobb szél a kevésbé szeles ciklonközponthoz közelében fordult elő, és a 10 m/s feletti terület jóval kisebb kiterjedésűvé vált. 20-án reggelre viszont részben Ciprus szigetének elérése miatt, részben a ciklon általános gyengülése révén már újra aszimmetrikusabb lett a szélmező, a maximumok a déli oldalra korlátozódtak, és az örvény egy DNY-ÉK irányú tengely mentén elnyúltá vált. Mivel a ciklon mindvégig gyenge volt, így az ASCAT szenzorok által mért maximális szélességekben nem mutatkozott jelentős eltérés az egyes mérések között. Általában 13–14 m/s körül alakultak ezen értékek – 18-án a mérés már nem érintette a ciklon feltehetőleg erősebb nyugati felét –, de 17-én este a 15,4 m/s-ot, míg 19-én délelőtt a 15,9 m/s-ot is elérte a szélerősség a ciklon északnyugati térségében. Tekintve, hogy előbbi mérés már a konvekció gyengülése után, utóbbi pedig az intenzív zivatarok kipattanása előtt történt, illetve a korábban említettek alapján kis méretű ciklonoknál ismert a műszer alámérése, 17-én és 19-én délután a szélesség feltehetőleg elérte vagy kevéssel meghaladta a Saffir-Simpson szélskála trópusi vihar kategóriájának megfelelő 18 m/s-os határértéket. Ezt alátámaszthatja, hogy az SMAP műhold mindvégig kissé erősebb szelet detektált, 18-án reggel és este is 16,7 m/s volt a maximális érték a ciklonhoz kapcsolódóan, holott az akkor szinte egyáltalán nem produkált érdemi konvekciót.

Összefoglalás

Írásunkban a 2022 októberében kialakult Ciprián ciklonhoz kapcsolódóan mutattuk be a mikrohullámú műholdas mérések felhasználásának lehetőségeit medikánok esetében. Tekintve, hogy ezek a légörvények kisebb méretűek és gyengébbek a trópusi ciklonokhoz, hurrikánokhoz képest, ezért a legjobb felbontású szenzorok adatait használtuk fel. Az úgynevezett leképező szenzorok által alkalmazott mérési frekvenciák segítségével meghatározható a ciklonok strukturális felépítése, mind horizontálisan, mind vertikálisan. Mivel a példaként választott ciklon viszonylag

gyenge volt, ezért itt határozott szem nem jelent meg, azonban a kezdeti időszakban jól analizálhatóak voltak a legintenzívebb konvektív csapadékgócok, később pedig a ciklon központja körüli, szimmetrikus megjelenésű alacsonyszintű felhőzet, illetve időszakosan a környező spirális felhő- és csapadékkarok. A nagy felbontású, 3-dimenziós méréseket lehetővé tevő DPR szenzor két alkalommal is érintette a ciklon központi részét, ez által a legfejlettebb és egy későbbi gyengébb állapotában is meghatározható volt a hozzá kapcsolódó csapadék intenzitása és kiterjedése, illetve néhány ahhoz kapcsolódó egyéb paraméter. A trópusi jelleg ezekben az adatokban is megmutatkozott, így például a központ közelében magasabban helyezkedett el a fényes sáv és az ezzel összefüggő 0 °C-os izoterma, a ciklon ezen részén az alacsonyabb szintekre korlátozódnak, intenzívebb csapadék (meleg eső) volt jellemző, valamint a ciklon centrumában lévő erősebb konvektív gócok gyengébb villámaktivitást produkáltak, mint a külső csapadéksávokban lévők. Végezetül az ASCAT és SMAP szenzorok méréseiből származtatható széladatokat mutattuk be, melyek megerősítették, hogy bár a ciklon meglehetősen kis kiterjedésű volt, a kevésbé szeles centrum körül szimmetrikus szélmezővel rendelkezett.

Irodalomjegyzék

- Berg, W., 2022a: GPM AMSR-2 on GCOM-W1 Common Calibrated Brightness Temperature L1C 1.5 hours 10 km V07, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [2022-10-22], <https://doi.org/10.5067/GPM/AMSR2/GCOMW1/1C/07>
- Berg, W., 2022b: GPM GMI Common Calibrated Brightness Temperatures Collocated L1C 1.5 hours 13 km V07, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [2022-10-22], <https://doi.org/10.5067/GPM/GMI/GPM/1C/07>
- Cavicchia, L., von Storch, H. and Gualdi, S., 2014: A long-term climatology of medicanes, *Climate Dynam.* 43, 1183–1195. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1893-7>
- Dafis, S., Rysman, J-F., Claud, C. and Flaouanas, E., 2018: Remote sensing of deep convection within a tropical-like cyclone over the Mediterranean Sea. *Atmos. Sci. Lett.* 19(6): e823 1–7. <https://doi.org/10.1002/asl.823>
- Dafis, S., Claud, C., Kotroni, V., Lagouvardos, K. and Rysman, J-F., 2020: Insights into the convective evolution of Mediterranean tropical-like cyclones, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146(733): 4147–4169. <https://doi.org/10.1002/qj.3896>

