



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

NATAŠA STRELEC MAHOVIĆ

**PREPOZNAVANJE KONVEKTIVNIH OBLAKA,
MAGLE I NISKIH OBLAKA TE LOCIRANJE ŠUMSKIH
POŽARA MULTISPEKTRALNOM ANALIZOM
SATELITSKIH SLIKA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2011.



UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF SCIENCE
GEOPHYSICAL INSTITUTE

NATAŠA STRELEC MAHOVIĆ

**DETECTING CONVECTIVE CLOUDS, FOG AND LOW
CLOUDS AND LOCATING FOREST FIRES USING
MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGE ANALYSIS**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2011



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

NATAŠA STRELEC MAHOVIĆ

**PREPOZNAVANJE KONVEKTIVNIH OBLAKA,
MAGLE I NISKIH OBLAKA TE LOCIRANJE ŠUMSKIH
POŽARA MULTISPEKTRALNOM ANALIZOM
SATELITSKIH SLIKA**

DOKTORSKI RAD

Mentorica: dr.sc. Branka Ivančan-Picek

Zagreb, 2011.

Hvala mojoj mentorici dr.sc. Branki Ivančan-Picek što mi je pružila stručnu, ali prije svega i moralnu podršku. Velika pomoć bili su mi komentari prof.dr.sc. Branka Grisogona kao i oni doc.dr.sc. Danijela Belušića pa i njima zahvaljujem na pomoći. Hvala također svim kolegicama i kolegama iz Odjela za vremenske analize i prognoze što su nekoliko mjeseci odrađivali i moje operativne smjene. Kolegama iz DUZS-a puno hvala na iscrpnoj bazi podataka o požarima. A ponajviše hvala cijeloj mojoj obitelji jer bez njih, bez njihove podrške, svakodnevne pomoći i strpljenja, ovaj rad nikada ne bi bio napisan. Stoga rad posvećujem upravo njima: svojoj djeci Dori i Borni, suprugu Damiru i svojim dragim roditeljima Zdenki i Antunu. Svima od srca hvala!

SAŽETAK

Tema ovog rada je poboljšanje, operativna primjena, testiranje i validacija metoda za prepoznavanje i praćenje razvoja konvektivnih oblaka, magle i niskih oblaka te lociranje šumskih požara, temeljenih na kombinacijama Meteosat satelitskih podataka u različitim spektralnim područjima. Istraživanje je podijeljeno u tri zasebne tematske cjeline, od kojih je najdetaljnije obrađena tema praćenja razvoja konvektivnih oblaka.

Poglavlje 2 donosi osvrt na dosad korištene metode prepoznavanja konvekcije i njihove nedostatke. Zbog potrebe za poboljšanjem izведен je novi produkt, temeljen na razlici refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm . Pokazuje se da ta razlika prepoznaje male konvektivne stanice u početnoj fazi razvoja. Promjena razlike refleksivnosti, s početnih 40 ili 50% na 60 ili 70% nakon 15 minuta, najčešće se može povezati s naglim razvojem konvektivne stanice. Razlika refleksivnosti veća od 80% javlja se kad su na vrhu oblaka prisutni veliki kristali leda, što je pokazatelj zrele faze konvektivne stanice. Također su istražene karakteristike vrhova konvektivnih oblaka uočene u različitim spektralnim područjima. Primjećeno je da se područje najveće razlike refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm , kao i područje najvećeg albeda u kanalu 0.6 μm , nalaze jugozapadno od najhladnjeg dijela oblaka. Istodobno se najhladniji dio oblaka poklapa s područjem najveće refleksivnosti u kanalu 3.9 μm . Povećana refleksivnost u kanalu 3.9 μm povezana je s jakom uzlaznom strujom koja na vrh oblaka izbacuje male kristaliće leda. Iz svih obrađenih primjera može se zaključiti da je najaktivniji dio oblaka onaj u kojem je razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm između 60 i 80%.

Za prepoznavanje magle i niskih oblaka, obrađeno u poglavlju 3, noću se koristi razlika temperature u kanalima 10.8 i 3.9 μm , uz graničnu vrijednost razlike 3 K, dok je danju uključen i kanal 1.6 μm . Usporedba s motrenjima na postajama pokazuje uspješnost metoda. S obzirom na to da satelit ne razlikuje maglu od niskih oblaka uveden je dodatni kriterij u kojem se temperatura u kanalu 10.8 μm uspoređuje s mjerrenom temperaturom na 2 m.

U lociranju šumskih požara ključnu ulogu ima temperatura u kanalu 3.9 μm , kao što je pokazano u poglavlju 4. Kao dodatni kriterij uzima se razlika temperature u kanalima 3.9 i 10.8 μm . Obrađeni podaci o svim požarima većim od 1 ha, tijekom požarne sezone 2009., pokazuju da je samo 7% požara bilo uočljivo u satelitskim podacima. Ostali nisu bili vidljivi uglavnom zbog postojanja oblaka iznad požarišta ili premale površine požarišta. Ovakav rezultat ukazuje na to da sustav za rano upozoravanje na požare ne može biti temeljen samo

na satelitskim podacima s geostacionarnog satelita zbog premale vjerojatnosti detekcije, osobito kad se radi o malim požarima.

Na kraju se može zaključiti da je od tri prikazane mogućnosti korištenja kombinirane analize satelitskih slika najuspješnija ona u prepoznavanju i praćenju konvektivnih oblaka.

Ključne riječi:

satelitski podaci, multispektralna analiza, konvektivni oblaci, razlika refleksivnosti 0.6-3.9 μm , magla/niski oblaci, razlika temperature 10.8-3.9 μm , požari, kanal 3.9 μm .

SUMMARY

The topic of this dissertation is improvement, operative implementation, testing and validation of methods for detection and monitoring of convective clouds, fog and low clouds and locating forest fires, using a combination of Meteosat satellite data in different spectral channels. The study was divided into three separate thematic units, of which the most detailed, presented in Chapter 2, deals with monitoring of convective clouds. The goal of the research was to provide operational forecasters with satellite products that would enable easier recognition and nowcast of typical important weather phenomena.

Detection of potentially dangerous convective clouds is one of the most important tasks in operational weather services. Low predictability of the processes causing convective development emphasizes the importance of the methods for early detection and nowcast of convective cells. Satellite-based methods play a major role in this field. Chapter 2 explains the possibilities of using satellite data in the analysis of all stages of convective development. In pre-convective stage, temperature difference of channels 6.2 and 7.3 μm locates the unstable regions. Concerning the early detection of convective cells, this work makes reference to the previously used methods of convective clouds recognition, based on 10.8 μm channel data, and discusses their shortcomings. Following the need to improve the existing methods, a new product is designed, based on reflectivity difference of 0.6 and 3.9 μm channels. Validation of the method includes comparison to radar and lightning data. The results show that the reflectivity difference detects small convective cells in the initial stage of their development. Changes in difference levels, from the initial 40% or 50% to 60 or 70% after 15 minutes, can be associated with the rapid development of a convective cell. The difference values of 80% or larger are connected with large ice particles on top of convective cloud, absorbing most of the solar radiation in 3.9 μm channel. These are the values that can be associated with mature convective cells.

Additionally, analysis of cloud-top characteristics in channels 0.6, 3.9 and 10.8 μm as well as in 0.6 - 3.9 μm reflectivity difference was performed. It was noted that the area of highest 0.6 - 3.9 μm reflectivity difference, as well as the maximum of 0.6 μm reflectivity, are located southwest of the coldest part of the cloud. However, the coldest part of the cloud coincides with the area of highest 3.9 μm reflectivity. Increased 3.9 μm reflectivity can be associated with strong updrafts, bringing small ice particles to the top of the cloud. Finally, it

can be concluded that the most active part of the cloud is the one with reflectivity difference of channels 0.6 and 3.9 μm between 60 and 80%.

Chapter 3 is dedicated to the recognition of fog and low clouds. Method used for fog/low cloud detection at night utilizes the temperature difference of the channels 10.8 and 3.9 μm . During daytime, 1.6 μm channel reflectivity is added to the algorithm. Comparison with synop observations shows satisfactory performance of both methods, with limitations at the time of dawn and dusk. Given that the satellite cannot distinguish the fog from low clouds, an additional criterion has been introduced, comparing the 10.8 μm temperature with the measured 2 m temperatures.

Chapter 4 presents the possibility of using satellite data to locate forest fires. The key in hot-spot detection is the 3.9 μm temperature, whereas an additional criterion is provided by the temperature difference of channels 3.9 and 10.8 μm . The analysis of all recorded fires larger than 1 ha, during fire season 2009, was performed. The results show that only 7% of fires were evident in satellite data. For all other fires detection was not possible. The most frequent reason were clouds above the fires, but in many cases fires were too small to be recognized and a large number of fires during dawn, dusk or even night was also not visible. This result indicates that the early warning system could not be based only on satellite data from geostationary satellites, since the probability of fire detection is too low, especially for small fires.

Finally, of all three investigated topics, multispectral satellite image analysis shows the most promising results in identifying and tracking of convective clouds.

Keywords:

satellite data, multispectral analysis, convective clouds, reflectivity difference of channels 0.6 and 3.9 μm , fog / low clouds, temperature difference of channels 10.8 and 3.9 μm , forest fires, channel 3.9 μm .

Sadržaj

1	UVOD	11
1.1	Multispektralna analiza – kombiniranje kanala	13
1.2	Cilj rada	15
2	PRAĆENJE RAZVOJA KONVEKTIVNIH OBLAKA	16
2.1	Uvod	16
2.2	Pred-konvektivni uvjeti	18
2.3	Prepoznavanje konvektivnih oblaka na slikama u infracrvenom dijelu spektra	24
2.4	Primjena solarnih kanala u ranom prepoznavanju konvektivnih oblaka	30
2.4.1	Svojstva solarnih kanala	30
2.4.2	Svojstva kanala $3.9\text{ }\mu\text{m}$	33
2.4.3	Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9\text{ }\mu\text{m}$	36
2.4.4	Metoda i podaci	38
2.4.5	Primjeri konvektivnih situacija	42
	Primjer 1: 20. svibnja 2009.	42
	Primjer 2: 03. srpnja 2007.	50
2.4.6	Pobliže o svojstvima vrhova konvektivnih oblaka vidljivim u kombinaciji kanala	60
2.5	Praćenje premještanja konvektivnih stanica	72
2.6	Zaključak	76
3	PREPOZNAVANJE MAGLE I NISKIH OBLAKA	79
3.1	Uvod	79
3.2	Prepoznavanje magle noću	79
3.3	Prepoznavanje magle danju	85
3.4	Rasprava	90
4	OTKRIVANJE POŽARA	91
4.1	Uvod	91

4.2	Svojstva kanala $3.9 \mu\text{m}$	92
4.3	Povod za istraživanje	94
4.4	Analiza podataka	99
4.5	Rasprava	103
5	ZAKLJUČAK	105
6	LITERATURA	109
PRILOG 1: Popis kratica i pojmove		115
ŽIVOTOPIS		117
POPIS OBJAVLJENIH RADOVA		121

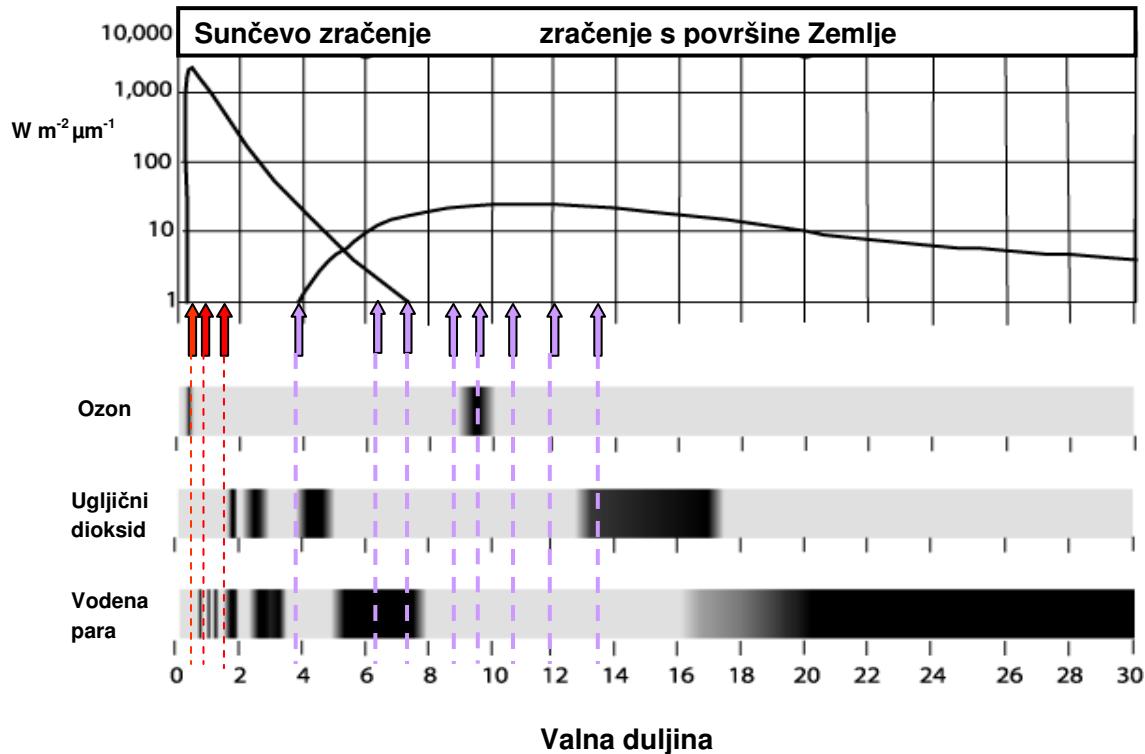
1 UVOD

Već tridesetak godina, otkada se sateliti koriste u meteorologiji, podaci o svojstvima atmosfere koje nam šalju nezamjenjiv su dio globalnog sustava mjerena i motrena. Javnosti su satelitski podaci uglavnom poznati u obliku slika koje mogu vidjeti na televiziji ili internetu, no to je samo vrlo mali dio njihove primjene. Instrumenti na satelitima mjeru zračenje koje dopire sa Zemlje i iz Zemljine atmosfere, u više spektralnih područja, dajući na taj način podatke o različitim svojstvima atmosfere i Zemljine površine. Ti su podaci od velike važnosti osobito na onim područjima gdje ne postoje klasična mjerena na meteorološkim postajama: iznad oceana, pustinja ili većih nenaseljenih područja. Budući da numerički modeli za prognozu vremena uvelike ovise o podacima koji im daju informaciju o trenutnom stanju atmosfere, satelitski podaci u mnogim slučajevima zamjenjuju ili nadopunjaju konvencionalne podatke mjerena. Time čine numeričku prognozu vremena točnijom i preciznijom. Osim na taj način, satelitski podaci mogu se i izravno pretvoriti u prognozu neposrednog razvoja vremena (engl. nowcast) do koje se dolazi praćenjem gibanja oblaka i njihovih promjena na uzastopnim slikama.

Lansiranje Meteosat satelita druge generacije (engl. Meteosat Second Generation, u dalnjem tekstu MSG) donijelo je pravu revoluciju u motrenju atmosfere iz svemira, osobito na području Europe i Afrike. SEVIRI (skraćeno od engl. Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager), instrument na MSG satelitima, snima zračenje sa Zemlje u 12 spektralnih područja svakih 15 minuta, odnosno svakih 5 minuta nad područjem Europe. Time omogućuje vrlo detaljan uvid u stanje atmosfere i procese koji se u njoj događaju. SEVIRI instrument ima osam kanala u termalnom infracrvenom području (IR), tri u području solarnog odnosno vidljivog dijela spektra (VIS) kao i širokopojasni vidljivi kanal visoke razlučivosti (HRVIS) (Sl. 1.1). Prostorna razlučivost HRVIS kanala u točki ispod satelita je 1 km, dok je razlučivost ostalih 11 kanala 3 km po pikselu.

Svako od spektralnih područja ima svoju primjenu u analizi stanja atmosfere i njenih sastojaka (Schmetz i sur., 2002). Tako se podaci u vidljivom djelu spektra, koji je zastupljen s dva kanala (0.6 i $0.8 \mu\text{m}$), koriste za prepoznavanje i praćenje oblaka te motrenje površine tla i aerosola. Mogu se koristiti u kombinaciji, čime se dobiva podatak o vegetaciji. Kanal u solarnom dijelu spektra, ali blizak infracrvenom području, $1.6 \mu\text{m}$, mjeri reflektirano Sunčevo

zračenje i omogućuje razlikovanje snijega od oblaka i vodenih od ledenih oblaka. Također daje i podatak o količini aerosola. Taj je kanal vrlo važan za zrakoplovstvo zbog njegove mogućnosti prepoznavanja ledenih oblaka. Infracrveni kanal 3.9 μm ima važnu ulogu u prepoznavanju niskih oblaka i magle noću, procjeni temperature tla i mora noću te u prepoznavanju šumskih požara odnosno vrućih točaka. Upravo će kanal 3.9 μm biti korišten u svim sljedećim poglavlјima ovoga rada te će se pokazati njegova primjenljivost na tri posve različite pojave u atmosferi odnosno na tlu. Podaci u infracrvenim kanalima u području apsorpcije vodene pare (6.2 i 7.3 μm) mjeru su za količinu vodene pare u višoj odnosno srednjoj troposferi i omogućuju pridjeljivanje visine polutransparentnim oblacima. Zajednički podatak o vlazi iz oba kanala koristi se za praćenje struktura prepoznatljivih na slikama u spektru vodene pare, čime se osiguravaju oznake (engl. tracers) za proračunavanje atmosferskog vjetra, čak i u uvjetima kad nema oblaka. Važna im je primjena i u određivanju nestabilnosti atmosfere, kao što će biti pokazano u poglavlju 2. Infracrveni kanal 8.7 μm koristi se za dobivanje informacija o tankim cirusima, jer razlikuje vodene od ledenih oblaka, te u produktima za određivanje nestabilnosti atmosfere.



Slika 1.1: Ovisnost intenziteta zračenja o valnoj duljini za Sunčevu i Zemljino zračenje. Strelice prikazuju raspored valnih duljina kanala u kojima mjeri SEVIRI instrument. Ljubičastom bojom označeni su kanali u infracrvenom (Zemljinom) dijelu spektra, a crvenom oni u vidljivom (solarnom) dijelu spektra. U donjem dijelu slike prikazane su apsorpcijske vrpce ozona, ugljičnog dioksida i vodene pare. (Preuređeno iz „MSG Interpretation Guide“, Zwatz-Meise, 2004).

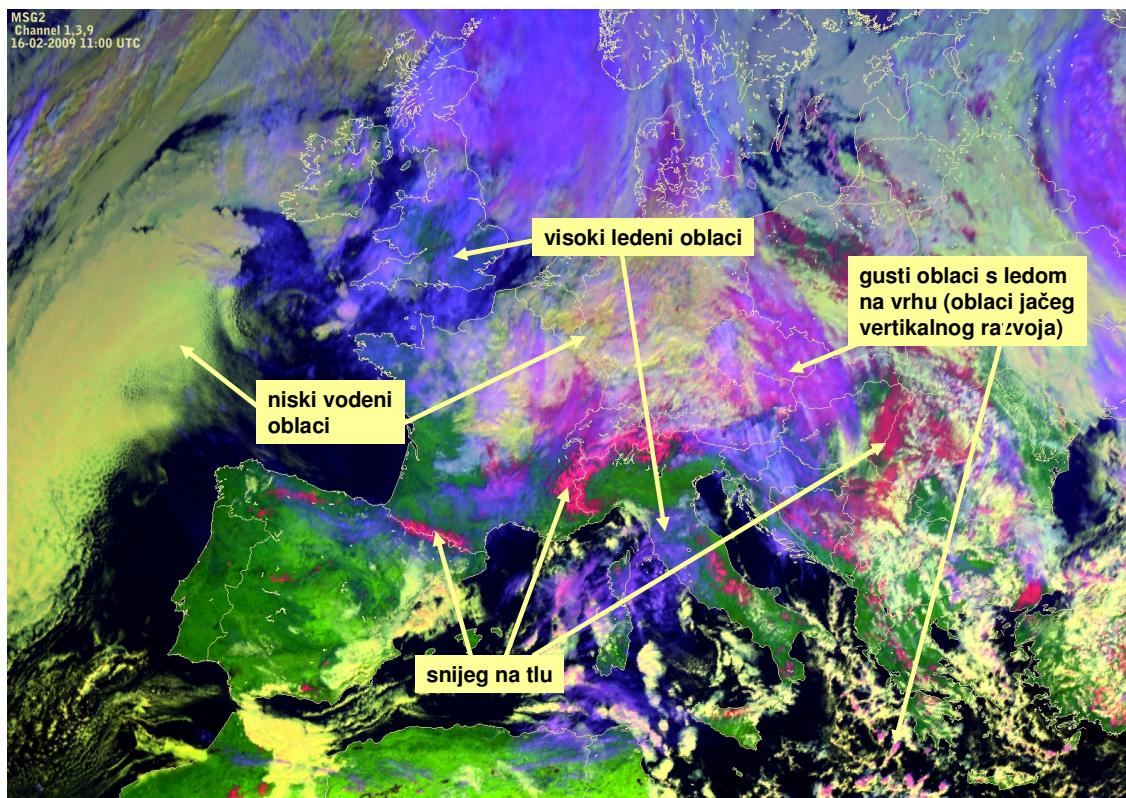
Kanal 9.7 μm , tzv. ozonski kanal, osjetljiv je na koncentraciju ozona u nižoj stratosferi pa omogućuje praćenje ukupnog ozona i njegovih dnevnih promjena kao i praćenje visine tropopauze. Termički infracrveni kanali 10.8 i 12.0 μm služe za mjerjenje temperature površine tla i vrhova oblaka, za procjenu nestabilnosti atmosfere te za praćenje oblaka prilikom proračunavanja atmosferskog vjetra. CO₂ kanal, srednje valne duljine 13.4 μm , koristi se za procjenu nestabilnosti atmosfere, a daje i informaciju o temperaturi niže troposfere te omogućuje određivanje visine polutransparentnih oblaka.

S gledišta meteorologa, koji satelitske podatke koriste u operativnom radu (u prognozi vremena u sklopu nacionalnih meteoroloških centara, zrakoplovnih, pomorskih, vojnih i drugih primijenjenih meteoroloških službi), količina slika koje stižu samo s Meteosat satelita prevelika je za pojedinačnu analizu svakog kanala u svakom vremenskom koraku. U skoroj budućnosti, za najviše desetak godina, kada podaci počnu stizati sa satelita treće generacije, njihova će količina biti nezamisliva za pojedinačnu analizu. Upravo je ta činjenica povod istraživanjima koja uključuju povezivanje više kanala u produkte za posebne namjene.

1.1 Multispektralna analiza – kombiniranje kanala

Iz prethodno navedenih svojstava pojedinačnih kanala i područja njihove primjene vidljivo je koliki potencijal leži u kombiniranju kanala, imajući na umu fizikalna svojstva koja oni u sebi nose. Takvo kombiniranje može se izvesti na više načina: podaci iz pojedinačnih kanala mogu se grafički povezati u tzv. RGB (od engl. Red-Green-Blue) kompozit, mogu se vrijednosti npr. temperature ili refleksivnosti u jednom spektralnom području oduzeti od one izmjerene u drugom spektralnom području, a može se i tako napravljena razlika povezati u RGB kompozit s drugim kanalima ili drugim razlikama. RGB kompozit postiže se tako da se po jedan od tri kanala koji se kombiniraju stavi u crveni, plavi odnosno zeleni spektar i zatim se povežu u jednu sliku na kojoj svaka boja daje informaciju o udjelu zračenja u svakom pojedinom kanalu. Više o načinu kombiniranja slika u RGB kompozite i razlike te o primjeni takvih kompozita može se naći u Roesli i sur. (2004), kao i u CAL modulima EUMeTrain (2009) i COMET (2010). Pritom je važno voditi računa da se kombiniraju samo oni kanali čija fizikalna svojstva imaju veze s fizikalnim svojstvima drugih kanala u kombinaciji.

Mogućnosti primjene multispektralne analize satelitskih podataka su brojne. Primjenjuju se u operativnoj analizi i prognozi vremena nalazi velik broj RGB kombinacija pomoću kojih je omogućeno raspoznavanje različitih vrsta oblaka na slici, razlikovanje snijega od oblaka i slično. Na slici 1.2 dan je primjer RGB kompozita koji se koristi u operativnom radu u Državnom hidrometeorološkom zavodu (DHMZ). To je kombinacija kanala 0.6, 1.6 i 10.8 μm . Kao što je i označeno na slici, ta kombinacija omogućuje razlikovanje snijega od oblaka, vodenih od ledenih oblaka, a omogućuje i prepoznavanje magle i niskog stratusa. Također omogućuje i prepoznavanje konvektivnih oblaka odnosno oblaka jačeg vertikalnog razvoja.



Slika 1.2: Kombinacija kanala 0.6, 1.6 i 10.8 μm za 16. veljače 2009. u 11 UTC. Prikazano je kako kombiniranje kanala u jednoj slici omogućuje raspoznavanje različitih tipova oblaka i razlikovanje oblaka od snijega na tlu. Boje na slici dobivene su bojenjem kanala 0.6 μm u crvene, kanala 1.6 μm u zelene, a kanala 10.8 μm u plave nijanse i njihovim spajanjem u RGB kompozit.

Pored takvih kompozita, koji omogućuju brzi pregled vremenske situacije, u prognozi neposrednog razvoja vremena od velikog su značaja izvedeni produkti, koji omogućuju razlikovanje pojedinih vrsta oblaka, uvid u količinu oborive vode koju sadrže i slično. Osim

što olakšavaju uvid u veću količinu materijala odjednom, produkti koji kombiniraju kanale otkrivaju mnoge važne pojedinosti koje na pojedinačnim slikama uopće nisu uočljive.

1.2 Cilj rada

U ovom će radu biti istražena mogućnost primjene multispektralne analize satelitskih slika u prepoznavanju i analizi dviju različitih meteoroloških pojava, konvekcije i magle, te u lociranju požara na otvorenom prostoru. Rad je motiviran potrebom da se operativnim meteoroložima ponude satelitski produkti, koji zorno prikazuju pojedine pojave ili meteorološke procese. S druge strane, nastojat će se u potpunosti istražiti potencijal nekih od kombinacija kanala koje su se u praksi pokazale korisnima.

Rad je podijeljenom u tri zasebne tematske cjeline. U poglavlju 2 bit će objašnjena metoda za prepoznavanje konvektivnih oblaka i praćenje njihovog razvoja kombiniranjem kanala u solarnom dijelu spektra. Također će se detaljnije istražiti karakteristike vrhova konvektivnih oblaka uočene u različitim spektralnim područjima. Poglavlje 3 posvećeno je prepoznavanju magle i niskih oblaka, danju kombinacijom solarnih i infracrvenih kanala, noću razlikom dvaju infracrvenih kanala. Konačno, poglavlje 4 prikazuje mogućnosti korištenja satelitskih podataka u lociranju šumskih požara. Težište rada stavljeno je na metodu za analizu konvektivnih oblaka, dok su druge dvije teme obrađene manje detaljno.

2 PRAĆENJE RAZVOJA KONVEKTIVNIH OBLAKA

2.1 Uvod

Prepoznavanje potencijalno opasnih konvektivnih oblaka, njihovo praćenje i prognoza njihovog razvoja jedan je od najzahtjevnijih zadataka u operativnoj prognostičkoj službi. Meteorološke pojave vezane uz razvoj kumulonimbusa, kao jednog od oblika u kojima se javljaju konvektivni oblaci, mogu biti velikog intenziteta i u mnogim slučajevima uzrokuju materijalnu štetu. Brojne su studije i opisi situacija s izraženim razvojem konvekcije, najčešće potaknute posljedicama tih pojava. Kod nas je već dugi niz godina aktivан projekt "Oluje i prirodne katastrofe u Hrvatskoj" u kojem su kao jedna od tema zastupljene i analize konvektivnih situacija kod nas, kao na primjer u Ivančan-Picek i Strelec Mahović (1997), Strelec Mahović i Drvar (2004), Stiperski (2005), Belušić i sur. (2007), Strelec Mahović i sur. (2007), Belušić i Strelec Mahović (2009) i drugi.

Činjenica da konvektivni oblaci spadaju u meteorološke fenomene malih dimenzija (na mikro i mezo skali), razmjerno kratkog životnog vijeka, s vrlo složenim fizikalnim procesima koji ih formiraju i definiraju, njihova je pojava teško predvidljiva čak i pomoću operativnih numeričkih mezo-modela. A upravo je pravodobno prognoziranje i praćenje takvih pojava iznimno važna zadaća prognostičkih službi. Postoje slučajevi u kojima pažljivo prilagođeni numerički modeli mogu u određenoj mjeri simulirati, odnosno prognozirati razvoj konvekcije. Jedna takva situacija prikazana je u radu Strelec Mahović i sur. (2007). U radu se numeričkim modelom pokušalo simulirati razvoj linije nestabilnosti (engl. squall-line). Promatrana je situacija 28. srpnja 2003., kad je linija nestabilnosti u području sjeverozapadne Hrvatske rezultirala tučom, koja je uzrokovala veliku materijalnu štetu. Detalji o modelu, parametrizaciji modela i samoj simulaciji mogu se pronaći u članku. Ono što je važno zaključiti na temelju tog rada je sljedeće: iako je model razmjerno dobro simulirao samu pojavu linije nestabilnosti pa čak i pojedine vrtloge vjetra, koji su definirali konvektivne stanice unutar linije, ostaje činjenica da je model bio "prespor". Drugim riječima, model nije bio u stanju toliko brzo "proizvesti" konvekciju kao što je to bio slučaj u prirodi. Takvi su primjeri u svakodnevnoj prognozi vremena brojni. Iako numerički modeli posljednjih godina postaju sve bolji i u prognoziranju pojava na manjoj skali, još uvijek se prognoza, kad je konvekcija u pitanju, svodi uglavnom na prognozu uvjeta za razvoj odnosno nestabilnost

atmosfere, a ne samog razvoja ili pojedinih faza u životnom ciklusu konvektivnih oblaka. Točna prognoza razvoja uvjetovana je vrlo dobrim poznavanjem trenutnog stanja atmosfere i upravo u tom području podaci dobiveni satelitskim motrenjem imaju nezamjenljivu ulogu.

Oblačni sustavi vezani uz konvektivne procese na satelitskim slikama pojavljuju u velikom broju različitih oblika i veličina, od malih kumulusa „lijepog vremena“ do grmljavinskih oluja s jakom oborinom (Cotton i Anthes, 1989), odražavajući pritom nestabilnost atmosfere, ali i utjecaj sinoptičke, mezoskalne ili orografske prisile (engl. forcing). Konvektivni oblačni sustavi mogu biti pojedinačne konvektivne stanice ili nakupine (engl. clusters) oblaka veličine svega nekoliko kilometara pa sve do velikih konvektivnih sustava koji mogu biti široki i nekoliko stotina kilometara. Kao što je opisano u Bader i sur. (1995) postoje određene razlike u pojavi pojedinih konvektivnih oblačnih struktura iznad mora, gdje se zrak jednoličnije zagrijava, u odnosu na one iznad kopna, gdje je raspodjela i promjena temperature zraka mnogo složenija. Zagrijavanje prizemnog sloja zraka iznad morske površine uglavnom je jednoliko, obzirom na tipične veličine i trajanje konvektivnih sustava, pa konvektivni oblaci nad morem poprimaju pravilniju strukturu. Pritom se pojavljuju dva osnovna oblika: otvorene stanice – prstenovi kumulusnih oblaka dimenzija od 10 do 100 km koji okružuju područja bez oblaka ili zatvorene stanice koje se javljaju kao oblačne strukture okružene uskim zonama bez oblaka. Takve pravilne strukture javljaju se uglavnom iznad oceana. Iznad kopna slika je složenija. Konvektivni sustavi iznad kontinentalnih područja najčešće su grupacije elemenata nepravilnog oblika i različitih veličina. Ti različiti oblici zapravo su odraz promjenljivog strujanja i različitog stupnja nestabilnosti. Tipično je za konvektivne sustave iznad kontinenta da češće nastaju u toplo doba godine, u topлом i vlažnom sloju zraka blizu Zemljine površine.

Satelitski podaci u vrlo malim vremenskim intervalima daju sliku trenutnog stanja atmosfere, a brojne metode analize tih podataka omogućuju i kratkoročnu prognozu premještanja i razvoja oblačnih sustava. Analiza konvektivnih oblaka upotrebom satelitskih podataka datira još iz ranih 70-tih godina (Hunt, 1973), iz vremena prvih satelitskih snimaka, a nastavlja se do današnjih dana. Najnoviji instrumenti u geostacionarnoj orbiti na MSG i GOES-12 (od engl. Geostationary Operational Environmental Satellite) satelitima imaju vrlo dobru prostornu razlučivost (1 km/piksatu u VIS području i 3 km/piksatu u svim ostalim kanalima) te vremenski razmak između sukcesivnih slika od 5 do 15 minuta. Upravo su te vrijednosti prostorne i vremenske razlučivosti presudne za veliku primjenljivost

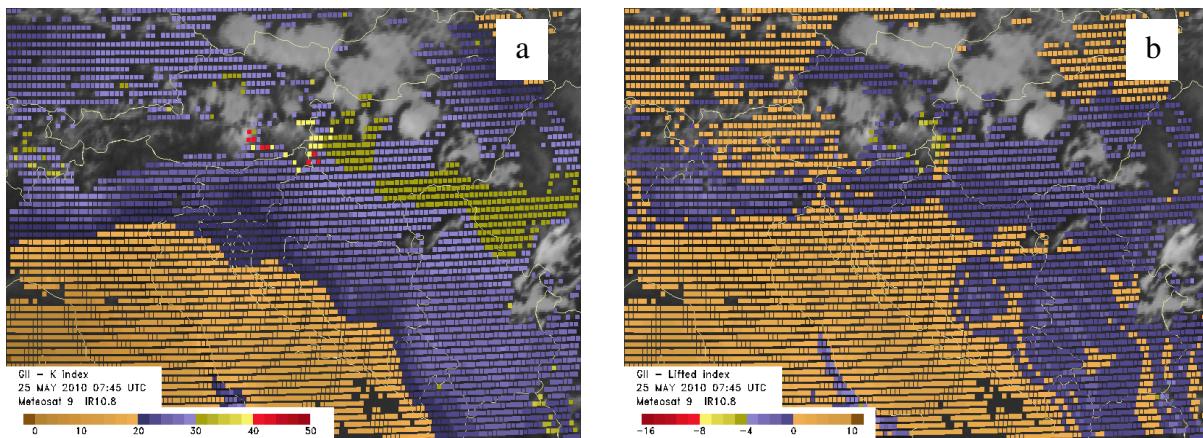
geostacionarnih satelitskih podataka za analizu meteoroloških pojava na vremenskoj skali ≤ 6 sati te prostornih dimenzija na mezo- β (20-200 km) i mezo- γ skali (2-20 km). Njihova je prednost mogućnost stalnog praćenja konvektivnih oblaka i njihovih promjena na sukcesivnim slikama. Osim toga, velik broj spektralnih kanala koji su na raspolaganju, osobito u podacima s MSG satelita, omogućuju kombinacije podataka dvaju ili više kanala koji otkrivaju svojstva konvektivnih oblaka koja u pojedinačnim kanalima nisu vidljiva.

Ako bismo pojednostavnili problem konvektivnog razvoja, mogli bismo reći da postoje tri osnovna čimbenika bez kojih ne bi bilo konvekcije: sadržaj vlage u nižim slojevima atmosfere, nestabilnost atmosfere te proces ili mehanizam koji uzrokuje dizanje zraka. Satelitski podaci mogu nam dati informaciju o prva dva čimbenika: sadržaju vlage i stabilnosti. Pomoću podataka dobivenih iz kombinacije satelitskih slika moguće je izračunati indeks nestabilnosti te u područjima gdje još i ne postoje oblaci predvidjeti potencijal za razvoj konvekcije. Zatim, u samom početku konvektivnog razvoja, kombinacijom kanala u vidljivom dijelu spektra, kao i razlikama između vrijednosti temperature u pojedinim infracrvenim kanalima, moguće je prepoznati konvektivne stanice i odrediti koje od njih imaju tendenciju naglog razvoja. Na kraju, tijekom razvoja konvektivnog oblaka praćenjem promjena na satelitskim slikama mogu se odrediti pojedine faze razvoja i na taj način prepoznati potencijalno opasne oblake, a računanjem brzine i praćenjem njihova premještanja može se prognozirati i njihov očekivani položaj u nekom od sljedećih termina.

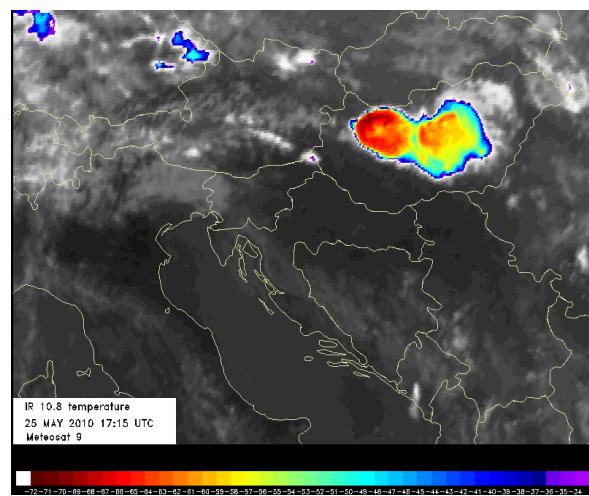
2.2 Pred-konvektivni uvjeti

Razvoj konvektivnih oblaka nužno prepostavlja povoljne uvjete odnosno stanje atmosfere koje će podržavati razvoj u većoj ili manjoj mjeri. Pritom nam je posebno zanimljiv podatak o ravnoteži odnosno nestabilnosti atmosfere iznad pojedinog područja. Za razvoj konvektivnih oblaka uvjet je postojanje nestabilne stratifikacije. Ona je najbolje vidljiva iz podataka radiosondažnih mjerjenja, no valja imati na umu da su radiosondažna mjerjenja najčešće dostupna samo u 2 termina tijekom dana i to u vrlo malom broju točaka. Podaci donekle komplementarni radiosondažnim mjeranjima mogu se dobiti i sa satelita. Dva su načina za to: direktno, instrumentom za sondiranje kakav postoji npr. na GOES satelitu (Schreiner i sur., 2001) ili indirektno, metodom fizikalnog pretraživanja (engl. physical retrieval) (Kidder i Vonder Haar, 1995), kojom se iz podataka u određenom broju spektralnih

područja zaključuje o stvarnim profilima temperature i vlažnosti u svakoj točki. Iz tako dobivenih profila mogu se izračunati razni indeksi nestabilnosti (König i de Coning, 2009). Rezultat je prikaz nestabilnosti atmosfere u područjima u kojima još nema oblaka, dakle u pred-konvektivnoj fazi. Na slici 2.1a je prikaz K indeksa, a na slici 2.1b prikaz indeksa podizanja (engl. Lifted index), izračunatih iz satelitskih podataka u jutarnjim satima 25. svibnja 2010. Kasnije istoga dana došlo je do vrlo intenzivnog konvektivnog razvoja u neposrednoj blizini područja na kojem su satelitski indeksi indicirali nestabilnost atmosfere (Sl. 2.2).



Slika 2.1: Indeksi nestabilnosti izračunati iz satelitskih podataka za 25. svibnja 2010. u 0745 UTC. a) K indeks; b) indeks podizanja (engl. Lifted index). Područja žute i crvene boje predstavljaju nestabilnu i vrlo nestabilnu atmosferu. U predjelima gdje postoje oblaci podatak nije dostupan. Geografsko područje istovjetno je onom na slici 2.2.

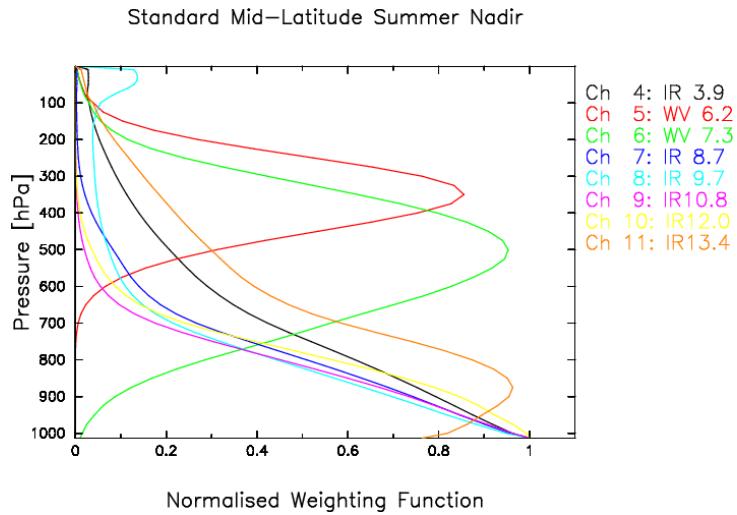


Slika 2.2: Meteosat 9 slika u infracrvenom dijelu spektra ($10.8 \mu\text{m}$) za 25. svibnja 2010. u 1715 UTC. Boje označavaju temperaturne intervale. Skala temperature: od -33°C (ljubičasto) do -72°C (tamno crveno). Temperatura zraka na vrhu oblaka u najhladnjem području niža je od -70°C .

Kao što je već rečeno, za razvoj duboke konvekcije nužna su tri uvjeta: vлага, dizanje i nestabilnost. Općenito se nestabilnost može definirati na dva načina: preko stope ohlađivanja (uvjetna i potencijalna nestabilnost) ili kao energija raspoloživa za konvekciju (CAPE). U literaturi se mogu pronaći brojne rasprave o različitim tipovima nestabilnosti i njihovoju ulozi u konvektivnim procesima. Tako Sherwood (2000) govori o dva oblika nestabilnosti: potencijalnoj nestabilnosti, definiranoj pseudoadijabatičkom stopom ohlađivanja i uvjetnoj nestabilnosti, koja se javlja ako je stopa ohlađivanja između pseudoadijabatičkih i suhoadijabatičkih vrijednosti ($\Gamma_s < \Gamma < \Gamma_d$). Pritom naglašava nedostatke koncepta uvjetne nestabilnosti, izražene preko stope ohlađivanja, a prednost daje konceptu koji uključuje raspoloživu energiju odnosno CAPE. S druge strane Schultz i sur. (2000) zaključuju kako je u analizi oborinskih procesa ključno prepoznati mehanizam koji uzrokuje dizanje zraka. Pritom stupanj nestabilnosti, bilo da je prikazan kroz raspoloživu energiju ili potencijalnu nestabilnost, samo modificira to dizanje zraka. Kako u ovom radu nije cilj teorijska rasprava o nestabilnosti, već prikaz primjene satelitskih podataka u dobivanju informacije o stanju atmosfere, u nastavku će uglavnom biti riječi o potencijalnoj nestabilnosti.

Izraz potencijalna nestabilnost često se u literaturi zamjenjuje izrazom konvektivna nestabilnost. Za atmosferu kažemo da je potencijalno nestabilna ako je $\partial\theta_e/\partial z < 0$, gdje je θ_e ekvivalentna potencijalna temperatura. Potencijalna ili konvektivna nestabilnost atmosfere javlja se u područjima u kojima se u srednjim ili višim slojevima atmosfere nalazi razmjerne suh zrak dok su niži slojevi topliji i vlažniji. Najbolji način za analizu konvektivne nestabilnosti je analiza radiosondažnih podataka. Međutim, takvi su podaci vremenski i prostorno prerijetki. Želimo li informaciju o potencijalnoj nestabilnosti dobiti iz satelitskih mjeranja, treba uzeti podatke u onim spektralnim područjima koja daju informaciju o sadržaju vlage u atmosferi.

MSG satelit ima dva kanala u apsorpcijskim vrpcama vodene pare. Podatak o sadržaju vlage i temperaturi u nižim slojevima atmosfere daje zračenje u kanalu $7.3 \mu\text{m}$. Kao što je vidljivo na slici 2.3, kanal u spektralnom području srednje valne duljine $7.3 \mu\text{m}$ najjači signal ima s visine od oko 500 hPa (u sloju između 600 i 400 hPa). Istodobno kanal u spektralnom području valne duljine $6.2 \mu\text{m}$ najjači signal ima s visine od oko 300 hPa (u sloju između 400 i 250 hPa). Stoga on daje podatak o sadržaju vlage i temperaturi u višim slojevima atmosfere.



Slika 2.3: Normalizirane težinske funkcije za MSG kanale u infracrvenom dijelu spektra (3.9 do 13.4 μm) za točku ispod satelita. Pretpostavka za podatak je standardna atmosfera ljeti u umjerenim geografskim širinama (Schmetz i sur., 2002).

U slučaju potencijalno nestabilne atmosfere, u kanalu 7.3 μm trebao bi postojati signal o većem sadržaju vlage (u toplom i vlažnom donjem sloju), dok bi na većim visinama (u kanalu 6.2 μm) trebalo biti razmjerno suho. S obzirom na to da oba spomenuta kanala mijere u apsorpcijskim vrpcama vodene pare, veći sadržaj vlage za posljedicu ima manji intenzitet zračenja, odnosno nižu temperaturu. Drugim riječima, razlika temperatura u kanalima 6.2 i 7.3 μm može dati informaciju o stabilnosti atmosfere. Pritom se pokazalo da je atmosfera to nestabilnija što je razlika manje negativna, a posebno ako je razlika pozitivna.

