Metoda razlikovanja magle i niske stratusne naoblake pomoću satelitskih podataka i prizemne temperature

Cerovečki, Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:636154

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Marija Cerovečki

Metoda razlikovanja magle i niske stratusne naoblake pomoću satelitskih podataka i prizemne temperature

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOGRAFIJA

Marija Cerovečki

Diplomski rad

Metoda razlikovanja magle i niske stratusne naoblake pomoću satelitskih podataka i prizemne temperature

Voditelj diplomskog rada: doc. dr.sc. Nataša Strelec Mahović

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2018.

Sažetak

Nastanak i disipacija, prostorna raspoređenost i dinamika magle vrlo su važne informacije za odvijanje i sigurnost pomorskog, cestovnog i zračnog prometa. Prognoza magle pomoću numeričkih modela za prognozu vremena još je uvijek vrlo zahtjevno područje operativne meteorologije. S druge strane, većina državnih meteoroloških službi automatizira sinoptičke postaje, pa su motrenja koja obavljaju motritelji na postajama, kao što su naoblaka, vidljivost i meteorološke pojave, sve manje dostupna, jer automatske postaje nisu uvijek opremljene instrumentima za mjerenje vidljivosti. Stoga, objektivne metode za razlikovanje magle i stratusne naoblake, temeljene na podatcima daljinskih motrenja, mogu pružiti dodatne informacije potrebne za detekciju i vrlo kratkoročnu prognozu (*nowcast*) magle. U ovom radu je testirana pretpostavka da je razlika prizemne temperature na $2m$ visine mjerene na sinoptičkim postajama i temperature vrha stratusnog sloja ili sloja magle, dobivene iz satelitskih podataka, znatno manja u slučajevima s maglom nego u slučajevima sa sumaglicom i stratusnom naoblakom. Dani s maglom, sumaglicom i stratusnom naoblakom izdvojeni su iz sinoptičkih izvještaja i NWCSAF (*Nowcasting Satellite Application Facility*) CTYPE (*Cloud Type*) produkta. Za određivanje temperature vrha sloja magle/stratusa korišteni su satelitski podatci s MSG (*Meteosat Second Generation*) satelita, iz infracrvenih kanala IR8.7, IR10.8 i IR12.0, a podatci o temperaturi zraka na $2m$ iz sinoptičkih izvještaja prikupljenih s četiri kontinentalne i pet primorskih postaja Hrvatske. Dobiveni rezultati pokazuju da su temperaturne razlike vrha sloja i prizemne temperature znatno manje ($\sim 3°C$) u slučajevima magle nego u slučajevima sumaglice i stratusne naoblake.

Ključne riječi: magla, stratus, satelitski podatci

Discrimination between fog and stratus clouds using a method based on satellite data and ground measurements

Abstract

Formation and dissipation, spatial extent and dynamics of fog are very important information for sea, road and air traffic management, especially in terms of traffic safety. Nowcasting and forecasting of fog, using numerical model products, still represent very demanding tasks in the operational meteorology. Since most of national weather services tend to automatize their synoptic weather stations, human observations about current weather, i.e. visibility, fog and low clouds, will become less available. Consequently, an objective method for discrimination between fog and stratus clouds is becoming increasingly important for real time detection, as well as nowcasting of fog. The hypothesis which was tested in this study is that the temperature differences between $2m$ temperature measured on synoptic weather stations and brightness temperature of the top of fog/low cloud layer is notably different in cases with fog compared to cases with haze or stratus. Days with fog or low clouds were identified using weather observation reports and NWCSAF (*Nowcasting Satellite Application Facility*) CTYPE (*Cloud Type*) product. The analysis was done using Meteosat Second Generation satellite data, i.e. infrared channels (IR8.7, IR10.8 and IR12.0) to obtain brigntness temperature, and $2m$ temperature measurements from four synoptic weather stations in the continental part of Croatia and five weather stations along the coastline. The results showed that differences between $2m$ temperature and cloud top temperature are significantly lower ($\sim$ 3°C) in cases with fog, than in those with haze or stratus.

Keywords: fog, stratus, satellite data

Sadržaj

1 Uvod **1**

2 Motivacija **4**

3 Podatci i metode **6**

3.1 Satelitska mjerenja 6

3.1.1 Zračenje Sunca i Zemlje 6

3.1.2 MSG SEVIRI kanali 7

3.1.2.1 Solarni kanali 10

3.1.2.2 Kanal IR3.9 10

3.1.2.3 IR kanali u atmosferskom prozoru 12

3.1.3 Temperature (BT) iz podataka u infracrvenim kanalima 12

3.1.3.1 Primjeri računanja temperature (BT) iz infracrvenih kanala 15

3.2 Podatci motrenja na postajama 23

4 Rezultati **26**

5 Analiza magle nad Hrvatskom 20. i 21.01.2017. **28**

6 Diskusija i zaključak **35**

Literatura **37**

1 Uvod

Magla je meteorološka pojava koja se pojavljuje unutar atmosferskog graničnog sloja, te kao takva utječe na biljni i životinjski svijet, te razne ljudske aktivnosti. Pozitivan utjecaj ima, primjerice, na insekte te biljne vrste osjetljive sušu, koje radi transporta vlage nad kopno putem obalne magle ipak mogu obitavati u za njih nepovoljnim područjima (Rastogi i sur., 2016). Također, prikupljanje vode iz magle olakšava život u sušnim predjelima. Ipak, magla može nepovoljno utjecati na zdravlje osjetljivijih osoba. Njezin utjecaj i na sve oblike prometa: kopneni, pomorski i zračni, postaje sve značajniji radi postupnog pojačavanja prometa ljudi i sirovina. Ukupan gubitak u cestovnom, pomorskom i zračnom prometu zbog magle na području SAD-a se može usporediti s gubitcima prilikom tornada ili zimskih oluja (Gultepe i sur., 2007). Također je, primjerice, u SAD-u u razdoblju 2005.-2015. prosječno dolazilo do preko 28000 sudara godišnje uzrokovanih maglom (US FWHA, 2017). Iako su prometne nesreće uzrokovane maglom sve rjeđe, još uvijek su prisutne, a magla nerijetko uzrokuje i usporenost ili obustavu prometa svih vrsta. Time do sve većeg izražaja dolazi važnost *nowcasting-a*, odnosno vrlo kratkoročne prognoze vremena, kao osnove za pravovremena upozorenja.

Definicija magle iz Naputka za rad na glavnim meteorološkim postajama (GMP) (Pandžić, 2008) je sljedeća: Magla je pojava vrlo sitnih kapljica vode koje lebde u zraku te smanjuju horizontalnu vidljivost, tj. udaljenost do koje se mogu vidjeti predmeti na površini Zemlje. Pojava se smatra maglom ako smanjuje horizontalnu vidljivost na manje od $1km$ od mjesta motrenja, a smanjuje i vertikalnu vidljivost, pa se oblaci ili nebo često ne vide. Magla je bjelkasta, ali u velikim gradovima i industrijskim krajevima zbog dima i prašine može imati prljavo žutu ili sivkastu boju. Relativna vlažnost pri magli obično je blizu 100%. Ako je vidljivost veća od $1km$, te manja od $10km$, riječ je o sumaglici.

Za formiranje magle moraju biti zadovoljena dva uvjeta: dovoljan broj nukleacijskih jezgri, te visoka relativna vlažnost (Willet, 1928). Broj nukleacijskih jezgri prostorno jako varira, te je veći u velikim gradovima i industrijskim središtima. Relativna vlažnost pri nastanku, trajanju te disipaciji magle može biti i $85-90\%$, a postiže se ohlađivanjem prizemnog sloja zraka ili dovođenjem vlage.

Maglu možemo podijeliti u nekoliko tipova, ovisno o:

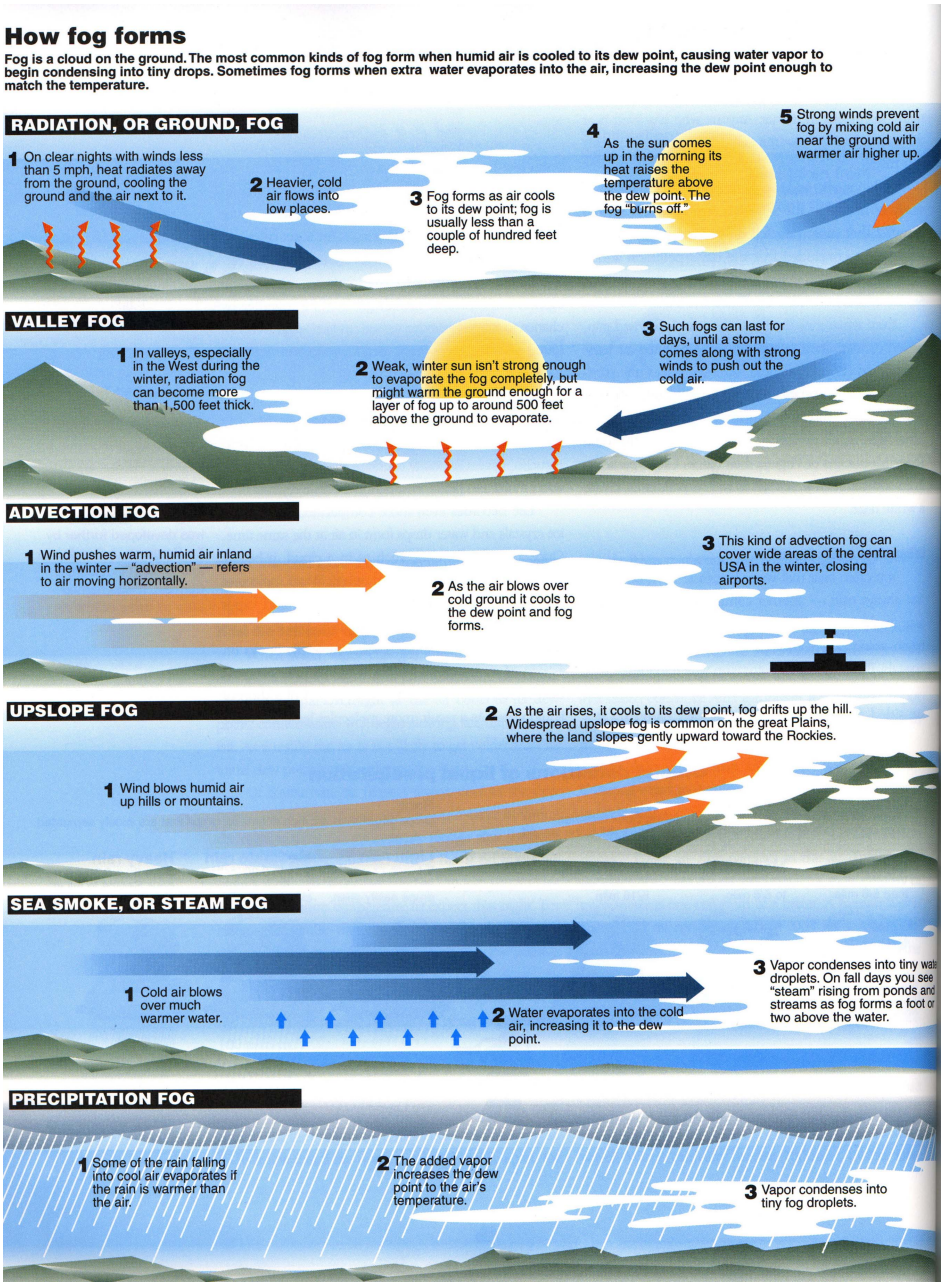


Slika 1.1: Magla u šumi iznad Bratislave, 17.10.2016., slika autorice

- trajanju: kratkoročne, jednodnevne i višednevne
- vodenoj fazi: kapljične, mješovite i ledene
- intenzitetu: jaka (vidljivost $V < 100m$), umjerena ($100m < V < 500m$), te slaba ($500m < V < 1000m$)
- mehanizmu nastanka

Podjelu po mehanizmu nastanka prvi je dao Willet (1928), te je kasnije dorađivana; npr. Byers (1959) te Koračin (1978). Razlikovati možemo radijacijsku, advekcijsku te frontalnu maglu. Prizemna magla je prvi radijacijski tip magle. Formira se pri samoj površini te je povezana s vedrim, mirnim noćima. Ovakvi uvjeti pogoduju jakom radijacijskom hlađenju površine, odnosno hlađenju prizemnog sloja zraka te posljedično formiranju magle. Tok topline iz dubljih slojeva tla, turbulencija unutar prizemnog sloja i depozicija rose mogu ublažiti ovaj efekt. Drugi tip radijacijske magle je tzv. magla visoke inverzije. Inverzija nastaje dugotrajnim radijacijskom ohlađivanjem, te supsidencijom uzrokovanom anticiklonom. Ovaj tip magle se pojavljuje nad dolinama prekrivenima vrlo vlažnim zrakom. Advekcijska magla nastaje pri premještanju toplog, vlažnog zraka nad hladniju površinu, pri čemu dolazi do stvaranja magle. Ovaj tip magle javlja se i u lokalnim cirkulacijskim ćelijama (obalna cirkulacija, cirkulacija obronka), kao i nad morem (vlažni zrak se formira iznad tople morske struje, te advektira nad hladnu struju). Advekcijska magla se može formirati i premještanjem hladnog zraka nad toplu morsku podlogu. Pri tome je tlak dolaznog

hladnog zraka niži, dolazi do pojačane evaporacije iznad morske površine te formacije magle (arktički dim). Frontalna magla se može formirati prije nailaska tople fronte (isparavanje oborine u hladnom zraku), pri prolasku fronte (miješa se hladan zrak sa toplim koji je blizu zasićenja) te nakon prolaska hladne fronte (isparavanje oborine).



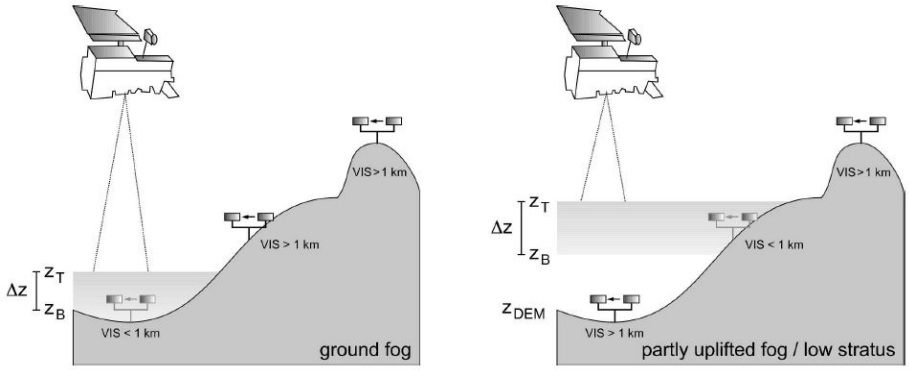
Slika 1.2: Mehanizmi nastanka magle. (courses.knox.edu/envs150/overheads/fogX.JPG)

2 Motivacija

Radi velike varijabilnosti u vremenskoj i prostornoj skali te velikom broju parametara koji utječu na njen nastanak i razvoj (sinoptička situacija, stabilnost u atmosferskom graničnom sloju, nagib i tip podloge, pokrov, površinski turbulentni fluksevi, procesi nukleacije itd.) magla se može opisati kao kompleksna pojava. Prognostički modeli nemaju dovoljno finu rezoluciju te ne sadrže prikladne fizikalne parametrizacije za opis magle. Stoga se modeli oslanjaju na prognozu vidljivosti kao indikator pojave magle, koja je netočna u vrlo velikom broju slučajeva (Gultepe, 2006). Motrenja na postajama, iz kojih bi bio dostupan podatak o pojavi i svojstvima magle, s automatizacijom meteoroloških mjerenja postaju nedostupna, a uređaji za mjerenje horizontalne vidljivosti razmjerno su skupi pa se najčešće postavljaju samo na zračnim lukama i na rijetkim ključnim meteorološkim postajama. Također, iz satelitskih motrenja nije moguće nedvosmisleno razlikovati nisku stratusnu naoblaku od magle pri tlu (slika 2.1) jer satelit mjeri zračenje koje dolazi s vrha objekta pa se iz podataka ne može odrediti radi li se o debelom sloju magle ili o stratusu ispod kojeg nema magle. Raniji radovi u kojima se pokušala uspostaviti satelitska metoda razlikovanja stratusnog i maglenog sloja rezultirali su pouzdanim shemama za detekciju niske i vrlo niske naoblake, bez pouzdane indikacije horizontalne vidljivosti. Bendix i sur. (2005) koristili su NASA-ine satelite u polarnoj orbiti kako bi dobili visinu sloja i njegovu optičku debljinu, usporedbom s DEM-om (Digital Elevation Model) dobivali odignutost sloja od tla, te zadovoljavajuću vjerojatnost detekcije magle pri tlu (Probability of Detection, POD=0.76). Nedostatak metode je što koristi satelite u polarnoj orbiti, koji nad istim područjem prolaze dva puta dnevno, te ima relativno visok FAR (False Alarm Rate). Gultepe i sur. (2006) koriste podatke GOES-12 geostacionarnog satelita i prizemne podatke temperature i rosišta. Algoritam sheme detektira nisku naoblaku tijekom dana te slučajeve s maglom izdvaja pomoću uvjeta za visoku prizemnu relativnu vlažnost ($RH_W > 80\%$) i pretpostavke da će razlika temperature vrha sloja i prizemne temperature u slučajevima s maglom biti manja od 10°C.

