

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Felhőtető mikrofizikai tulajdonságainak vizsgálata a Himawari műhold adataival

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Domonkos Gréta

Meteorológus mesterszak
Előrejelző szakirány

Témavezető:

dr. Putsay Mária

Országos Meteorológiai Szolgálat

Belső konzulens:

dr. Pieczka Ildikó

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2017

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	2
2.	A felhőtető mikrofizika jelentősége	3
3.	Adatok és módszertan	4
3.1	Adatok	4
3.2	RGB kompozit műholdkép	5
3.3	A feldolgozáshoz használt szoftver	6
4.	Elméleti alapok – Sugárzásátvitel a rövidhullámú tartományban	6
4.1	Sugárzási alapfogalmak	7
4.2	A sugárzásátviteli egyenlet a napsugárzás tartományában	8
4.3	A méretparamétertől való függés	11
5.	A látható és közeli infravörös csatornák jellemzői	18
5.1	0,4-1 μ m-es tartományba eső csatornák jellemzői	18
5.2	Az 1,6 μ m-es csatorna jellemzői	22
5.3	Elnyelő és nem elnyelő csatornák eltérő tulajdonságai, együttes használatuk ...	26
5.4	A 2,25 μ m-es csatorna tulajdonságai	30
5.5	A rövidhullámú csatornák együttes felhasználása a 2,25 μ m-es csatorna bevonásával	35
6.	Eredmények	40
6.1	Felhőfázis RGB kompozit kép	41
6.1.1	A Felhőfázis RGB kompozit kép hangolása	42
6.1.2	A Felhőfázis RGB kompozit kép tipikus színei	50
6.1.3	A mért reflektivitás értékek eloszlásának vizsgálata szórásdiagramok segítségével	59
6.2	Az eredmények összegzése, konklúziók	65
7.	Összefoglalás	66
8.	Irodalmi hivatkozás	67
9.	Köszönetnyilvánítás	69

1. Bevezetés

A meteorológiai műholdak a földfelszín és a felhő irányából érkező sugárzást mérik. A mérésekből a légkör, a felhők és a felszín számos fizikai tulajdonságára lehet következtetni. A dolgozat célja a felhők jellemzése műholdadatok alapján, a felhőtető mikrofizikájának vizsgálata.

Az európai geostacionárius (a föld felszínéhez képest álló) műholdakat néhány év múlva egy fejlettebb műholdcsalád váltja fel: a Harmadik Generációs Meteorosat műholdak családja (MTG – Meteorosat Third Generation). Az MTG műholdakon a jelenleginél fejlettebb leképező berendezés (FCI – Flexible Combined Imager – Rugalmas Kombinált Leképező) fog működni. Az új műszer a jelenleginél több csatornában fog mérni. A diplomamunka a 2,25 μm tartományban mérő új csatorna tulajdonságaival, fizikai jellemzőivel foglalkozik. Az MTG műholdakat még nem bocsátották fel, viszont az új geostacionárius japán Himawari műholdak leképező rendszerei, a Fejlett Himawari Leképező műszerek (AHI – Advanced Himawari Imager) már mérnek ebben a csatornában. Így a Himawari AHI mérésekkel tesztelni tudjuk az új csatorna tulajdonságait, mely a felhőtető mikrofizikai tulajdonságainak pontosabb elemzését teszi lehetővé.

A dolgozat arra koncentrál, hogy a felhőtető mikrofizikai tulajdonságait hogyan lehet meghatározni műholdadatokból. Ennek alapját, lényegét vizsgálja, ismerteti. Nem a zivataron belüli folyamatokról szól, hanem arról, hogy milyen információ nyerhető a műhold adatok segítségével.

A felhőtető mikrofizikai paraméterek (halmazállapot és átlagos részecskeméret) számításának elvi alapjait mutatjuk be. A dolgozat keretében minőségi – nem mennyiségi – vizsgálatokat végeztünk. Olyan megjelenítési eljárást ismertetünk, aminek segítségével az időjárás előrejelző, illetve esettanulmány készítő szakember vizuális, minőségi információt kaphat a felhőtető mikrofizikai jellemzőiről.

A dolgozatban ismertetjük:

- az elvi alapokat,
- mely csatornák hasznosak az adott célra,
- az új csatorna információ-tartalma mennyiben más, mint a már korábban is rendelkezésünkre álló 1,6 μm -es mikrofizikai csatorna információtartalma,
- hogyan érdemes kombinálni őket,

- milyen kompozit képet lehet majd az új csatorna felhasználásával előállítani.

A diplomamunka keretében vizsgáltuk az új csatorna tulajdonságait. Ismertetünk egy erre a célra az EUMETSAT-ban fejlesztés alatt álló, új, kísérleti kompozit képet. Elvégeztük az új kompozit kép hangolását, összegyűjtöttük a tipikus színeket és a fentiek alátámasztására példákat gyűjtöttünk.

Vizsgálatunkhoz a McIDAS-V műholdkép megjelenítő és feldolgozó programcsomagot használtuk.

2. A felhőtető mikrofizika jelentősége

A felhők mikrofizikai paramétereiből (a felhőelemek anyaga, formája, méret szerinti eloszlása), illetve ezek vertikális eloszlásából megismerhetjük egy felhő szerkezetét, valamint számos jellemzőt származtathatunk, mint pl. a légszlopban lévő folyékony víz- vagy jégtartalom. E kapcsolatot több tanulmány is feltárta (*Austin et al., 2001*). A csapadékképződési folyamatok megismerésében is fontos szerepe van a mikrofizikai paramétereknek. Egy felhő csapadékképzése a cseppméret eloszlás növekedésének mértékén is múlik (*Rosenfeld et al., 2007*).

A dolgozatban azt vizsgáljuk, hogy a műholdak által a napsugárzási tartományban mért értékekből milyen mikrofizikai paraméterek származtathatók. A műhold a napsugárzás tartományában a felszín, felhő, légkör által szórt sugárzást méri. A felhő tetejéről visszavert napsugárzás mértéke függ (többek között) a mérési spektrumtartománytól, valamint a felhőtető mikrofizikai tulajdonságaitól is: a felhő tetején lévő felhőelemek halmazállapotától, méretétől, alakjától. A hullámhossztartománytól függ az is, hogy a felhő tetejének milyen vastag rétege határozza meg a visszaverődési tulajdonságokat (*Roebeling et al., 2008*).

A felhőtető mikrofizikai tulajdonságainak ismerete hasznos:

- az aeroszolok és felhők kölcsönhatásának vizsgálatában,
- a zivataron belüli folyamatok megismerésében,
- a csapadékbecslésben,
- a zivatar intenzitásának előrejelzésében (egyres felhőtető jelenségek felismerése révén, pl. közepes földrajzi szélességeken a kisméretű jégkristályok feláramlási csatornában való megjelenése intenzív feláramlást valószínűsít).

A dolgozatban a felhőtetőt alkotó részecskék halmazállapota alapján nevezünk egy felhőt vízfelhőnek vagy jégfelhőnek.

Felmerülhet a kérdés, hogy a felhő tetejének a halmazállapotát miért nem a felhőtető hőmérsékletéből származtatjuk. A válasz az, hogy a hőmérséklet nem határozza meg egyértelműen a halmazállapotot. A vízcseppek gyakran túlhűlnek, -40 és 0 °C között a felhőelemek halmazállapota lehet víz vagy jég is.

3. Adatok és módszertan

Vizsgálatainkhoz a Himawari műhold AHI műszerének adatait használtuk fel. A rövidhullámú csatornában (a napsugárzás tartományában) készített képeket vizsgáltuk, különös tekintettel azokra a csatornákra, amelyek a felhőtető mikrofizikáról nyújtanak információt. Szakirodalomból, mások kutatásaiból grafikonokat, következtetéseket vettünk át.

Olyan eljárásokat ismertetünk, vizsgáltunk, használtunk, amelyek vizuális információt nyújtanak a felhőtető mikrofizikáról. Egyedi sávokat és ezekből készített speciális kompozit képeket is elemeztünk, vizsgáltunk, hangoltunk.

3.1 Adatok

A Himawari 8 és 9 műholdak a japán geostacionárius műholdak újabb generációjához tartozó operatívak műholdak. Az MTG műholdak az európai geostacionárius METEOSAT műholdak harmadik generációs műholdjai lesznek. A geostacionárius műhold az Egyenlítő felett kering, oly módon, hogy az Egyenlítő egy adott pontja felett tartózkodik, ugyanis a Föld forgásával megegyező szögsebességgel mozog azonos irányban. A Himawari műholdak az Egyenlítő és a $140,7^\circ$ keleti hosszúság metszéspontja felett vannak, míg az MTG műholdak az Egyenlítő és a 0° hosszúsági fok metszéspontja felett lesznek. [1 - MTG Product Guide]

Az MTG iker műhold lesz: egy leképező (MTG-I) és egy szondázó műhold (MTG-S) párosa, melyeken eltérő műszerek fognak működni. Az MTG-I, illetve MTG-S műholdak pályára állítása 2020-ban, illetve 2022-ben várható.

Az MTG FCI, valamint a HIMAWARI AHI leképező műszerek nagyon hasonlóak. Hasonló csatornában mérnek/fognak mérni. Többek között a $2,25$ μm -es közeli infravörös csatorna új a geostacionárius műholdaknál. A diplomamunka témája annak a vizsgálata, hogy ez az új csatorna milyen többlet-információt szolgáltat. A Himawari adatokon mutatjuk be ennek a csatornának a fizikai tulajdonságait. [2 - Himawari Product Guide]

A Himawari-8 fedélzetén az AHI berendezés található, míg az MTG-I-n az FCI műszer fog működni. Mindkét műszer 16 csatornán mér (1. táblázat).

1. táblázat: Az MTG FCI és a Himawari AHI leképező berendezések csatornáinak adatai: központi hullámhosszak és területi felbontások. Az utolsó oszlop a Himawari AHI csatornáknak a dolgozatban használt jelöléseit tünteti fel, sárgával kiemelve a dolgozatban vizsgált csatornákat. (*Az Európa térségéről készíthető gyors szkennelési ciklus felbontása.) [1 - MTG Product Guide] [2 - Himawari Product Guide]

	Központi hullámhossz		Felbontás		Jelölés
	[μm]		[km]		
	MTG-FCI	Himawari-AHI	MTG-FCI	Himawari-AHI	
VIS	0,444	0,47063	1	1	VIS0.47
	0,510	0,51000	1	1	VIS0.51
	0,640	0,63914	1 (0,5*)	0,5	VIS0.64
NIR	0,865	0,85668	1	1	NIR0.86
	0,914		1		
	1,380	1,6101	1	2	NIR1.6
	1,610		1		
	2,250		1 (0,5*)		
rövidhullámú IR	3,800	3,8853	2 (1*)	2	IR3.9
WV IR	6,300	6,2429	2	2	IR6.3
	7,350	6,9410	2	2	IR6.9
		7,3467		2	IR7.3
hosszúhullámú IR	8,700	8,5926	2	2	IR8.6
	9,660	9,6372	2	2	IR9.6
	10,500	10,4073	2 (1*)	2	IR10.4
	12,300	11,2395	2	2	IR11.2
		12,3806		2	IR12.4
	13,300	13,2807	2	2	IR13.3

3.2 RGB kompozit műholdkép

A kompozit műholdképek több csatorna kombinálásából állnak elő. Az RGB a három alapszín angol nevének mozaikszava – Red Green Blue, vagyis piros zöld és kék. Az ún. RGB kompozit kép úgy készül, hogy a három „egyedi” csatornában készült képet a három alapszínben jelenítjük meg egyszerre (Putsay et al., 2016).

A „jó” kompozit kép készítésének lépései a következők:

- 1) A cél kiválasztása: milyen konkrét információt szeretnénk kiemelni a képen. A három sávot eszerint célzottan kell megválasztani.
- 2) Lényegkiemelés, kontrasztosítás: kalibrálás és annak a legszűkebb tartománynak a kiválasztása, amely a számunkra fontos információt tartalmazza. Az egyedi sávok értékeit ezekben a tartományokban húzzuk szét.
- 3) A három kiválasztott és kontrasztosított sávot a három alapszínhez rendeljük.

Egy RGB kép készítésénél fő szempont, hogy az az információ, amit látni szeretnénk, kontrasztosan jelenjen meg és jól elkülönüljön a környezetétől. A színek és csatornák párosításait elvben tetszőlegesen lehet variálni, de a WMO ajánlásai szerint a természeteshez minél közelebbi színekombináció használata javasolt. További fontos szempont az elkülönítendő objektumok közötti jó szíkontraszt.

Az RGB képek használata hozzásegíti a felhasználókat a meteorológiai képződmények gyorsabb, biztosabb vizuális felismeréséhez. Kompozit képek készítésekor az egyes csatornák struktúrái megmaradnak, valamint a tér- és időbeli folytonosság sem sérül. Az RGB kompozit kép magát a mérést jeleníti meg, nem a mérésből számított értékeket, így nem tartalmaz esetleges származtatási hibát. Az RGB kompozit képek csak vizuális, képi információt nyújtanak, programban bemenő adatként nem használhatók. [3 - *Introduction to RGBs*]

3.3 A feldolgozáshoz használt szoftver

Vizsgálatunkhoz a McIDAS – Számítógépes Interaktív Adatelérési Rendszert (Man-computer Interactive Data Access System) használtuk, melyet a Wisconsin-Madison Egyetem Űrkutatási és Mérnöki központjában (UW SSEC University of Wisconsin-Madison, Space Science and Engineering Center) fejlesztettek. A McIDAS-V programcsomag alkalmas a műholdképek megjelenítésére, feldolgozására, valamint a képek analíziséhez is számos lehetőséget nyújt. [4 – *McIDAS-V*]

4. Elméleti alapok – Sugárzásátvitel a rövidhullámú tartományban

A geostacionárius műholdak műszerei a Föld által visszavert napsugárzást és a Föld által kibocsájtott hőmérsékleti sugárzást mérik több spektrális intervallumban, csatornában. A Föld itt a felszín, légkör és felhők rendszerét jelenti.

A dolgozatban a napsugárzás tartományában végzett mérések információ-tartalmáról lesz szó. A rövidhullámú tartományban a sugárzás szóródása a meghatározó folyamat. A mérésekből a felhők optikai vastagságára, a felhőtetőn lévő részecskék halmazállapotára és az átlagos méretükre következtethetünk.

A szóródás egy fizikai folyamat. Ha egy részecske a beeső elektromágneses hullám útjába kerül, akkor kölcsönhatásba léphet vele. A fotonok egy részét elnyelheti, vagy megváltoztathatja az irányukat, azaz szórja, esetleg a részecske is bocsájt ki új

fotonokat. A légkörben a szóródást okozó részecskék lehetnek gázmolekulák, aeroszolok, felhőelemek, esőcseppek, vagy jégzemcsék. A szóródás mértéke erősen függ a részecske méretétől és a beeső sugárzás hullámhosszától (Menzel et al., 2006).

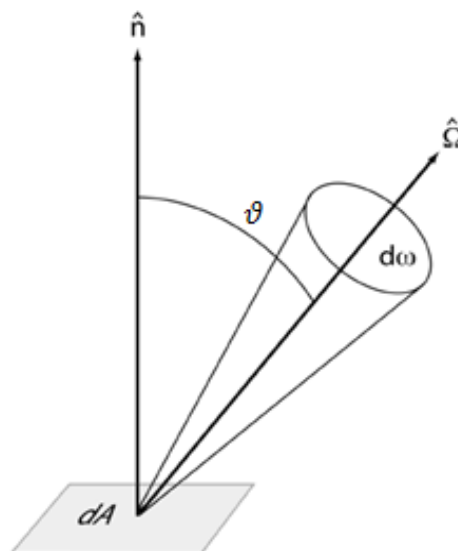
4.1 Sugárzási alapfogalmak

Az elektromágneses sugárzás $3 \cdot 10^{10}$ cm/s sebességű. Szinuszos függvénnyel lehet leírni, fő paraméterei a hullámhossz, valamint az intenzitás. Monokromatikus sugárzásról beszélünk, ha csak egy bizonyos frekvenciával rendelkező hullámot vizsgálunk. A hullámszám azt számszerűsíti, hogy egy centiméterben hány darab hullám található.

Az irradiancia (I) meghatározott irányban, egységnyi térszögben, egységnyi idő alatt, egységnyi felület által kisugárzott, vagy egységnyi felületre érkező, vagy egységnyi felületen áthaladó sugárzási energia. Jele: I , mértékegysége: $[\text{Wm}^{-2}\text{st}^{-1}]$. Az irradiancia függ a beeső sugárzás irányától, amit a zenittől való elhajlás szögével (ϑ) adunk meg. Ezt az összefüggést az (1) egyenlet írja le (Ács et al., 2012).

$$I = \frac{d^3Q}{dt d\Omega dA \cos \vartheta} \quad (1)$$

A 4.1. ábra szemlélteti az irradiancia irányát, a térszöget, a beesési szöget és a felületet.



4.1. ábra: A $d\omega$ térszög geometriája. \hat{n} a sugárzás iránya, ϑ a dA felületre állított merőlegestől vett eltérés: a sugárzás beesési/kilépési zenit szöge. [5 – MTU scattering]

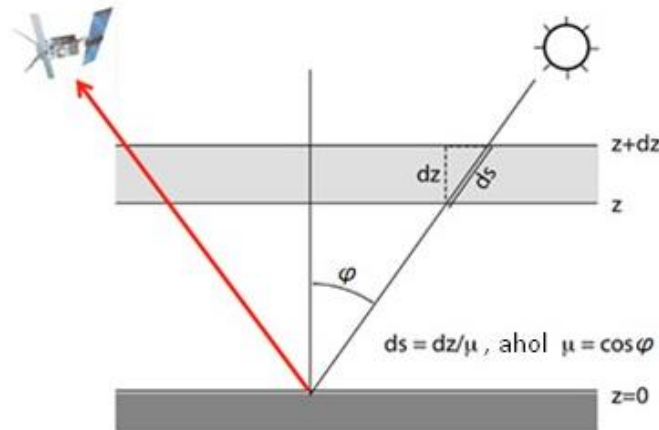
A spektrális irradiancia (2) egységnyi hullámhossztartományra vonatkozik.

$$I_\lambda = \frac{d^4 Q}{dt d\lambda d\Omega dA \cos \vartheta} \quad (2)$$

A műhold berendezése általában több spektrális tartományban mér. Az adott csatorna hullámhossz tartományában, a vizsgált irányból beérkező sugárzás radianciáját méri. Ahhoz, hogy a mért radiancia értékekből a légkör állapotára következtetéseket tudjunk levonni, meg kell ismerni a sugárzást befolyásoló folyamatokat. Ebben segít a sugárzásátviteli egyenlet. A sugárzásátviteli egyenlet a légkörön belül kialakuló, valamint a légkör tetején kilépő (a műhold által mért) sugárzási teret írja le.

4.2 A sugárzásátviteli egyenlet a napsugárzás tartományában

A következőkben megvizsgáljuk, hogy a műholdig megtett útja során mi történhet egy fotonnal. A napsugárzás tartományában két fő kölcsönhatás lehetséges: elnyelődhet vagy szóródhat. (A kisugárzást a napsugárzási tartományban elhanyagolhatjuk.) A 4.2. ábra mutatja be a beeső napsugárzás geometriáját (Menzel et al., 2006).



4.2. ábra: A dz vastagságú rétegben a φ beesési zenitszög irányból érkező sugárzás ds utat tesz meg. [5 – MTU scattering]

A (φ, Ω) irányból érkező sugárzás radianciájának ds úthossz alatti megváltozása (Bennartz et al., 2012/b):

$$\frac{dI}{ds} = \text{Forrás} - \text{Nyelő} \quad (3)$$

Először az elnyelést vizsgáljuk, ami gyengülést okoz a radianciában, „nyelő” folyamat. Felírjuk, hogy egy dz vastagságú elnyelő rétegben mennyit változik az I , ha a felületre állított merőlegeshez képest φ szöget zár be a sugárzás iránya (4.2. ábra):

$$dI = -\beta_A I \frac{1}{\cos \varphi} dz \quad (4)$$

A dI a radiancia gyengülése, mely a β_A térfogati elnyelési együtthatóval arányos. β_A a levegő térfogategységének elnyelésére jellemző mennyiség, ez a térfogategységben lévő molekulák, aeroszolok és felhőelemek össz elnyelése. Az $1/\cos \varphi$ azt írja le, hogy a rétegben a sugárzás által megtett ds „ferde úthossz” hányszorosa a réteg dz vastagságának (4.2. ábra).

A szórás folyamata részben „nyelő”, részben „forrás” folyamat. A vizsgált irányból való kiszóródás a „nyelő folyamat”. A többi irányból a vizsgált irányba való beszóródás a „forrás folyamat”. Az eredeti irányból történő kiszóródás csökkenti az I radiancia nagyságát:

$$dI = -\beta_S I \frac{1}{\cos \varphi} dz \quad (5)$$

ahol β_S a térfogati szórási együttható, ez jellemzi a térfogategységben található részecskék okozta össz szórást (Young et al., 1993). A nyelő folyamatokat közösen felírva (a kiszóródást és az elnyelést is figyelembe véve):

$$dI = -(\beta_A + \beta_S) I \frac{1}{\cos \varphi} dz \quad (6)$$

Az elnyelési és szórási együtthatók összege a gyengülési együttható $\beta_e = \beta_A + \beta_S$ (Young et al., 1993).

A többi irányból a vizsgált irányba való beszóródást az alábbi egyenlettel írhatjuk le:

$$dI = +\beta_S \frac{1}{4\pi} \oint_{\hat{\Omega}} P(\hat{\Omega}, \Omega) I(\hat{\Omega}) d\hat{\Omega} \frac{1}{\cos \varphi} dz \quad (7)$$

A P függvény a szórás fázisfüggvénye, amely a szórás irányeloszlását írja le (Bennartz et al., 2012/b). Normált függvény:

$$\frac{1}{4\pi} \oint_{\Omega'} P(\Omega', \Omega) d\Omega' = 1 \quad (8)$$

A megismert folyamatok segítségével felírható a sugárzásátviteli egyenlet. Felhasználva a korábbi egyenleteket:

$$dI = -(\beta_S + \beta_A)I \frac{1}{\cos \varphi} dz + \beta_S \frac{1}{4\pi} \oint_{\hat{\Omega}} P(\hat{\Omega}, \Omega) I(\hat{\Omega}) d\hat{\Omega} \frac{1}{\cos \varphi} dz \quad (9)$$

Az egyenletet tovább rendezve, a $(\beta_S + \beta_A) \cdot \frac{1}{\cos \varphi} \cdot dz$ tagokkal osztva, kapjuk a napsugárzás tartományára felírt sugárzásátviteli egyenletet (*Bennartz et al., 2012/b*). (Elhanyagoltuk a hőmérsékleti sugárzást.)

$$\mu \frac{dI}{dt} = -I + \frac{\omega_0}{4\pi} \oint_{\hat{\Omega}} P(\hat{\Omega}, \Omega) I(\hat{\Omega}) d\hat{\Omega} \quad (10)$$

A (10) egyenletben a $\mu := \cos \varphi$ jelölést használtuk. (A μ számot geometriai légtömeg faktornak szokták nevezni.) A dt a réteg függőleges menti átbocsátása. Ezt alább még kifejtjük. Az $\omega_0 := \beta_S / (\beta_S + \beta_A)$ az egyszeres szórási albedó. Ez a szám jellemzi, hogy a térfogategységben a szórás mennyire meghatározó az elnyeléshez képest. Értéke 0 és 1 közötti. Ha $\omega = 0$, akkor tisztán elnyelő, ha $\omega = 1$, akkor tisztán szóró közegről van szó (*Bennartz et al., 2012/b*).

A sugárzásátviteli egyenlet egy integro-differenciál egyenlet. Csak numerikusan lehet megoldani. Ha ki akarjuk számítani a sugárzási teret a légkörben, akkor a következő határfeltételeket kell figyelembe venni:

- a légkör tetejére egy irányból érkező napsugárzás erősségét és irányát, valamint
- a légkör alján, a felszín sugárzást elnyelő és visszaverő képességét.

A határfeltételeken kívül a légkörben lévő molekulák, felhőelemek és aeroszolok mennyiségét, eloszlását, és tulajdonságait is ismerni kell a megoldáshoz. A műhold detektorának irányában a légkör tetején kilépő sugárzás radianciájára kívánjuk megoldani az egyenletet. A megoldásra vannak eljárások, programok.

Vizsgáljuk meg azt a mennyiséget $((\beta_S + \beta_A) \cdot \frac{1}{\cos \varphi} \cdot dz)$, amivel a (9) egyenlet mindkét oldalát elosztottuk. A $(\beta_S + \beta_A) dz$ mennyiség a dz réteg optikai vastagsága, és egyben a függőleges menti átbocsátása is. Egy (z_1 és z_2 szintek által határolt) réteg optikai vastagsága (τ), a szórási és elnyelési együtthatók összegének integrálja az adott rétegre (*Bennartz et al., 2012/b*):

$$\tau(z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} (\beta_A + \beta_S) dz \quad (11)$$

A réteg átbocsátását, átteresztőképességét (a függőlegeshez képest φ irányban) egy exponenciális függvény írja le, aminek kitevőjében a τ optikai vastagság és a $\mu = \cos(\varphi)$ geometriai légtömegfaktor szerepel:

$$t(z_1, z_2) = e^{-\frac{\tau(z_1, z_2)}{\mu}} \quad (12)$$

4.3 A méretparamétertől való függés

A dolgozat tárgya a felhőtető mikrofizikájának vizsgálata. Mint látni fogjuk, a közeli infravörös csatornák információt tartalmaznak a felhőtetőn lévő felhőelemek halmazállapotáról és átlagos méretéről. Ennek elméleti alapjait tárgyaljuk. Éppen ezért különös hangsúllyal vizsgáljuk meg, hogy a sugárzásátviteli egyenlet változói függenek-e, és ha igen, hogyan a részecskék halmazállapotától és méretétől.

A méretparamétert a (13) egyenlet definiálja, a részecske sugarának a beeső sugárzás hullámhosszához képesti „méretét” adja meg:

$$\alpha = 2\pi r / \lambda \quad (13)$$

A sugárzási tér számításához szükség van a β_A , β_S értékekre és a szórási fázisfüggvényekre (P). Ezek a térfogategységben levő részecskék elnyelési és szórási jellemzőitől függenek [5 – *MTU scattering*].

Egy részecske elnyelése a részecske anyagától és térfogatától függ. A levegő térfogategységének elnyelése pedig a térfogategységben található elnyelő részecskék össz térfogatával ($\sim \sum r^3$) arányos.

Egy részecske szórása a részecske anyagától és az ún. hatáskeresztmetszetétől függ. A szórási hatáskeresztmetszet (σ_S) felírható a valódi keresztmetszet (A) és az ún. szórási hatékonyság (Q_S) szorzataként. Hasonlóan definiálható a gyengülési hatáskeresztmetszet (σ_e) és gyengülési hatékonyság (Q_e) is. A β_S térfogati szórási együttható a térrészben található részecskék szórási hatáskeresztmetszetének összegével arányos ($\sim \sum r^2$). A levegő térfogategységének szórási fázisfüggvénye (P) is az egyes részecskék fázisfüggvényeiből származtatható [8 – *Rosenfeld 2016*].

Egy felhő térfogategységében különböző nagyságú felhőelemek találhatók. A felhőelemek nagyságának eloszlását az $n(r)$ eloszlás-függvénnyel leírva a gyengítési együtthatót a következő egyenlettel számíthatjuk:

$$\beta_e = \int_0^{\infty} n(r)[Q_e(r)\pi r^2] dr \quad (14)$$

A különböző sugarú részecskék egyszerűbb kezeléséhez bevezetjük az effektív cseppsugár fogalmát, ami a vizsgált felhő térfogategységében a felhőelemek térfogatának összege elosztva a felhőelemek felületének összegével [6 – *MTU transmission*]:

$$r_{eff} = \frac{\int_0^{\infty} n(r)r^3 dr}{\int_0^{\infty} n(r)r^2 dr} \quad (15)$$

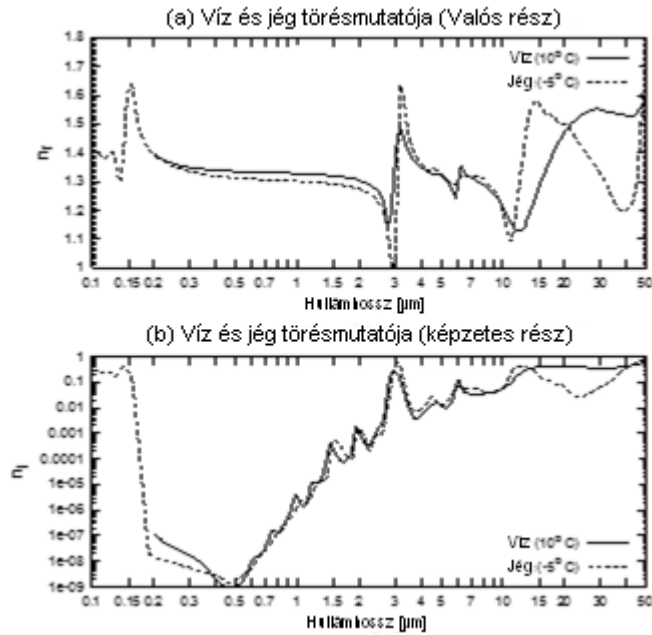
Egy részecske fázisfüggvénye, szórási hatáskeresztmetszete és elnyelése függ:

- a komplex törésmutatótól,
- a részecske formájától,
- a méretparamétértől.