- D'Adderio, L. P., Casella, D., Dietrich, S., Sano, P. and Panegrossi, G., 2022: GPM-CO observations of Medicane Ianos: Comparative analysis of precipitation structure between development and mature phase. *Atmos. Res.* 273, 106174. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106174>
- EUMETSAT/OSI SAF, 2013: MetOp-B ASCAT Level 2 Ocean Surface Wind Vectors Optimized for Coastal Ocean. Ver. Operational/Near-Real-Time. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed [2022-10-20]
- EUMETSAT/OSI SAF, 2019: MetOp-C ASCAT Level 2 Ocean Surface Wind Vectors Optimized for Coastal Ocean. Ver. Operational/Near-Real-Time. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed 2022-10-20]
- Fita, L. and Flaounas, E., 2018: Medicanes as subtropical cyclones: the December 2005 case from the perspective of surface pressure tendency diagnostics and atmospheric water budget, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 144(713): 1028–1044. <https://doi.org/10.1002/qj.3273>
- Flaounas, E., Gray, S.L. and Teubler, F., 2021: A process-based anatomy of Mediterranean Cyclones: from baroclinic lows to tropical-like systems. *Weather Climate Dynam* 2(1): 255–279. <https://doi.org/10.5194/wcd-2-255-2021>
- Fontan, A.-C., Dupont, T. and Langlade, S., 2019: Satellite technology - Applications to tropical cyclones, 9th training course about tropical cyclones, WMO / Météo-France, elérhető online: https://severeweather.wmo.int/TCFW/RAI_Training2019/07_Specific_satellite_data_for_TCs.pdf
- Geresdi, I., 2004: Felhőfizika, Dialóg Campus Kiadó, Budapest-Pécs.
- González-Alemán, J.J., Pascale, S., Gutierrez-Fernandez, J., Murakami, H., Gaertner, M.A. and Vecchi, G.A., 2019: Potential Increase in Hazard From Mediterranean Hurricane Activity With Global Warming. *Geophys. Res. Lett.* 46(3): 1754–1764. <https://doi.org/10.1029/2018GL081253>
- González-Alemán J.J., Valero, F., Martín-León, F. and Evans, J.L., 2015: Classification and Synoptic Analysis of Subtropical Cyclones within Northeastern Atlantic Ocean. *J. Climate* 28(8): 3331–3352. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00276.1>
- Iguchi, T. and Meneghini, R., 2021: GPM DPR Precipitation Profile L2A 1.5 hours 5 km V07, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Accessed: [2022-10-18], <https://doi.org/10.5067/GPM/DPR/GPM/2A/07>
- Lagouvardos, K., Karagiannidis, A., Dafis, S., Kalimeris, A. and Kotroni, V., 2022: Ianos - A hurricane in the Mediterranean. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 103(6), 1621–1636. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0274.1>
- Marra, A. C., Federico, S., Montopoli, M., Avolio, E., Baldini, L., Casella, D., D'Adderio, L. P., Dietrich, S., Sanò, P., Torcasio, R. C. and Panegrossi, G., 2019: The Precipitation Structure of the Mediterranean Tropical-Like Cyclone Numa: Analysis of GPM Observations and Numerical Weather Prediction Model Simulations. *Remote Sens.* 11(14), 1690. <https://doi.org/10.3390/rs11141690>
- Miglietta, M.M. and Rotunno, R., 2019: Development Mechanisms for Mediterranean tropical-like cyclones (Medicanes), *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 145(721), 1444–1460. <https://doi.org/10.1002/qj.3503>
- Panegrossi, G., D'Adderio, L. P., Dafis, S., Rysman, J.-F., Casella, D., Dietrich, S. and Sanò, P., 2023: Warm core and deep convection in medicanes: A passive microwave-based investigation, *Rem. Sensing*, 15 (11): 2838. <https://doi.org/10.3390/rs15112838>
- Qian, B., Jiang, H., Weng, F. and Wu, Y., 2020: Climatology of Passive Microwave Brightness Temperatures in Tropical Cyclones and their Relations to Storm Intensities as Seen by FY-3B/MWRI. *Remote Sens.* 12(1), 147. <https://doi.org/10.3390/rs12010147>
- Shapiro, M. A. and Keyser, D., 1990: Fronts, Jet Streams and the Tropopause, American Meteorological Society Extratropical Cyclones, The Erik Palmén Memorial, 167–191. https://doi.org/10.1007/978-1-944970-33-8_10
- Tang, B. H., Fang, J., Bentley, A., Kilroy, G., Nakano, M., Park, M.-S., Rajasree, V.P.M., Wang, Z., Wing, A. A. and Wu, L., 2020: Recent advances in research on tropical cyclogenesis. *Tropic. Cycl. Res. Rev.* 9(2), 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.tcr.2020.04.004>
- Zekkos, D., Zalachoris, G., Alvertos, A. E., Amatya, P. M., Blunts, P., Clark, M., Dafis, S., Farmakis, I., Ganas, A., Hille, M., Kalimogiannis, V., Karagiannidis, A., Karantanellis, E., Khan, K., Kirshbaum, D., Kourkoulis, R., Kotroni, V., Ktenidou, O.-J., Lagouvardos, K., Loli, M., Makrinikas, A., Marinos, V., Manousakis, J., Nikas, K., Panousis, D., Papathanassiou, G., Saroglou, C., Simopoulos, A., Stanley, T., Tsavalas, A. and Valkaniotis, S., 2020: The September 18-20 2020 Medicane Ianos Impact on Greece - Phase I Reconnaissance Report, Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Report, GEER-068 <https://doi.org/10.18118/G6MT1T>

Internetes hivatkozások

- [1] <http://tropic.ssec.wisc.edu/real-time/atms/archive/2020/202090M.html>
- [2] https://www.blitzortung.org/hu/historical_maps.php?map=14