Cilj ovog rada je ispitati pretpostavku da razlika temperature vrha sloja magle/stratusa i prizemne temperature zraka mjerene na postajama može poslužiti kao indikacija postojanja magle pri tlu odnosno kao metoda za razlikovanje magle od

stratusa ili sumaglice. Time bi se značajno poboljšala upotrebljivost satelitskih podataka u detekciji, ali i kratkoročnoj prognozi magle.



Slika 2.1: Skica prizemne magle i odignutog sloja stratusa. (Bendix i sur., 2005)

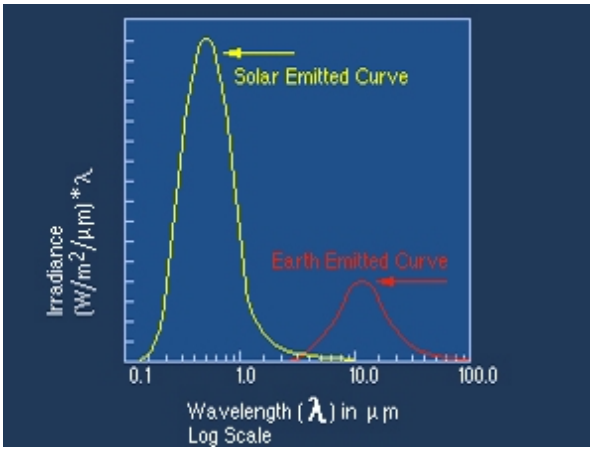
3 Podatci i metode

3.1 Satelitska mjerenja

Satelitska mjerenja jedan su od načina daljinskih mjerenja, odnosno mjerenja prilikom kojih senzor nije u doticaju s objektom kojeg promatra. Za razliku od tradicionalnih uređaja poput termometra, barometra, anemometra i sl., koji moraju biti u doticaju s medijem (atmosferom), senzori na satelitu nemaju nikakvog fizičkog kontakta s atmosferom. Senzor na satelitu bilježi elektromagnetsko zračenje koje do njega dolazi sa Zemlje te ovisno o promatranom intervalu valnih duljina daje određenu informaciju o promatranom objektu.

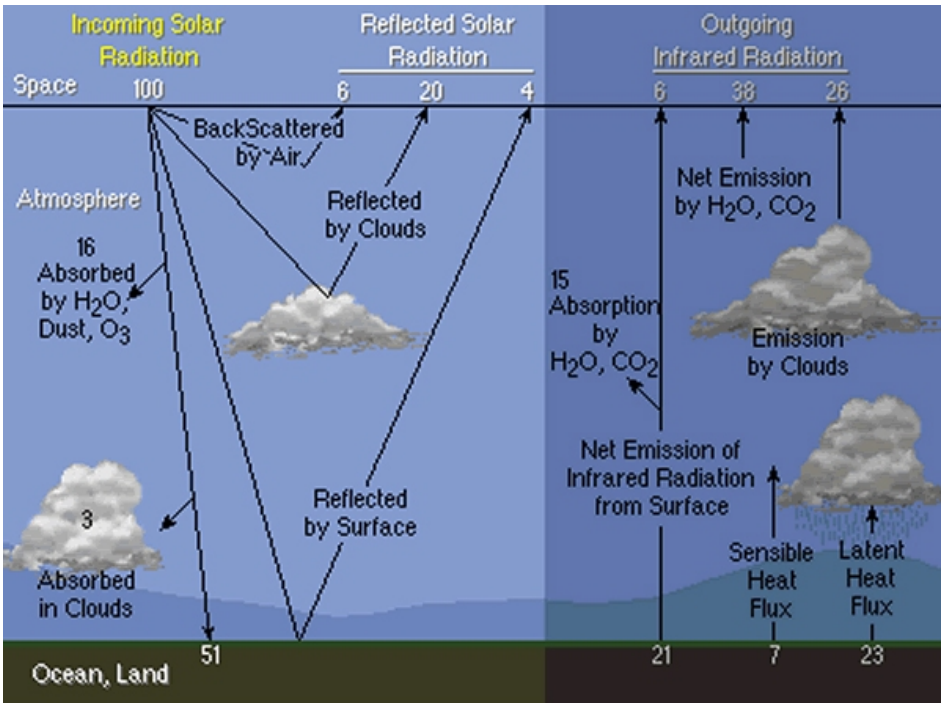
3.1.1 Zračenje Sunca i Zemlje

Zračenje Sunca i Zemlje može se opisati preko Planckovog zakona zračenja za crno tijelo. Sunce zrači poput crnog tijela temperature približno $6000K$ s maksimumom zračenja u području valne duljine približno $0.49\mu m$, te najveći dio energije emitira u ultraljubičastom i vidljivom dijelu spektra. Zemlja najveći dio energije emitira na valnim duljinama između $4\mu m$ i $13\mu m$, s maksimumom na približno $10\mu m$, što odgovara zračenju crnog tijela temperature približno $290K$ (slika 3.1).



Slika 3.1: Zračenje Sunca i Zemlje ovisno o valnoj duljini na logaritamskoj skali. (https://www.meted.ucar.edu/asmet/asmet1/media/graphics/SMCM12Planck1.jpg)

Dolazno kratkovalno Sunčevo zračenje se transmitira, reflektira ili apsorbira kroz atmosferu i na Zemljinoj površini. Isto se događa i s odlaznim dugovalnim Zemljinim zračenjem. Skica apsorbiranih i reflektiranih udjela zračenja nalazi se na slici 3.2,



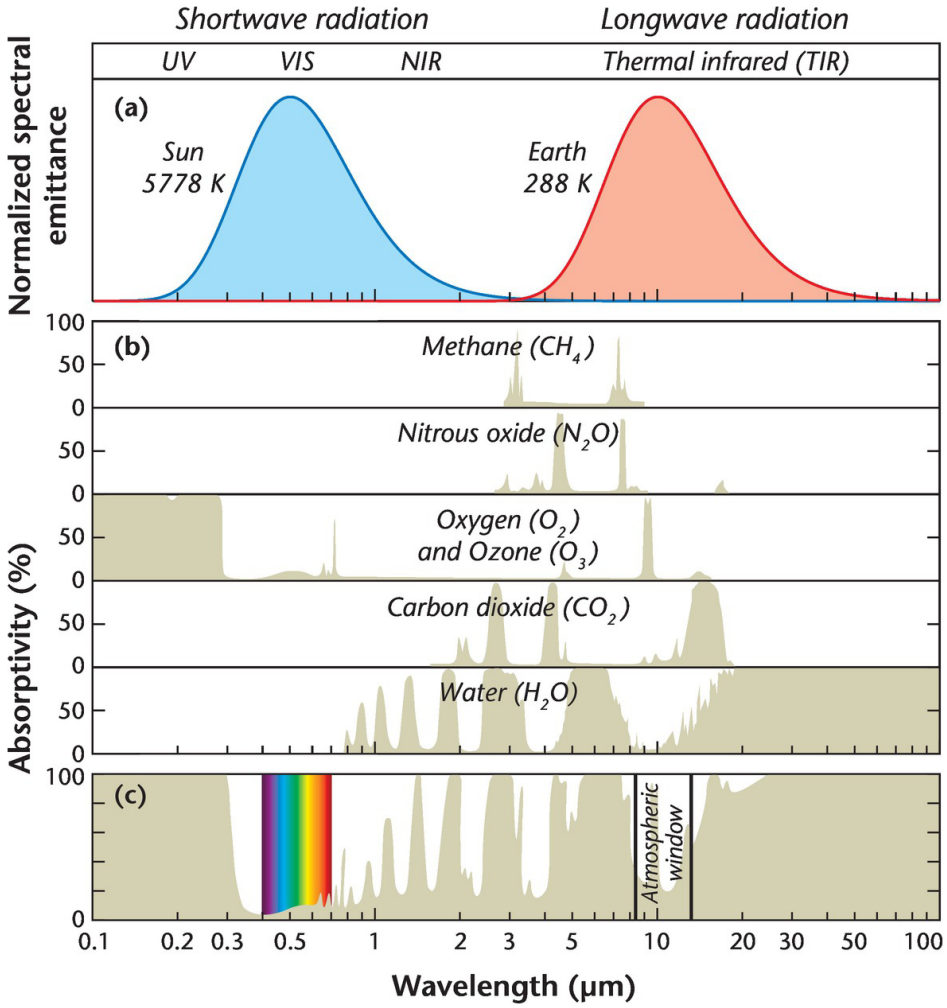
Slika 3.2: Komponente reflektiranog i apsorbiranog zračenja Sunca, Zemlje i atmosfere. (https://www.meted.ucar.edu/asmet/asmet1/media/graphics/graphic2.jpg)

gdje je predočen prosječan udio zračenja u pojedinim procesima na globalnoj skali.

Dugovalno i kratkovalno zračenje koje prolazi kroz atmosferu modificirano je raznim plinovima koji se u njoj nalaze. Tu se najvećim udjelom radi o vodenoj pari u atmosferi, ugljičnom dioksidu i ozonu, koji apsorbiraju zračenje i emitiraju zračenje na određenim valnim duljinama (slika 3.3). Ovisno o tome je li utjecaj pojedinog plina poželjan ili nepoželjan, u skladu s time koristimo različite kanale. Primjerice, želimo li pratiti koncentraciju ozona, koristit ćemo apsorpcijski kanal IR9.7 jer ozon najjače apsorbira zračenje upravo te valne duljine. Želimo li pratiti vodenu paru u atmosferi, koristit ćemo apsorpcijske kanale vodene pare VW6.2 i VW7.3, a ukoliko je utjecaj vodene pare nepoželjan, koristit ćemo infracrvene kanale u "atmosferskom prozoru", gdje je apsorpcija na vodenoj pari minimalna.

3.1.2 MSG SEVIRI kanali

U radu su korišteni podatci s MSG satelita (*Meteosat Second Generation - Meteosat sateliti druge generacije*). MSG sustav sastoji se od 4 satelita koji se nalaze u geostacionarnoj orbiti. Meteosat-8 se nalazi iznad $41.5°E$ te dostavlja IODC (*Indian Ocean Data Coverage*) podatke, čime je zamijenio Meteosat-7 iz MFG (*Meteosat First Generation*). Meteosat-9 se nalazi iznad Afrike na $3.5°E$, trenutačno u funkciji *back-*



Slika 3.3: Apsorpcija Sunčevog i Zemljinog zračenja po pojedinim atmosferskim plinovima. (Oke i sur., 2017)

up satelita, dok Meteosat-10, koji se nalazi nad $9.5°E$ služi za RSS – *Rapid Scan Service*. Slike Meteosat-10 satelita su dostupne svakih $5min$, te pokrivaju područje Europe, sjeverne Afrike i susjednih mora. Meteosat-11 se nalazi nad $0°E$, te dostavlja snimku cijelog Zemljinog diska vidljivog s njegove pozicije. Snimke su dostupne svakih $15min$. Glavni instrument na MSG satelitima je SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager)*, koji snima Zemlju i atmosferu u 12 spektralnih područja (kanala) (Meteosat Design - EUMETSAT, 2018).

Spektralna područja (kanale) u kojima SEVIRI snima možemo, prema njihovim karakteristikama, podijeliti u grupe:

- Solarni kanali: VIS0.6, VIS0.8, NIR1.6
- Kanal 3.9: IR3.9
- Apsorpcijski kanali vodene pare: VW6.2, VW7.3

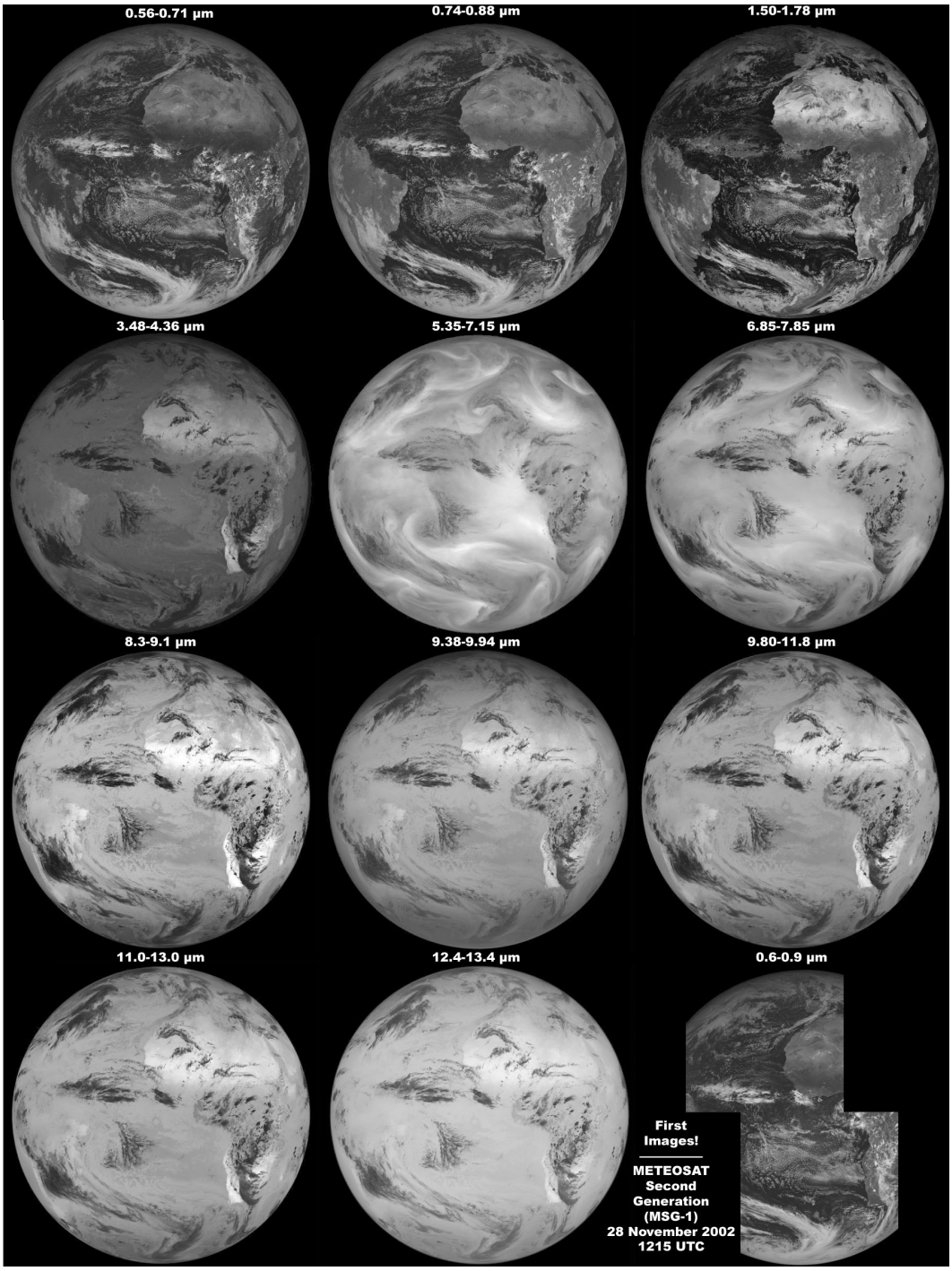
– Infracrveni kanali u ”atmosferskom prozoru”: IR8.7, IR10.8, IR12.0

– Apsorpcijski kanal ozona: IR9.7

– Apsorpcijski kanal ugljikovog dioksida: IR13.4

– HRVIS: kanal visoke rezolucije u vidljivom spektru

Snimke Zemljinog diska u svih 12 spektralnih područja prikazane su na slici 3.4.