A komplex törésmutató (n) a részecske anyagának és a beeső sugárzás hullámhosszának a függvénye (4.3. ábra). A törésmutató valós része (n_r) a szórást, komplex része (n_i) pedig az elnyelést határozza meg.

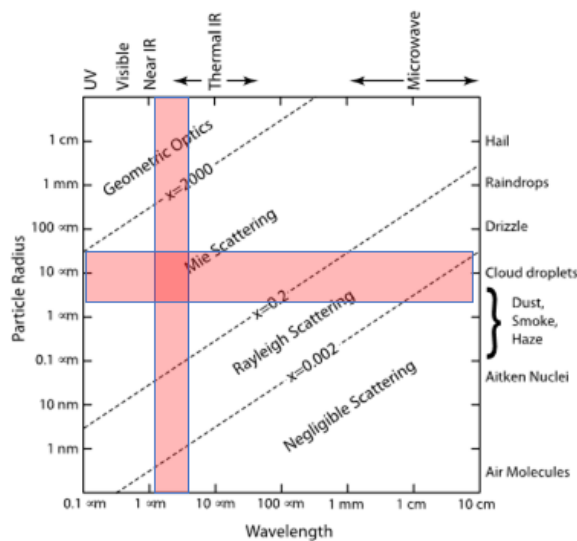
$$n = n_r + n_i \quad (16)$$

A 4.3. ábrán a komplex törésmutató valós és képzetes részét látjuk a hullámhossz függvényében. Ez anyagi jellemző. A folyamatos görbe a víz, míg a szaggatott görbe a jég törésmutatóját ábrázolja. Az (a) diagram a valós részt mutatja be. Ettől függ a részecske szórásának mértéke, vagyis a szórási hatáskeresztmetszete, és szórási fázisfüggvénye. A (b) diagram a törésmutató képzetes része, ami az elnyelést határozza meg [6 – *MTU transmission*].



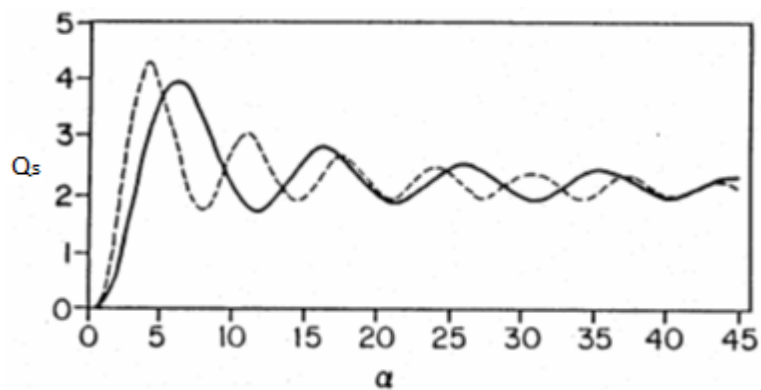
4.3. ábra: Víz és jég komplex törésmutatója a hullámhossz függvényében (víz – folytonos vonal, jég – szaggatott vonal). A felső ábrán a komplex törésmutató valós része, az alsó ábrán a komplex törésmutató képzetes része látható. [6 – MTU transmission]

Az α méretparaméter függvényében más-más módszerrel kell számítani a szórási jellemzőket (4.4. ábra). A Rayleigh szórás esetén a részecske mérete sokkal kisebb, mint a beeső sugárzás hullámhossza. Ha a részecske sokkal nagyobb, mint a sugárzás hullámhossza, akkor geometrikus szórás történik. Ha a részecske mérete és a beeső sugárzás hullámhossza összevethető méretű, akkor az ún. Mie elmélettel írható le a szórás (Menzel et al., 2006). A rövidhullámú tartományban a felhőelemek szórását a Mie elmélet írja le (Petty et al., 2006).



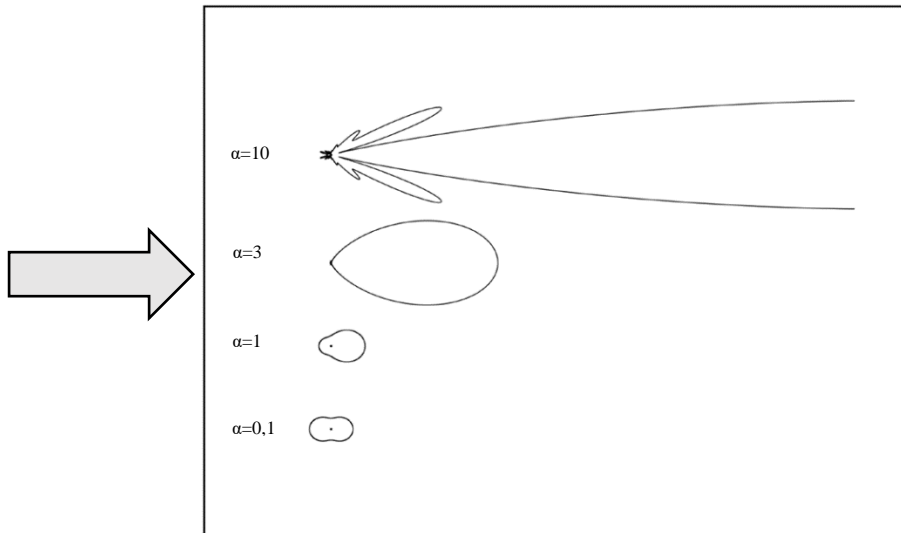
4.4. ábra: A szórás fajtája a hullámhossz és részecskeméret függvényében. (Petty et al., 2006) [5 – MTU scattering]

Gömb alakú (és egyes más szimmetrikus alakú) részecskékre, a szórási hatékonyságot (Q_s) a Mie elmélet alapján ki lehet számítani az α méretparaméter függvényében. Egy darab nem elnyelő gömb alakú részecske szórási hatékonysága (Q_s) (a Mie szórás tartományában) látható a 4.5. ábrán. Vízcseppek esetén aránylag jó közelítés a gömb alak. A jégrészecskék nagyon eltérnek a gömb alaktól, ezekre más eljárásokat kell alkalmazni. A 4.5. ábra mutatja, hogy a szórási hatékonyság hogyan függ a méretparamétertől. Mivel a szórási hatáskeresztmetszetet úgy definiáltuk, mint a valódi hatáskeresztmetszet és a szórási hatékonyság szorzata, így a hatáskeresztmetszet még erősebben függ a részecske méretétől [5 – *MTU scattering*].



4.5. ábra: Egy gömb alakú részecske szórási hatékonysága (Q_s) a méretparaméter függvényében. 1,330 valós törésmutató (folytonos vonal) és 14,86 valós törésmutató (szaggatott vonal) esetén (Menzel et al., 2006)

A fázisfüggvény a szórás irányeloszlását írja le. A szórási fázisfüggvény (P) is függ a méretparamétertől (4.6. ábra). Minél nagyobb a méretparaméter, annál inkább „előre szóródik” a sugárzás. Az ábra alján $\alpha=0,1$ esetén a Rayleigh szórás fázisfüggvényét látjuk. Ekkor ugyanannyi az előre és hátrafelé szóródás.



4.6 ábra: A szórás fázisfüggvény négy különböző méretparaméter értékre. [5 – MTU scattering]

Megvizsgáljuk az egyszeres szórás albedó ((16) egyenlet) méretparamétertől való függését is.

$$\omega_0 := \frac{\beta_S}{(\beta_S + \beta_A)} \quad (17)$$

Ha a részecske elnyelő, vagyis β_A értéke nem nulla, akkor az ω_0 egyszeres szórás albedó 1-nél kisebb. Ekkor az egyszeres szórás albedó értéke függ az elnyelés mértékétől, és a részecske méretparaméterétől is. Az elnyelés a részecskék térfogatával arányos, míg a szórás a részecskék keresztmetszetével, azaz a mérettől más módon függnek. Következésképpen az egyszeres szórás együttható is függ a méretparamétertől (Bennartz et al., 2012/b).

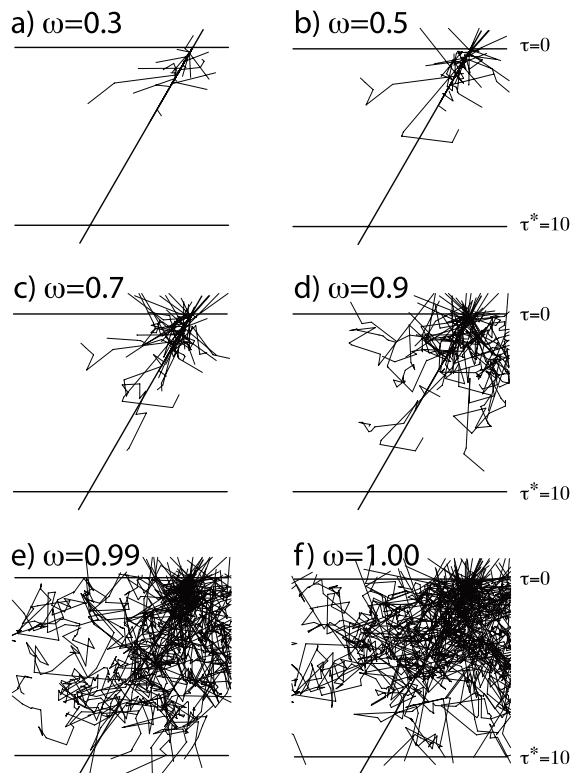
Egy térfogategység egyszeres szórás albedója, a benne levő részecskék egyszeres szórás albedó értékeiből származtatható. Fontos, hogy egy térfogategység egyszeres szórás albedója hogyan függ a térfogatelemben lévő részecskék átlagos méretétől, felhők esetén, a felhőtetön lévő felhőelemek effektív cseppsugarától.

Mint később látni fogjuk, az egyszeres szórás albedó mérettől való függése meghatározó abból a szempontból, hogy egy adott csatorna tartalmaz-e (számottevő) információt a felhőtető mikrofizikájáról. Az erősebben elnyelő részecskékről kevesebb sugárzás szóródik. A műhold a visszavert sugárzást méri, aminek mértéke sok mindentől függ, többek között az elnyelés mértékétől.

A többszörös szórás folyamatban is jelentős szerepe van az egyszeres szórás albedó értékének, azaz, hogy az elnyelés mennyire jelentős a szóráshoz képest. Ha nincs

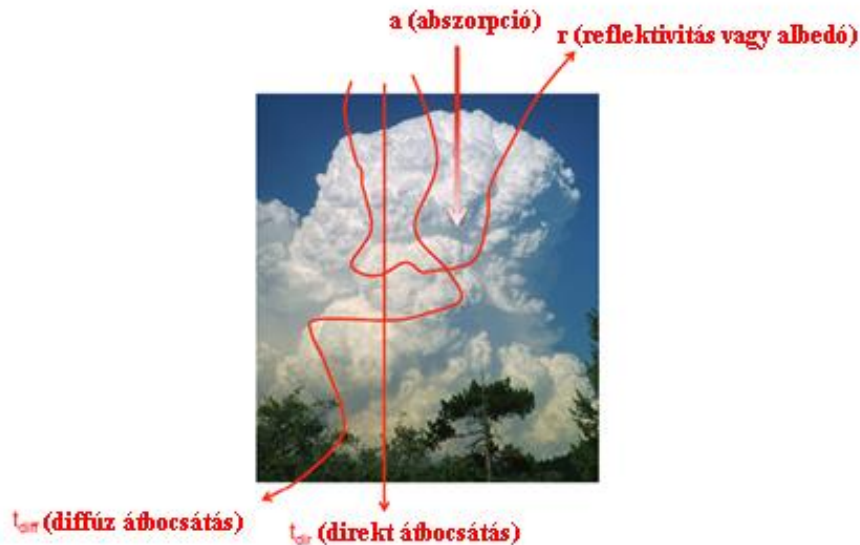
elnyelés, a beesó sugárzás akár több százszor is képes szóródni egy felhőben, mielőtt elhagyja azt. Minél erősebb az elnyelés, azaz minél kisebb az egyszeres szórási albedó, annál nagyobb lesz a foton elnyelésének valószínűsége.

A 4.7. ábrán egy optikailag vastag felhőben ($\tau=10$) száz darab beérkező foton véletlen útját ábrázolták izotrop szórás, és különböző egyszeres szórási albedó értékek esetén. Azok a fotonok, amelyek irányváltoztatás nélkül jutnak át a felhőrétegen, alkotják a direkt sugárzást. A felhő tetején kilépő fotonok alkotják a felhő által visszavert sugárzást. Azok a fotonok, amelyek többszöri irányváltoztatás után jutnak ki a felhőalapról, alkotják a szórt sugárzást. A fennmaradó fotonok a felhőben elnyelődnek, és energiájuk a felhő melegítésére fordítódik [5 – *MTU scattering*].



4.7. ábra: 100 foton útvonala adott optikai vastagságú felhőben ($\tau^*=10$), izotrop szórás és különböző egyszeres szórási albedók esetén. [5 – *MTU scattering*]

A 4.8. ábra a felhőbe be- és onnan kilépő sugárzásokat vázolja. A felhőn átjutó, átbocsátott sugárzás lehet direkt vagy diffúz attól függően, hogy a fotonok irányt változtattak-e a felhőben. A sugárzás egy része elnyelődik a felhőben, az elnyelt sugárzás a felhőt melegíti. A felhő tetejéről kilépő sugárzás a reflektált sugárzás. Ezen folyamatok összege 1. A felhőben kialakuló sugárzási teret és a felhőből kilépő különböző sugárzások mértékét, arányát (többek között) a felhő optikai vastagsága (τ) határozza meg [6 – *MTU transmission*].



4.8. ábra: A felhőbe be- és onnan kilépő sugárzások [6 – MTU transmission]

Azt, hogy egy optikailag vastag felhőbe milyen mélyen „lát bele” a műhold, a felhő elnyelése határozza meg. Minél nagyobb az elnyelés aránya a szórással szemben, annál kevésbé lát bele a vizsgált felhőbe. A felhőtetőn beérkező foton rengeteg folyamaton megy keresztül a felhőben. Vastag felhő esetén az irány, amiben távozni fog a foton a felhőből, független attól az iránytól, amiből érkezett.

Egy felhő optikailag vastag ($\tau \gg 1$), ha a felhő direkt átbocsátása elhanyagolható. Ekkor nem számottevő azon fotonok száma, amelyek kölcsönhatás nélkül haladnak át a felhőn. Optikailag vékony felhő esetén ($\tau \ll 1$) számottevő azon fotonok száma, amelyek kölcsönhatás nélkül átjutnak a felhőn. Ez mind a Nap felől érkező sugárzásra, mind a felszín irányából érkező sugárzásra fennáll. Az optikailag vékony felhők irányából érkező sugárzást a felhő alatti térrész sugárzási jellemzői is befolyásolják. Ha a felhő alatti felszín a műhold felől nézve sötét, akkor kisebb lesz a mért reflektivitás, világos háttér esetén pedig nagyobb [5 – MTU scattering].

A kalibráció során reflektivitást számolunk a műhold által a rövidhullámú sávokban mért értékekből. A reflektivitás az adott irányban visszavert sugárzás erőssége osztva a nap irányából érkező sugárzás erősségével. Mértékegység nélküli szám. A reflektivitás a visszaverő közeg tulajdonságain kívül a nap és a műhold megfigyelési irányaitól is függ (az irányokat a képletben nem tüntettük fel) [7 – MSG Interpretation]. A reflektivitást a következőképpen számoljuk:

$$R(i) = \frac{I(i)}{S(i) \cdot \cos \vartheta} \quad (18)$$

ahol:

- i a rövidhullámú sávra utaló index
- $R(i)$ az i -dik rövidhullámú sávban a reflektivitás
- $I(i)$ az i -dik rövidhullámú sávban a mért radiancia
- $S(i)$ az i -dik rövidhullámú sávban a Nap irányából érkező radiancia
- ϑ a Nap zenit szöge.

5. A látható és közeli infravörös csatornák jellemzői

A következőkben a munka során vizsgált csatornák jellemzőit mutatjuk be. Ezek a Himawari már operatívan működő csatornái, melyek hasonlóak a 2020-ban pályára álló MTG jövőbeli csatornáihoz. Először a Himawari első négy csatornáját jellemezzük, ezek a 0,4-1 μm tartományba esnek. Ezután két közeli infravörös csatornát mutatunk még be, ezek mérései alapján tudjuk a felhőtető mikrofizikát vizsgálni. A csatornák önálló elemzésén kívül közös használatukat is bemutatjuk.

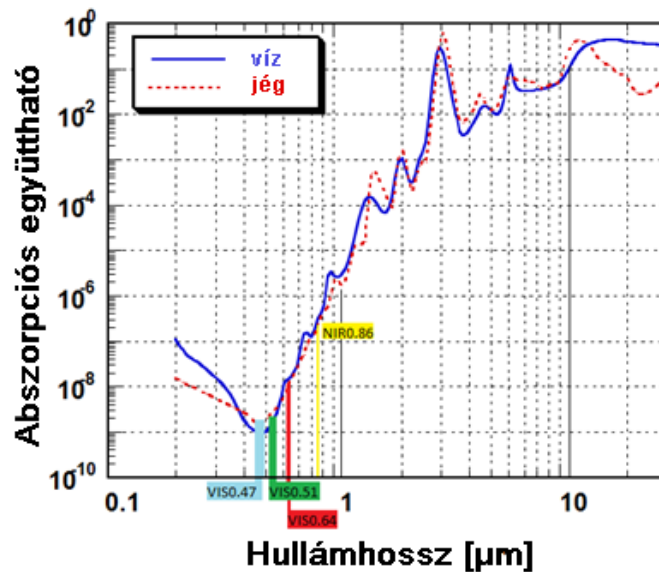
A csatornák bemutatásához és a kombinációik vizsgálatához saját műholdkép példákat mutatunk be.

5.1 0,4-1 μm -es tartományba eső csatornák jellemzői

A Himawari-AHI három látható tartományban lévő csatornáját, és egy láthatóhoz közeli infravörös csatornát vizsgálunk: a VIS0.47, VIS0.51, VIS0.64, NIR0.86 sávokat. A VIS0.64 nagyfelbontású csatorna 0,5 km-es felbontású képeket készít. A másik három csatorna 1 km-es felbontással működik. Ezen csatornák tartományában a víz és a jég elnyelése kicsi, a szóródás a meghatározó kölcsönhatás a napfény és a felhőelemek között. Az egyszeres szórási albedó ezen hullámhossztartományokon közel 1 minden effektív cseppszög esetén. A felhőtető „domborzata” jelenik meg a képeken (az árnyékok rajzolják ki) és az optikai vastagságukra lehet következtetni. A műhold a visszaszóródott sugárzást méri. Ezt leginkább a felhő optikai vastagsága befolyásolja ezekben a hullámhossz tartományokban. Az optikailag vastagabb felhőknek nagyobb a mért reflektivitásuk, mint az optikailag vékony felhőknek.

Az 5.1. ábrán a hullámhossz függvényében látható a víz és jég abszorpciós együtthatója. Mindkét tengely beosztása logaritmikus, a négy vizsgált csatorna abszorpciós együtthatói 10^{-9} és 10^{-6} közöttiek. Ezek olyan kicsi abszorpciós együtthatók, hogy a fázisok között az elnyelés mértékének különbsége elhanyagolható.

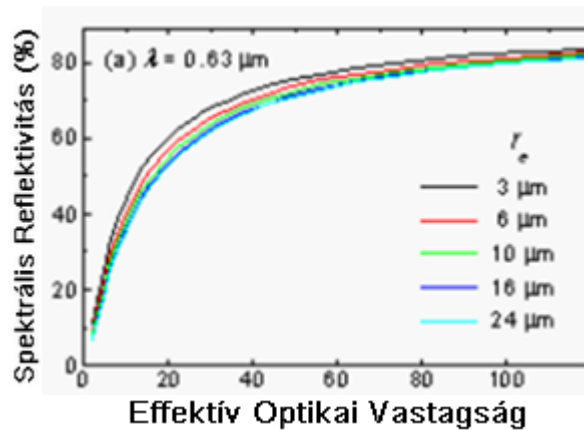
Mint látni fogjuk a halmazállapotok megkülönböztetésére nem használhatók ezek a csatornák.



5.1. ábra: Víz (kék görbe) és jég (piros görbe) elnyelési együtthatója a hullámhossz függvényében. (4 Himawari AHI sáv tartományát jelöltük a képen: VIS0.47 – világoskék, VIS0.51 – zöld, VIS0.64 – piros, NIR0.86 – sárga) [8 – Rosenfeld 2016]

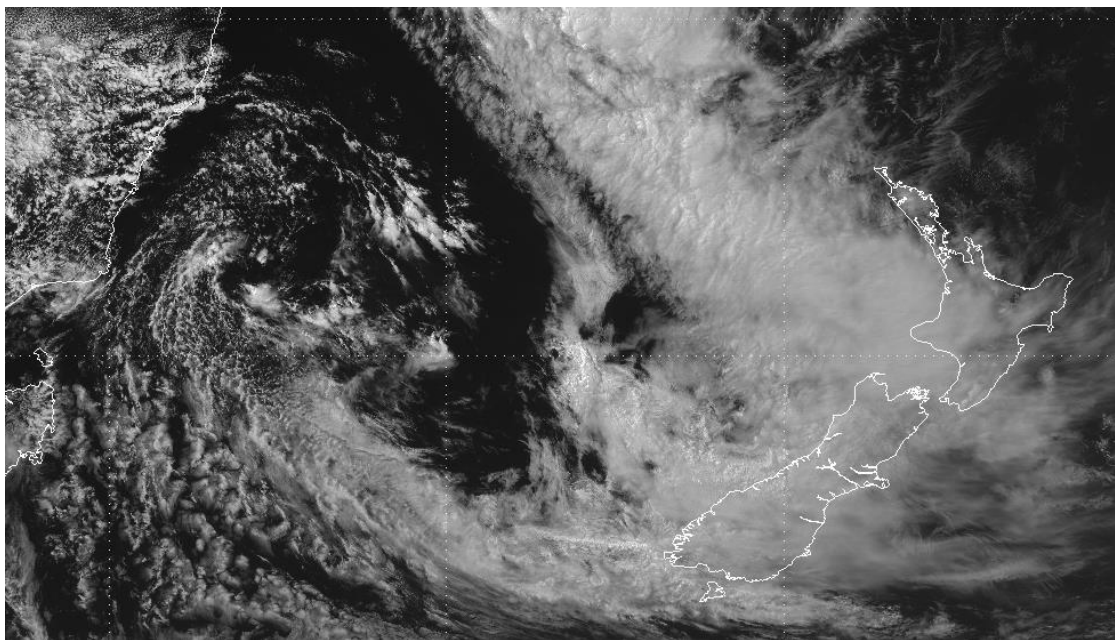
Mind a négy csatorna (VIS0.47, VIS0.51, VIS0.64 és NIR0.86) elnyelési együtthatója csekély, így mind a négy csatorna használatos, mint az optikai vastagságról információt nyújtó csatorna.

Az 5.2. ábrán vízfelhő szimulált reflektivitását látjuk (0,63 μm hullámhosszú beeső sugárzás esetén) az optikai vastagság függvényében, a felhőtétőn lévő cseppecskék különböző effektív cseppsugár méreteire. Ezek a reflektivitások jóval erősebben függenek az optikai vastagságtól, mint az effektív cseppsugártól, az effektív cseppsugarak görbéi szinte együtt haladnak. Hasonló alakú ábra vonatkozna a másik három tárgyalt csatornára is, tehát a VIS0.47, VIS0.51 és NIR0.86 csatornák is az optikai vastagságtól függenek erősebben. Ezen csatornák mérései nem tartalmaznak számottevő információt a felhőtető mikrofizikáról.



5.2. ábra: Vízfelhő reflektivitása a VIS0.64 sávban az optikai vastagság függvényében, a felhőtető cseppcsekék különböző effektív cseppugár esetén. (Chang et al., 2002)

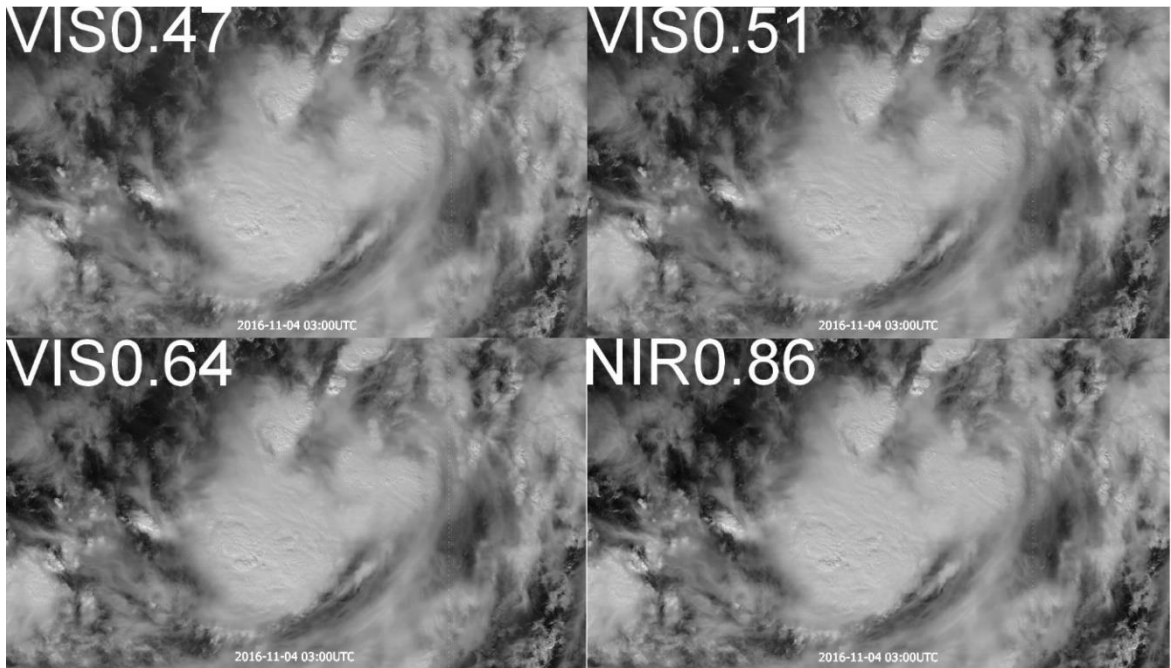
Az 5.3. ábrán egy 2016-11-14 03:00 UTC-kor Új-Zéland felett lévő ciklon NIR0.86 sávban készített műholdképe látható. A ciklon formája jól felismerhető, a felhőzetben az optikai vastagságból adódó különbségek láthatók (a vékony felhők sötétebbek). A frontnak optikailag vastag a felhőzete, a peremén és a középpontjában optikailag vékonyabb felhőzettel. Ebből a képből a felhőtetőt alkotó részecskékről, és azok fázisáról nem kapunk információt.



