Analiza utjecaja katabatičkog strujanja na pojavu magle nad Zagrebom

Klaić, Martin

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:682655

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Martin Klaić

Diplomski rad

Analiza utjecaja katabatičkog strujanja na pojavu magle nad Zagrebom

Voditelj: doc. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak

Zagreb, 2015.

Svesrdno se zahvaljujem mentorici doc. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak na ideji, velikom trudu, iznimnom strpljenju i neizmjerno korisnim savjetima tijekom izrade ovoga rada. Njezino vođenje ovog diplomskog rada je uvelike olakšalo njegovu izradu, te u meni potaknulo želju za daljnjim znanstvenim radom.

Također se zahvaljujem osoblju Državnog hidrometeorološkog zavoda, zračne luke Zagreb i Geofizičkog odsjeka PMF-a na ustupljenim prizemnim mjerenjima.
Zahvaljujem se Petri Mikuš Jurković na pomoći pri dobivanju satelitskih podataka.
Zahvaljujem se članovima komisije, dr. sc. Antunu Markiju i mr. sc. Ines Ivančić, na ispravkama i savjetima za dobivanje konačnog oblika diplomskog rada.

Proračuni numeričkim modelom (WRF-ARW) provedeni su na računalu Geofizičkog odsjeka PMF-a.

I na kraju, veliko hvala mojim roditeljima, baki i djedu jer su mi omogućili ove divne studentske dane, sestri i djevojci na podršci i razumijevanju, prijateljima na smijehu, te kolegicama s godine na svoj pomoći i zajedničkom radu.

Sadržaj

1. Uvod 1

1.1. Magla 1

1.2. Mezoskalne pojave: urbani toplinski otok i anabatički/katabatički vjetar 4

1.3. Karakteristike istraživanog područja i mjerne postaje 7

1.3.1. Geografske karakteristike istraživanog područja i odabrane postaje 7

1.3.2. Klima Zagreba i istraživanje magle na zagrebačkom području 8

1.3.3. Mjerne postaje i podaci 11

1.4. Motivacija i cilj rada 11

2. Opis numeričkog mezoskalnog modela 13

2.1. Opće karakteristike i postavke WRF modela 13

2.2. Statistički parametri korišteni u evaluaciji modela 15

2.3. Algoritmi za procjenu horizontalne vidljivosti, h 16

3. Karakteristike odabranog slučaja magle 5.-9. studenoga 2013. 18

3.1. Sinoptička analiza i radiosondaže 18

3.2. Satelitske slike 20

3.3. Prizemna mjerenja 22

3.3.1. Temperatura, relativna vlažnost i vidljivost 22

3.3.2. Epizode magle i primjena algoritama 23

3.4. Prizemni vjetar i epizode magle 26

4. Evaluacija i analiza rezultata WRF modela 29

4.1. Analiza statističkih parametara osnovnih meteoroloških veličina 29

4.1.1. Prizemna mjerenja 29

4.1.2. Radiosondažna mjerenja - usporedba 33

4.2. Analiza statističkih parametara horizontalne vidljivosti 35

4.3. Analiza slučaja 37

4.3.1. Prva epizoda magle (predvečerje 05.11.2013., noć i jutro 06.11.2013.) 37

4.3.2. Druga epizoda magle (večer 06.11.2013., noć i jutro 07.11.2013.) 43

4.3.3. Treća epizoda magle (poslijepodne 07.11.2013., noć i jutro 08.11.2013.) 47

4.4. Analiza uspješnosti algoritma za procjenu vidljivosti 50
4.5. Analiza utjecaja rijeke Save na formiranje magle nad gradom 51
5. Zaključak 52
6. Literatura 54
7. Sažetak 56
Dodatak A: Satelitske slike 57
Dodatak B: Taylorovi dijagrami i statistički parametri 59
Dodatak C: Radiosondažna mjerenja i vertikalni profili – slike 62