Kako bi se izračunala razlika temperatura u dvama infracrvenim kanalima, potrebno je podatak o vrijednostima piksela pretvoriti najprije u zračenje (engl. radiance), a zatim kalibrirati u vrijednosti temperature za svaki pojedini kanal. Relacije koje opisuju odnos vrijednosti piksela i zračenja te vrijednosti zračenja i temperature dali su Rosenfeld i sur. (2005):

$$R = \text{CAL}_{\text{offset}} + \text{CAL}_{\text{slope}} \text{Count} \quad (1)$$

R spektralna radijanca (zračenje) ($\text{mW m}^{-2} \text{sr}^{-1}(\text{cm}^{-1})^{-1}$), sr označava steradian

$\text{CAL}_{\text{offset}}$ konstanta pomaka između vrijednosti piksela i fizikalnog zračenja – dobiva se iz kalibracije na satelitu ($\text{mW m}^{-2} \text{sr}^{-1}(\text{cm}^{-1})^{-1}$)

CAL_{slope} linearni koeficijent kalibracije - dobiva se iz kalibracije na satelitu
 $(\text{mW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}(\text{cm}^{-1})^{-1})$

Count binarna vrijednost piksela (vrijednost između 0 i 1023 jer su slike 10-bitne)

Vrijednost temperature računa se zatim kao:

$$T_b = \left[C_2 v_c / \log \left(\frac{C_1 v_c^3}{R} + 1 \right) - B \right] / A \quad (2)$$

gdje su:

$$C_1 = 1.19104 \cdot 10^{-5} \text{ mW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}(\text{cm}^{-1})^{-4}$$

$$C_2 = 1.43877 \text{ K} (\text{cm}^{-1})^{-1}$$

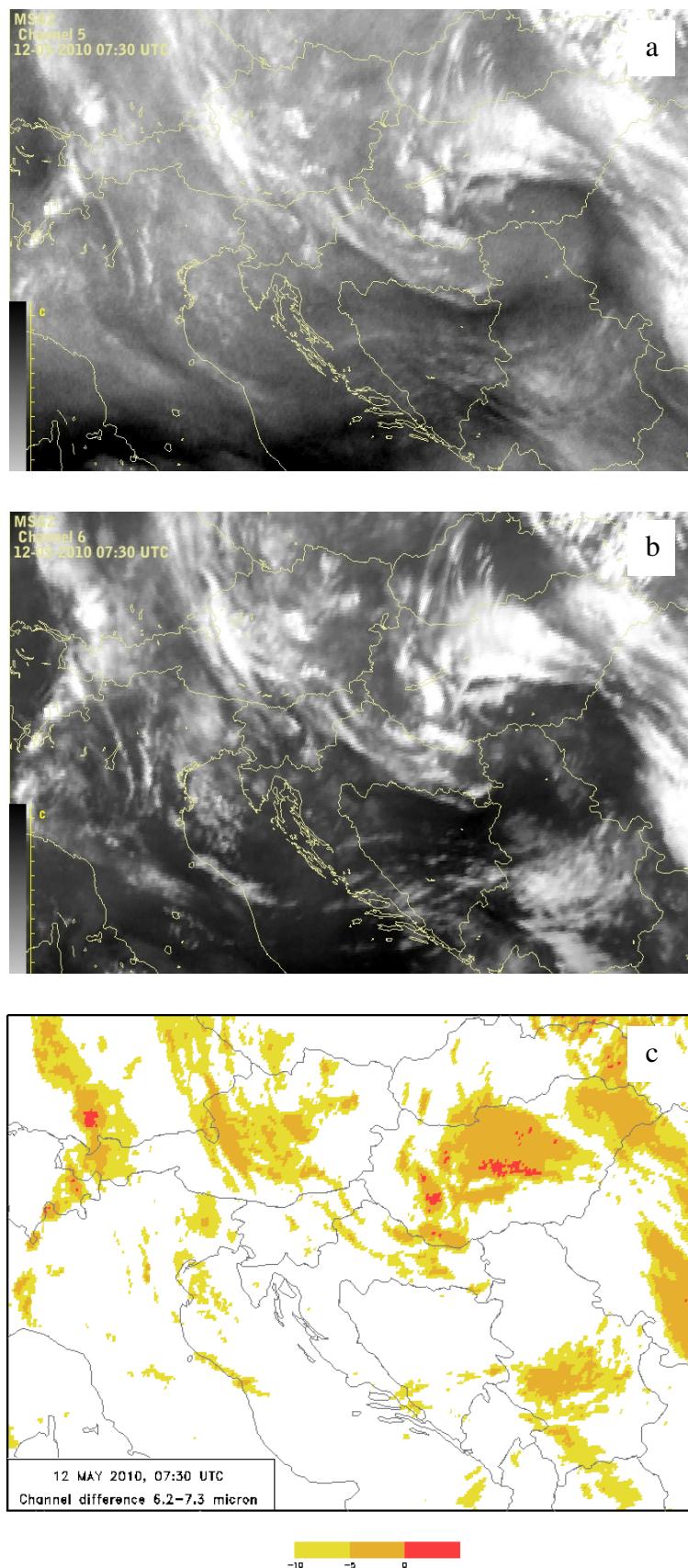
$$v_c \text{ središnji valni broj kanala} (\text{cm}^{-1})$$

$$A, B \text{ koeficijenti}$$

Iste relacije vrijede za pretvaranje vrijednosti piksela u temperaturu u svim infracrvenim kanalima, pri čemu se razlikuju samo vrijednosti v_c , A i B, koje su ovisne o kanalu i dane su u tablici 1.1.

Tablica 1.1: Parametri u jednadžbi (2) za pretvaranje zračenja u temperaturu za pojedine infra-crvene kanale.

kanal	$v_c (\text{cm}^{-1})$	A	B
3.9 μm	2569.094	0.9959	3.471
6.2 μm	1598.566	0.9963	2.219
7.3 μm	1362.142	0.9991	0.485
8.7 μm	1149.083	0.9996	0.181
9.7 μm	1034.345	0.9999	0.060
10.8 μm	930.659	0.9983	0.627
12.0 μm	839.661	0.9988	0.397
13.4 μm	752.381	0.9981	0.576



Slika 2.4: Meteosat 9 satelitske slike u kanalima 6.2 (a) i 7.3 μm (b) te razlika temperature u kanalima 6.2 i 7.3 μm (c) za 12. svibnja 2010. u 0730 UTC. Crvena područja su potencijalno najnestabilnija.

Nakon izračunavanja temperature svakog piksela u pojedinom kanalu, računa se razlika između temperatura u dvama kanalima, za svaki piksel. Slika 2.4 daje primjer slika u pojedinačnim kanalima 6.2 (Sl. 2.4a) i 7.3 μm (Sl. 2.4b) i razlike temperatura u tim kanalima (Sl. 2.4c). Razlike temperatura između dva sloja podijeljene su u intervale koji su na slici označeni različitim bojama. Potencijalno najnestabilnija područja, odnosno područja u kojima je temperatura u kanalu 6.2 μm viša od one u kanalu 7.3 μm , prikazana su crvenom bojom. Nestabilna su također i područja u kojima je razlika negativna, ali malog iznosa, što bi značilo da je temperatura u kanalu 6.2 μm tek malo niža od one u kanalu 7.3 μm .

Ovakav prikaz nestabilnosti atmosfere, jednako kao i onaj s izračunatim indeksima nestabilnosti iz satelitske „sondaže“, samo su naznaka postojanja uvjeta za daljnji razvoj konvekcije, a najveće razlike naći će se upravo u već postojećim konvektivnim oblacima. No, pred-konvektivna okolina nije definirana samo nestabilnošću. Nužna je i informacija o gibanju, pa je potrebno u obzir uzeti i konvergenciju u nižim slojevima atmosfere, ali i o drugim atmosferskim parametrima.

2.3 Prepoznavanje konvektivnih oblaka na slikama u infracrvenom dijelu spektra

Najvažniji korak u praćenju konvektivnog razvoja je rana detekcija potencijalno opasnih konvektivnih oblaka. Brojni algoritmi, temeljeni na satelitskim podacima, usredotočuju se upravo na to da što ranije prepoznaju početak konvektivnog razvoja odnosno inicijaciju konvekcije. Mecikalski i Bedka (2006) u svojoj su studiji definirali inicijaciju konvekcije kao prvu pojavu odraza većeg od 35 dBZ na radarskoj slici konvektivnog oblaka. Taj kriterij odabran je jer se pokazalo da su odrazi veći od 35 dBZ povezani s konačnim razvojem zrelih kumulonimbusa (Roberts i Rutledge, 2003). Koristeći podatke s američkog geostacionarnog satelita GOES, Mecikalski i Bedka (2006) pokazali su da se na temelju satelitskih podataka, praćenjem promjena na konvektivnim oblacima u infracrvenim kanalima, inicijacija konvekcije može prognozirati 30 do 45 minuta prije pojave radarskog odraza od 35 dBZ. Osim u tom radu i drugdje u literaturi se za prepoznavanje i praćenje konvektivnih oblaka najčešće spominju kombinacije infracrvenih kanala. Razlog tome je činjenica da su podaci u infracrvenom dijelu spektra dostupni i danju i noću. Pritom se kao kriterij obično koristi vrijednost temperature u kanalu 10.8 μm , kao i promjene temperature

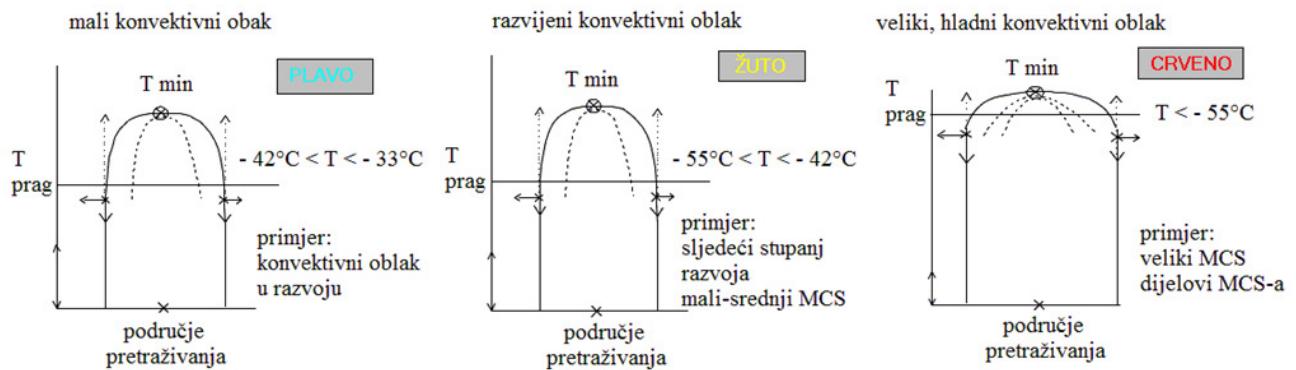
unutar pojedinog objekta (konvektivne stanice) tijekom 15 minuta ili općenito između dviju suksesivnih slika.

Detekcija konvekcije temeljena na podacima u infracrvenom dijelu spektra napravljena je u operativnoj službi DHMZ-a još u vrijeme kad su se koristili podaci s Meteosat satelita prve generacije. Metoda je razvijena 2002. godine u sklopu projekta "CEI-Nowcasting system" u kojem su prognostičari iz DHMZ-a, zajedno s kolegama iz Austrije, Mađarske, Slovačke i Slovenije, radili na izradi alata za vrlo kratkoročnu prognozu vremena (engl. nowcast) temeljenim na podacima sa satelita (Iršić i sur., 2004). S dolaskom druge generacije Meteosat satelita, metoda je prilagođena kako bi se mogli koristiti podaci o temperaturi u kanalu $10.8 \mu\text{m}$. Osnovne pretpostavke na kojima se temelji algoritam za prepoznavanje konvektivnih oblaka su sljedeće:

- konvektivne stanice na satelitskoj slici su okruglog ili eliptičnog oblika,
- konvektivni oblaci se razlikuju od svojeg okoliša po tome što su vidljivo hladniji (temperatura na vrhu oblaka za određeni je iznos niža od temperature okolnih piksela),
- postoji ograničen raspon temperatura i dimenzija koje konvektivni oblaci mogu poprimiti tako da gotovo sve konvektivne stanice mogu biti prepoznate pregledavanjem slika konačan broj puta s različitim ulaznim parametrima.

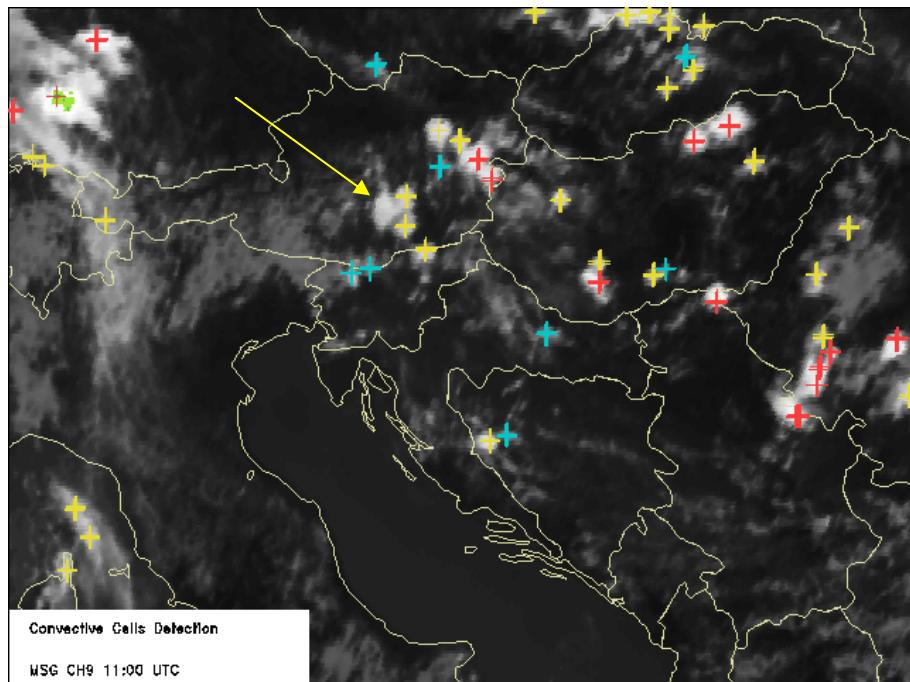
Algoritam se, dakle, temelji na prepoznavanju struktura čija je temperatura niža od zadalog praga, a oblik okrugao ili eliptičan. Uvjet kružnog ili eliptičnog oblika postavljen je kako bi se izbjegla pogreška prepoznavanja frontalnih sustava ili većih područja visokih ledenih oblaka (cirusa) kao konvekcije.

Temperatura vrhova oblaka računa se pomoću (1) i (2), uz korištenje parametara v_c , A i B za kanal $10.8 \mu\text{m}$ (tablica 1.1). Na polje izračunatih temperatura primjenjuje se algoritam za prepoznavanje okruglih ili eliptičnih, hladnih struktura. Rezultat se, u slučaju produkta koji se koristi u operativnoj službi DHMZ-a, prikazuje kao obojena oznaka u središtu detektirane konvektivne stanice. Boja oznake označava temperaturu vrhova oblaka, odnosno tip konvektivne stanice. Konvektivne stanice podjeljene su u tri tipa, po kriterijima prikazanim na slici 2.5.



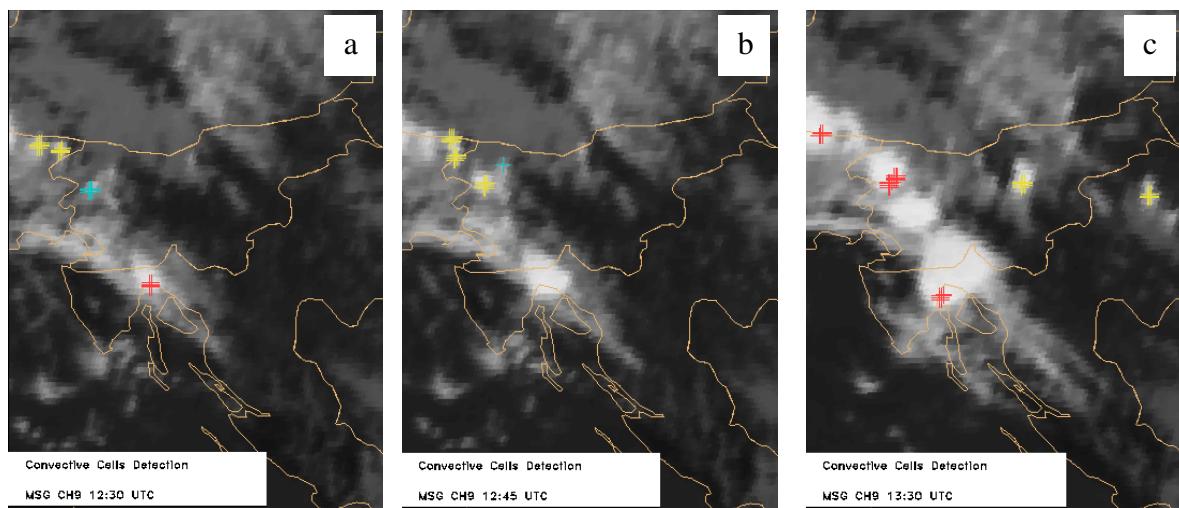
Slika 2.5: Tipovi konvektivnih stanica u sustavu za automatsko prepoznavanje konvekcije iz podataka u kanalu $10.8 \mu\text{m}$. Konvektivni oblaci klasificiraju se u tri kategorije temeljem kriterija za temperaturu vrha, površinu i razliku temperature vrha oblaka od okolnih piksela.

Primjer jedne situacije s konvektivnim oblacima, prepoznatim pomoću algoritma temeljenog na podacima u kanalu $10.8 \mu\text{m}$, prikazan je na slici 2.6. Iako je, na prvi pogled, algoritam prepoznao većinu konvektivnih oblaka na slici, uključujući i one najmanje, ipak postoje i konvektivne stanice (označena strelicom, nad područjem Austrije) koje u ovom slučaju nisu prepoznate.



Slika 2.6: Meteosat 9 satelitska slika u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ za 09. lipnja 2006. u 11 UTC. Križićima su označeni konvektivni oblaci, prepoznati metodom za automatsko prepoznavanje konvekcije. Različite boje označavaju različite tipove konvektivnih stanica, kao na slici 2.5. Strelicom je označena konvektivna stanica koja nije prepoznata.

Osim toga, kroz operativnu primjenu uočeno je da ponekad u dva uzastopna termina sustav prepoznaće različite konvektivne stanice jer ne prati premještanje svake pojedine. Naime, u sam algoritam nije ugrađeno praćenje već detektirane konvektivne stanice, nego se sa svakom novom satelitskom slikom sustav ponovno inicijalizira i prepoznaće one konvektivne stanice koje se nalaze na toj slici, bez obzira na predhodni termin. Tako se ponekad dogodi da konvektivna stanica u nekom terminu bude "izgubljena", a zatim ponovno prepoznata.

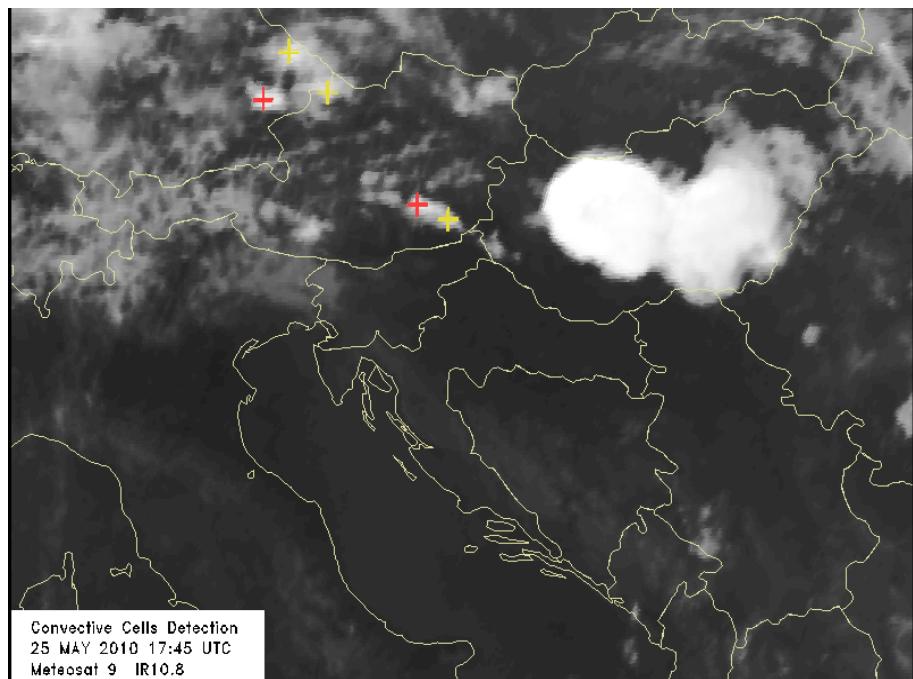


Slika 2.7: Meteosat 9 satelitske slike u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ za 26. srpnja 2008. u 1230 (a), 1245 (b) i 1330 UTC (c). Kržiči označavaju automatski prepoznate konvektivne stanice, boje odgovaraju tipovima opisanim na slici 2.5. Konvektivna stanica iznad Rijeke nije prepoznata u terminu 1245 UTC (b).

Takav slučaj vidljiv je na slici 2.7, koja prikazuje niz od tri satelitske slike na kojima su označene automatski prepoznate konvektivne stanice. Pogledamo li konvektivnu stanicu čiji razvoj počinje na području Rijeke vidjet ćemo da nakon početnog prepoznavanja u 1230 sati (Sl. 2.7a) u sljedećem terminu sustav nije bio prepoznat iako je zadržao karakteristike konvektivnog oblaka i dodatno se intenzivirao (Sl. 2.7b). No, 30 minuta kasnije, kao što je vidljivo na slici 2.7c, sustav je ponovno prepoznat. Iako je algoritam za prepoznavanje konvektivnih oblaka u najvećem broju slučajeva vrlo uspješan, primjeri prikazani na slikama 2.6 i 2.7 ističu njegove nedostatke. Neke konvektivne stanice "promaknu" ovom algoritmu dok je drugi nedostatak nekonzistentnost.

Problem se također javlja i kod jako velikih konvektivnih stanica. Naime, algoritam je napravljen tako da za konačan broj udaljenosti od najhladnije točke pretražuje okolne piksele

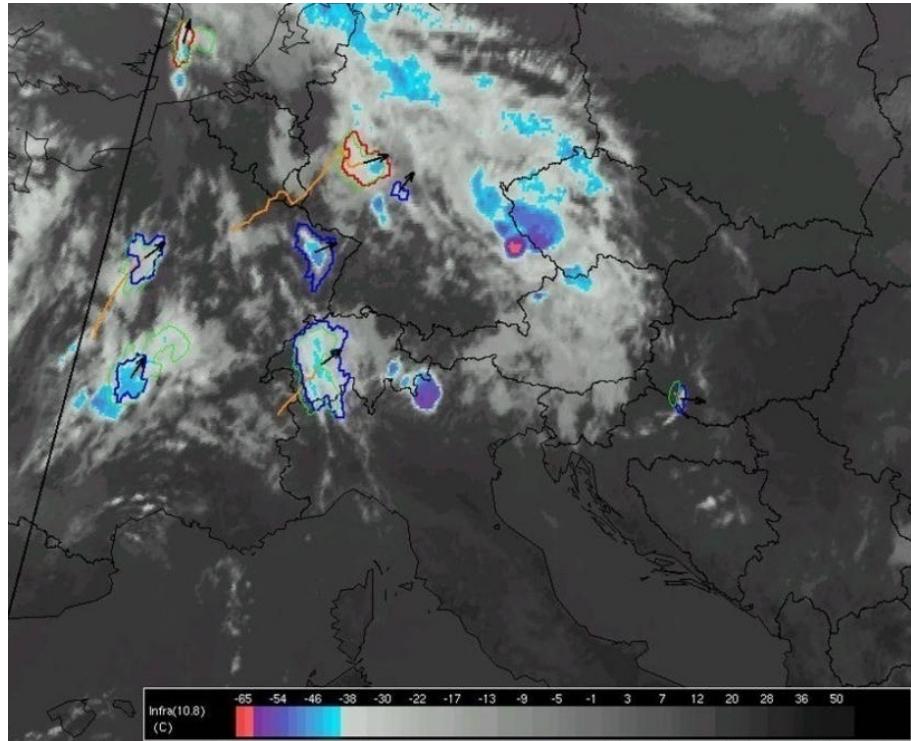
tražeći one čija je temperatura za određenu vrijednost viša od temperature središta. Međutim, ako je konvekivna stаница jako velika, ako se radi npr. o mezoskalnom konvektivnom sustavu, algoritam će "potrošiti" sva pretraživanja ukrug oko središta prije nego na piksele koji su dovoljno topliji od središta i neće takav sustav prepoznati kao konvektivnu stanicu. Jedan takav primjer prikazan je na slici 2.8.



Slika 2.8: Meteosat 9 satelitska slika u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ za 25. svibnja 2010. u 1745 UTC. Križićima su označene automatski prepoznate konvektivne stанице. Najveći konvektivni sustav (iznad Madarske) algoritam nije prepoznao.

Na kriteriju temperature vrhova oblaka temelji se i metoda za praćenje razvoja grmljavinskih oluja ("Rapid Developing Thunderstorms" (RDT)), razvijena u sklopu NWC SAF (Satellite Application Facility on Support to Nowcasting and Very Short Range Forecasting) projekta EUMETSAT-a. Ta metoda ima varijabilnu skalu temperature kao kriterij za otkrivanje konvektivnih oblaka. Opis metode i produkta može se pronaći na http://www.nwcsaf.org/HTMLContributions/RDT/Prod_RDT_fichiers/SAF-NWC-CDOP-MFT-SCI-PUM-11_v2.1.pdf. Zbog dostupnosti (produkt se diseminira putem Eumetcast servisa) velik broj prognostičkih službi uveo je RDT produkt kao jedan od operativnih produkata za detekciju i praćenje razvoja konvektivnih oblaka. No, verifikacija je pokazala da postoje brojni problemi kad se u algoritmima za konvekciju koriste samo podaci u jednom

spektralnom području, u ovom slučaju također u kanalu $10.8 \mu\text{m}$. Najvažnija zamjerk je, kao i u predhodnom primjeru, da algoritam ne prepozna sve konvektivne stanice, ponekad čak ni one koje imaju izražena obilježja tipičnog Cb oblaka, ili ih prepozna tek u kasnjem stupnju razvoja.

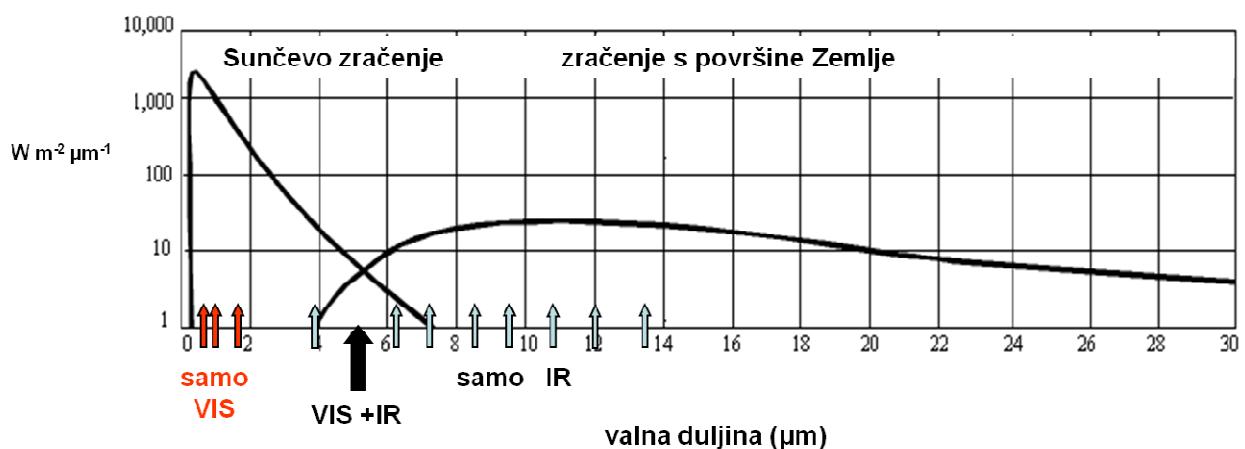


Slika 2.9: Primjer detekcije konvektivnih stanica pomoću NWC SAF metode RDT. Prikazana je temperatura u kanalu $10.8 \mu\text{m}$. Vrhovi oblaka hladniji od -40°C obojani su bojama kao na skali. Plavim i crvenim linijama označene su konvektivne stanice, ovisno o stupnju razvoja, a narančaste linije pokazuju putanju sustava u prošlosti. Konvektivni sustavi na granici Njemačke i Češke te u sjevernoj Italiji nisu prepoznati.

Na slici 2.9 prikazana je temperatura u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ (u bojama koje odgovaraju skali na dnu slike). Crvene i plave linije označavaju konvektivne stanice, a narančaste njihovu putanju u prošlosti. Sustav, dakle omogućava praćenje pojedinih konvektivnih stanica, a boja linije kojom su omeđene označava fazu razvoja odnosno intenzitet. No, već na prvi pogled očito je da ima konvektivnih stanica koje uopće nisu prepoznate, iako temperatura njihovih vrhova sugerira da se radi o Cb-ima u visokom stupnju razvoja, vrlo hladnih vrhova (sustavi na sjeveru Italije i na jugu Njemačke). S druge strane, u nekim situacijama cirusi bivaju prepoznati kao konvektivni oblaci, a ponekad i čitavi frontalni sustavi ili čak magla.

2.4 Primjena solarnih kanala u ranom prepoznavanju konvektivnih oblaka

Velika prednost metoda za prepoznavanje konvekcije, koje koriste samo podatke o zračenju u infracrvenom području, je ta što su upotrebljive i danju i noću. Međutim, kao što je pokazano primjerima u predhodnom poglavlju, većina algoritama ima brojne nedostatke. Upravo zbog tih nedostataka pokušalo se nadopuniti postojeće metode, koje uključuju samo infracrvene podatke, s novima, koje bi uključivale podatke o zračenju u drugim dijelovima spektra. Pogledamo li svojstva pojedinih SEVIRI kanala, navedena u uvodnom dijelu, jasno je da je za sve aplikacije vezane uz oblake puno primijerenja upotreba solarnih kanala, odnosno onih u kojima je reflektirano sunčev zračenje ono kojeg instrument mjeri. Takvi su kanali 0.6, 0.8 i 1.6 μm , a djelomično i kanal 3.9 μm koji danju mjeri i emitirano Zemljino i reflektirano Sunčev zračenje (Sl. 2.10). Odmah valja naglasiti da su svi produkti koji uključuju solarne kanale dostupni samo danju dok je za aplikacije tijekom noći i dalje jedina mogućnost upotreba infracrvenih kanala.



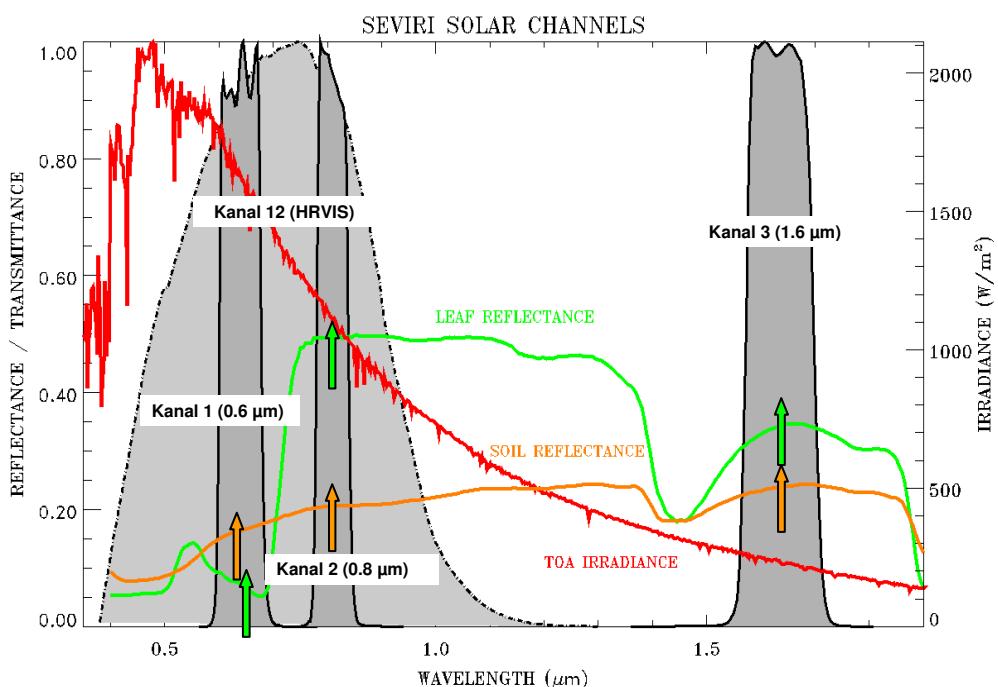
Slika 2.10: Raspodjela valnih duljina zračenja Sunca i Zemlje. Valne duljine solarnih kanala SEVIRI instrumenta na MSG satelitima označene su crvenom bojom, a valne duljine infracrvenih plavom. (Preuređeno iz „MSG Interpretation Guide“, Zwatz-Meise, 2004).

2.4.1 Svojstva solarnih kanala

Solarni kanali 0.6 i 0.8 μm primarno su namjenjeni za prepoznavanje i praćenje oblaka. No, kao što je vidljivo na slici 2.11, u kanalu 0.8 μm puno je izraženija refleksija od

ta i osobito od vegetacije. Stoga se taj kanal najčešće koristi za računanje vegetacijskih indeksa i općenito za aplikacije u kojima je potrebno motrenje površine tla, dok je kanal $0.6 \mu\text{m}$ povoljniji za primjene vezane uz oblake upravo zbog manjeg utjecaja površine.

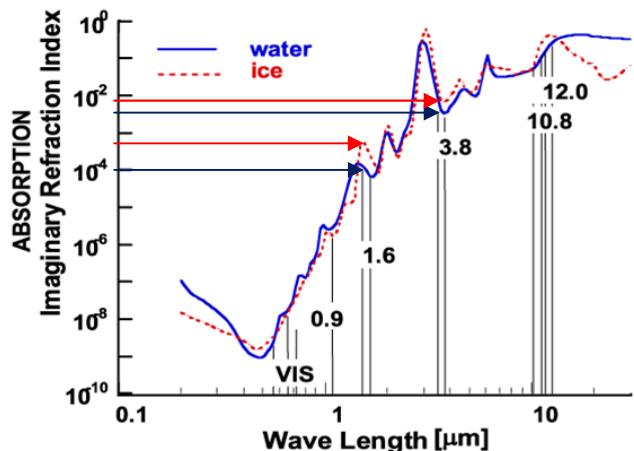
Zračenje u kanalu $0.6 \mu\text{m}$, koje se u potpunosti sastoji od reflektiranog sunčevog zračenja, mjera je optičke gustoće oblaka, odnosno albeda. Albedo oblaka u osnovi je funkcija optičke gustoće oblaka, njegovog sastava i raspodjele veličine čestica (kapljica ili kristalića) u oblaku. Najveće vrijednosti refleksije u kanalu $0.6 \mu\text{m}$ vezane su uz optički gусте vodene oblake i snijeg. Vrijednosti refleksije za vrlo gустe oblake, npr. velike Cb oblake, često je veća od 90%. S druge strane, transparentni oblaci (na primjer cirusi) imaju mnogo manje vrijednosti refleksije, zbog male optičke gustoće.



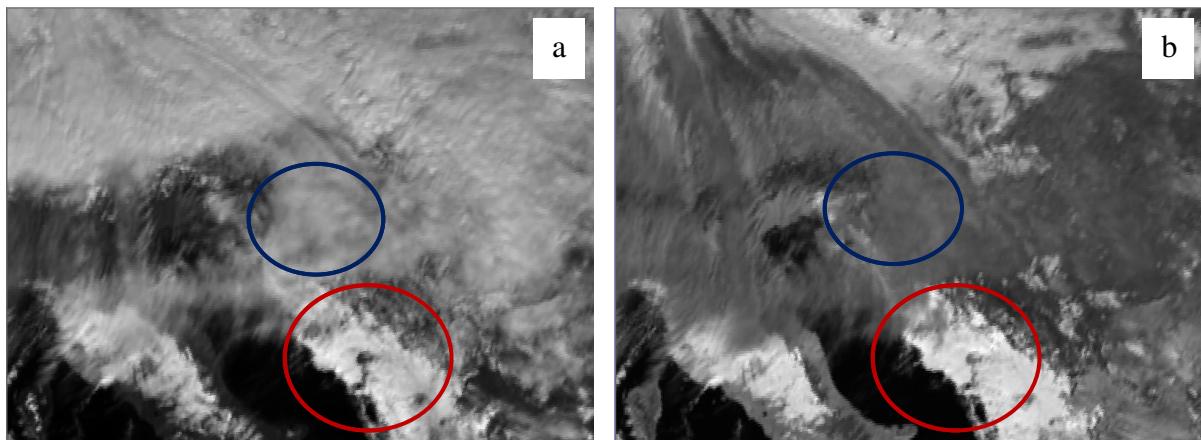
Slika 2.11: Raspodjela valnih duljina zračenja reflektiranog od tla (narančasta linija) i vegetacije (zelena linija). Pokazuje se da je u području kanala $0.8 \mu\text{m}$ refleksija od vegetacije najizraženija dok je u kanalu $0.6 \mu\text{m}$ najmanja. Svjetlo-sivom bojom označeno je područje valnih duljina kanala HRVIS, a tamno siva su područja valnih duljina kanala 0.6 , 0.8 i $1.6 \mu\text{m}$. Crvena linija prikazuje solarno zračenje na vrhu atmosfere. (Preuređeno iz „MSG Interpretation Guide“, Zwatz-Meise, 2004).

Kanal $1.6 \mu\text{m}$ primarno je uveden zbog lakšeg prepoznavanja snijega i leda na tlu ili moru, razlikovanja oblaka od snijega i leda te razlikovanja vodenih od ledenih oblaka. Iako se ne nalazi u području maksimuma solarnog spektra kao kanali 0.6 i $0.8 \mu\text{m}$ (Sl. 2.10 i 2.11),

ipak možemo reći da je cijelokupno zračenje u tom kanalu, kao i kod ostalih solarnih kanala, reflektirano Sunčevu zračenje. Važno svojstvo kanala $1.6 \mu\text{m}$ je da u tom spektralnom području led ima gotovo dvostruko veću mogućnost apsorpcije nego voda pa je reflektirano zračenje mnogo manje ako je na površini oblaka led nego ako je to voda (Sl. 2.12). Upravo zbog toga kanal $1.6 \mu\text{m}$ pogodan je za određivanje agregatnog stanja vode u oblaku (Knap i sur., 2002).



Slika 2.12: Ovisnost apsorpcije o valnoj duljini za led (crveno) i vodu (plavo). Strelicama su označene vrijednosti apsorpcije za kanale 1.6 i $3.9 \mu\text{m}$ (Preuređeno iz „MSG Interpretation Guide“, Zwatz-Meise, 2004).



Slika 2.13: Usporedba slika u kanalu $0.6 \mu\text{m}$ (a) i $1.6 \mu\text{m}$ (b). Plavim su zaokruženi ledeni, a crvenim vodeni oblaci.

To je svojstvo vrlo očito ako se usporede pojedinačne slike oblaka u kanalima 0.6 i $1.6 \mu\text{m}$, kao na slici 2.13, gdje je slika (a) snimljena u području $0.6 \mu\text{m}$, a slika (b) u području $1.6 \mu\text{m}$.

Razlika je uočljiva na prvi pogled. Vodeni oblaci, koji prekrivaju jug Hrvatske i Crnu Goru (zaokruženi crvenom linijom), bijeli su i na jednoj i na drugoj slici dok su oblaci iznad središnje Hrvatske (zaokruženi plavom linijom), s ledom na vrhu, u $0.6 \mu\text{m}$ svijetli, a u $1.6 \mu\text{m}$ tamno sivi (Strelec Mahović, 2008). Razlog je jača apsorpcija u ledenim kristalićima i time manja refleksivnost u kanalu $1.6 \mu\text{m}$.

Metoda za prepoznavanje konvektivnih oblaka, temeljena na opisanim svojstvima solarnih kanala, objavljena je u radu Strelec Mahović i Zeiner (2009). U tom je radu pokazano da kombiniranje albeda u kanalima $0.6 \mu\text{m}$ i $1.6 \mu\text{m}$ omogućava prepoznavanje prvih znakova pojave konvekcije.

2.4.2 Svojstva kanala $3.9 \mu\text{m}$

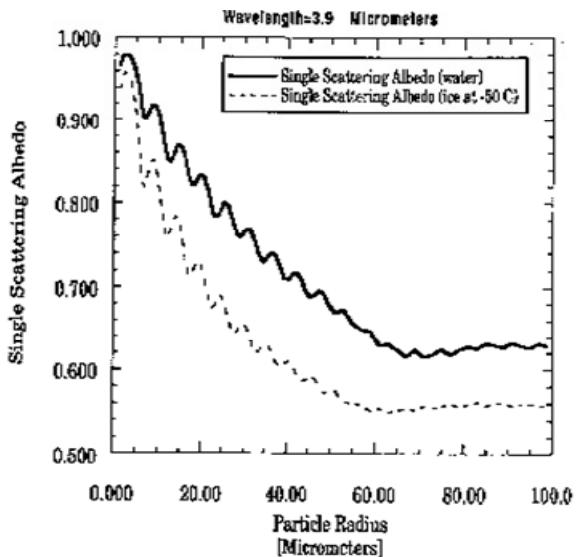
Kao što je objašnjeno u Strelec Mahović i Zeiner (2009), kad je u pitanju razlikovanje ledenih od vodenih oblaka, svojstva slična kanalu $1.6 \mu\text{m}$ ima i kanal $3.9 \mu\text{m}$. Taj se kanal nalazi na kraju valnih duljina solarnog spektra i na početku valnih duljina spektra Zemljinog zračenja (Sl. 2.10). Primarno je kanal $3.9 \mu\text{m}$ namijenjen prepoznavanju niskih oblaka i magle noću, kad ima samo termalnu komponentu (Schmetz i sur., 2002), te ponalaženju vrućih točaka vezanih uz požare, no ovdje će se pokazati i njegova važna uloga u prepoznavanju konvektivnih oblaka.

Primjena kanala $3.9 \mu\text{m}$, instrumenta SEVIRI na MSG satelitima, naslijedjena je od kanala $3.7 \mu\text{m}$ instrumenta AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) na NOAA (National Oceanic and Atmospheric Agency) polarnim satelitima. Kao što su pokazali Rosenfeld i sur. (2004a), kanal $3.7 \mu\text{m}$, u aplikacijama vezanim uz oblake, ima slična svojstva kao kanal $1.6 \mu\text{m}$. Oba kanala omogućuju prepoznavanje leda i snijega na tlu te leda na moru, a omogućuju i razlikovanje oblaka od leda i snijega na tlu. Setvak i Doswell (1991) objašnjavaju da se zračenje u kanalu $3.7 \mu\text{m}$ sastoji od emitirane i reflektirane komponente u približno jednakim omjerima tijekom dana, pri čemu o temperaturi i albedu samih objekata te kutu upada sunčevog zračenja ovisi koja je od komponenata zastupljenija. Također su naglasili da je priroda refleksivnosti u kanalu $3.7 \mu\text{m}$ bitno različita od refleksivnosti u vidljivim kanalima 0.6 i $0.8 \mu\text{m}$. Naime, u kanalu $3.7 \mu\text{m}$ led se ponaša gotovo kao crno tijelo, odnosno ima albedo blizak nuli. To se pokazalo i za kanal $3.9 \mu\text{m}$ u kojem snima instrument SEVIRI na Meteosat satelitima (Setvak i sur., 2003).

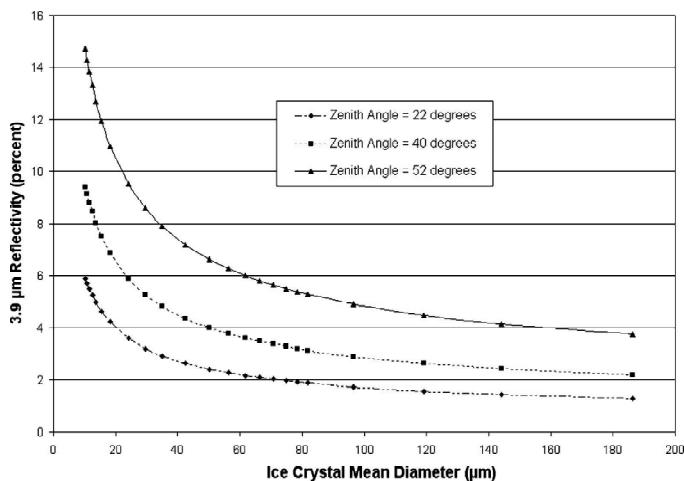
Ovdje su važna sljedeća dva svojstva koja ima zračenje u kanalu $3.9 \mu\text{m}$: mogućnost prepoznavanja agregatnog stanja (faze) vode u oblaku, dakle razlikovanje vodenih od ledenih oblaka, te mogućnost zaključivanja o veličini kapljica odnosno kristalića u oblaku. Prvo svojstvo slikovito je prikazano na slici 2.12, na kojoj se vidi da i u području $3.9 \mu\text{m}$, kao i u području $1.6 \mu\text{m}$, led absorbira značajno jače (dvostruko više) od vode. S obzirom na to svojstvo oba su kanala jednako pogodna za razlikovanje vodenih od ledenih oblaka. Ipak, led (ali i voda) u području $3.9 \mu\text{m}$ absorbira gotovo za dva reda veličine više zračenja nego u području $1.6 \mu\text{m}$, što je također vidljivo iz slike 2.12. Zbog toga ukupno zračenje u području $3.9 \mu\text{m}$ dolazi uglavnom s vrha oblaka i mnogo je manje kontaminirano zračenjem s površine Zemlje, dok u području $1.6 \mu\text{m}$ dio zračenja dolazi iz nižih dijelova oblaka, pa čak i s tla ispod oblaka. Upravo stoga, kao što su pokazali Rosenfeld i sur. (2004a), kanal $3.9 \mu\text{m}$ je u prednosti pred kanalom $1.6 \mu\text{m}$ kad su u pitanju aplikacije vezane uz oblake, pod uvjetom da se iz ukupnog zračenja u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ ukloni termalna komponenta, odnosno da se izračuna reflektirana komponenta zračenja (Setvak i Doswell, 1991).