Slika 3.4: Prve snimke sa satelita MSG-1 u 12 spektralnih područja u kojima snima instrument SEVIRI. (goes.gsfc.nasa.gov/pub/goes/msg1$_$first$_$images.jpg)

3.1.2.1 Solarni kanali

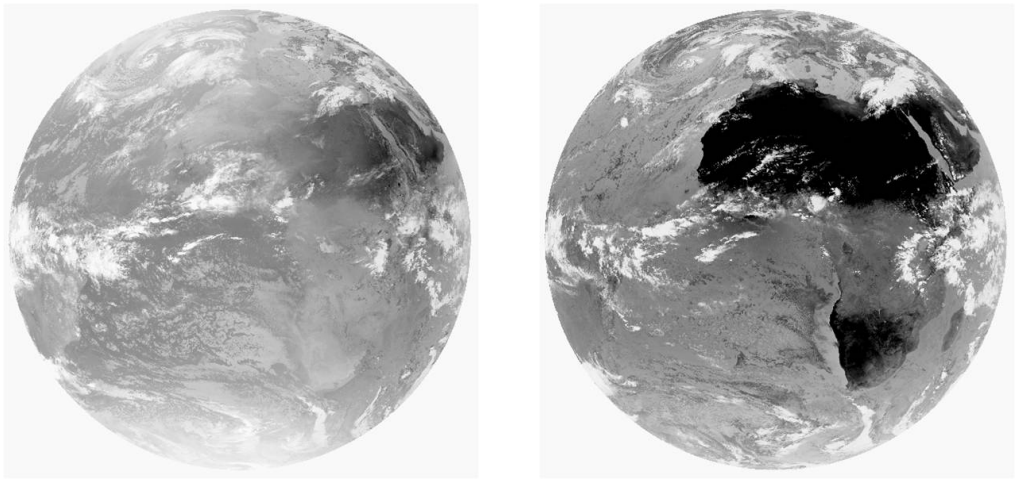
Od 12 SEVIRI kanala četiri su solarna: VIS0.6, VIS0.8, NIR1.6, te HRV, od kojih su prva dva i HRV u vidljivom dijelu spektra dok je NIR1.6 u blisko infracrvenom dijelu. Zračenje koje satelit prima u navedenim kanalima je reflektirano kratkovalno Sunčevo zračenje, te ovakav podatak govori o refleksivnosti, tj. albedu površine od koje se zračenje reflektiralo. Solarne kanale primarno koristimo za motrenje oblaka i tipa površine te u RGB produktima u kombinaciji s drugim kanalima.

U prepoznavanju i praćenju magle od solarnih se kanala danju najčešće koristi kombinacija HRV FOG RGB. Radi se o kombinaciji u kojoj se u crvenoj (R) i u zelenoj (G) boji prikazuje HRV kanal, a u plavoj kanal NIR1.6. U kanalu NIR1.6 apsorpcija na ledu je veća od apsorpcije na vodi u oblacima, pa je taj kanal vrlo koristan u prepoznavanju vodenih oblaka i magle u usporedbi s ledenim oblacima, snijegom ili tlom. HRV kanal se koristi u dvije boje kako se ne bi izgubila prostorna rezolucija. Nedostatak ovog produkta je što se oslanja na solarne kanale, koji su dostupni samo tijekom dana, a pri visokim zenitnim kutevima je kontrast između magle i ledenih oblaka ili snijega znatno manji.

3.1.2.2 Kanal IR3.9

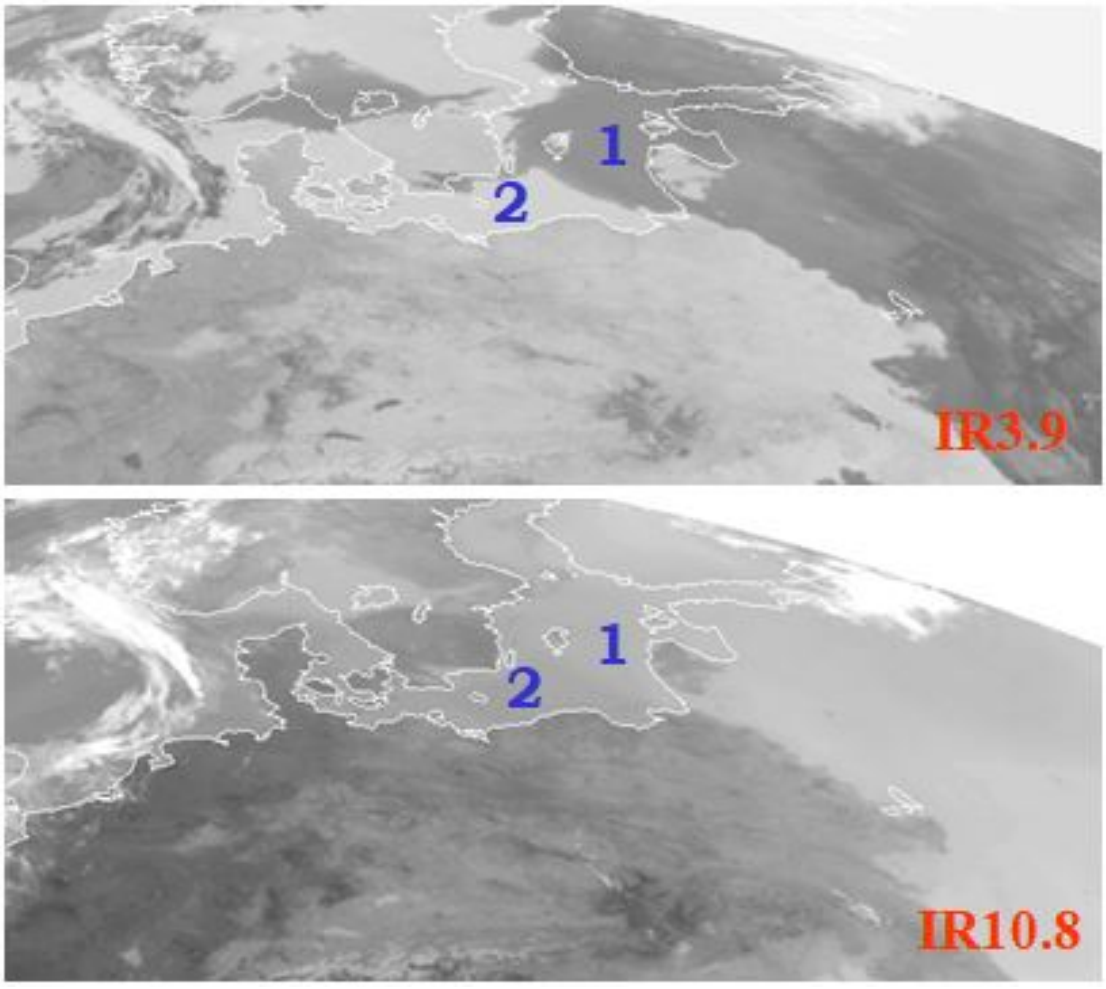
Zračenje u kanalu IR3.9 se sastoji od kombinacije reflektiranog Sunčevog zračenja i emitiranog Zemljinog zračenja (slika 3.1). Promatramo li snimku u navedenom kanalu tokom noći, on će imati svojstva infracrvenog kanala, i to u atmosferskom prozoru, blizu apsorpcijske vrpce ugljičnog dioksida (slika 3.3). Da bismo ga lakše uspoređivali s ostalim infracrvenim kanalima, kanal IR3.9 se invertira. Topli objekti na slici su tako tamniji, dok su hladniji objekti svjetliji. Tijekom dana, ovaj kanal je kombinacija infracrvenog i solarnog kanala pa su na slici tamni objekti oni koji su topli i visoke refleksivnosti, dok su svjetliji objekti oni koji su hladni i niske refleksivnosti (primjer na slici 3.5). Temperatura dobivena iz intenziteta zračenja u ovom kanalu ne odgovara stvarnoj temperaturi objekta koji zrače jer je termičko zračenje uvećano za reflektirano solarno zračenje.

Od svih SEVIRI kanala IR3.9 najkorisniji je za detekciju magle/stratusa. Noću magla i niski vodeni oblaci izgledaju hladnije u kanalu IR 3.9 nego u kanalu IR10.8 zbog razlike u emisivnosti u ta dva kanala. Danju kanal IR3.9, zbog činjenice da je u njemu refleksija na sitnim vodenim kapljicama puno veća nego na velikim ledenim



(a) Kanal IR3.9, 03 UTC (noću) (b) Kanal IR3.9, 12 UTC (danju)

Slika 3.5: SEVIRI snimka Zemljine polutke, 24.04.2003. u kanalu IR3.9. (EUMETSAT - MSG Interpretation guide, 2018)



Slika 3.6: SEVIRI snimka nad Baltičkim morem, 24.03.2003., 12 UTC. 1-stratus/magla, 2-površina bez naoblake. (EUMETSAT - MSG Interpretation guide, 2018)

kristalima, omogućuje razlikovanje vodenih od ledenih oblaka, ali i oblaka sa sitnim kapljicama od onih s krupnim. Stoga je magla/stratus u kanalu IR3.9 osobito iznad morske površine danju puno bolje uočljiva nego u kanalu IR10.8 (slika 3.6). Zbog tih se svojstava za prepoznavanje magle/stratusa i danju i noću najčešće koristi razlika temperatura u kanalima IR10.8 i IR3.9.

3.1.2.3 IR kanali u atmosferskom prozoru

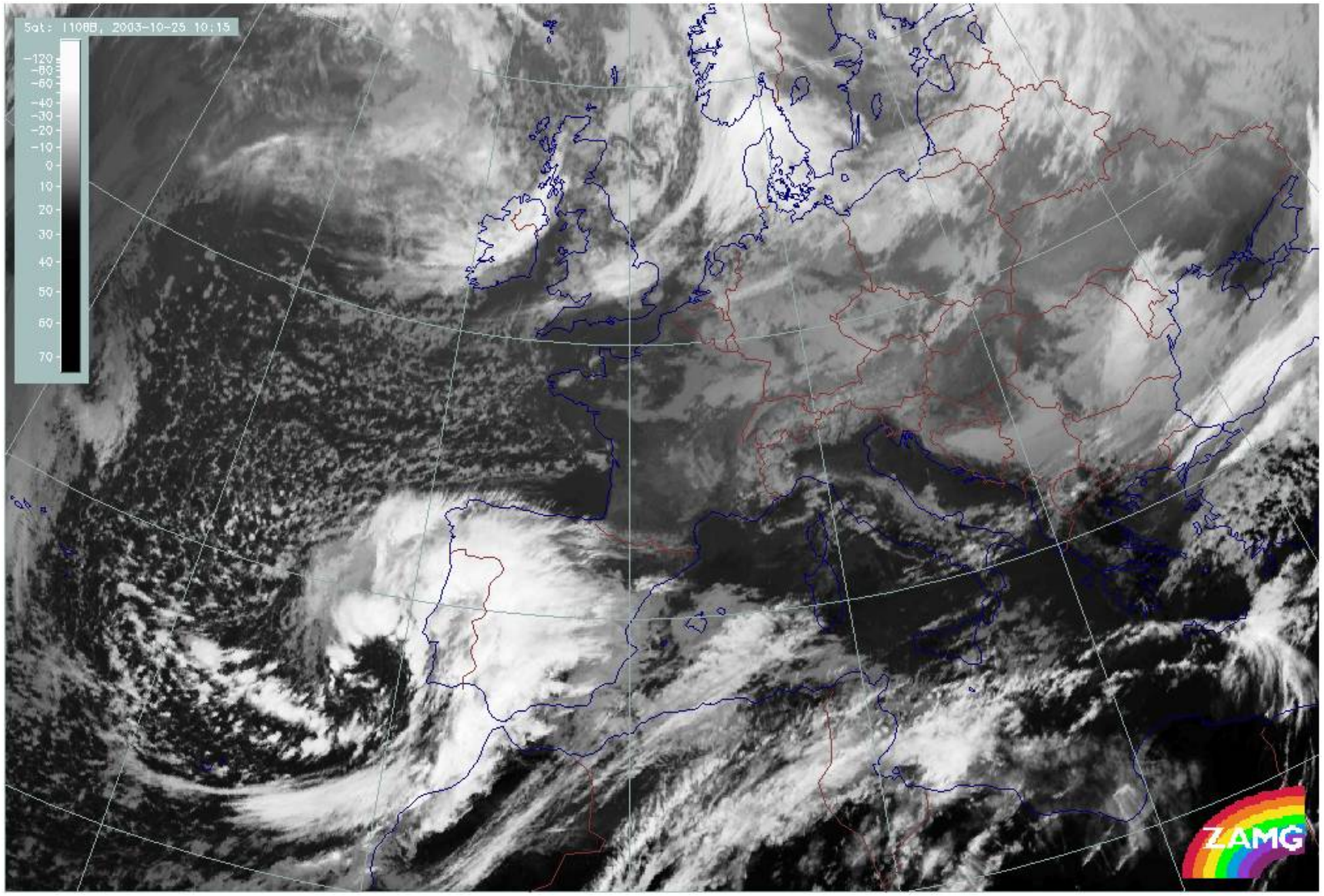
"Atmosferski prozor" se odnosi na interval infracrvenih valnih duljina na otprilike 8 do $13\mu m$ (slika 3.3), gdje je apsorpcija zračenja na atmosferskim plinovima vrlo mala ili zanemariva, uz iznimku uskog intervala ozona. Naočigled nema velikih razlika u snimkama u ta tri kanala, te ih je okom teško raspoznati. Kanal IR8.7 ima vrlo malu apsorpciju na vodenoj pari, kanal IR10.8 se smatra "čistim" infracrvenim kanalom (primjer na slici 3.7), dok je u kanalu IR12.0 apsorpcija na ledenim česticama nešto veća nego na vodenim. Ta razlika na snimci nije primjetna, ali se, primjerice, mogu koristiti razlike kanala IR12.0 i drugih kanala atmosferskog prozora kako bi se detektirali tanki cirusi. Informacija koju nam daju snimke u kanalima atmosferskog prozora je temperatura objekta, a satelitske snimke se invertiraju kako bi oblaci na slici bili bijeli, a tlo tamno. Ako nema oblaka, iz zračenja se može izračunati temperatura površine (mora, tla), a ako su prisutni oblaci zračenje je mjera temperature vrha oblaka. Problem pri očitavanju temperature predstavljaju tanki cirusi koji propuštaju dio zračenja od sloja ispod sebe te time daju netočan iznos.

3.1.3 Temperature (BT) iz podataka u infracrvenim kanalima

Satelitske snimke u infracvenim kanalima daju podatak o zračenju koje emitiraju objekti u atmosferi ili na površini zemlje. Prema Planckovom zakonu zračenja, intenzitet zračenja proporcionalan je temperaturi tijela koje zrači, odnosno tijelo niže temperature emitira manje zračenja od tijela više temperature.