1. Uvod

1.1. Magla

Magla (sl. 1) je fenomen atmosferskog graničnog sloja (AGS), a po definiciji se sastoji od suspendiranih vodenih kapljica i/ili kristalića leda u blizini Zemljine površine koji dovode do smanjenja horizontalne vidljivosti ispod 1 km (WMO, 1966.; International Civil Aviation Organization, ICAO, 2010.). Ukoliko je horizontalna vidljivost (*h*) smanjena te iznosi od 1 do 5-10 km, uz veliku relativnu vlažnost zraka (*rh* > 95%), tada govorimo o sumaglici. Kapljice vode i kristalići leda, obično su 5-50 μm u promjeru, a rezultat su prezasićenosti uslijed hlađenja, povećanja vlažnosti i/ili miješanja prizemnog zraka različitih temperatura (Gultepe i sur., 2007.). Zbog tih karakteristika magla od davnina (npr. poznata londonska magla) ima velik utjecaj na sve vrste prometa (pomorski, zračni, cestovni) čiji intenzitet kontinuirano raste. Nalazi se na popisu opasnih pojava (engl. *hazard list*). Stoga je maglu potrebno što uspješnije detektirati i prognozirati (*http://www.meteoalarm.eu*) jer su ekonomske posljedice mjestimice usporedive s onima nakon tornada (Gultepe i sur., 2007.).



Slika 1: Lijevo - magla na kopnu, pogled sa Medvednice (nad Zagrebom, vidljiv Medvedgrad) (izvor: *https://www.flickr.com/photos/svantevid/38331974/in/photostream/*). Desno – magla na moru (nad Rabom).

Postoji više klasifikacija magle (Koračin, 1978.; Gultepe i sur., 2007.) koje su više ili manje raščlanjene, a baziraju se na onoj koju je napravio Willett (1928.) i nadopunio Byers (1959.). Magle se mogu podijeliti ovisno o: njenim fizikalnim ili termodinamičkim svojstvima (magla koja se sastoji od kapljica, kristalića ili mješovitog tipa čestica), dinamičkim procesima nastanka (npr. radijacijska, inverzijska, turbulentna, advekcijska magla), kemijskom sastavu kondenzacijskih jezgri (npr. suha magla ili magla s oborinom), ili mjestu nastanka (npr. frontalna magla, magla zračnih masa, morska magla). Prema svom trajanju magle mogu biti višednevne, cjelodnevne ili kratkotrajne. Na ograničenom