Osim na agregatno stanje vode u oblaku, zračenje u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ osjetljivo je i na veličinu čestica oblaka, odnosno njihov efektivni polumjer. Efektivni polumjer definira se kao omjer sume svih površina i sume svih volumena kapljica u danom volumenu oblaka. Raspršivanje ulaznog Sunčevog zračenja događa se na površini kapljice vode u oblaku, dakle proporcionalno je kvadratu efektivnog polumjera kapljice ($\sim r^2$). S druge strane, apsorpcija se događa unutar volumena kapljice što je čini proporcionalnom trećoj potenciji efektivnog polumjera ($\sim r^3$). S obzirom na to da je ukupna refleksivnost zapravo omjer raspršenja i apsorpcije, dolazimo do zaključka da je refleksivnost obrnuto proporcionalna efektivnom polumjeru kapljice ($\sim r^{-1}$) (Rosenfeld i sur., 2004b). Drugim riječima, što je kapljica veća, refleksivnost će biti manja. Isto vrijedi i za idealizirane ledene kristaliće. To je slikovito prikazano na slici 2.14. Dakle, refleksija u području $3.9 \mu\text{m}$ se smanjuje s povećanjem efektivnog radijusa čestica oblaka.

Lindsey i sur. (2006) izračunali su sintetičke vrijednosti zračenja za pojedine vrijednosti srednjeg promjera čestica i iz njih reflektiranu komponentu zračenja u kanalu $3.9 \mu\text{m}$. Na slici 2.15 prikazana je refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ kao funkcija srednjeg promjera za tri različita kuta upada sunčevog zračenja. Pokazalo se da se za konstantni kut upada sunčevog zračenja refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ gotovo ne mijenja s promjenom veličine kristalića leda za promjere veće od $80 \mu\text{m}$, a da za manje promjere refleksivnost naglo raste.



Slika 2.14: Ovisnost refleksivnosti u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ o polumjeru čestica za led i vodu (iz „MSG Interpretation Guide“, Kerkemann i sur., 2004).



Slika 2.15: Ovisnost refleksivnosti u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ o srednjem promjeru kristalića leda na vrhu oblaka za različite vrijednosti upadnog kuta Sunčevog zračenja (Lindsey i sur., 2006).

Također, sudeći prema modeliranim vrijednostima, povećanje kuta upada sunčevog zračenja za posljedicu ima povećanje refleksivnosti za pojedinu veličinu kristala. Kako su naglasili Lindsey i sur. (2006), važan rezultat je činjenica da refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ drastično raste za male veličine kristala.

Isto vrijedi i za kanal $1.6 \mu\text{m}$. Međutim u tom je spektralnom području prisutna izraženija kontaminacija zbog zračenja s površine. To posebno dolazi do izražaja kod malih

konvektivnih oblaka, osobito iznad mora. Također, kao što su pokazali Setvak i sur. (2003), u onim djelovima konvektivnog oblaka koji su optički tanki, refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ nije direktno u vezi s veličinom čestica već to vrijedi samo za optički gусте односно netransparentne oblake. Stoga se taj problem može izbjegći kombiniranjem s kanalom $0.6 \mu\text{m}$ koji daje informaciju o optičkoj gustoći oblaka.

Kako je zaključeno u Strelec Mahović i Zeiner (2009), razlika kanala 0.6 i $1.6 \mu\text{m}$ pokazala se dobrom indikatorom početne faze u razvoju konvektivnih oblaka. Međutim, s obzirom na to da je u mnogim istraživanjima istaknuto da solarna komponenta kanala $3.9 \mu\text{m}$ u raspoznavanju karakteristika oblaka ima bolja svojstva nego kanal $1.6 \mu\text{m}$, daljnje istraživanje usmjereno je na kanal $3.9 \mu\text{m}$.

Stoga će opisana svojstva Meteosat kanala 3.9 i $0.6 \mu\text{m}$, koji omogućuju razlikovanje agregatnog stanja vode u oblacu kao i veličine čestica (kristalića leda ili kapljica vode), odnosno uvid u optičku gustoću oblaka, biti kombinirana u svrhu prepoznavanja konvektivnih oblaka te praćenja pojedinih faza u njihovom razvoju.

2.4.3 Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$

Pojednostavljeno rečeno, konvektivni oblaci su oblaci jakog vertikalnog razvoja, velikog sadržaja vode i najčešće imaju na vrhu ledene kristaliće. Ako bismo promatrati mogućnost prepoznavanja takvih oblaka na slikama u samo jednom spektralnom području, naišli bismo na brojne probleme. Vidjeli smo već u poglavlju 2.3 da kod korištenja samo jednog infracrvenog kanala postoje problemi kod detekcije konvektivnih oblaka. Isto vrijedi i za pojedinačne solarne kanale. Naime, ako gledamo samo kanal $0.6 \mu\text{m}$, osim konvektivnih oblaka veliki albedo imaju i svi drugi gusti vodenii oblaci, osobito magla i stratus, pa bismo na osnovu samog kanala $0.6 \mu\text{m}$ teško prepoznati potencijalno opasne konvektivne oblake. S druge strane, ako bismo gledali samo kanal $3.9 \mu\text{m}$, u njemu konvektivni oblaci, koji imaju led na vrhu, imaju vrlo malu reflektiranu komponentu zračenja. Kad bismo taj kriterij uzeli kao kriterij za prepoznavanje konvektivnih oblaka, tad bi sva područja s malom refleksijom bila prepoznata kao konvektivna. To znači da bi i snijeg na tlu i tanki cirusi bili prepoznati kao konvekcija. Uzmemo li u obzir činjenicu da je konvektivan oblik istovremeno gusti vodenii oblik i ima led na vrhu, potreba za kombiniranjem tih svojstava u jednom produktu nameće se sama.

Multispektralna analiza satelitskih slika koja koristi kombinaciju jednog vidljivog i jednog blisko-infracrvenog kanala opisana je i korištena u mnogim metodama za određivanje mikrofizikalnih svojstava oblaka (Nakajima i King, 1990; Jolivet i Feijt, 2003). Gledamo li svaki pojedini kanal vrijedi sljedeće: u vidljivom području $0.6 \mu\text{m}$ velika vrijednost refleksije povezana je s optički gustim oblacima dok tanki obaci (npr. cirusi) imaju male vrijednosti refleksije. Kad se promatraju obaci jakog vertikalnog razvoja (Cb obaci) vrijednosti refleksije su veće od 80%, a ponekad dosižu i 100%. U kanalu $3.9 \mu\text{m}$ najveće vrijednosti refleksije, kad su u pitanju obaci, pripadaju vodenim oblacima s malim kapljicama dok vodeni obaci građeni od velikih kapljica reflektiraju nešto slabije. Ledeni obaci sastavljeni od malih ledenih kristalića reflektiraju bitno manje nego vodenim obaci, a najmanje vrijednosti reflektirane komponente sunčevog zračenja u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ dolaze od ledenih oblaka sačinjenih od velikih kristala leda, kao što se vidi i iz slike 2.14.

Iako se ledene oblake može jasno prepoznati gledajući samo reflektiranu komponentu u području $3.9 \mu\text{m}$, nije moguće prepoznati koji od tih oblaka su konvektivni. Ovdje ćemo pokazati da razlika između kanala 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ omogućuje upravo to. Ako je razlika reflektiranih komponenti kanala 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ pozitivna i po iznosu velika, znači da promatramo oblik kojem je reflektirana komponenta kanala $0.6 \mu\text{m}$ jako velika, a reflektirana komponenta kanala $3.9 \mu\text{m}$ jako mala. Velike vrijednosti albeda u $0.6 \mu\text{m}$ znače da se radi o obliku velike optičke gustoće. S druge strane, male vrijednosti reflektirane komponente kanala $3.9 \mu\text{m}$ govore da se radi o ledu, odnosno da je vrh oblake prekriven ledenim kristalićima, jer je refleksija od vodenih kapljica puno je veća od one na ledenim kristalićima. Velika pozitivna vrijednost razlike je stoga upravo onaj podatak koji omogućuje izdvajanje konvektivnih oblake od drugih oblake na slici. S druge strane, oni obaci koji zbog male optičke gustoće imaju malu reflektiranu komponentu u kanalu $3.9 \mu\text{m}$, također imaju malu refleksivnost i u kanalu $0.6 \mu\text{m}$. U tim je slučajevima i razlika refleksivnosti u dvama kanalima mala, što omogućuje isključivanje tih oblake u postupku prepoznavanja konvekcije.

2.4.4 Metoda i podaci

Metoda za prepoznavanje konvektivnih oblake na satelitskim slikama i praćenje njihovog razvoja temelji se na kombiniranju kanala 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ u razliku albeda u kanalu $0.6 \mu\text{m}$ i reflektirane komponente zračenja u kanalu $3.9 \mu\text{m}$. Prije računanja razlike potrebno je iz

mjerenja zračenja u pojedinom spektralnom području izdvojiti reflektiranu komponentu. Za kanal $0.6 \mu\text{m}$ to se radi pomoću sljedećih relacija (Rosenfeld i sur., 2005):

$$R_r(0.6 \mu\text{m}) = 100 R(0.6 \mu\text{m}) / \text{TOARAD}_{0.6 \mu\text{m}} / \cos \theta \quad (3)$$

gdje su:

$R_r(0.6 \mu\text{m})$ refleksivnost u kanalu $0.6 \mu\text{m}$ (%)

$R(0.6 \mu\text{m})$ ukupno zračenje u kanalu $0.6 \mu\text{m}$ ($\text{mW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}$), računa se iz (1), jednako kao za infracrvene kanale

θ upadni kut Sunčevog zračenja (računa se iz datuma, vremena, zemljopisne dužine i širine). Za sumrak ($\theta > 80^\circ$) se stavlja $\theta = 80^\circ$

TOARAD solarna konstanta na vrhu atmosphere ($\text{mW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}$)
za kanal $0.6 \mu\text{m}$ $\text{TOARAD}_{0.6 \mu\text{m}} = 20.76 / \text{ESD}^2$, gdje je

ESD udaljenost Zemlje od Sunca (u astronomskim jedinicama), tijekom godine mijenja se u skladu s:

$$\text{ESD(Julian Day)} = 1.0 - 0.0167 \cos(2\pi(\text{Julian Day} - 3)/365) \quad (4)$$

Kod kanala $3.9 \mu\text{m}$ postupak je nešto složeniji jer je potrebno ukloniti termalnu komponentu zračenja odnosno izdvojiti samo reflektiranu komponentu (Setvak i Doswell, 1991; Lindsey i sur., 2006; Rosenfeld i sur., 2005). Naime zračenje u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ danju se sastoji od emitiranog i reflektiranog zračenja. Relacija za računanje reflektirane komponente zračenja je:

$$R_r(3.9 \mu\text{m}) = 100 (R(3.9 \mu\text{m}) - R_{\text{therm}}) / (\text{TOARAD}_{3.9 \mu\text{m}} - R_{\text{therm}}) \quad (5)$$

- $R_r(3.9 \mu\text{m})$ reflektirana komponenta zračenja u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ (%)
 $R(3.9 \mu\text{m})$ ukupno zračenje u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ ($\text{mW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}$), računa se iz (1), jednako kao za infracrvene kanale
 R_{therm} termička komponenta zračenja u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ ($\text{mW m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}$), korigirana zbog apsorpcije od strane CO_2

Termička komponenta zračenja u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ može se procjeniti na temelju zračenja u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ pomoću:

$$R_{\text{therm}} = R(3.9 \mu\text{m}, T_b(10.8 \mu\text{m})) R_{3.9,\text{corr}} \quad (6)$$

Pri čemu se prvo izračuna temperatura u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ ($T_b(10.8 \mu\text{m})$), pomoću (2), koristeći parametre ν_c , A i B za kanal $10.8 \mu\text{m}$, a zatim se ta temperatura pretvori nazad u zračenje, ali koristeći parametre ν_c , A i B koji odgovaraju kanalu $3.9 \mu\text{m}$:

$$R_{\text{therm}} = C_1 v_c^3 / \{\exp[C_2 v_c / A T_b(10.8 \mu\text{m}) + B] - 1\} \quad (7)$$

$R_{3.9,\text{corr}}$ faktor korekcije ukupnog zračenja u kanalu $3.9 \mu\text{m}$, zbog atenuacije emitiranog termičkog zračenja uslijed apsorpcije od strane CO_2 , može se procjeniti pomoću temperature u kanalima 10.8 i $13.4 \mu\text{m}$ kao:

$$R_{3.9,\text{corr}} = \frac{[T_b(10.8 \mu\text{m}) - 0.25(T_b(10.8 \mu\text{m}) - T_b(13.4 \mu\text{m}))]^4}{[T_b(10.8 \mu\text{m})]^4} \quad (8)$$

Solarna konstanta na vrhu atmosfere (TOARAD), korigirana zbog apsorpcije od strane CO_2 može se procjeniti iz:

$$\text{TOARAD}_{3.9\mu\text{m}} = \frac{4.92}{\text{ESD}^2} \cos\theta \exp[-(1 - R_{3.9,\text{corr}})] \exp\left[-(1 - R_{3.9,\text{corr}}) \frac{\cos\theta}{\cos(\text{SAT})}\right] \quad (9)$$

gdje su:

SAT	kut zenita satelita
4.92 / ESD ²	solarna konstanta u kanalu 3.9 μm bez CO ₂ korekcije (mW m ⁻² sr ⁻¹ cm)
$\exp[-(1-R_{3.9,\text{corr}})]$	atenuacija reflektiranog Sunčevog zračenja od oblaka do satelita zbog absorpcije od strane CO ₂
$\exp\left[-(1-R_{3.9,\text{corr}})\frac{\cos\theta}{\cos(\text{SAT})}\right]$	atenuacija upadnog Sunčevog zračenja od Sunca do oblaka zbog absorpcije od strane CO ₂

Svi satelitski podaci korišteni u analizi su podaci s MSG satelita, odnosno satelita Meteosat 8 i Meteosat 9. Podaci se na DHMZ-u primaju i obrađuju na prijemnoj stanici tvrtke Kongsberg Spacetec. Reflektirana komponenta zračenja u kanalu 3.9 μm računa se neposredno nakon prijema. Za potrebe izračuna različitih parametara satelitski podaci projiciraju se na ekvidistantnu cilindričnu geografsku projekciju. Grafički prikazi satelitskih podataka i produkata izrađeni su korištenjem programskog paketa GrADS (Grid Analysis and Display System) koji je dostupan na internetskoj stranici <http://www.iges.org/grads>.

S obzirom na to da izračun refleksivnosti u kanalu 3.9 μm postaje nedefiniran kako kut upadnog sunčevog zračenja teži k 90° (u (3) i (9)), ovdje će biti uzeti u obzir samo podaci za one termine u kojima je $\Theta < 70^\circ$.

Za usporedbu s dobivenim rezultatima korišteni su podaci maksimalne refleksivnosti radara na Bilogori te podaci o električnim pražnjenjima. Podaci o električnim pražnjenjima (munjama) dolaze iz LINET mreže za detekciju električnih pražnjenja (Betz i sur., 2009). Na slikama munja u nastavku rada bit će prikazana sva električna pražnjenja, odnosno neće biti razdvojene munje oblak-oblak od onih oblak-tlo. Slike će obuhvaćati razdoblje od 1 h, pri čemu će munje u različitim vremenskim intervalima unutar tog razdoblja biti označene različitim bojama.

Kad je riječ o usporedbi s radarskim podacima, važno je spomenuti da je povod ovom istraživanju, između ostalog, bila potreba da se nedostajući radarski podaci, na neki način, nadomjestite satelitskim podacima. Drugim riječima, pokušalo se podacima, koji bi u

određenoj mjeri bili usporedivi s radarskima, obuhvatiti Jadran i obalno područje, za koje radarski podaci ne postoje. Pritom valja na umu imati razliku između satelitskih i radarskih mjerena. Valna duljina koju koristi radar i zračenja koje mjeri instrument na satelitu različite su za nekoliko redova veličina. Radar na Bilogori, čiji su podaci prikazani u nastavku rada, koristi valnu duljinu 10 cm, dok je valna duljina zračenja koje mjeri SEVIRI instrument reda veličine 1-10 μm . Radarski odraz je mjera količine kapljica ili kristalića, koji su reda veličine 0.1-10 mm. Istodobno refleksivnost koju mjeri instrument na satelitu je mjera raspodjele čestica oblaka čiji polumjeri su reda veličine 1-100 μm . Iz toga se može zaključiti da će radar vidjeti konvektivne oblake zapravo kasnije nego satelit, jer je satelit u mogućnosti registrirati sitnije čestice (kapljice, kristaliće) nego radar. Unatoč toj razlici, vizualna usporedba u slučaju konvektivnih oblaka, kao što se pokazalo u Strelec Mahović i Zeiner (2009) daje dobre rezultate.

Radarske slike koje će biti korištene u nastavku rada rezultat su tzv. volumnog snimanja (engl. volume scan), koji počinje na elevaciji $0,5^\circ$, a završava na $34,9^\circ$. Prikaz radarske snimke je krug promjera 480 km. Iznad kruga nalazi se projekcija radarskog odraza gledano s juga, a desno od kruga projekcija gledano sa zapada. Na tim se projekcijama može ocijeniti visina oblaka (projekcija ima maksimalnu visinu 15 km). Na desnoj strani radarske slike nalazi se skala refleksivnosti oblaka u dBZ, s vrijednostima od 10 do 65 dBZ u koracima po 5 dBZ. Konvektivna naoblaka tipično poprima vrijednosti 35 i više dBZ. Što je veća odražajnost, konvektivni procesi su izraženiji. Prikaz radarske slike je panoramski prikaz, a pokazuje situaciju na 2 km visine. Na slikama je naznačen termin početka radarskog mjerjenja u UTC.

Važno je također naglasiti da satelitski podaci, prikazani u sljedećim primjerima, nisu korigirani na pogrešku zbog paralakse pa se konvektivni sustav na satelitskim slikama uvijek prikazuje malo pomaknut prema sjeveroistoku u odnosu na radarski odraz istog sustava. Drugim rječima, usporedbu s radarskim odrazom valja uzeti samo kao informativnu, a za kvantitativnu usporedbu radarskih i satelitskih podataka bilo bi potrebno dodati algoritam za korekciju pogreške paralakse kao i algoritam za praćenje, no to nije svrha ovoga rada.

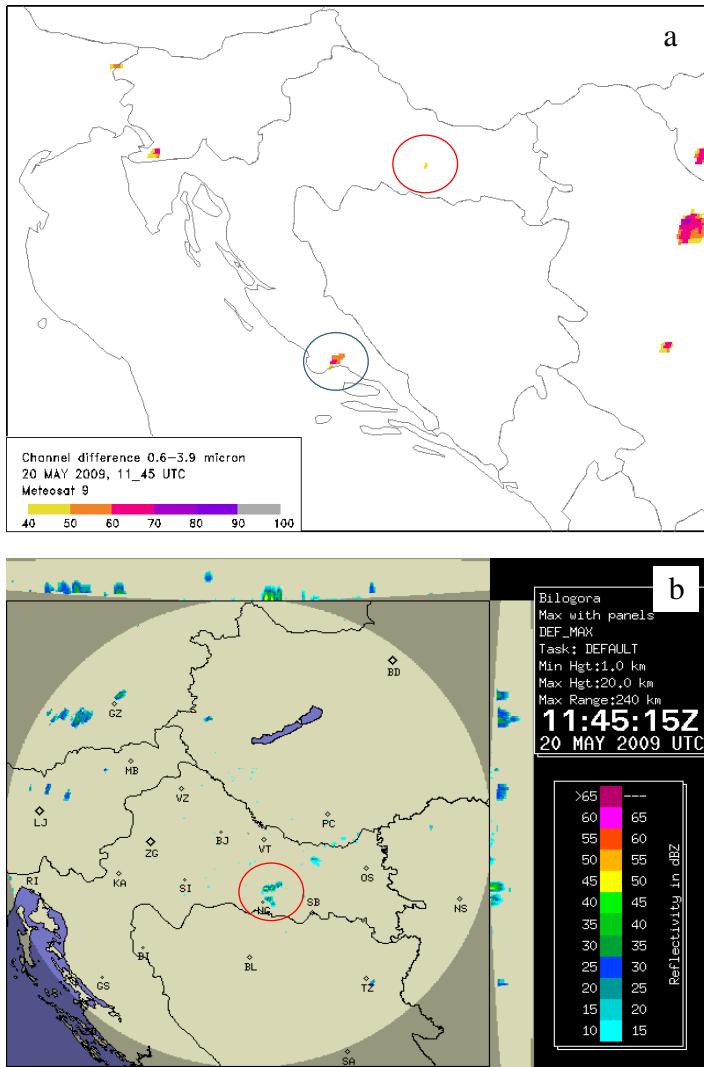
2.4.5 Primjeri konvektivnih situacija

Kroz sljedeće primjere, uzete iz niza obrađenih situacija, bit će prikazana mogućnost praćenja razvoja konvektivnih oblaka, korištenjem razlike refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm . Prikazane situacije nisu nužno bile obilježene jakim konvektivnim razvojem, već se nastojalo dati prikaz različitih vrsta konvektivnih stanica u različitim fazama razvoja, kako bi se što bolje uočili prednosti i nedostaci korištene metode.

Primjer 1: 20. svibnja 2009.

U ovom primjeru prati se razvoj manjeg konvektivnog sustava iznad zapadne Slavonije i kratko-živućeg sustava iznad Dalmacije. U oba slučaja radi se o konvekciji u uvjetima lijepog vremena (engl. fair weather conditions), dakle bez prisutnosti frontalnih poremećaja u blizini. U prvoj fazi razvoja, u zapadnoj Slavoniji pojavljuje se signal u kojem je razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm $>40\%$ (Sl. 2.16a, u crvenom krugu). Odmah valja naglasiti da je granična vrijednost 40% određena empirijski, na osnovu većeg broja analiziranih situacija. Namjera je bila dobiti prikaz konvektivne stanice u satelitskim podacima koji je usporediv s radarskim odrazom. Maksimalni radarski signal koji odgovara ovoj konvektivnoj stanici je oko 45 dBZ (Sl. 2.16b). Na istoj slici još je nekoliko konvektivnih sustava s razlikom refleksivnosti $>40\%$, od kojih ćemo dalje pratiti onaj u blizini Splita (Sl. 2.16a, zaokruženom plavom). Taj sustav nije vidljiv na radarskoj slici jer hrvatski radari ne pokrivaju područje Jadrana, a Dalmaciju ne pokriva niti jedan sustav radara iz susjednih zemalja.

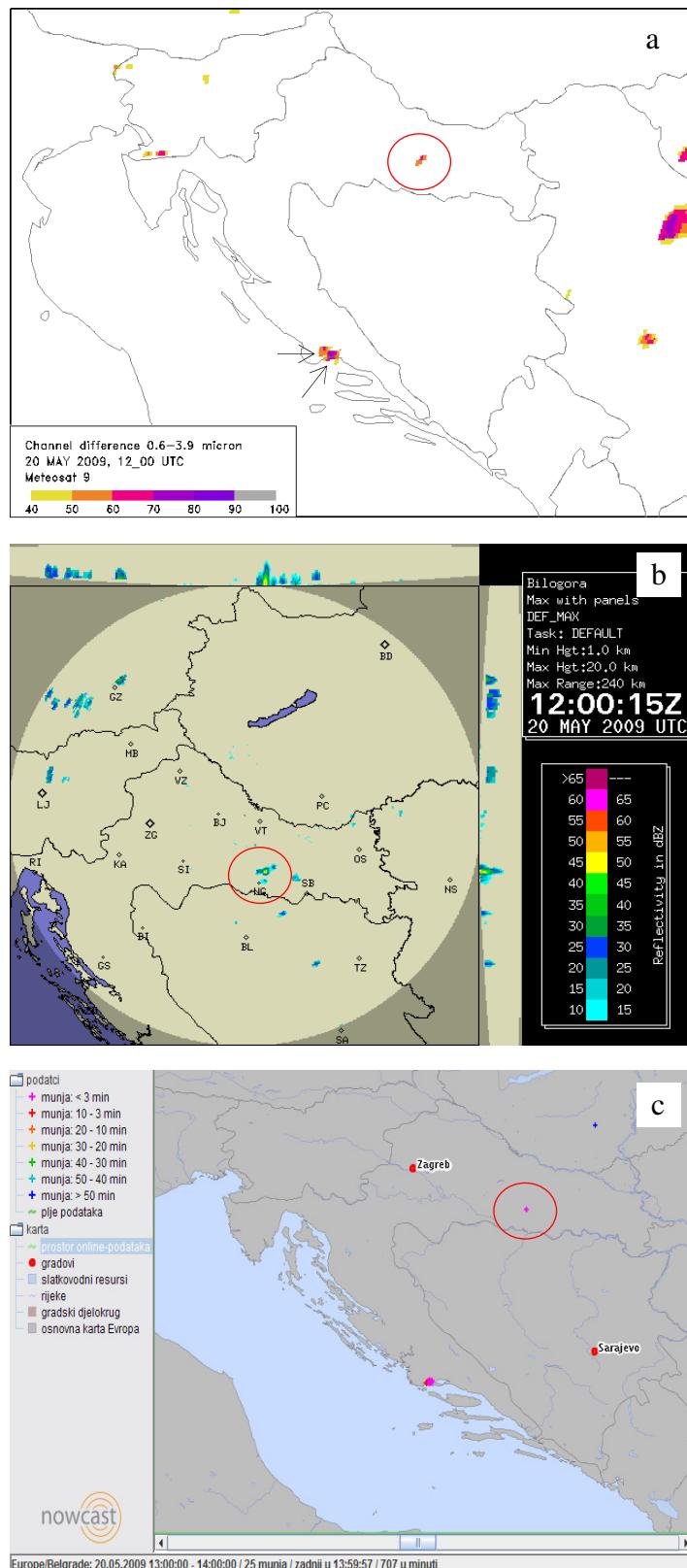
U sljedećem terminu, 15 minuta kasnije (Sl. 2.17), razlika refleksivnosti za sustav iznad zapadne Slavonije već je veća od 60% (Sl. 2.17a), a odgovarajući maksimalni radarski signal u jezgri stanice dostiže vrijednost 50 dBZ (Sl. 2.17b). U tom se trenutku pojavljuje i prvo električno pražnjenje, kao što se vidi na slici 2.17c. To je najvažnije razdoblje u praćenju razvoja konvektivne stanice. Temeljem velike promjene vrijednosti razlike refleksivnosti unutar kratkog vremenskog intervala, može se zaključiti da se radi o sustavu koji se naglo razvija. To potvrđuje i promjena radarskog odraza, kao i pojava munja. Naime, povećanje razlike refleksivnosti posljedica je povećanja albeda u kanalu 0.6 μm ili/i značajnog smanjenja reflektirane komponente zračenja u kanalu 3.9 μm . U slučaju kad se radi o ovako velikoj promjeni razlike, može se zaključiti da se radi o oba efekta.



Slika 2.16: a) Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm (%) i b) maksimalni radarski odraz (dBZ) za 20. svibnja 2009. u 1145 UTC. Pojava prvog signala razlike refleksivnosti $>40\%$ vidljiva je iznad zapadne Slavonije (u crvenom krugu). Odgovarajući maksimalni radarski odraz je oko 45 dBZ. Plavim je zaokružen konvektivni sustav iznad Dalmacije u kojem je razlike refleksivnosti 40-60%, a u jednom pikselu i veća od 60%.

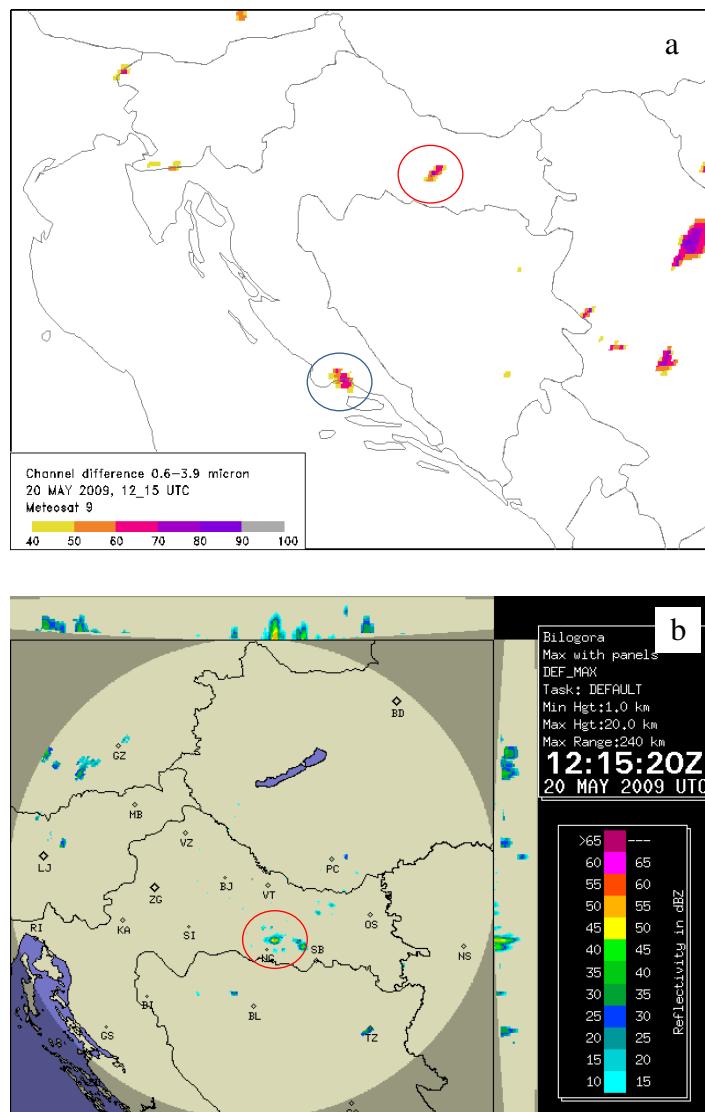
Drugim riječima, ova promjena razlike refleksivnosti ukazuje na to da je konvektivni oblak postao gušći (viši) te da je na njegovu vrhu došlo do zaledivanja.

Sustav iznad Dalmacije također ima pozitivnu promjenu razlike refleksivnosti između 1145 i 1200 UTC. Razlika refleksivnosti za taj sustav povećala se sa 60 na 70%, a povećanje intenziteta očituje se i po gustoći električnih pražnjenja (Sl. 2.17c). Također, temeljem razlike u refleksivnosti može se pretpostaviti da se sustav iznad Dalmacije sastoji od barem dvije konvektivne stanice. One su označene strelicama na slici 2.17a.



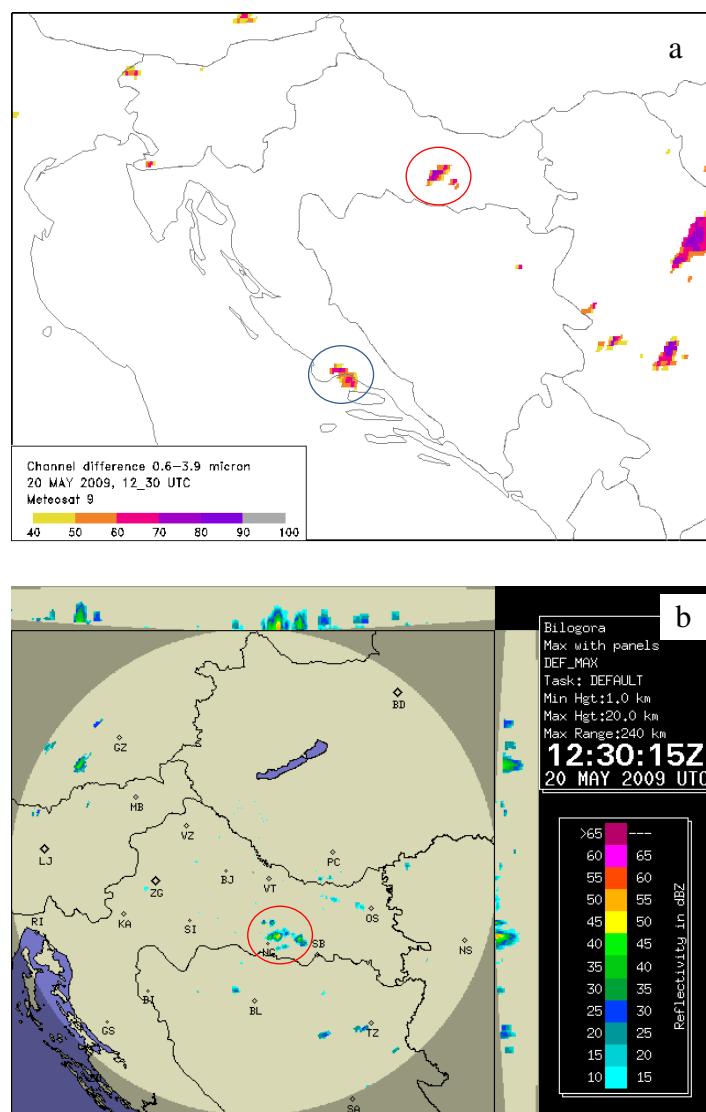
Slika 2.17: a) Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm (%) i b) maksimalni radarski odraz (dBZ) za 20. svibnja 2009. u 12 UTC; c) električna pražnjenja od 11 do 12 UTC.

Daljnji razvoj konvektivne stanice iznad Slavonije (Sl. 2.18a, u crvenom krugu) pokazuje da s porastom razlike refleksivnosti na vrijednosti $>70\%$ nije došlo do jačanja radarskog odraza. Međutim, iz vertikalnog presjeka (desno i iznad radarskog kruga na slici 2.18b) može se vidjeti da se povećala i povisila jezgra konvektivne stanice, s radarskim odrazom 50-55 dBZ. Drugim riječima, iako nije došlo do jačanja radarskog odraza, možemo zaključiti da stanica i dalje raste.



Slika 2.18: a) Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu m$ (%) i b) maksimalni radarski odraz za 20. svibnja 2009. u 1215 UTC. Razlika refleksivnosti $>70\%$ odgovara maksimalnom radarskom odrazu između 50 i 55 dBZ. Projekcija radarskog odraza (desno i iznad radarskog kruga na b) pokazuje povećanje visine konvektivne stanice u odnosu na sliku 2.17b. U konvektivnom sustavu iznad Dalmacije (u plavom krugu) došlo je do smanjenja razlike refleksivnosti.

Kao što je ranije rečeno, jedan od razloga za promjenu razlike refleksivnosti na satelitskim slikama je zaleđivanje na vrhu oblaka. Što proces zaleđivanja dalje odmiče, razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm bivat će sve veća. Naime, na vrhu oblaka stvarat će se veliki ledeni kristali, koji u kanalu 3.9 μm absorbiraju veliku količinu zračenja pa im je reflektirano zračenje vrlo malo. To, naravno, vrijedi samo u području u kojem optička gustoća oblaka ostaje ista, jer je ona dominantna veličina u razlici refleksivnosti. S druge strane, bez obzira na zaleđivanje, ako se sustav počne raspadati, njegova optička gustoća će se smanjivati pa će i razlika refleksivnosti postati manja, što je vidljivo na primjeru konvektivnog sustava iznad Dalmacije.

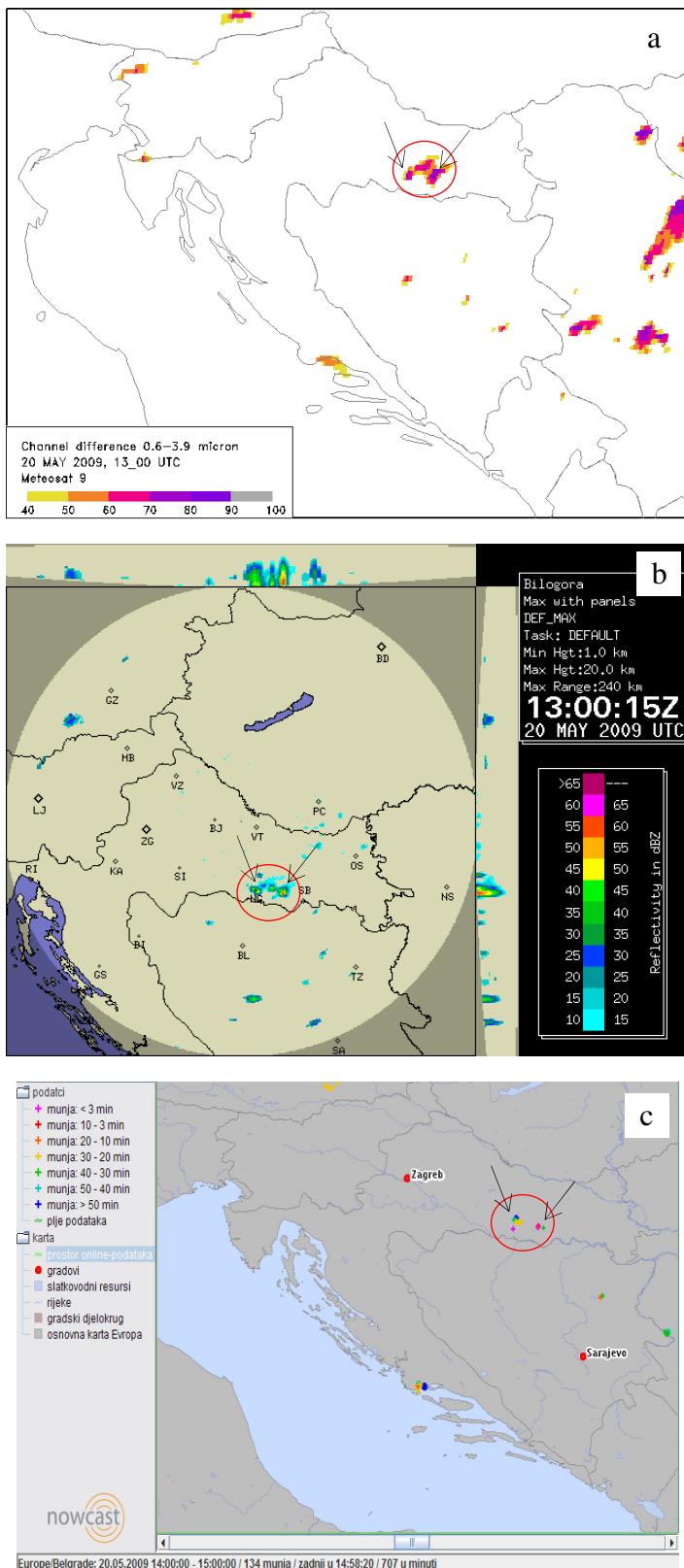


Slika 2.19: a) Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm (%) i b) maksimalni radarski odraz u dBZ za 20. svibnja 2009. u 1230 UTC. Razlika refleksivnosti $>70\%$ odgovara maksimalnom radarskom odrazu između 50 i 55 dBZ.

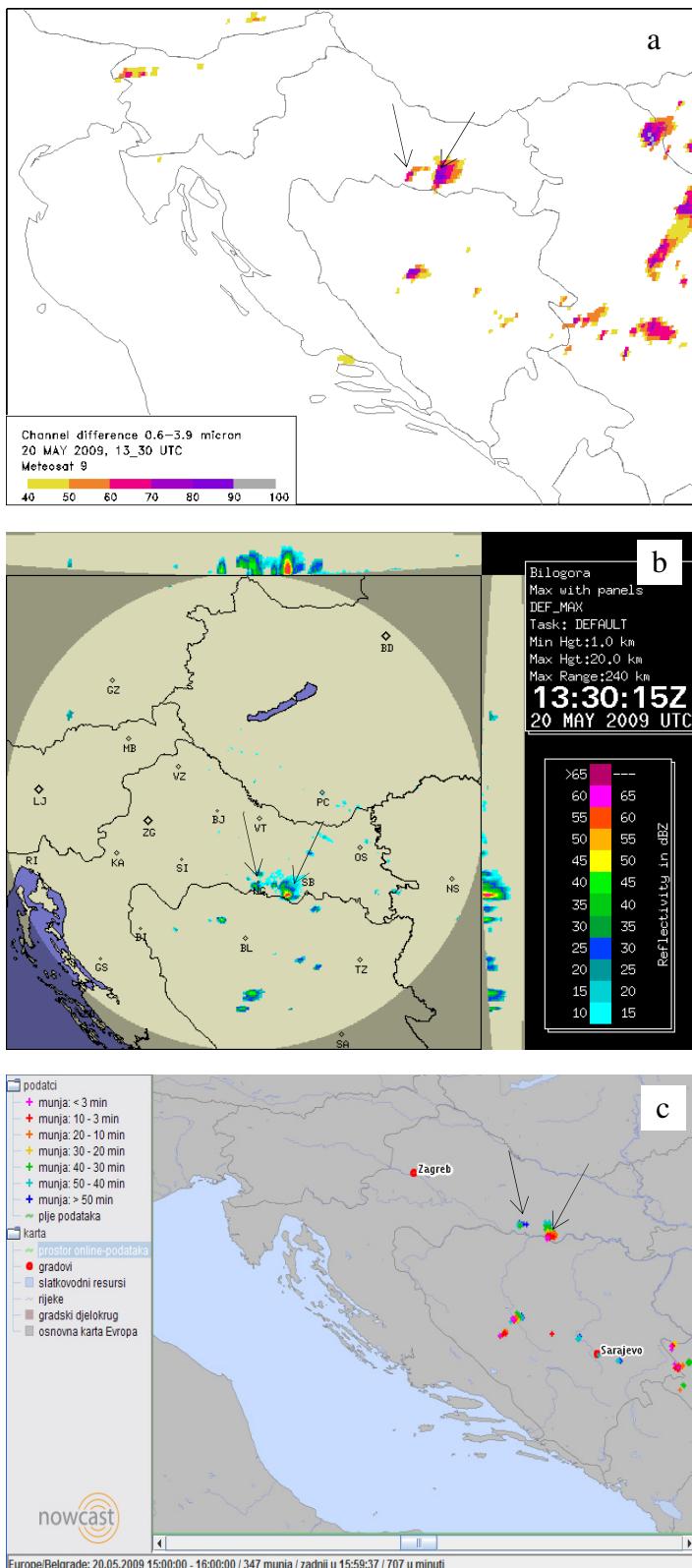
U sljedećem terminu, 1230 UTC (Sl. 2.19a), kod stanice iznad Slavonije, površina područja s razlikom refleksivnosti $>70\%$ povećala se u odnosu na prethodni termin (Sl. 2.18a). To se može povezati sa dalnjim zaledivanjem i stvaranjem cirusnog „nakovnja“ na vrhu konvektivnog oblaka, koji se uglavnom sastoji od velikih ledenih kristala vrlo male refleksivnosti. Drugo što valja primjetiti je pojava nove konvektivne stanice, istočno od primarne. Razlika refleksivnosti u toj je stanici već u prvom pojavljivanju veća od 60% dok je radarski odraz oko 40 dBZ (Sl. 2.19b). Istodobno, sustav iznad Dalmacije gubi na intenzitetu, odnosno područje velike razlike refleksivnosti se smanjuje. Iz toga se može zaključiti da se konvektivni sustav nalazi u zreloj fazi te da se može očekivati njegovo postupno raspadanje. To se potvrđuje na slici 2.20a, na kojoj je očito da je u sljedećih 30 minuta došlo do daljnog smanjenja razlike refleksivnosti, te da se smanjuje broj električnih pražnjenja (Sl. 2.20c).

Razlika refleksivnosti u novonastaloj stanici u konvektivnom sustavu iznad zapadne Slavonije, porasla je iznad 80% (Sl. 2.20a, u crvenom krugu). Odgovarajući radarski signal doseguo je vrijednost maksimalnog odraza između 55 i 60 dBZ (Sl. 2.20b). Porast razlike refleksivnosti i zamjetno jačanje radarskog odraza govore da se radi o konvektivnoj stanici koja se naglo razvija. Gledajući pobliže razliku refleksivnosti, možemo opaziti da se sustav sastoji od tri konvektivne stanice, od kojih je ona koja se nalazi najistočnije najintenzivnija, što potvrđuje i radarski odraz. Stanica koja se nalazi najzapadnije je početna stanica, koja gubi na intenzitetu, što se može vidjeti po smanjenju radarskog odraza i na prikazu električnih pražnjenja za razdoblje od 12-13 UTC (Sl. 2.20c). Praćenjem daljnog razvoja na satelitskim i radarskim podacima, uočava se da ta stanica razmjerno brzo odumire, a prestaju i električna pražnjenja (Sl. 2.21).

Nova stanica, ona na istoku sustava, jača i dalje. Razlika refleksivnosti ostaje $>80\%$, područje s velikom razlikom refleksivnosti se povećava, radarski odraz >55 dBZ i nove munje registrirane su između 15 i 16 sati (Sl. 2.21). Pogleda li se prikaz električnih pražnjenja, očito je da se stanica premješta od sjevera prema jugu, jer se nove munje javljaju južno od prethodnih. Usporede li se područja najveće razlike refleksivnosti, uočava se da se i ono premješta prema jugu dok se cirusni vrh oblaka širi prema sjeveroistoku. Detaljniji prikaz položaja najaktivnijeg dijela oblaka bit će dan u poglavljiju 2.4.6.