5.3. ábra: 2016-11-14 03:00 UTC-kor készült NIR0.86 műholdkép egy Új-Zéland térségében lévő ciklonról. (0-100% reflektivitás tartomány)

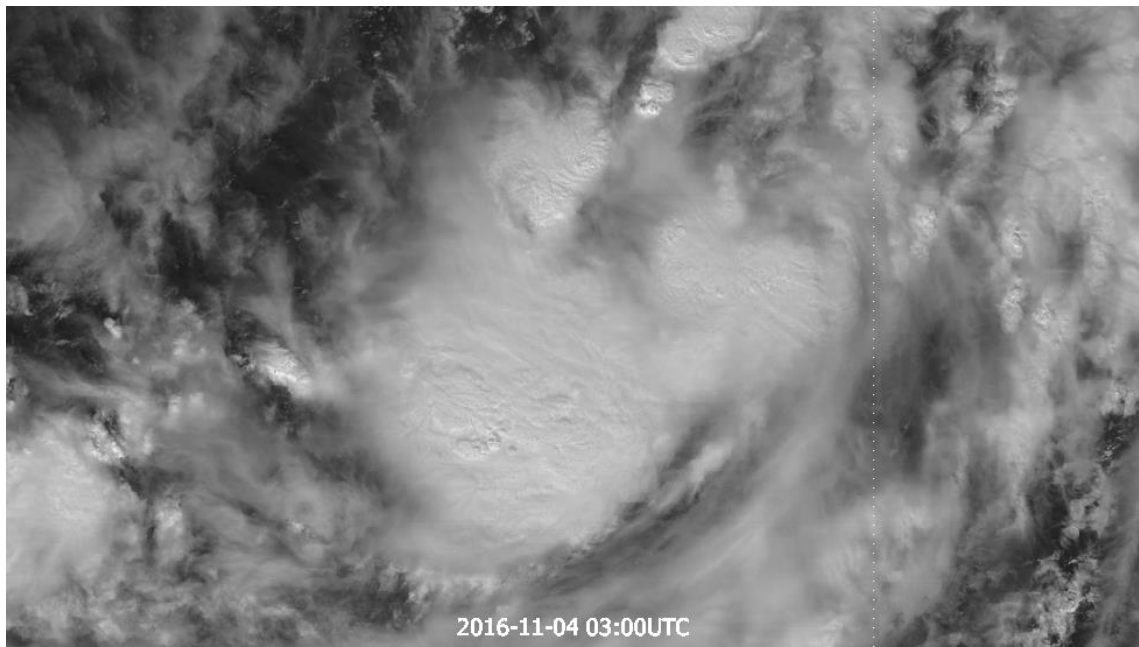
Az 5.4. ábrán mind a négy csatornával készült műholdképre egy-egy példa szerepel, amelyek 2016-11-04 03:00 UTC-kor a Filippínó-tenger felett elhelyezkedő felhőzetet mutatják. A négy különböző tartományba eső csatornával készült képen

kevés a különbség. Mind a négy képen, a kép közepén egy optikailag vastag felhő helyezkedik el.



5.4. ábra: 2016-11-04 03:00 UTC-kor a Filippínó-tenger felett elhelyezkedő zivatarrendszer. A Himawari első négy csatornájával készített képek. (0-100% reflektivitás tartomány)

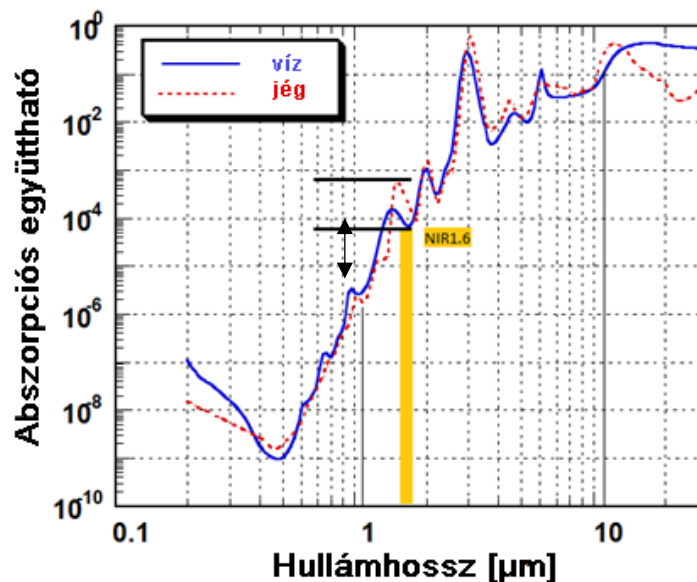
Az 5.5. ábrán az előző példa látható újra a VIS0.47 csatorna képen. Ennek a zivatarrendszernek részletesen vizsgáljuk majd a mikrofizikáját a következőkben.



5.5. ábra: 2016-11-04 03:00 UTC-kor a Filippínó-tenger felett elhelyezkedő zivatarrendszer a VIS0.47 csatornában készült műholdképen. (0-100% reflektivitás tartomány)

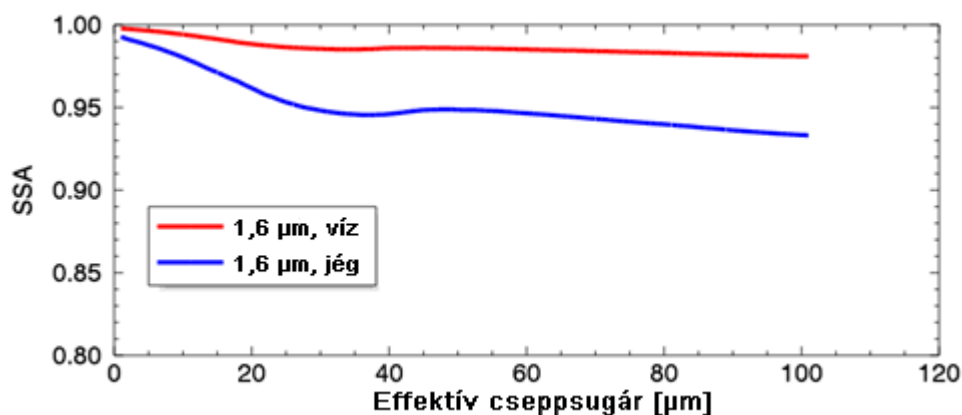
5.2 Az 1,6 μm -es csatorna jellemzői

Az 5.6. ábrán a jég és víz elnyelési együtthatója látható a hullámhossz függvényében. Az elnyelési együttható a NIR1.6 sávban két nagyságrenddel nagyobb, mint a NIR0.86 sávban; a három látható tartományban lévő csatorna együtthatóinál pedig négy nagyságrenddel. A NIR1.6 sávban már nem elhanyagolható folyamat az elnyelés. A víz és jég elnyelési együtthatói közötti különbség sem elhanyagolható. A jég elnyelése nagyobb, így ezen a hullámhosszon készült képeken a jégfelhők, vagyis a jégkristályokból alkotott felhőtetők sötétebben jelennek meg, mint a vízfelhők. Az erősebb elnyelés eredményezi a NIR1.6 csatorna, mint mikrofizikai csatorna használatát.



5.6. ábra: Víz (kék görbe) és jég (piros görbe) elnyelési együtthatója a hullámhossz függvényében. A fekete nyíl mutatja a NIR1.6 sávban a víz és a jég elnyelési együtthatója közötti különbséget. [8 – Rosenfeld 2016]

Az elnyelési együtthatók ismeretében kiszámítható az egyszeres szórási albedó víz- és jég részecskékre. Az 5.7. ábrán szimulált egyszeres szórási albedó látható az effektív csepp sugar függvényében. Korábban ismertettük az egyszeres szórási albedó definícióját (17. egyenlet). Mivel a jég elnyelése nagyobb, mint a víz elnyelése, így az egyszeres szórási albedó nagyobb vízfelhőre, mint jégfelhőre, mint ahogy az 5.7. ábrán látjuk is. Az ábra alapján az egyszeres szórási albedó igen erősen függ a felhőtetőn lévő felhőelemek halmazállapotától, és méretüktől is függ. Emlékeztetünk rá, hogy a látható csatornák esetén az egyszeres szórási albedó értéke konstans 1 közeli.

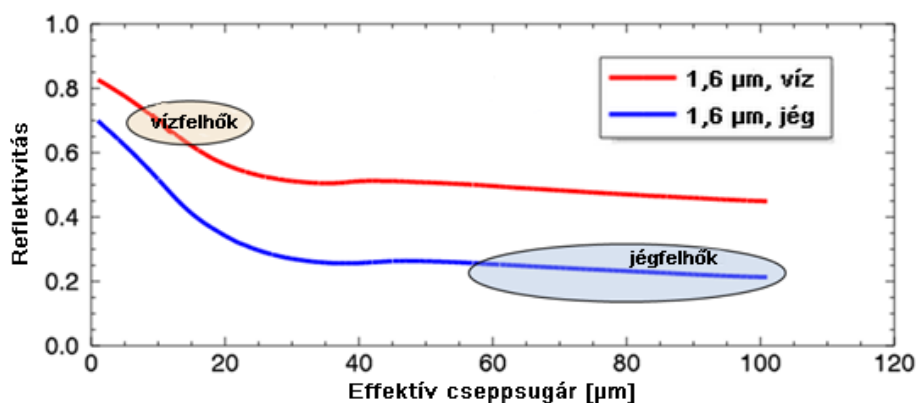


5.7. ábra: Vízfelhő (piros görbe) és jégfelhő (kék görbe) szimulált egyszeres szórási albedója (SSA) a NIR1.6 sávban az effektív cseppszugár függvényében. (Bennartz et al., 2012/a)

Az 5.8. ábrán két különböző halmazállapotú felhőtető szimulált reflektivitása látható az effektív cseppszugár függvényében. A szimulálás optikailag vastag felhőre vonatkozik, valamint konkrét Nap és műhold megfigyelési irányokra. A jégfelhő és vízfelhő görbéje távol van egymástól. A kisebb effektív cseppszugárú víz-, vagy jégfelhőkre a reflektivitás értéke nagyobb, mint a nagyobb effektív cseppszugárúakra. A NIR1.6 sávban a felhők fázisuk alapján kontrasztosan elkülönülnek egymástól. Sok esetben e mérések a részecskeméret megállapítására is használhatók.

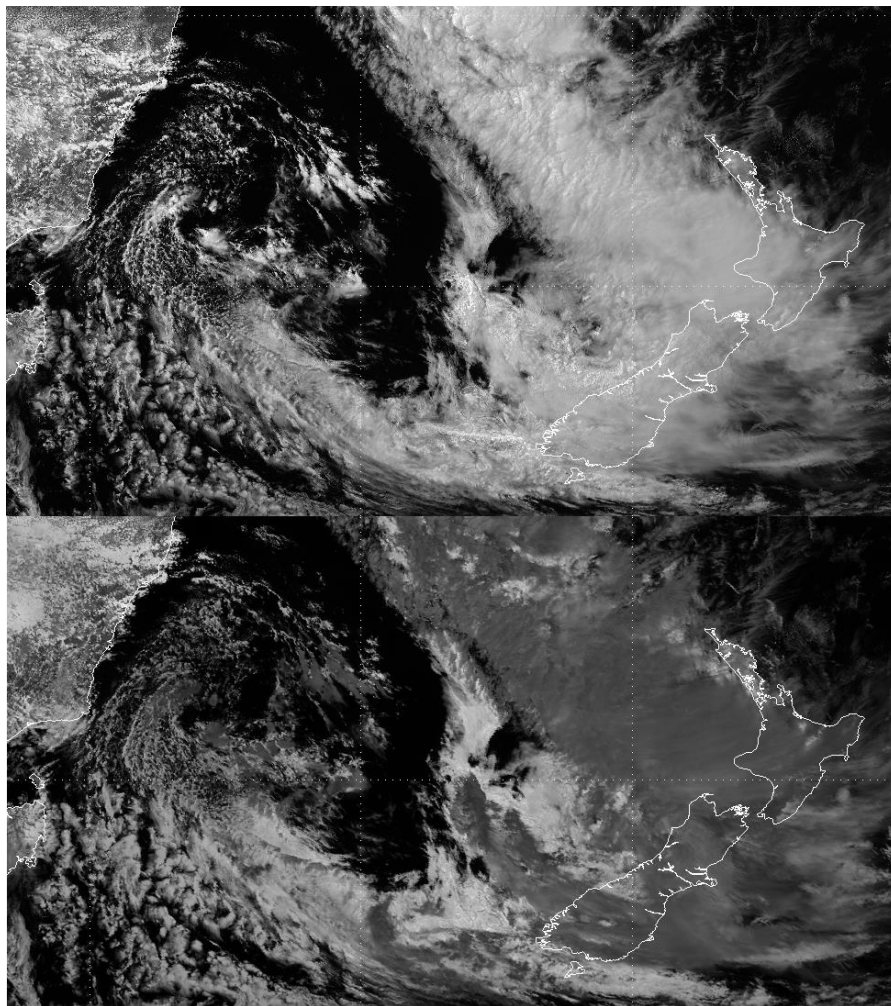
Az 5.8. ábrán ellipszisek mutatják a vízfelhők és jégfelhők jellemző effektív cseppszugár tartományait. Vannak azonban esetek, mikor ezektől eltér a felhőtető. Ilyen lehet,

- Ha kis jég részecskék vannak a felhő tetején, a reflektivitás a vízfelhőkéhez lesz hasonló.
- Ha nagy effektív cseppszugárú a vízfelhő, akkor a reflektivitása a kis effektív cseppszugárú jégfelhőkéhez hasonlít.



5.8. ábra: Optikailag vastag vízfelhő (piros görbe) és jégfelhő (kék görbe) szimulált reflektivitása a NIR1.6 sávban a felhőtető effektív cseppszugara függvényében. A jég- és a vízfelhők görbéjén fel vannak tüntetve a leggyakoribb effektív cseppszugár tartományok (ellipszisek). (Bennartz et al., 2012/a)

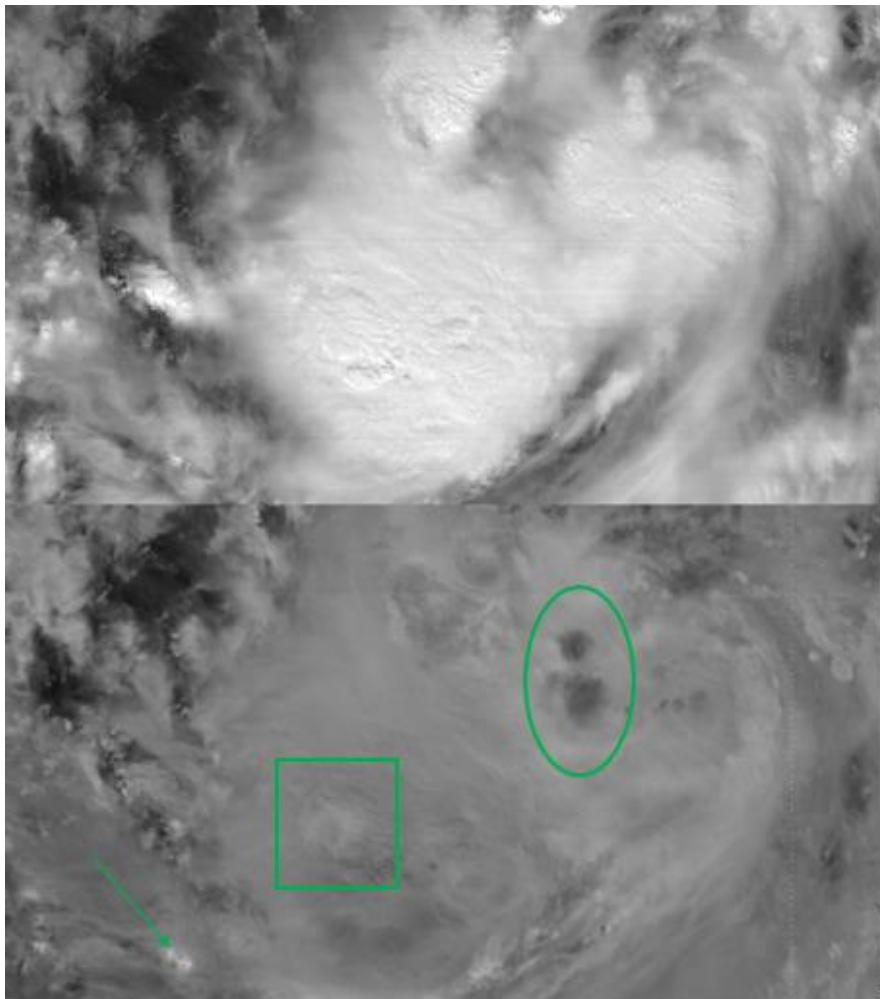
A következő ábrán (5.9. ábra) egy 2016-11-14-ei, Új-Zéland térségében elhelyezkedő ciklon látható, a VIS0.51 és NIR1.6 csatornák tartományában készült képeken. A látható csatorna képéről a felhőzet optikai vastagságáról kapunk több információt. A NIR1.6 képen sötét és világos felhőket látunk olyan területeken, ahol a felhők világosak voltak a VIS0.51 képen. Ezek a sötét felhők optikailag vastag jégfelhők. Az optikailag vékony jégfelhők (a kép jobb felső sarkában) a NIR1.6 képen alig látszanak.



5.9. ábra: 2016-11-14 03:00 UTC-kor készült VIS0.51 műholdkép (fenn, 0-100% reflektivitás tartomány) és NIR1.6 műholdkép (lenn, 0-60% reflektivitás tartomány)

Az 5.10. ábrán 2016-11-04 03:00 UTC-kor a Filippínó-tenger felett elhelyezkedő zivatarrendszer látható a VIS0.47 és NIR1.6 sávokban. A VIS0.47 képről az előző alfejezetben láttuk, hogy egy optikailag vastag rendszert vizsgálunk. A NIR1.6 képen a korábbi megállapítások alapján a felhőtető mikrofizikát vizsgáljuk meg. A NIR1.6

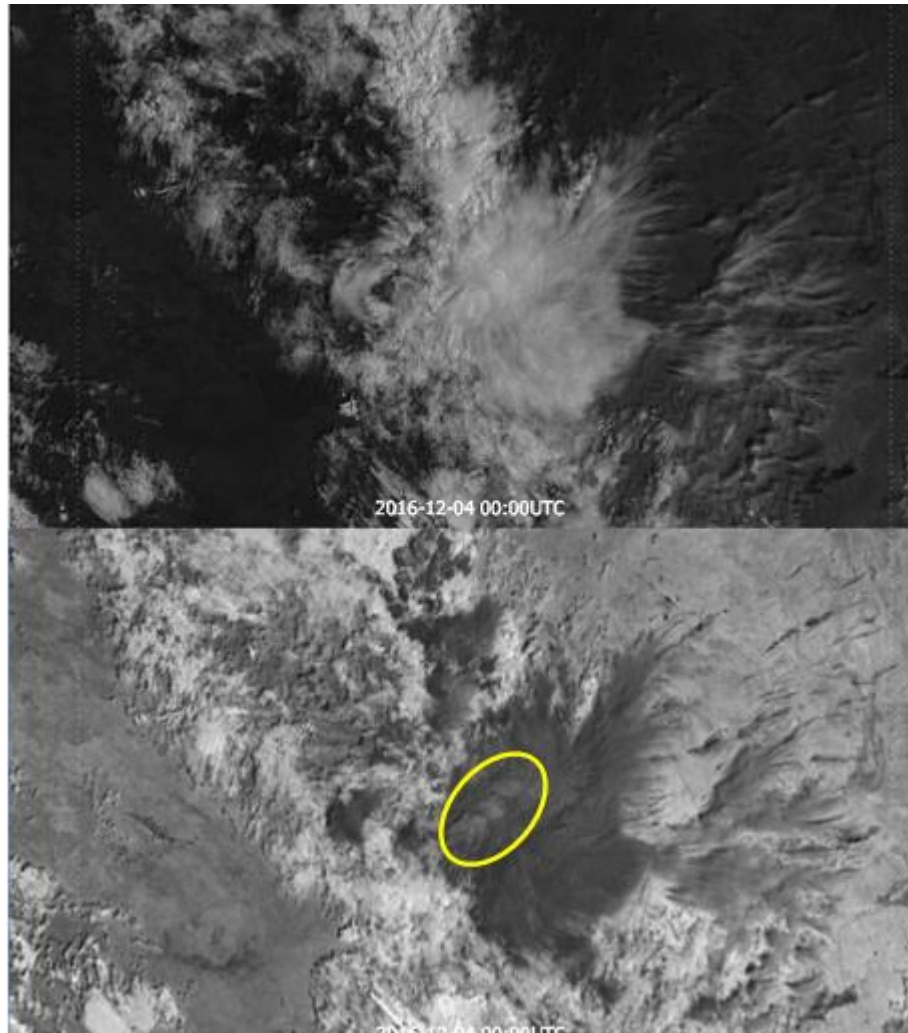
műholdképen sötétebb felhőket látunk, ezek jégfelhők. A nyíllal megjelölt részen látható vízfelhő, aminek a reflektivitása nagyobb. A két jelölt területen szignifikáns árnyalatbeli különbségek látszódnak. Először az ellipszissel jelölt területet vizsgálom. Ezen belül van két folt, ahol a NIR1.6 által mért reflektivitás jóval kisebb a környezeténél. Valószínűleg itt igen nagy jégkristályokat látunk. A négyszöggel jelölt terület kissé világosabb, mint a környezete, itt a NIR1.6 által mért reflektivitás kissé nagyobb. Ezt kisebb effektív cseppsugarú terület okozhatja, aminek nagyobb a reflektivitása, mint a környezetének. A felette lévő képpel összevetve ezen a területen egy ellaposodó túlnyúló csúcsot látunk.



5.10. ábra: 2016-11-04 03:00 UTC-kor a Filippínó-tenger felett elhelyezkedő zivatarrendszer képe a VIS0.47 (fenn) és NIR1.6 (lenn) sávokban

Az 5.11. ábrán bemutatott példán, a VIS0.64 és NIR1.6 képein egy Ausztrália szárazföldje felett elhelyezkedő zivatarrendszer látható. A szárazföldnek a NIR1.6 képen nagy a reflektivitása. A VIS0.64 képéről itt is a felhők optikai vastagságára következtethetünk, a felhők a nagy reflektivitásuk miatt kontrasztosan kivehetők. A

NIR1.6 képen sötét jégfelhőket és világos vízfelhőket látunk. A zivatarrendszer tetején (jégfelhő) három relatíve világosabb folt látszódik (sárga ellipszis) a NIR1.6 képen. Ezek mikrofizikája más, mint a környezetüké. A korábbi következtetéseink alapján itt valószínűleg kisebb effektív cseppszugarú jégkristályok találhatóak.



5.11. ábra: 2016.12.04. 0:00-UTC-kor Ausztrália felett elhelyezkedő zivatarrendszer a VIS0.64 (fenn) és a NIR1.6 (lenn) műholdképeken.

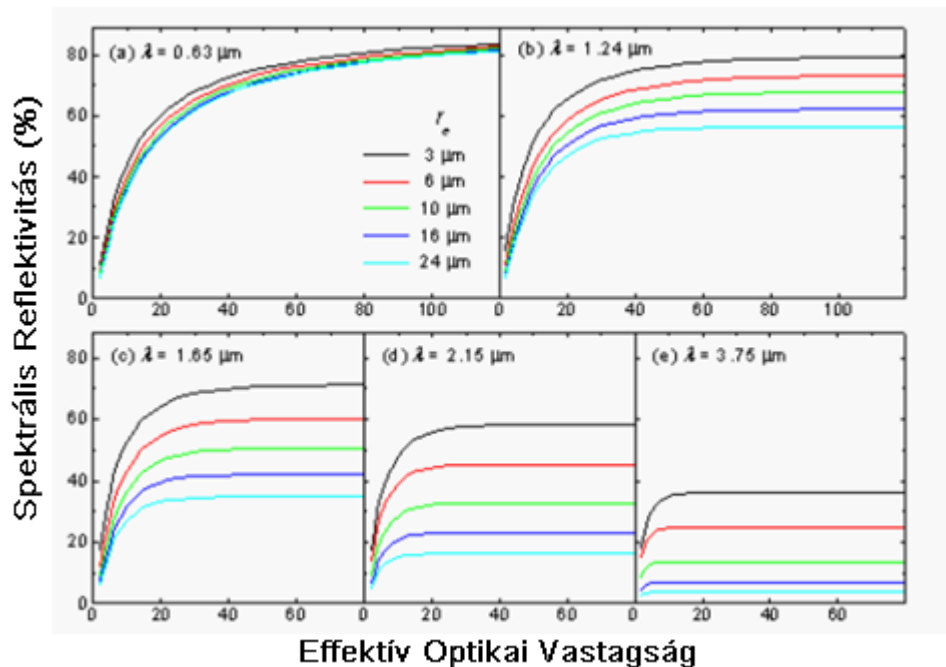
5.3 Elnyelő és nem elnyelő csatornák eltérő tulajdonságai, együttes használatuk

A korábban bemutatott NIR1.6 sáv egy elnyelő csatorna, míg az 5.1. fejezet négy csatornája nem elnyelő csatorna. A nem elnyelő csatornáknál a szórás a meghatározó kölcsönhatás, az elnyelő csatorna esetén viszont a szórás mellett az elnyelésnek is fontos a szerepe a visszavert sugárzás alakításában. Az elnyelő és nem elnyelő csatornákat kombinálva minőségi információhoz jutunk a felhőtető mikrofizikáról; összetettebb információhoz, mint önállóan használva őket. Ezt a korábbi példákon is láttuk.

Az 5.12. ábrán az 5 panel 5 hullámhosszra vonatkozik. Vízfelhők szimulált reflektivitását látjuk a (látható tartományra vonatkozó) optikai vastagság függvényében, a felhőtétől lévő cseppek több effektív cseppsugara esetén. A különböző színű görbék más-más effektív cseppsugarat jelölnek. Mindegyik hullámhossz esetén a nagyobb optikai vastagságok felé nőnek a görbék.

A 0,63 μm -es csatorna esetén az optikai vastagságtól való függés a meghatározó. Az effektív cseppsugarak görbéi szinte együtt haladnak, a felhőelemek mérete alig befolyásolja a szimulált reflektivitás értéket.

Az 1,24 μm hullámhossz értéktől kezdve nagy optikai vastagságnál (közel) konstans értékeket vesznek fel a színes görbék. Ebben a négy sávban optikailag vastag felhők vizsgálata esetén az effektív cseppsugártól való függés a meghatározó. A felhőelemek méretbeli különbségei határozzák meg a felhőtétő reflektivitását. Nagyobb hullámhosszokra messzebb helyezkednek el a színes görbék a „konstans reflektivitás” tartományban. Minél nagyobb távolság van a görbék között, annál jobban használható a hullámhossztartomány a méretek elkülönítésére. Minél nagyobb a szimuláláshoz használt hullámhossz, annál érzékenyebb a mért reflektivitás az effektív cseppsugárra.

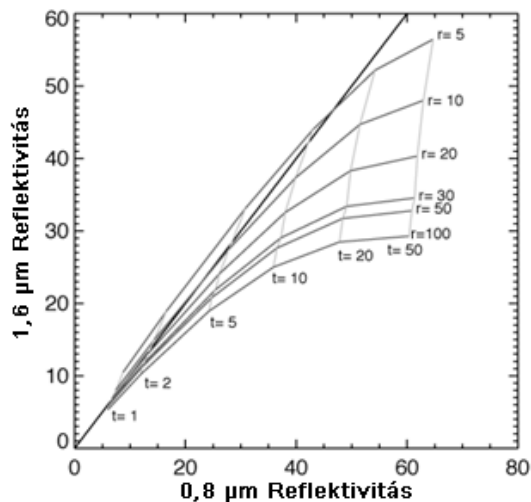


5.12. ábra: Vízfelhő reflektivitása az effektív optikai vastagság függvényében, öt különböző hullámhossz értéknél. A különböző színű görbék más-más effektív cseppsugarakat jelölnek. (Chang et al., 2002)

Az 5.13. ábrán vízfelhő szimulált reflektivitását látjuk egy látható és egy közeli infravörös sávban az optikai vastagság és az effektív cseppsugár paraméterek

függvényében. A vastag görbék mentén konstans az effektív cseppszugár, a vékonyabb görbék mentén az optikai vastagság a konstans. Látható, hogy az x tengelyen lévő 0,8 μm csatorna reflektivitás értékei inkább az optikai vastagságtól függenek. A közeli infravörös, 1,6 μm csatorna reflektivitásai vastag felhő esetén az effektív cseppszugártól függenek erősebben.

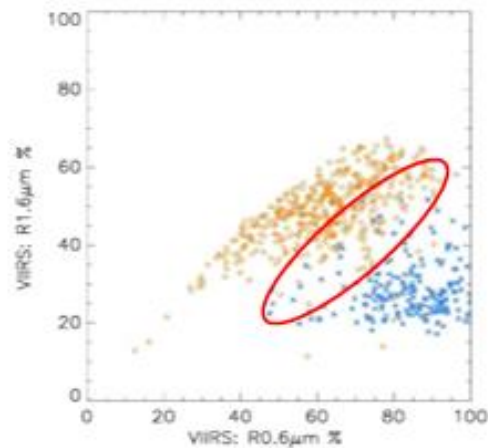
A szimulált reflektivitás a Nap és a műhold megfigyelési irányától is függ. Az olyan típusú ábrák, mint az 5.13. ábrán bemutatott szimuláció, mindig valamilyen iránypárra vonatkoznak. Az iránypár három szöggel írható le: a nap zenitszöge, a műhold megfigyelés zenitszöge és a relatív azimut. Más iránypár esetén a görbesereg helyzete kissé módosul. Az irányokon kívül fontos szerepe van a felszínnek is. A vékonyabb felhők reflektivitása a felhő alatti felszín reflektivitásától is függ. Az 5.13. ábra tenger feletti vízfelhőre vonatkozik (sötét háttér előtti vízfelhő). Vastagabb felhők esetén a megfelelő szögháromszóhoz és fázishoz tartozó görbesereg felhasználható az effektív cseppszugár és optikai vastagság meghatározásához. Vékony felhők esetén a görbék nagyon közel vannak egymáshoz, ebben a tartományban a méretet nem lehet meghatározni. Nagy optikai vastagság értékek kellene ahhoz, hogy a szimulációt megbízhatóan használni lehessen az effektív cseppszugarak származtatásához.