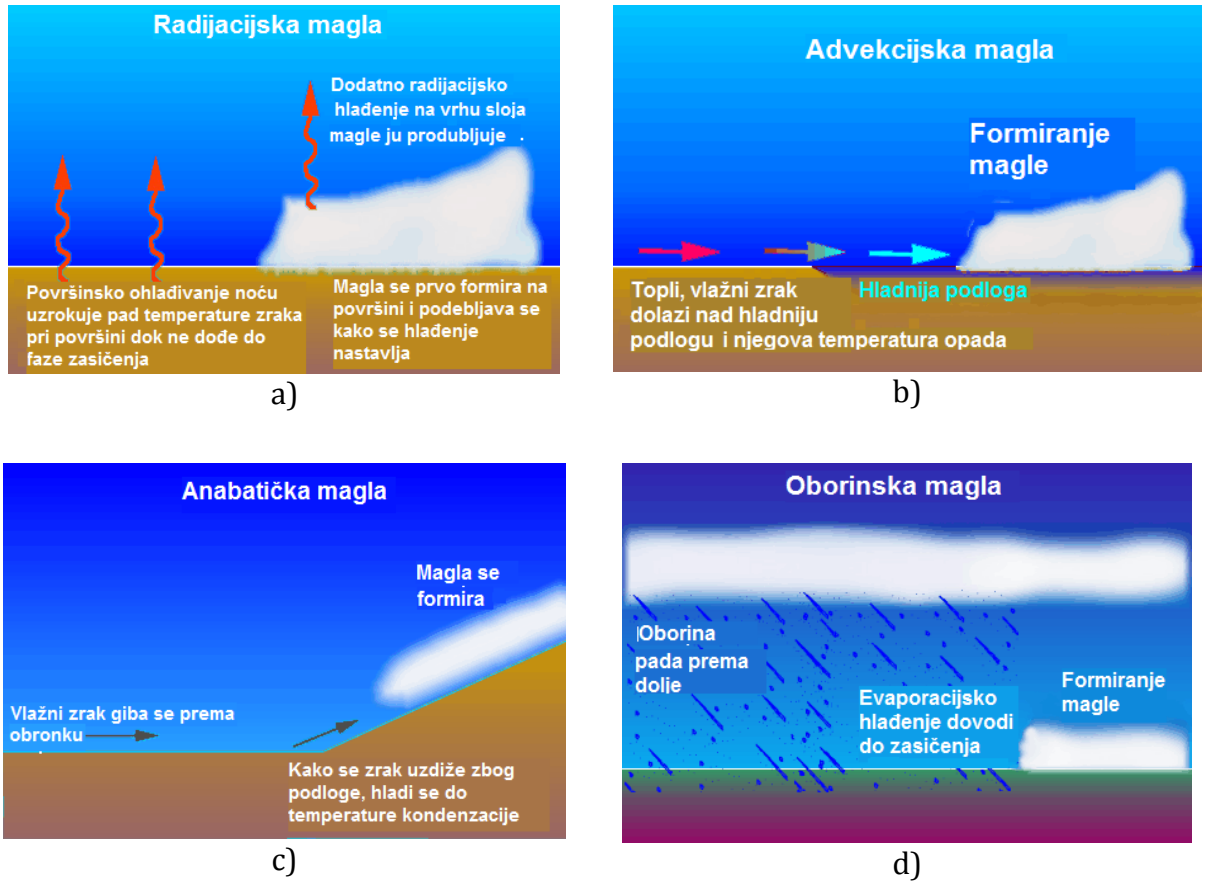
geografskom području broj tipova magle se znatno smanjuje i ovisno o reljefu obično nije veći od pet ili šest (Koračin, 1978.).

Za pojavu magle nad nekim područjem ključan je (konstruktivan/destruktivan) odnos radijacijskih, turbulentnih i advektivnih procesa, kao i zrak obogaćen aerosolom u uvjetima visoke *rh*. Aerosol su krute ili tekuće čestice suspendirane u zraku. U većini situacija povoljni uvjeti za nastanak (radijacijske) magle (sl. 2a) uključuju pojavu slabog vjetra za vedrih noći koji dopušta brže radijacijsko hlađenje površinskog sloja zraka od zraka na većoj visini. Ukoliko postoji povećanje vlažnosti s visinom, te postoji (čak i mala) turbulencija, istovremeno se odvijaju procesi u dva smjera: (i) silazni tok vodene pare nadomješta vodenu paru koja se kondenzirala kao rosa te se (ii) dio već ohlađenog zraka diže, i dodatno hladi adijabatičkim širenjem. Ukoliko ti procesi djeluju dovoljno dugo, imaju za posljedicu hlađenje cijelog prizemnog sloja do zasićenja i u vezi s tim stvaranje (radijacijske) magle (Koračin, 1978). Radijacijsko hlađenje može biti umanjeno djelovanjem toka topline iz dubljih slojeva tla, kao i učincima zagrijavanja i gubitka vlažnosti uslijed mokrog taloženja tijekom turbulentnog miješanja. Navedeni procesi mogu u stabilnom AGS-u u velikoj mjeri odrediti vremena nastanka i trajanja magle. Pa ipak već su rani radovi pokazali da se magla formira i u izraženijim turbulentnim uvjetima te u situacijama s jakim vjetrom (npr., Scott, 1894.; Gultepe i sur., 2007.).