Iz satelitskih podataka moguće je izračunati točnu temperaturu svakog piksela. SEVIRI podatci na MSG satelitima su 10-bitni, što znači da je svakom pikselu na dobivenoj snimci dodjeljena vrijednost od 0 to 1023, te se ove vrijednosti nazivaju $counts$. Veza između njih i radijance R promatranog piksela je linearna:

$$R = CAL_{offset} + CAL_{slope} * counts$$

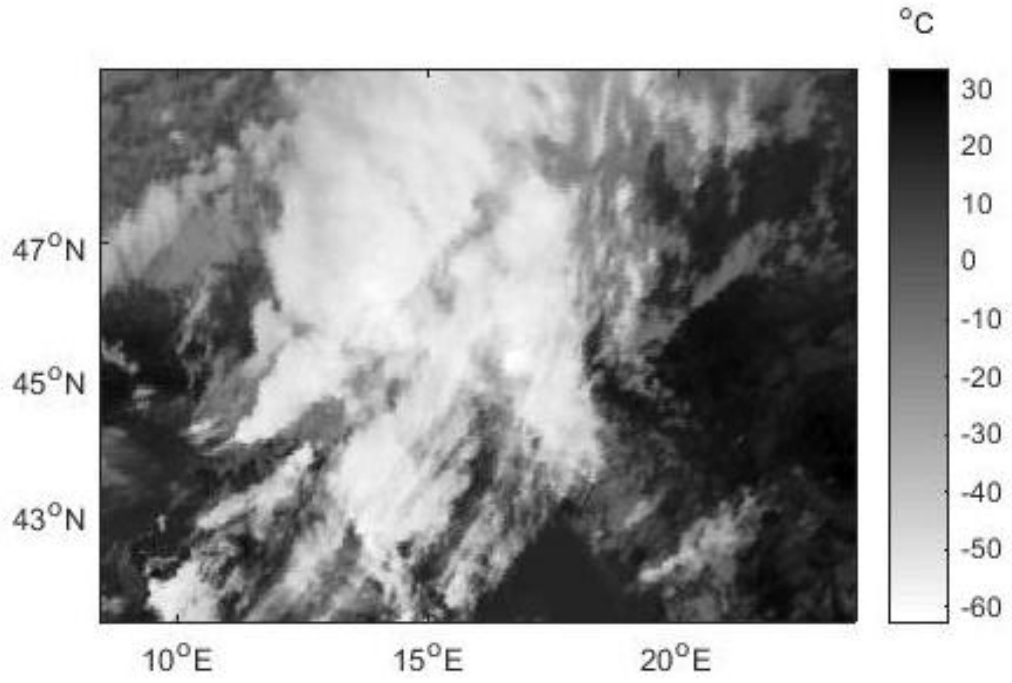


Slika 3.7: SEVIRI snimka iznad Europe, 25.10.2003. u 10:15 UTC u kanalu IR10.8. (EUMETSAT - MSG Interpretation guide, 2018)

CAL_{offset} i CAL_{slope} su vrijednosti dobivene kalibracijom. Početna kalibracija instrumenata na satelitu se vrši prije lansiranja, te se nakon uspostavljanja stabilne geostacionarne orbite konstantno korigira. Gore navedeni koeficijenti dobiveni takvom kalibracijom se vrlo sporo mijenjaju. Ovisno o kojem se spektralnom kanalu radi, ovako dobivene radijance se preračunavaju u temperaturu, odnosno albedo. Kako poznajemo radijancu svakog pojedinog piksela, njegovu temperaturu možemo dobiti iz Planckovog zakona zračenja. Malo korigirana relacija glasi:

$$BT = \left[\frac{C_2 \nu_c}{log(\frac{C_1 \nu_c^3}{R} + 1)} - B \right] / A$$

gdje je BT, tzv. "brigtness temperature", izražena u Kelvinima, ν_c središnji valni broj promatranog spektralong kanala, $C_1 = 1.19104 \cdot 10^{-5} mW m^{-2} sr^{-1} (cm^{-1})^{-4}$, $C_2 = 1.43877 K (cm^{-1})^{-1}$, te A i B konstante koje ovise o spektralnom kanalu. Primjerice, za kanal IR10.8 one iznose $A = 0.9983$, te $B = 0.627$.



Slika 3.8: Satelitska snimka u kanalu IR10.8 s odgovarajućom *BT*, 07.11.2011., 10:45 UTC

3.1.3.1 Primjeri računanja temperature (BT) iz infracrvenih kanala

Prije samog računanja temperature iz satelitskih podataka, potrebno je razumjeti o čemu zapravo dobivamo informaciju. U kanalima "atmosferskog prozora" zračenje koje dolazi do satelita je zračenje prvog, odnosno najvišeg objekta kojeg on odozgo "vidi". Ovaj princip je demonstriran na nekoliko primjera u različitim situacijama: bez naoblake, s niskom stratusnom naoblakom, te s debljom i tanjom visokom naoblakom. BT koju očitavamo je dobivena iz vrijednosti zračenja u svakom pikselu. Prizemni uvjeti u dolje navedenim primjerima dobiveni su iz sinoptičkih izvještaja GMP Zagreb-Maksimir, radiosondažni podaci su s iste postaje, dok su BT dobivene iz satelitskih snimki s MSG satelita u $hdf5$ formatu, obrađenih u *Matlab-u*.

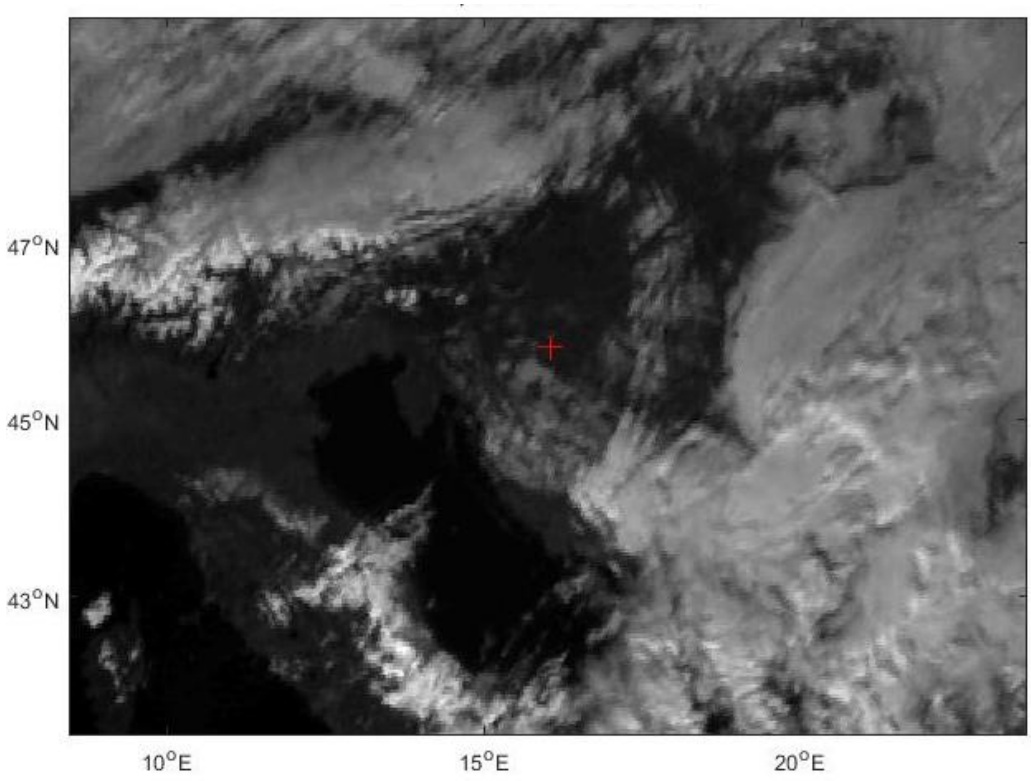
Prvi primjer je 25.12.2011. u 12 UTC nad područjem postaje Zagreb-Maksimir. Prizemna temperatura je $7.7°C$, a uvjeti smanjene vidljivosti nisu prisutni. BT iz kanala IR8.7, IR10.8 i IR12.0 su redom 6.69, 7.66 i $7.38°C$. Iz satelitske snimke na slici 3.9a možemo zaključiti da je situacija vedra, dakle dobivene BT odgovaraju temperaturi površine. Temperatura najnižeg sloja u radiosondaži (slika 3.9b) je otprilike $7°C$, te nema naznaka o oblacima, što se podudara sa satelitskom snimkom. Iz ovog se primjera vidi i da je *BT* dobivena iz kanala IR10.8 jednaka temperaturi mjerenoj na postaji.

Drugi primjer je 27.12.2011. u 12 UTC. Prizemna temperatura na postaji Zagreb-Maksimir iznosi $4.7°C$, uz prizemnu horizontalnu vidljivost $5.7km$. Temperature u kanalima IR8.7, IR10.8 i IR12.0 su redom -3.79, -1.56 i $-3.79°C$. Na satelitskoj snimci na slici 3.10 u kanalima VIS0.6 i IR10.8 vidljivo je da je većina kontinentalne Hrvatske, pa tako i promatrana postaja, pod slojem stratusne naoblake ili magle bez viših oblaka, što znači da BT u IR kanalima pripada temperaturi vrha tog sloja. Ovo se može potvrditi i iz radiosondaže (slika 3.11) nad postajom, gdje se vidi da se sloj oblaka proteže do visine $900hPa$ plohe, te je njegov vrh temperature približno $-2°C$, što ponovno najbolje odgovara temperaturi dobivenoj iz podataka u kanalu IR10.8.

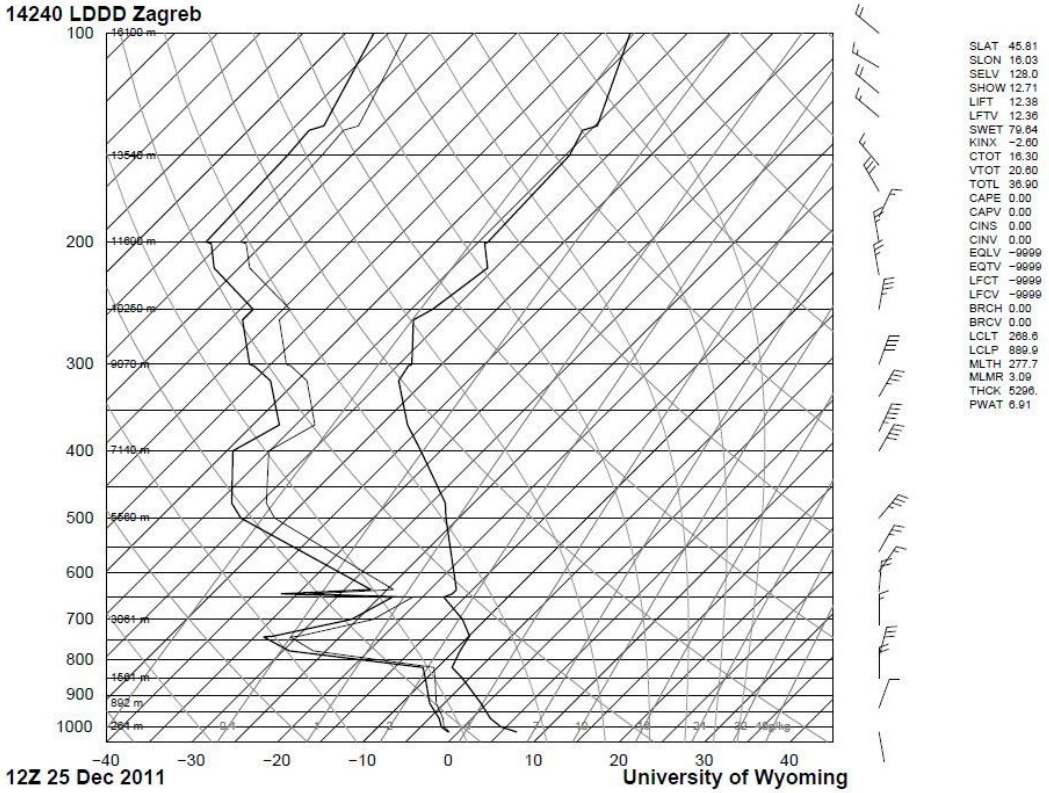
Treći primjer je 19.12.2011. u 12 UTC. Prizemna temperatura iznosi $-0.1°C$, te je prema podatcima motrenja na postaji prisutna sumaglica uz vidljivost $2km$. BT iz kanala IR8.7, IR10.8 i IR12.0 su redom -36.54, -36.36 i $-37°C$. Sa satelitske snimke u IR10.8 kanalu (3.12) nije potpuno jasno nalazi li se nad postajom nizak ili visok oblak. U kanalu IR3.9 su niski oblaci radi svoje više temperature i veće refleksivnosti tamniji od hladnih visokih oblaka, te je lakše vidjeti da se nad područjem postaje

prostiru i visoki oblaci. Temperatura dobivena iz satelitskih podataka je dakle temperatura sloja visokih oblaka. Ovo možemo potvrditi i radiosondažom (slika 3.13), gdje vidimo dubok vlažan sloj od površine do otprilike visine $650hPa$ plohe, te se nad njim nalazi i sloj visokog oblaka na visini $480hPa$ plohe, temperature otprilike $-36°C$.

Četvrti primjer je 18.12.2011. u 12 UTC. Prizemna temperatura iznosi $0.2°C$, te je pristuna magla uz horizontalnu vidljivost $400m$. Temperature u kanalima IR8.7, IR10.8 i IR12.0 su redom -9.88, -8.93 i $-11.24°C$. Sa satelitske snimke na slici 3.14 u IR10.8 kanalu vidimo da se u okolini postaje, a pogotovo zapadno od nje, nalaze hladni oblaci, dok se na snimci u kanalu NIR1.6 vidljivo da se, radi tamnije boje, radi o ledenim oblacima. Nad samom postajom se, dakle, nalazi tanak sloj hladnih ledenih oblaka. Iz radiosondaže (slika 3.15) nad postajom vidi se da je sloj magle vrlo plitak, a temperatura vrha tog sloja je vrlo bliska površinskoj. Dakle, piksel nad postajom je u ovom slučaju kontaminiran transparentnim cirusom. Vrlo niska temperatura cirusa i njegova djelomična propusnost zračenja koje dolazi iz slojeva ispod njega rezultira temperaturom koja odgovara kombinaciji zračenja cirusnog i maglenog sloja, nižom od temperature sloja magle, a višom od temperature cirusa. Ovakav podatak o temperaturi nije iskoristiv.