5.13. ábra: Tengerfelszín feletti vízfelhő szimulált reflektivitása a NIR0.8 és NIR0.6 sávokban, különböző optikai vastagságok (t), és effektív cseppszugarak (r) és egy konkrét Nap és műhold megfigyelési irány-pár esetén (Roebeling et al., 2008)

Az 5.14. ábrán a VIS0.64 és NIR1.6 csatornában mért reflektivitás értékeket tüntettek fel. A vízfelhők és jégfelhők reflektivitásait látjuk két különböző színben. E két csatorna reflektivitás méréseiből szórásdiagramot készítve, a különböző fázisú

felhők többnyire elkülönülnek egymástól, de nem teljesen. A piros ellipszissel jelölt terület az átfedési zóna, ez jég- és vízfelhők méréseit is tartalmazza.



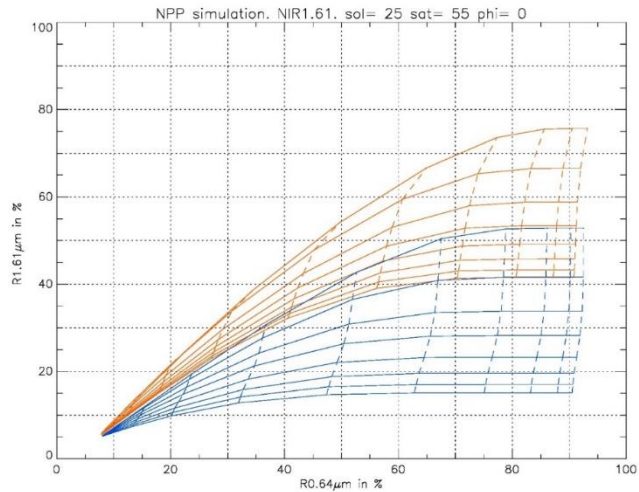
5.14. ábra: Víz és jégfelhők mért reflektivitásai a VIS0.64 és NIR1.6 csatornák tartományában. Narancsszínnel a vízfelhők láthatók (Stratus, Stratocumulus), késsel pedig a jégfelhők (Cumulonimbus, Cirrosstratus) felhők esetén (Le Gléau et al., 2015)

Az 5.13. ábrán csak vízfelhőre vonatkozó szimulációt láttunk. Az 5.15. ábrán víz-, és jégfelhők szimulált reflektivitásai láthatók a VIS0.64 és a NIR1.6 sávokban. Ez a szimuláció az ábrafeliratban feltüntetett iránypárra készült. Az x tengelyen a VIS0.64 csatornára vonatkozó, míg az y tengelyen a NIR1.6 sávra vonatkozó reflektivitás értékeket lehet leolvasni. A narancssárga görbeseregek a vízfelhőkre, a kék görbeseregek a jégfelhőkre vonatkoznak. A vízfelhők görbeseregei feljebb helyezkednek el. A folytonos görbék mentén konstans az effektív cseppsugár, lentről felfelé egyre kisebb cseppsugarak tartoznak hozzájuk. A szaggatott görbék mentén konstans az optikai vastagság.

Felhívjuk a figyelmet, hogy a vízfelhőre és a jégfelhőre vonatkozó görbeseregek átfednek. Ez magyarázza az 5.14. ábra átfedési zónáját.

A felhőtető mikrofizikai paraméterek származtatásához a megfelelő iránypárra vonatkozó szimulációt kell használni. Az ábrán látható, hogy vastag felhők esetén elég távol vannak egymástól a görbék ahhoz, hogy következtetni tudjunk az effektív cseppsugárra, ha a felhő fázisát ismerjük. Vékony felhők esetén a görbék jóval közelebb helyezkednek el, ami nem teszi lehetővé az effektív cseppsugár megbízható becslését.

Ha nem ismerjük a felhő fázisát, akkor a víz-, és jégfelhők görbéinek átfedése miatt nem minden esetben lehetünk biztosak a felhőt alkotó elemek halmazállapotában.

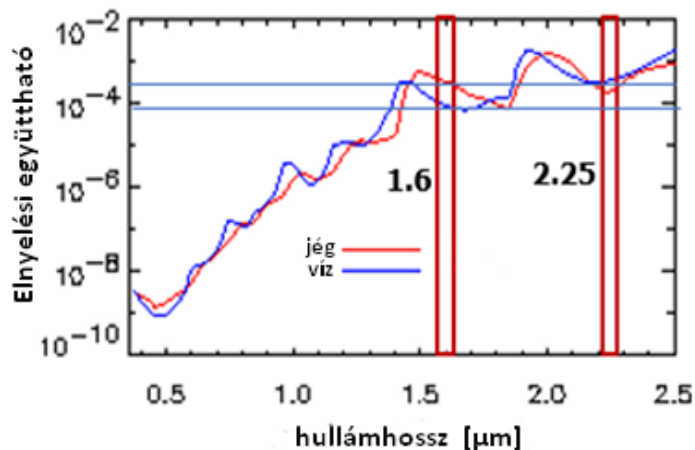


5.15. ábra: Tengerfelszín feletti vízfelhők (narancssárga görbék) és jégfelhők (kék görbék) szimulált reflektivitás értékei a VIS0.64 és NIR1.6 sávokban az optikai vastagság (szaggatott görbék) és az effektív cseppsugár (folyamatos görbék) paraméterek függvényében. (A Nap zenit szöge (sol) 25°, a műhold zenit szöge (sat): 55°, a relatív azimut szög (phi): 0°) [9 – Kerdraon 2016]

5.4 A 2,25 µm-es csatorna tulajdonságai

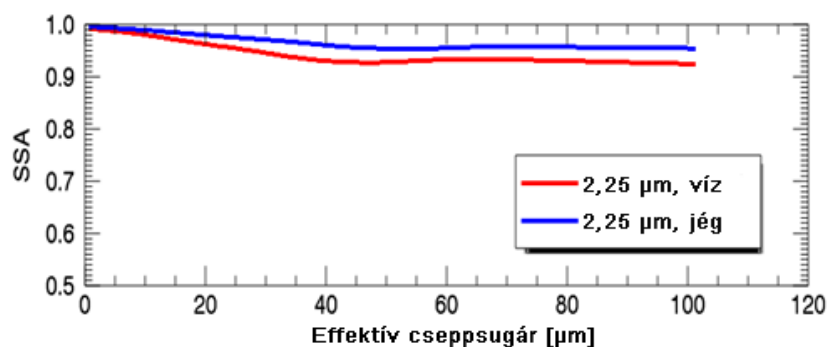
A következő vizsgált csatorna a NIR2.25, ami a Himawari AHI és az MTG FCI berendezések új csatornája. Az 5.16. ábra a víz és jég elnyelési együtthatóit mutatja a hullámhossz függvényében. A NIR2.25 is elnyelő csatorna, itt sem elhanyagolható az elnyelés.

A víz és jég NIR2.25 sávra vonatkozó elnyelési együtthatóit összehasonlítjuk a NIR1.6 sávra vonatkozó elnyelési együtthatókkal. A víz és jég görbéje 2,25 µm-nél közelebb van egymáshoz, mint 1.6 µm-nél. Másik szembevetendő különbség, hogy a NIR2.25 esetében a víz elnyelési együtthatója nagyobb, míg a NIR1.6 sávban a jégé. A víz elnyelése a NIR2.25 sávban erősebb, mint a NIR1.6 sávban. A jég elnyelése viszont a NIR1.6 sávban erősebb, mint a NIR2.25 sávban.



5.16. ábra: Jég (piros görbe) és víz (kék görbe) elnyelési együtthatói a hullámhossz függvényében. A piros oszlopok a NIR1.6 és NIR2.25 sávok tartományát jelölik. [10- Kerkman 2015]

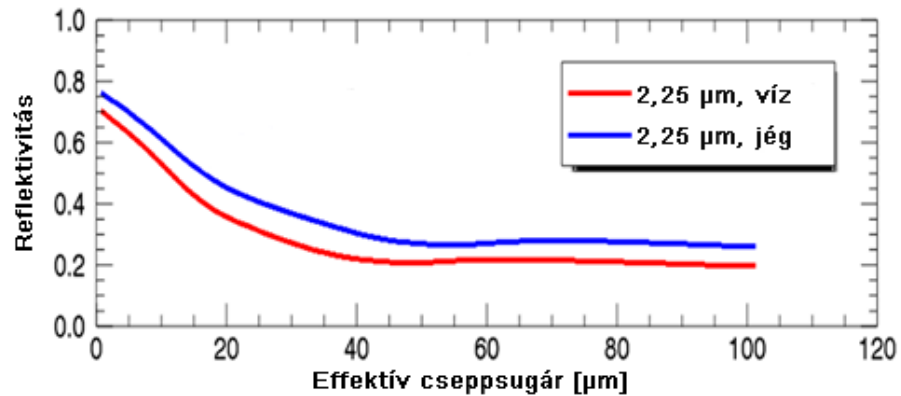
Az 5.17. ábrán NIR2.25 sávra vonatkozó vízfelhő és jégfelhő egyszeres szórási albedója látható az effektív cseppszugár függvényében. Mivel a jég elnyelése gyengébb, mint a víz elnyelése (5.16. ábra), így az egyszeres szórási albedó kisebb vízfelhőre, mint jégfelhőre. Ezt az 5.17. ábrán látjuk is. Az ábra alapján az egyszeres szórási albedó függ a felhőtétőn lévő felhőelemek halmazállapotától és méretétől is. Ezt az ábrát érdemes összevetni az 5.7. ábrával, ami a NIR1.6 sávra szimulált egyszeres szórási albedót mutatja be.



5.17. ábra: Vízfelhő (piros görbe) és jégfelhő (kék görbe) szimulált egyszeres szórási albedója (SSA) a NIR2.25 sávban a felhőtétőn lévő felhőelemek effektív cseppszugara függvényében. (Bennartz et al., 2012/a)

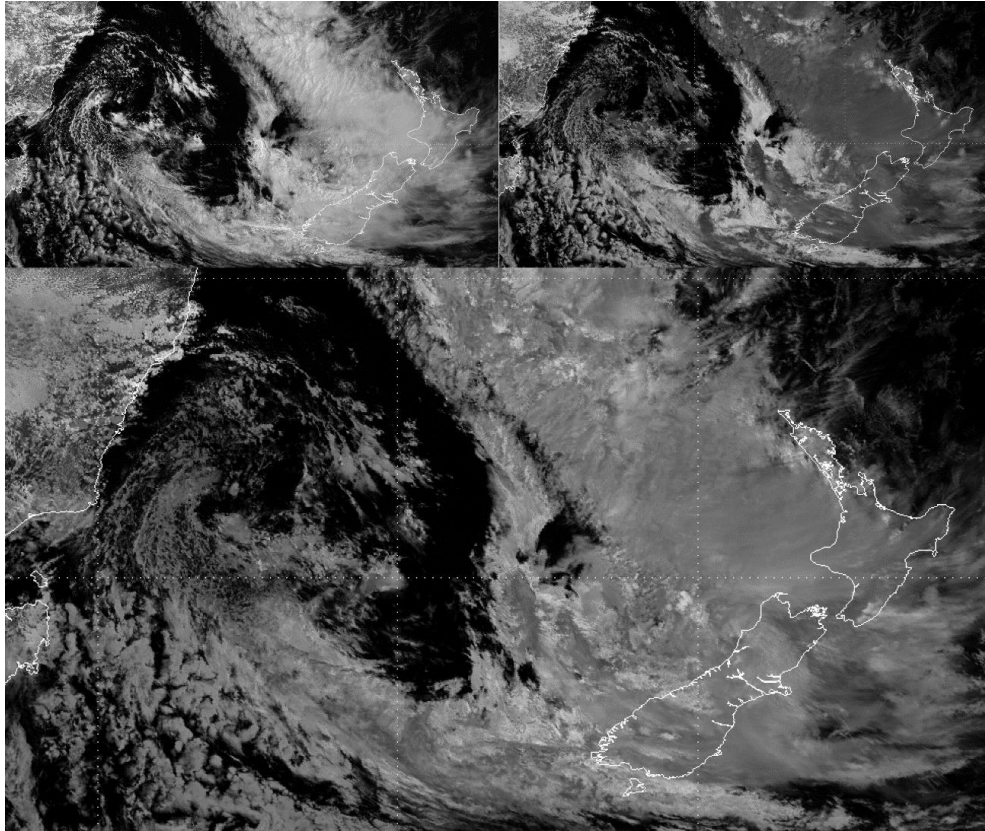
Az 5.18. ábrán a NIR2.25 hullámhossztartományban szimulált reflektivitás látható az effektív cseppszugár függvényében, víz- és jégfelhők esetére külön-külön. A szimulációt optikailag vastag felhőre végezték, valamint konkrét Nap és műhold megfigyelési irányokra. A görbék közel haladnak egymáshoz. A NIR1.6 sávban ez a különbség jelentősebb volt (összehasonlítva az 5.8. ábrával). A NIR1.6 csatornához hasonlóan igaz, hogy a kisebb effektív cseppszugárú felhőrészek reflektivitása nagyobb,

mint a nagyobb effektív cseppszugárúaké. Megállapítható, hogy önmagában nem használható fázis elkülönítésre ez a csatorna (a két görbe közelsége miatt), de a méretparaméterre érzékeny.



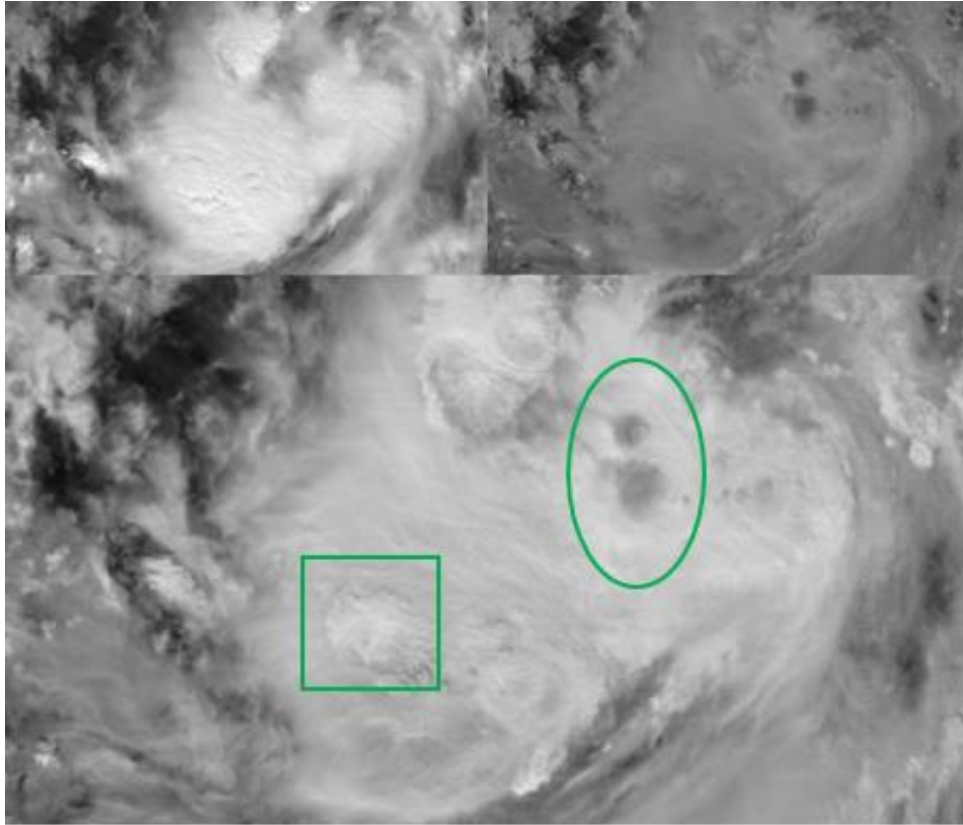
5.18. ábra: Optikailag vastag vízfelhő (piros görbe) és jégfelhő (kék görbe) szimulált reflektivitása a NIR2.25 sávban a felhőtetőn lévő felhőelemek effektív cseppszugara függvényében. (Bennartz et al., 2012/a)

Az 5.19. ábrán a NIR0.86, a NIR1.6 és a NIR2.25 csatornáknál készült műholdképen láthatjuk a 2016-11-14-én Új-Zéland felett lévő ciklont. A NIR2.25 képen gyengébb a kontraszt a különböző halmazállapotú felhők között, mint a NIR1.6 képen. A NIR2.25 képen a részecskeméret eloszlását látjuk leginkább, míg a NIR1.6 műholdkép segítségével azt állapíthatjuk meg könnyebben, hogy hol helyezkedik el víz-, vagy jégfelhő.



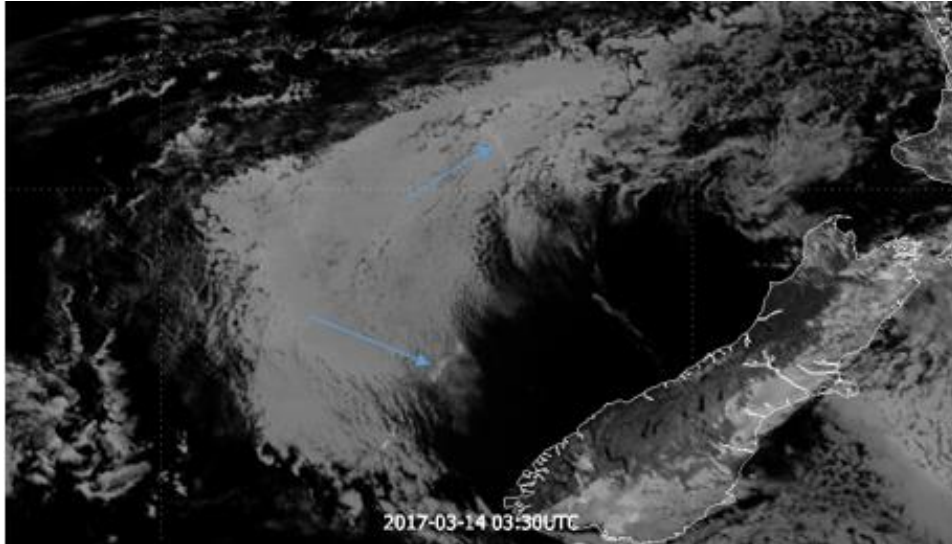
5.19. ábra: 2016-11-14 03:00 UTC-kor Új-Zéland térségében elhelyezkedő ciklonról készült műholdképek: NIR0.86 (bal fenn, 0-100% reflektivitás tartomány), NIR1.6 (jobb fenn, 0-60% reflektivitás tartomány) és NIR2.25 (0-50% reflektivitás tartomány)

Az 5.20. ábrán, 2016-11-04 03:00 UTC-kor a Filippínó-tenger felett elhelyezkedő zivatarrendszert láthatjuk a VIS0.47, NIR1.6 és NIR2.25 sávokban. A területen majdnem kizárólag jégfelhőt látunk. A zöld ellipszissel jelölt területen két ovális, sötét folt látható. A NIR1.6 képből korábban arra következtettünk, hogy itt nagyok a jégkristályok. Ezek a NIR2.25 képen is kis reflektivitású területek, tehát az effektív cseppsugár ezen a területen nagy. Valószínűleg itt két feláramlási csatorna teteje látszik, melyekben olyan erős a feláramlás, hogy igen nagy jégzemeket képes a felhőtetőre szállítani. Ezek súlyuk miatt nem képesek a felhőtetőn maradni, ezért csak a feláramlási csatornában látszódnak, nem terjednek szét a felhőtetőn, a feláramlásból kikerülve gyorsan lejjebb süllyednek. A zöld négyszöggel jelölt területen a mért reflektivitásokból arra lehet következtetni, hogy a felhőtető többi részéhez képest itt valamennyivel kisebb az effektív cseppsugár. Itt egy ellaposodó túlnyúló csúcs helyezkedik el. Az itteni feláramlás kis kristályokat szállított a felhőtetőre. Ezek az apró jégkristályok képesek a felhőtetőn maradni, azon szétterjedni.



5.20. ábra: 2016-11-04 03:00 UTC-kor a Filippínó-tenger felett elhelyezkedő zivatarrendszer, a VIS0.47 (balra fenn), NIR1.6 (jobbra fenn) és NIR2.25 (alul)

Az 5.21. ábrán Új-Zélandtól keletre egy alacsony vízfelhő látható a NIR2.25 sávban. Ez a példa jól szemlélteti a csatorna érzékenységet a részecskeméret különbségek iránt. Nyílt tengerfelszín felett általában nagyobb cseppszugárból álló felhők alakulnak ki a kevesebb kondenzációs mag miatt. A felhőzetben két nyíllal jelölt, a környezetétől elkülönülő világosabb vonal látszódik. Mint láttuk, a vízfelhők reflektivitása a NIR2.25 sávban nagyobb, a kisebb effektív cseppszugárú felhőkre. E két vonal is kisebb effektív cseppszugárú felhőket jelez. A képen látható vonalakat a felhő alatt elhaladó hajók okozzák. Ezek aeroszol kibocsátása miatt több kondenzációs mag kerül a levegőbe, így a hajóút mentén kisebb effektív cseppszugárú felhők képződnek. E folyamat miatt látszódnak a NIR2.25 képen a hajók útvonalai.



5.21. ábra: 2017.03.14.-én Új-Zélandtól keletre lévő felhőzet a NIR2.25 sávban készült műholdképen, (0-45% reflektivitás tartomány). Kék nyilak mutatják a hajó útvonalakat. (Putsay Mária képe)

5.5 A rövidhullámú csatornák együttes felhasználása a 2,25 μm -es csatorna bevonásával

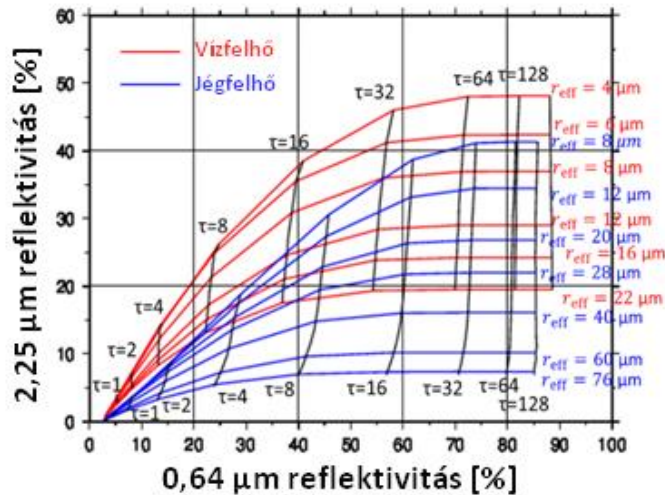
Az 5.3. fejezetben láttuk, hogy egy nem elnyelő csatorna, és egy elnyelő csatorna kombinálásával hogyan ismerhető meg a felhőtető mikrofizika. Azt állapítottuk meg, hogy a halmazállapotok meghatározása bizonyos esetekben problematikus, de a fázis ismeretében, kellően vastag felhő esetén a mért reflektivitásokból következtethetünk a felhő effektív cseppsugarára. A következőkben bevonjuk a vizsgálatba az új NIR2.25 csatornát is.

Az 5.22. ábrán tengerfelszín feletti víz- és jégfelhők szimulált reflektivitásait látjuk a VIS0.64 és NIR2.25 sávokban. A szimuláció egy konkrét iránypárra készült. A piros görbesereg vízfelhőre, a kék görbesereg jégfelhőre vonatkozik.

A színes görbék mentén konstans az effektív cseppsugár. A színes görbék közötti sötétszürke görbék mentén pedig az optikai vastagság a konstans. Víz- és jégfelhő azonos effektív cseppsugarú görbéjét kiválasztva látható, hogy a jégfelhő görbéjéhez tartozó NIR2.25 reflektivitás a nagyobb. Ha optikailag elég vastag felhőket vizsgálunk és ismert a fázisuk, akkor nagy megbízhatósággal meghatározható az effektív cseppsugaruk. Ennél a szimulációnál az azonos fázisú felhő görbeseregében a görbék távolabb vannak egymástól, mint a NIR1.6-tal végzett szimulációnál (5.15. ábra).

Viszont a piros és kék görbesereg átfedése jelentősen nagyobb, mint a NIR1.6 és VIS0.64 csatorna párra végzett szimulációnál (5.15. ábra).

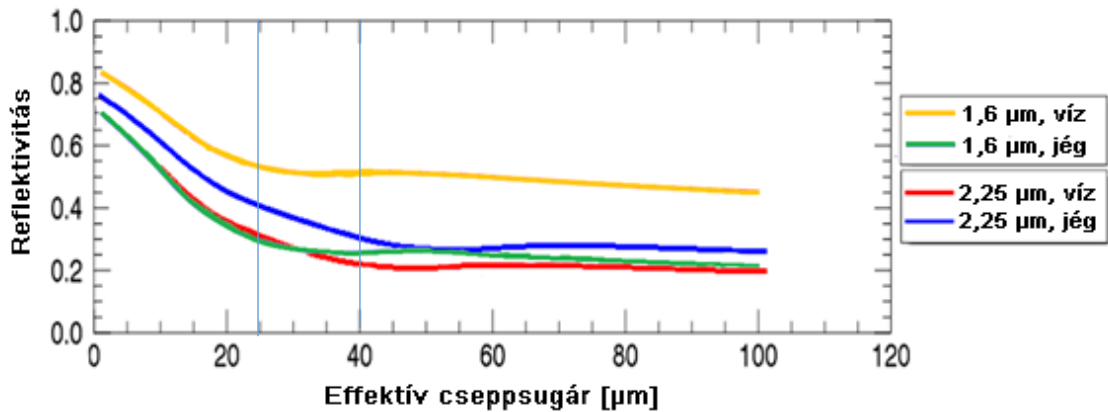
Ezen átfedés miatt a fázis meghatározására nem használható ez a csatorna pár. A NIR2.25 és egy látható tartományú csatorna együtt akkor használható jól az effektív cseppszugár meghatározására, ha már ismerjük a vizsgált felhő fázisát.



5.22. ábra: Tengerfelszín feletti vízfelhők (narancssárga görbék) és jégfelhők (kék görbék) szimulált reflektivitás értékei a VIS0.64 és NIR2.25 sávokban az optikai vastagság (τ) és az effektív cseppszugár (r_{eff}) paraméterek függvényében. (A Nap zenit szöge 25° , a műhold zenit szöge 45° , a relatív azimut szög 110°) (Hayashi et al., 2015)

Az 5.23. ábra segítségével összehasonlítjuk a NIR1.6 és NIR2.25 csatornában az optikailag vastag víz- és jégfelhők reflektivitását (az effektív cseppszugarak függvényében). Láttuk, hogy a NIR1.6 sávban a két fázis görbéje távol van egymástól, míg a NIR2.25 sávban sokkal közelebb vannak egymáshoz. A NIR1.6 sáv érzékenyebb a fáziskülönbségekre.

A NIR1.6 görbéi $\sim 25 \mu\text{m}$ nagyságú effektív cseppszugárig érzékenyek a különböző effektív cseppszugarakra, onnantól a méret befolyása kicsi. A NIR2.25 csatorna esetén $\sim 40 \mu\text{m}$ -ig terjedő tartományban csökkennek folyamatosan a reflektivitás értékek, az effektív cseppszugár növekedésével, mindkét halmazállapot esetében. Csak ezután állnak be konstans értékekre. Így a NIR2.25 csatornában a reflektivitások nagyobb tartományban érzékenyek az effektív cseppszugár értékére.



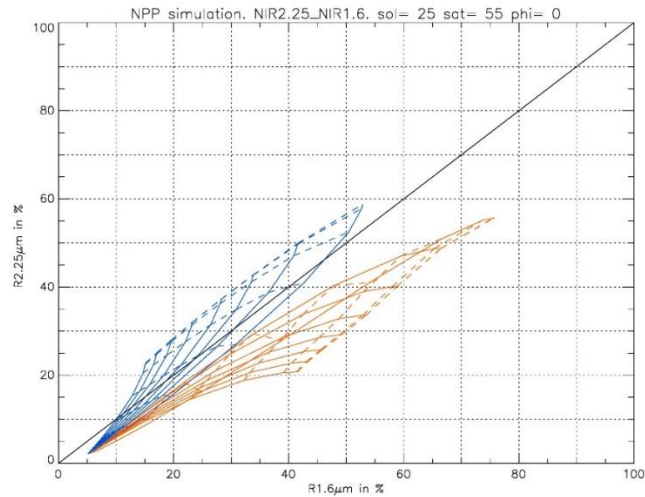
5.23. ábra: Optikailag vastag vízfelhő és jégfelhő szimulált reflektivitása a NIR1.6 és NIR2.25 csatornában az felhőben lévő felhőelemek effektív sugara függvényében. (sárga görbe: vízfelhő reflektivitása az NIR1.6 sávban, zöld görbe: jégfelhő reflektivitása az NIR1.6 sávban, piros görbe: vízfelhő reflektivitása az NIR2.25 sávban, kék görbe: jégfelhő reflektivitása az NIR2.25 sávban) (Bennartz et al., 2012/a)

Mint láttuk egy közeli infravörös és egy látható csatorna párral nem tudjuk minden esetben jól elkülöníteni az optikailag vastag víz- és jégfelhőket. Azonban, mint látni fogjuk, ha a NIR1.6 és NIR2.25 csatornákat együtt használjuk, akkor már sokkal biztosabban szétválaszthatók az optikailag vastag víz- és jégfelhők. Ezt szemlélteti az 5.24. ábra. Ugyanis ekkor a víz- és jégfelhőre vonatkozó görbeseregek között nincs átfedés.