Drugi najčešći i dobro dokumentiran tip magle je onaj advekcijski (sl. 2b). Nastaje u bilo koje doba dana uslijed nailaska vlažnog zraka drukčijih temperaturnih karakteristika u odnosu na temperaturu podloge. Također može nastati i zbog razlika u tlaku vodene pare (> 5 hPa) u zraku i onog iznad relativno tople (često morske) površine (morska magla i arktički "morski dim"). Advekcijski tip magle može se javiti prilikom izmjene smorca i kopnenjaka kao čisto obalni fenomen. Pri tome zahvaća površinu do ~5 km od obale. Do magle u noćnim satima, a može se održati do jutarnjih sati nad morem, dolazi uslijed transporta vlažnog zraka s kopna. Stvorena magla se zatim može advektirati nad kopno prilikom stvaranja smorca u jutarnjim satima.

Česta je i magla generirana lokalnim cirkulacijama (npr. vjetrom cirkulacije obronka) tijekom prisilnog dizanja zraka uvis anabatičkim strujanjem (sl. 2c). Na većoj nadmorskoj visini i pri nižem tlaku dolazi do hlađenja prizemnog vlažnog zraka uslijed adijabatičkog širenja. Npr. vertikalna brzina od 3 m/s uzrokuje adijabatičko hlađenje od 1°C/h što je usporedivo s noćnim hlađenjem (Koračin, 1978.).

Nakon što je magla formirana, njena je evolucija u velikoj mjeri određena radijacijskim hlađenjem na vrhu sloja magle, supsidencijom i taloženjem vodenih kapljica, te evolucijom površinskih turbulentnih tokova topline i vlažnosti (Gultepe i sur., 2007.).



Slika 2: a) radijacijska magla, b) advekcijska magla, c) magla nastala anabatičkim uzdizanjem i d) frontalna magla (preuzeto i prevedeno: http://charliesweatherforecasts.blogspot.com/2011/10/different-types-of-fog.html).

Magla (tzv. inverzijska magla) također može nastati spuštanjem baze niskih slojevitih oblaka (stratusa) na vrhu graničnog sloja sve do Zemljine površine tijekom dnevnog ciklusa dizanja i spuštanja visine (često morskog) AGS-a (Koračin i sur., 2001.). Pojava magle s oborinom (tj. frontalna magla) tipična je karakteristika fronte koja se može javiti u tri stadija dolaska fronte nad neko područje: (i) prije dolaska tople fronte zbog isparavanja tople kiše u prizemnom, stabilnom, hladnom zraku (prikazano na slici 2d), (ii) tijekom prolaska fronte zbog miješanja zraka iz toplog i hladnog sektora ciklone koji je blizu zasićenja i (iii) sporadično nakon prolaska hladne fronte zbog isparavanja (uglavnom konvektivne) oborine.

Unatoč jedinstvenoj definiciji magle ne postoji jedinstvena definicija guste magle (engl. *heavy fog* ili *dense fog*) u literaturi. Stoga se ponekad intenzitet magle dijeli na slabu, umjerenu i jaku maglu. Razni autori definiraju različito gustoću magle; tako je gusta (jaka) magla najčešće definirana s vidljivošću, $h < 200$ m (Ivatek-Šahdan, 1997.; van Oldeborgh i sur. 2010.).

Aerosol ima jak utjecaj na životni vijek magle. U urbanim sredinama na debljinu

sloja magle utječu koncentracija i veličine čestica aerosola jer smanjuju dozračenu Sunčevu energiju pri tlu i omogućuju time ranije stvaranje noćnog AGS-a i magle (npr. Stolaki i sur., 2015.). Ujedno veća koncentracija vodi prema dubljoj magli i većem sadržaju vlage u zraku. Novije klimatološke studije su pomoću podataka o vidljivosti pokazale smanjenje broja dana s maglom u Europi u razdoblju 1976.-2006. (Vautard i sur., 2009.). Autori smatraju da je uzrok tome smanjenje onečišćenja zraka, odnosno smanjenje emisija. Međutim, učinak je uglavnom pronađen u podacima o vidljivosti za sumaglicu, od 1 do 5 km (van Oldenborgh i sur., 2010.).