Slika 2.20: a) Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm (%) i b) maksimalni radarski odraz u dBZ za 20.svibnja 2009. u 1300UTC te c) električna pražnjenja od 1200 do 1300 UTC. Strelice označavaju dvije konvektivne stanice u sustavu – lijeva je početna, a desna novonastala stanica.



Slika 2.21: a) Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm (%), b) maksimalni radarski odraz (dBZ) za 20. svibnja 2009. u 1330UTC te c) električna pražnjenja od 13 do 14 UTC. Primarna konvektivna stanica, označena lijevom strelicom, odumire, dok se novonastala, desna, nastavlja razvijati.

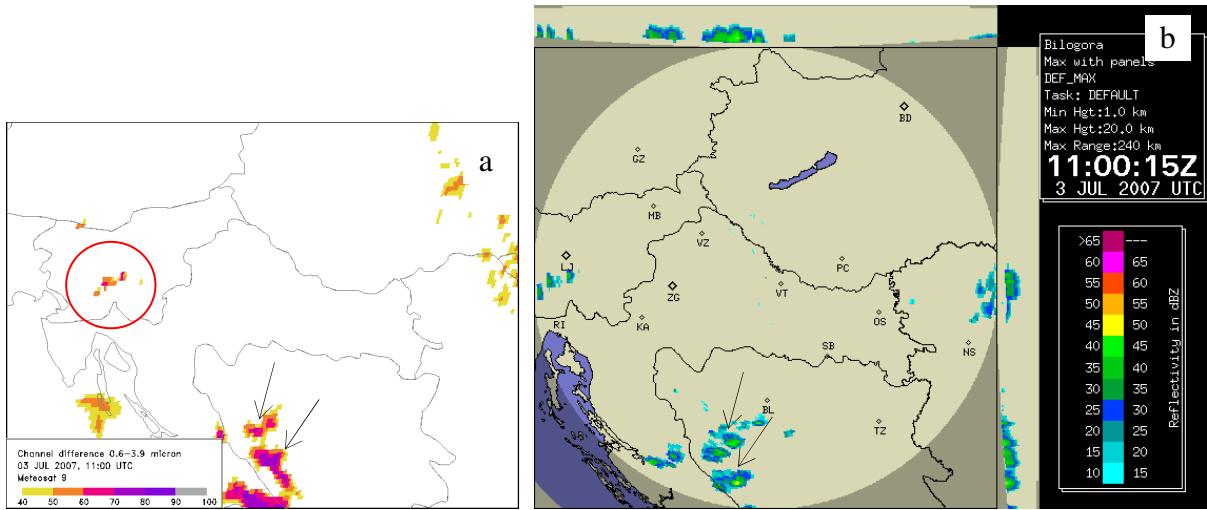
U ovom primjeru pokazalo se da je konvektivni oblak na satelitskim slikama uočljiv u vrijeme dok je radarski signal još razmjerne slab, a usporedba s podacima o električnom pražnjenju pokazuje da iz satelitskih podataka konvektivne stanice mogu biti prepoznate u ranoj fazi razvoja, dok još nema električnih pražnjenja. Također se pokazuje da se u početnim fazama razvoja konvektivne stanice, praćenjem promjena u razlici refleksivnosti kanala 0.6 i 3.9 μm može zaključiti o tome da li stanica dalje raste ili nestaje. Sustav iznad zapadne Slavonije, koji je na slikama bio zaokružen crvenom linijom, sastojao se od dvije konvektivne stanice od kojih smo jednu pratili od samog nastanka do prestanka pojave munja, dok je druga, koje se formirala istočno od početne stanice, nastala naglo i nastavila se razvijati. Čini se da je razvoj druge konvektivne stanice bio potpomognut energijom one prvostrukne, po sličnom principu kao kod razvoja linije nestabilnosti, kao što je pokazano npr. u Strelec i sur. (2007). Pritom se mora imati u vidu da je, kao što je zaključeno iz premještanja električnih pražnjenja i područja najveće razlike refleksivnosti, gibanje sustava u ovoj situaciji bilo od sjevera prema jugu, što bi značilo da je nova stanica nastala lijevo od početne, gledano u smjeru gibanja.

Primjer 2: 03. srpnja 2007.

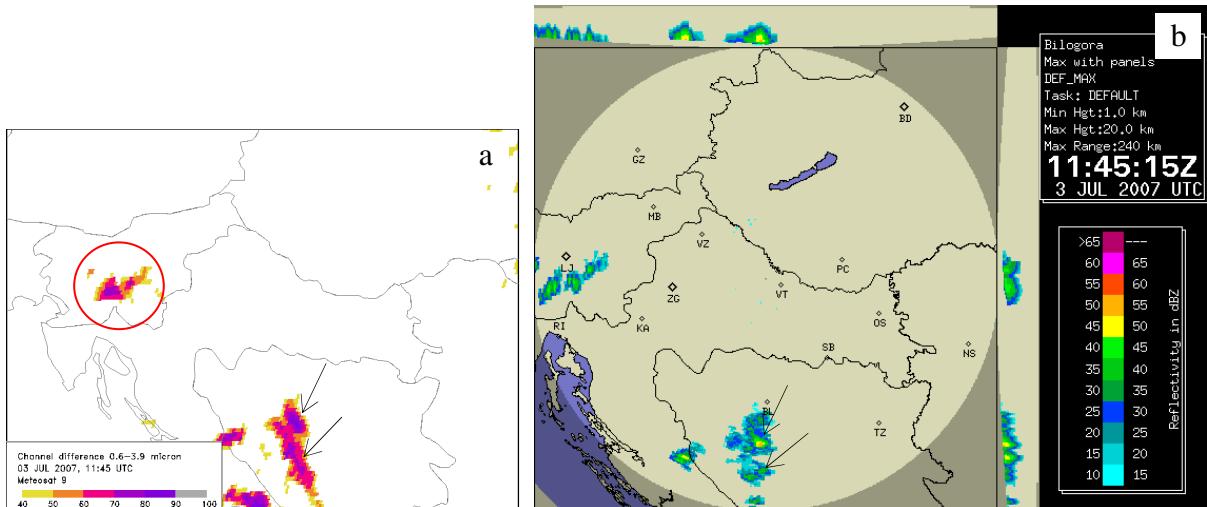
U analizi ove situacije prate se tri odvojena konvektivna sustava. Prvi je sustav vidljiv na slici 2.22a iznad zapadnog dijela Bosne i Hercegovine i unutrašnjosti Dalmacije. Ovdje se radi o već razvijenom konvektivnom sustavu u kojem je razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm veća od 70%. Sustav se sastoji od dvije veće konvektivne stanice, označene strelicama radi lakšeg praćenja. Radarski odraz koji odgovara tim konvektivnim stanicama je oko 45 dBZ (Sl. 2.22b), no taj podatak nije pouzdan s obzirom na to da se konvektivni sustav nalazi na samom rubu područja koje radar vidi. Kod tog sustava vrijednost razlike refleksivnosti ne može se povezati s intenzitetom radarskog odraza jer se radi o već razvijenoj konvektivnoj stanići. Drugi konvektivni sustav koji ćemo pratiti nalazi se iznad Slovenije. U tom sustavu dvije konvektivne stanice imaju razliku refleksivnosti $> 60\%$ (Sl. 2.22a, u crvenom krugu). Taj je sustav u početnoj fazi razvoja.

U sljedećih 45 minuta sustav iznad BiH premjestio se prema sjeveroistoku pri čemu se intenzivirala lijeva konvektivna stanica u sustavu, ona koja se nalazi sjevernije, dok kod desne nije bilo promjene u razlici refleksivnosti, ali se smanjilo područje u kojem je razlika

refleksivnosti $> 70\%$ (Sl. 2.23a). Radi lakšeg praćenja obje promatrane konvektivne stanice u sustavu označene su strelicama. Promjene radarskog odraza prate promjenu razlike refleksivnosti na satelitskim slikama. Naime, kod lijeve stanice u sustavu radarski odraz se značajno povećao, dok se kod desne smanjio (Sl. 2.23b).



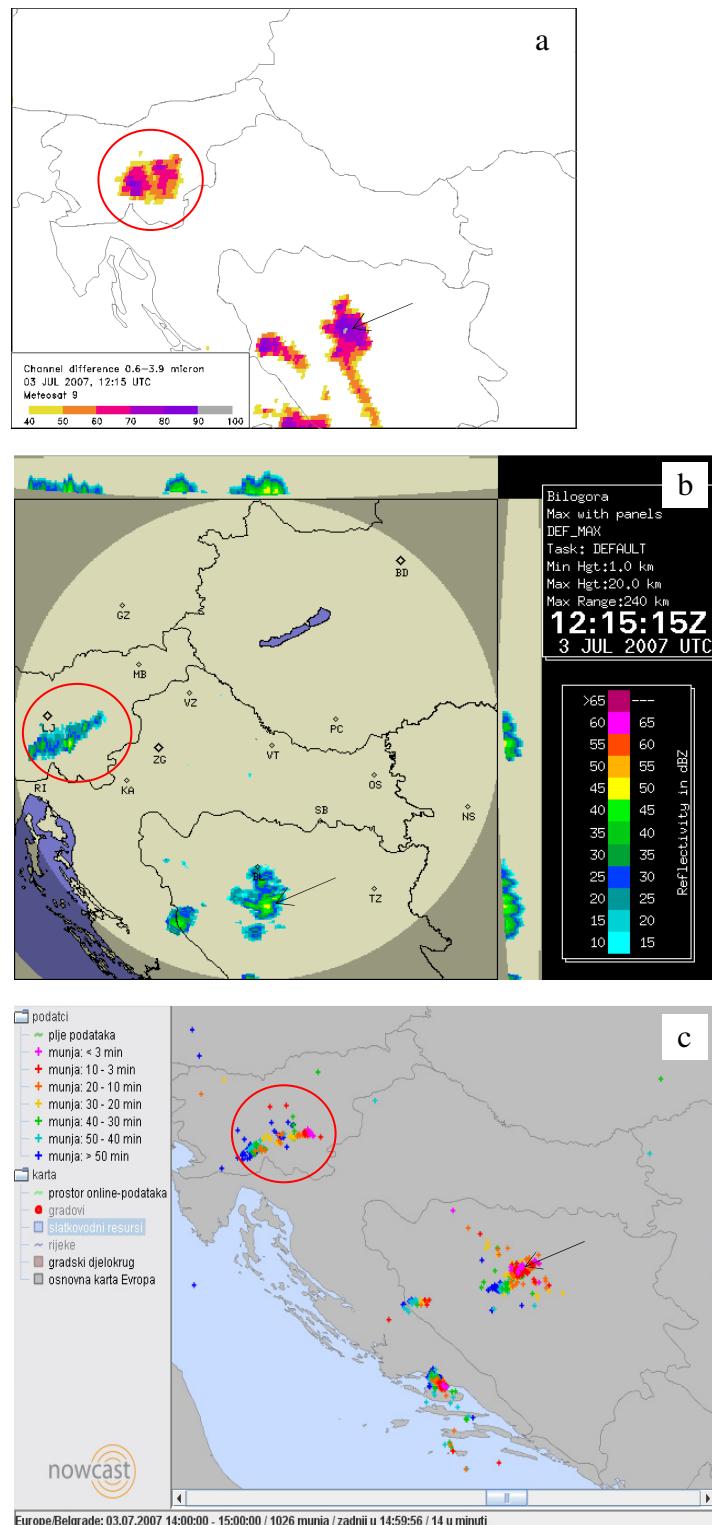
Slika 2.22: a) Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ (%) i b) maksimalni radarski odraz (dBZ) za 03. srpnja 2007. u 11 UTC.



Slika 2.23: a) Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ (%) i b) maksimalni radarski odraz (dBZ) za 03.srpnja 2007. u 1145 UTC. Uočljivo je intenziviranje oba sustava koje pratimo.

Također je došlo do jačanja sustava iznad Slovenije pri čemu je razlika refleksivnosti poprimila vrijednosti $>70\%$ (Sl. 2.23a, u crvenom krugu). Radarski odraz te konvektivne

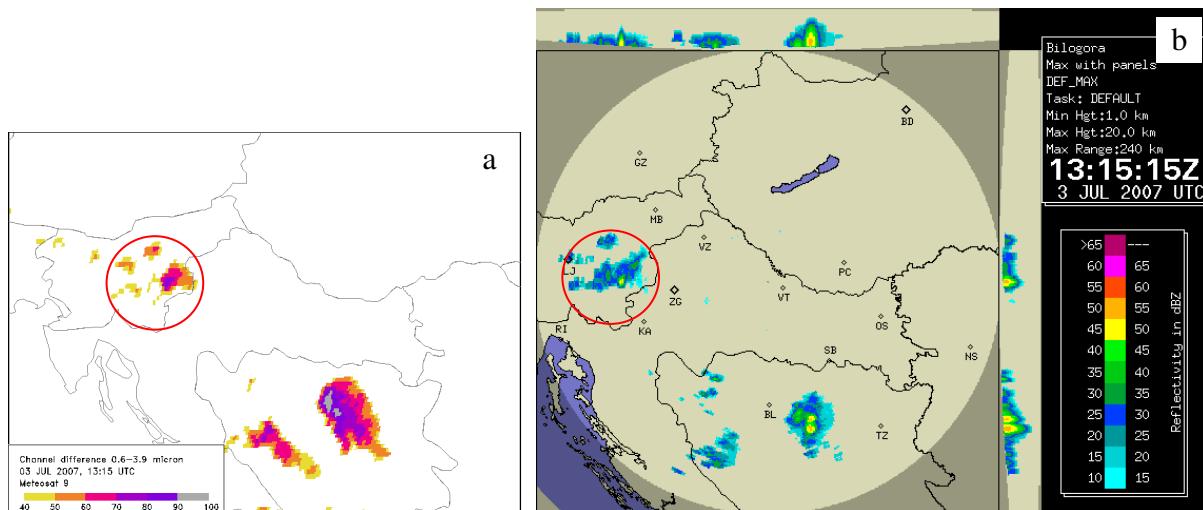
stanice nalazi se na rubu radarski vidljivog područja pa nije upotrebljiv za usporedbu sa satelitskom razlikom refleksivnosti.



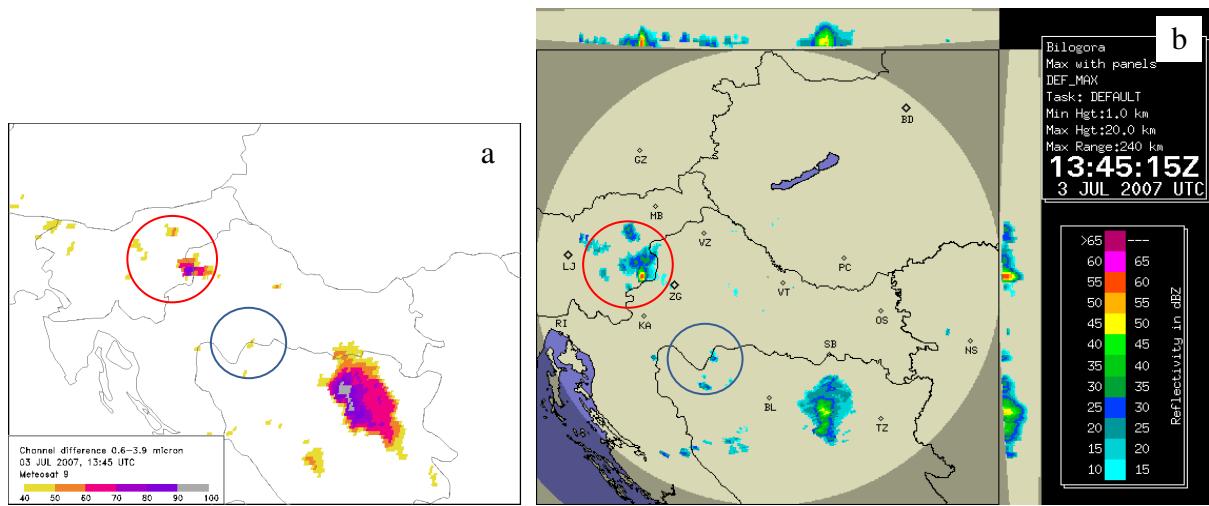
Slika 2.24: a) Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm (%) i b) maksimalni radarski odraz (dBZ) za 03. srpnja 2007. u 1215 UTC te c) električna pražnjenja od 12 do 13 UTC.

U sljedećih pola sata u sustavu iznad BiH javlja se razlika refleksivnosti $>90\%$ (Sl. 2.24a). Takav iznos razlike moguć je samo ako se radi o optički vrlo gustom oblaku koji na vrhu ima velike ledene kristale koji gotovo uopće ne reflektiraju Sunčeve zračenje. Osim toga, površina sustava je razmjerno velika. Iz radarske slike vidljivo je da se radi o oblaku s maksimalnim odrazom oko 50 dBZ (Sl. 2.24b). Velika gustoća električnih pražnjenja (Sl. 2.24c) pokazuje da se radi o razmjerno velikom konvektivnom sustavu koji se giba od jugozapada prema sjeveroistoku. U sustavu iznad Slovenije u tom se terminu može primjetiti, da se lijeva stanica, gledano u smjeru gibanja, intenzivira. To potvrđuju i podaci o električnom pražnjenju (Sl. 2.24c, u crvenom krugu). Istodobno, aktivnost desne (južnije) stanice slabija.

U sljedećem promatranom terminu, sat kasnije, desna će stanica u sustavu iznad Slovenije posve nestati dok će lijeva dodatno ojačati (Sl. 2.25a). Pojavljuje se razlika refleksivnosti $>80\%$. U sustavu iznad BiH javljaju se dva područja s refleksivnošću većom od 90%, a površina sustava još se povećala. Radarski odraz pokazuje da se sustav sastoji od dvije veće i nekoliko manjih konvektivnih stanica, s najvećim odrazom između 50 i 55 dBZ.



Slika 2.25: a) Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm (%) i b) maksimalni radarski odraz (dBZ) za 03.srpnja 2007. u 1315 UTC. Razlika refleksivnosti u sustavu iznad BiH je porasla iznad 90%, a područje najveće razlike refleksivnosti usporedivo je s dva središta vidljiva na radarskoj slici, s maksimalnim odrazima >50 dBZ.

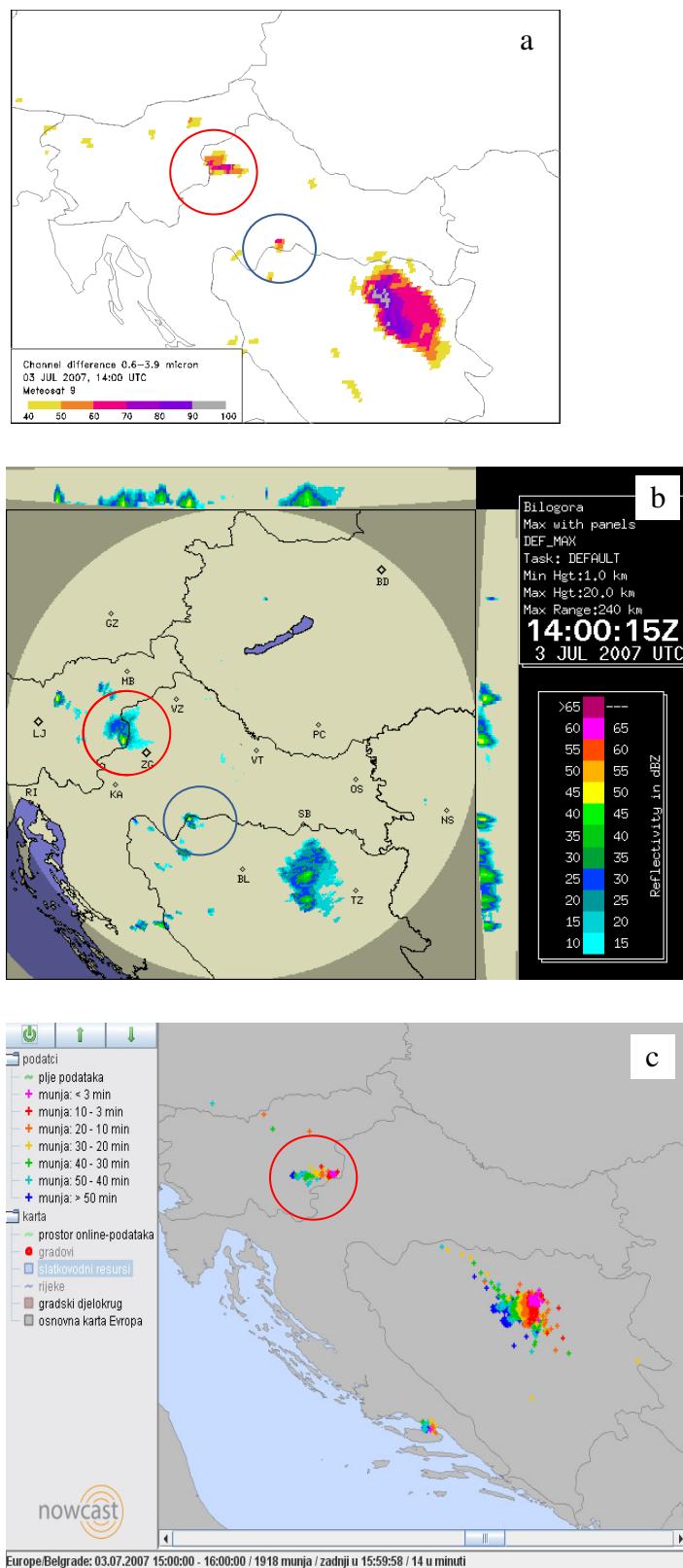


Slika 2.26: a) Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm (%) i b) maksimalni radarski odraz (dBZ) za 03. srpnja 2007. u 1345 UTC.

U terminu 1345 UTC u satelitskim podacima uočljiva je promjena razlike u refleksivnosti u području konvektivnog sustava iznad Slovenije (Sl. 2.26a, u crvenom krugu). Sjeveroistočno od područja maksimalne razlike refleksivnosti pojavljuje se malo područje u kojem je razlika nešto manja (50-60%). Ta promjena može biti posljedica smanjenja optičke gustoće odnosno albeda u kanalu 0.6 μm ili povećanja reflektirane komponente u kanalu 3.9 μm . S obzirom na to da je kod radarskog odraza došlo do povećanja (Sl. 2.26b), moglo bi se zaključiti da je promjena razlike refleksivnosti posljedica povećanja reflektirane komponente kanala 3.9 μm , o čemu će više riječi biti u nastavku teksta.

Treća konvektivna stаница, koju možemo pratiti od samog početka njenog razvoja, prvi put je uočljiva na slici u 1345 UTC u Posavini (Banija), kao razlika u refleksivnosti $>40\%$ (Sl. 2.26a, u plavom krugu). Radarski odraz vezan uz tu konvektivnu stanicu manji je od 35 dBZ (Sl. 2.26b). U sljedećem terminu, 14 UTC (Sl. 2.27), razlika refleksivnosti je već $>60\%$. To ukazuje na nagli razvoj konvektivne stanice. Do tog trenutka još nisu registrirana električna pražnjenja vezana uz tu stanicu (Sl. 2.27c).

Na istoj slici možemo dalje pratiti i konvektivni sustav koji je iz Slovenije ušao u sjeverozapadnu Hrvatsku. Područje s razlikom reflektivnosti većom od 70% značajno se smanjilo (Sl. 2.27a, u crvenom krugu) što ukazuje na postupno raspadanje sustava. Potvrdu tome daje i slabljenje radarskog odraza na slici 2.27b.



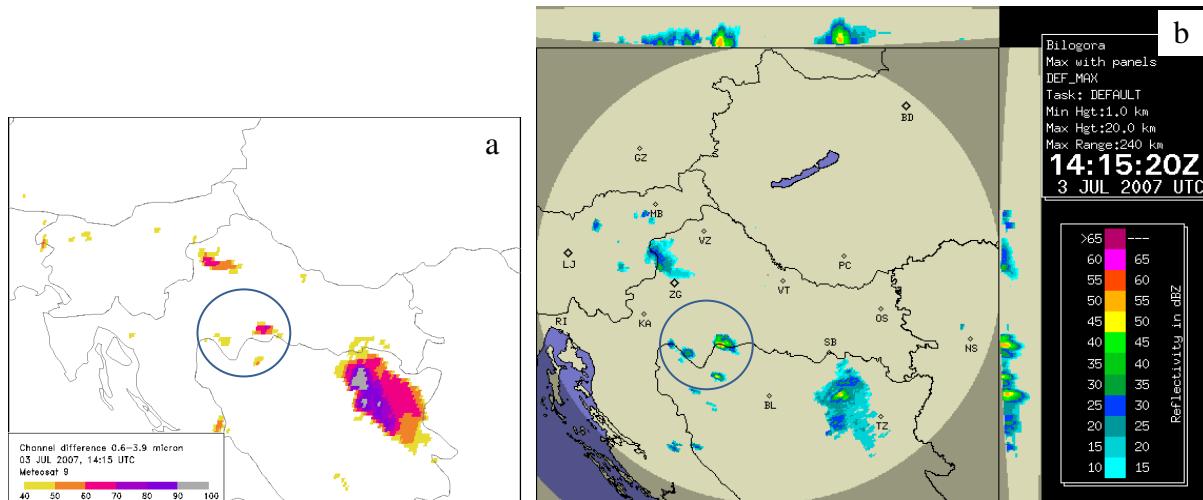
Slika 2.27: a) Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm (%) i b) maksimalni radarski odraz (dBZ) za 03. srpnja 2007. u 14 UTC te c) električna pražnjenja od 1300 do 1400 UTC.

Na primjeru konvektivne stanice uz nad Slovenije zorno se vidi utjecaj pogreške paralakse. Na radarskom odrazu (Sl. 2.27b), kao i na podacima o električnom pražnjenju (Sl. 2.27c), sustav je na samoj granici Hrvatske i Slovenije ali još na slovenskoj strani, dok je na satelitskoj slici (Sl. 2.27a) sustav već ušao u Hrvatsku. Jednim dijelom je to posljedica pogreške paralakse, no dijelom je za to zaslužna i razlika u vremenima skeniranja. Naime, satelitska slika kojoj je nominalno vrijeme 1400 UTC, točno u 1400 UTC vidi zapravo južni pol dok je nad područjem Hrvatske (oko 45N) skeniranje obavljeno gotovo desetak minuta kasnije. Istovremeno radarsko skeniranje s nominalnim vremenom 1400 UTC obavlja se u samo 2 minute i završeno je oko 1402 UTC pa je razlika u vremenima između satelitske i radarske slike desetak minuta. Shodno tome, bilo bi možda ispravnije uspoređivati satelitsku sliku u 1345 UTC s radarskom u 1400 UTC. Tada bi pomak u vremenu bio malo više od 5 minuta. To bi imalo smisla kod uspostavljanja automatskog sustava detekcije i motrenja konvektivnih stanica koji bi se osnivao na kombinaciji radarskih i satelitskih podataka, no ovdje za teorijsku raspravu nije od presudnog značaja. Također, kad se spominje razlika u vremenima motrenja, valja napomenuti da podaci o električnom pražnjenju daju podatak najbliži stvarnom terminu događanja pojave jer su oni trenutni i obnavljaju se u sustavu sa svakim novim događajem, no grafički prikaz ih grupira u 10-minutne podatke pa i ovdje može biti nekoliko minuta odstupanja od stvarnog termina događaja.

Pratimo li dalje sustav iznad BiH vidjet ćemo da je u terminu 14 UTC došlo do manjeg slabljenja radarskog odraza (Sl. 2.27b). Međutim podatak o razlici refleksivnosti, u kojem je doduše došlo do smanjenja područja s razlikom $>90\%$, ali su razlike još uvijek velike, govori nam da je sustav i dalje aktivran. To će se potvrditi već u sljedećem terminu u 1415 UTC (Sl. 2.28), gdje se vidi novo povećanje područja s razlikom $>90\%$, ali i jačanje radarskog odraza, odnosno pojava nove konvektivne stanice. U tom terminu uočljivo je raspadanje konvektivnog sustava iznad sjeverozapadne Hrvatske (u crvenom krugu). Razlika refleksivnosti smanjila se ispod 70% (Sl. 2.28a). Radarski odraz na slici 2.28b također pokazuje smanjenje, na njemu više nema vidljivog konvektivnog sustava već je prisutna samo kišna masa.

U sustavu u Posavini razlika refleksivnosti povećala se na više od 70% (Sl. 2.28a, u plavom krugu). Odgovarajući radarski odraz poprimio je vrijednosti između 50 i 55 dBZ. Očito je da se radi o sustavu koji se naglo razvija. Također valja primjetiti da su se u sustavu pojavile dvije nove konvektivne stanice, južno i jugozapadno od primarne, u kojima je razlika

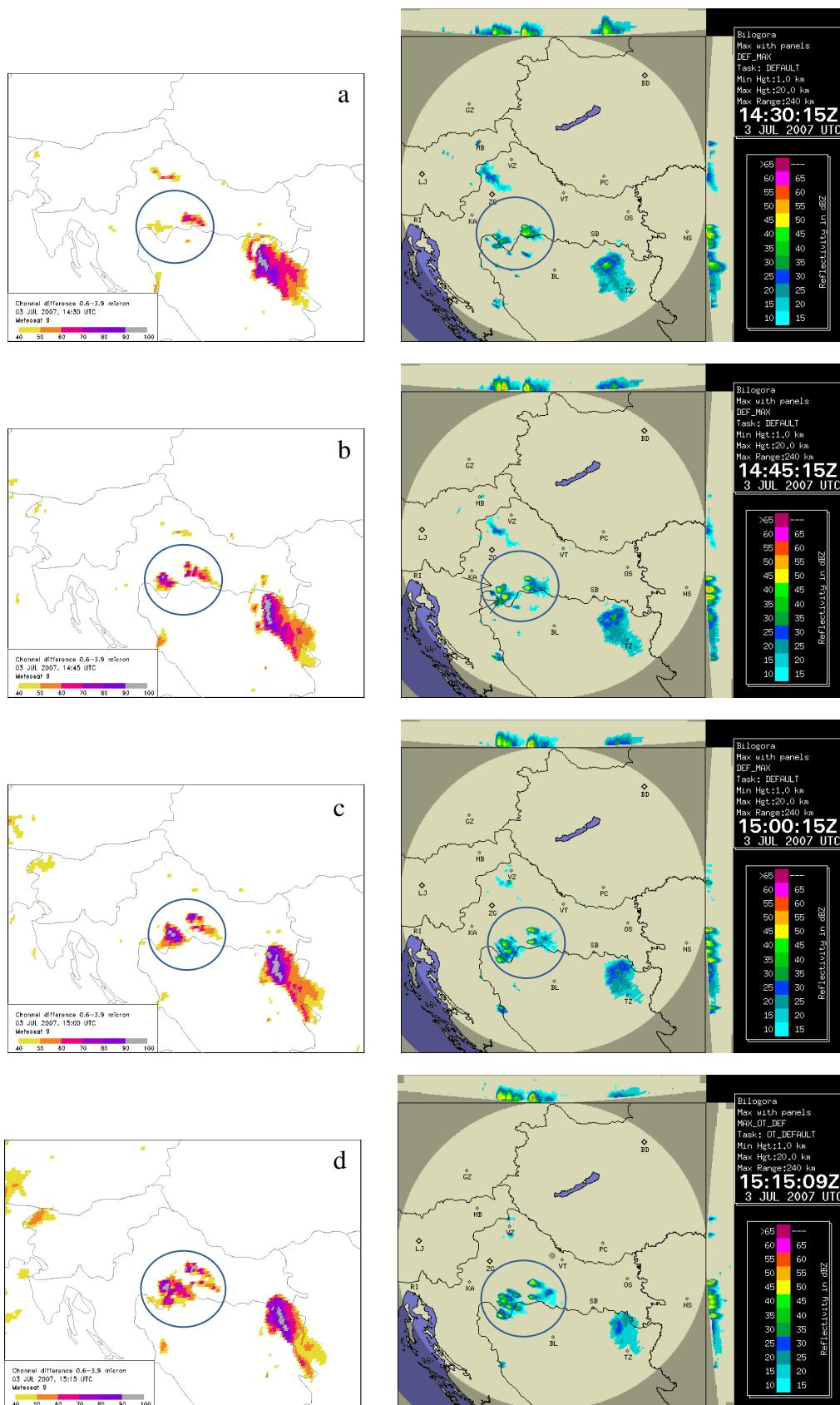
u refleksivnosti >40 odnosno $>50\%$. Maksimalni radarski odraz je u slučaju lijeve stanice između 35 i 40 dBZ, a u slučaju desne između 45 i 50 dBZ.



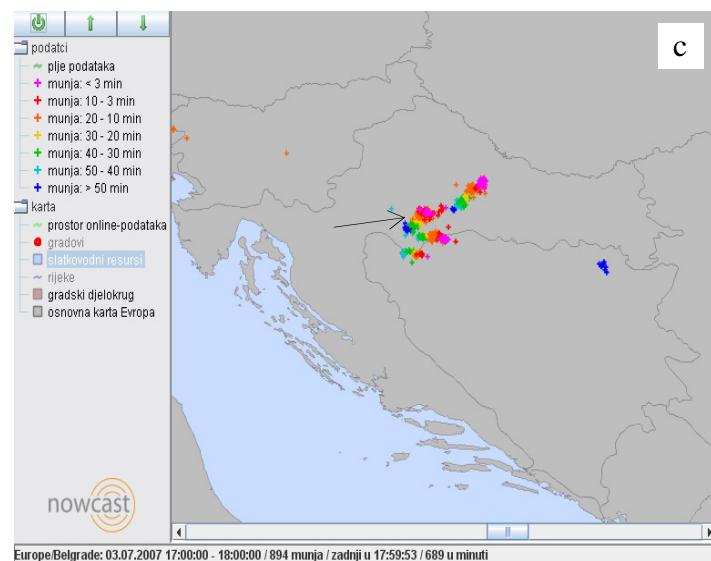
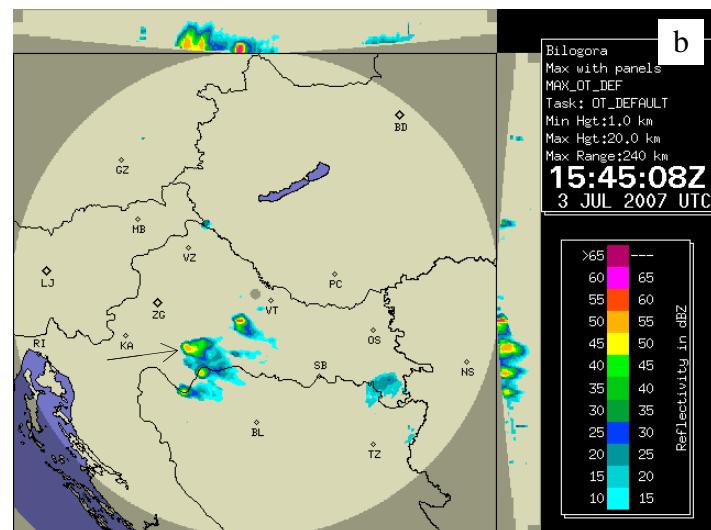
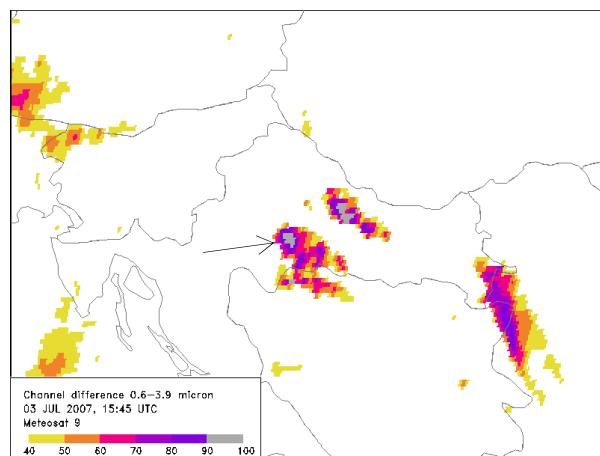
Slika 2.28: a) Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ (%) i b) maksimalni radarski odraz (dBZ) za 03. srpnja 2007. u 1415 UTC.

Daljnji razvoj svih dosad promatranih konvektivnih sustava može se pratiti na nizu satelitskih i radarskih slika između 1430 i 1515 UTC, na slici 2.29. Uočava se da sustav iznad sjeverozapadne Hrvatske odumire, kako je prethodno bilo indicirano. Također dolazi do slabljenja aktivnosti sustava iznad BiH. Valja uočiti kako je kod tog sustava razlika u refleksivnosti i dalje na velikom području $>90\%$. To je, međutim, posljedica stvaranja velikih kristala leda na vrhu zrele konvektivne stanice, odnosno stvaranja većeg područja cirusnih oblaka. Istodobno smanjenje radarskog odraza, kao i smanjenje broja električnih pražnjenja, ukazuju na to da je sustav u fazi odumiranja. Sustav iznad Posavine (u plavom krugu) u fazi je intenzivnog razvoja. U terminu 1430 UTC u primarnoj je stanici razlika refleksivnosti i dalje $>80\%$ dok je u druge dvije stanice još uvijek 40-50%. Nagli skok uočava se između 1430 i 1445 UTC. U tom razdoblju stanica južno od primarne odumire dok se ona jugozapadno iznimno naglo razvila pa je razlika u refleksivnosti čak premašila 90%.

Može se također primjetiti da se kod te jugozapadne stanice zapravo radi o dva konvektivna oblaka (Sl. 2.29b). To je još očitije na radarskoj slici, na kojoj je maksimalni odraz oba konvektivna oblaka (označena strelicama) između 50 i 55 dBZ.



Slika 2.29: Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm (%) (lijevo) i maksimalni radarski odraz (desno) za 03. srpnja 2007. u 1430 (a), 1445 (b), 1500 (c) i 1515 UTC (d). Radi lakšeg praćenja promatrani sustav je zaokružen.



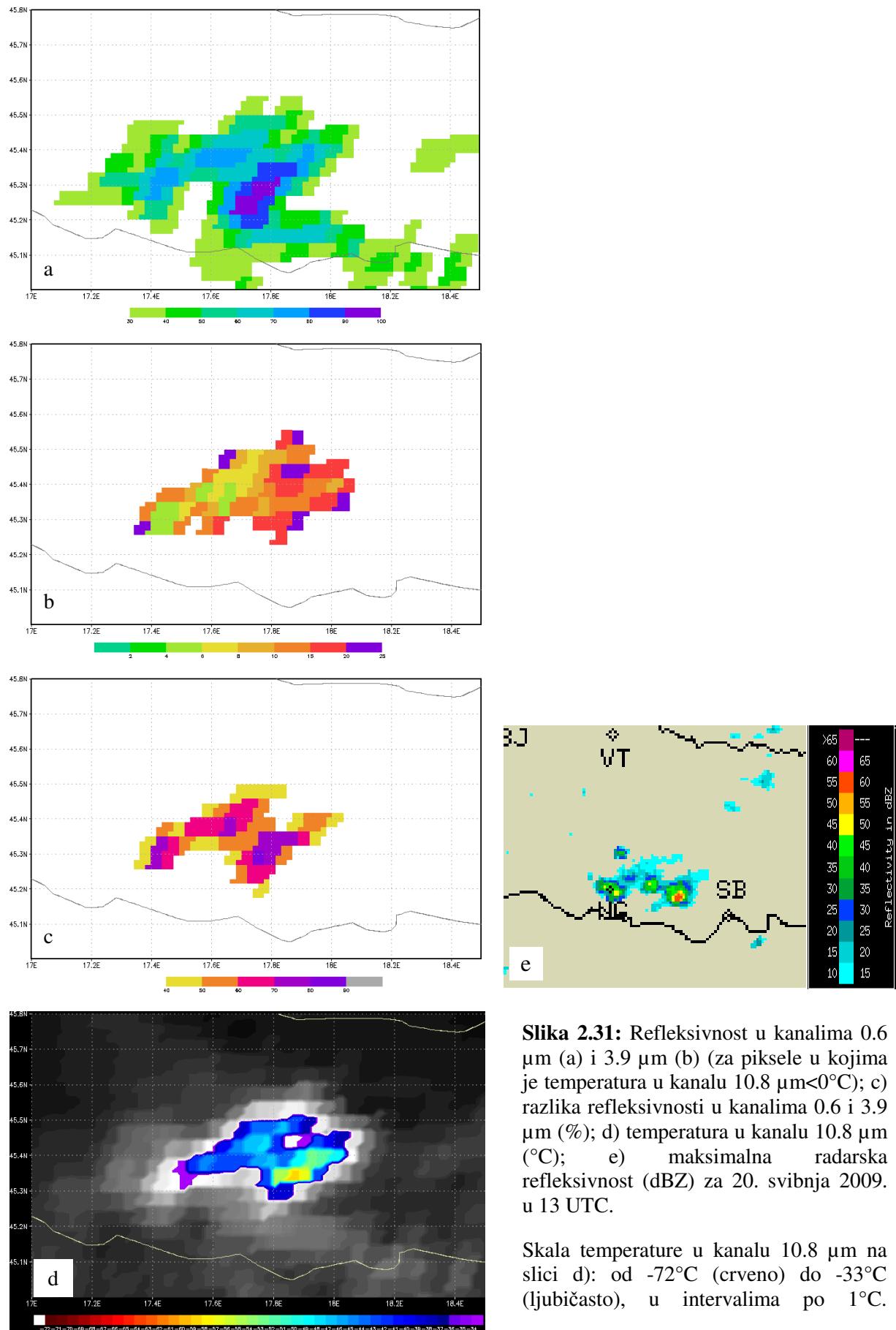
Slika 2.30: a) Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm (%) i b) maksimalni radarski odraz (dBZ) za 03.srpnja 2007. u 1545 UTC te c) električna pražnjenja od 15 do 16 UTC.

Također se i primarni sustav, koji se premjestio prema sjeveroistoku, sastoji od dvije konvektivne stanice. Ljeva od njih, gledano u smjeru strujanja, doživljava nagli razvoj. Razlika u refleksivnosti povećava se na $> 80\%$ do 1500 UTC (Sl. 2.29c), a zatim i na $> 90\%$ do 1515 UTC (Sl. 2.29d) dok istodobno desna postupno odumire. U sljedećih 15 minuta može se uočiti da je primarna stanica i dalje aktivna. Razlika u refleksivnosti je $> 90\%$, a povećala se i njen površina (Sl. 2.30a). Radarski odraz govori da se radi o oblaku s maksimalnim odrazom u jezgri > 60 dBZ, kao što je vidljivo iz slike 2.30b. Kod sustava jugozapadno od primarne stanice uočava se također povećanje površine lijeve stanice (označeno strelicom), u kojoj je razlika refleksivnosti i dalje $> 90\%$, te pojačanje radarskog odraza, koji je na slici 2.20b između 50 i 55 dBZ. Ono što je također zanimljivo primjetiti je različita rotacija dviju stanica: lijeva (označena strelicom) se giba pravocrtno prema sjeveroistoku dok desna zaokreće udesno, što je najbolje vidljivo iz podataka o električnom pražnjenju.

2.4.6 Pobliže o svojstvima vrhova konvektivnih oblaka vidljivim u kombinaciji kanala

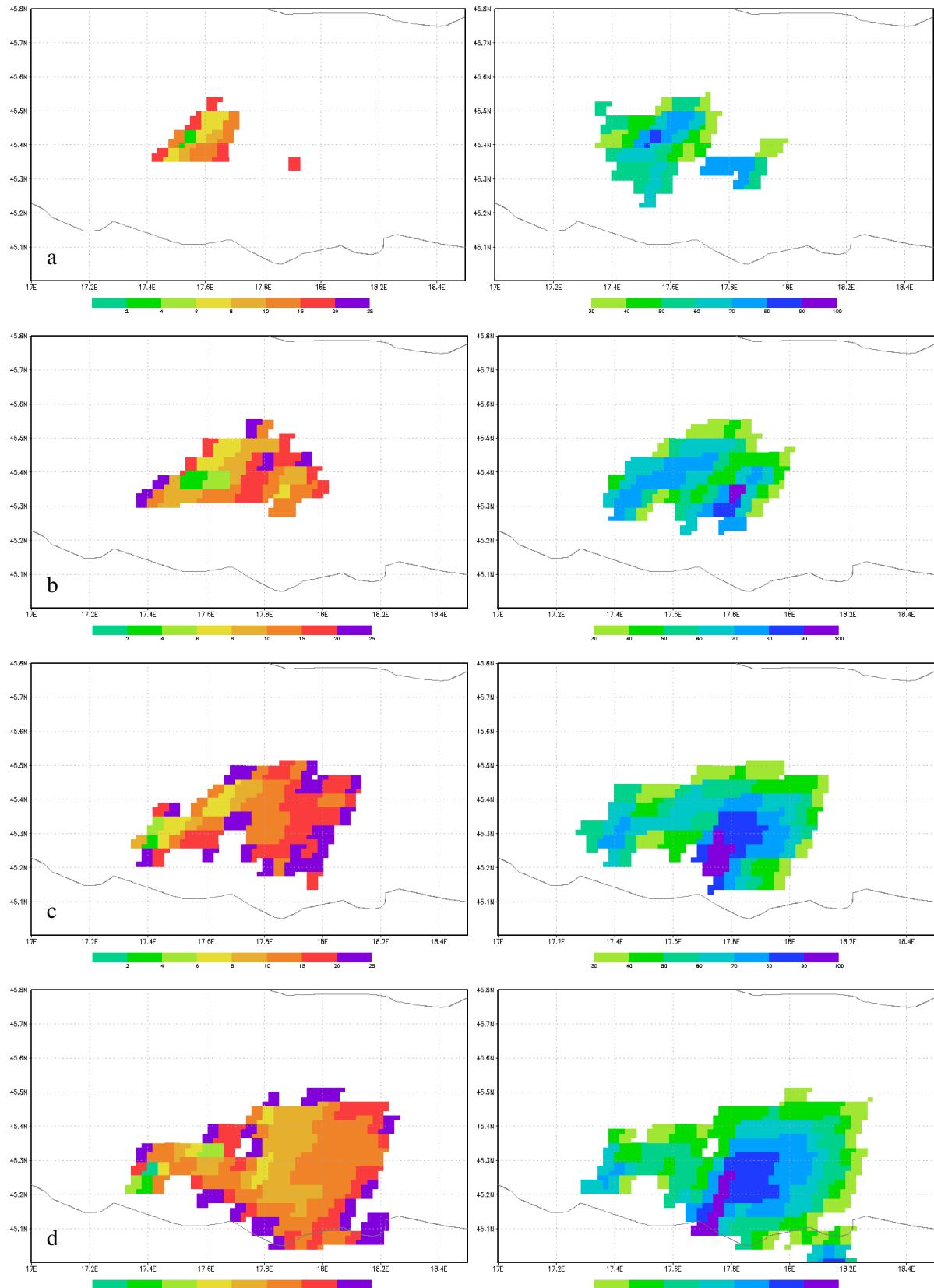
Brojni analizirani primjeri konvektivnog razvoja u različitim fazama, uključujući i one prikazane u predhodnom poglavlju, pokazali su da su najzanimljiviji iznosi razlike refleksivnosti kanala 0.6 i 3.9 μm oni između 70 i 90%. Čini se da su te vrijednosti povezane s najaktivnijim dijelovima oblaka. Stoga ćemo malo detaljnije pojedinačno promotriti kanale 0.6 i 3.9 μm kako bismo utvrdili od kojih pojedinačnih vrijednosti potječe spomenute vrijednosti njihove razlike. Refleksivnost u kanalu 3.9 μm na sljedećim će slikama biti prikazana samo za one piksele u kojima je temperatura u kanalu 10.8 μm niža od 0°C. Na taj način postiže se isključivanje oblaka koji nisu konvektivni.