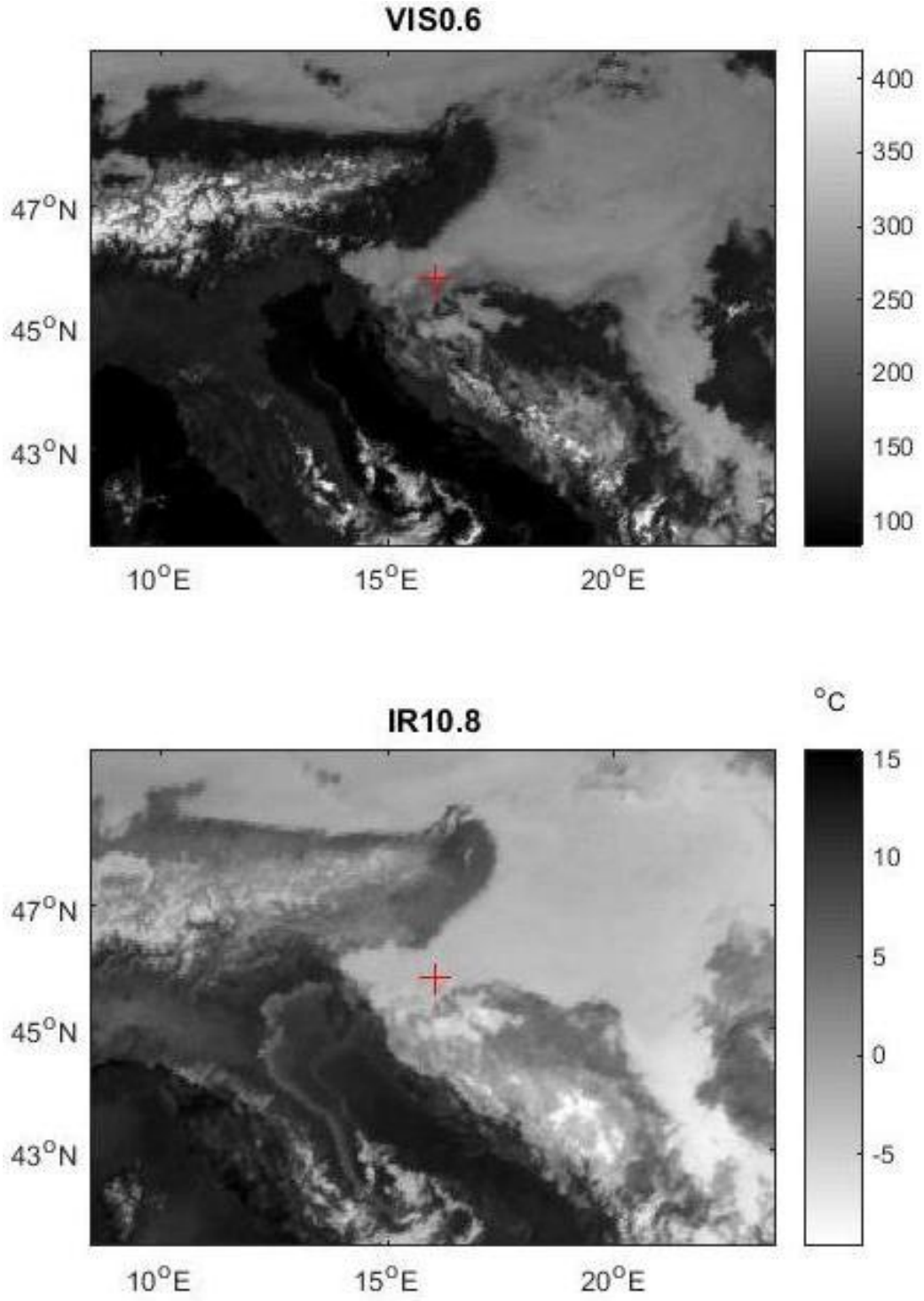


(a) Kanal VIS0.6, 25.12.2011., 12 UTC

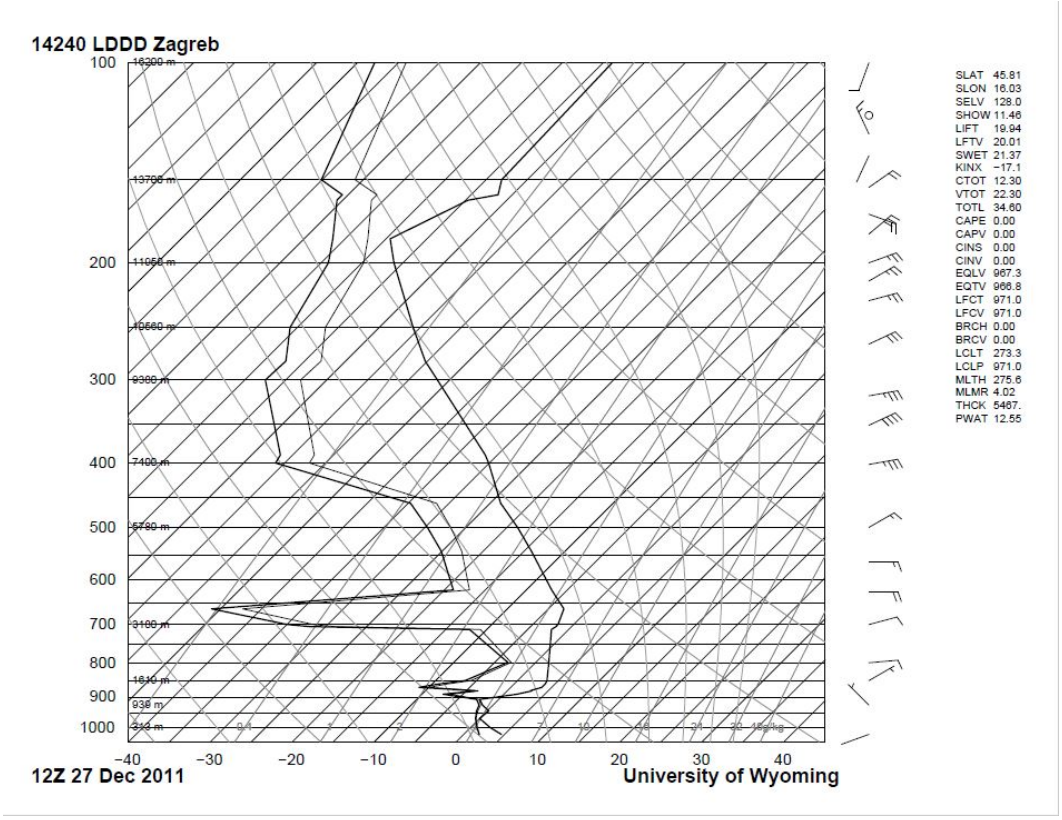


(b) Radiosondaža nad postajom Zg-Maksimir, 25.12.2011., 12 UTC

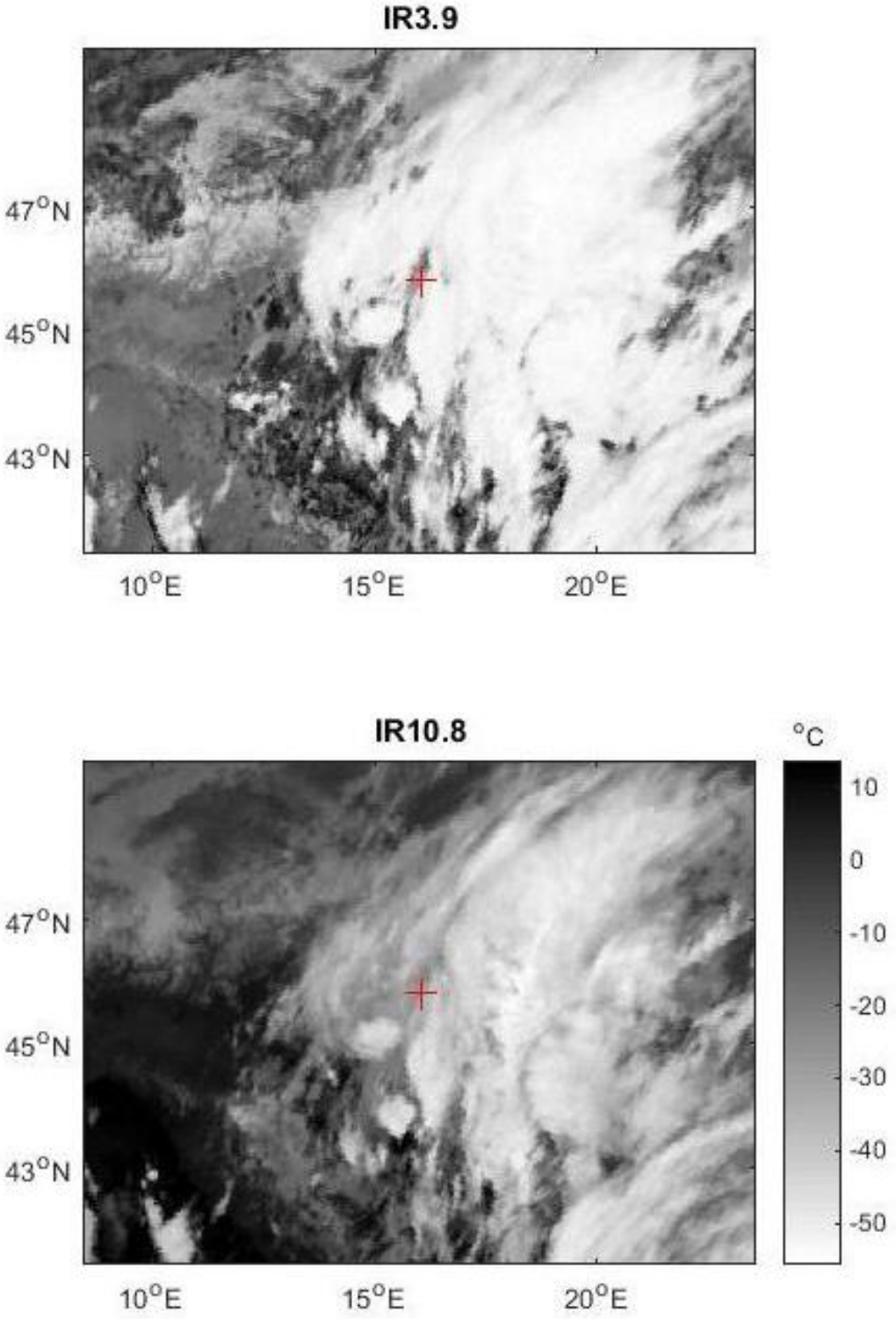
Slika 3.9: Satelitska snimka (gore) i radiosondaža (dolje) 25.12.2011., 12 UTC



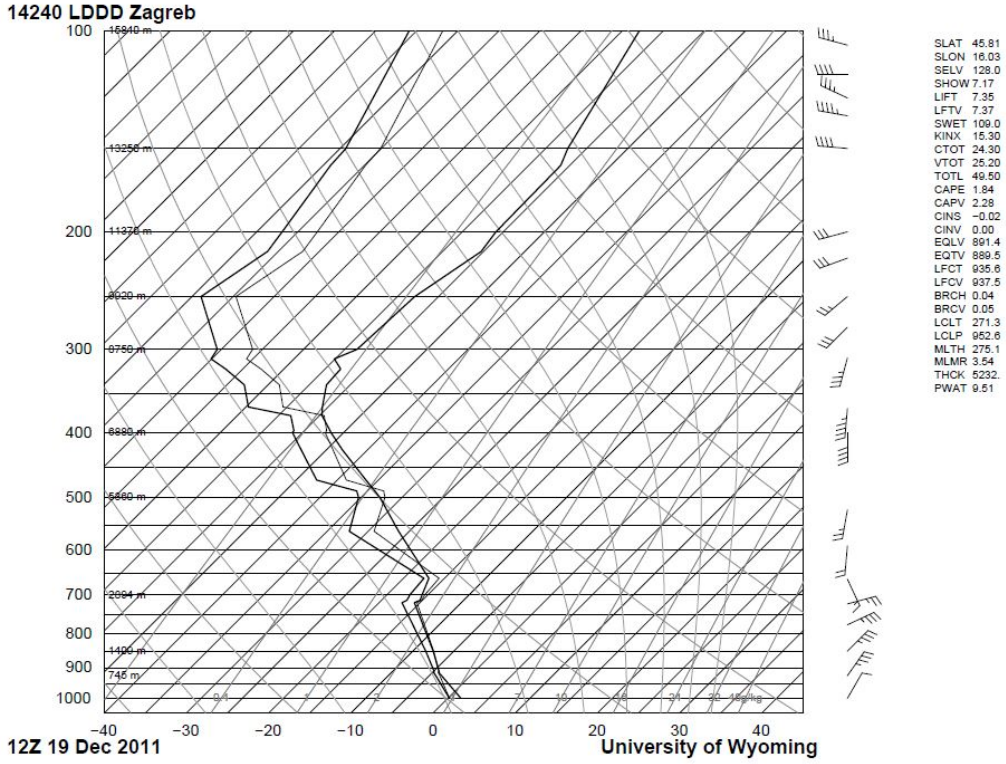
Slika 3.10: Satelitske snimke u kanalima VIS0.6 (gore) i IR10.8 (dolje), 27.12.2011., 12 UTC



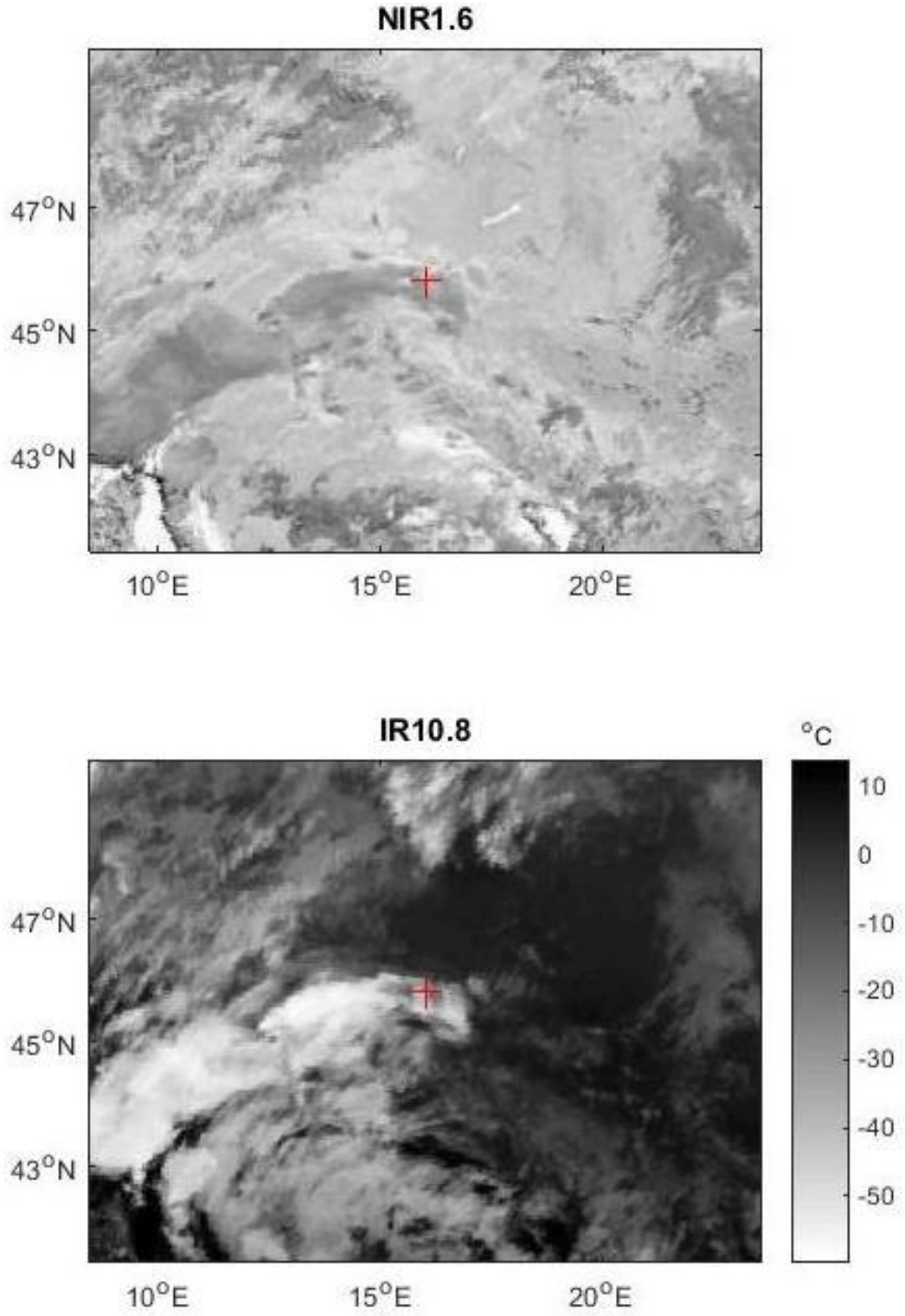
Slika 3.11: Radiosondaža nad postajom Zg-Maksimir, 27.12.2011., 12 UTC



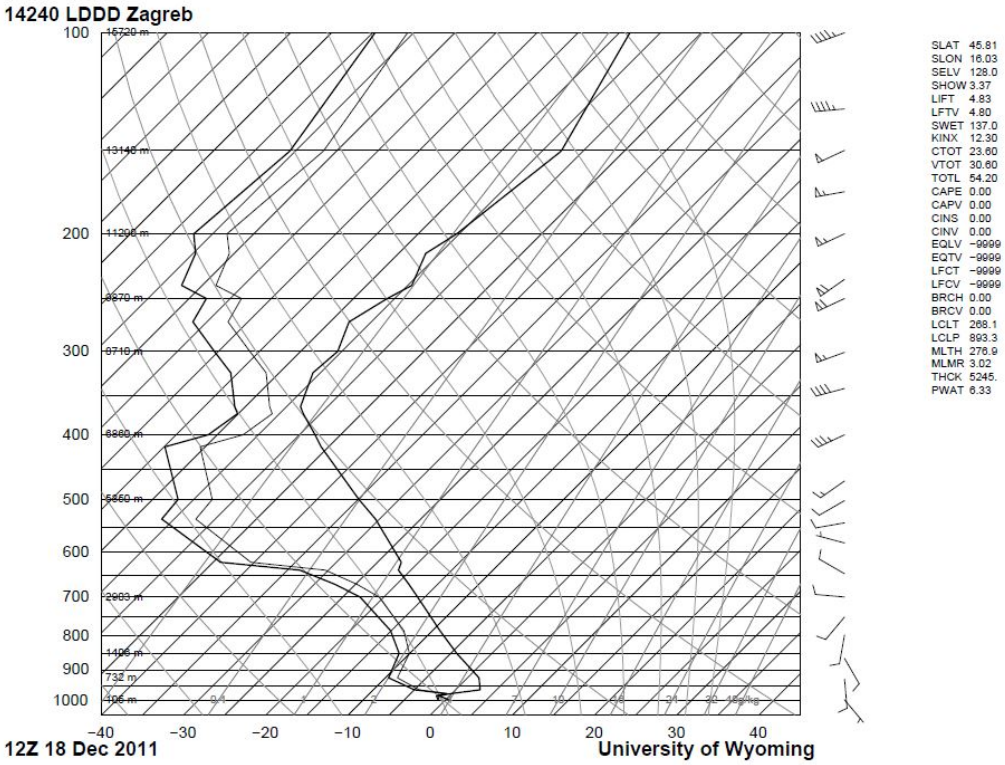
Slika 3.12: Satelitske snimke u kanalima IR3.9 (gore) i IR10.8 (dolje), 19.12.2011., 12 UTC



Slika 3.13: Radiosondaža nad postajom Zg-Maksimir, 19.12.2011., 12 UTC



Slika 3.14: Satelitske snimke u kanalima NIR1.6 (gore) i IR10.8 (dolje), 18.12.2011., 12 UTC



Slika 3.15: Radiosondaža nad postajom Zg-Maksimir, 18.12.2011., 12 UTC

3.2 Podatci motrenja na postajama

Promatrano vremensko razdoblje je 10., 11. i 12. mjesec 2011. godine. Termini s maglom, sumaglicom i motrenom stratusnom naoblakom dobiveni su iz motrenja na glavnim meteorološkim postajama u Hrvatskoj: Zagreb – Grič, Zagreb – Maksimir, Zagreb – Pleso, Osijek, Rijeka, Split – Resnik, Split – Marjan, Dubrovnik, Dubrovnik – Ćilipi. Koordinate pojedinih postaja se nalaze u tablici 3.1.