Az 5.24. ábrán tengerfelszín feletti víz- és jégfelhők szimulált reflektivitásait látjuk a NIR1.6 és NIR2.25 sávokban (egy adott iránypárra). A narancssárga görbék a vízfelhőre vonatkoznak, a kékek a jégfelhőre. A folyamatos vonalak mentén az effektív cseppsugár konstans, a szaggatott vonalak mentén az optikai vastagság.

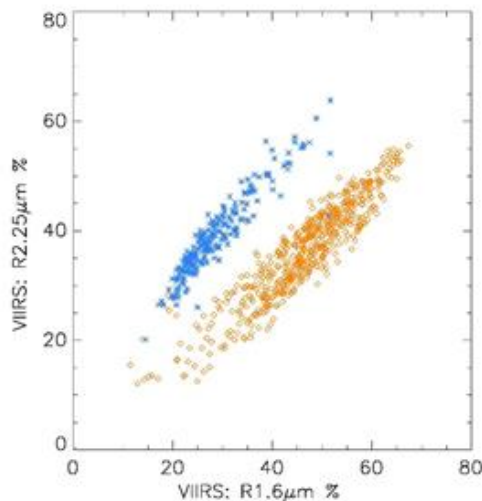
Az ilyen szimulált görbeseregeket (minden lehetséges iránypárra kiszámítva) hatékonyan használhatóak a fázisok elkülönítésére. Majd, már a felhő fázisának ismeretével, a NIR2.25 és VIS0.64 csatornapárra vonatkozó szimuláció felhasználásával lehet az effektív cseppsugarat meghatározni.

Optikailag vékony felhők esetén a fázis meghatározása problematikus lehet.



5.24. ábra: Tengerfelszín feletti vízfelhő (narancssárga görbék) és jégfelhő (kék görbék) szimulált reflektivitás értékei a NIR1.6 és NIR2.25 sávokban az optikai vastagság (szaggatott görbék) és az effektív cseppsugár (folyamatos görbék) paraméterek függvényében. A Nap zenit szöge (sol) 25°, a műhold zenit szöge (sat): 55°, a relatív azimut szög (phi): 0°. (Le Gléau et al., 2015)

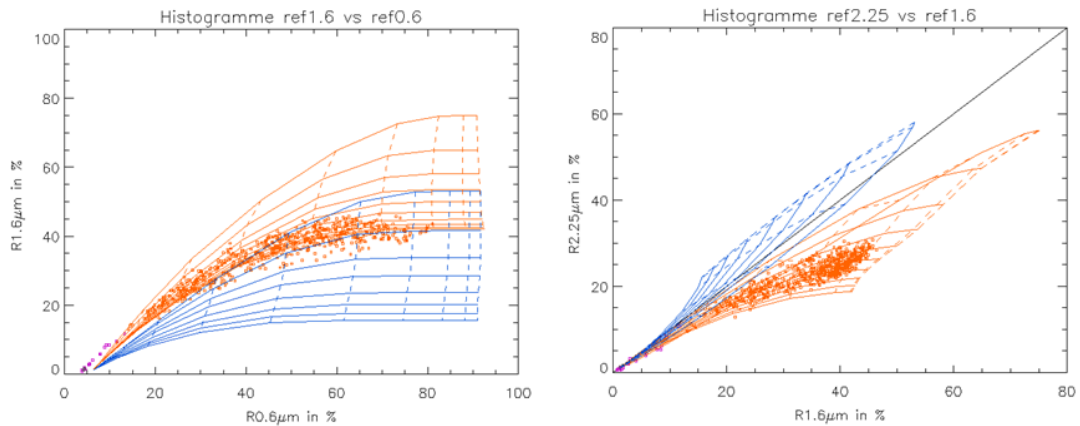
Az 5.25. ábrán vízfelhők és jégfelhők mért reflektivitás értékei láthatók a NIR1.6 és NIR2.25 sávokban. A vízfelhők mért reflektivitásait narancssárga, a jégfelhők mért reflektivitásait kék szimbólumokkal ábrázolták. Az 5.24. ábrán látott szimulációkhoz hasonló eloszlást látunk. A víz- és jégfelhőkre vonatkozó mérések igen jól elkülönülnek. E két csatorna kombinálásával a felhőteten lévő felhőelemek halmazállapota egyértelműen meghatározható.



5.25. ábra: Vízfelhők (narancssárga szimbólumok) és jégfelhők (kék szimbólumok) mért reflektivitás értékei a VIIRS műszer NIR1.6 és NIR2.25 sávjaiban. (Le Gléau et al., 2015)

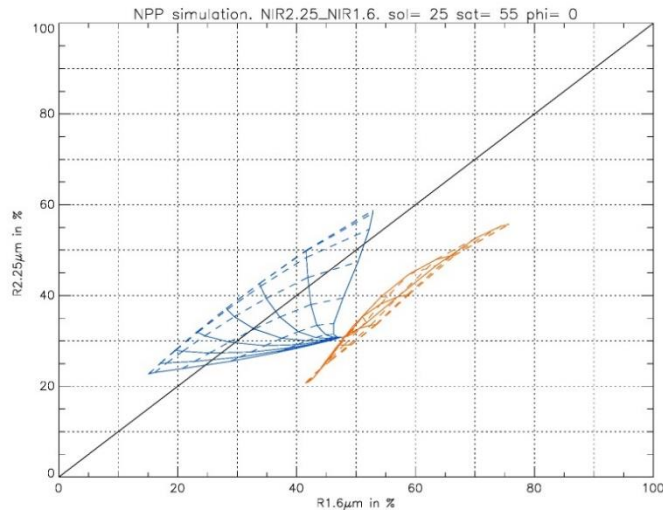
A korábban bemutatott két szimuláció (5.15. ábra és 5.24. ábra) látható az 5.26. ábrán. A szimulált görbeseregeken konkrét Himawari reflektivitás méréseket is ábrázoltak. Bal oldalon a VIS0.64 és NIR1.6 reflektivitásaira végzett szimulációk

görcseregei, jobb oldalon a NIR1.6 és NIR2.25 reflektivitásaira végzett szimulációk görcseregei láthatók. Mindkét eset azonos iránypárra vonatkozik, valamint tenger feletti szimulációk és mérések. A pontok mindkét ábrán azonos felhő mért reflektivitásait mutatják. A bal oldali szimuláció alapján nem határozható meg a felhőtető fázisa, mert a görcseregek átfedési zónájába esnek a mért reflektivitás értékek. A jobb oldali szimuláció alapján viszont egyértelműen látszik, hogy vízfelhő méréseit ábrázolták.



5.26. ábra: Bal oldal: A görbék a VIS0.64 és NIR1.6 csatornák szimulált reflektivitásai, a pontok egy vízfelhő mért reflektivitásai. Jobb oldal: A görbék a NIR1.6 és NIR2.25 szimulált reflektivitásai, a pontok ugyanazon vízfelhő mért reflektivitás értékei. A narancssárga görbék vízfelhőkre, a kék görbék jégfelhőkre vonatkozó szimulációk. [9 – Kerdraon 2016]

A görcseregek alakját a felhő alatti felszín reflektivitása is befolyásolja, különösen az optikailag vékony felhők tartományában (összevetve az 5.24. és az 5.27. ábrákat). Az 5.27. ábrán látható szimuláció nagy reflektivitású, világos felszín (sivatag) feletti felhőkre vonatkozó szimulációt mutatja. (Az is előfordul, hogy a nagy reflektivitású felszín feletti vékony felhő sötétebb lesz a képen, mint a derült terület.) A felszín reflektivitását az a pont mutatja, ahol a jégfelhők és vízfelhők görcseregei összeérnek, ahol a felhő optikai vastagsága nulla. A fázis elkülönülése világos háttér előtt is egyértelmű, de a felhő alatti felszín reflektivitását is ismernünk kell.



5.27. ábra: Nagy albedójú felszín feletti vízfelhő (narancssárga görbék) és jégfelhő (kék görbék) szimulált reflektivitás értékei a NIR1.6 és NIR2.25 sávokban az optikai vastagság (szaggatott görbék) és az effektív cseppszugár (folyamatos görbék) paraméterek függvényében. A Nap zenit szöge (sol) 25°, a műhold zenit szöge (sat): 55°, a relatív azimut szög (phi): 0°. (Le Gléau et al., 2015)

6. Eredmények

Az előző fejezetben bemutattuk azokat a sávokat, melyek információt tartalmaznak a felhőtető mikrofizikáról, és ismertettük azokat a módszereket, melyek segítségével számszerű információ nyerhető ki belőlük. Bemutattuk, hogy mely sávokat kell együtt feldolgozni, hogy az információszerzés a leghatékonyabb legyen.

E fejezetben egy olyan kompozit kép típust mutatunk be, mellyel gyors, vizuális információt kaphatunk a felhőtető mikrofizikáról. A dolgozat célja egy olyan kompozit kép összeállítása, hangolása, leírása és elemzése, amellyel gyors, vizuális információt kaphatunk a felhőtető mikrofizikáról.

A következőkben definiáljuk, ismertetjük ezt a kompozit kép típust: mely csatornákat mely alapszínben jelenítünk meg. Továbbá bemutatjuk az RGB kép hangolását: a csatornák mely reflektivitás tartományait használjuk a kompozit kép készítésénél; hogyan határoztuk meg az optimális tartományokat. A tartományok meghatározása után tárgyaljuk a kompozit kép tipikus színeit. Végül valódi mérések szórásdiagramját hasonlítjuk össze szimulációkkal – ezáltal is ellenőrizve a tipikus színek helyességét.

Saját példákon keresztül mutatjuk be eredményeinket, a tárgyalt kompozit kép tulajdonságait.

6.1 Felhőfázis RGB kompozit kép

Az RGB kompozit képek célja, hogy a színárnyalatok segítségével gyorsan, effektíven kapjunk vizuális információt a légköri képződményekről, a csatornák külön-külön vizsgálata nélkül. Az RGB képeket az időjárás előrejelzők intenzíven használják, amikor műholdképeken vizuálisan követik az időjárási helyzetet. Ehhez minél érthetőbb, egyértelmű, jó minőségű, gyorsan értelmezhető vizuális információra van szükségük. A kompozit műholdképek más szakembernek is hasznosak, amikor esettanulmányukhoz műholdképeket használnak vizuálisan.

Az RGB képek több csatorna kombinálásával állnak elő. Könnyebben és gyorsabban értelmezhető vizuális információt tartalmaznak, mint a csatornák külön-külön. Három csatorna képét jelenítik meg a három alapszínben. Így egy színes képet kapunk. Az optimális RGB kép elérése érdekében a célnak megfelelően kell kiválasztani a csatornákat, és a csatornák képeit külön-külön úgy kell kontrasztosítani, hogy a legjobb eredményt kapjuk: a kompozit képen az elkülönítendő tulajdonságok különböző színnel, jó kontraszttal jelenjenek meg.

A kompozit képen milliányi színárnyalat fordulhat elő. Az egyes objektumok tipikus színeinek ismerete segíti a gyors felismerést. Az általunk hangolt Felhőfázis RGB kompozit kép tipikus színeit a 6.1.2. fejezetben foglaljuk össze.

A Felhőfázis kompozit kép alapötlete Jochen Kerkmanntól (EUMETSAT) származik. Az Ő elgondolása volt, hogy mely csatornákból álljon az új felhőfázisra jellemző RGB kép. Valamint ő javasolta, hogy melyik csatornát melyik alapszínhez rendeljük. Az új kompozit kép hangolásával is kísérletezett, de még nem véglegesítette.

Az új kompozit kép a következő csatornákat jeleníti meg a három alapszínben: a pirosban a NIR1.6, a zöldben a NIR2.25 és egy látható csatorna, a VIS0.47 kerül a kék színbe. A két közeli infravörös csatorna a mikrofizikai jellemzőket tükrözi, míg a látható csatorna a felhők optikai vastagságát. A NIR1.6 és NIR2.25 csatornában mért reflektivitások a felhőtetőn lévő részecskék halmazállapotától és effektív cseppméretétől is függenek. A NIR1.6 reflektivitások elsősorban a halmazállapottól, míg a NIR2.25 reflektivitások elsősorban az effektív cseppmérettől függenek.

2. táblázat: Felhőfázis RGB összetevői

Szín	Csatorna	Információ
Piros	NIR1.6	Mikrofizika (elsősorban a fázis)
Zöld	NIR2.25	Mikrofizika (elsősorban a méret)
Kék	VIS0.47	Felhő vastagság

6.1.1 A Felhőfázis RGB kompozit kép hangolása

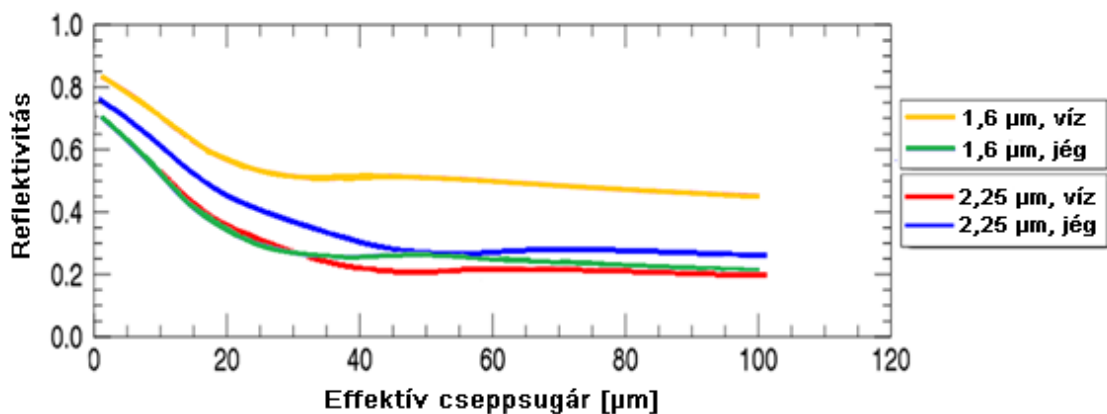
A sávok kiválasztását és színekhez rendelését ugyan megalkották az EUMETSAT-ban az új RGB kompozit képhez, de az optimális reflektivitás tartományok meghatározása még nyitott kérdés maradt, ami most folyó kutatások témája.

Egy RGB kompozit kép akkor ad jó vizuális információt, ha az elválasztandó tulajdonságokat különböző színekben jó kontraszttal jeleníti meg. Az információ effektív megjelenítéséhez ki kell választani azon legszűkebb reflektivitás érték tartományokat, amelyek a láttatni kívánt fizikai tulajdonságokhoz tartozó értékeket még tartalmazzák.

A kiválasztott reflektivitás tartományt jelenítjük meg a hozzárendelt alapszínben. A tartomány alsó határán az alapszín intenzitása nulla lesz, a felső határán pedig maximális. A tartomány minimumánál kisebb reflektivitás értékek nulla, a tartomány maximumánál nagyobb reflektivitás értékek maximális intenzitással fognak megjelenni.

A tartomány megfelelő mértékű szűkítésével elérhető, hogy kellően kontrasztos legyen a kép a különbségek megjelenítéséhez. Ha túl bő a tartomány, akkor a kompozit kép túl sötét, vagy túl világos lehet, ami „elrejt” a lényeges információkat, csökkenti a színekontrasztot. Fontos viszont, hogy ne válasszuk túl kicsire a tartományokat, ne veszítsünk lényeges információt.

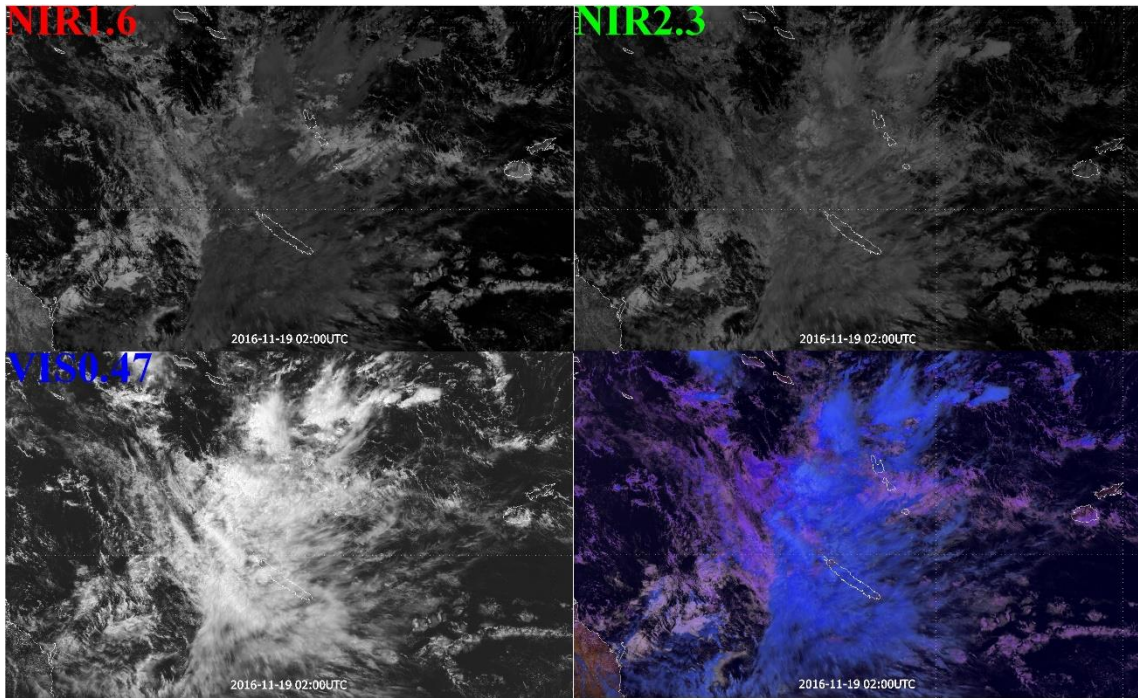
A munka során kísérleteket folytattunk a hangolással, és tanulmányoztuk, hogyan érdemes a tartományokat meghatározni. Ehhez a 6.1. ábrát használtuk fel, ami már korábban is szerepelt (5.23. ábraként). Ez alapján ki kell választani a NIR1.6 és NIR2.25 csatornához azokat a legszűkebb tartományokat, amelyek a számunkra fontos információkat még tartalmazzák. A hangolást sok képen végeztük el, több nap és műhold megfigyelési irányra, hogy ki tudjunk választani olyan optimális tartományokat, amelyek bármely időpontra és területre jó minőségű informatív RGB képet adnak.



6.1. ábra: Víz- és jégfelhő szimulált reflektivitása a NIR1.6 és NIR2.25 csatornában az felhőtetőn lévő felhőelemek effektív sugara függvényében. (Bennartz et al., 2012/a)

A hangolás folyamatát egy 2016.11.19. 2:00 UTC-kor Csendes-óceán felett lévő zivatarrendszer RGB kompozit képén, és megfelelő csatorna képein mutatom be (6.2-6.6. ábrák).

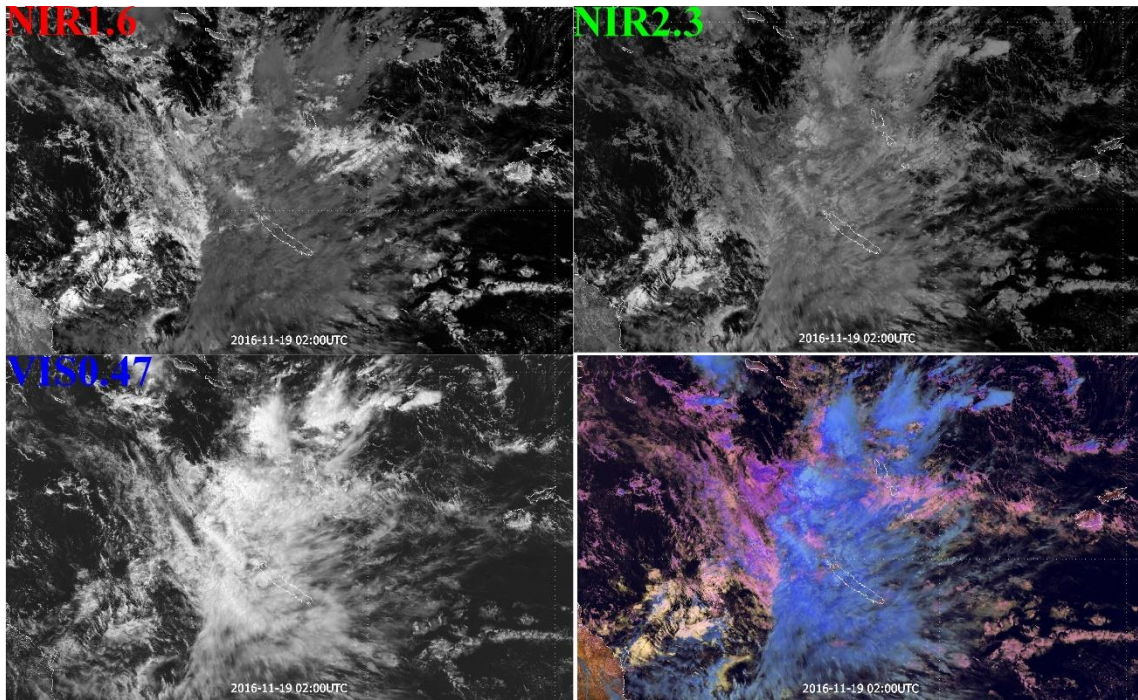
Először a **0-100% reflektivitás tartományt** használtuk mind a három csatorna esetén (6.2. ábra). Ebben az esetben a csatornák reflektivitása egymással jól összehasonlítható. Ezen esetben, csak a VIS0.47 csatornának kontrasztos a képe, a két közeli infravörös sáv sötét. (Az elnyelés miatt a tényleges reflektivitás tartomány ezekben a csatornában szűkebb, lásd 6.1. ábra). A NIR1.6 csatorna képén látható valamennyi kontraszt a jég-, és vízfelhők között. A belőlük alkotott RGB kompozit kép sötét, főleg a láthatóból adódó információk jelennek meg rajta, de nem kizárólag. Gyengén ugyan, de már a NIR1.6 kép hatása is jelentkezik: megfigyelhetünk sötét kékes és sötét lilás árnyalatú felhőket. A 6.1. ábrával összevetve láthatjuk, hogy ezek a jégfelhők és a vízfelhők. A háttérben lévő óceáni felszín fekete. A kompozit kép színekontrasztja nem kielégítő. Tovább vizsgáljuk a hangolás hatását a színekre. Szűkítjük a NIR1.6 és NIR2.25 sávok tartományait.



6.2. ábra: 2016.11.19. 2:00 UTC-kor Csendes-óceán felett lévő zivatarrendszer. Bal fenn – NIR1.6 (0-100% reflektivitás tartomány), Jobb fenn – NIR2.25 (0-100% reflektivitás tartomány), Bal lenn – VIS0.47 (0-100% reflektivitás tartomány), Jobb lenn – a másik három képből elállított RGB kompozit kép.

Következő lépésben mind a két közeli infravörös csatorna reflektivitás tartományát **0-60%-ra** szűkítettük. Ezzel a ritkábban elforduló, 60%-nál magasabb értékeket a maximumhoz rendeltük hozzá. Ily módon mind a NIR1.6, mind a NIR2.25 képek kontrasztosabbá váltak. Az alsó határt nem változtatjuk, mert pl. a derült tenger reflektivitása nulla közeli. A VIS0.47 sáv reflektivitás tartományát sem változtatjuk. Ez a kép már elég kontrasztos. Ennek további szűkítésével már fontos információt veszítenénk.

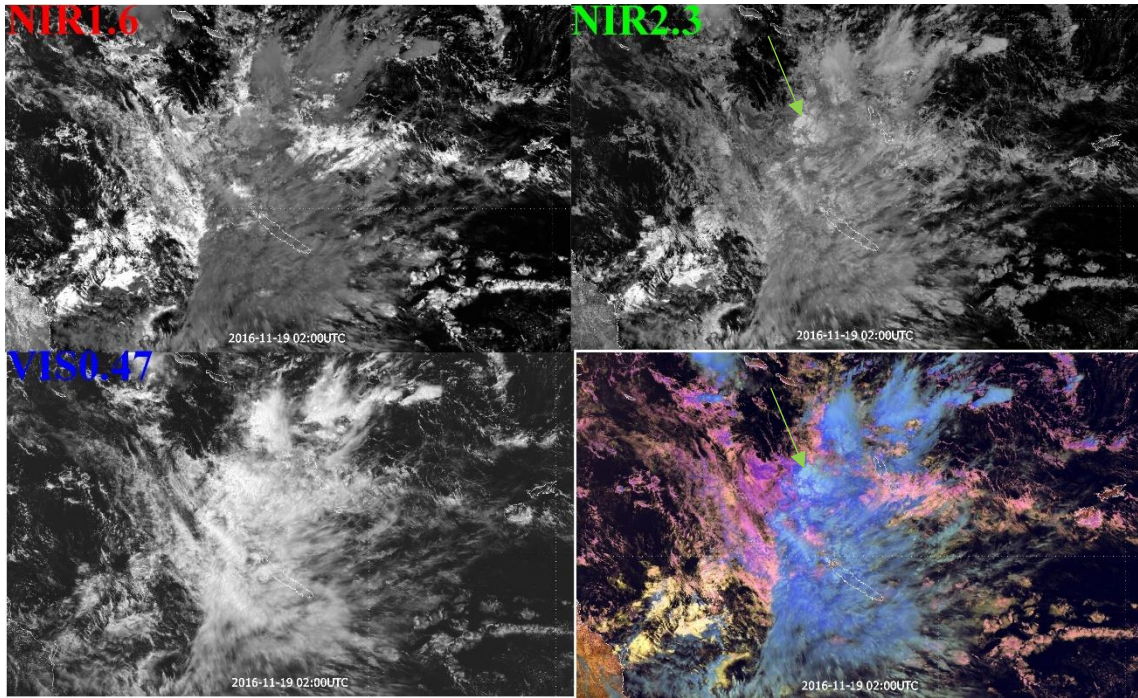
Mind a két közeli infravörös sáv kontrasztosabb lett (6.3. ábra). Az így előállított RGB kompozit képen feltűnőbben különülnek el a kékes jégfelhők a rózsaszínes, lilás, sárgás árnyalatú vízfelhőktől. A vízfelhőkön belül feltűnőbbé váltak az árnyalatnyi különbségek (lila, rózsaszín, sárga) és a jégfelhőknél is többféle kék árnyalatot látunk. A kompozit képen a kék árnyalatú jégfelhőktől nyugatra lévő vízfelhők az előző esetben még nem különültek el szignifikánsan a jégfelhőktől. Ezen szűkítéssel már kezdenek a különbségek látszódni, de még tovább szeretnénk növelni a kontrasztot.



6.3. ábra: 2016.11.19. 2:00 UTC-kor Csendes-óceán felett lévő zivatarrendszer. Bal fenn – NIR1.6 (0-60% reflektivitás tartomány), Jobb fenn – NIR2.25 (0-60% reflektivitás tartomány), Bal lenn – VIS0.47 (0-100% reflektivitás tartomány), Jobb lenn – a másik három képből elállított RGB kompozit kép.

A közeli infravörös csatornák reflektivitás tartományát még tovább szűkíthetjük: **0-50%-ra** (6.4. ábra). A szűkítés célja, hogy minél finomabb méretkülönbségeket tudjunk megkülönböztetni. A 6.1. ábra alapján a NIR1.6 csatornában a vízfelhők reflektivitása általában meghaladja, vagy közel van az 50%-hoz. Tehát a 0-50% reflektivitás tartományt használva a vízfelhők színében a piros komponens közel lesz a maximumhoz. Ezzel ugyan a piros komponens vízfelhők esetében kevesebb méretre vonatkozó információt tartalmaz, viszont a zöld színek komponens méretre vonatkozó információját jobban kidomborítjuk. A piros színek komponens a fázisról hordoz információt: vízfelhőnél maximum közeli a piros komponens erőssége, jégfelhőknél (az extrém kis kristályokból álló felhőket leszámítva) jóval alacsonyabb. Vízfelhő esetén a méretre vonatkozó információt főleg a zöld komponens erőssége fogja hordozni a kompozit képben.