Na slici 2.31 prikazana je konvektivna stanica iznad zapadne Slavonije, iz primjera 1. Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm prikazana je na slici 2.31c. Vidljiva su tri područja u kojima je razlika veća od 70%. U prvom slučaju, koji je na slici predstavljen maksimumom razlike oko 45.3N 17.75E (najistočnija stanica), refleksivnost u kanalu 0.6 μm iznosi između 90% i 100% (Sl. 2.31a). Radi se, dakle, o optički vrlo gustom oblaku. Istodobno je refleksivnost u istoj točki u kanalu 3.9 μm između 8 i 15 % (Sl. 2.31b). To je refleksivnost koja odgovara vrlo malim ledenim kristalima promjera manjeg od 20 μm (kao što se može vidjeti iz slike 2.15). Rezultat je razlika u refleksivnosti između 80 i 90%.



Kao što su pokazali Rosenfeld i Lensky (1998) te Setvak i sur. (2003) općenito vrijedi da vrhovi konvektivnih oblaka, u kojima postoji jaka uzlazna struja, sadrže brojnije male kristaliće leda. Kao mogući razlog, koji dovodi do povećane koncentracije malih kristala leda na vrhu konvektivnog oblaka, Levizzani i Setvak (1996) spominju iznimno jak vertikalni transport, zbog kojeg je vrijeme rasta ledenih kristala jako skraćeno. Drugim riječima, velika refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ može se objasniti jakom uzlaznom strujom koja na vrh oblaka izbacuje sitne kristaliće leda (u ekstremnim slučajevima čak i pothlađene kapljice vode) iz nižih slojeva oblaka. To su ujedno područja najizraženije aktivnosti u oblaku, što se može potvrditi i radarskom slikom na kojoj je očito da je upravo ta konvektivna stanica najintenzivnija, s maksimalnim odrazom iznad 55 dBZ (Sl. 2.31d).

Zanimljivo je primjetiti da se povećane vrijednosti refleksivnosti u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ u ovom slučaju javljaju uglavnom u najistočnijoj konvektivnoj stanici sustava, dok druge dvije, koje također imaju razliku refleksivnosti $>70\%$, pokazuju vrlo malu refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$. To ne vrijedi samo u promatranom terminu, već se pokazuje za čitav tijek razvoja ovog konvektivnog sustava, kao što se može vidjeti iz slike 2.32. Promjenu refleksivnosti na vrhovima konvektivnih oblaka u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ i pojavu povećane refleksivnosti kod pojedinih konvektivnih stanica ili sustava proučavali su npr. Levizzani i Setvak (1996) te Setvak i sur. (1996). Lindsey i sur. (2006) su za područje SAD-a napravili klimatologiju refleksivnosti u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ i pokazali da postoje geografska područja u kojima se javlja veća srednja vrijednost refleksivnosti na vrhovima konvektivnih stanica, ali i da postoje tipovi konvektivnih stanica kod kojih je refleksivnost u prosjeku veća. Tako se pokazalo da vrhovi konvektivnih stanica koje se formiraju iznad planina ili visoravn u prosjeku jače reflektiraju zračenje u području valne duljine $3.9 \mu\text{m}$. Također su povezivanjem s profilima temperature, vjetra i vlage pokazali da se povećana refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ javlja u uvjetima razmjerno suhog atmosferskog graničnog sloja, velikog vertikalnog smicanja vjetra i male udaljenosti od baze oblaka do nivoa smrzavanja. Iz toga se može zaključiti da vrijednosti refleksivnosti u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ mogu dati informaciju o unutrašnjoj strukturi konvektivnog oblaka i uvjetima u kojima je nastao.



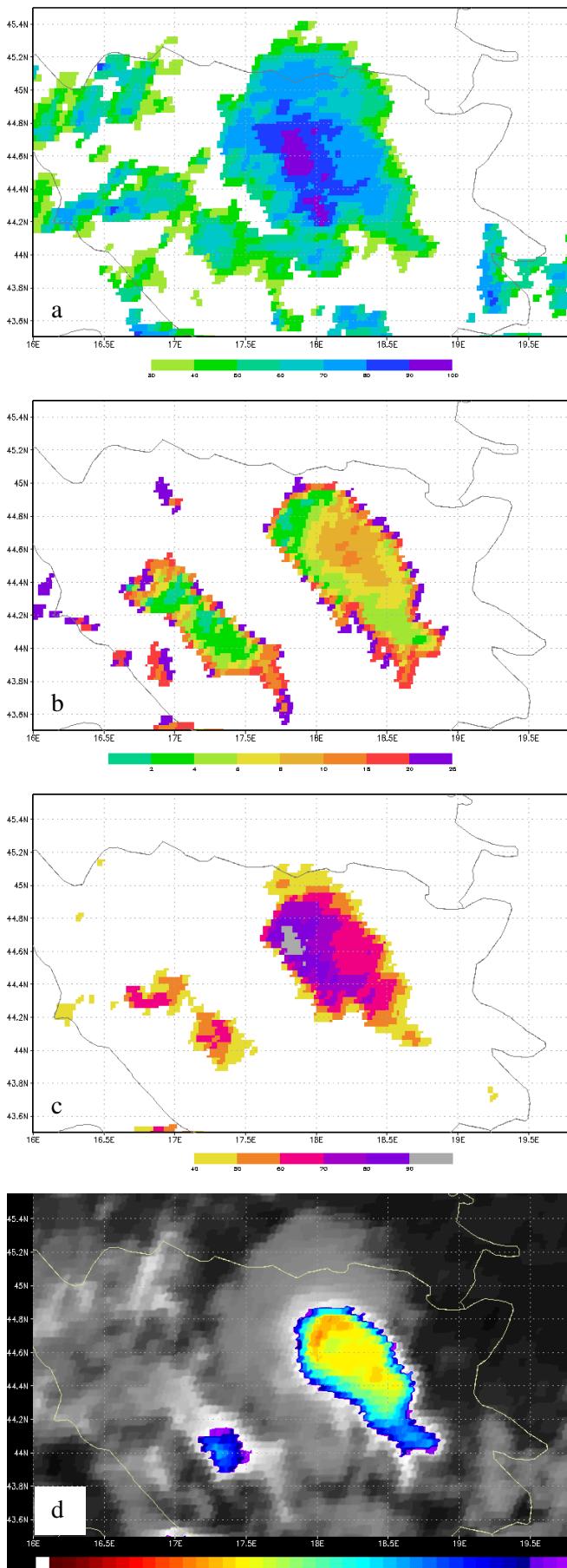
Slika 2.32: Usporedba refleksivnosti u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ (lijevo) i albeda u kanalu $0.6 \mu\text{m}$ (desno) za 20. svibnja 2009. u 1215 (a), 1245 (b), 1315 (c) i 1345 UTC (d). Prikazane su vrijednosti refleksivnosti samo u područjima u kojima je temperatura u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ niža od 0°C .

Ono što se dodatno može vidjeti na slici 2.32 je da mali kristali leda, koji uzrokuju povećanu refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$, opstaju na vrhu konvektivnog oblaka tijekom dužeg vremena. Slično su pokazali i Levizzani i Setvak (1996) spominjući također da u slučaju pojave cirusne perjanice (engl. plume) iznad konvektivnog oblaka, refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ ostaje gotovo konstantna i na velikoj udaljenosti od izvora perjanice. Na slici 2.32 veće vrijednosti refleksivnosti u svim se terminima pojavljuju na sjeveroistočnoj strani u odnosu na područje najvećeg albeda u kanalu $0.6 \mu\text{m}$. S obzirom na to da je strujanje po visini sve do nivoa tropopauze bilo sjeverozapadno (sudeći prema radiosondažnom mjerenu na postaji Zagreb-Maksimir, koje ovdje nije prikazano) ovakav položaj ne može se objasniti širenjem nakonvja konvektivnog oblaka zbog visinskog strujanja.

S obzirom na dosad korištene metode za detekciju konvektivnih oblaka temeljene na podacima u infracrvenom kanalu $10.8 \mu\text{m}$, napraviti ćemo i usporedbu s tim podacima. Na slici 2.31 podaci o temperaturi u infracrvenom kanalu $10.8 \mu\text{m}$ prikazani su na slici (d). Prvo što upada u oči je činjenica da se područje najniže temperature u kanalu $10.8 \mu\text{m}$, koje se nalazi oko $45.35\text{N } 17.9\text{E}$, ne poklapa s područjem najvećeg albeda u kanalu $0.6 \mu\text{m}$, niti s područjem najveće razlike u refleksivnosti između kanala 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$. I jedno i drugo područje nalaze se jugozapadno od najhladnjeg dijela oblaka. No, položaj najhladnjeg dijela oblaka poklapa se s položajem područja većih vrijednosti refleksivnosti u kanalu $3.9 \mu\text{m}$. Najhladniji dio oblaka ima temperaturu oko -60°C , a refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ u tom je području $>10\%$ što bi značilo da je promjer kristalića leda na vrhu manji od $30 \mu\text{m}$.

Drugo područje na slici 2.31 u kojem je razlika refleksivnosti 0.6 - $3.9 \mu\text{m}$ veća od 70% nalazi se oko $45.35\text{N } 17.65\text{E}$. Tu je albedo u kanalu $0.6 \mu\text{m}$ između 70 i 80% . Međutim, albedo u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ je vrlo mali, tek između 4 i 6% pa je razlika refleksivnosti zapravo približno jednaka albedu u kanalu $0.6 \mu\text{m}$. Ovako mala refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ ukazuje na to da se na vrhu oblaka nalaze veliki kristali leda (kao što se može zaključiti iz slike 2.15), koji apsorbiraju veliki dio zračenja, čineći reflektiranu komponentu malom. Još jedno takvo područje nalazimo u trećoj konvektivnoj stanici, oko $45.3\text{N } 17.4\text{E}$.

U drugom primjeru (velika konvektivna stanica iz primjera 2.) samo je jedan maksimum razlike kanala 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$, oko $17.8\text{E } 44.7\text{N}$ (Sl. 2.33c). Taj je maksimum u području u kojem je albedo u kanalu $0.6 \mu\text{m}$ veći od 90% (Sl. 2.33a) dok je reflektirana komponenta kanala $3.9 \mu\text{m}$ manja od 4% (Sl. 2.33b).

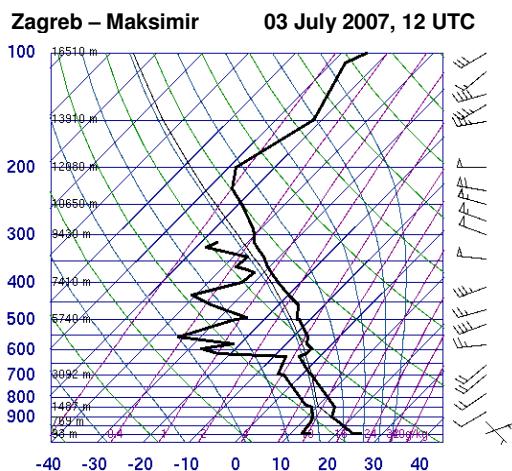


Slika 2.33: Refleksivnost u kanalima $0.6 \mu\text{m}$ (a) i $3.9 \mu\text{m}$ (b) (za piksele u kojima je temperatura u kanalu $10.8 \mu\text{m} < 0^\circ\text{C}$); c) razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ (%); d) temperaturna razlika u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ ($^\circ\text{C}$) za 03. srpnja 2007. u 1330 UTC.

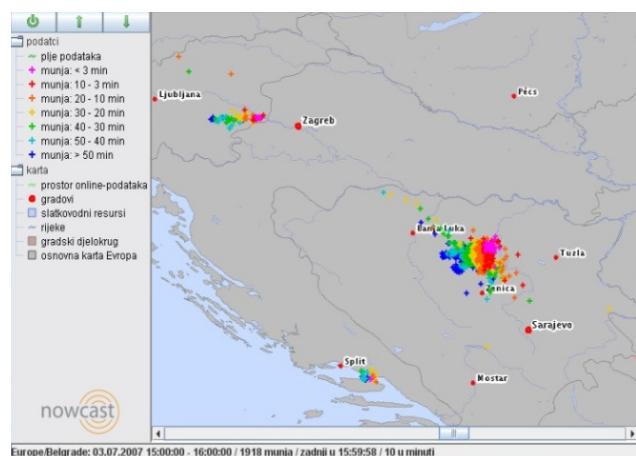
Skala temperature u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ na slici d): od -72°C (crveno) do -33°C (ljubičasto), u intervalima po 1°C .

Refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ i u primjeru na slici 2.33 ima najveće vrijednosti istočnije od područja najveće optičke gustoće. Usporedi li se položaj tog, po svemu sudeći najaktivnijeg dijela oblaka s položajem najhladnjih vrhova u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ ponovno dolazimo do zaključka sličnog onom u prethodnom primjeru: područje najveće razlike refleksivnosti kanala 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ ne poklapa se s područjem najniže temperature, već je pomaknuto prema zapadu i nalazi se na stražnjoj strani konvektivne stanice, gledano u smjeru gibanja. Isto vrijedi i za područje najvećeg albeda u kanalu $0.6 \mu\text{m}$. No, taj pomak se možda može objasniti sljedećim: temperaturni minimum često se nalazi u području „nakovnja“ (engl. anvil) konvektivnog sustava u kojem su oblaci velikim dijelom samo hladni, ali ne i optički gusti. Naime, vrh konvektivnog oblaka dobrim se dijelom sastoji od cirusa koji se rasprostiru niz strujanje. Ti oblaci zbog male optičke gustoće imaju malu refleksivnost u kanalu $0.6 \mu\text{m}$, pa je i razlika između kanala 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ mala. S druge strane i ovdje se, kao i u prethodnom primjeru, položaj područja najveće refleksivnosti u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ vrlo dobro poklapa s najhladnjim dijelom oblaka.

Okolno strujanje u ovom je slučaju do visine oko 7 km bilo jugozapadno, zatim do nivoa tropopauze sjeverozapadno i zapadno, a tek iznad 14 km ponovno zapadno-jugozapadno. To se vidi iz prikaza radiosondažnih mjerena za postaju Zagreb-Maksimir, 3. srpnja 2007 u 12 UTC (Sl. 2.34.). Istodobno, prikaz električnih pražnjenja između 13 i 14 UTC, na slici 2.35, pokazuje da se područje električne aktivnosti u oblaku premješta u smjeru istok-sjeveroistok, dakle u skladu sa strujanjem u nižoj i srednjoj troposferi, obzirom na zagrebačku sondazu.



Slika 2.34: Radiosondažni podaci s postaje Zagreb-Maksimir za 03. srpnja 2007. u 12 UTC.

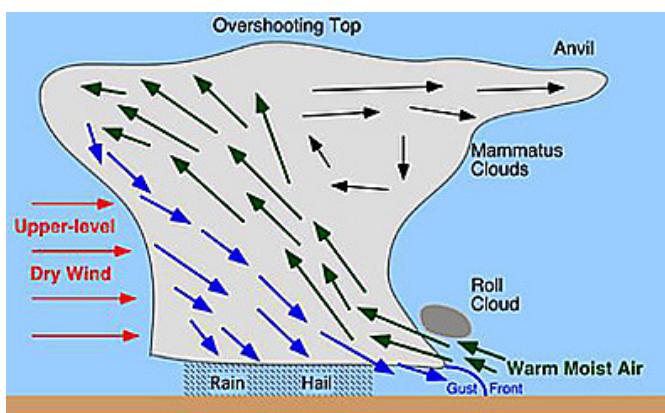


Slika 2.35: Podaci o električnom pražnjenju za 03. srpnja 2007. od 15 do 16 sati po lokalnom vremenu (13 do 14 UTC).

Smjer premještanja aktivnog dijela konvektivne stanice, prema podacima o električnom pražnjenju, bio je od zapada prema istoku. Zanimljivo je, međutim, primjetiti da temperatura u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ pokazuje rasprostiranje najhladnjeg dijela oblaka prema jugoistoku. To se može objasniti strujanjem u višim slojevima atmosfere. Sudeći po podacima zagrebačke radio-sondaže (Sl. 2.34), strujanje je između 9500 i 11000 m bilo sjeverozapadno. Na tim nivoima temperatura je između -45 i -60°C, što odgovara podacima o temperaturi najhladnijih dijelova oblaka na slici 2.33d. Drugim riječima, strujanje je, na visini gdje se nalazio vrh konvektivne stanice, bilo sjeverozapadno. Nakovanj je stoga pokazivao smjer prema jugoistoku, iako se sam aktivni dio oblaka gibao od istoka prema zapadu.

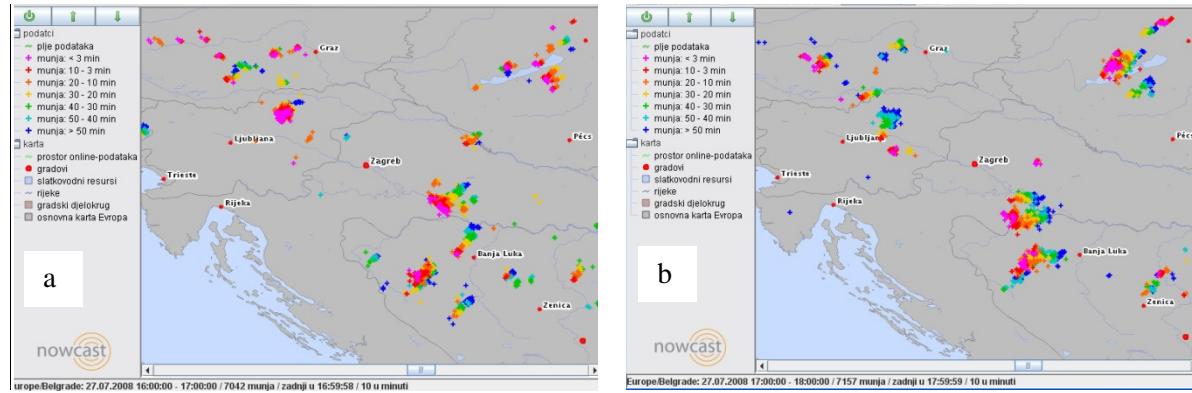
Najhladniji dio oblaka na slici 2.33d ima prstenasti oblik. Pojavljivanje takvog prstenastog (ili U ili V) oblika na vrhu konvektivnog oblaka zabilježeno je u literaturi najprije na NOAA slikama (Heymsfield i sur., 1983a,b ; McCann, 1983), a s pojavom MSG podataka i na slikama s Meteosat satelita. Setvak i sur. (2008) pokazuju da se pojava i dulje zadržavanje ovih struktura na vrhu konvektivne stanice može smatrati pokazateljem njenog intenziteta te da je u takvim situacijama velika vjerojatnost pojave ekstremnih vremenskih prilika. Istraživanje povezanosti struktura uočenih na vrhovima konvektivnih sustava s pojavama na tlu je u tijeku.

U obje prethodne situacije uočeno je da se područje najveće razlike refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ nalazi iza najhladnjeg dijela oblaka, gledano u smjeru strujanja. To je, čini se, slučaj kod velikog broja konvektivnih situacija. Naime, u nekim se istraživanjima (npr. Mikuš, 2010) pokazalo da se konvektivne stanice u našim predjelima često razvijaju u jugozapadnoj ili zapadnoj struci, gdje im je smjer premještanja isti kao visinsko strujanje. Takav razvoj odgovara uvriježenoj slici konvektivne stanice kakva je prikazana na slici 2.36.



Slika 2.36: Shematski prikaz konvektivne stanice. Nakovanj (engl. anvil) se širi u smjeru strujanja dok se aktivni dio oblaka, onaj s uzlaznom strujom, nalazi na stražnjoj strani i u području najhladnjeg dijela (engl. overshooting top) oblaka (izvor: internet).

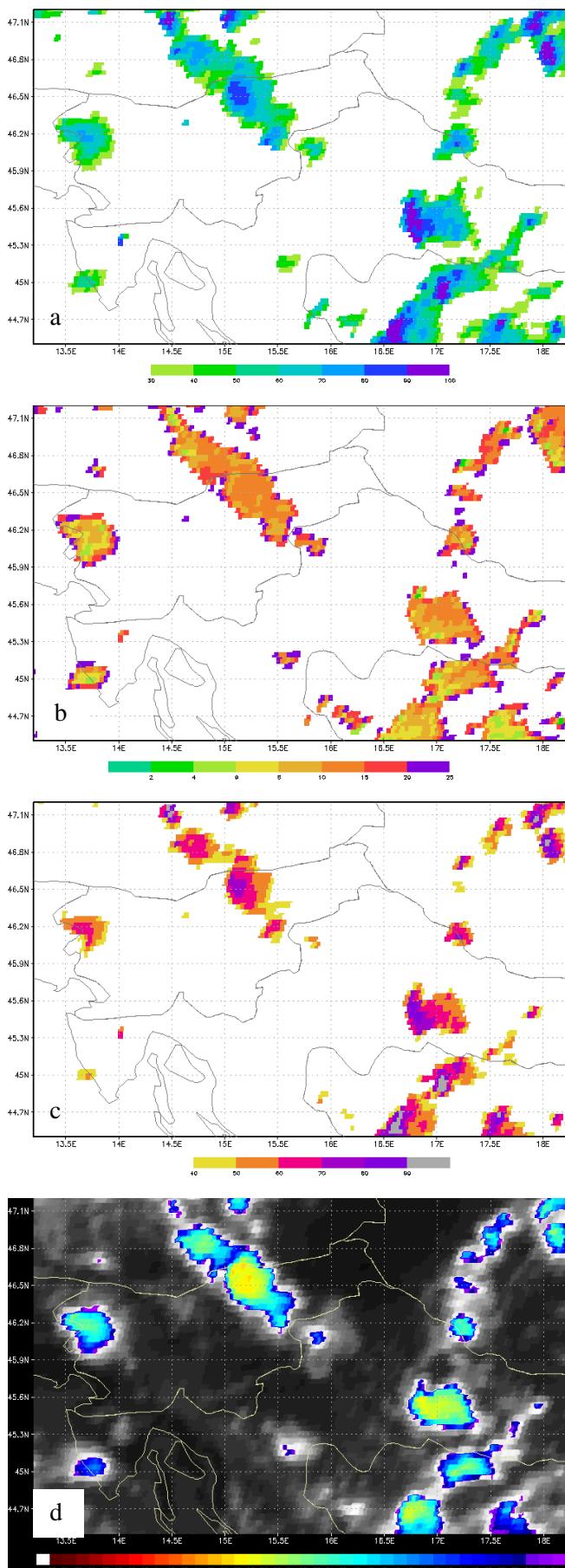
Postavlja se pitanje što se događa kod konvektivnih stanica koje se gibaju u sjeveroistočnoj struci. Za primjer je dana situacija 27. srpnja 2008. Strujanje iznad područja srednje Europe je sjeveroistočno i sjeverno, zbog utjecaja ciklone iznad jugoistočne Europe. Smjer premještanja konvektivnih stanica vidljiv je iz prikaza električnih pražnjenja na slici 2.37.



Slika 2.37: Podaci o električnom pražnjenju za 27. srpnja 2008. od 14 do 15 (a) te od 15 do 16 UTC (b).

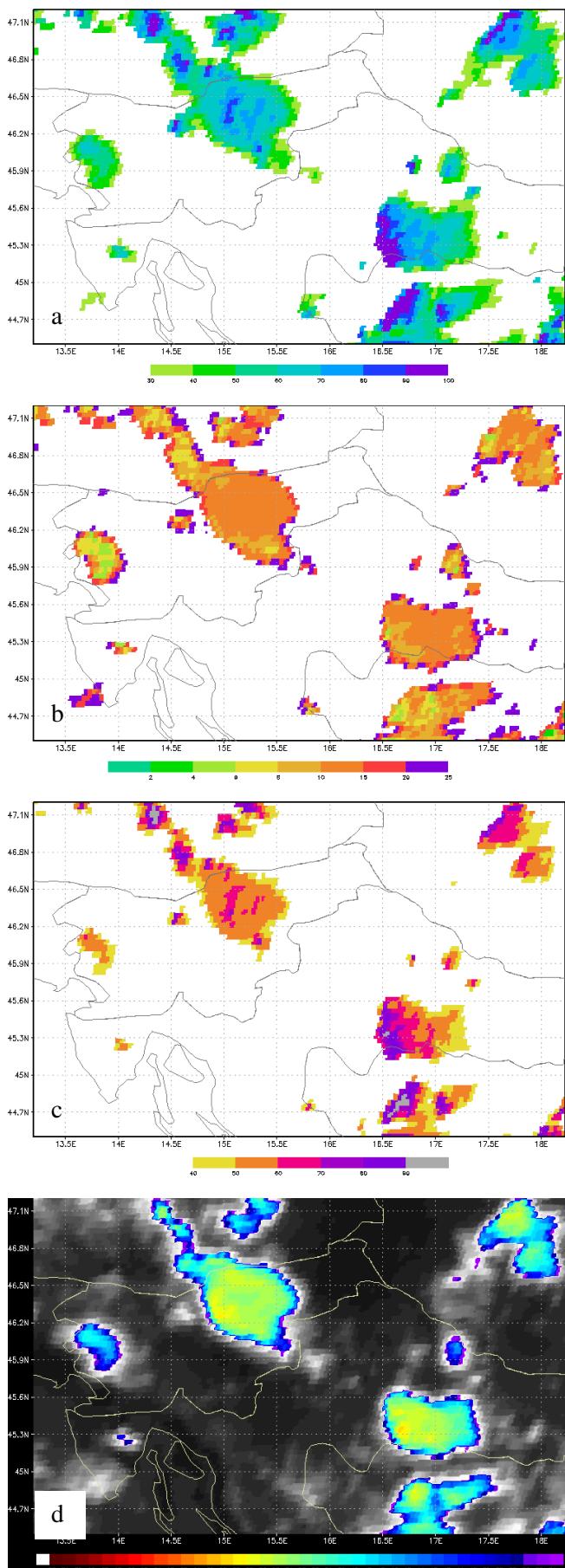
Promatrat ćemo konvektivnu stanicu jugoistočno od Zagreba. U terminu 1445 UTC područje najvećeg albeda u kanalu $0.6 \mu\text{m}$ nalazi se oko $45.5\text{N } 16.75\text{E}$ (Sl. 2.38a). To se poklapa s položajem najveće razlike u refleksivnosti u kanalima $0.6\text{-}3.9 \mu\text{m}$ (Sl. 2.38c). Refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ na tom je području između 6 i 10% (Sl. 2.38 b), što odgovara razmjerno velikim ledenim kristalima na vrhu oblaka. Ono što se u ovom slučaju razlikuje, u odnosu na slučaj kad se konvektivna stanica giba prema istoku, sjeveroistoku ili jugoistoku, je položaj najhladnjeg dijela oblaka. Naime, sudeći po prikazu vrijednosti temperature u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ na slici 2.38d, najhladniji dio oblaka poklapa se i s područjem najvećeg albeda u kanalu $0.6 \mu\text{m}$ i s područjem najveće razlike refleksivnosti te se nalazi u području manjih vrijednosti refleksivnosti u kanalu $3.9 \mu\text{m}$. Doduše, i ovdje se može primjetiti da se područje najveće razlike refleksivnosti nalazi zapadnije od najhladnjeg dijela oblaka, ali je taj pomak bitno manji nego u prethodnim primjerima.

Nešto je veća razlika u sljedećem promatranom terminu, u 15:30 UTC (Sl. 2.39). Ovdje je položaj područja s najvećom razlikom refleksivnosti također zapadnije od najhladnjeg dijela oblaka dok se taj najhladniji dio oblaka poklapa s optički najgušćim područjem u oblaku kao i s područjem manjih vrijednosti refleksivnosti u kanalu $3.9 \mu\text{m}$.



Slika 2.38: Refleksivnost u kanalima $0.6 \mu\text{m}$ (a) i $3.9 \mu\text{m}$ (b) (za piksele u kojima je temperatura u kanalu $10.8 \mu\text{m} < 0^\circ\text{C}$); c) razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ (%); d) temperatuta u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ ($^\circ\text{C}$) za 27. srpnja 2008. u 1445 UTC.

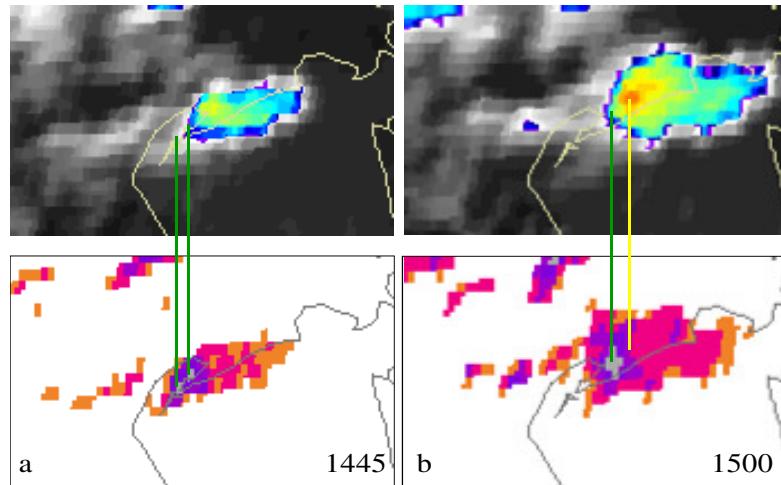
Pokazuje se da se područje najveće razlike refleksivnosti nalazi na jugozapadnom rubu oblaka, bez obzira na smjer gibanja sustava.



Slika 2.39: Refleksivnost u kanalima $0.6 \mu\text{m}$ (a) i $3.9 \mu\text{m}$ (b) (za piksele u kojima je temperatura u kanalu $10.8 \mu\text{m} < 0^\circ\text{C}$); c) razlika refleksivnosti u kanalima $0.6\text{-}3.9 \mu\text{m}$ (c) i temperatura u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ (d) za 27. srpnja 2008. u 1530 UTC.

Skala temperature u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ na slici (d): od -72°C (crveno) do -33°C (ljubičasto), u intervalima po 1°C .

Na slici 2.40 dan je još jedan primjer u kojem se vidi da se područje najveće razlike refleksivnosti nalazi jugozapadno od područja najniže temperature. U ovom slučaju najveće razlike reflektiranih komponenti kanala 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ nalaze se na stražnjoj strani konvektivne stanice, gledano u smjeru gibanja oblaka.



Slika 2.40: Temperatura vrhova oblaka u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ (gore) te razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ (dolje) za 07. srpnja 2008. u 1445 (a) i 1500 UTC (b). Zelene linije povezuju piksele s najvećom razlikom refleksivnosti na donjoj slici s istim pikselima na gornjoj slici. Žuta linija povezuje piksel s najnižom temperaturom na gornjoj slici s istim pikselom na donjoj. Vidi se da je područje najveće razlike refleksivnosti kanala 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ pomaknuto je na jugozapad u odnosu na najhladniji dio oblaka.

Iz prethodnih prikaza refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$, njihove razlike i usporedbe s temperaturom vrhova oblaka vidljivo je da je položaj najhladnjeg dijela oblaka u odnosu na položaj područja u kojem je najveća razlika refleksivnosti uvijek pomaknut na sjeveroistok, neovisno o smjeru strujanja i smjeru premještanja oblaka. To predstavlja problem u interpretaciji ovih karakteristika. Usmenom diskusijom s dr.sc. Martinom Setvakom došla sam do zaključka da je razlog ovim razlikama u položaju pojedinih maksimuma zapravo uzrokovani kutom upada Sunčevog zračenja i temperaturom najhladnijih vrhova. Objasnit ću pobliže: refleksivnost oblaka u kanalu $0.6 \mu\text{m}$ uvijek je veća s one strane na koju stiže direktno Sunčeve zračenje od one koja je u sjeni. Prikazani primjeri uglavnom pokazuju termini u rano poslijepodne što je velikim dijelom razlog smještaja područja najvećeg albeda u tom kanalu upravo na zapadnoj, odnosno jugozapadnoj strani konvektivne stanice. Razlika je samo u primjeru na slici 2.33 gdje se, zbog činjenice da se radi o velikom konvektivnom sustavu, područje najvećeg albeda nalazi otprilike u sredini sustava.

Što se tiče kanala 3.9 μm situacija je nešto komplikiranija. Ovdje pak valja imati na umu način izračunavanja reflektirane komponente zračenja, koja se temelji na temperaturi u kanalu 10.8 μm . Ako pogledamo relacije (5) i (6) možemo zaključiti da će, čak i ako pretpostavimo da je „stvarna“ refleksivnost u kanalu 3.9 μm homogena za cijelo područje vrha oblaka, za one piksele u kojima je najniža temperatura, termička komponenta zračenja u kanalu 3.9 μm biti vrlo mala pa će reflektirana komponenta biti veća. Upravo zbog toga se područje najnižih temperatura poklapa s područjem veće refleksivnosti.

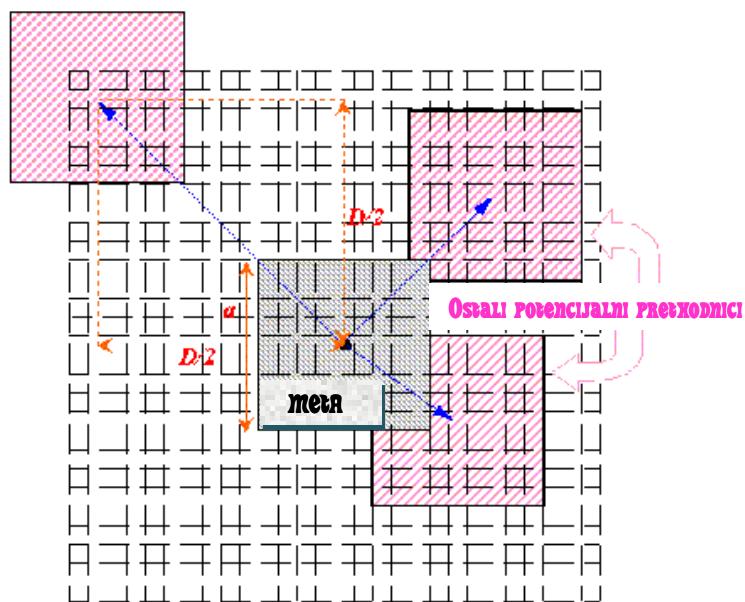
Temeljem svega navedenog, može se zaključiti da područja u kojima je razlika kanala 0.6 i 3.9 μm između 60 i 80% predstavljaju najaktivniji dio oblaka.

2.5 Praćenje premještanja konvektivnih stanica

U prethodnim poglavljima prikazane su mogućnosti prepoznavanja konvektivnih oblaka i praćenja njihovog razvoja pomoću kombinacije satelitskih slika. Ovdje će se pokazati kako se praćenjem premještanja oblačnih struktura može utvrditi putanja oblaka u prošlosti i prognozirati očekivana putanja u skoroj budućnosti. U literaturi (Kidder i Vonder Haar, 1995) se spominju dvije metode praćenja premještanja oblaka, „ručna“ i automatska. Danas se uglavnom koriste automatske metode. Za računanje vektora premještanja (u engleskoj literaturi susreću se nazivi cloud motion vectors, atmospheric motion vectors), kad su u pitanju satelitski podaci, najčešće se koriste podaci u kanalu 10.8 μm ili kanalu 6.2 μm .

Metoda se temelji na usporedbi dviju satelitskih slika - aktualne i njoj prethodne. Na aktualnoj slici definira se pravilna mreža točaka. Zatim se za svaku točku mreže definira kvadrat oko te točke s određenom duljinom stranica i taj kvadrat predstavlja metu. Postupak je dalje na prethodnoj slici pronaći područje iste veličine koje izgleda slično kao meta. To se radi tako da se na prethodnoj slici na određenoj udaljenosti od točke mreže izdvoji nekoliko kvadratnih područja koji se potencijalno slažu s metom (potencijalni prethodnici) i među njima se odabire onaj najsličniji meti. Središte mete i njoj najsličnijeg prethodnika povezuje vektor premještanja (Sl. 2.41).

Potencijalni prethodnik br. 1

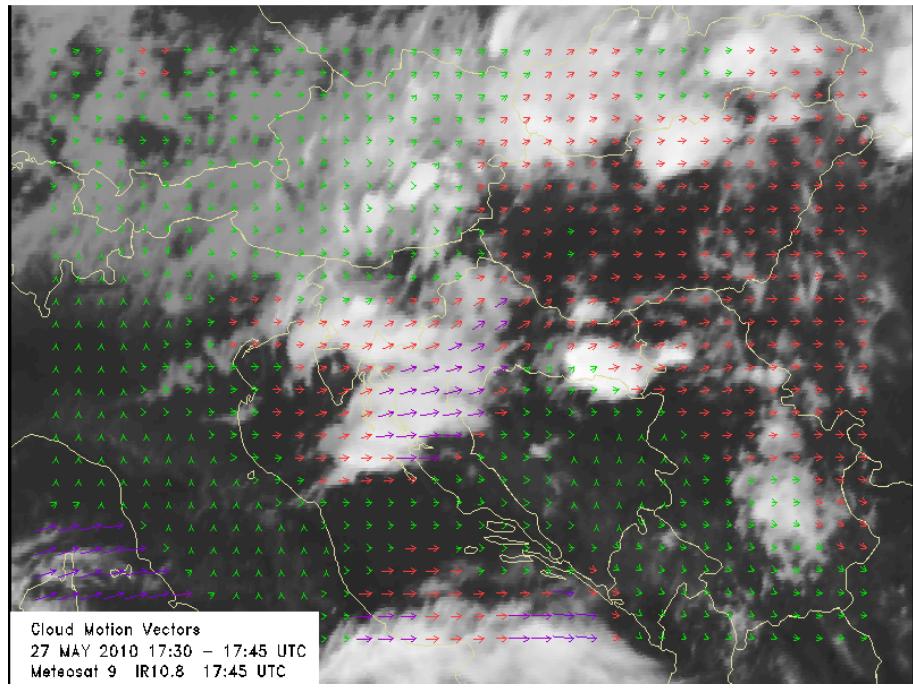


Slika 2.41: Slikovni prikaz metode računanja vektora premještanja oblaka – traženje najsličnijeg prethodnika. Plavi kvadrat označava metu na slici u terminu t , a ružičasti potencijalni prethodnici na slici u terminu $t-\Delta t$. (Autor: A. Jann, ZAMG).

Samo traženje najsličnijeg prethodnika temelji se na tehnici unakrsne korelacije (engl. cross-correlation technique) primjenjenoj na pravokutne mete (Kidder i Vonder Haar, 1995). Polje atmosferskog vjetra odnosno vektora premještanja oblaka prikazuje se na kraju kao pravilno polje u kojem početna i završna točka svakog vektora prikazuju stvarnu početnu (na predhodnoj slici) i završnu točku (na trenutačnoj slici) premještanja svakog promatranog dijela slike.

Metoda za izračunavanje vektora premještanja oblaka, koja se i operativno koristi na DHMZ-u, razvijena je u sklopu projekta „CEI-Nowcasting system“ u vrijeme dok su još korišteni podaci s Meteosat satelita prve generacije. S dolaskom MSG satelita metoda je prilagođena za nove podatke koji imaju bolju prostornu i vremensku razlučivost (Strelec Mahović, 2005).

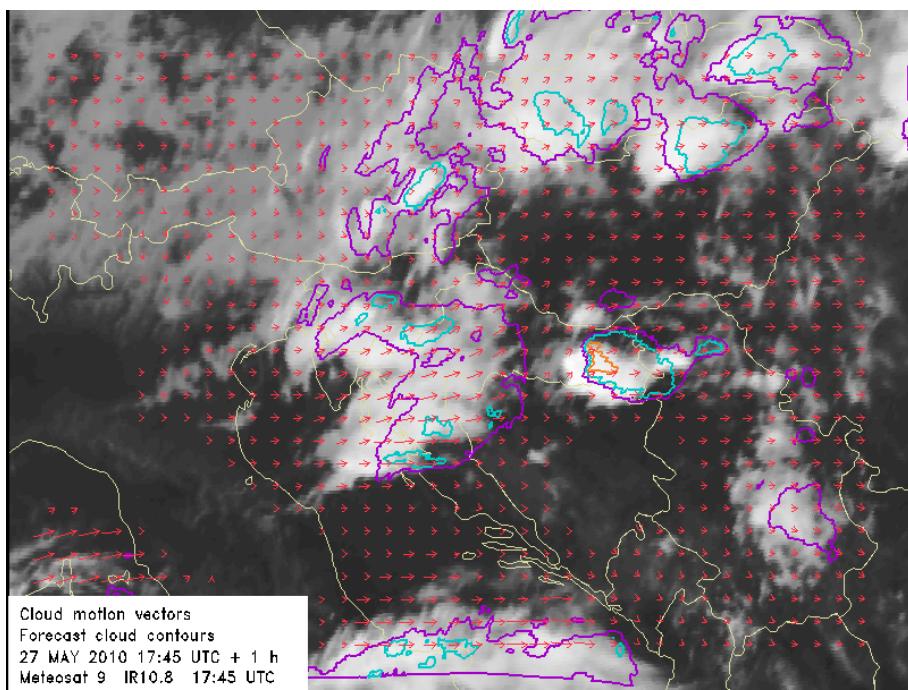
Na slici 2.42 prikazani su vektori premještanja oblaka između 1730 i 1745 UTC, 27. svibnja 2010. Radi jasnijeg prikaza brzine premještanja vektori su obojani različitim bojama za različite intervale brzina.



Slika 2.42: Vektori premještanja oblaka za 27. svibnja 2010. od 1730 do 1745 UTC. Vektori su prikazani u različitim bojama koje označavaju brzine: zeleno ($>10\text{ m/s}$), crveno ($>20\text{ m/s}$) i ljubičasto ($>30\text{ m/s}$).

Kod korištenja satelitskih slika s MSG satelita pojavio se problem što 15-minutni razmak između sukcesivnih slika često za posljedicu ima vrlo male iznose pomaka oblaka pa vektori, u slučaju sporog premještanja oblaka, nisu dovoljno informativni. Zbog toga se u praksi računaju i prognostičke konture oblaka. One predstavljaju prognozu premještanja odnosno ekstrapolaciju područja s određenim vrijednostima piksela. Prognoza se izrađuje samo na osnovu satelitskih slika i izračunatih vektora premještanja oblaka. Najprije se metodom bikubne interpolacije (Akima, 1996) polje vektora premještanja interpolira na razlučivost slike. Za svaki piksel sljedeći se položaj (u vremenu $t+\Delta t$) određuje pomoću vektora premještanja. U sljedećem koraku ($t+2\Delta t$) položaj se ekstrapolira pomoću vektora premještanja s početkom u novoj poziciji. Pritom se pretpostavlja da se polje pomaka, odnosno polje vektora premještanja, ne mijenja. S obzirom na to da je takva pretpostavka valjana samo tijekom kratkog vremena, najčešće se prikazuju konture za $t+1\text{h}$, što u slučaju MSG podataka predstavlja $t+4\Delta t$. Ovakva „prognoza“, izračunata iz vektora premještanja linearnom ekstrapolacijom, prikazuje samo promjene uslijed advekcije, dok efekt razvoja nije uključen.

Primjer operativnog produkta koji prikazuje vektore premještanja oblaka i prognostičke konture oblaka u terminu t+1h dan je na slici 2.43. Različitim bojama označene su izoterme: -33°C (ljubičasta), -42°C (svjetlo plava) i -55°C (narančasta).



Slika 2.43: Primjer vektora premještanja i prognostičkih kontura oblaka za 27. svibnja 2010. u 17:45 UTC. Konture prikazuju očekivani položaj piksela s određenom vrijednošću temperature vrhova nakon 1 sat. Različite boje kontura označuju različite temperature vrhova oblaka: -33°C (ljubičasta), -42°C (svjetlo plava) i -55°C (narančasta).