Iz podataka s GMP-a izdvojeni termini u kojima je bila:

- prisutna magla – vidljivost manja od $1km$
- prisutna sumaglica – vidljivost između 1 i $10km$
- velika količina stratusne naoblake – naoblaka $N > 6$, niski oblaci tipa stratus

Za izdvojene termine uzeti su satelitski podatci nad Hrvatskom u *hdf5* formatu, koji su obrađeni u *Matlab-u*, s ciljem dobivanja temperature vrha sloja magle, sumaglice ili stratusa. Jedan od problema pri računanju željenih temperatura iz satelitskih snimki je prisutnost visoke ili isprekidane naoblake. Naime, temperatura

postaja	šifra postaje	geog. širina	geog. dužina
Zagreb-Grič	236	$45°49'N$	$15°59'E$
Zagreb-Maksimir	240	$45°49'N$	$16°02'E$
Zagreb-Pleso	241	$45°44'N$	$16°04'E$
Osijek	284	$45°28'N$	$18°49'E$
Rijeka	216	$45°20'N$	$14°27'E$
Split-Marjan	445	$43°31'N$	$16°26'E$
Split-Resnik	444	$43°32'N$	$16°18'E$
Dubrovnik	472	$42°39'N$	$18°05'E$
Dubrovnik-Čilepi	474	$42°34'N$	$18°16'E$

Tablica 3.1: Popis GMP RH i njihove koordinate.

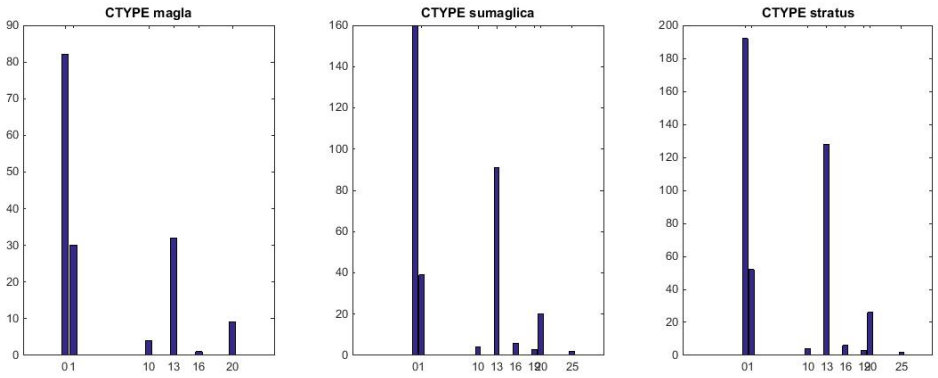
u određenom pikselu je temperatura najvišeg objekta njemu. Nerijetko se nad slojem magle, sumaglice ili niskog stratusa nalazi i sloj srednje ili visoke naoblake. U ovakvim slučajevima podatak o temperaturi nije od koristi. Osim podataka u pojedinačnim spektralnim područjima, korišten je i NWCSAF *CTYPE* produkt, odnosno tip naoblake. Njegove kategorije se nalaze u tablici 3.2.

CTYPE	karakteristika
0	Not processed
1	Land
2	Sea
3	Snow
4	Ice
7	Very low
10	Low
13	Medium
16	High
17	High opaque
18	Cumulonimbus
19	Very high
20	Semitransparent
25	Broken
28	Unclassified

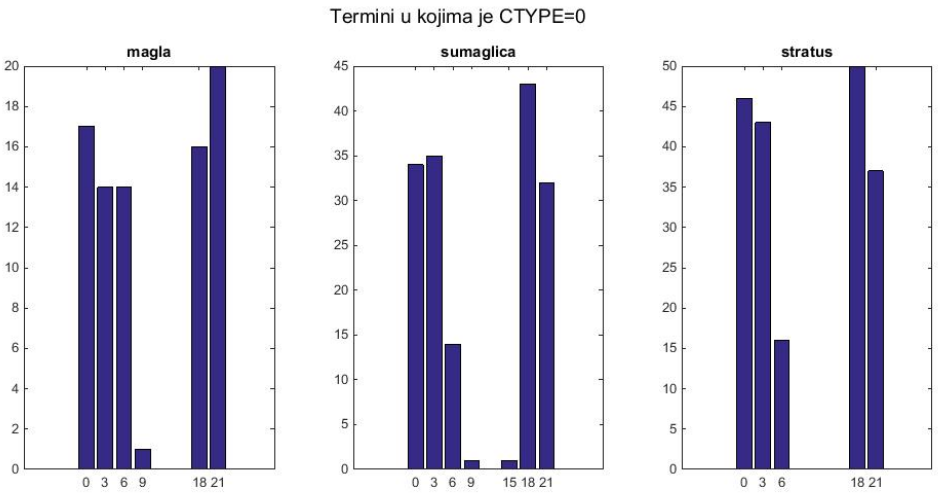
Tablica 3.2: Kategorije NWCSAF *CTYPE* produkta.

Na slici 3.16 nalazi se *CTYPE* za sve termine s maglom, sumaglicom i stratusnom naoblakom dobivene iz motrenja na GMP. U sva tri slučaja, najveći dio termina otpada na ”neobrađene” podatke. Budući da se *CTYPE* produkt oslanja na solarne kanale, tijekom noći ili pri visokom zenitnom kutu njegova vrijednost iznosi 0, tj. „Not Processed“ (slika 3.17). U velikom broju termina nad promatranom postajom

nalazi se srednje visoka naoblaka, te je u manjim udjelima prisutna niska, visoka, vrlo visoka i isprekidana naoblaka (slika 3.16).



Slika 3.16: Histogram tipova naoblake među podatcima za slučajeve magle, sumaglice i stratusne naoblake.

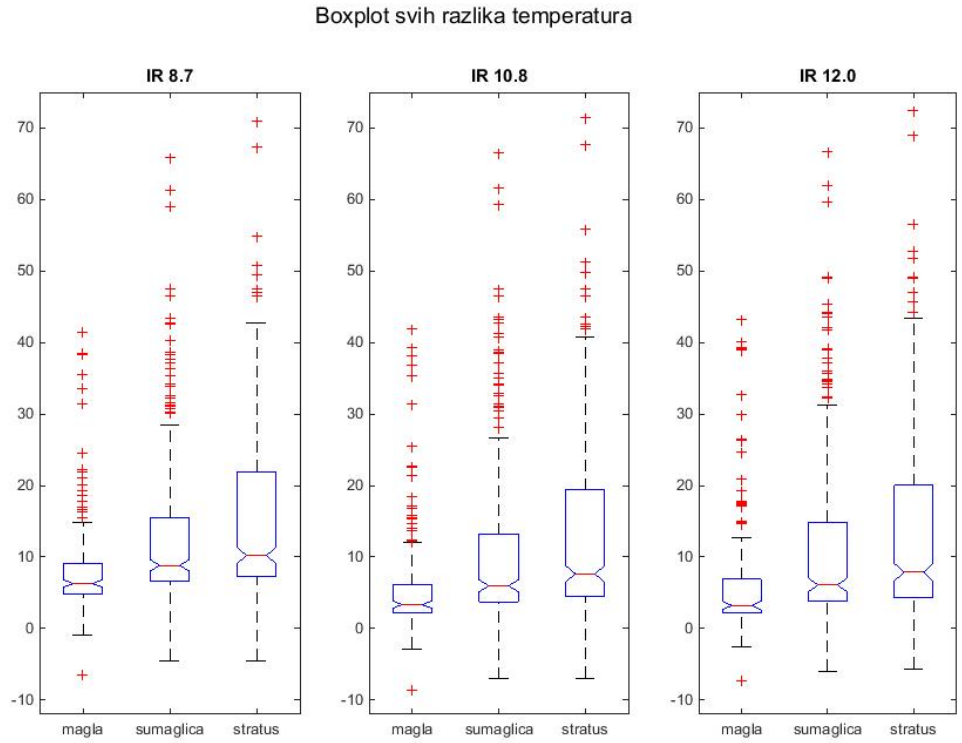


Slika 3.17: Histogram termina u kojima je CTYPE=0, ”Not Processed”.

Za diskusiju su uzeti samo slučajevi magle, sumaglice i stratusa u kojima je prisutna vrlo niska ($CTYPE = 7$), niska ($CTYPE = 10$) i srednja ($CTYPE = 13$) naoblaka.

4 Rezultati

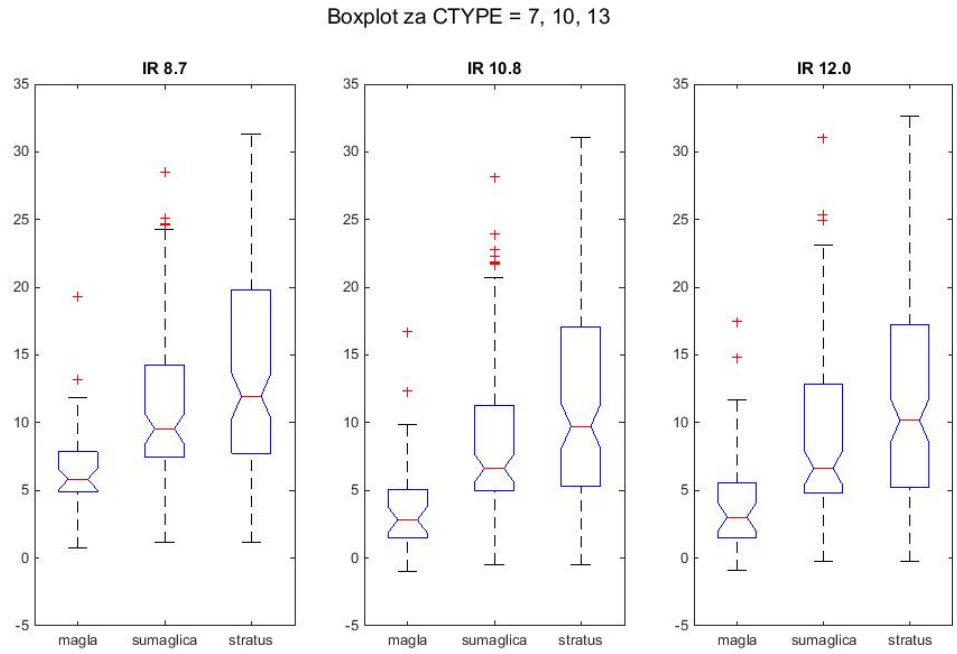
Iz podataka motrenja na glavnim meteorološkim postajama u razdoblju od 01.10. do 31.12.2011. izdvojeno je 158 termina s maglom, 325 sa sumaglicom, te 416 sa stratusnom naoblakom. Na slici 4.1 nalazi se prikaz dobivenih razlika prizemne temperature mjerene na meteorološkoj postaji i BT dobivene iz satelitskih podataka, posebno za maglu, sumaglicu, i stratusnu naoblaku. Ovi podatci sadrže i slučajeve visoke, vrlo visoke, polutransparentne i isprekidane naoblake, što je nepoželjno.



Slika 4.1: Dijagram s pravokutnicima (*boxplot*) razlika prizemne temperature i temperature dobivene iz satelitskih snimki za slučajeve magle, sumaglice i stratusne naoblake.

Koristeći NWCSAF CTYPE produkt izdvojeni su samo slučajevi vrlo niske, niske i srednje naoblake. Uzevši u obzir samo navedene termine, preostaje ih 36 s maglom, 95 sa sumaglicom, te 132 sa stratusom. Prikaz dobivenih razlika prizemne temperature mjerene na meteorološkoj postaji i temperature vrha oblačnog, odnosno maglovitog sloja nalaze se na slici 4.2, posebno za maglu, sumaglicu i stratusnu naoblaku.

Razlike su računate za tri spektralna kanala u atmosferskim prozorima, IR8.7, IR10., te IR12.0. Za sva tri navedena kanala razlika prizemne temperature i temperature vrha sloja u slučajevima s maglom se vidljivo razlikuju od razlika u slučajevima



Slika 4.2: Dijagram s pravokutnicima (*boxplot*) razlika prizemne temperature i temperature vrha sloja magle, sumaglice ili oblaka za slučajeve magle, sumaglice i stratusne naoblake u slučajevima u kojima CTYPE produkt daje vrlo nisku, nisku ili srednju naoblaku.

sa sumaglicom i stratusnom naoblakom. Interkvartilni raspon razlike temperatura za kanal IR10.8 nalazi se u intervalu $2-5°C$ za maglu, $5-11°C$ za sumaglicu te $6-17°C$ za stratusnu naoblaku. U kanalu IR12.0 interkvartilni rasponi su $2-6°C$ za maglu, $5-13°C$ za sumaglicu, te $6-17°C$ za stratusnu naoblaku. Za kanal IR8.7 svi interkvartilni rasponi su „pomaknuti“ prema većim vrijednostima, te se nalaze na $5-8°C$ za maglu, $7-14°C$ za sumaglicu, te $7-19°C$ za stratusnu naoblaku. Temperature u kanalu IR8.7 su nešto veće nego u ostala dva. Razlog tome je što, iako se kanal IR8.7 nalazi u ”atmosferskom prozoru”, apsorpcija na vodenoj pari ipak nije potpuno zanemariva, te dolazi do izražaja u slučajevima poput promatranih, gdje je sadržaj vodene pare u prizemnom sloju visok. Za sva tri kanala medijan temperaturne razlike u slučajevima magle je znatno niži od medijana u slučajevima sumaglice i stratusne naoblake, i to za otprilike $3°C$.