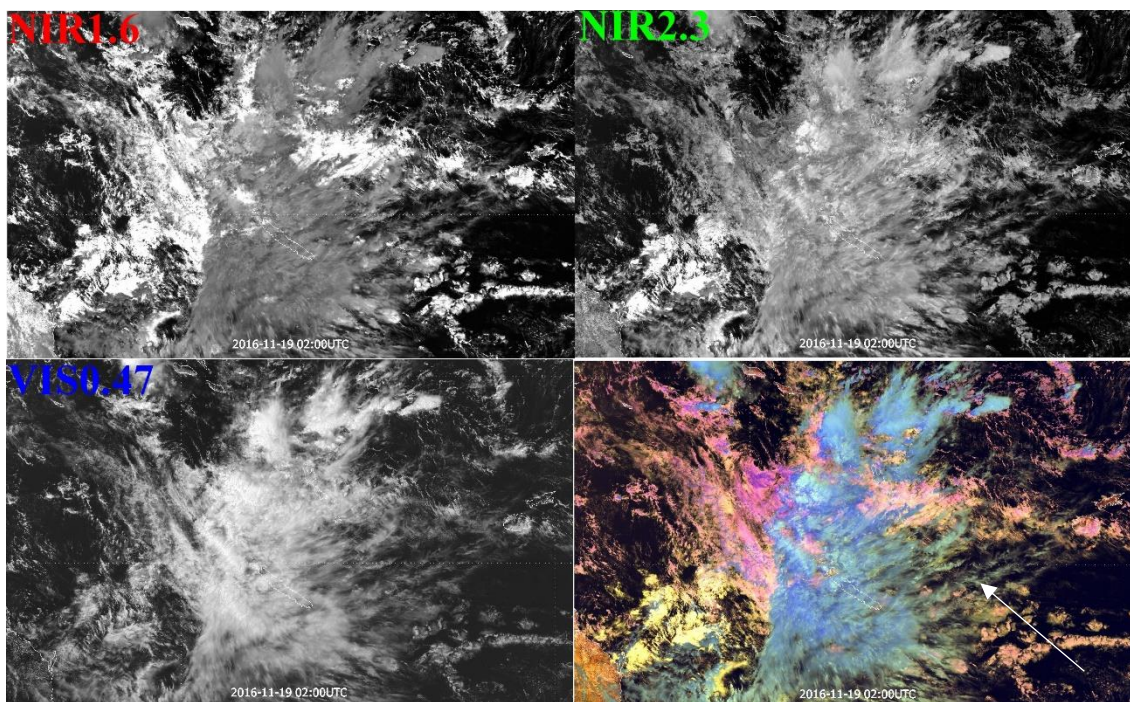
A NIR2.25 képet vizsgálva láthatjuk, hogy egyre kontrasztosabb a kép, pl. a zöld nyíllal jelölt terület most határozottabban válik el a környezetétől. A vízfelhők közötti színárnyalat különbségek egyre feltűnőbbek. Mivel az RGB kép még mindig kissé sötét, és a NIR2.25 sáv még mindig nem elég kontrasztos, ezért kísérleteztünk a tartományok további szűkítésével.



6.4. ábra: 2016.11.19. 2:00 UTC-kor Csendes-óceán felett lévő zivatarrendszer. Bal fenn – NIR1.6 (0-50% reflektivitás tartomány), Jobb fenn – NIR2.25 (0-50% reflektivitás tartomány), Bal lent – VIS0.47 (0-100% reflektivitás tartomány), Jobb lent – a másik három képből elállított RGB kompozit kép.

A NIR1.6 és NIR2.25 sávok tartományát **0-40%-ig** lecsökkentettük (6.5. ábra). A NIR2.25 kép kontrasztosabb lett, még jobb méreti differenciálódást kaptunk. A NIR1.6 képen még kontrasztosabban különül el a jégfelhő a derült felszíntől és a vízfelhőktől, viszont a vízfelhők ilyen tartományon megjelenítve „telítődnek”, ugyanis reflektivitás értékeik többnyire meghaladják a 40%-ot (6.1. ábra).

Az **RGB kompozit kép** is kontrasztosabbá vált. Az optikailag vastag jég- és vízfelhők világosabbak és strukturáltabbak lettek, így jobban kivehető a mikrofizika. A **vízfelhőn** belüli színárnyalatok a zöld és a kék komponensekből származnak: a zöld komponens tükrözi a felhőtető részecskék effektív méretét, míg a kék az optikai vastagságot, a piros pedig a fázist. A **jégfelhők** színeiben szembetűnő a változás. A jégfelhők árnyalatai között határozottan javult a szíkontraszt. Jobban elkülönül a kisebb jégkristályokat jelző világoskék szín a nagyobb jégkristályokat jelző sötétkéktől. Több kékes árnyalat jelent meg a jégfelhők tetején. A türkizes zöld színben megjelenő vékony jégfelhők (fehér nyíllal jelölve a 6.5. ábrán) jobban elkülönülnek a vastag jégfelhőktől, mint amikor nagyobb tartományokkal dolgoztunk.



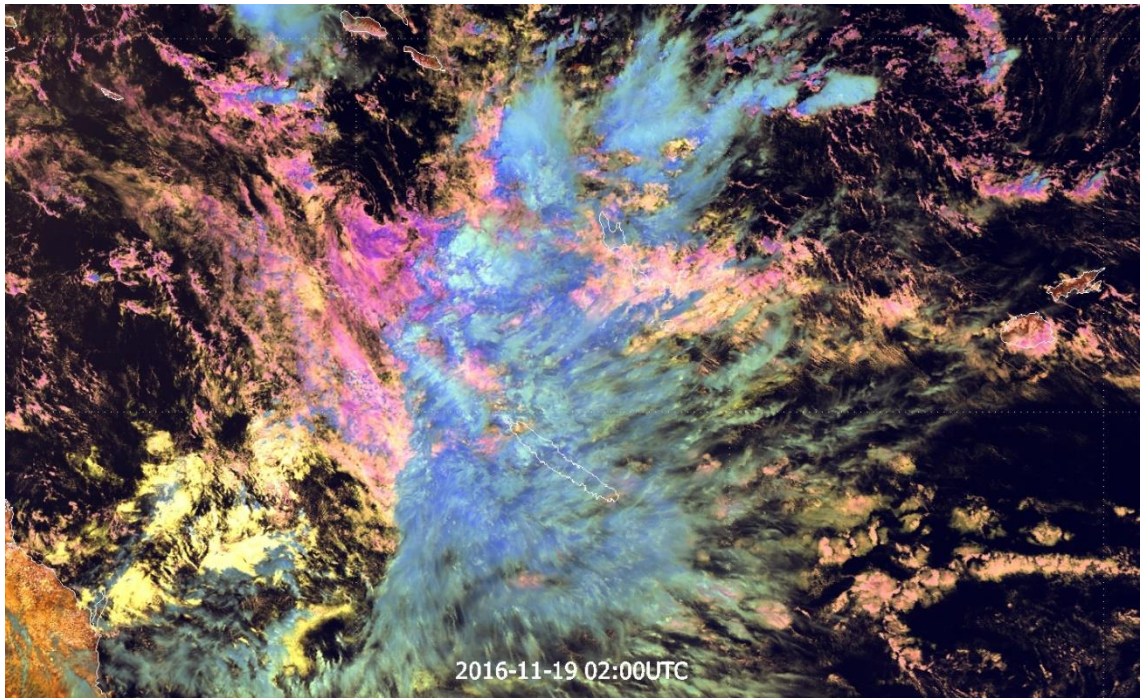
6.5. ábra: 2016.11.19. 2:00 UTC-kor Csendes-óceán felett lévő zivatarrendszer. Bal fenn – NIR1.6 (0-50% reflektivitás tartomány), Jobb fenn – NIR2.25 (0-50% reflektivitás tartomány), Bal lenn – VIS0.47 (0-100% reflektivitás tartomány), Jobb lenn – Felhőfázis RGB kompozit kép.

Ha a közeli infravörös sávok reflektivitás tartományát még tovább szűkítjük, akkor már értékes információt veszünk. Több képen és nap, illetve műholdirányra végzett számos kísérlet után úgy látjuk, hogy az alábbi reflektivitás tartományok (3. táblázat) használata az optimális.

3. táblázat: A felhőfázis RGB kompozit kép előállításának „receptje”

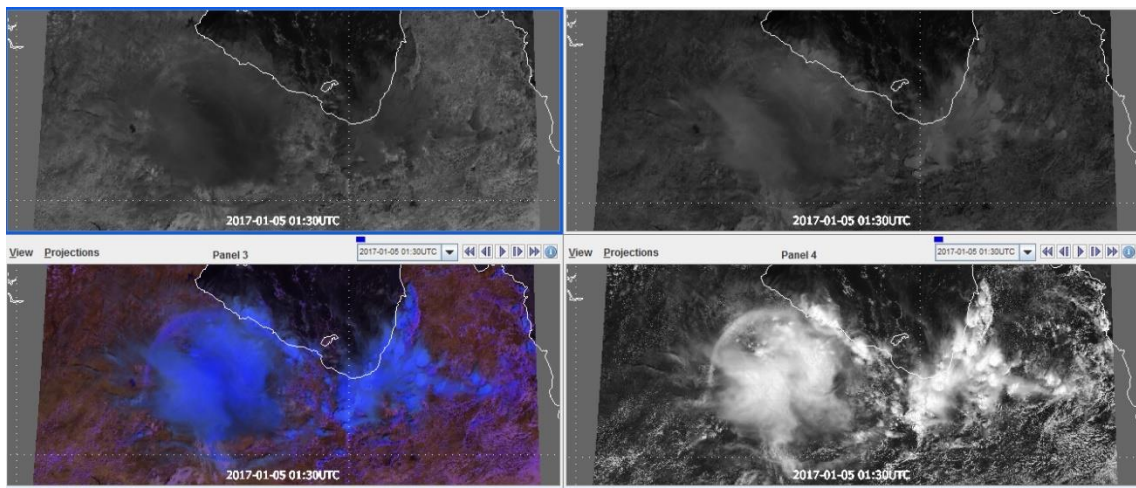
Szín	Csatorna	reflektivitás tartomány
Piros	NIR1.6	0-40 %
Zöld	NIR2.25	0-40 %
Kék	VIS0.47	0-100 %

A 6.6 ábra mutatja be a hangolás utáni, a fenti „recept” alapján előállított Felhőfázis RGB kompozit képet. A felhőzet jól elkülöníthető a sötét háttértől. Megállapítható a rengeteg színárnyalat révén, hogy sok különböző mikrofizikájú felhő (részlet) van a képen. (E példát a következő fejezetben a tipikus színek bemutatásánál is fel fogjuk használni.)

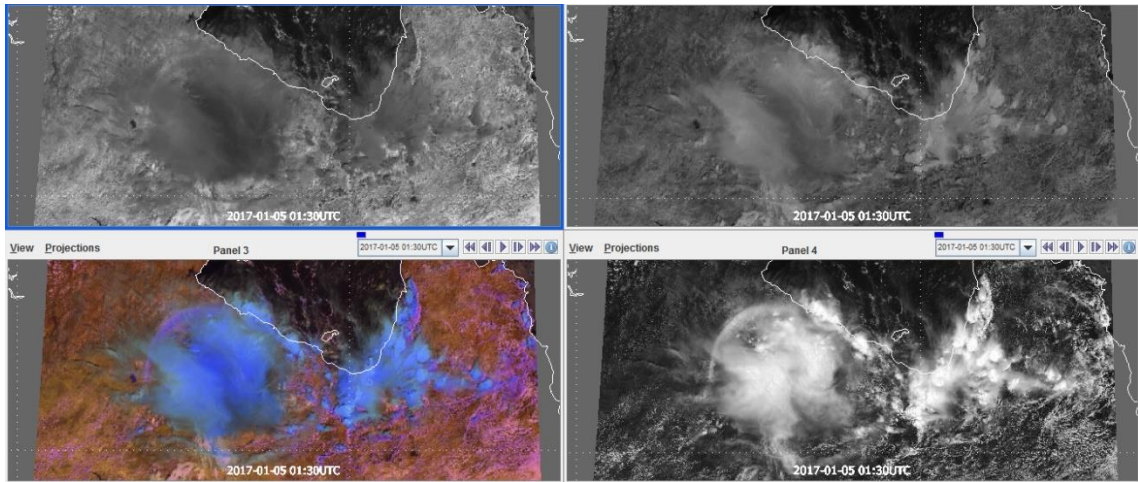


6.6. ábra: 2016.11.19. 2:00 UTC-kor Csendes-óceán felett lévő zivatarrendszer Felhőfázis RGB kompozit képe.

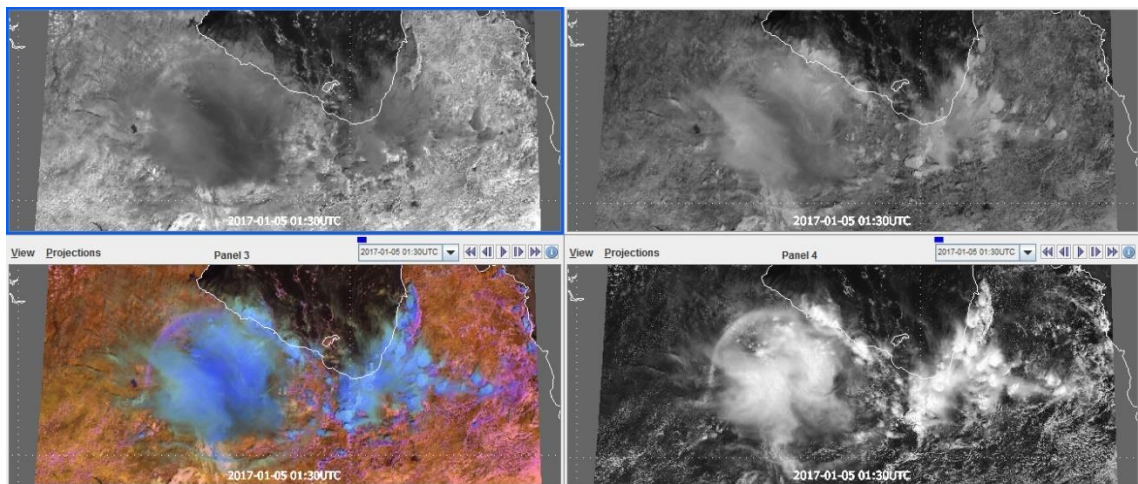
Az RGB kép hangolásához sok esetet vizsgáltam. Még egy esetet bemutatok (6.7-6.10. ábrák). Itt a felhők sivatag felett helyezkednek el, és közülük sok optikailag vékony. Az előzőekben végig kísért folyamatot erre az esetre is elvégeztem. A kész RGB kompozit képet fogom elemezni, a tartomány szűkítés lépéseit külön-külön nem.



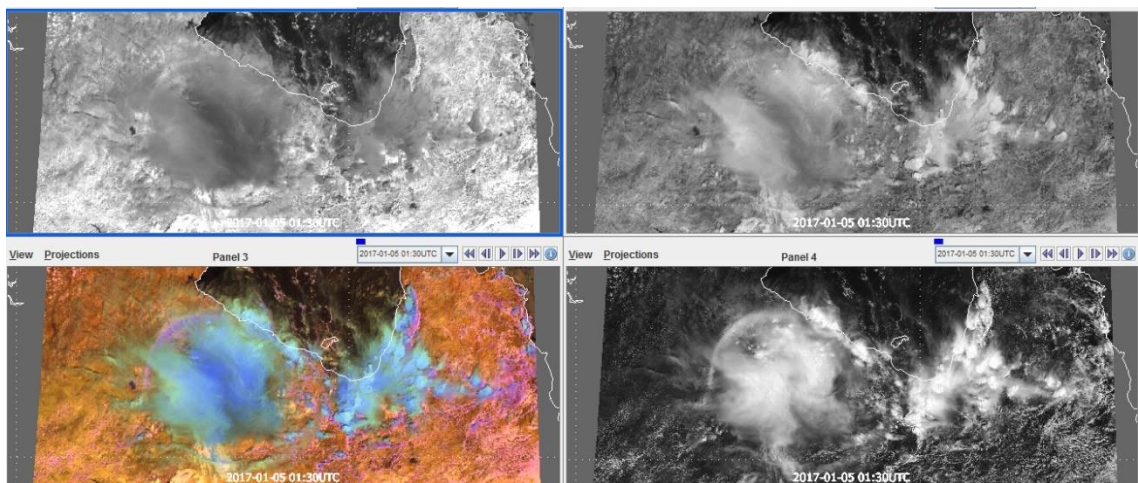
6.7. ábra: 2017-01-05 1:50 UTC-kor Ausztráliában lévő zivatarrendszer. Bal fenn – NIR1.6 (0-100% reflektivitás tartomány), Jobb fenn – NIR2.25 (0-100% reflektivitás tartomány), Bal lenn – a másik három képből elállított RGB kompozit kép, Jobb lenn – VIS0.47 (0-100% reflektivitás tartomány)



6.8. ábra: 2017-01-05 1:50 UTC-kor Ausztráliában lévő zivatarrendszer. Bal fenn – NIR1.6 (0-60% reflektivitás tartomány), Jobb fenn – NIR2.25 (0-60% reflektivitás tartomány), Bal lenn – a másik három képből elállított RGB kompozit kép, Jobb lenn – VIS0.47 (0-100% reflektivitás tartomány)

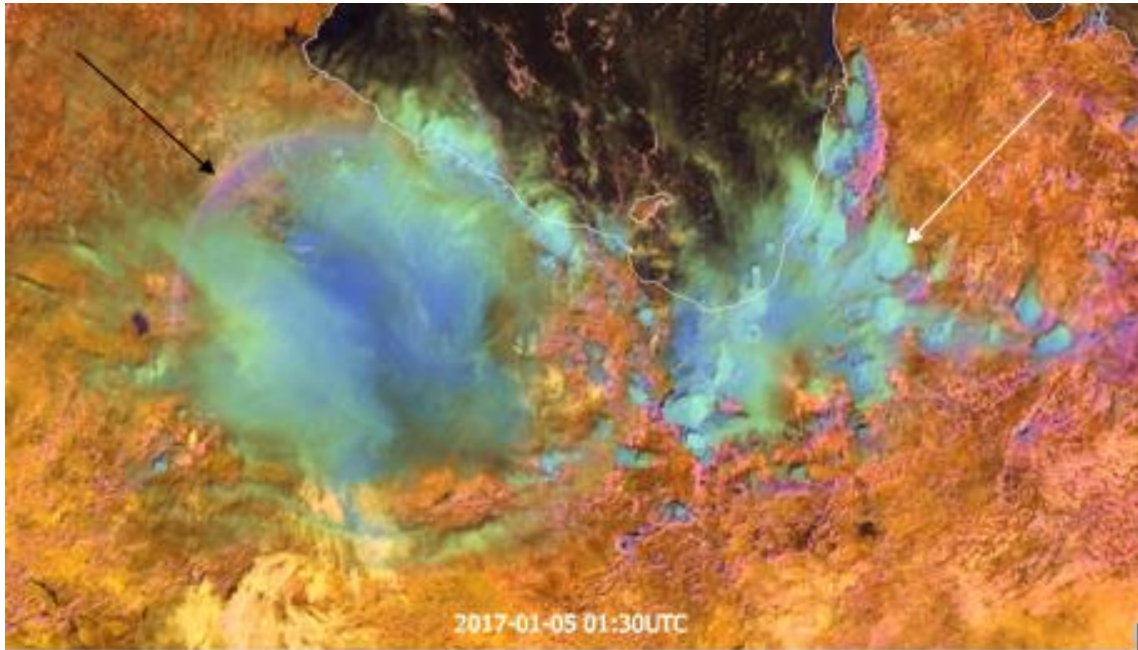


6.9. ábra: 2017-01-05 1:50 UTC-kor Ausztráliában lévő zivatarrendszer. Bal fenn – NIR1.6 (0-50% reflektivitás tartomány), Jobb fenn – NIR2.25 (0-50% reflektivitás tartomány), Bal lenn – a másik három képből elállított RGB kompozit kép, Jobb lenn – VIS0.47 (0-100% reflektivitás tartomány)



6.10. ábra: 2017-01-05 1:50 UTC-kor Ausztráliában lévő zivatarrendszer. Bal fenn – NIR1.6 (0-40% reflektivitás tartomány), Jobb fenn – NIR2.25 (0-40% reflektivitás tartomány), Bal lenn – Felhőfázis RGB, Jobb lenn – VIS0.47 (0-40% reflektivitás tartomány)

A 6.11 ábra mutatja a hangolás végeredményét. A kép bal oldalán egy feloszló fázisában lévő zivatar látszódik. Ennek kifutó szele hatására, a zivatar hideg légtömegének határán egy vízfelhő sáv alakult ki a zivatartól északnyugatra (fekete nyíllal jelölve). A kép jobb oldalán újabb kipattanó cumulusok és zivatarok láthatók (fehér nyíllal jelölve).



6.11. ábra: 2017-01-05 1:50 UTC-kor Ausztráliában lévő zivatarrendszerről készült Felhőfázis RGB kompozit kép.

6.1.2 A Felhőfázis RGB kompozit kép tipikus színei

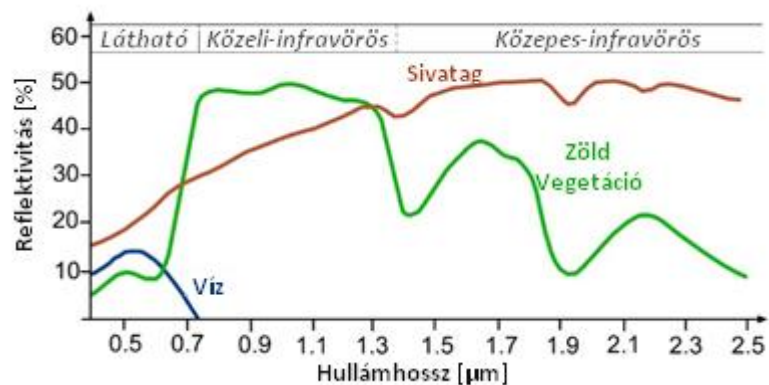
Mint a hangolás során is láttuk, a Felhőfázis RGB kép minőségi vizuális információt nyújt, amely a felhőtető mikrofizika effektív megismerésére használható. Az RGB kompozit kép elkészítésével sok árnyalat adódik, de a gyakori színek ismeretével gyorsan értelmezhetők az árnyalatok.

A kompozit kép használatát megkönnyíti a tipikus színek táblázatos összefoglalása. Megjegyezzük, hogy a színárnyalatok függenek a hangolástól, azaz attól, hogy milyen reflektivitás tartományokat használtunk a kép előállításánál. A következőkben összeállítunk egy tipikus szín ismertetőt, amely a 3. táblázatban bemutatott tartományokkal előállított RGB kép típusra vonatkozik.

Először a **derült felszínek** tipikus színeit tárgyaljuk. A 6.13. ábrán Ausztrália látható, az ábra jobb felső sarkában pedig a kontinens vegetációjának eloszlását látjuk (egy másik műhold képe, amin a növényzet zöld színű). A színek értelmezéséhez

segítségként a 6.12. ábrát használjuk majd, amin három különböző felszín reflektivitása látható a hullámhossz függvényében.

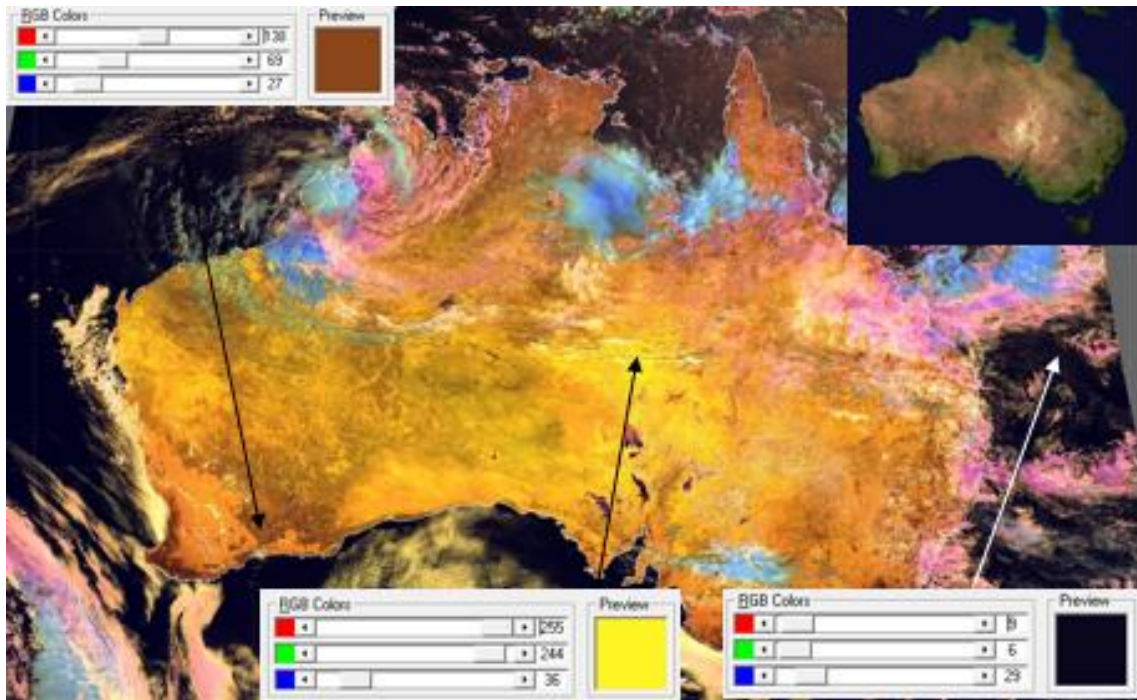
Ausztráliában a szárazföld nagy része *sivatag* és félsivatag, amik a Felhőfázis kompozit képen sárga, sárgás-barna színnel jelennek meg. A 6.12. ábrán a sivatag reflektivitása meghaladja a 40%-ot a két közeli infravörös csatornában, vagyis a piros és zöld szín erőssége (közel) maximális lesz. A VIS0.47 sávban a sivatag reflektivitása 10 és 20% közötti, tehát a kék szín erőssége gyenge sivatagi területeken. Emiatt lesz az RGB kompozit képen a sivatag sárgás árnyalatú.



6.12. ábra: A vízfelszín, a sivatag és a zöld vegetációval borított területek reflektivitása a hullámhossz függvényében. [11 – SEOS]

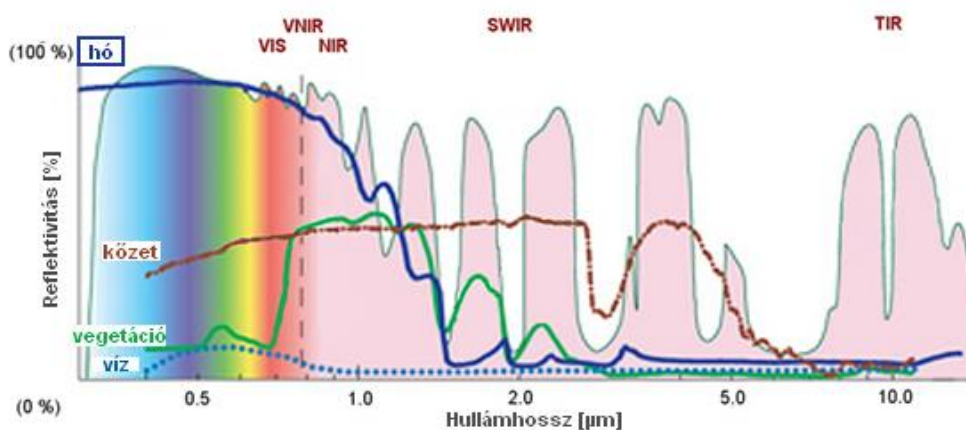
Ausztráliában a partvidékek felé egyre több a *növényzet*. A 6.12. ábra alapján a zöld növényzet reflektivitása a VIS0.47 csatornában 10% alatti, a NIR1.6 csatornában 30% körüli és a NIR2.25 sávban 20% körüli. Egy pixel reflektivitása attól függ, hogy mennyire borított a felszín zöld növényvel. Ezen kívül a növény fajtájától is függ. Ha nem teljesen borított a terület, akkor a talaj tulajdonságaitól is függ. Egy zöld növényvel teljesen borított terület barna a Felhőfázis RGB képen a piros összetevő a legerősebb, a zöld valamivel gyengébb és a kék még gyengébb.

A tavak, *tengerek* a 6.13. ábrán is látható fekete háttérrel alkotják, mert mindhárom tartományban kicsi a reflektivitásuk (kivéve naptükrözés, vagy alacsony napállás esetén).