Praktičnu primjenu metoda prepoznavanja konvektivnih oblaka te računanja njihove brzine i smjera premještanja našla je i u teorijskim razmatranjima mogućnosti praćenja i prognoziranja pojave meteotsunamija. Tako je u radu Belušić i Strelec Mahović (2009) pokazano da je u četiri situacije s najjačim meteotsunamijama u Jadranu u posljednjih 30 godina u području pojave meteotsunamija bio prisutan konvektivni sustav. To je dovelo do pretpostavke da je upravo konvektivni sustav zaslužan za pojavu poremećaja u polju tlaka koji je kao rezultat imao pojavu meteotsunamija. Za dvije situacije, 22. kolovoza 2007., kad je meteotsunami poplavio otok Ist, te 15. kolovoza 2008., kad je zabilježen meteotsunami u Malom Lošinju, na raspolaganju su bili podaci s MSG satelita. Analiza slika u kanalu 10.8 μm pokazala je da se u slučaju meteotsunamija na Istu prema otoku i preko njega premještao

konvektivni sustav, koji je najnižu temperaturu vrhova imao upravo u području iznad otoka i kasnije iznad unutrašnjosti. U slučaju meteotsunamija u Malom Lošinju čitavo područje Istre i Kvarnera bilo je pod utjecajem prostranog mezoskalnog konvektivnog sustava koji je zahvaćao sjeverni Jadran i južni dio Alpa. Analiza konvekcije pomoću razlike refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm dala je jasniju sliku o područjima unutar konvektivnih sustava u kojima je najveći udio ledenih kristala na vrhu oblaka iz čega se pokazalo da su se upravo preko spomenutih mesta premještali najaktivniji dijelovi oblaka.

Proračun brzine premještanja konvektivnih sustava pokazao je da je, u slučaju meteotsunamija u Malom Lošinju, brzina bila približno 22 m/s. Upravo se ta brzina smatra brzinom premještanja sustava koji može uzrokovati meteotsunami, jer je to približna brzina barotropnih valova na otvorenom moru za područje sjevernog Jadrana. U slučaju meteotsunamija na Istu, iz satelitskih podataka dobiven je očekivani smjer premještanja, no izračunata brzina je na području Ista bila nešto veća od 22 m/s. Ipak, kad se uzme u obzir da je i maksimalna brzina širenja dobivena iz barografskih mjerjenja za slučaj meteotsunamija na Istu bila 26 m/s (Šepić i sur., 2009), može se zaključiti da se korištenjem satelitskih slika dobivaju zadovoljavajuće točni podaci.

Vektori premještanja oblaka primjenjeni su i u radu Vilibić i sur. (2010), u kojem se pokazalo da je brzina premještanja frontalnog sustava i pojedinih konvektivnih stanica unutar sustava bila upravo u skladu s teorijski dobivenim vrijednostima za mogući meteotsunami na zapadnoj obali Crnog mora. Tim se radovima pokazalo da bi vektori premještanja oblaka u kombinaciji s detekcijom konvektivnih stanica potencijalno mogli biti upotrebljeni u sustavu za praćenje i eventualno upozoravanje na pojavu meteotsunamija u Jadranu.

2.6 Zaključak

U poglavljju 2 pokazalo se na koji način se satelitski podaci mogu primijeniti u prepoznavanju pojedinih faza razvoja konvektivnih oblaka te koju informaciju o svojstvima oblaka i fizikalnim procesima unutar njih možemo isčitati iz podataka u pojedinim kanalima. Tako se pokazalo da podaci u spektru vodene pare, u kanalima 6.2 i 7.3 μm mogu dati informaciju o stabilnosti, odnosno nestabilnosti atmosfere, slično kao parametri stabilnosti koji se računaju numeričkim modelima za prognozu vremena. Pritom valja imati na umu da

spomenuti indeksi opisuju samo stanju atmosfere, odnosno potencijal za razvoj konvekcije, a da je za razvoj konvekcije potreban i mehanizam, odnosno „okidač“ (engl. trigger), koji će izazvati dizanje zraka.

Kad je riječ o ranom prepoznavanju konvektivnih oblaka, pokazalo se da veliki potencijal ima korištenje slika u infracrvenom dijelu spektra, kod kojih je indikacija konvekcije vezana uz temperaturu vrhova oblaka. No, pokazalo se da je ta metoda u nekim situacijama nedovoljno precizna pa čak i manjkava. Zbog toga je u metodu za detekciju rane faze konvekcije poželjno uključiti solarne kanale od kojih se najvažnijim pokazao kanal 3.9 μm zbog svojstva razlikovanja faze vode u oblaku kao i veličina čestica vrhova oblaka. U tom smislu došlo se do sljedećih zaključaka:

1. Razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm detektira male konvektivne stanice u početnom stupnju razvoja. To vrijedi za situacije razvoja konvekcije u čistom zraku odnosno u uvjetima lijepog vremena. Pokazano je da se signal u razlici refleksivnosti javlja dok je radarski odraz još vrlo slab.
2. Nagla promjena razlike refleksivnosti, s početnih 40 ili 50% na 60 ili 70% nakon 15 minuta, najčešće se može povezati s naglim razvojem konvektivne stanice. Pokazalo se da su upravo to stanice na koje treba obratiti pažnju. Naime porast razlike refleksivnosti može s jedne strane biti uzrokovani naglim porastom gustoće pa time i albeda u kanalu 0.6 μm , ili pak smanjenjem refleksivnosti u kanalu 3.9 μm kao posljedica zaledivanja.
3. Povećanje razlike refleksivnosti iznad 80% više se ne može po iznosu povezati s radarskim odrazom, iako se položaj najveće razlike refleksivnosti i dalje podudara s područjem najjačeg radarskog odraza.
4. Pojava razlike iznad 90% posljedica je jakog zaledivanja na vrhu konvektivne stanice, odnosno pojave velikih ledenih kristala i ukazuje na zreli konvektivni sustav. S druge strane, vrlo male vrijednosti refleksivnosti u kanalu 3.9 μm mogu biti vezane s promjenom temperature vrhova, zbog metode izračuna reflektirane komponente zračenja.

Kad je u pitanju veza između temperature vrhova u kanalu 10.8 μm i refleksivnosti u kanalima 3.9 i 0.6 μm pokazalo se sljedeće:

Područje najvećeg albeda u kanalu 0.6 μm , kao i područje najveće razlike refleksivnosti kanala 0.6 i 3.9 μm , nalaze se jugozapadno od najhladnjeg dijela oblaka. To osobito vrijedi

za oblake koji se razvijaju u zapadnoj ili jugozapadnoj visinskoj struji. Ovo neslaganje područja najniže temperature u obliku s područjem najveće razlike refleksivnosti može se objasniti pojavom velikih ledenih kristala na vrhu oblaka, zbog kojih je vrijednost reflektirane komponente u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ vrlo mala. Istodobno, u području gdje je temperatura vrhova najniža, razlika je nešto manja, što bi moglo značiti da se u tom području na vrhu oblaka nalaze manji kristalići leda kao posljedica vrlo jake uzlazne struje u obliku. Naime, ako je uzlazna struja jaka, ona će na vrh oblaka donositi manje kristale iz nižih slojeva oblaka. To potvrđuje i usporedba položaja najhladnijeg dijela oblaka s položajem najvećih vrijednosti reflektirane komponente kanala $3.9 \mu\text{m}$ iz koje se vidi da se područje najveće refleksivnosti poklapa s hladnim dijelom oblaka.

Kod razmatranja razlike reflektiranih komponenti treba također uzeti u obzir i to da sjena, koju stvaraju vrhovi konvektivnih oblaka koji nadvisuju nakovanj (engl. overshooting tops), može značajno smanjiti reflektiranu komponentu zračenja u kanalu $3.9 \mu\text{m}$, a dodatni efekti zbog kojih postoje pomaci objašnjeni su u poglavljiju 2.4.6.

Na kraju se iz svih prikazanih primjera može zaključiti da je najaktivniji dio oblaka onaj u kojem je razlika refleksivnosti kanala 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ između 60 i 80% . Ako se promatraju dva piksela iste temperature, ali u kojima je radius čestica različit, onda pikseli s manjim radiusom čestica, dakle oni veće refleksivnosti u kanalu $3.9 \mu\text{m}$, predstavljaju opasnije oblake, a također i mlade oblake u kojima je stvoreno manje leda. Na taj način refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$, kao i razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$, omogućuju praćenje razvojnog tijeka konvektivnih oblaka odnosno omogućuju razlikovanje faze razvoja od zrele faze ili faze odumiranja.

Konačno, nakon što smo navedenom metodom prepoznali konvektivni sustav u razvoju, njegovo premještanje možemo pratiti i za kratko vrijeme predvidjeti pomoću vektora atmosferskog gibanja, izračunatih iz podataka u kanalu 10.8 ili u kanalu $6.2 \mu\text{m}$.

3 PREPOZNAVANJE MAGLE I NISKIH OBLAKA

3.1 Uvod

Prema definiciji Svjetske meteorološke organizacije (WMO) magla je raspršenje vrlo sitnih kapljica vode u zraku, koje smanjuje vidljivost na manje od 1 km. Magla je, kao i konvekcija, pojava koju je teško prognozirati, a može imati brojne neželjene društveno-ekonomske posljedice. Često predstavlja veliki problem u cestovnom i zrakoplovnom prometu, a može i bitno promijeniti kvalitetu zraka na nekom području. Oblaci niske baze i smanjena vidljivost čest su uzrok prometnih nesreća na kopnu, moru i u zraku. Temeljem samo prizemnih mjerjenja, prostornu raspodjelu magle i njenu dinamiku gotovo je nemoguće predvidjeti, posebice kad se radi o radijacijskoj magli.

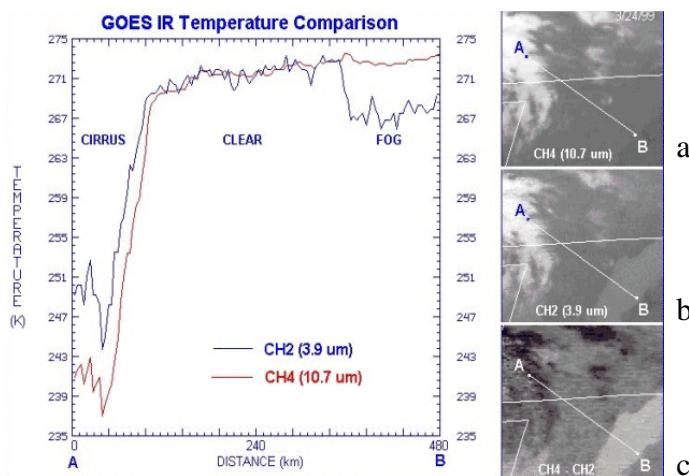
Satelitski podaci svojom vremenskom i prostornom raspodjelom pokrivaju i ona područja na kojima nema konvencionalnih meteoroloških motrena pa se ovdje ispituje mogućnost njihovog korištenja za prepoznavanje magle. Prepoznavanje i praćenje magle pomoći podataka s GOES satelita dugogodišnja je praksa na području Amerike. Iznad Europe, prije pojave MSG satelita, instrumenti na NOAA polarnim satelitima mjerili su u spektralnim područjima koja su omogućavala prepoznavanje magle, ali samo u nekoliko termina tijekom dana. MSG satelit, dobrom prostornom i vremenskom razlučivošću podataka, kao i spektralnim područjima u kojima mjeri, omogućuje sustavno praćenje magle i niskih oblaka i nad našim područjem. U ovom će poglavlju biti prikazane metode prepoznavanja magle i niskih oblaka korištenjem podataka s MSG satelita.

3.2 Prepoznavanje magle noću

Kad se pogledaju pojedinačni kanali u kojima mjeri instrument SEVIRI, pokazuje se da tijekom noći magla može biti prepoznatljiva jedino korištenjem podataka u kanalu $3.9 \mu\text{m}$. Prepoznavanje magle, kao što je navedeno i u poglavlju 2.4.2, ujedno je i glavna primjena tog kanala. Naime, u valnoj duljini $3.9 \mu\text{m}$ Zemljina površina emitira kao crno tijelo, dok je emisivnost vodenih kapljica u magli i niskim oblacima na toj valnoj duljini manja (Bader i sur., 1995). S druge strane, u području valnih duljina oko $11 \mu\text{m}$ niski, neprozirni vodeni

oblaci emitiraju gotovo kao crno tijelo iste temperature, dakle jednako kao Zemljina površina pa su u tom kanalu niski oblaci i magla nevidljivi. Zbog navedenih svojstava kanala $10.8 \mu\text{m}$ i $3.9 \mu\text{m}$ produkti za prepoznavanje magle tijekom noći uglavnom se temelje na razlici tih dvaju kanala. Manja emisivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ znači ujedno i nižu temperaturu u promatranom području, u odnosu na temperaturu u kanalu $10.8 \mu\text{m}$. Naime, temperatura u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ računa se također pomoću (1) i (2) iz poglavlja 2.2.1, uz korištenje vrijednosti ν_c , A i B za kanal $3.9 \mu\text{m}$ iz tablice 1.1. Pritom se pretpostavlja da su svi objekti koji zrače crna tijela pa se zbog toga manje zračenje u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ prikazuje kao zračenje tijela niže temperature.

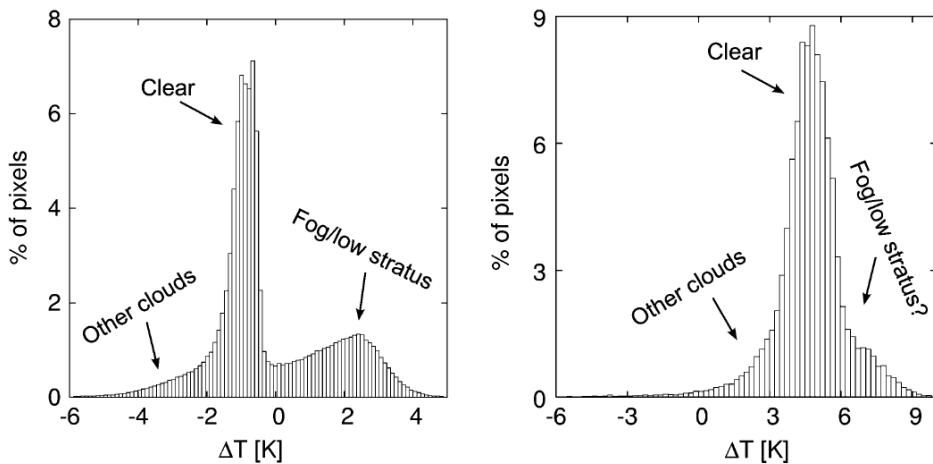
Razlika temperature u kanalima 10.7 i $3.9 \mu\text{m}$ GOES satelita prikazana je na slici 3.1. Uočava se da je u onom dijelu presjeka AB u kojem postoji magla temperatura u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ zamjetno niža od one u kanalu $10.7 \mu\text{m}$. Za usporedbu su s desne strane prikazane slike u kanalima $10.7 \mu\text{m}$ (a), $3.9 \mu\text{m}$ (b) i njihova razlika (c). U kanalu $10.7 \mu\text{m}$ magla nije prepoznatljiva jer je njena temperatura istovjetna temperaturi okolnog tla, a upravo razlika kanala 10.7 i $3.9 \mu\text{m}$ daje najjasniji prikaz magle.



Slika 3.1: Usporedba temperature u kanalima 10.7 i $3.9 \mu\text{m}$ na GOES satelitu za područja s cirusima (lijevi dio grafikona), bez oblaka (sredina) i s maglom (desno). Desno od grafikona: satelitske slike u kanalu $10.7 \mu\text{m}$ (a), $3.9 \mu\text{m}$ (b) i prikaz razlike kanala 10.7 - $3.9 \mu\text{m}$ (c) (Ellrod, 2007).

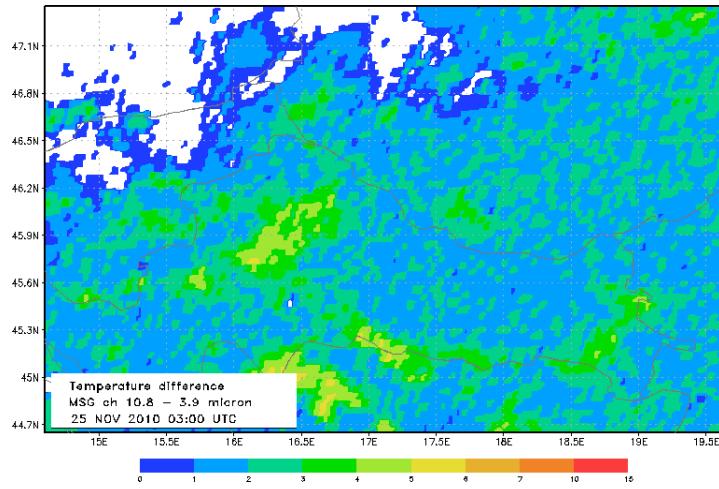
Cermak i Bendix (2007) su pokazali da se magla i niski oblaci vrlo dobro ističu u razlici kanala 10.8 i $3.9 \mu\text{m}$ u MODIS podacima dok je u SEVIRI podacima razlikovanje

magle i niskih oblaka nešto složenije. Kao razlog tome autori navode veću širinu kanala 3.9 μm SEVIRI-a, zbog čega je zračenje u tom kanalu djelomično pod utjecajem apsorpcijske vrpce CO_2 . Slikoviti prikaz razlike između dva instrumenta dan je na slici 3.2, preuzetoj iz Cermak i Bendix (2007).

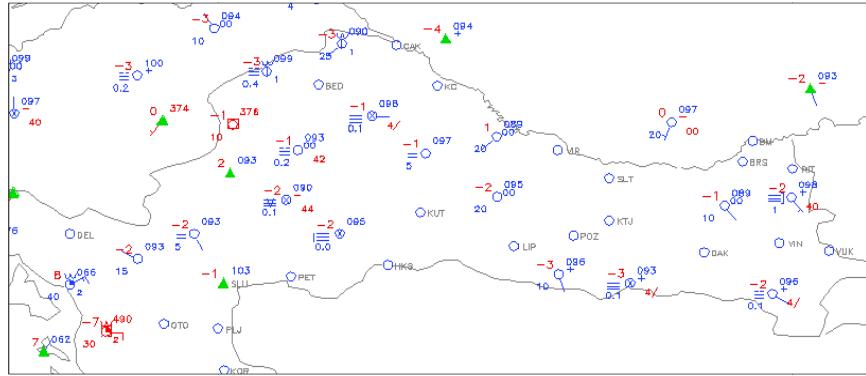


Slika 3.2: Raspodjela broja piksela u ovisnosti o razlici temperature (ΔT) u kanalima 10.8 - 3.9 μm za instrument MODIS, 10.02.2006. u 2250 UTC te za instrument SEVIRI, 10.02.2006. u 2245 UTC, za isto geografsko područje (Cermak i Bendix, 2007).

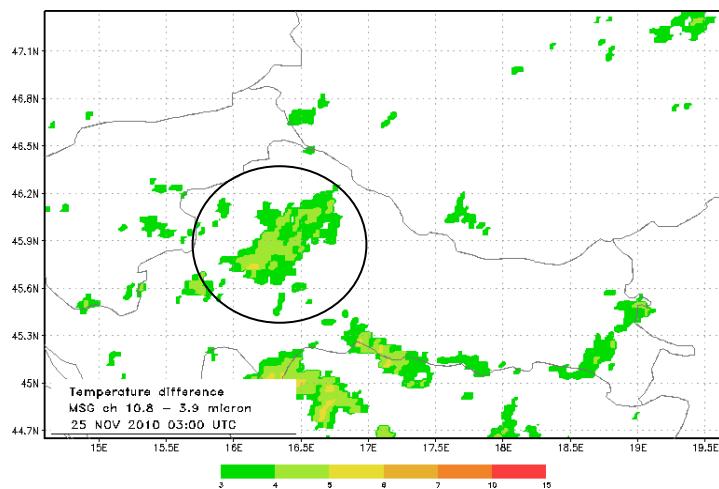
Problem kod promatranja magle sa satelita je u tome što instrument na satelitu ne „vidi“ da li se radi o magli pri tlu, koja doista smanjuje vidljivost, ili o izdignutoj magli, odnosno niskom oblaku. Stoga pomoću razlike kanala 10.8 i 3.9 μm maglu i niske oblake prepoznajemo kao jednu kategoriju. Na slici 3.3 prikazana je razlika kanala 10.8 - 3.9 μm za 25. studenog 2010. u 03 UTC. Vrijednosti razlike prikazane su različitim bojama počevši od 0 K. Za usporedbu, na slici 3.4 prikazani su podaci sinop motrenja. Magla je u sinop podacima označena kao tri paralelne horizontalne linije lijevo od oznake postaje. Prema tim podacima magla je zabilježena na većini postaja u središnjoj Hrvatskoj. Usporedba satelitskih podataka i sinop motrenja pokazuje da se kao granična vrijednost za vjerojatnost postojanja magle/niskih oblaka može uzeti minimalna razlika između kanala 10.8 i 3.9 μm u iznosu od 3 K. Usporedimo li to sa grafikonom na slici 3.2. vidjet ćemo da je taj kriterij dosta niži od onoga koji su pretpostavili Cermak i Bendix (2007). Međutim, kad bismo kao kriterij za maglu uzeli vrijednost razlike 6 K, kako sugerira slika 3.2, većina područja s maglom ostala bi neprepoznata.



Slika 3.3: Razlika temperature u kanalima 10.8 i 3.9 μm za 25. studenog 2010. u 03 UTC. Obojana su područja u kojima je razlika $\Delta T = T_{10.8} - T_{3.9} > 0$.

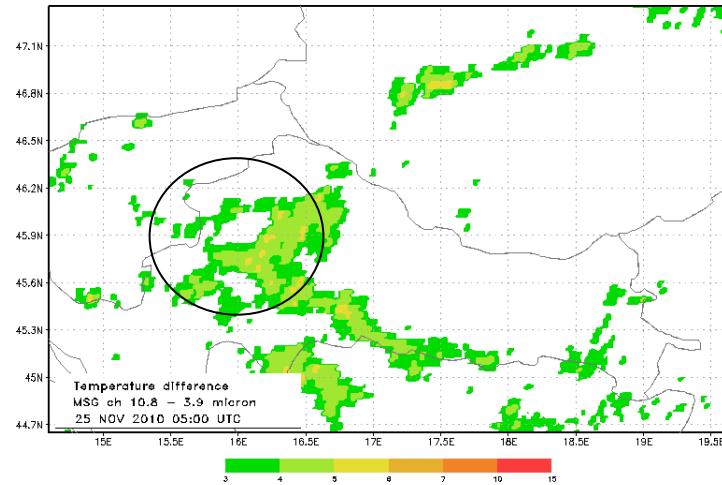


Slika 3.4: Isječak sinoptičke karte za područje središnje i istočne Hrvatske za 25. studenog 2010. u 03 UTC. Magla i sumaglica motrene su u područjima u kojima je razlika temperature kanala 10.8 i 3.9 μm bila $\geq 3\text{K}$.

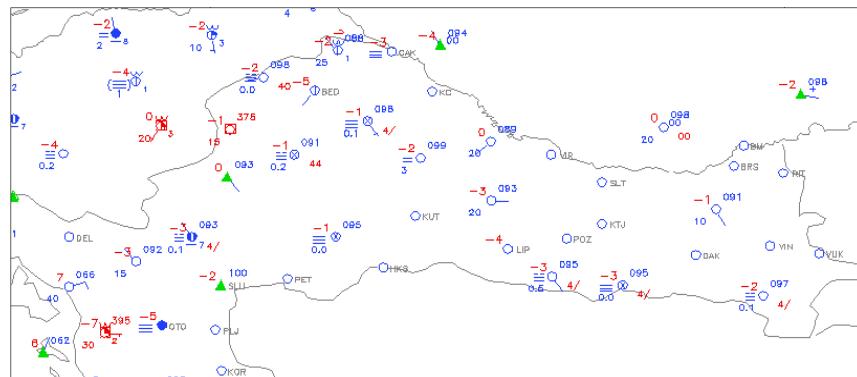


Slika 3.5: Razlika temperature u kanalima 10.8 i 3.9 μm za 25. studenog 2010. u 03 UTC. Obojana su područja u kojima je vjerojatna pojava magle odnosno niskih oblaka ($\Delta T \geq 3\text{K}$).

Na slici 3.5 prikazani su isti podaci kao i na slici 3.3, ali samo za područja u kojim je razlika između temperature u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ i one u kanalu $3.9 \mu\text{m} \geq 3\text{K}$. Vidljivo je da se ta područja poklapaju s područjima u kojima je magla zabilježena u sinop motrenjima (Sl.3.4).



Slika 3.6: Razlika temperature u kanalima 10.8 i $3.9 \mu\text{m}$ za 25. studenog 2010. u 05 UTC. Obojana su područja u kojima je vjerojatna pojava magle odnosno niskih oblaka ($\Delta T \geq 3\text{K}$). Vidljivo je da se područje pod maglom proširilo u odnosu na sliku 3.5. Zanimljivo je primetiti područje Zagrebačke gore „uokvireno“ maglom.



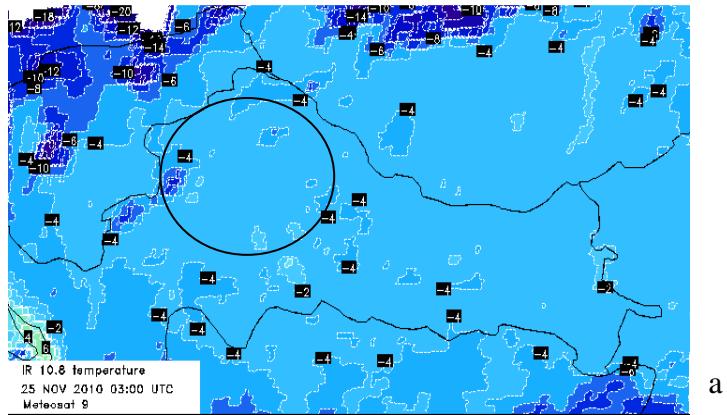
Slika 3.7: Isječak sinoptičke karte Hrvatske za područje središnje i istočne Hrvatske za 25. studenog 2010. u 05 UTC. Motrenje potvrđuje da se u području oko Zagrebačke gore radi o magli, a ne o stratusu. Na postaji Puntijarka je vedro, magla je u sloju ispod 1000 m.

Pomoć kod razlikovanja magle pruža i niz sukcesivnih satelitskih slika jer je magla uglavnom stacionarna i, za razliku od oblaka, na nizu slika neće se primjećivati njeno gibanje već samo nastajanje ili nestajanje. Tako u promatranoj situaciji, u terminu 05 UTC (Sl. 3.6)

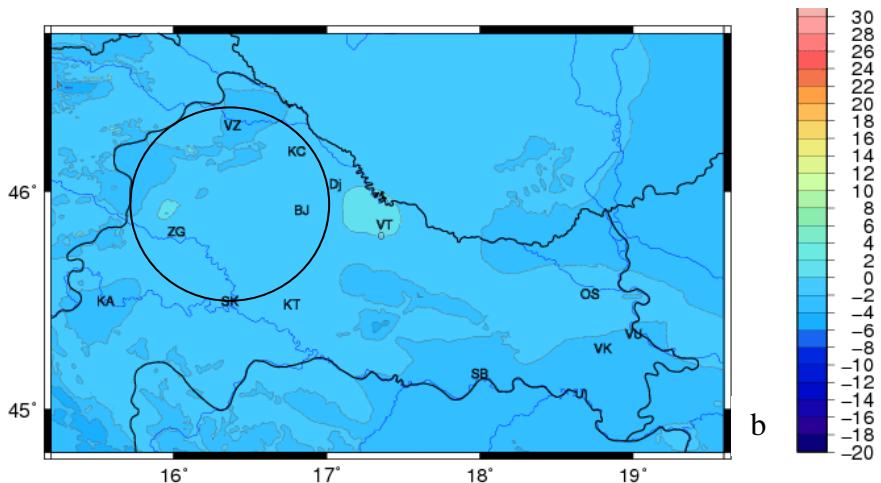
vidimo da se područje pod maglom proširilo. To potvrđuju i podaci motrenja na slici 3.7. Na slici 3.6 zanimljivo je primjetiti i kako se u području sjeverozapadne Hrvatske magla obavila oko Zagrebačke gore, što potvrđuje da se radi o magli a ne o stratusu.

S obzirom na činjenicu da instrument na satelitu vidi samo vrh oblaka, a ne i njegovu bazu, magla i niski oblaci, osobito tipa stratus, u podacima sa satelita izgledaju podjednako i nije ih moguće razlikovati. Zbog toga je potrebno uvesti dodatan kriterij. U praksi se pokazalo da dodatnu informaciju može dati kriterij koji se temelji na mjerelim podacima temperature zraka. Ako je razlika između temperature u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ i prizemne temperature izmjerene na postajama manja od 4 K ($T(10.8\mu\text{m}) - T(2\text{m}) \leq 4\text{K}$), u području gdje je na satelitskim slikama prepoznata magla/stratus, tada je velika vjerojatnost da se radi o magli. Problem je, međutim, činjenica da je mreža postaja na kojima se mjeri temperatura suviše rijetka da bi se usporedba mogla napraviti na svim područjima na kojima je pomoću razlike temperature u kanalima 10.8 i $3.9 \mu\text{m}$ detektirana magla/stratus.

U tu svrhu ovdje je uspoređena temperatura u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ s temperaturom na 2 m dobivenom iz sustava INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis). Taj sustav, razvijen u Austrijskoj meteo službi objedinjuje sva konvencionalna mjerena (sinoptičke, automatske postaje) i interpolira ih na mrežu rezolucije $1 \times 1 \text{ km}$ korištenjem numeričkog modela za prognozu vremena Aladin (Haiden i sur., 2010). Slika 3.8 pokazuje da se temperatura na 2 m iz INCA sustava od satelitske temperature razlikuje za oko 2°C u predjelima gdje nema oblaka. Naime, u predjelima gdje postoje oblaci oni u satelitskim podacima imaju znatno nižu temperaturu od temperature izmjerene na postaji. To je na slici 3.8a slučaj u gornjem lijevom kutu, u kojem je temperatura u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ između -6 i -20°C dok je u istom području na slici 3.8b temperatura na 2 m između 0 i -4°C . S druge strane, u području omeđenom crnom kružnicom, u kojem je na slikama 3.4 i 3.5 motrena ili prepoznata magla, temperatura u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ slična je onoj pri tlu. Vrijednosti koje se u zaokruženom području mogu vidjeti na satelitskoj slici (Sl. 3.8a) su između -2 i -6°C dok su vrijednosti prizemne temperature iz sustava INCA (Sl. 3.8b) između 0 i -4°C . Razlika temperature u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ i temperature pri tlu je tako $\leq 4\text{K}$ pa možemo zaključiti da se na području središnje Hrvatske, u predjelima gdje je razlika kanala pokazivala indikaciju za postojanje magle/niskih oblaka, radilo o magli, što je u suglasju i sa sinop motrenjima. Izrada automatske metode koja bi se temeljila na ovim teorijskim postavkama i iskustvenim činjenicama bit će tema nekog sljedećeg istraživanja.



a

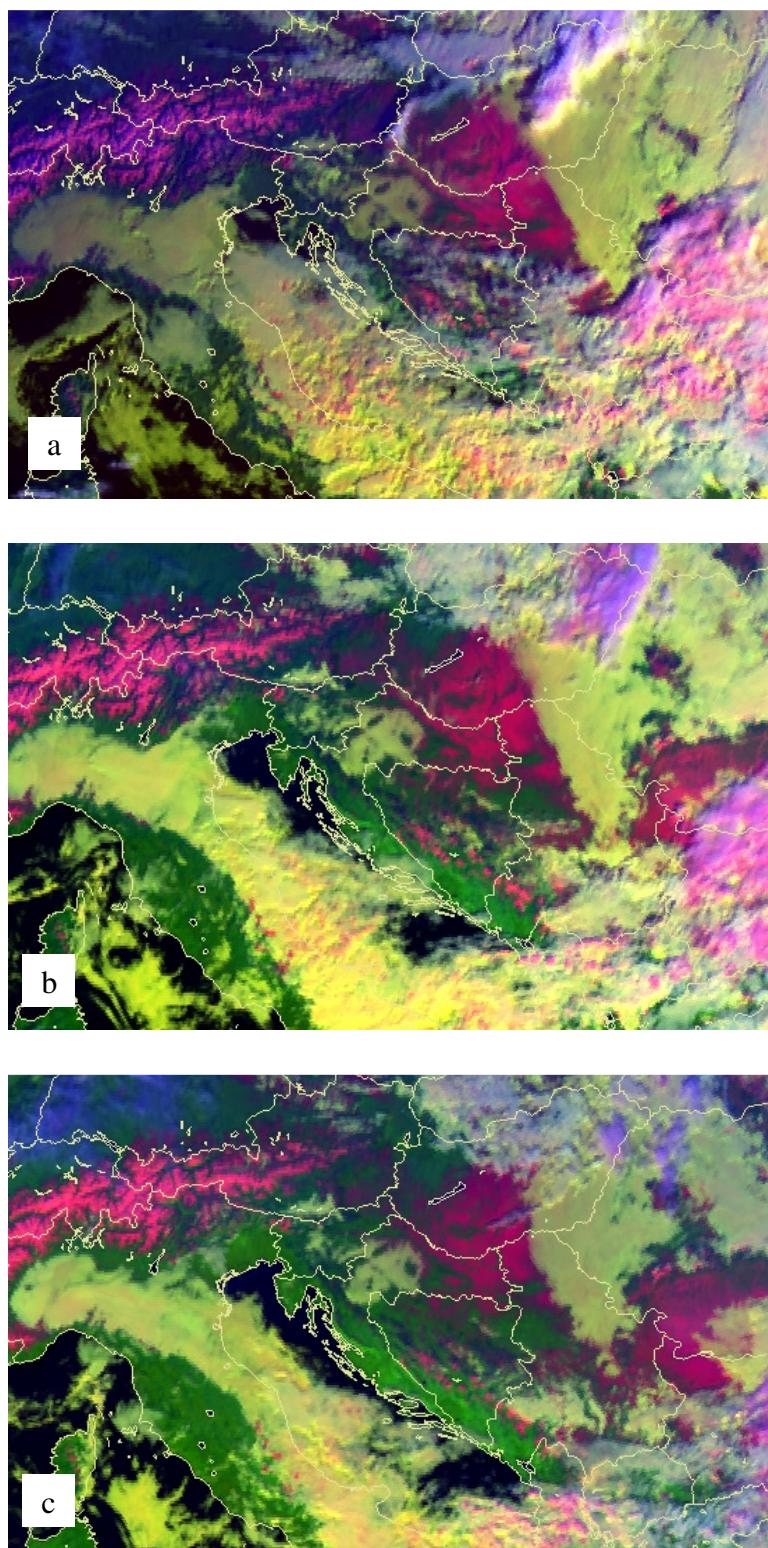


b

Slika 3.8: Usporedba temperature u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ (a) i temperature iz sustava INCA (b) za područje središnje i istočne Hrvatske za 25.studenog 2010. u 03 UTC. Skala temperature odgovarajuća je za obje slike.

3.3 Prepoznavanje magle danju

Za razliku od noći, danju se u algoritam za detekciju magle mogu uvrstiti i solarni kanali. Naime, u infracrvenim kanalima temperatura na vrhu sloja niskog oblaka ne razlikuje se mnogo od temperature tla, kao što smo vidjeli i u prethodnom poglavlju, pa je na slikama u infracrvenom dijelu spektra gotovo nemoguće razlikovati maglu od tla. Međutim, u solarnim kanalima do izražaja dolazi razmjerno veliki albedo koji ima maglu kao gusti vodenih oblak. Osim toga magla na slikama u solarnom dijelu spektra ima glatkou teksturu i oštretu rubove pa se lako razlikuje od drugih vodenih oblaka i od tla.

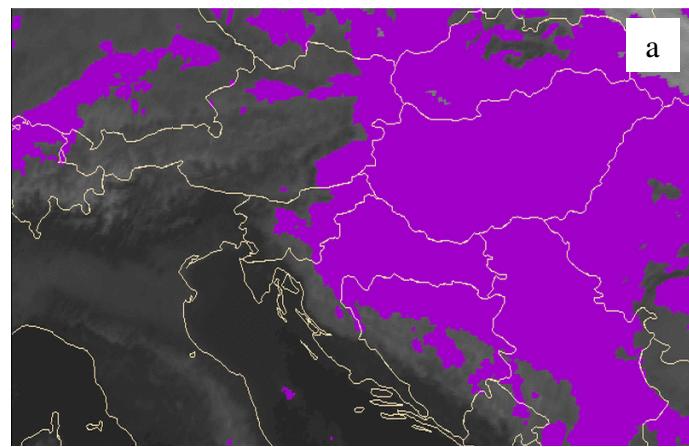


Slika 3.9: Meteosat 9 RGB kombinacija kanala 0.6, 1.6 i 10.8 μm za 08. siječnja 2008. u 08 UTC (a), 10 UTC (b) i 12 UTC (c). Magla/stratus su jednolično žuto-zeleni, ružičasti su kumulusi, svjetlo-plavi cirusi, a tamno-ružičasto-crvena boja označava snijeg na tlu. Strelica pokazuje vrh Zagrebačke gore koja izviruje iz sloja magle.

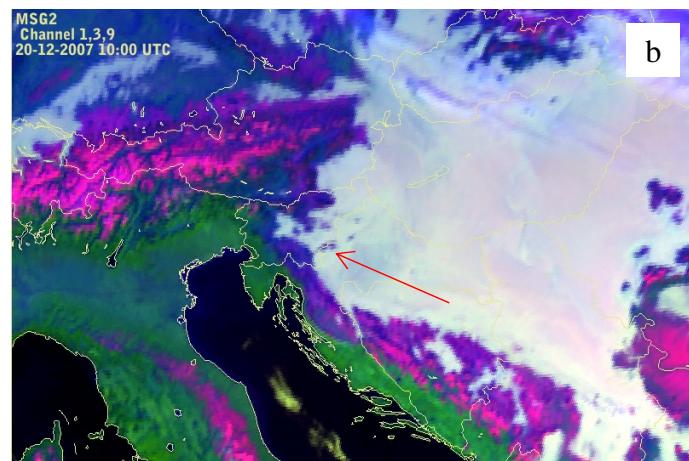
U kanalima 3.9 i 1.6 μm magla/stratus, koji se sastoje od sitnih kapljica vode, ima veliku refleksivnost (Sl. 2.14., poglavlje 2.4.2) i stoga je u kontrastu sa snijegom i hladnim tlom. U prepoznavanju magle pomaže nam i niz uzastopnih slika iz kojeg se može uočiti da se magla giba, odnosno razvija, mnogo sporije od oblaka.

Za prepoznavanje magle danju koriste se kanali koji daju informaciju o mikrofizikalnim svojstvima oblaka, odnosno o fazi vode i veličini čestica oblaka u kombinaciji s temperaturom i albedom. Drugim riječima, kombinacija jednog vidljivog (albedo), jednog kanala koji daje informaciju o fazi i veličini čestica, odnosno kanala 1.6 ili 3.9 μm te na kraju jednog infracrvenog kanala (temperatura), zorno će prikazati područja s maglom. Primjer takve kombinacije kanala prikazan je na slici 3.9. Uzeta je RGB kombinacija kanala 0.6, 1.6 i 10.8 μm , koja se operativno koristi na DHMZ-u. U toj se kombinaciji jasno razlikuju magla i niski oblaci (žuto-zeleno, jednolično) od drugih niskih oblaka (žuto s primjesama ružičaste), oblaka jačeg vertikalnog razvoja (ružičasto) te visokih oblaka (svjetlo plavo). Također se jasno razaznaju područja pod snijegom kao tamno ružičasto-crvena. Niz od tri slike u 08, 10 i 12 UTC 08. siječnja 2008. pokazuje da se magla zadržava nad područjem središnje Hrvatske, pri čemu se u 12 UTC (Sl. 3.9c) vidi disipacija magle/stratusa u dijelu sjeverno od Zagreba. Također je izraženo područje s maglom iznad istočne Srbije i zapadne Rumunjske gdje se vidi smanjenje područja pod maglom u terminu 12 UTC. Treće izraženo područje je u dolini rijeke Po, u sjevernoj Italiji. Kad je u pitanju područje središnje Hrvatske vidi se sličan efekt kao kod primjera za noćnu maglu, naime Zagrebačka gora uokvirena je žutom bojom što jasno pokazuje da se radi o magli, a ne o stratusu.

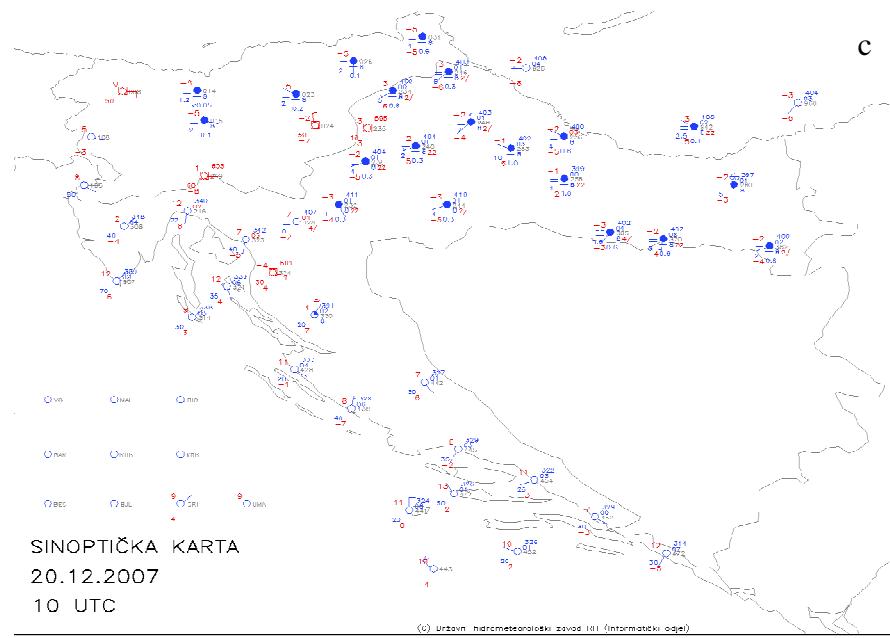
Osim ovakve RGB kombinacije kanala, u sklopu projekta „CONEX II“ napravljen je i produkt za detekciju niskih oblaka, u kojem su kombinirani kriteriji za reflektirane komponente zračenja u kanalima 1.6 i 3.9 μm i kriterij za temperaturu u kanalu 10.8 μm . U prvoj verziji produkta bila je korištena razlika kanala 3.9 i 8.7 μm , ali se u praksi pokazalo da upotreba refleksivnosti u kanalu 1.6 μm , umjesto spomenute razlike, daje bolje rezultate. U slučaju operativnog produkta koji se koristi na DHMZ-u rezultat je prikazan kao na slikama 3.10a i 3.11a. Ljubičasta boja označava područje prekriveno maglom ili niskim oblacima. Na slici 3.10 prikazana je situacija s maglom/niskim oblacima iznad središnje i istočne Hrvatske te susjednih zemalja. Za usporedbu, na slici 3.10b prikazana je kombinacija kanala 0.6, 1.6 i 10.8 μm , a na slici 3.10c dani su podaci motrenja na sinop postajama.



a

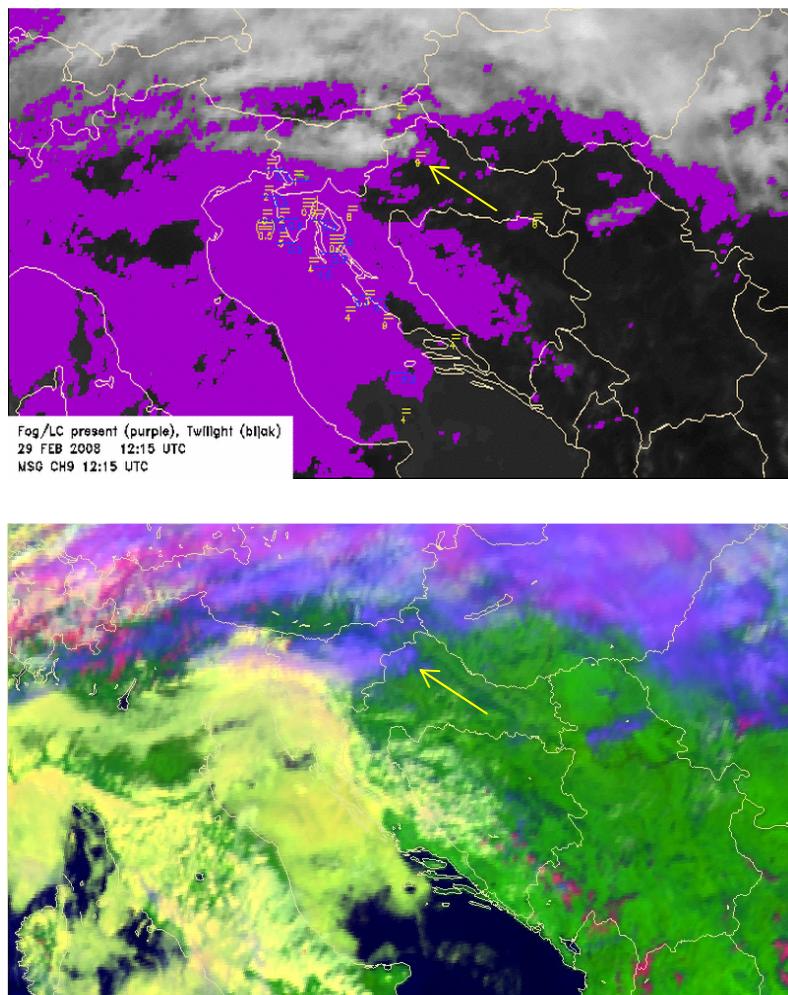


b



Slika 3.10: Detekcija magle/niskih oblaka za 20. prosinca 2007. u 10 UTC. a) Područja pod maglom/stratusom (ljubičasto). Korištena je kombinacija refleksivnosti u kanalima 1.6 i 3.9 μm i temperature u kanalu 10.8 μm . b) RGB kombinacija kanala 0.6, 1.6 i 10.8 μm . c) Sinoptička karta Hrvatske za 20. prosinca 2007. u 10 UTC. Područja u kojima je na a) i b) detektirana magla/niski oblak u sinop mjerjenjima prekrivena su stratusima.