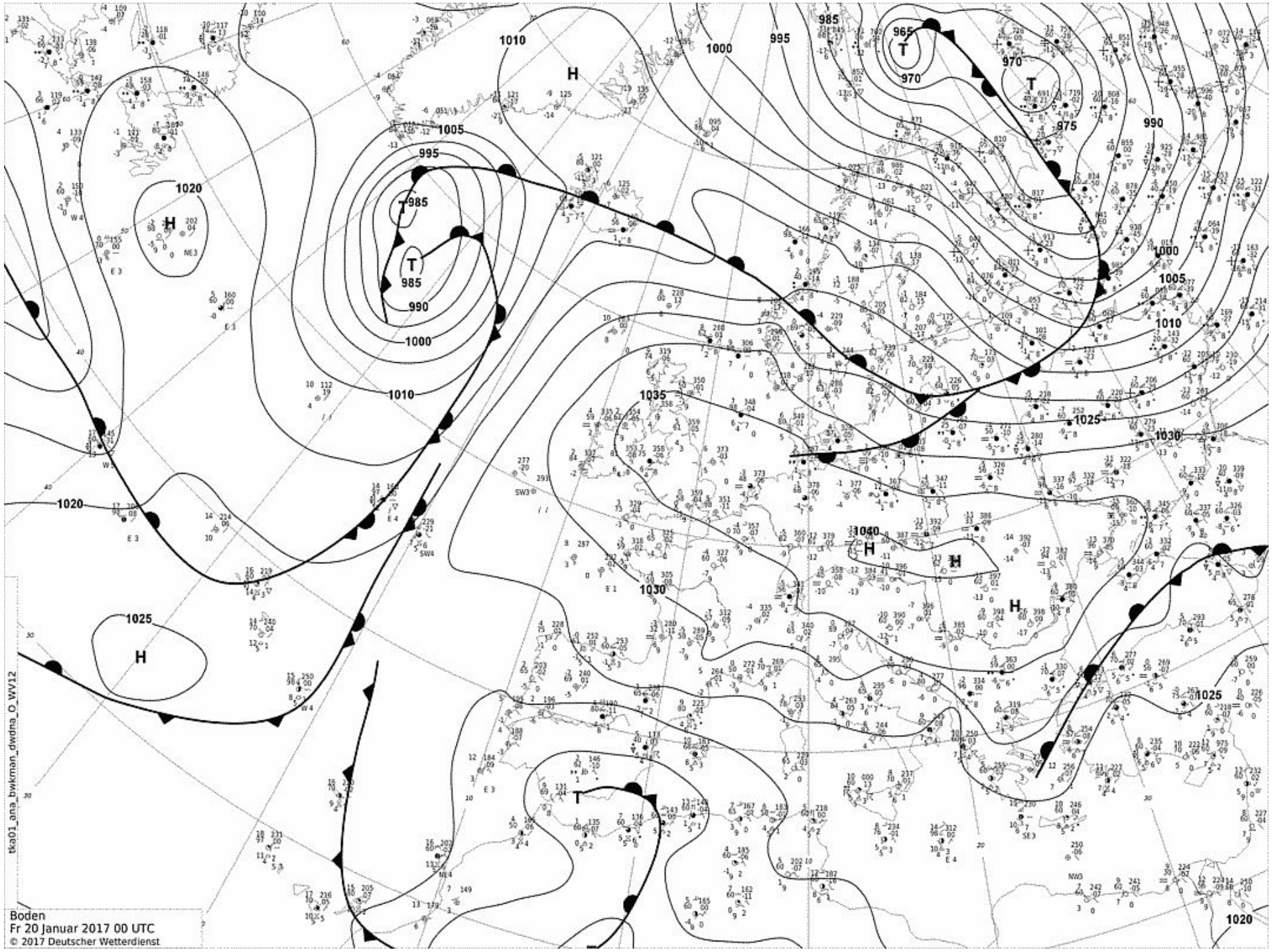
5 Analiza magle nad Hrvatskom 20. i 21.01.2017.

Za posebno razmatranje uzeta su dva dana u siječnju 2017., odnosno tri termina: 20.01.2017. u 00 UTC, 20.01.2017. u 06 UTC te 21.01.2017. u 06 UTC. Tijekom oba dana, vremenska situacija nad Hrvatskom je bila pod utjecajem anticiklonalnog polja sa centrom nad Češkom i Slovačkom, koje se premještalo prema Hrvatskoj (slike 5.1, 5.2 i 5.3). Mirna i vedra situacija tijekom ove dvije noći pogodovala je pojačanom radijacijskom ohlađivanju, te formiranju magle i sumaglice nad područjem kontinentalne Hrvatske. Kroz program *Visual Weather* na računalima DHMZ-a dobivene su prizemne temperature iz redovitih sinoptičkih izvještaja na kontinentalnim postajama, te temperatura u IR10.8 kanalu. Analiza je provedena kako bi se provjerila pretpostavka da je u slučajevima kada je razlika temperature vrha sloja u IR10.8 kanalu i prizemne temperature manja od $5°C$ pri tlu prisutna magla.

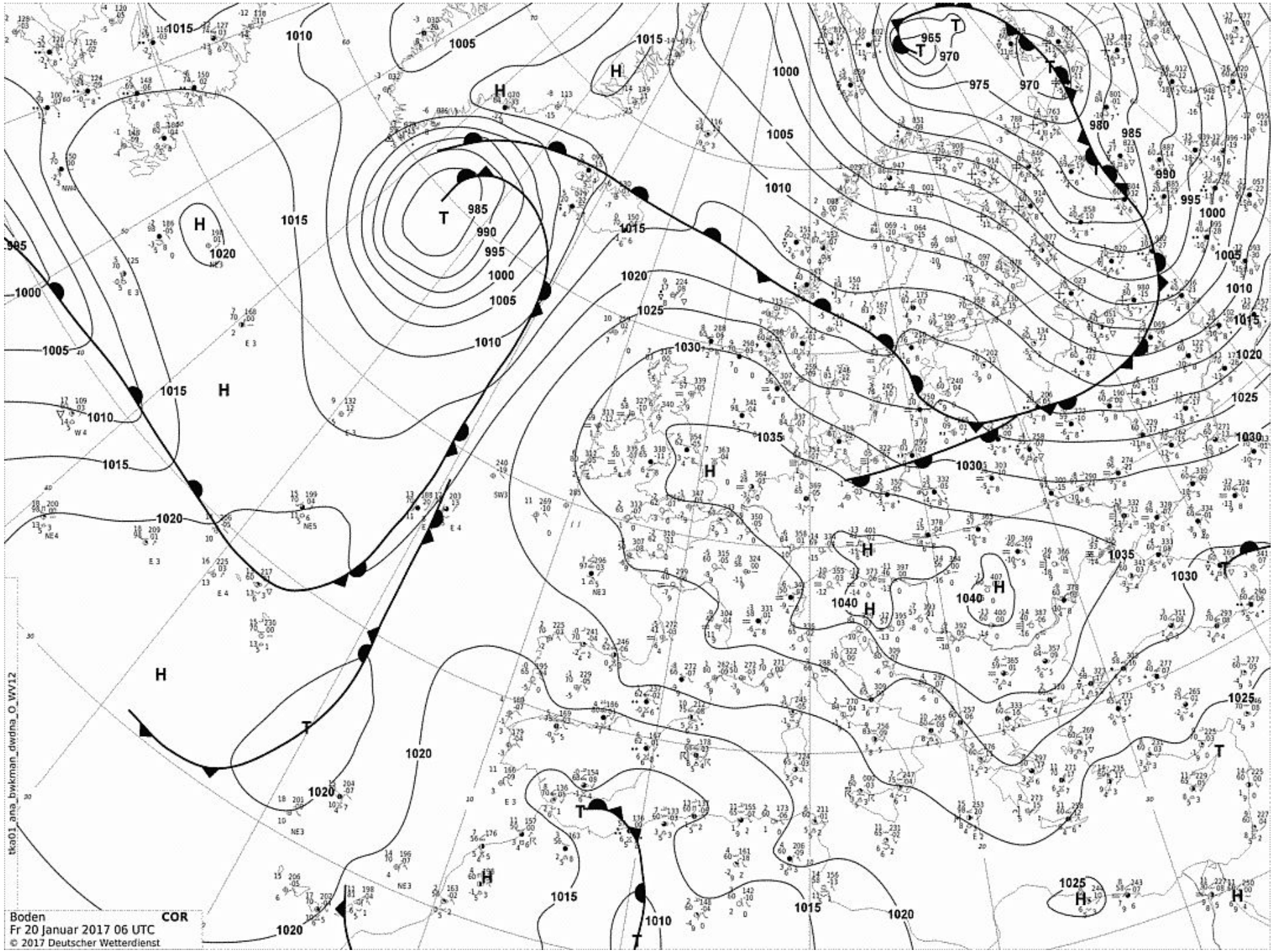
U prvom terminu, 20.01.2017 u 00 UTC (slika 5.4), na postajama Slavonski Brod, Osijek te Osijek-aerodrom temperaturne razlike redom su bile 1.37, 2.28 te $0.24°C$. Na navedene tri postaje osmotrena je i magla. Na postajama Gradište i Bilogora razlike temperatura su 5.41 i $9.11°C$. Na postaji Gradište osmotrena je sumaglica, dok na Bilogori nisu osmotrene nikakve pojave. Temperaturne razlike i pojave u ovom terminu se odlično poklapaju s početnom pretpostavkom.

U drugom terminu, 20.01.2017. u 06 UTC (slika 5.5), temperaturne razlike na postajama Slavonski Brod, Gradište, Osijek i Osijek-aerodrom su redom -0.6, 1.0, 0.8 i $-1.3°C$. Na sve četiri postaje prisutna je magla. Na postajama Gorice, Bjelovar, Bilogora i Sisak temperaturne razlike su redom 5.0, 5.3, 6.9 i $4.6°C$. Na navedenim postajama osmotrena je sumaglica. Na postaji Daruvar temperaturna razlika je $0.2°C$, nema pojava te je vidljivost $15km$. Dobivene razlike i osmotrene pojave se dobro slažu sa početnom pretpostavkom, uz iznimku postaja Sisak i Daruvar.

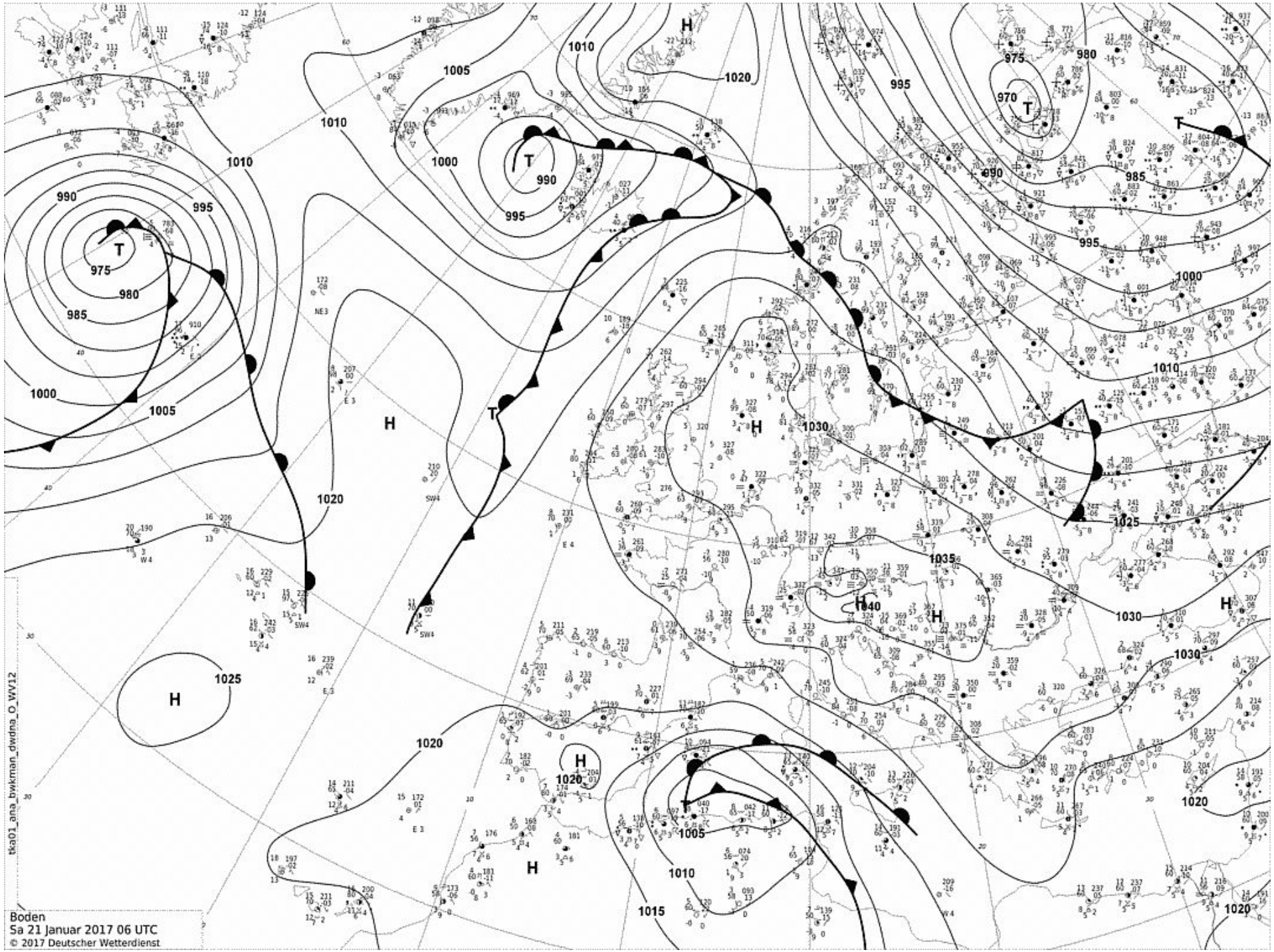
U trećem terminu, 21.01.2017. u 06 UTC (slika 5.6), na postajama Gorice, Slavonski Brod, Gradište, Osijek, Osijek-aerodrom i Vukovar temperaturne razlike redom iznose 3.58, -1.93, 4.37, -0.915, -1.876 i $-1.48°C$. Na svim postajama je prisutna magla, osim na postaji Gorice, gdje je prisutna sumaglica. Temperaturne razlike i pojave se slažu s početnom pretpostavkom za sve postaje, s iznimkom postaje Gorice.



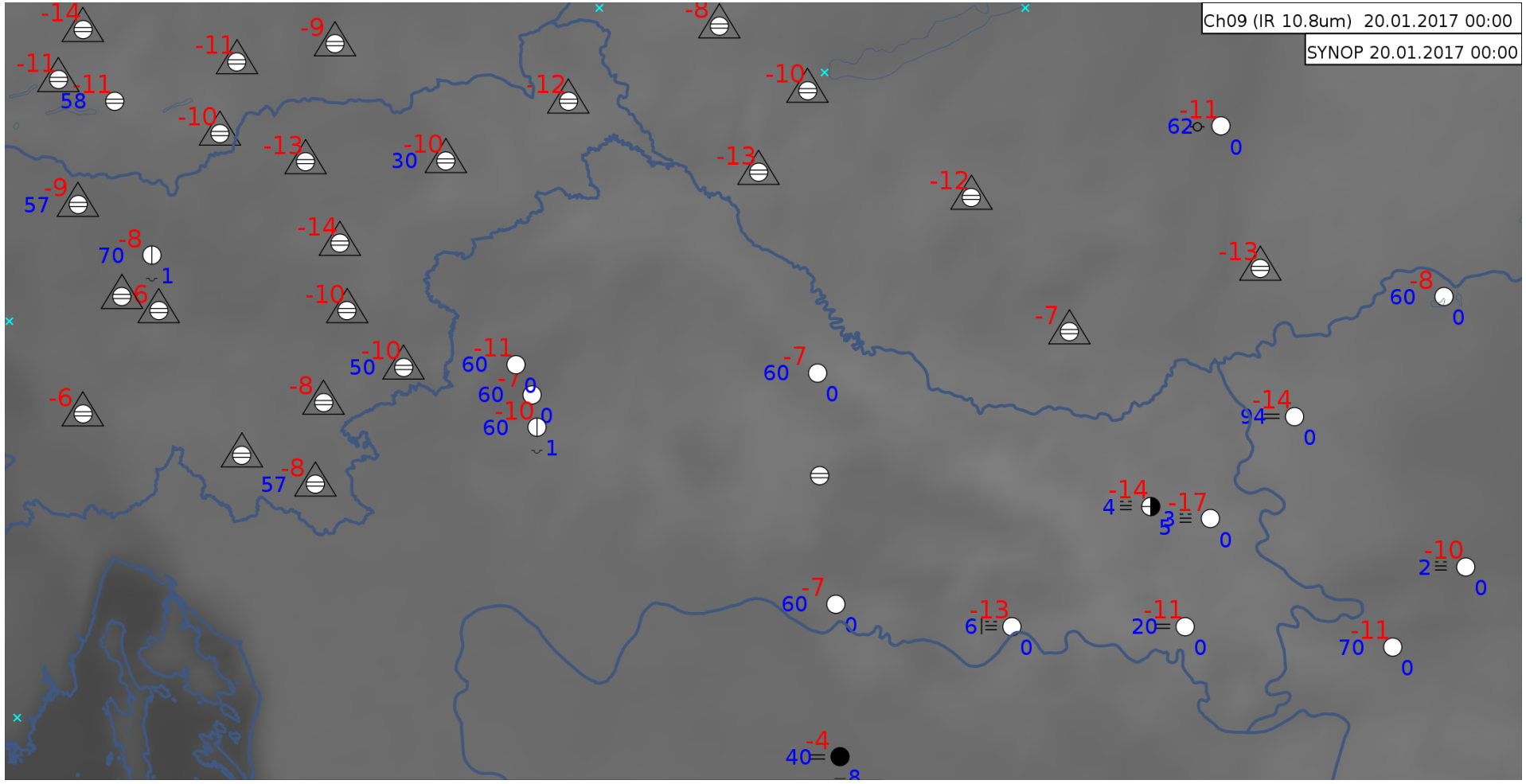
Slika 5.1: Sinoptička karta za 20.01.2017. u 00 UTC. (DWD, 2017)