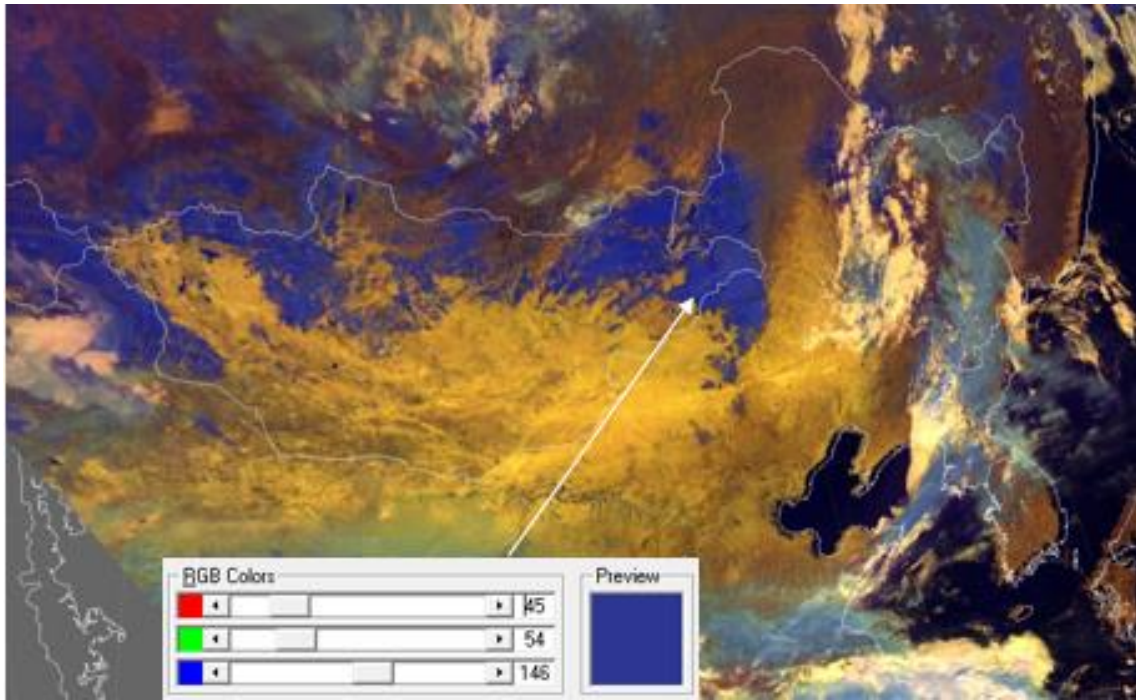
6.13. ábra: 2017-01-05 1:50 UTC-kor Ausztrália Felhőfázis RGB kompozit képe.

A Felhőfázis RGB kompozit képeken a **hó** tipikus színe sötétkék. A látható csatornában nagy a hó reflektivitása, így a kék színek komponens erős. A 6.14. ábrán látható, hogy mind a NIR1.6, mind a NIR2.25 sávban a hó reflektivitása igen alacsony, még a 0-40% tartományban is. Ezért lesznek a hóval borított felszínek sötétkékek (6.15. ábra).



6.14. ábra: A hóval borított felszín, a sziklás felszín, a vegetáció és a vízfelszín reflektivitása a hullámhossz függvényében. [12 – SEVIRI RGB Cal]

A 6.15. ábrán Mongólia északi részén látható hóval borított terület a Felhőfázis RGB képen. Ezen területek sötétkékek jelennek meg. Mongóliától keletre, Kína északi területein is látható, hogy vannak hóval borított területek, de ezek egy részét felhőzet borítja.



6.15. ábra: 2017-03-12 4:20 UTC-kor Mongóliáról és a környező területekről készült Felhőfázis RGB kompozit kép. (Putsay Mária képe)

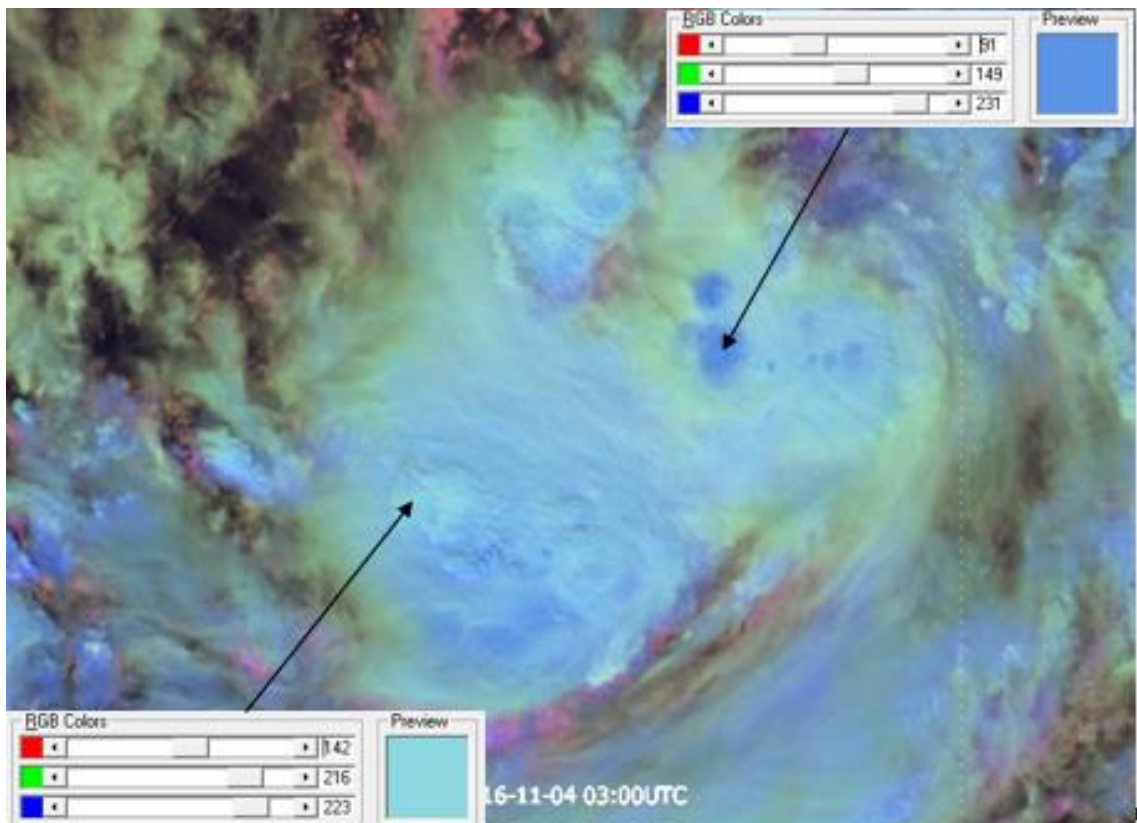
A **felhők** tipikus színeinek bemutatásával folytatom. A jég-, és vízfelhőket külön tárgyalom, és ezeket optikai vastagságuk alapján is külön mutatom be. Az **optikailag vastag jégfelhők** tipikus színe kék (esetleg türkizes kék) árnyalatú. Az árnyalatbeli különbségeket a jégfelhő tetején főleg a részecskék mérete okozza. A VIS0.47 sávban a reflektivitás, vagyis a kék színek komponens, a részecskemérettől függetlenül erős, a nagy optikai vastagság miatt.

Az *optikailag vastag, nagy jégkristályokból* álló felhők piros színek komponense tipikusan közepesen erős, míg a kék színek komponens valamennyivel erősebb, de nem erős (lásd a 6.16. ábrán a felső nyíllal jelölt terület színét). A 6.1. ábra alapján a NIR1.6 és NIR2.25 csatornában a jégfelhő reflektivitása a 0-40% tartomány közepe táján van, míg a VIS0.47 csatornában a 0-100% tartomány tetején helyezkedik el.

Az *optikailag vastag, kisebb jégkristályokból* álló felhők reflektivitása nagyobb mindkét közeli infravörös csatornában. Minél kisebb az effektív cseppsugár, annál nagyobb reflektivitású a jégfelhő a NIR1.6 és a NIR2.25 sávokban. A NIR1.6 és NIR2.25 csatornában a reflektivitás értékek a 0-40 % tartomány tetejéhez közelítenek (6.1. ábra). A NIR2.25 sávban nagyobb a reflektivitás, mint a NIR1.6 sávban (6.1. ábra), ezért a zöld színek komponens valamivel erősebb, mint a piros. Minél kisebbek a

jégkristályok a jégfelhő tetején, annál világosabb (türkizes) kék a Felhőfázis RGB kompozit képen a jégfelhő (lásd a 6.16. ábrán az alsó nyíllal jelölt terület színét).

A 6.16. ábrán a 2016-11-04 3:00 UTC-kor a Filippínó-tenger felett lévő zivatarról készült Felhőfázis RGB kompozit képet látjuk, melyet az 5. fejezetben már tárgyaltunk. A világos türkizkék terület a felhő nyugati felében kis effektív cseppszugarú, míg a keleti részben megjelölt terület nagyobb részecskékből áll. A nyíllal jelölt ovális alakú nagyméretű jégkristályokból álló terület valószínűleg feláramlási csatorna teteje. Erre egyrészt az alakja utal, valamint az is, hogy ekkora jégkristályokat leginkább egy feláramlás tud egy fiatal aktív zivatarfelhő tetejére szállítani. Ezen jégkristályok súlyuk miatt nem sokáig maradnak a felhőtetőn. A másik nyíllal jelölt területen kicsi jégkristályokat szállított a feláramlás a felhőtetőre, amelyek szétáramlanak a felhő tetején.



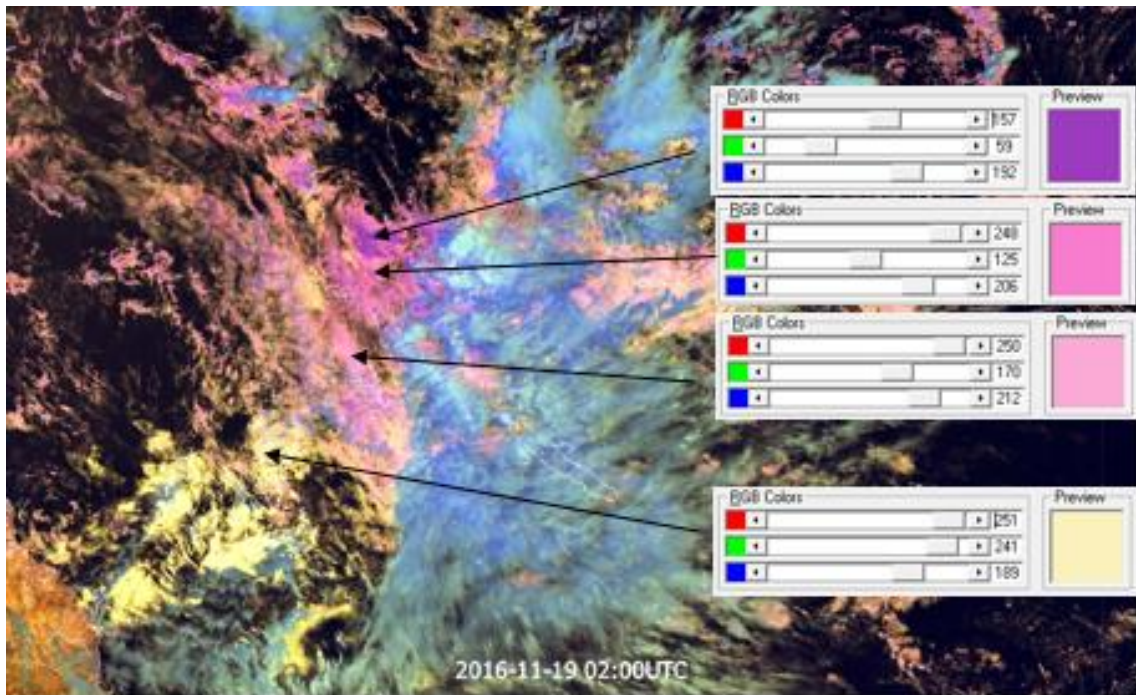
6.16. ábra: 2016-11-04 3:00 UTC-kor a Filippínó-tenger felett lévő zivatarról készült Felhőfázis RGB kompozit kép.

A következő példán a **vastag vízfelhők** tipikus színeit vizsgáljuk. Mivel a hangolásnál a 0-40% reflektivitás tartományt választottuk a NIR1.6 csatorna határainak, a vízfelhők esetén a piros szín hozzájárulása közel maximális. A VIS0.47 sávban az optikailag vastag vízfelhők reflektivitása nagy a 0-100 % tartományban. Tehát a piros és

kék szín hozzájárulása nagy. A vízfelhők színárnyalatait főleg a NIR2.25 sávban mért reflektivitás erőssége határozza meg, azaz a részecskék méretbeli különbségei. Az egyre kisebb effektív cseppsugarú vízfelhőknek a NIR2.25 tartományban egyre nagyobb a reflektivitásuk (lásd 6.1. ábra), a zöld komponens fokozatosan növekszik, ezért sötét rózsaszínből indulva egyre világosabb rózsaszín, majd drappos, halvány sárga színbe megy át a vízfelhők színe a Felhőfázis RGB képen (6.17. ábra).

A 6.17. ábrán a 6.1.1 fejezetben már tárgyalt 2016-11-19 2:00 UTC-kor a Csendes-óceán felett lévő felhőzetet vizsgáljuk meg újra, a vízfelhőkre koncentrálva. Az optikailag vastag vízfelhők többféle árnyalata figyelhető meg a képen. A felülről a második nyíllal jelölt terület sötétebb rózsaszín árnyalatú, itt nagy vízcseppekből álló optikailag vastag vízfelhő található. A világosabb rózsaszínű, harmadik nyíllal jelölt területen közepes méretű vízcseppek találhatók, végül a negyedik nyíllal jelölt halvány sárgás felhőrészlet effektív cseppsugara a legkisebb. Láthatjuk, hogy minden esetben a VIS0.47 reflektivitása szinte egyforma, azaz a vizsgált helyeken a felhők optikailag vastagok.

A legfelső nyíllal jelölt területen lila színű a felhő. Itt nagyok a felhőelemek, mert a NIR2.25 sávban aránylag kicsi a reflektivitás. Viszont mivel a piros komponens nem maximális, ezért valószínűleg nemcsak vízcseppek vannak a felhőtetőn, hanem jégkristályok is, ez valószínűleg egy **kevert fázisú felhőtető**.



6.17. ábra: 2016-11-19 2:00 UTC-kor a Csendes-óceán felett lévő felhőzetről készült Felhőfázis RGB kompozit kép.

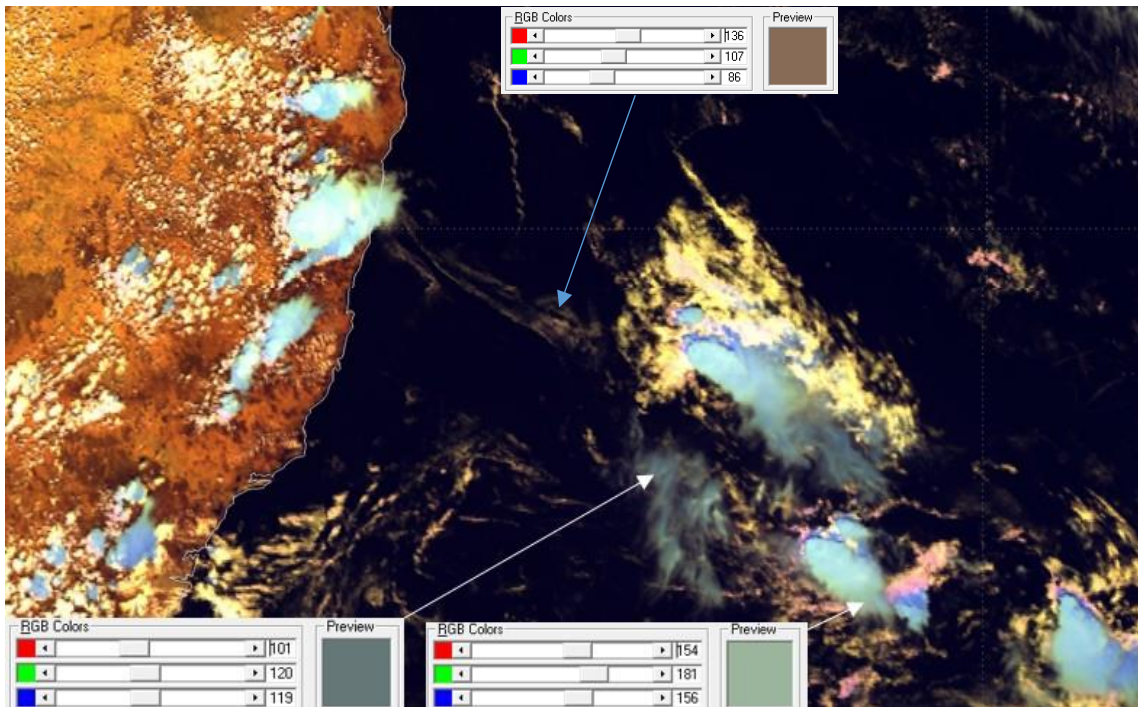
Optikailag minél **vékonyabb felhőt** vizsgálunk, annál jobban közelít a színe a háttér színéhez. Különböző összetételű, borítású és növényzetű felszínek máshogy alakítják a kompozit képen a vékony felhők színét. Tenger esetén az egyre vékonyabb felhő színe egyre sötétebb lesz. A dolgozatban a tenger feletti vékony felhők színét tárgyaljuk.

Vékony felhők esetén a VIS0.47 reflektivitása csökken. Minél vékonyabb, annál kisebb lesz a tenger feletti cirrus felhő reflektivitása a VIS0.47 sávban.

A **vékony jégfelhők** esetén is igaz az, hogy a zöld komponens kissé erősebb, mint a piros komponens (6.1. ábra). És mivel a kék komponens már nem erős, így az áttetsző cirrusok általában zöldes türkiz színben jelennek meg a Felhőfázis RGB képen (6.18. ábra fehér nyíllal jelölt területei). Kicsi jégkristályok esetén erősebb a piros és a zöld komponens a kékhez képest, míg nagy jégkristályok esetén gyengébb a piros és a zöld komponens a kékhez képest. De mivel a cirrusok színe az átlátszóságuktól is erősen függ, ezért a vékony cirrusok méretére nem egyszerű következtetni a színárnyalatból.

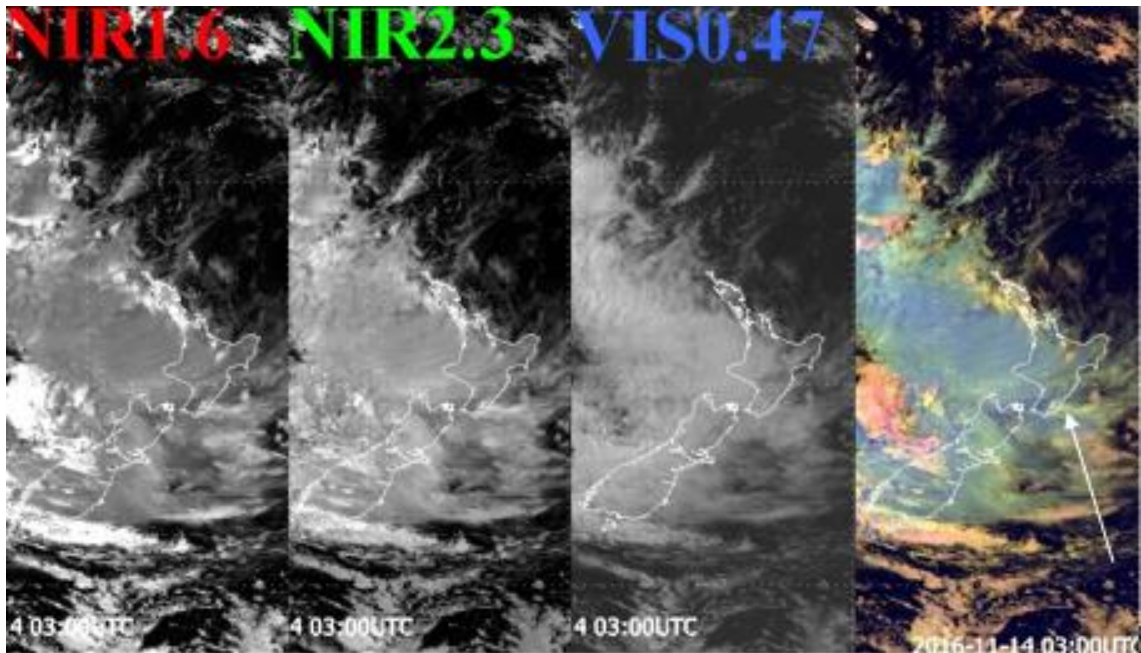
A tenger feletti **vékony vízfelhőkre** is igaz, hogy az optikai vastagságuk csökkenésével egyre sötétebbek lesznek. A vastag vízfelhőknél a piros komponens volt a legerősebb. Általában ez a tenger feletti vékony vízfelhőre is igaz, így ezek legtöbbször sötét szürkés-barnás árnyalatúak.

A 6.18. ábrán olyan eset látható, ahol vékony jégfelhő és vízfelhő is megjelenik tenger felett. Három területet jelöltünk meg: két jégfelhőt (fehér nyíllal) és egy vízfelhőt (kék nyíllal). A vékony vízfelhő szürkés barna színű a kompozit képen. A színét a NIR1.6 sávban mért relatív erősebb reflektivitás alakítja. A két vékony jégfelhő között nagyrészt az optikai vastagságukkal magyarázható az árnyalatbeli különbség. A nyugatabbra lévő jégfelhő optikailag vékonyabb, a keletebb elhelyezkedő zöldes-szürke felhő vastagabb.



6.18. ábra: 2016-11-30 2:30 UTC-kor Ausztrália keleti partjainál lévő felhők Felhőfázis RGB kompozit képe.

A kisméretű jégkristályokból álló felhőre jó példa a magas szintű lee felhőzet. A magas szintű lee felhőzet erős szél és domborzat hatására alakul ki. A 6.19. ábrán Új-Zéland északi szigetén, a Tararua-hegység mögött kialakuló lee felhőzetet figyelhetjük meg (fehér nyíllal jelölve). A front felhőzetétől az RGB képen elkülönül (eltérő színben látszódik) a kelet felé elnyúló lee felhőzet. A lee felhők jellemzően nagyon apró jég szemekből állnak és optikailag vékonyak. Mivel Új-Zélandra a műhold nagyon ferdeszögben néz, így az áttetsző cirrus felhő vastagabbnak tűnik. A NIR1.6 és a NIR2.25 képén is elkülönül a lee felhő a környezetétől. Az RGB kompozit képen az előzőekben bemutatott felhőknél világosabb, sárgás-zöld színe miatt még jobban szembetűnik.



6.19. ábra: 2016-11-14 3:00 UTC-kor Új-Zéland hegyei felett kialakult lee felhőzet (nyíllal jelölve) a Felhőfázis kompozit képen.

A 6.20 ábrán látható a színösszesítő, ami a Felhőfázis RGB bemutatott tipikus színeit összegzi. Ez jól felhasználható segédanyagként a Himawari csatornáiból készített Felhőfázis RGB kompozit képek tanulmányozásához, és majd 2020 után az MTG csatornák felhasználásával készíthető Felhőfázis RGB kompozit képekhez is (egy esetleges újabb hangolás után).



6.20. ábra: A Felhőfázis RGB kompozit kép tipikus színei.

6.1.3 A mért reflektivitás értékek eloszlásának vizsgálata szórásdiagramok segítségével

A dolgozatban a felhőtető mikrofizikáját vizsgáljuk: milyen a felhők reflektivitása a vizsgált csatornában az egyes felhőtető mikrofizikai típusokra. A csatornák tulajdonságainak elemzését részben a szakirodalomban közzétett szimulációkra alapoztuk, részint más kutatók által közzétett tapasztalatokra, részben a HIMAWARI műholdképek feldolgozása során szerzett saját tapasztalatainkra. Sok képet dolgoztunk fel, amelyeken a valós mért adatokat a szimulációk fényében értékeltük. Összevetettük a mért reflektivitásokat a szimulációkkal. Az RGB képek hangolását, a tipikus színek összegyűjtését szimulációkra és a mért adatok feldolgozása során szerzett tapasztalatainkra alapoztuk.

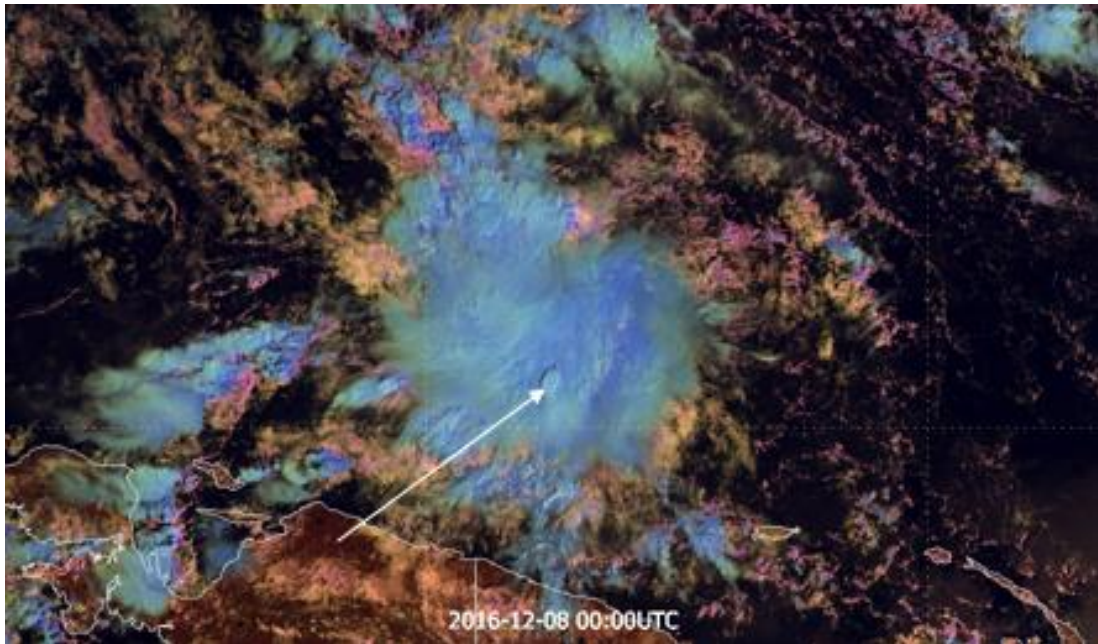
Valós mérések esetén tanulmányoztuk, hogy a csatornák reflektivitásai különböző mikrofizikájú felhőtípusok esetén valóban olyan értékeket vesznek-e fel, mint ahogy azt a szimulációk alapján várjuk. Szórásdiagramon végeztük az ilyen típusú vizsgálatainkat. Ezekből a vizsgálatainkból mutatunk be egy adott esetre vonatkozót. A mért értékeket szórásdiagram segítségével jelenítettem meg. A szórásdiagramon két választott csatorna mért reflektivitást értékei a kerülnek az x és y tengelyekre.

A szórás-diagramokat a McIDAS-V programmal állítottuk elő. Először ki kell választani egy területet és két csatornát. A program a területen lévő összes pixel (a két kiválasztott csatornához tartozó) reflektivitás érték párját jeleníti meg egy ábrán: fekete alapon fehér pontokkal. A 2 csatornában készült képpel együtt jeleníti meg a szórásdiagramot. Ezután 3 különböző színnel kisebb részterületeket jelölhetünk ki egyik vagy másik csatorna képén. Az ezekhez tartozó pixelek reflektivitás párpait a program az adott színnel jeleníti meg a szórásdiagramon.

A kiválasztott részterületeket a Felhőfázis RGB képen is bejelöltük. A szórásdiagramon a fehér pixelek alakját összehasonlítottuk a szimulációkkal, majd a részterületekhez tartozó pontok szórás-diagramon belüli elhelyezkedését tanulmányoztuk abból a célból, hogy ez megfelel-e a szimulációkra támaszkodó feltételezéseinknek, valamint a tipikus színekre vonatkozó állításainknak.

Az alábbi esetre mutatok példát a szórásdiagram vizsgálatainkra. Egy Pápua Új-Guineától 2016-12-8 0:00 UTC-kor északra elhelyezkedő zivatarrendszer Felhőfázis RGB kompozit képe látható a 6.21. ábrán. A tipikus színek alapján zivatarrendszer

óceánfelszín felett helyezkedik el. A kék árnyalatú területek jégfelhők, a sárgás, rózsaszínes területek vízfelhők. A jégfelhő tetején látható egy túlnyúló csúcs (fehér nyíllal jelölve). Az árnyékok mutatják az alakját, és hogy valóban kiemelkedik a környezetéből. A színe is eltérő a környezetétől, kisebb effektív cseppsugarú részecskékből áll. A felhőtetőn vannak nagy effektív cseppsugarú részek is, amik sötétkék. A felhő pereme felé optikailag vékony jégfelhők is megjelennek (zöldes türkiz színben).