Usporedbom slika 3.10a i 3.10b uočava se da produkt za detekciju magle/niskih oblaka pokazuje upravo ona područja u kojima je i na RGB kombinaciji vidljiva žuto-zelena boja, koja je pokazatelj postojanja niskih oblaka. Razlika je samo u sitnim detaljima, kao na primjer u području na samoj granici Hrvatske i Slovenije, označenom crvenom strelicom na slici 3.10b. U tom je području produkt za maglu indicirao postojanje niskih oblaka, dok je iz RGB kombinacije vidljivo da se radi o vrhovima gora koje „izviruju“ iz sloja magle/stratusa. Sinop motrenja, na slici 3.10c, pokazuju da je na vrhu Zagrebačke gore u Hrvatskoj te na Lisci, u Sloveniji, bilo vedro. Drugim rječima RGB kombinacija u ovoj je situaciji dala točniju informaciju.



Slika 3.11: Detekcija magle/niskih oblaka za 29. veljače 2008. u 1215 UTC: a) područja pod maglom/stratusom (ljubičasto), sinop motrenja pokazuju postaje na kojima je zabilježena magla (žute oznake) i stratus (plave oznake); b) RGB kombinacija kanala 0.6, 1.6 i 10.8 μm . Područja pod maglom su žute ili žuto-zelene boje. Strelicom je označeno područje na kojem produkt za detekciju magle indicira postojanje magle/niskih oblaka, potvrđeno i sinop motrenjem, dok je u RGB kombinaciji boja koja odgovara visokim oblacima.

Sljedeći primjer, na slici 3.11, prikazuje maglu/niske oblake nad područjem sjevernog Jadrana. Produkt za detekciju magle (Sl. 3.11a) indicira postojanje magle/niskih oblaka, a da se radi o magli potvrđuju i motrenja na sinop postajama, koja su ovdje prikazana na satelitskom produktu. Iz RGB kombinacije, na slici 3.11b, vidljivo je da tekstura magle nije posve glatka, kao što je bio slučaj u primjeru na slici 3.10, već da mjestimice iznad magle ima i visokih oblaka. Najveća razlika između magle/niskih oblaka detektiranih na slici 3.11a i RGB kombinacije na slici 3.11b vidljiva je u sjeverozapadnoj Hrvatskoj. U tom je području (označenom strelicom) indicirano postojanje magle/niskih oblaka na slici 3.11a, što potvrđuje i motrenje na postaji, prikazano na istoj slici. RGB kombinacija u tom području ne pokazuje karakterističnu žutu ili žuto-zelenu nijansu već plavkastu. Plava boja na kombinaciji kanala 0.6, 1.6 i 10.8 μm karakteristična je za visoke oblake (ciruse). U ovakvoj situaciji moguće je da postoje niski oblaci/magla koji su dijelom prekriveni visokim ledenim oblacima pa kao rezultat u RGB kombinaciji imamo plavkasto-ljubičaste nijanse.

Kriterij razlike između temperature u kanalu 10.8 μm i mjerene temperature na 2m, opisan u poglavlju 3.2, i ovdje se može koristiti kao dodatni kriterij za razlikovanje magle od niskih oblaka.

3.4 Rasprava

Pokazalo se da je detekcija magle moguća noću upotrebom kanala 10.8 i 3.9 μm zbog svojstva kanala 3.9 μm u kojem je temperatura magle niža nego što je to u kanalu 10.8 μm . Pozitivna razlika veća od 3 K može se koristiti kao indikator za moguću maglu. Pritom je za razlikovanje magle od niskih oblaka potrebno uvesti i kriterij za temperaturu u kanalu 10.8 μm u odnosu na temperaturu pri tlu.

Danju se osim spomenutih kanala koristi i neki od vidljivih kanala, 0.6 ili 0.8 μm , a kad je riječ o kanalima 1.6 odnosno 3.9 μm , koji daju informaciju o fazi i veličini čestica u oblaku/magli, valja naglasiti da se uzima reflektirana komponenta, slično kao kod detekcije konvektivnih oblaka.

Na osnovu do sad korištenih metoda i ovih teorijskih pretpostavki planira se testiranje novih metoda za detekciju, a zatim i njihovo uvođenje u operativnu upotrebu.

4 OTKRIVANJE POŽARA

4.1 Uvod

Šumski požari godišnje oštete ili potpuno uniše nekoliko stotina milijuna hektara šuma i druge vegetacije širom svijeta. U Hrvatskoj su šumski požari i požari druge vegetacije najčešćaliji u ljetnim mjesecima, osobito na obali i otocima i svake su godine uzrokom velikih materijalnih šteta. U ljeto 2007., koje je prema statistikama bilo ljeto s najvećim brojem požara, na hrvatskoj obali buknulo je više od 750 požara i ukupno je opožareno oko 160.000 hektara. U požaru na otoku Kornatu 30. kolovoza 2007. po prvi puta su izgubljeni i životi 12 vatrogasaca (Vučetić i sur., 2007). Ovi podaci zorno pokazuju koliko je važno pravovremeno otkrivanje i gašenje požara. Rano otkrivanje požara u nenaseljenim ili slabo naseljenim područjima jedna je od učestalih primjena daljinskih istraživanja. Na globalnoj razini praćenje se provodi korištenjem podataka s polarnih satelita NOAA (Flannigan i Vonderhaar, 1986) i METOP zbog njihove razmjerno velike prostorne razlučivosti. Posebno korisnima pokazali su se MODIS podaci, koji mogu mjeriti zračenje sa Zemlje s prostornom razlučivošću 250 m. Podaci s polarnih satelita operativno se koriste u detekciji požara u mnogim zemljama, osobito u višim geografskim širinama (npr. Kanada, Finska, Rusija). U umjerenim širinama prepreku pravodobnom prepoznavanju požara iz podataka s polarnih satelita predstavlja velik vremenski raspon između dviju sukcesivnih snimki iznad određenog područja. Naime, sateliti Terra i Aqua područje Hrvatske prelete jednom dnevno i to ne uvijek pod kutem koji bi bio dobar za analizu snimaka. NOAA i METOP sateliti posjete nas nešto češće, 2 do 3 puta dnevno. U vrijeme kad nema preleta polarnih satelita jedini raspoloživi podaci su oni s MSG satelita Meteosat 8 ili 9, dakle iz geostacionarne orbite.

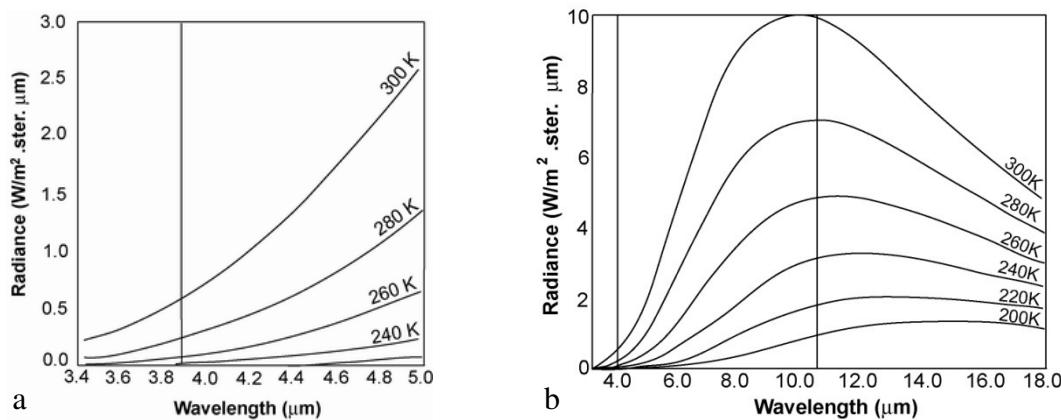
Za praćenje požara sa satelita ključan je kanal u području valne duljine $3.9 \mu\text{m}$, u kojem je omogućeno prepoznavanje vrućih točaka (engl. hot spots) koje predstavljaju požare. Nedostatak motrenja iz geostacionarne orbite je razmjerno mala prostorna razlučivost koja u području iznad Ekvatora i 0-tog meridijana iznosi $3 \times 3 \text{ km}$ i smanjuje se s povećanjem geografske širine. Prednost je, međutim, stalna prisutnost satelita iznad našeg područja i vremenski razmak od samo 15 minuta između dviju sukcesivnih snimki.

4.2 Svojstva kanala 3.9 μm

Požari vegetacije razvijaju temperaturu uglavnom u rasponu između 500 i 1000 K. Optimalna valna duljina za praćenje požara je upravo ona u kojoj bi zračilo crno tijelo na takvoj temperaturi. Prema Wien-ovom zakonu pomaka (10), što je objekt koji zrači topliji to je kraća valna duljina na kojoj emitira većinu svog zračenja. Valna duljina maksimalnog zračenja pri nekoj temperaturi računa se prema izrazu:

$$\lambda = kT^{-1} \quad (10)$$

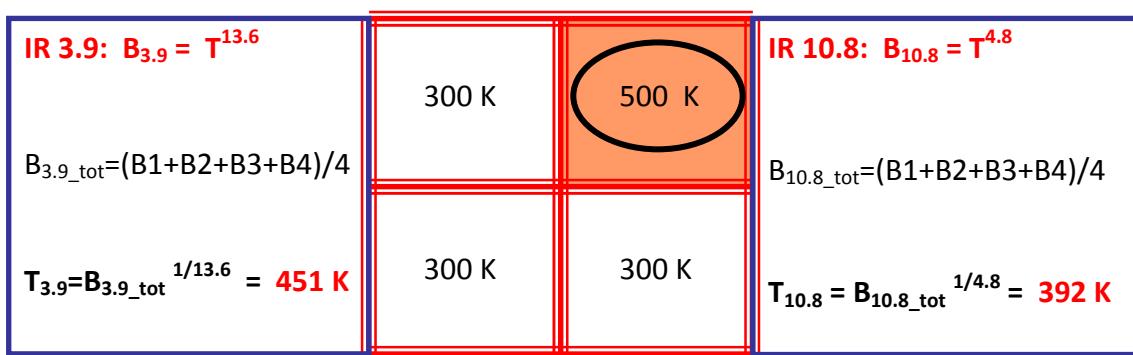
gdje je T temperatura crnog tijela, a k konstanta proporcionalnosti koja iznosi: 2897.9 μmK. Dakle, iz Wienovog zakona se može zaključiti da valna duljina maksimalnog zračenja tijela temperature oko 750 K iznosi 4 μm. Upravo stoga je najbolji kanal za detekciju šumskih požara kanal valne duljine 3.9 μm.



Slika 4.1: Odnos jakosti zračenja i valne duljine za različite temperature crnog tijela: a) kraće valne duljine - porast jakosti zračenja s povećanjem temperature izrazito je nelinearan (vertikalnom linijom označena je valna duljina 3.9 μm); b) veće valne duljine - porast zračenja s povećanjem temperature gotovo je linearan (vertikalnom linijom označena je valna duljina 10.8 μm). (Preuređeno iz „MSG Interpretation Guide“, Kerkemann i sur., 2004).

Nelinearnost odnosa zračenja i temperature nekog tijela čini odaziv zračenja na promjenu temperature puno većim za kraće valne duljine. To se lijepo vidi na slici 4.1, na kojoj je prikazan odnos jakosti zračenja i valne duljine za različite temperature crnog tijela. Očito je da je za male valne duljine porast jakosti zračenja s porastom temperature puno veći nego za veće valne duljine. Upravo zbog toga kanal 3.9 μm iznimno je osjetljiv na promjene

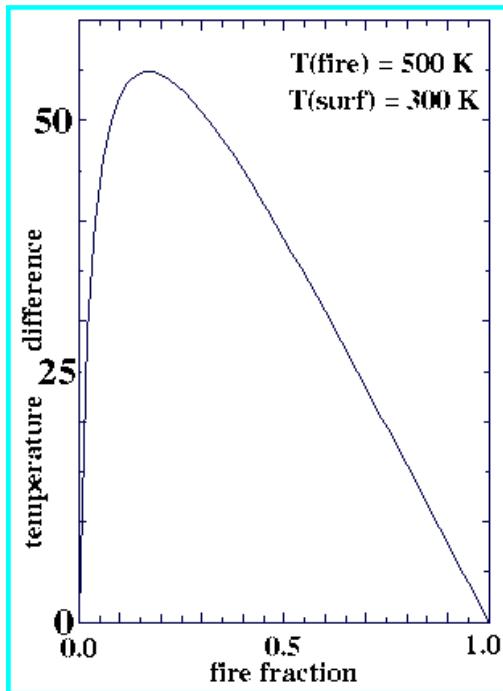
temperature odnosno na vrlo topla područja. To svojstvo omogućava detekciju vrućih područja čija je površina mnogo manja od one koju obuhvaća piksel na slici (Kerkmann i sur., 2004). Slika 4.2 pokazuje utjecaj vrućeg područja unutar piksela na temperaturu cijelog piksela u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ i kanalu $10.8 \mu\text{m}$. Naime, temperatura piksela ne računa se tako da se zbroje temperature pojedinih dijelova piksela i podjele s brojem dijelova, već se zbraja zračenje. S obzirom na to da je ovisnost temperature o zračenju različita za različita spektralna područja, temperatura cijelog piksela puno je veća u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ nego u kanalu $10.8 \mu\text{m}$, ako je samo mali dio piksela zahvaćen vatrom.



Slika 4.2: Utjecaj vrućeg područja unutar piksela na temperaturu piksela u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ (lijevo) i kanalu $10.8 \mu\text{m}$ (desno). (Preuređeno iz „MSG Interpretation Guide“, Kerkmann i sur., 2004).

Dovoljno je da je oko 5% piksela zahvaćeno temperaturom od 500 K pa da temperatura cijelog piksela u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ bude 360 K, dok će u istim uvjetima temperatura piksela u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ biti manja od 320 K. To svojstvo omogućuje prepoznavanje i razmjerno malih požara. Čak i ako je samo 1% piksela zahvaćeno požarom temperature 500 K, temperatura u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ bit će 358 K, a u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ oko 306 K, a njihova razlika bit će veća od 50 K.

U praksi se koristi nekoliko algoritama za detekciju požara koji, osim temperature u području $3.9 \mu\text{m}$, uključuju i temperaturu u području $10.8 \mu\text{m}$ te njihove standardne devijacije (EUMETSAT, 2010), iako je signal o požaru odnosno vrućem području sadržan samo u temperaturi u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ (Weaver i Purdom, 1995). Pritom se kao jedan od kriterija koristi razlika temperature u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ i temperature u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ jer je ta razlika velika kad je mali dio piksela zahvaćen požarom.



Slika 4.3: Odnos površine piksela zahvaćene vatrom i razlike temperature u kanalima 3.9 i 10.8 μm . (Kerkmann i sur., 2004).

Ako je cijeli piksel zahvaćen požarom onda će i temperatura u kanalu 10.8 μm indicirati požar, a razlika između temperature u ta dva kanala bit će mala, što je vidljivo i iz slike 4.3. Navedena svojstva kanala 3.9 μm te razlike kanala 3.9 i 10.8 μm koriste se u algoritmima za prepoznavanje vrućih točaka.

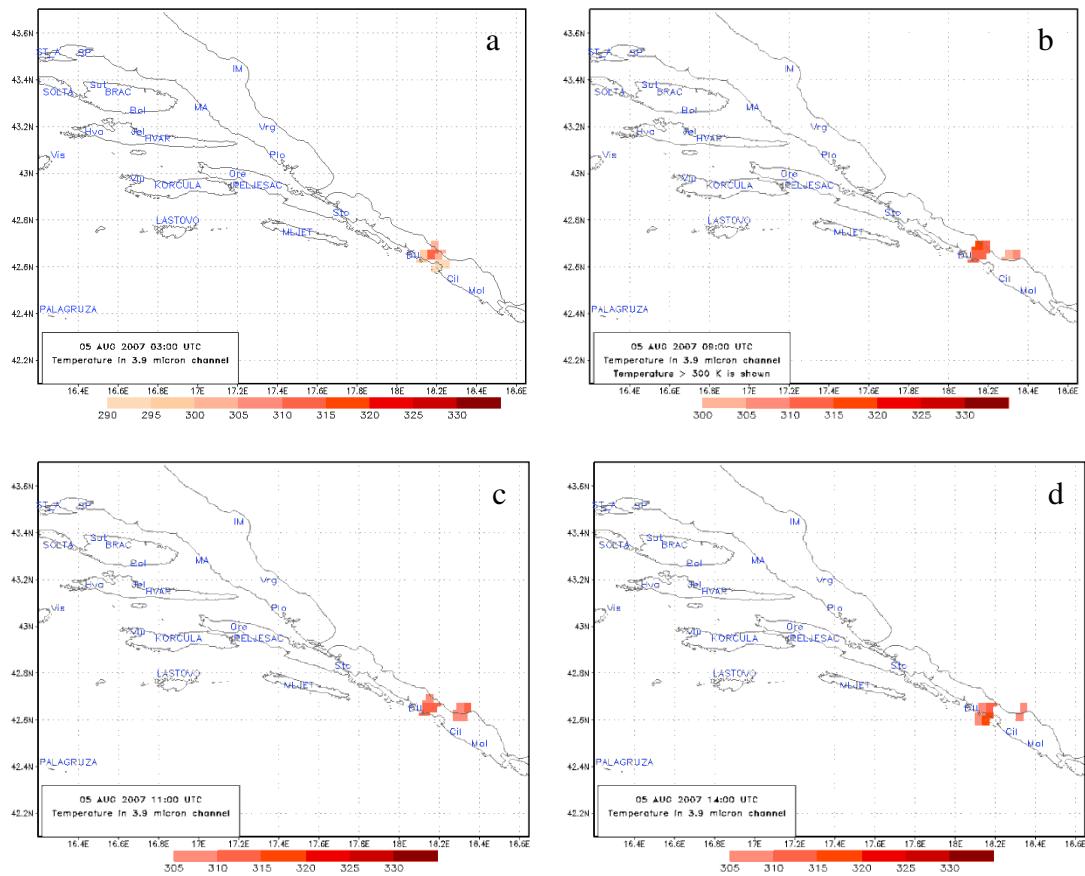
4.3 Povod za istraživanje

Mogućnost prepoznavanja požara iz satelitskih podataka geostacionarnog satelita pokazala se korisnom u slučaju velikog požara u Dubrovniku početkom kolovoza 2007. Požar je buknuo u susjednoj BiH i proširio se prema Dubrovniku zbog jake bure. Upravo je činjenica da je izbio u nenaseljenom području i nije na vrijeme bio uočen, djelomice bila razlogom kasnijih dimenzija požara (Sl. 4.4). Kako je požarište bilo velikih dimenzija na satelitskim slikama u kanalu 3.9 μm vidljivo je nekoliko vrućih točaka u više termina. U primjeru na slici 4.5 pokazana je temperatura u kanalu 3.9 μm u intervalima od 1 K. Na području BiH vidljivo je nekoliko piksela s temperaturom višom od 300 K dok pikseli na

području Dubrovnika imaju temperaturu višu od 310 K. Požar se mogao pratiti na satelitskim slikama tijekom većeg dijela dana (Strelec Mahović, 2009).

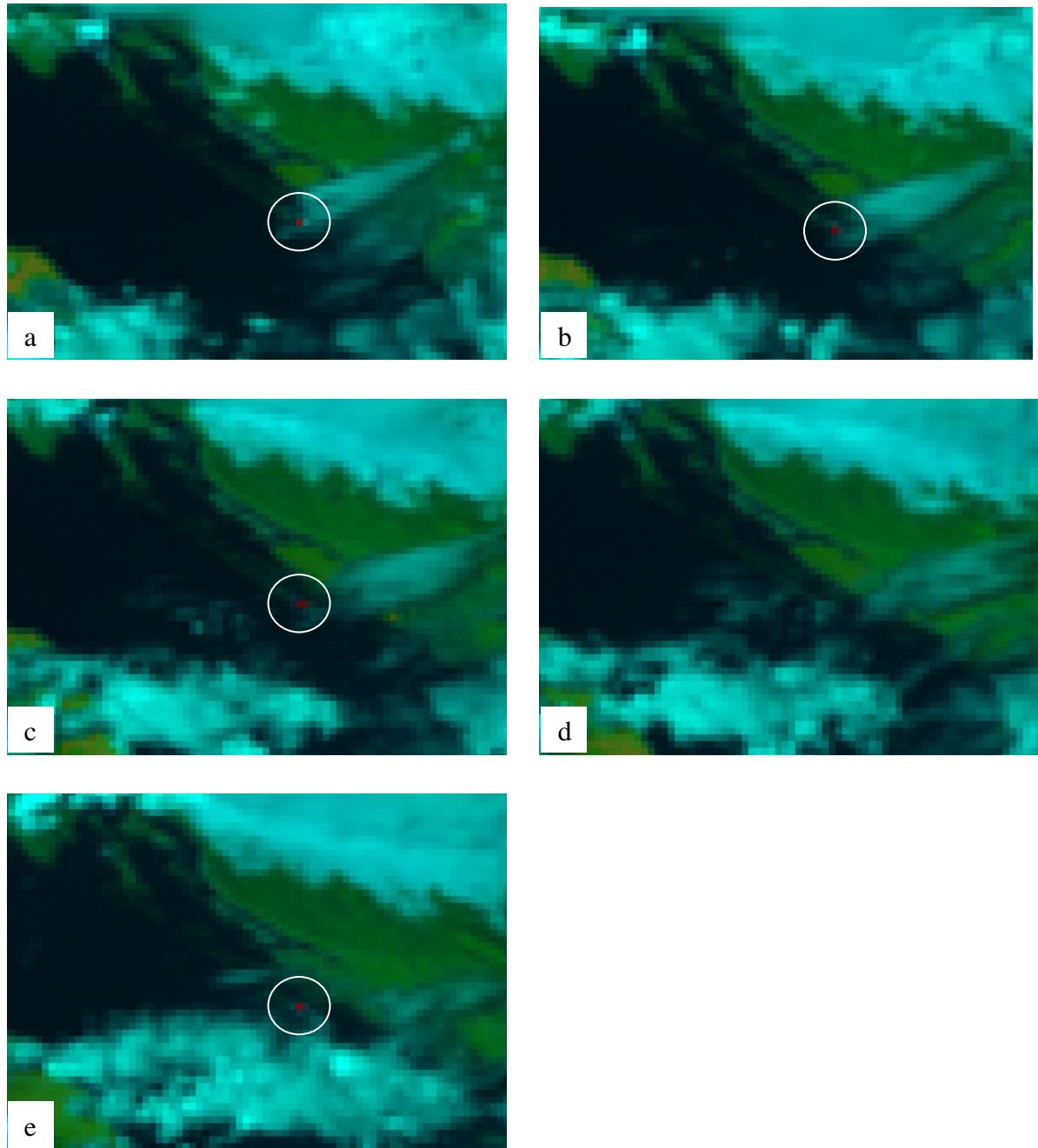


Slika 4.4: Požar na brdu Srđ iznad Dubrovnika, u noći s 04. na 05. kolovoza 2007.



Slika 4.5: Temperatura u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ za 05. kolovoz 2007. u 03 UTC (a), 09 UTC (b), 11 UTC (c) i 14 UTC (d). Crveni pikseli označavaju područja u kojima je temperatura u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ $> 305 \text{ K}$.

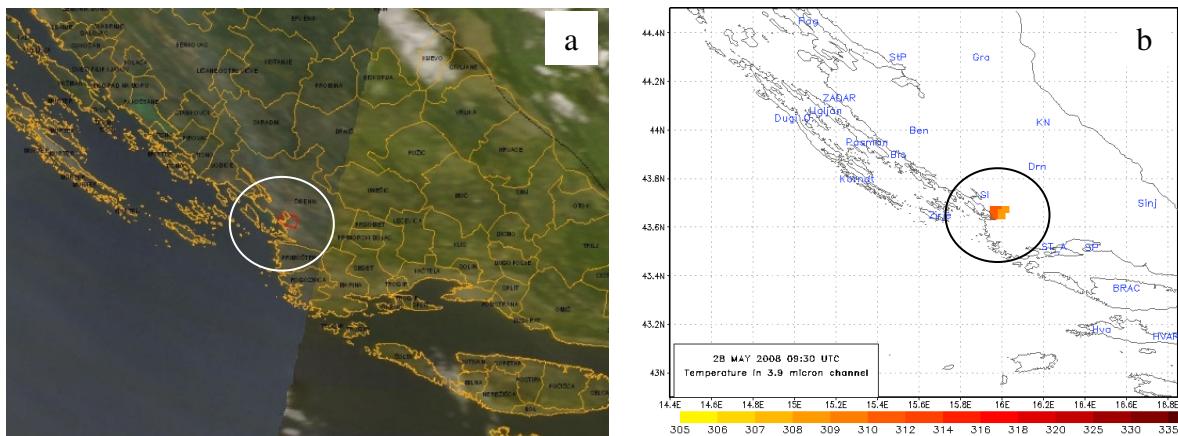
Tragičan požar na otoku Kornatu 30. kolovoza 2007., koji je za posljedicu imao gubitak 12 ljudskih života, bio je znatno manjih dimenzija od dubrovačkog požara. Upravo zbog toga i zbog njegovih tragičnih posljedica, napravljena je analiza satelitskih snimaka kako bi se provjerilo da li postoji mogućnost detektiranja i tako malih požara (Strelec Mahović, 2007). Pokazalo se da je vruća točka, unatoč maloj površini požarišta, ipak bila vidljiva u kanalu $3.9 \mu\text{m}$.



Slika 4.6: Satelitska slika s Meteosat 9 satelita za 30. kolovoz 2007. u 1245 UTC (a), 13 UTC (b), 1315 UTC (c), 1330 UTC (d) i 14 UTC (e). Prikazana je kombinacija kanala $3.9 \mu\text{m}$, $0.8 \mu\text{m}$ i $0.6 \mu\text{m}$. Vruća točka koja označava požar vidljiva je u crvenoj boji (u bijelom krugu).

Radi zornijeg prikaza i lakšeg raspoznavanja topografije podaci o zračenju u kanalu 3.9 μm kombinirani su s podacima zračenja u vidljivom dijelu spektra. Pritom je kanal 3.9 μm prikazan u crvenom dijelu spektra, kanal 0.8 μm u zelenom, a kanal 0.6 μm u plavom. U takvoj kombinaciji područja visoke temperature, a malog albeda zbog nedostatka oblaka, su crvene boje, kopno je u zeleno-smeđim nijansama, more crno, a oblaci svjetlo plavi. Kao što je vidljivo na slici 4.6, požar je uočljiv kao crvena točkica na otoku Kornatu. Požar je bio vidljiv u četiri termina satelitskih motrenja dok je u ostalim terminima područje Kornata bilo prekriveno oblacima. U tri od četiri termina motrenja položaj najtoplje točke bio je 43.88N, 15.21E dok je u terminu 14 UTC vruća točka bila na 43.93N, 15.23E. Analiza je pokazala da je najviša temperatura vruće točke zabilježena upravo na slici u 14 UTC, nakon čega se signal gubi zbog oblaka. Ova je analiza dala naslutiti da bi se i u slučaju požara manjih dimenzija podaci s MSG satelita mogli koristiti za pravovremeno otkrivanje i praćenje požara.

Za 2008. godinu analizirano je nekoliko većih požara. Na slici 4.7 prikazana je usporedba između produkta za prepoznavanje požara iz MODIS podataka i temperature u kanalu 3.9 μm SEVIRI-a. Položaj pozarišta je na obje slike isti.

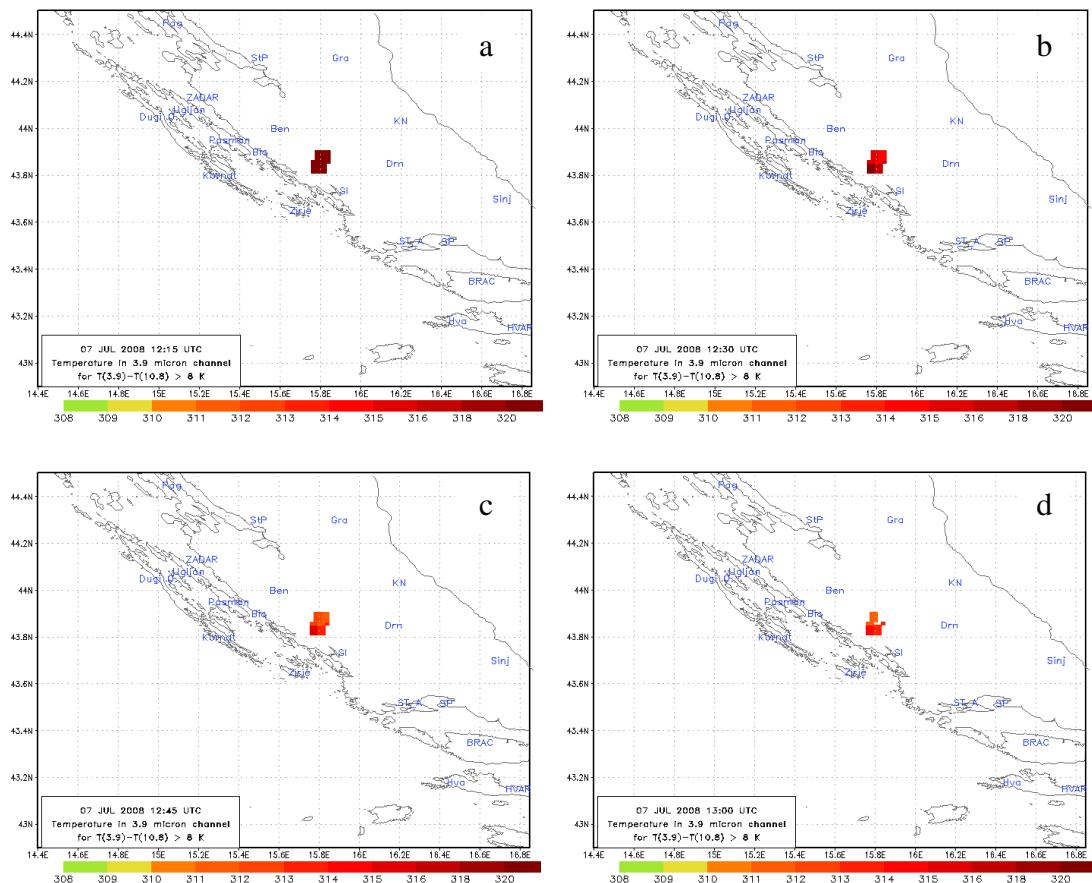


Slika 4.7: Usporedba MODIS produkta za požare (a) s temperaturom u kanalu 3.9 μm SEVIRI instrumenta na Meteosat 9 satelitu (b).

S obzirom na puno veće prostorno razlučivanje MODIS podataka, na tim je slikama detektirano puno više vrućih točaka, no produkt za požare pokazuje samo okvir pozarišta dok

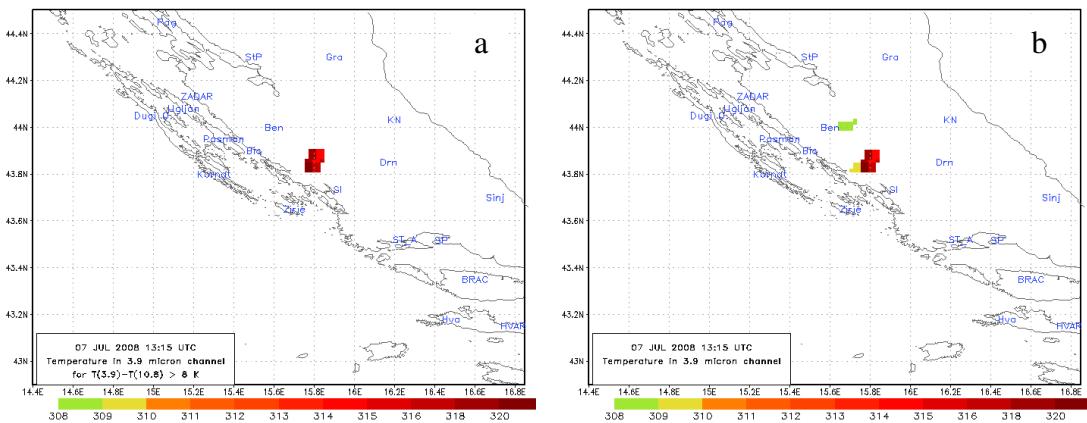
su na slici s MSG satelita vidljivi pojedinačni pikseli, od kojih se samo najtamniji u ovom slučaju mogu klasificirati kao požar jer im temperatura prelazi 310 K.

Analizom samo podataka o temperaturi u kanalu 3.9 μm dobiva se podatak o svim vrućim točkama, ali mnoge od njih nisu vezane uz požare. Da bi se isključile one točke u kojima je temperatura visoka iz nekog drugoga razloga, a ne zbog prisutnosti požara, uvodi se razlika u temperaturi između kanala 3.9 i kanala 10.8 μm , kako je opisano u poglavlju 4.2. Kriterij za razliku postavljen je na 8 K, a primjer detektiranog požara prikazan je na slici 4.8.



Slika 4.8: Požar detektiran u unutrašnjosti Dalmacije 07. srpnja 2008. u 1215 UTC (a), 1230 UTC (b), 1245 UTC (c) i 13 UTC (d). Prikazana je temperatura u kanalu 3.9 μm za one piksele u kojima je razlika temperature između kanala 3.9 i 10.8 μm veća od 8 K.

Razlika između detekcije korištenjem samo kanala 3.9 i one u kojoj se koristi dodatni kriterij za razliku s temperaturom u kanalu 10.8 je manji broj pogrešno detektiranih požara.



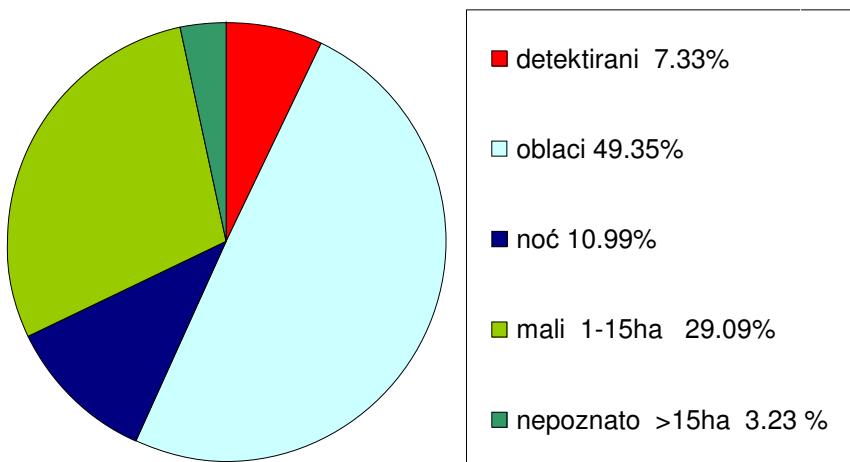
Slika 4.9: Usporedba produkta za detekciju požara, koji uključuje razliku s temperaturom u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ (a) i same temperature u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ (b) za 07. srpnja 2008. u 1315 UTC.

Kao što je vidljivo na slici 4.9 uključivanjem temperature u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ zadržava se samo informacija o vrućim točkama vezanim uz požare dok točke koje su vruće i u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ nestaju zbog male razlike u temperaturi između dvaju kanala.

4.4 Analiza podataka

Da bi se utvrdilo u kojim je uvjetima i u kojem postotku moguće detektirati požare iz podataka s Meteosat satelita, analizirani su podaci o svim požarima površine veće od 1 ha zabilježenim od 01. svibnja do 30. rujna 2009. godine. Podaci o požarima, dobiveni od Državne uprave za zaštitu i spašavanje, sadržavaju točne koordinate i površinu požarišta, kao i vremena početka i završetka požara. Prema raspoloživim podacima u tom su razdoblju u Hrvatskoj zabilježena ukupno 464 požara. Za sve zabilježene požare analizirani su podaci o temperaturi u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ u kombinaciji s podacima o temperaturi u kanalu $10.8 \mu\text{m}$. Promatrana je temperatura u kanalu $3.9 \mu\text{m}$, a točka se definira kao vruća točka ako je njena temperatura viša od 290 K, ali samo za one točke u kojima je razlika temperature u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ i one u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ veća od 8 K. Također je napravljena i analiza operativnog produkta FIR-A koji EUMETSAT diseminira u realnom vremenu putem Eumetcast-a.

Od 464 požara samo se njih 34 moglo detektirati u satelitskim podacima, dakle u samo 7.3% slučajeva vruća točka je bila vidljiva u satelitskim podacima na mjestu gdje je zabilježen požar (Strelec Mahović, 2010b).



Slika 4.10: Statistika detekcije požara površine veće od 1ha za ljetо 2009. Crvenom bojom označen je udio požara koji su prepoznati u kanalu 3.9 μm. Ostale boje označavaju požare koji nisu bili vidljivi sa satelita, zbog različitih razloga.

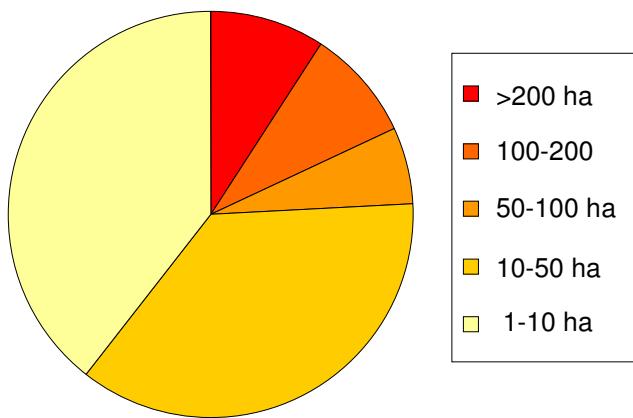
Kao što je vidljivo na slici 4.10 najčešću prepreku zbog koje požar nije vidljiv s geostacionarnog satelita predstavlja prisutnost oblaka iznad požarišta. U podacima iz 2009. oblaci su onemogućili detekciju požara u 229 slučajeva, odnosno 49.35%.

S obzirom na valnu duljinu kanala 3.9 μm zbog koje podatak u tom dijelu spektra sadrži emitiranu komponentu, ovisnu o temperaturi, ali i reflektiranu komponentu, ovisnu o ulaznom sunčevom zračenju, vrijednosti temperature u kanalu 3.9 μm ovise i o dobu dana. Kod ove detekcije uzeto je da je za kut upada sunca veći od 70° dan, za kuteve od 70 do 90° sumrak, a za kuteve veće od 90° noć. U analizi podataka za ljetо 2009. primjećeno je da su tijekom sumraka i noći čak i veći požari nevidljivi ili teško vidljivi pa je to još jedna prepreka prepoznavanju vrućih točaka. Sumrak ili noć bili su uzrokom neprepoznavanja požara u oko 11% slučajeva (Strelec Mahović, 2010b).

Pogledaju li se ostali rezultati vidljivo je da velik broj požara koji nisu prepoznati u satelitskim podacima čine požari površine manje od 10 ha. To je i razumljivo, ako se uzme u obzir da je prostorno razlučivanje satelitskih podataka s Meteosat 8 i 9 satelita u točki ispod satelita 3x3 km po pikselu dok je nad našim područjem to otprilike 4x4 km po pikselu. U skladu s time, nad našim bi područjem površina požarišta trebala biti veća od 80 ha da bi činila oko 5% površine piksela, a takvih je požara u ljetу 2009. bilo samo 18. Od tih 18 u 3 slučaja požar nije bio prepoznat iako iznad njega nije bilo oblaka. Ako pak uzmem da je

dovoljno da požar temperature oko 500 K čini samo 1% piksela, to bi za naše područje značilo da bi požar morao biti veći od 15 ha da bismo ga mogli vidjeti kao vruću točku. Požara većih od 15 ha, a koji nisu prepoznati u podacima s Meteosat satelita bilo je 15, odnosno 3.23% od ukupnog broja požara u ljeto 2009. godine.

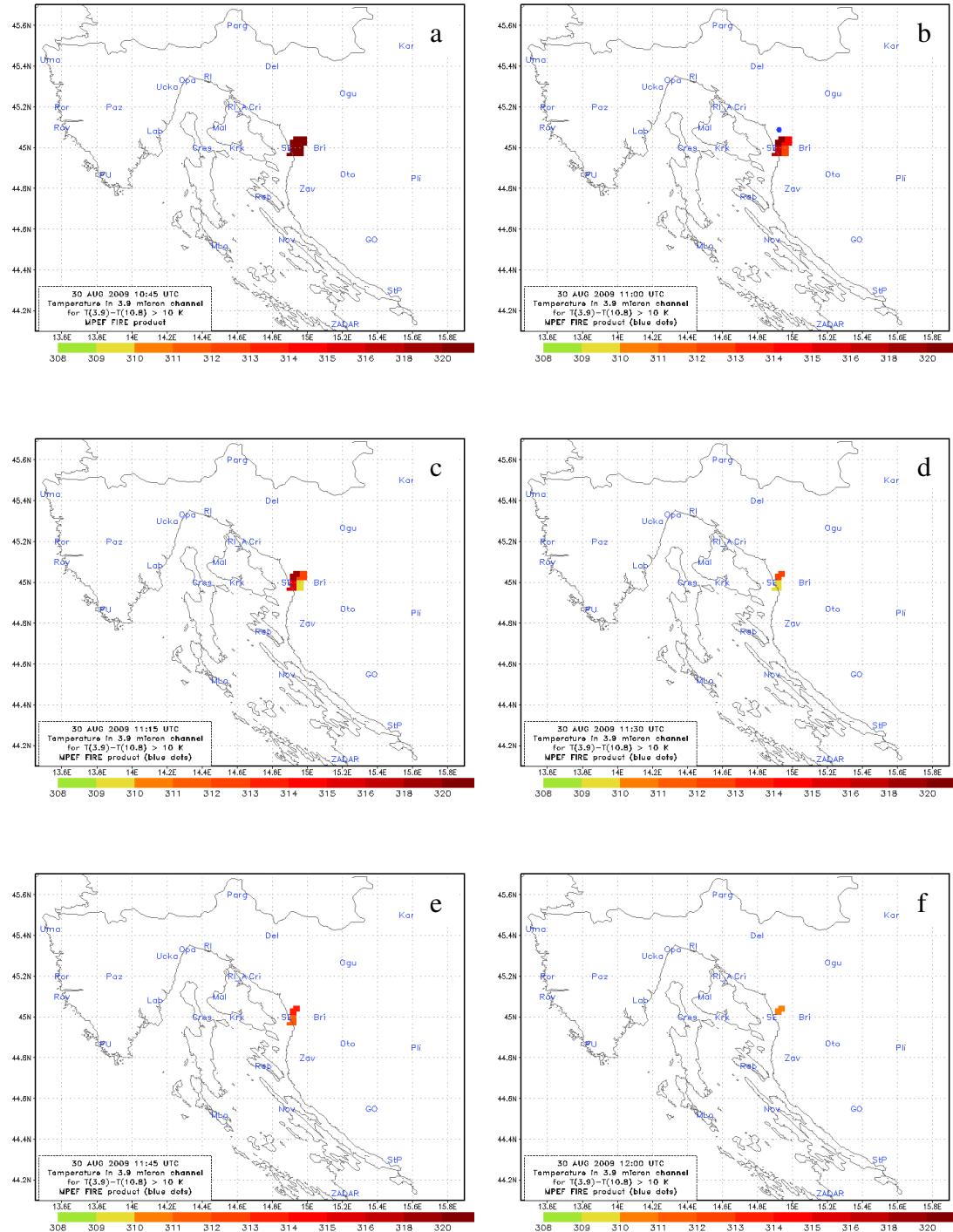
Pogleda li se statistika detektiranih požara na slici 4.11 podaci ipak pokazuju malo drugačiju sliku od teorije. Naime, od 34 detektirana požara čak je njih 13, odnosno 38% imalo površinu manju od 10 ha, a još 12 (35%) površinu manju od 50 ha. Dakle, više od 70% detektiranih požara nad našim područjem ima površinu bitno manju od 5% veličine piksela slike!



Slika 4.11: Raspodjela površina detektiranih požara

Drugim riječima, nad našim su područjem prepoznatljivi i požari čija površina ne zahvaća ni 1% veličine piksela. Ipak, ovaj podatak treba uzeti s rezervom. Naime, činjenica da u broju detektiranih požara mali požari imao velik udio, posljedica je velikog ukupnog broja malih požara. Stoga bi ove podatke trebalo promotriti u odnosu na ukupan broj požara za svaku od kategorija. Tako je u kategoriji malih požara, do 10 ha, prepoznato tek oko 5% od ukupnog broja. U kategorijama od 15 do 50 i od 50 do 100 ha udio prepoznatih požara u ukupnom broju požara te površine je oko 15% dok je za kategorije velikih požara, površine >100 ha udio prepoznatih požara u ukupnom broju 50%. Dakle, mali požari su ponekad vidljivi, no vjerojatnost njihovog detektiranja pomoću satelitskih podataka razmjerno je mala. Primjer malog požara bio je i požar na Kornatu, koji je unatoč maloj površini bio uočljiv na satelitskim snimkama. Za pretpostaviti je da kod manjih požara veliku ulogu igra temperatura

kojom gori goriva tvar jer to bitno mijenja ukupnu temperaturu piksela, kao što je pokazano na slici 4.2 u poglavlju 4.2.