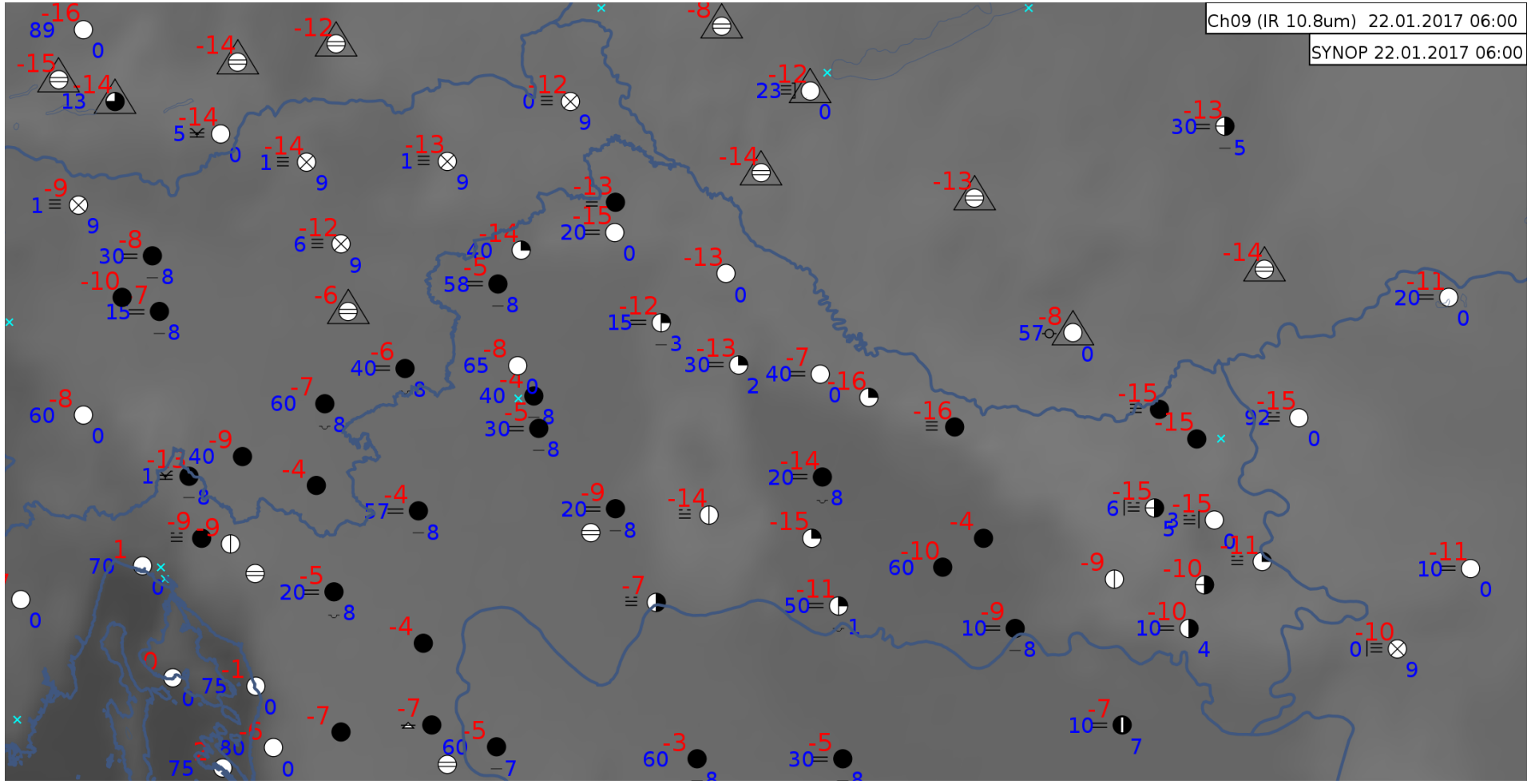
Slika 5.2: Sinoptička karta za 20.01.2017. u 06 UTC. (DWD, 2017)



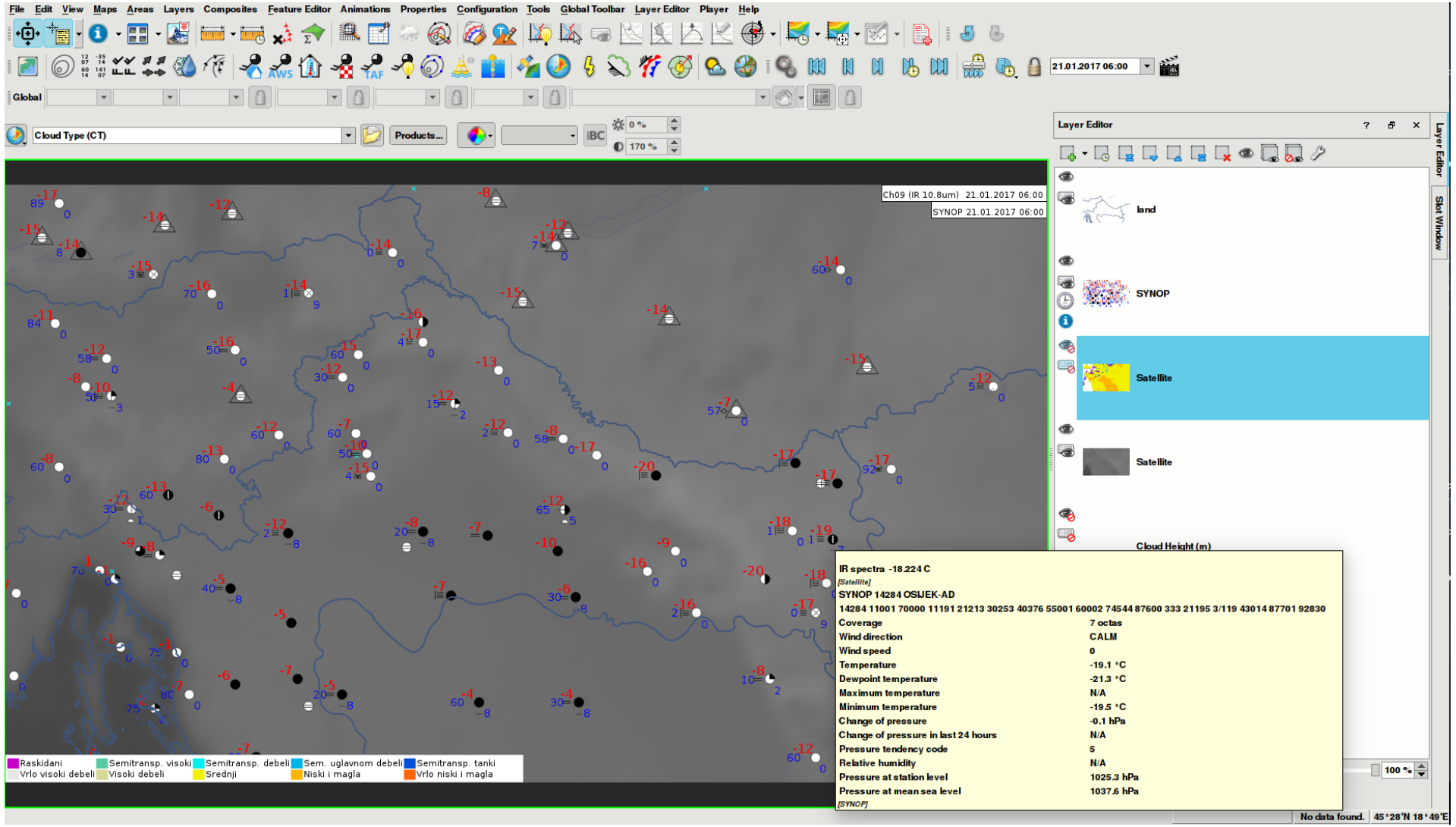
Slika 5.3: Sinoptička karta za 21.01.2017. u 06 UTC. (DWD, 2017)



Slika 5.4: Sinopi i satelitska snimka u kanalu IR10.8 za 20.01.2017. u 00 UTC.



Slika 5.5: Sinopi i satelitska snimka u kanalu IR10.8 za 20.01.2017. u 06 UTC.



Slika 5.6: Sinopi i satelitska snimka u kanalu IR10.8 za 21.01.2017. u 06 UTC i prikaz rada u programu *Visual Weather*.

6 Diskusija i zaključak

U radu su obrađeni podaci temperature zraka mjerene na glavnim meteorološkim postajama i odgovarajući podaci o temperaturi vrhova oblaka iznad lokacije postaje dobiveni iz MSG satelitskih snimaka za razdoblje listopad - prosinac 2011. godine. Satelitski podatci u *hdf5* formatu obrađeni su u programu *Matlab*. U prvom dijelu rada, ilustriran je način na koji se satelitski podatci mogu koristiti da bi se dobila informacija o temperaturi. Kao što je pokazano na tri primjera, BT dobivena iz IR kanala u "atmosferskom prozoru" daje temperaturu najvišeg neprozirnog sloja kojeg "vidi" satelit: u slučaju bez naoblake to odgovara temperaturi površine Zemlje, a u slučajevima gdje se nad područjem nalazi deblji oblačni sloj dobivena temperatura odgovara temperaturi vrha takvog sloja. Problematični su slučajevi u kojima se nad promatranim područjem prostire i tanki prozirni oblak. U ovakvim situacijama, podatak o temperaturi nije koristan jer je kombinacija tankog oblačnog sloja i slojeva ispod njega.

Drugi dio rada se sastoji od testiranja metode koja bi omogućila razlikovanje sloja magle ili sumaglice od stratusnog sloja koji je odignut od površine. Promatrana je razlika temperature mjerene na $2m$ na GMP i temperature vrha sloja magle ili oblaka u spektralnim područjima IR8.7, IR10.8 i IR12.0. U slučajevima magle medijani temperaturnih razlika značajno se razlikuju od medijana temperaturnih razlika pri sumaglici i stratusnoj naoblaci. Medijan temperaturnih razlika je u slučajevima magle manji nego u druga dva slučaja, te je za $3°C$ niži u sva tri kanala.

Nekoliko je mogućih izvora pogrešaka kod ovakve sheme. Prvi je rezolucija signala na SEVIRI instrumentu. Signal je 10-bitni, dakle vrijednost svakog mjerenja na instrumentu poprima vrijednost između 0 i 1023. Uvidom u kalibracijske tablice za tri korištena spektralna kanala, na intervalu od -30 do $40°C$, najveća razlika dvije susjedne vrijednosti koje temperatura može poprimiti je $0.23°C$. Druga moguća pogreška pri mjerenju je pogreška pri utvrđivanju prizemne temperature na postaji. Obje potencijalne pogreške su reda veličine $0.2°C$.

Pri analizi podataka neke od meteoroloških postaja se nalaze relativno blizu jedna drugoj; Zagreb-Maksimir, Zagreb-Grič, te Zagreb-Pleso. Iako ove tri postaje nisu daleko jedna od druge, njihove klimatološke karakteristike magle se razlikuju (Brzoja, 2012). Naime, razlika u učestalosti magle na ove tri postaje je značajna. Tako su

u razdoblju od 1981.-2008.g. na postaji Zg-Grič zabilježena 993 dana s maglom, na postaji Zg-Maksimir 1168 dana s maglom, a na postaji Zg-Pleso čak 2113 maglovitih dana, s time da su mjerenja sa Plesa nepotpuna. Razloge ovakvim razlikama Brzoja nalazi u geografskom položaju postaja. Pleso se nalazi u ruralnom dijelu grada, dok su Maksimir i Grič pod urbanim utjecajem. Također, Grič se nalazi na većoj nadmorskoj visini od Maksimira i u samom je centru grada, te je utjecaj toplinskog otoka jači. Iz svega navedenoga smatram da se ove tri postaje mogu neovisno promatrati za potrebe ovog rada.

Česta kontaminacija promatranog područja visokom naoblakom je još jedan od problema kojeg ovakva shema ne može zaobići. Nakon korištenja *CTYPE* produkta, kako bi se eliminirali slučajevi sa srednjom i visokom naoblakom u promatranom pikselu, broj iskoristivih podataka je pao za više od dvije trećine - za maglu je broj podataka pao sa 158 na 36, za sumaglicu sa 325 na 95, te za stratusnu naoblaku sa 413 na 132 (poglavlje 4). Pouzdanost ovakve metode otklanjanja kontaminiranih piksela je također upitna, jer ni jedna od satelitskih shema za utvrđivanje tipa naoblake nije nepogrešiva. Tako se nad promatranim područjem može naći tanak cirusni sloj kojeg shema neće detektirati (npr. Bendix et al, 2005.), što će dovesti do krivog očitanja temperature vrha sloja.

Primjena rezultata pokazana je na nekoliko slučajeva u poglavlju 5. Ustanovljeno je da je, u slučajevima gdje nad promatranim područjem nema srednje i visoke naoblake, razlika temperature vrha sloja u kanalu IR10.8 i prizemne temperature mjerene na postajama koja je manja od $5°C$ dobra indikacija postojanja magle pri tlu.

Kao što je ilustrirano u gore navedenim slučajevima, te s obzirom na konstantno rastući broj automatskih postaja, koje mjere temperaturu, ali ne i sve pojave, vjerujem da rezultati ovoga rada mogu naći primjenu u situacijama gdje je potrebno razlikovati stratusne slojeve oblaka od magle pri tlu pomoću daljinskih (satelitskih) mjerenja i temperatura izmjerenih na automatskim meteorološkim postajama.

Literatura

Bendix, J., Thies, B., Cermak, J., and Nauss, T. (2005). Ground Fog Detection from Space Based on MODIS Daytime Data - A Feasibility Study. Weather and Forecasting, 20(6), 989-1005. doi:10.1175/waf886.1

Brzoja, D. (2012). Analiza pojave magle na širem području Zagreba. Diplomski rad. Zagreb, Prirodoslovno-matematički fakultet

Byers, H.R. (1959). General Meteorology. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York

Koračin D. (1978). Glavni uzroci magle na zagrebačkom aerodromu Pleso. Diplomski rad. Zagreb, Prirodoslovno-matematički fakultet

Gultepe, I., Pagowski, M. and Reid, J. (2006). A Satellite-Based Fog Detection Scheme Using Screen Air Temperature. Weather and Forecasting, 22(3), 444-456. doi:10.1175/waf1011.1

Gultepe, I. (2006). Fog and Boundary Layer Clouds: Introduction. Pageoph Topical Volumes Fog and Boundary Layer Clouds: Fog Visibility and Forecasting, 1114-1116. doi:10.1007/978-3-7643-8419-7_1

Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S., Cermak, J., Bott, A., Bendix, J., Müller, M., Pagowski, M., Hansen, B., Ellrod, G, Jacobs, W., Toth, G., Cober, S. G. (2007). Fog Research: A Review of Past Achievements and Future Perspectives. Pageoph Topical Volumes Fog and Boundary Layer Clouds: Fog Visibility and Forecasting, 1121-1159. doi:10.1007/978-3-7643-8419-7_3

Oke, T., Mills, G., Christen, A., Voogt, J. (2017). Urban Climates. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781139016476

Pandžić, K. (ur.) (2008). Naputak za opažanja i mjerenja na glavnim meteorološkim postajama. DHMZ, Zagreb

Rastogi, B., Williams, A. P., Fischer, D. T., Iacobellis, S. F., Mceachern, K., Carvalho, L., Jones, C., Baguskas, S. A., Still, C. J. (2016). Spatial and Temporal Patterns of Cloud Cover and Fog Inundation in Coastal California: Ecological Implications. Earth Interactions, 20(15), 1-19. doi:10.1175/ei-d-15-0033.1

Willett, H. C.(1928). Fog and haze, their distribution, and forecasting. Monthly weather review. Vol.56, No.11

DWD - Deutsche Wetterdienst. http://www2.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html

EUMETSAT - MSG Interpretation Guide. https://www.eumetsat.int/website/home/Data/Training/TrainingLibrary/DAT$_$2044069.html

Meteosat Design - EUMETSAT. https://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Meteosat/MeteosatDesign/index.html

U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. How Do Weather Events Impact Roads? https://ops.fhwa.dot.gov/weather/q1$_$roadimpact.htm