6.21. ábra: Pápua Új-Guineától 2016-12-8 0:00 UTC-kor északra elhelyezkedő zivatarrendszer Felhőfázis RGB kompozit képe.

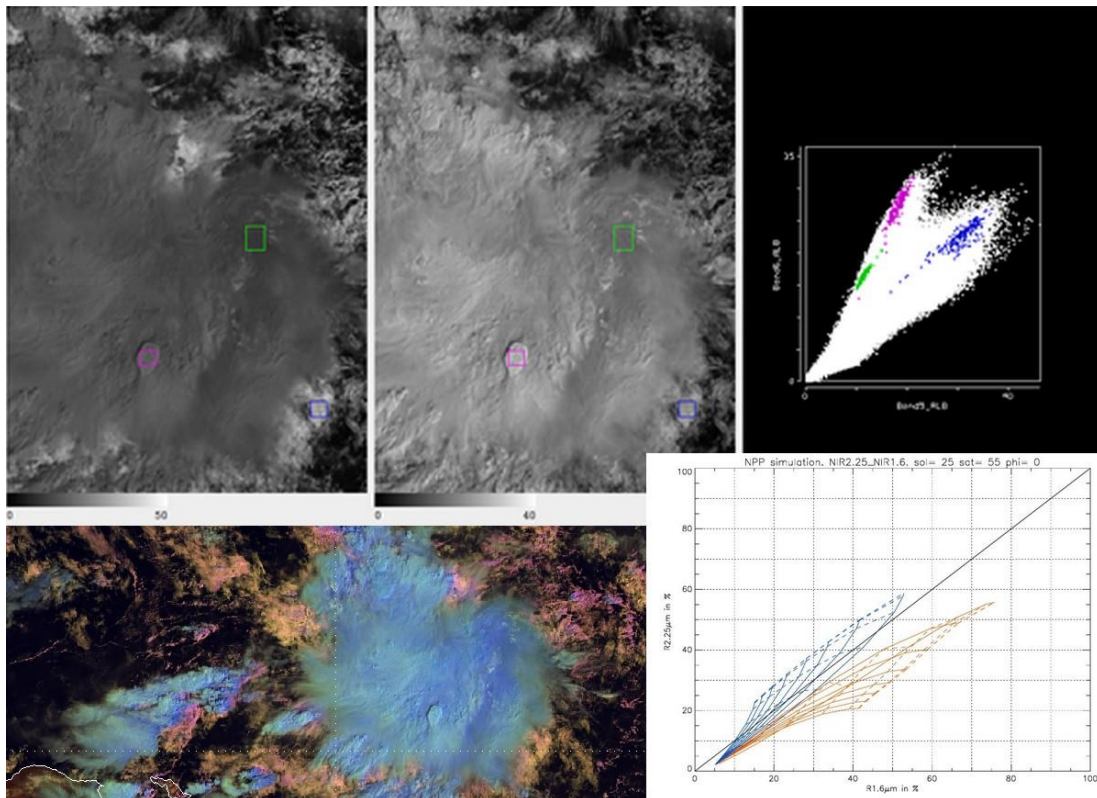
Négy vizsgálatot mutatok be. Az első három vizsgálatban (6.22-6.24. ábrák) három azonos területet vizsgálunk. E három területet három különböző csatornapárral vizsgáljuk. A negyedik vizsgálatnál optikailag vékony felhőket vizsgálunk (6.25. ábra).

Első vizsgálat (6.22. ábra): Optikailag vastag felhők vizsgálata a NIR1.6 és NIR2.25 csatornák segítségével

A NIR1.6 és NIR2.25 csatornák méréseiből készült szórásdiagramot láthatunk a 6.22. ábrán. Az ábra mutatja a szimulációt is. A jégfelhőre szimulált görbeseregek (kék görbék) nem fednek át a vízfelhők szimulált görbeseregeivel (barna görbék).

A szimuláció jellegzetes alakja a fehér pontok alakján is felismerhető. Nem egyezik meg teljesen, mert a fehér pontok nem csak a jégfelhőkhöz és vízfelhőkhöz tartozó pixelekhez tartozó reflektivitás párokat tartalmazzák, hanem minden a területen előforduló pixel reflektivitás párját: a derült területhez és a kevert fázisú felhőkhöz

tartozó értékeket is. A szimuláció csak a víz- vagy jégfelhők értékeit mutatja. Viszont a szimulációban szerepelhet olyan optikai vastagságú és effektív csepp sugarú felhőhöz tartozó értékpár is, ami a kiválasztott területen nem fordul elő. Ezért nem egyezik meg teljesen a szórásdiagram fehér területének alakja a szimulált görbék alakjával. Viszont a „két elkülönülő csúcsosságú” jelleg egyértelműen felismerhető, és ezek alapján láthatjuk, hogy a zölddel és rózsaszínnel jelölt területek jégfelhők, míg a kézzel jelölt terület vízfelhő.



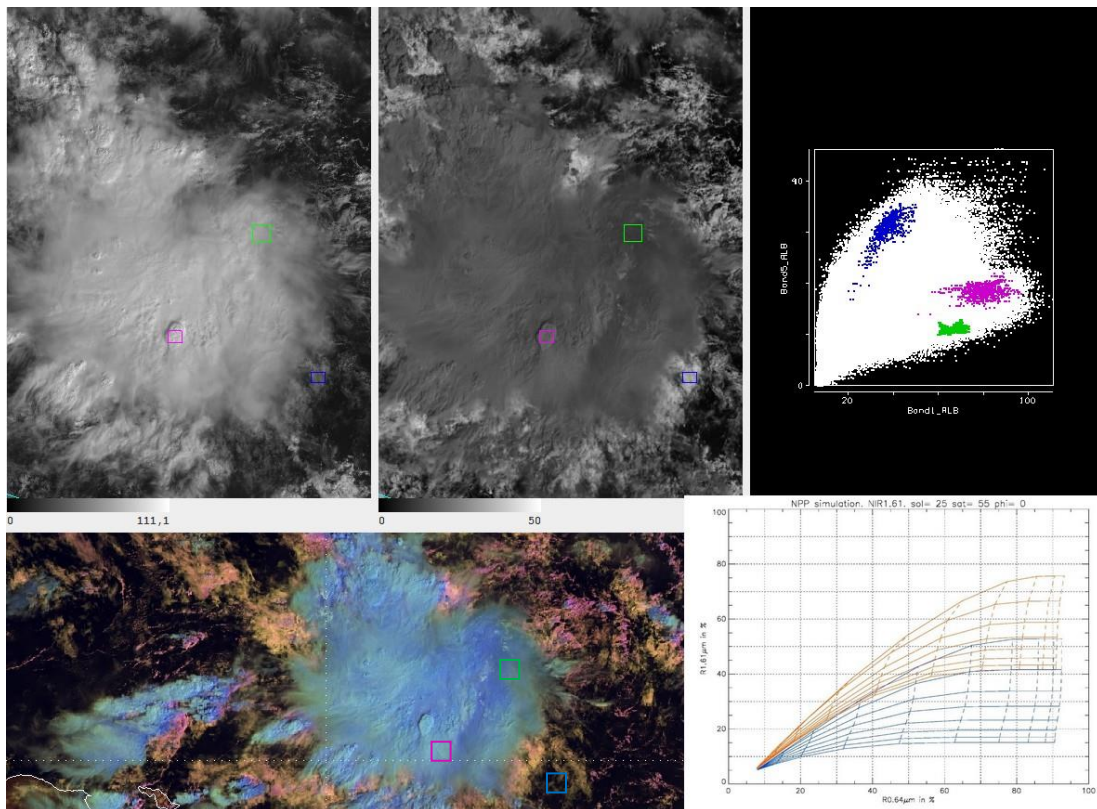
6.22. ábra: Első szórásdiagramos vizsgálat egy Pápua Új-Guineától 2016-12-8 0:00 UTC-kor északra elhelyezkedő zivatarrendszer esetére: A felső sorban a NIR1.6 és NIR2.25 csatornák képei, valamint a méréseikből készült szórásdiagram látható. Az alsó sorban a Felhőfázis RGB kompozit kép és a két csatornára készült szimulációk láthatók.

Második vizsgálat (6.23. ábra): Optikailag vastag felhők vizsgálata a VIS0.47 és NIR1.6 csatornák segítségével

A szórásdiagram fehér területe és a szimulált görbeseregek alakja hasonló. A szimulált görbeseregek részben átfednek, így ezeket a csatornákat vizsgálva nem minden esetben válik egyértelműen el a vízfelhő a jégfelhőtől. A 3 területet vizsgálva valószínűsíthető, hogy a kézzel jelölt terület vízfelhő, míg a rózsaszínnel és zölddel jelölt területek jégfelhők, mint ahogy ezt már az előző vizsgálat alapján is biztosan tudjuk.

A szimuláción a szaggatott vonalak mentén konstans az optikai vastagság. Jobb felé egyre nagyobb optikai vastagság görbék találhatók. A folyamatos görbék mentén konstans az effektív cseppszugár. Felfelé egyre kisebb effektív cseppszugár görbék találhatók. A barna görbék vízfelhőre, míg a kék görbék jégfelhőre vonatkoznak.

A szórásdiagram és a szimulációk összevetéséből az látszik, hogy a késsel jelölt területen a vízfelhő optikai vastagsága nem konstans. A zöld mérési pontok felett jobbra a rózsaszín pontok helyezkednek el, ami a rózsaszínnel jelölt terület kisebb effektív cseppszugárára és nagyobb optikai vastagságára utal.



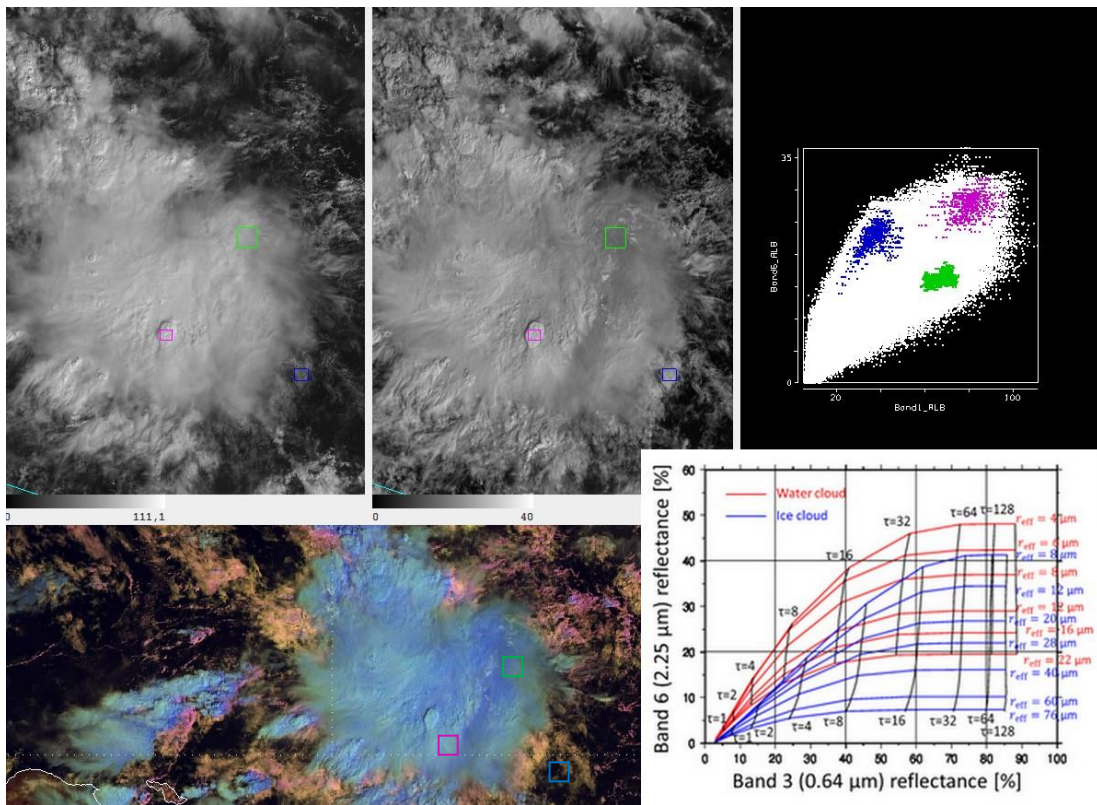
6.23. ábra: Második szórásdiagramos vizsgálat egy Pápua Új-Guineától 2016-12-8 0:00 UTC-kor északra elhelyezkedő zivatarrendszer esetére: A felső sorban a VIS0.47 és NIR1.6 csatornák képei, majd a méréseikből készült szórásdiagram látható. Az alsó sorban a Felhőfázis RGB kompozit kép és a két csatornára készült szimulációk láthatók.

Harmadik vizsgálat (6.24. ábra): Optikailag vastag felhők vizsgálata a VIS0.47 és NIR2.25 csatornák segítségével

Ugyanezen területeket vizsgáljuk a VIS0.47 és NIR2.25 csatornák képei és a megfelelő szimuláció (jobb alul) alapján. A szórás-diagramon a fehér terület kisebb kiterjedésű, mint a VIS0.47 és NIR1.6 szórásdiagramjánál. Ennek oka az, hogy a vízfelhőkre és jégfelhőkre vonatkozó görbeseregek között nagyobb az átfedés.

A kisebb szórású diagram és a szimulációk átfedése miatt a halmazállapotok megállapítása csak ezt a 2 csatornát vizsgálva nem lehetséges. Viszont az első vizsgálatból már tudjuk, hogy a késsel jelölt felhő vízfelhő és a zölddel és rózsaszínnel jelölt felhők jégfelhők.

A három különböző színű pontok halmaza a szórásdiagramon jól elkülönül egymástól. A halmazállapotot már ismerve arra következtethetünk, hogy a rózsaszínnel jelölt terület kisebb effektív cseppsugarú és nagyobb optikai vastagságú, mint a zölddel jelölt terület. A késsel jelölt terület pedig kis cseppekből áll.



6.24. ábra: Harmadik szórásdiagramos vizsgálat egy Pápua Új-Guineától 2016-12-8 0:00 UTC-kor északra elhelyezkedő zivatarrendszer esetére: A felső sorban a VIS0.47 és NIR2.25 csatornák képei, majd a méréseikből készült szórásdiagram látható. Az alsó sorban a Felhőfázis RGB kompozit kép és a két csatornára készült szimulációk láthatók.

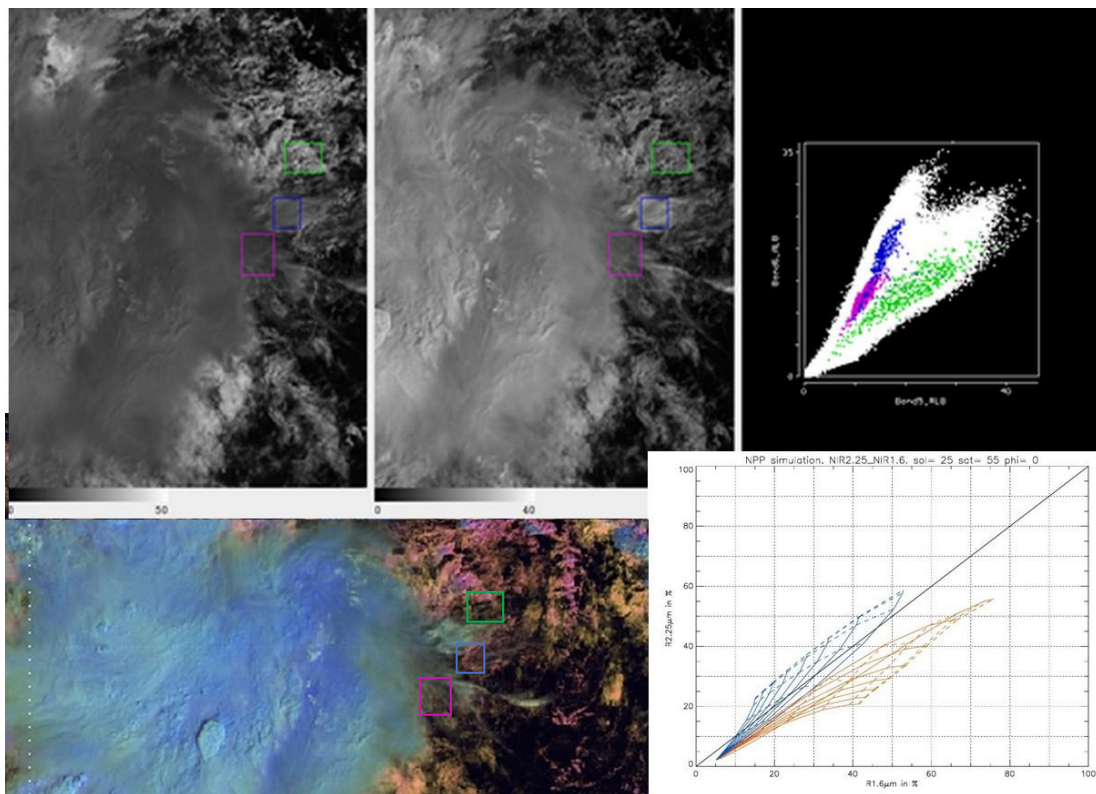
A három vizsgálatból együtt azt kaptuk, hogy a késsel jelölt terület vízfelhő, amely különböző optikai vastagságú részekből áll és a tetején kis cseppek vannak. A rózsaszínnel jelölt rész jégfelhő kis jégkristályokkal a tetején. A zölddel jelölt terület az előzőnél kisebb optikai vastagságú jégfelhő, nagyobb jégkristályokkal a tetején. **Ezek a szórásdiagram és szimulációk összevetéséből kapott megállapítások összhangban vannak a Felhőfázis RGB kép színeivel.**

Negyedik vizsgálat (6.25 ábra): Optikailag vékony felhők vizsgálata a NIR1.6 és NIR2.25 csatornák segítségével

Másik három területet vizsgálunk, mint az előző vizsgálatoknál. A zivatarrendszer három optikailag vékony felhővel borított területét vizsgáljuk a **NIR1.6** és **NIR2.25** sávokban mért reflektivitás értékek alapján.

A szórásdiagramot az első vizsgálattal összehasonlítva azt látjuk, hogy a mostani színes pontok közül sok közelebb helyezkedik el az origóhoz. Ez mutatja, hogy tényleg sikerült olyan területeket választani, aminek a nagy/egy része optikailag vékony.

A kék és a lila pontok a szórásdiagram „jégfelhő ágában” vannak, míg a zöldek a „vízfelhő ágában” helyezkednek el. Egyik területen sem homogén az optikai vastagság, legkevésbé a zölddel jelölt vízfelhő esetén. A késsel jelölt jégfelhő vastagabb és/vagy kisebb jégkristályokból áll, mint a rózsaszínnel jelölt. **Ezek a szórásdiagram és szimulációk összevetéséből kapott megállapítások összhangban vannak a Felhőfázis RGB színeivel.**



6.25. ábra: Negyedik szórásdiagramos vizsgálat egy Pápua Új-Guineától 2016-12-8 0:00 UTC-kor északra elhelyezkedő zivatarrendszer esetére: A felső sorban a NIR1.6 és NIR2.25 csatornák képei, majd a méréseikből készült szórásdiagram látható. Az alsó sorban a Felhőfázis RGB kompozit kép és a két csatornára készült szimulációk láthatók.

6.2 Az eredmények összegzése, konklúziók

Az 5. fejezetben a csatornák tulajdonságait mutattam be a szakirodalomban fellelhető szimulációk segítségével. Azt tárgyaltam, hogy mely rövidhullámú csatornák szolgáltatnak információt a felhőtető mikrofizikáról, és ezeket hogyan lehet együttesen használni. A bemutatott műholdkép példák többsége saját előállítású. A saját példák gyűjtése, elemzése is az eredmények része.

A 6. fejezet mutatja be a további eredményeket. Először az EUMETSAT által javasolt RGB kép típus hangolásával foglalkoztam: hogyan kell az egyes alapszínekben megjelenítendő csatornák tartományait optimálisan megválasztani, hogy az eredmény színkontrasztja is és információ-tartalma is optimális legyen. A 3. táblázatban foglaltam össze a Felhőfázis RGB képek „receptjét”, amely az optimális tartományokat is tartalmazza.

A pontos előállítási eljárással készített képek sokaságát vizsgálva összegyűjtöttem és leírtam a felszín- és felhőtípusok tipikus színeit. A tipikus színek összefoglalása feltétlenül szükséges ahhoz, hogy a felhasználó (pl. időjárás előrejelző) eredményesen tudja értelmezni a képeket. A Felhőfázis RGB kompozit kép tipikus színeit a 6.20. ábrán foglaltam össze.

Végül valódi mérések szórásdiagramját hasonlítottam össze szimulációkkal – ezáltal is ellenőrizve a tipikus színek helyességét.

A dolgozat eredményei: a Felhőfázis RGB kompozit kép végleges hangolása, a tipikus színek összefoglalása, valamint a számos példa elemzése, bemutatása. A példák oktató anyagként is jól használhatóak.

7. Összefoglalás

A diplomamunkám célja a felhők jellemzése műholdadatok alapján, ezen belül a felhőtető mikrofizikájának vizsgálata. A harmadik generációs Meteosat műholdak 2020-tól fognak működni. Az új típusú műhold a jelenleginél több csatornában fog mérni. A szakdolgozat az egyik új csatorna tulajdonságaival, fizikai jellemzőivel foglalkozik. Az új európai műholdra való felkészülésként, a már operatíván működő, japán Himawari műholdak adatait, csatornáit vizsgáltuk. A Himawari adatokkal teszteltük, hogy milyen előnyöket fog jelenteni ez az új csatorna a felhőtető mikrofizikai tulajdonságainak elemzésében.

A dolgozat arra koncentrál, hogy a felhőtető mikrofizikai tulajdonságait hogyan lehet meghatározni műholdadatokból. Ennek alapját, lényegét vizsgálja, ismerteti.

Először a mikrofizikai paraméterek (halmazállapot és átlagos részecske méret) számításának elvi alapjait mutattuk be, majd egy vizuális megjelenítési eljárást ismertettünk, amely segítségével az időjárás előrejelző, vagy egyéb szakember minőségi információt kaphat a felhőtető mikrofizikai jellemzőiről.

A dolgozatban ismertetjük:

- az elvi alapokat,
- mely csatornák hasznosak az adott célra,
- az új csatorna információ-tartalma mennyiben más, mint a már korábban is rendelkezésünkre álló 1,6 μm -es mikrofizikai csatorna információtartalma,
- hogyan érdemes kombinálni őket,
- milyen típusú kompozit képet lehet majd az új csatorna felhasználásával előállítani erre a célra (a kísérleti Felhőfázis RGB kompozit képet most fejlesztik, részletes vizsgálata még folyamatban van).
- Behangoltuk az új ún. Felhőfázis kompozit képet, ezzel pontos leírást adva előállításának menetére.
- A fentiek alátámasztására példákat gyűjtöttünk.
- Az általunk hangolt kép tipikus színeit összegyűjtöttük. Ez a színösszesítő az új típusú műhold pályára állása után hasznos segédanyag lesz az időjárás előrejelzőknek, a kompozit kép értelmezésében,
- Valódi mérések szórásdiagramját hasonlítottuk össze szimulációkkal – ezáltal is ellenőrizve a tipikus színek helyességét.

8. Irodalmi hivatkozás

Austin, R. T., & Stephens, G. L. (2001). Retrieval of stratus cloud microphysical parameters using millimeter-wave radar and visible optical depth in preparation for CloudSat. 1. Algorithm formulation. J. Geophys. Res, 106(28), 233-28.

Ács, F. (2012) Légköri sugárzástan, Légekörfizika órai jegyzet, 220p.

Bennartz, R. (2012/a) Cloud Optical Properties, International Summer School on Applications with the Newest Multispectral Environmental Satellites, Summer School Italy Bracciano, 11 to 19 June 2012

Bennartz, R. (2012/b) Scattering Radiative Transfer, International Summer School on Applications with the Newest Multispectral Environmental Satellites, Summer School Italy Bracciano, 11 to 19 June 2012

Chang F-L Z.Li, (2002) Estimating the vertical variation of cloud droplet effective radius using multispectral near infrared satellite measurements, Journal of Geophysical Research, VOL. 107, NO. D15, 12p

Hayashi, M. (2015) Development of the optimal cloud analysis product for the next geostationary meteorological satellites “Himawari-8/9”, EUMETSAT Meteorological Conference, 2015. szeptember 21-25.

Le Gléau, H., Kerdraon, G., Raoul, M.-P. (2015) Combined use of 1.6 and 2.25 micrometer reflectances to improve the cloud phase retrieval in the NWCSAF/GEO cloud microphysics, EUMETSAT Meteorological Conference, 2015. szeptember 21-25.

Menzel, W. P. (2006) Remote sensing applications with meteorological satellites, NOAA Satellite an Information Service, University of Wisconsin, 307p

Petty, G.W., (2006) A First Course in Atmospheric Radiation, Sundog Publishing, 460 pp.

Putsay, M. (2016) Introduction to the RGB images, Training Workshop on Monitoring and Forecasting Severe Weather with Remote Sensing Technology ,Taipei, Taiwan, 2016. November 28 - December 1

Roebeling, A. Robert (2008) Cloud physical properties retrieval for climate studies using SEVIRI and AVHRR data, Wageningen University, 2008, Wageningen, 158p.

Rosenfeld, D. (2007). Cloud top microphysics as a tool for precipitation measurements. In *Measuring Precipitation From Space* (pp. 61-77). Springer Netherlands.

Young, K.C. (1993) *Microphysical Processes in Clouds*, Oxford University Press, 448p.

Internetes hivatkozások:

[1 – MTG User Guide] - FCI L1 Dataset User Guide (2015):

[ftp://ftp.eumetsat.int/pub/OPS/out/test-data/FCI_L1C_Format_Familiarisation/FCI_L1_Dataset_User_Guide_\[FCIL1DUG\].pdf](ftp://ftp.eumetsat.int/pub/OPS/out/test-data/FCI_L1C_Format_Familiarisation/FCI_L1_Dataset_User_Guide_[FCIL1DUG].pdf)

[2 – Himawari User Guide] - Himawari User's Guide: <http://www.jma-net.go.jp/msc/en/support/>

[3 – Introduction to RGBs] – Putsay Mária, 2014:

http://www.eumetrain.org/resources/bsc_2014_s7.html

[4 – McIDAS-V] - <http://www.ssec.wisc.edu/mcidas/software/v/>

[5 – MTU scattering] – Fundamentals of Remote Sensing course, Michigan Technological University: http://pages.mtu.edu/~scarn/teaching/GE4250/scattering_lecture.pdf

[6 – MTU transmission] - Fundamentals of Remote Sensing course, Michigan Technological University: http://pages.mtu.edu/~scarn/teaching/GE4250/AtmoTrans_lecture.pdf

[7 – MSG Interpretation] – MSG Channels Interpretation Guide, szerkesztette Zwatz-Meise, V.,: <http://www.eumetrain.org/IntGuide/>

[8 – Rosenfeld 2016] – Rosenfeld, D.: New capabilities with high resolution cloud micro-structure facilitated by MTG 2.3 μm channel, MTG-I event week 2016:

http://www.eumetrain.org/resources/mtg_ew_2016_s5.html

[9 – Kerdraon 2016] - Kerdraon, G., Le Gléau, H., Raoul, M.-P.: Improvement of cloud products with MTG/I, MTG-I event week 2016 november 7-11:

http://www.eumetrain.org/resources/mtg_ew_2016_s5.html

[10 – Kerkmann 2015] – Kerkman, J.: MTG FCI and LI instruments and how to use MODIS, VIIRS and the new AHI images to simulate what is expected from MTG FCI, Preparing for the Next Generation of Satellites event week, 2015 november 16-20: <https://www.wmo-sat.info/vlab/next-generation-of-satellites/>

[11 - SEOS] - <http://www.seos-project.eu/modules/classification/classification-c00-p05.html>

[12 – SEVIRI RGB Cal] - <http://www.eumetrain.org/data/4/410/index.htm>

9. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni Putsay Mária munkáját. A rám szánt rengeteg idejével és szakértelmével az utolsó pillanatig segítette munkámat. Rendelkezésemre bocsátott adatai, a használt program és szakirodalmi anyagai miatt készülhetett el diplomamunkám.

Szeretném még megköszönni Pieczka Ildikónak, aki mindig készen állt segítséget nyújtani és ellenőrizni a dolgozatot.

Végül köszönöm Édesanyámnak, aki megteremtette a diplomamunka írásához szükséges körülményeim, és mindig támogat.