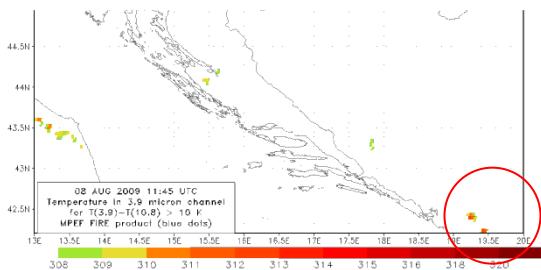


Slika 4.12: Detekcija požara kod Senja 30. kolovoza 2009. u 1045 UTC (a), 11 UTC (b), 1115 UTC (c), 1130 UTC (d), 1145 UTC (e) i 12 UTC (f). Prikazana je temperatura u kanalu 3.9 μm za one piksele u kojima je razlika temperature u kanalima 3.9 i 10.8 μm $> 10 \text{ K}$. Plava točkica na slici (b) označava položaj požara određen EUMETSAT-ovim MPEF produktom FIR-A.

Metoda prepoznavanja požara korištena u ovom radu ima puno blaže kriterije nego operativni EUMETSAT-ov produkt za požare. Razlog je što se zapravo željelo utvrditi u kojoj mjeri su požari vidljivi u satelitskim podacima. Upravo zbog toga pokazalo se da operativni produkt EUMETSAT-a u mnogo manjem broju slučajeva detektira vruće točke. U ljeto 2009. samo je u 3 slučaja vruća točka bila vidljiva i u FIR-A produktu. Jedan od tih slučajeva bio je požar kod Senja 30. kolovoza 2009. (Sl. 4.12). U MPEF FIR-A produktu aktivran požar detektiran je samo u 1055 UTC dok je korištenjem blažeg kriterija za temperaturu u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ i razliku $T(3.9 \mu\text{m}) - T(10.8 \mu\text{m}) > 10 \text{ K}$ požar bio vidljiv u nekoliko termina.

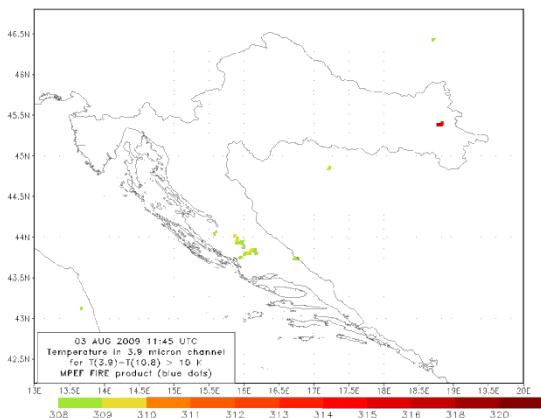
4.5 Rasprava

S obzirom na pokazane rezultate može se zaključiti da je detekcija požara odnosno vrućih točaka korištenjem podataka s Meteosat satelita moguća, ali uz dosta velika ograničenja. Nekoliko je čimbenika koji onemogućavaju detekciju požara. Najčešći je naoblaka, pri čemu čak i oblaci manji od veličine piksela, a koji se nalaze iznad vruće površine, mogu promjeniti temperaturu piksela. Upravo zbog toga algoritam za detekciju požara trebao bi se koristiti samo za piksele u kojima nema oblaka, dakle prije detekcije požara treba primjeniti masku oblaka. Drugi važan faktor je razlika u zračenju u području $3.9 \mu\text{m}$ noću u odnosu na dan. Zbog tih razlika granične vrijednosti temperature trebaju biti različite za dan i noć. Velike koncentracije CO₂ također snižavaju temperaturu i mogu biti prepreka u prepoznavanju vrućih točaka. U literaturi se također može pronaći podatak da područja u kojima su u jednom pikselu kombinirani vodena i kopnena površina također otežavaju detekciju požara, što je kod nas slučaj za obalne piksele te za mnoge otoke. Razlog tome je refleksija sunčevog zračenja od vodene površine, koja može bitno utjecati na podatak o zračenju u kanalu $3.9 \mu\text{m}$. Pritom prisutnost vodene površine može biti razlogom detekcije požara tamo gdje ga nema. Vezano uz to, primjećeno je da postoji sistematska pogreška u području velikih jezera, kao što je na primjer Skadarsko jezero na granici Crne Gore i Albanije gdje se sredinom dana, zbog odbijeska sunca u jezeru, reflektirana komponenta kanala $3.9\mu\text{m}$ toliko poveća da vrijednost izračunate temperature prelazi graničnu vrijednost za požare, kao što je vidljivo na slici 4.13.



Slika 4.13: Pogrešna detekcija u području Skadarskog jezera.

Najčešća područja u kojima se kod nas javlja temperatura granična za požare, a da požar pri tom nije registriran, dakle područja pogrešne detekcije, su područje na krajnjem istoku Hrvatske kao i unutrašnjost Dalmacije. Prepostavka je da je razlog tome vrlo visoka temperatura kao i vrsta tla. Naime, u području unutrašnjosti Dalmacije radi se uglavnom o kamenom tlu, nepokrivenom vegetacijom dok je u Slavoniji ljeti suha zemlja. Primjer takve pogrešne detekcije prikazan je na slici 4.14.



Slika 4.14: Pogrešna detekcija u području unutrašnjosti Dalmacije i u Slavoniji.

Može se zaključiti da bi za uspješnu detekciju vrućih točaka sa satelita trebalo riješiti još neke probleme, osim uključivanja maske oblaka. Trebalo bi pronaći način da se izuzmu pikseli u kojima se nalaze oblaci manji od veličine piksela i isključiti tanke ciruse (koji često nisu uključeni u masku oblaka). Trebalo bi riješiti problem refleksije na vodenim površinama te problem detekcije u onim pikselima koji sadrže i vodenu i kopnenu površinu. Također postoji i problem nehomogenih površina, kao što je slučaj u planinama te prepoznavanja požara u vrijeme sumraka i zore kad se vrijednosti refleksije u kanalu 3.9 μm naglo mijenjaju.

5 ZAKLJUČAK

U radu su obrađene tri različite teme: prepoznavanje konvektivnih oblaka, prepoznavanje magle i niskih oblaka te otkrivanje požara. Povezuje ih multispektralna analiza satelitskih slika, koja omogućuje razlikovanje konvektivnih ili pak niskih oblaka od drugih oblaka, a također omogućuje i prepoznavanje vrućih točaka koje su indikacija postojanja požara. U istraživanju su korišteni satelitski podaci s MSG satelita. Za usporedbu sa satelitskim podacima korišteni su podaci o maksimalnoj refleksivnosti radara na Bilogori, podaci o električnim pražnjenjima iz LINET mreže te podaci mjerena na sinoptičkim postajama.

Kad je riječ o konvektivnom razvoju, motivacija za istraživanje bila je činjenica da je prepoznavanje potencijalno opasnih konvektivnih oblaka, njihovo praćenje i prognoza njihovog razvoja jedan od najzahtjevnijih zadataka u operativnoj prognostičkoj službi. S druge strane, konvektivni oblaci spadaju u meteorološke fenomene malih dimenzija i razmjerno kratkog životnog vijeka, s vrlo složenim fizikalnim procesima koji ih formiraju, održavaju i razaraju, što ih čini teško predvidljivim pomoću operativnih numeričkih modela. U tom segmentu veliki doprinos mogu dati satelitski podaci.

U ovom se radu pokazalo na koji se način satelitski podaci mogu primijeniti u prepoznavanju pojedinih faza razvoja konvektivnih oblaka. Tako u pred-konvektivnoj fazi razlike temperature u kanalima 6.2 i 7.3 μm sadrži informaciju o stabilnosti, odnosno nestabilnosti atmosfere. U ranoj fazi razvoja konvektivne stanice važno je pravovremeno prepoznavanje početka odnosno inicijacije konvekcije. Iako se tradicionalno prepoznavanje konvektivnih oblaka temeljilo na podacima u infracrvenom dijelu spektra, zbog njihove dostupnosti tijekom 24 sata, ovdje se pokazalo da se upotrebom podataka u solarnim kanalima omogućuje ranije i točnije prepoznavanje konvektivnih oblaka, ali i praćenje njihovog životnog ciklusa. Metoda za prepoznavanje konvektivnih oblaka, predstavljena u ovom radu, temelji se na praćenju razlike refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm . Za konvektivne oblake ta je razlika pozitivnog predznaka i velikog iznosa jer su konvektivni oblaci gusti oblaci čiji je albedo u kanalu 0.6 μm često i viši od 90%, a led na vrhovima čini refleksiju u kanalu 3.9 μm vrlo malom. Iz pokazanih primjera može se zaključiti da razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i 3.9 μm detektira male konvektivne stanice u početnoj fazi razvoja. To vrijedi za situacije

razvoja konvekcije u čistom zraku odnosno u uvjetima lijepog vremena. Pokazano je da se signal u razlici refleksivnosti javlja dok je radarski odraz još vrlo slab.

Promjena razlike refleksivnosti, s početnih 40% na 60 ili 70% nakon 15 minuta, najčešće se može povezati s naglim razvojem konvektivne stanice. Pokazalo se da su upravo to stanice na koje treba obratiti pažnju. Naime porast razlike refleksivnosti može s jedne strane biti uzrokovani naglim porastom albeda u kanalu $0.6 \mu\text{m}$, ili pak smanjenjem refleksivnosti u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ kao posljedica zaledivanja. U ranoj fazi razvoja konvektivnog oblaka razlike refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ usporediva je s radarskim odrazom. To daje posebnu vrijednost ovoj metodi jer se podacima o razlici refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ mogu nadomjestiti nedostajući radarski podaci ili nadopuniti radarska mjerena u područjima gdje je radar nepouzdan (npr. planinski predjeli). Vrijednosti radarskog odraza prestaju biti usporedive sa satelitskim podacima kad razlike refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ prijeđe 80%. Tada konvektivna stаница ulazi u zrelu fazu i na vrhu je sve više velikih kristala leda koji imaju vrlo malu mogućnost refleksije. Pojava razlike refleksivnosti veće od 90% posljedica je jakog zaledivanja na vrhu konvektivne stанице, odnosno pojave velikih ledenih kristala.

Do zanimljivog otkrića došlo se detaljnom analizom razlike kanala u usporedbi s pojedinačnim kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ te s temperaturama na vrhu oblaka, dobivenim iz kanala $10.8 \mu\text{m}$. Pokazalo se da se područje maksimuma razlike refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$, kao i područje najvećeg albeda u kanalu $0.6 \mu\text{m}$ nalaze jugozapadno od najhladnjeg dijela oblaka. To osobito vrijedi za oblake koji se razvijaju u zapadnoj ili jugozapadnoj visinskoj struji. Objasnjenje za to je efekt povećane refleksivnosti u kanalu $0.6 \mu\text{m}$ na onoj stani oblaka koja je okrenuta prema Suncu, a smanjene na strani koja je u sjeni. Neslaganje najhladnjeg dijela oblaka s područjem najveće razlike refleksivnosti može se objasniti pojavom velikih ledenih kristala na vrhu oblaka, zbog kojih je vrijednost reflektirane komponente u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ vrlo mala. Istodobno, u području gdje je temperatura vrhova najniža, razlika refleksivnosti je nešto manja, što bi moglo značiti da se u tom području na vrhu oblaka nalaze manji kristalići leda, zbog vrlo jake uzlazne struje u oblaku. To potvrđuje i usporedba položaja najhladnjeg dijela oblaka s položajem najvećih vrijednosti reflektirane komponente kanala $3.9 \mu\text{m}$ iz koje se vidi da se područje najveće refleksivnosti poklapa s hladnim dijelom oblaka. Razlog tome, osim u fizikalnim procesima, leži i u načinu računanja refleksivnosti u kanalu $3.9 \mu\text{m}$.

Iz svih prikazanih primjera može se zaključiti da je najaktivniji dio oblaka onaj u kojem je razlika refleksivnosti kanala 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$ između 60 i 80% . Ako se promatraju dva piksela iste temperature, ali u kojima je efektivni radius čestica različit, onda pikseli s manjim radiusom čestica, dakle oni veće refleksivnosti u kanalu $3.9 \mu\text{m}$, predstavljaju opasnije oblake, a također i mlade oblake u kojima je stvoreno manje leda. Na taj način refleksivnost u kanalu $3.9 \mu\text{m}$, kao i razlika refleksivnosti u kanalima 0.6 i $3.9 \mu\text{m}$, omogućuju praćenje životnog ciklusa konvektivnih oblake, odnosno omogućuju razlikovanje faze razvoja od zrele faze ili faze odumiranja.

Osim detektiranja konvektivnih oblake i praćenja njihovog razvojnog ciklusa, pokazalo se da satelitski podaci omogućuju praćenje smjera i brzine premještanja konvektivnih (ali i drugih) oblake. Tako je ovdje prikazana metoda koja računanje brzine premještanja temelji na sukcesivnim slikama u kanalu $10.8 \mu\text{m}$, a pomoći izračunatih brzina moguće je predvidjeti i položaj konvektivne stanice u nekom bliskom budućem terminu.

Za prepoznavanje niskih oblake i magle noću korištena je razlika temperature u kanalima 10.8 i $3.9 \mu\text{m}$, a kao prag je uzeta vrijednost razlike od 3 K . Kao dodatni kriterij uvedena je razlika između temperature u kanalu $10.8 \mu\text{m}$ i mjerene temperature pri tlu. Pokazalo se da je ta razlika manja od 4 K za područja pod maglom, ako je prethodno na tom području detektirano postojanje magle/stratusa pomoći razlike kanala. U metodu za prepoznavanje magle danju uključen je i kanal $1.6 \mu\text{m}$. Usporedba s motrenjima na postajama pokazala je uspješnost obje metode uz ograničenja u vrijeme zore i sumraka.

Kad su u pitanju šumski požari, ključnu ulogu za prepoznavanje igra kanal $3.9 \mu\text{m}$. No, za razliku od primjene u detekciji konvekcije, gdje se promatra reflektirana komponenta zračenja, za požare se, kao i kod prepoznavanja magle noću, uzima termička, dakle emitirana komponenta. Temperatura u kanalu $3.9 \mu\text{m}$ dobra je indikacija tzv. vrućih točaka, što se pokazalo na brojnim primjerima požara. Međutim, kad su obrađeni podaci za čitavu požarnu sezonu 2009. godine, pri čemu su promatrani svi požari veći od 1 ha , rezultati nisu bili obećavajući. Samo je 7% požara bilo uočljivo u satelitskim podacima, dok kod ostalih detekcija nije bila moguća. Najčešći razlog za nemogućnost prepoznavanja požara bili su oblici iznad požarišta, zatim u nekim slučajevima premala površina požarišta, a velik broj požara u vrijeme zore, sumraka pa čak i noći također nije bio vidljiv. Ovakav rezultat ukazuje na to da sustav za rano upozoravanje na požare ne može biti temeljen samo na satelitskim

podacima s geostacionarnog satelita zbog premale vjerojatnosti detekcije. Iako u nekim slučajevima i požari manji od 10 ha mogu biti uočeni u satelitskim podacima, za 2009. godinu udio detektiranih požara manjih od 10 ha u ukupnom broju takvih malih požara bio je manji od 5%. Istodobno oko 50% od ukupnog broja velikih požara, površine veće od 100 ha, bilo je prepoznato.

Na kraju se može zaključiti da je od tri prikazane mogućnosti korištenja kombinirane analize satelitskih slika najuspješnija ona u prepoznavanju i praćenju konvektivnih oblaka. Upravo zbog toga je ta tematika najdetaljnije obrađena u ovom radu, dok su prepoznavanje magle i lociranje požara obrađeni s manje detalja i uglavnom informativno.

Zanimljivo je primjetiti i da se u sve tri teme kao ključan kanal pojavljuje SEVIRI kanal valne duljine 3.9 μm . U detekciji konvekcije te magle/stratusa danju koristi se njegova reflektirana komponenta dok se za lociranje požara i prepoznavanje magle/stratusa noću koristi termički dio tog kanala. Time je ovaj rad naglasio i važnost tog spektralnog područja u motrenju mnogih pojava u atmosferi i na tlu.

6 LITERATURA

- Akima, H. (1996): Algorithm 760; rectangular-grid-dana surface fitting that has the accuracy of a bicubic polynomial. *ACM Trans. Math. Soft.*, **22**, 357-361.
- Bader, M.J., Forbes, G.S., Grant, J.R., Lilley, R.B.E., i Waters, A.J. (urednici) (1995): Images in Weather Forecasting. University Press, Cambridge, 499 pp.
- Belušić, D., Grisogono, B. i Bencetić Klaić, Z. (2007): Atmospheric origin of the devastating coupled air-sea event in the east Adriatic. *J. Geophys. Res.*, **112**, D17111, doi:10.1029/2006JD008204.
- Belušić, D. i Strelec Mahović, N. (2009): Detecting and following atmospheric disturbances with a potential to generate meteotsunamis in the Adriatic. *Phys. Chem. Earth*, **34**, 918–927.
- Betz H.D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W.P., Defer, E., Dziewit, Z. i Konarski, J. (2009): LINET - An international lightning detection network in Europe. *Atmos. Res.*, **91**, 564-573.
- Cermak, J. i Bendix, J. (2007): Dynamical nighttime fog/low stratus detection based on Meteosat SEVIRI data: A feasibility study. *Pure Appl. Geophys.*, **164**, 1179-1192.
- COMET (2010): Multispectral Satellite Applications: RGB Products Explained.
http://www.meted.ucar.edu/npoess/multispectral_topics/rgb/
- Cotton, W.R. i Anthes, R.A. (1989): Storm and Cloud Dynamics. Academic Press, San Diego, CA, 883 pp.
- Ellrod, G.P. (2007): Satellite Remote Sensing of Fog and Low Clouds.
http://www.nwas.org/committees/rs/Fog_Newsletter_Article_Mar07_exp.pdf
- EUMeTrain (2009): Operational Use of RGB – CAL Module.
<http://www.satreponline.org/rgb/>

EUMETSAT (2010): Active Fire Monitoring with MSG; Algorithm Theoretical Basis Document. EUMETSAT Doc.No.: EUM/MET/REP/07/0170.

Flannigan, M. i Vonderhaar, T. (1986): Forest-fire monitoring using NOAA satellite AVHRR. *Can. J. For. Res.*, **16(5)**, 975-982.

Haiden, T., Kann, A., Pistotnik, G., Stadlbacher, K. i Wittmann, C. (2010): Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA): System description. Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna, Austria.

Heymsfield, G.M., Blackmer Jr., R.H. i Schotz, S. (1983a): Upper level structure of Oklahoma tornadic storms on 2 May 1979, Pt.1: Radar and satellite observations. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1740-1755.

Heymsfield, G.M., Szejwach, G., Schotz, S. i Blackmer Jr., R.H. (1983b): Upper level structure of Oklahoma tornadic storms on 2 May 1979, Pt.2: Proposed explanation of „V“ pattern and internal warm region in infrared observations. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1756-1767.

Hunt, G.E. (1973): Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infra-red thermal window wavelengths. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **99**, 346-369.

Iršić, M., Poredoš, A., Zgonc, T. i Strelec Mahović, N. (2004): CEI Nowcasting tools based on remote sensing data in Croatia and Slovenia. *The 2004 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Prag, Czech Republic, 31. May – 04. June 2004, Proceedings*, 345-351.

Ivančan-Picek, B. i Strelec Mahović, N. (1997): Konvektivne oluje 22. lipnja 1996. u zapadnoj Hrvatskoj. *Izvanr. meteorol. hidrol. prilike Hrvat.*, **20**, 25-31.

Jolivet, D. i Feijt, A.J. (2003): Cloud thermodynamic phase and particle size estimation using the 0.67 and 1.6 μm channels from meteorological satellites. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **3**, 4461-4488.

Kerkmann, J., Rosenfeld, D., Lutz, H.J., Prieto, J. i König, M. (2004): Introduction to Channel 04 (3.9 μm). http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/msg_channels.php

Kerkmann, J., Rosenfeld, D., Bridge, G. (2005): RGB part 04 - RGB Composites with Channels 01-11 and their interpretation.

http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/msg_channels.php

Kidder, S. i Vonder Haar, T.H. (1995): Satellite Meteorology: An introduction, Academic Press, San Diego, CA, 466 pp.

Knap, W.H., Stammes, P i Koelemeijer, R.B.A. (2002): Cloud thermodynamic-phase determination from near-infrared spectra of reflected sunlight. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 83-96.

König, M. i de Coning, E. (2009): The MSG Global Instability Indices product and its use as a Nowcasting tool. *Wea. Forecasting*, **24**, 272-285.

Levizzani, V. i Setvák, M. (1996): Multispectral, highresolution satellite observations of plumes on top of convective storms. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 361–369.

Lindsey, D.T., Hillger, D.W., Grasso, L., Knaff, J.A. i Dostalek, J.F. (2006): GOES climatology and analysis of thunderstorms with enhanced 3.9 μm reflectivity. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2342-2353.

McCann, D.W. (1983): The enhanced-V: A satellite observable severe storm signature. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 887-894.

Mecikalksi, J.R. i Bedka, K.M. (2006): Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 49-78.

Mikuš, P. (2010): Određivanje dominantnih tipova vremena i režima strujanja za vrijeme konvektivne aktivnosti nad Hrvatskom, Diplomski rad, Geofizički odsjek, PMF, Sveučilište u Zagrebu, 54 pp.

Nakajima, T. i King, M.D. (1990): Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1878–1893.

Roberts, R.D. i Rutledge, S. (2003): Nowcasting storm initiation and growth using GOES-8 and WSR-88D data. *Wea. Forecasting*, **18**, 562–584.

Roesli, H., Kerkmann, J., Rosenfeld D. i König, M. (2004): Introduction to Differences and RGB Composites.

http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/msg_channels.php.

Rosenfeld, D. i Lensky, I.M. (1998): Spaceborne sensed insights into precipitation formation processes in continental and maritime clouds. *B. Am. Meteorol. Soc.*, **79**, 2457–2476.

Rosenfeld, D., Cattani, E., Melani, S. i Levizzani, V. (2004a): Considerations on daylight operation of 1.6 μm vs 3.7 μm channel on NOAA and METOP Satellites. *B. Am. Meteorol. Soc.*, **85**, 873-881.

Rosenfeld, D., Lensky, I. i Kerkmann, J. (2004b): Insights into Cloud Processes.

http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/msg_channels.php.

Rosenfeld, D., Lensky, I., Kerkmann, J., Tjemkes, S., Govaerts, Y. i Roesli, HP. (2005): Conversion from counts to radiances.

http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/msg_channels.php.

Schmetz, J., Pili, P., Tjemkes, S., Just, D., Kerkmann, J., Rota S. i Ratier, A. (2002): An introduction to Meteosat Second Generation (MSG). *B. Am. Meteorol. Soc.*, **83**, 977 - 992.

Schreiner, A.T., Schmit, T.J. i Menzel, W.P. (2001): Observed trends of clouds based on GOES sounder data. *J. Geophys. Res.*, **106**, 20 349–20 363.

Schultz, D.M., Schumacher, P.N., Doswell III, C.A. (2000): The intricacies of instabilities. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 4143-4148.

Setvak, M. i Doswell III, C.A. (1991): The AVHRR channel 3 cloud top reflectivity of convective storms. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 841-847.

Setvak, M., Rabin, R.M., Levizzani, V. i Doswell III, C.A. (1996): Relations between increased 3.7/3.9 micron reflectivity above U.S. Great Plains thunderstorms from NOAA/AVHRR and GOES-8 and internal storm structure from NEXRAD radar. Proceedings, EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' Conference, 16-20 Sept. 1996, Vienna, Austria.

- Setvak, M., Rabin, R.M., Doswell III, C.A. i Levizzani, V. (2003): Satellite observations of convective storm tops in the 1.6, 3.7 and 3.9 μm spectral bands. *Atmos. Res.*, **67-68**, 607-627.
- Setvak, M., Lindsey, D.T., Novak, P., Rabin, R.M., Wang, P.K., Kerkmann, J., Radova, M. i Štastka, J. (2008): Cold-ring shaped storms in Central Europe. Proceedings, The 2008 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 08-12 Sept. 2008, Darmstadt, Germany.
- Sherwood, S.C. (2000): On moist instability. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 4139-4142.
- Stiperski, I. (2005): The causes of supercell development on 30 August 2003 - A case study. *Geofizika*, **22**, 83-104.
- Strelec Mahović, N. i Drvar, D. (2004): Hailstorm on 04 July 2003 - a case study. *Hrv. meteor. časopis*, **40**, 381-384.
- Strelec Mahović, N. (2005): Operational use of Meteosat-8 SEVIRI data and derived nowcasting products. Proceedings, The 2005 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 19-23. Sept. 2005, Dubrovnik, Croatia.
- Strelec Mahović, N. (2007): Analiza Meteosat-9 satelitskih snimki požara na Kornatu 30. kolovoza 2007. *Hrv. meteor. časopis*, **42**, 79-83.
- Strelec Mahović, N., Horvath, A. i Czirmaz, K. (2007): Numerical simulation of severe convective phenomena over Croatian and Hungarian territory. *Atmos. Res.*, **83**, 121-131.
- Strelec Mahović, N. (2008): Application of Meteosat SEVIRI channel differences 0.6-1.6 and 0.6-3.9 micron in convective cells detection. Proceedings, The 2008 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 08-12 Sept. 2008, Darmstadt, Germany.
- Strelec Mahović, N. (2009): Detecting forest fires at the Croatian Adriatic coast by means of 3.9 μm SEVIRI data. Proceedings, First International Conference on Remote Sensing Techniques in Disaster Management and Emergency Response in the Mediterranean Region, Zadar, 22-24 Sept 2008, 127-132.
- Strelec Mahović, N. i Zeiner, B. (2009): Application of Meteosat SEVIRI channel difference 0.6 μm - 1.6 μm in convective cell detection. *Atmos. Res.*, **93**, 270-276.

Strelec Mahović, N. (2010a): Prognoza i praćenje razvoja grmljavinskih oblaka pomoću satelitskih mjerena i drugih daljinskih motrenja. Zbornik radova, II Konferencija Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa, 14.-15. listopada 2010., Zagreb.

Strelec Mahović, N. (2010b): Detecting forest fires in Croatia – testing the MPEF Active Fire Monitoring (FIR) product. Proceedings, 2010 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 20-24 Sept. 2010, Cordoba, Spain.

Šepić, J., Vilibić, I. i Belušić, D. (2009): Source of the 2007 Ist meteotsunami (Adriatic Sea). *J. Geophys. Res.*, **114**, 1-14.

Vilibić, I., Šepić, J., Ranguelov, B., Strelec Mahović, N i Tinti, S. (2010): Possible atmospheric origin of the 7 May 2007 western Black Sea shelf tsunami event. *J. Geophys. Res.*, **115**, C07006, doi:10.1029/2009JC005904.

Vučetić. V., Ivatek Šahdan S., Tudor, M., Kraljević, L., Ivančan-Picek, B. i Strelec Mahović, N. (2007): Analiza vremenske situacije tijekom kornatskog požara 30. kolovoza 2007. *Hrv. meteor. časopis*, **42**, 41-65.

Weaver J.F. i Purdom, J.F. (1995): Observing forest fires with the GOES-8 3.9 μm imaging channel. *Wea. Forecasting*, **10**, 803-808.

Zwatz-Meise, V. (2004): Introduction to Solar Channels.

http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/msg_channels.php.

PRILOG 1: Popis kratica i pojmove

AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>	radiometar visoke razlučivosti na NOAA polarnim satelitima
CAL modul	<i>Computer Aided Learning</i>	modul za učenje putem računala
CAPE	<i>Convective Available Potential Energy</i>	mjera energije raspoložive za konvekciju
Cb		kumulonimbus
COMET		američki program u sklopu kojeg se izrađuje materijal za obuku iz područja atmosferskih znanosti
DHMZ		Državni hidrometeorološki zavod
Eumetcast		sustav za diseminaciju satelitskih podataka i produkata korisnicima
EUMeTrain		trening projekt u sklopu kojeg se izrađuje materijal za obuku korisnika satelitskih podataka, djelomično ga sponzorira EUMETSAT, DHMZ je aktivno uključen u projekt od 2004. godine
EUMETSAT	<i>European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites</i>	Europska agencija za iskorištavanje meteoroloških satelita
Γ		stopa ohlađivanja
Γ_s		pseudoadijabatička stopa ohlađivanja
Γ_d		suhoodijabatička stopa ohlađivanja
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>	američki geostacionarni satelit
GrADS	<i>Grid Analysis and Display System</i>	programske pakete za vizualizaciju meteoroloških podataka
HRVIS	<i>High Resolution Visible</i>	širokopojasni kanal visoke prostorne razlučivosti u vidljivom dijelu spektra

INCA	<i>Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis</i>	sustav za analizu i nowcast temeljen na podacima motrenja i mezo-modelu
IR	<i>Infra-Red</i>	zračenje u infracrvenom (termičkom) dijelu spektra
MCS	<i>Mesoscale Convective System</i>	mezo-skalni konvektivni sustav
Meteosat		serija geostacionarnih satelita agencije EUMETSAT
METOP		polarni satelit agencije EUMETSAT
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>	spektroradiometar – instrument na polarnim satelitima
MSG	<i>Meteosat Second Generation</i>	Meteosat satelit druge generacije
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Agency</i>	Američka agencija za oceane i atmosferu koja upravlja polarnim satelitima
NWC SAF	<i>Satellite Application Facility on Support to Nowcasting and Very Short Range Forecasting</i>	grupa zemalja članica EUMETSAT-a organizirana u svrhu istraživanja i izrade operativnih satelitskih produkata za vrlo kratkoročnu prognozu vremena
piksel	<i>pixel</i>	u računalnoj grafici označava najmanju (osnovnu) jedinicu slike
RGB	<i>Red-Green-Blue</i>	u optici i računalnoj grafici: kompozit osnovnih boja - crvene, zelene i plave
RDT	<i>Rapid Developing Thunderstorms</i>	operativni produkt NWC SAF projekta za praćenje razvoja i premještanja grmljavinskih oluja
SEVIRI	<i>Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager</i>	instrument na MSG satelitima kojim se mjeri zračenje
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>	univerzalno vrijeme, u Hrvatskoj je lokalno vrijeme ljeti UTC + 2 h, a zimi UTC + 1 h
VIS	<i>Visible</i>	zračenje u vidljivom (solarnom) dijelu spektra
WMO	<i>World Meteorological Organisation</i>	Svjetska meteorološka organizacija

ŽIVOTOPIS

Ime i prezime **Nataša Strelec Mahović**

Osobni podaci

Datum rođenja	28.10.1969.
Mjesto rođenja	Zagreb, Hrvatska
Ime oca	Antun Strelec
Ime majke	Zdenka Strelec rođ. Perović
Bračno stanje	udana, 2 djece (12 i 10 godina)
Adresa	Poljana Z. Dražića 10, Zagreb
e-mail	natas.a.strelec.mahovic@cirus.dhz.hr

Podaci o naobrazbi

1988. Završen Matematičko-informatički obrazovni centar (MIOC), u Zagrebu (današnja XV Gimnazija)
1992. Završen dodiplomski studij Fizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, Geofizika s meteorologijom, Usmjerenje: Meteorologija, Stečeno zvanje: Diplomirani inžinjer fizike
1996. Završen poslijediplomski studij na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu. Magistarski rad: Statistical correlation between satellite data and various meteorological parameters. Voditeljice: dr.sc. Veronika Zwatz-Meise, dr. sc. Vesna Jurčec. Stečeno zvanje: Magistar prirodnih znanosti iz polja fizike, Fizika atmosfere.

Podaci o poslodavcu i zanimanju

- 1992.-1993. Znanstveni novak na projektu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa, "Oluje i prirodne katastrofe u Hrvatskoj", voditeljice dr.sc. Vesne Jurčec
- 1993.-1997. Sinoptičar u Državnom hidrometeorološkom zavodu, Sektor za prognozu vremena
- 1997.-2003. Oblasni sinoptičar u Državnom hidrometeorološkom zavodu, Odjel za vremenske analize i prognoze
- 2003.-2010. Voditeljica Odsjeka za obradu daljinskih mjerjenja i meteorološke podloge
2010. - Voditeljica odsjeka za upozorenja i opću vremensku prognozu
Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, Grič 3
Odjel za vremenske analize i prognoze
Tel +385 1 4565 772
Fax +385 1 4565 757
E-mail natasa.strelec.mahovic@cirus.dhz.hr

Ostale aktivnosti

- 2002.- Delegat Republike Hrvatske u Znanstveno-tehničkom vijeću EUMETSAT-a
- 2002.-2004. Voditeljica radne grupe DHMZ-a na međunarodnom projektu "CEI Nowcasting System"
- 2003.- Predstavnica DHMZ-a u Znanstvenom vijeću za daljinska istraživanja HAZU
- 2004.-2005. Voditeljica radne grupe DHMZ-a na međunarodnom projektu "SatManu - C"
- 2004.-2006. Voditeljica radne grupe DHMZ-a na međunarodnom projektu "CONEX II"
- 2004.- Voditeljica radne grupe DHMZ-a na međunarodnom projektu "EUMeTrain"

Stipendije i studijski boravci u inozemstvu

1993. Stipendija austrijskog Ministarstva za Znanost i Istraživanja u trajanju od 3 mjeseca - ZAMG, Beč, Austrija, Odjel za satelitsku meteorologiju
1996. Stipendija austrijskog Ministarstva za Znanost i Istraživanja u trajanju od 6 mjeseci - ZAMG, Beč, Austrija, Odjel za satelitsku meteorologiju. Izrada magistarskog rada pod vodstvom dr. Veronike Zwatz-Meise

Strani jezici

Engleski: aktivno znanje, Njemački: aktivno znanje, Talijanski: pasivno znanje

Konferencije/ radionice/ seminari

1994. Int. Conference "Atmospheric Physics and Dynamics in the Analysis and Prognosis of Precipitation Fields", Rim, Italija, 15.-18. studenog 1994. (Usmeno izlaganje: Frontal analysis by means of isentropic high-resolution vertical cross-sections)
1996. XXI General Assembly of the European Geophysical Society, Den Haag, Nizozemska, 06.-10. svibnja 1996. (Usmeno izlaganje: Nowcasting possibilities of frontogenesis and frontolysis by means of Q-vector diagnostics combined with satellite images)
- 1996 Meteorological Satellite Data Users' Conference, Beč, Austrija, 16.-20. rujna 1996. (Usmeno izlaganje: Objective correlation of Meteosat images with various numerical parameters)
- ECMWF - International NWP seminar, Reading, V. Britanija, 9.-18. lipnja 1997.
1997. 3rd European Conference on Applications of Meteorology, Lindau, Njemačka, 23.-27. rujna 1997. (Usmeno izlaganje: Forecasting frontogenesis and frontolysis by means of Q-vector diagnostics combined with satellite images)
- 1997 Meteorological Satellite Data Users' Conference, Bruxelles, Belgija, 29. rujna – 3. listopada 1997. (Usmeno izlaganje: IR satellite images combined with the Q-vector normal component as a tool for forecasting frontogenesis and frontolysis)
- DWD – International NWP seminar, Langen, Njemačka, 10.-14. studenog 1997.

1998. XXIII General Assembly of the European Geophysical Society, Nica, Francuska, 20.-24. travnja 1998. (Poster: Cyclonic activity and severe jugo in the Adriatic)
- 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Pariz, Francuska, 25.-29. svibnja 1998. (Poster: Satellite images and vorticity fields in the analysis and forecast of Mediterranean cyclogenesis)
2002. Training workshop in Satellite meteorology, Langen, Njemačka, 02.-06. lipnja 2002.
2003. 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Weimar, Njemačka, 29. rujna – 03. listopada 2003.
- Training workshop in Satellite meteorology, Krakow, Poljska, 12.-16. studenog 2003.
2004. 2004 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Prag, Češka Republika, 31. svibnja - 04. lipnja 2004. (Poster: CEI Nowcasting tools based on remote sensing data in Croatia and Slovenia)
- NWC-SAF users' seminar, Madrid, Španjolska, 13.-16. lipnja 2004.
- EUMETSAT Licencing Agents workshop, Darmstadt, Njemačka, 26.-27. rujna 2004.
- III European Conference on Severe Storms & Workshop on Severe Convective Storms, Leon, Španjolska, 08.-12. studenog 2004. (Usmeno izlaganje: Numerical simulation of supercell by mesoscale models, in Croatia and Hungary)
2005. 2nd Meteosat Third Generation User Consultation Workshop, Locarno, Švicarska, 14.-16. travnja 2005.
- 28th International Conference on Alpine Meteorology (ICAM), Zadar, Hrvatska, 23.-27. svibnja 2005. (Poster: Hailstorm on 04 July 2003 – a case study)
- 2005 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Dubrovnik, 19.-23. rujna 2005. (poster: Operational Use of Meteosat-8 SEVIRI Data and Derived Nowcasting Products)
2007. 3rd Meteosat Third Generation User Consultation Workshop, Darmstadt, Njemačka, 04.- 06. prosinca 2007.
- 4th European Conference on Severe Storms, Trst, Italija, 10-14. rujna 2007. (Poster: Application of channel difference 0.6 μm-1.6 μm and 3.9 μm channel in automatic convective cells detection)
2008. 2008 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Darmstadt, Njemačka, 08-12. rujna 2008. (Usmeno izlaganje: Application of Meteosat SEVIRI channel differences 0.6-1.6 and 0.6-3.9 micron in convective cells detection)
- First International Conference on Remote Sensing Techniques in Disaster Management and Emergency Response in the Mediterranean Region, Zadar, 22.-24. rujna 2008. (Usmeno izlaganje: Detecting forest fires at the Croatian Adriatic coast by means of 3.9 μm SEVIRI data)
2009. 2009 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Bath, UK, 21.-25. rujna 2009. (Usmeno izlaganje: Predicting Adriatic meteotsunamis using satellite-based nowcast)

2010. 2010 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Cordoba, Španjolska, 20.-24. rujna 2010. (Poster: Detecting forest fires in Croatia – testing the MPEF Active Fire Monitoring (FIR) product)

II Konferencija Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa, Zagreb, 14.-15. listopada 2010. (Usmeno izlaganje: Prognoza i praćenje razvoja grmljavinskih oblaka pomoću satelitskih mjerena i drugih daljinskih motrenja)

Suvoditeljica na diplomskom radu:

Petra Mikuš (2010): Određivanje dominantnih tipova vremena i režima strujanja za vrijeme konvektivne aktivnosti nad Hrvatskom

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

Znanstveni radovi u CC časopisima:

1. Strelec Mahović, N., Jann, A. i Zwatz-Meise, V. (1997): Analysis of frontogenesis and frontolysis by means of Q-vector diagnostics combined with satellite images, *Meteorol. Atmos. Phys.*, **42**, 23-31.
2. Brzović, N. i Strelec Mahović, N. (1999): Cyclonic activity and severe Jugo in the Adriatic, *Phys. Chem. Earth, Part B*, **24**, 653-657.
3. Strelec Mahović, N., Horvath, A. i Czirmaz, K. (2007): Numerical simulation of severe convective phenomena over Croatian and Hungarian territory. *Atmos. Res.*, **83**, 121-131.
4. Strelec Mahović, N. i Zeiner, B. (2009): Application of Meteosat SEVIRI channel difference 0.6 μm - 1.6 μm in convective cell detection. *Atmos. Res.*, **93**, 270-276.
5. Belušić, D. i Strelec Mahović, N. (2009): Detecting and following atmospheric disturbances with a potential to generate meteotsunamis in the Adriatic. *Phys. Chem. Earth*, **34**, 918–927.
6. Vilibić, I., Šepić, J., Ranguelov, B., Strelec Mahović, N i Tinti, S. (2010): Possible atmospheric origin of the 7 May 2007 western Black Sea shelf tsunami event. *J. Geoph. Res.*, **115**, C07006, doi:10.1029/2009JC005904.

Znanstveni radovi u časopisima s međunarodnom recenzijom:

1. Glasnović, D., Čačić, I. i Strelec, N. (1994): Methodology and application of the High Resolution Isentropic Diagnostic Model (HRID). *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik*, **10**, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, Publ.Nr.357, 109-136.
2. Strelec N. (1995): Correlation of vorticity advection values and grey shade values in infrared satellite images. *Geofizika*, **12**, 33-41.
3. Strelec Mahović, N. i Drvar, D. (2004): Hailstorm on 04 July 2003 - a case study. *Hrv. meteor. časopis*, **40**, 381-384.
4. Vučetić, V., Ivatek Šahdan, S., Tudor, M., Kraljević, L., Ivančan-Picek, B. i Strelec Mahović, N. (2007): Analiza vremenske situacije tijekom kornatskog požara 30. kolovoza 2007. *Hrv. meteor. časopis*, **42**, 41-65.

Ostali znanstveni i stručni radovi:

1. Ivančan-Picek, B., Tutiš, V. i Strelec, N. (1993): Olujna bura na hrvatskom primorju 27.-29. prosinca 1992. *Izvanr. meteorol. hidrol. prilike Hrvat.*, **16**, 17-26.
2. Strelec, N. i Glasnović, D. (1994): Snježno nevrijeme u Hrvatskoj potkraj studenog 1993. *Izvanr. meteorol. hidrol. prilike Hrvat.*, **17**, 47-62.
3. Glasnović, D., Strelec, N. i Branković, Č. (1994): Objektivna dijagnoza i prognoza pojave obilnog snijega sredinom studenog 1993. u Hrvatskoj. *Izvanr. meteorol. hidrol. prilike Hrvat.*, **17**, 21-45.
4. Strelec, N. (1996): Statistical correlation between satellite data and various meteorological parameters. Magistarski rad – sažetak. *Hrv. meteor. časopis*, **31**, 129-130.
5. Brzović, N. i Strelec Mahović, N. (1997): Ciklonalna aktivnost nad Jadranom početkom travnja 1996. *Izvanr. meteorol. hidrol. prilike Hrvat.*, **20**, 17-24.
6. Ivančan-Picek, B. i Strelec Mahović, N. (1997): Konvektivne oluje 22. lipnja 1996. u zapadnoj Hrvatskoj. *Izvanr. meteorol. hidrol. prilike Hrvat.*, **20**, 25-31.
7. Strelec Mahović, N. (2007): Analiza Meteosat-9 satelitskih snimki požara na Kornatu 30. kolovoza 2007. *Hrv. meteor. časopis*, **42**, 79-83.
8. Strelec Mahović, N. i Zeiner, B. (2007): Application of Meteosat channel difference 0.6 μm -1.6 μm and 3.9 μm channel to improve automatic convective cells detection. 4th European Conference on Severe Storms, Trieste, Italy, 10-14 Sept. 2007, Extended abstract.

Radovi u zbornicima skupova:

1. Strelec N. i Glasnović, D. (1994): Frontal analysis by means of isentropic high-resolution vertical cross-sections. Proceedings, “Atmospheric Physics ad Dynamics in the Analysis and Prognosis of Precipitation Fields”, Rome, Italy, 15-18 November 1994, 153-156.
2. Zwatz-Meise, V., Jann, A., Winkler, R., Glasnović, D., Čačić, I. i Strelec, N. (1994): Diagnosis of weather systems, cloud structures, and rainfall in satellite images with help of vertical cross sections. Proceedings, 10th Meteosat Scientific Users’ Conference, Cascais, Portugal, 5-9 September 1994, 193-202.
3. Strelec, N. (1996): Objective correlation of meteosat images with various numerical parameters. Proceedings, The 1996 Meteorological Satellite data Users’ Conference, Vienna, Austria, 16-20 Sept. 1996, 151-158.
4. Strelec Mahović, N. (1997): Forecasting frontogenesis and frontolysis by means of Q-vector diagnostics combined with satellite images. Proceedings, 3rd European Conference on Applications of Meteorology, Lindau, Germany, 23-26 Sept. 1997, 61-63.
5. Strelec Mahović, N. (1997): IR satellite images combined with the Q-vector normal component as a tool for forecasting frontogenesis and frontolysis. Proceedings, The 1997

Meteorological Satellite data Users' Conference, Brussels, Belgium, 29 Sept.- 03 Oct. 1997, 327-333.

6. Iršić, M., Poredoš, A., Zgonc, T. i Strelec Mahović, N. (2004): CEI Nowcasting tools based on remote sensing data in Croatia and Slovenia. Proceedings, The 2004 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Prag, Czech Republic, 31. May – 04. June 2004, 345-351.
7. Strelec Mahović, N. (2005): Operational use of Meteosat-8 SEVIRI data and derived nowcasting products. Proceedings, The 2005 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Dubrovnik, Croatia, 19-23 Sept. 2005, 201-204.
8. Plačko-Vršnak, D., Strelec Mahović, N. i Drvar, D. (2007): Case study on Genoa cyclone with Mistral 13-15 February 2005. Proceedings, International Conference on Alpine Meteorology, Chambéry, France, 4-8 June 2007.
9. Strelec Mahović, N. (2008): Application of Meteosat SEVIRI channel differences 0.6-1.6 and 0.6-3.9 micron in convective cells detection. Proceedings, The 2008 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Darmstadt, Germany, 08-12 Sept. 2008.
10. Strelec Mahović, N. (2009): Detecting forest fires at the Croatian Adriatic coast by means of 3.9 μm SEVIRI data. Proceedings, First International Conference on Remore Sensing Techniques in Disaster Management and Emergency Response in the Mediterranean Region, Zadar, Croatia, 22-24 Sept. 2008, 127-132.
12. Strelec Mahović, N. i Belušić, D. (2009): Predicting Adriatic meteotsunamis using satellite-based nowcast. Proceedings, The 2009 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Bath, UK, 21-25 Sept. 2009.
13. Strelec Mahović, N. (2010): Detecting forest fires in Croatia – testing the MPEF Active Fire Monitoring (FIR) product. Proceedings, The 2010 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Cordoba, Spain, 20-24 Sept. 2010.
14. Strelec Mahović, N. (2010): Prognoza i praćenje razvoja grmljavinskih oblaka pomoći satelitskih mjeranja i drugih daljinskih motrenja. Zbornik radova, II Konferencija Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa, Zagreb, Hrvatska, 14.-15. listopada 2010.