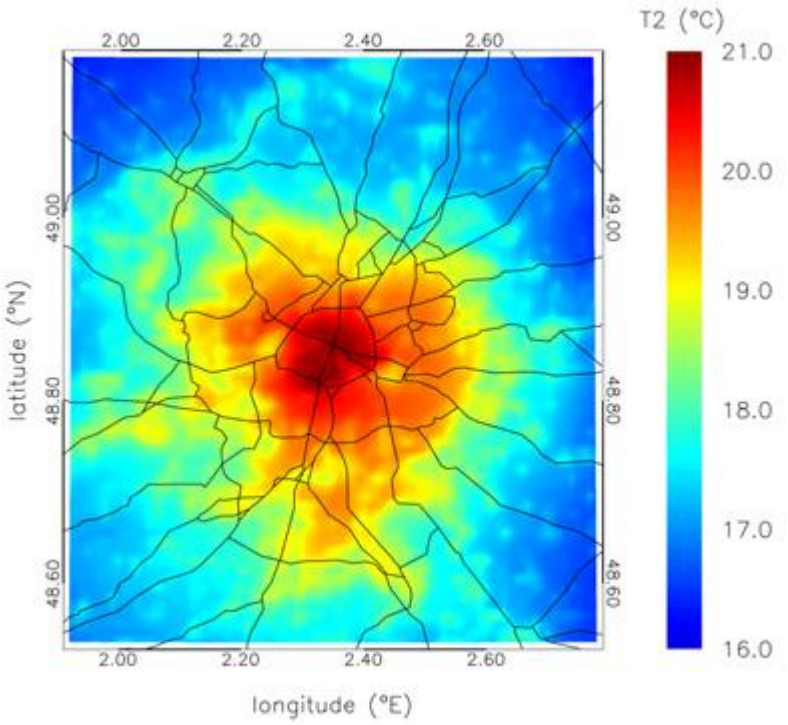
1.2. Mezoskalne pojave: urbani toplinski otok i anabatički/katabatički vjetar

Obzirom da se magla razvija unutar AGS-a, njezin početak i životni vijek pod jakim su utjecajem prizemnog sloja atmosfere, urbanog i vegetacijskog pokrova (engl. *canopy layer*), površine i dubljih slojeva tla. To znači da fenomeni kao što su urbani toplinski otok i njegova cirkulacija, odnosno vjetar cirkulacije obronka, imaju znatnu ulogu u (ne)formiranju magle. Utjecaj urbane površine može biti izravan i posredan. Izravan je u smislu modifikacije površine (neto bilance zračenja zbog promjene albeda, hrapavosti površine, emisivnosti, površinskih turbulentnih tokova topline i vlažnosti). Posredan utjecaj je zbog promjene radijacijskih svojstava urbane atmosfere uslijed prostorne i vremenske promjene koncentracije aerosola.

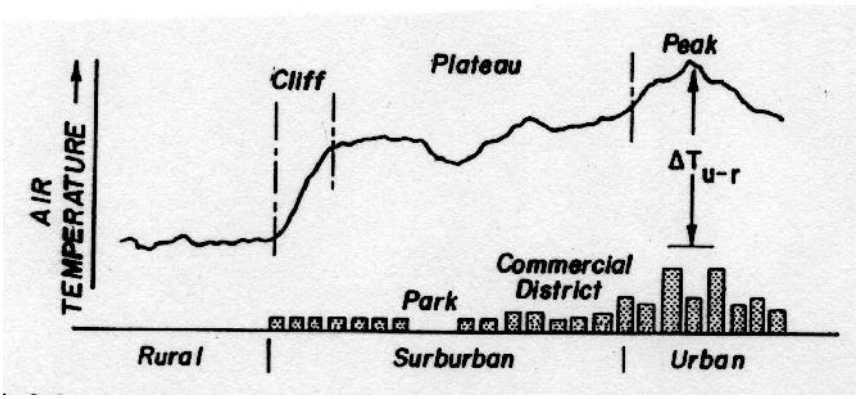
*Urbani toplinski otok (*engl. *urban heat island,* UHI*)* je pojava povišene temperature tla i zraka nad urbanim područjem u odnosu na ruralno područje (npr. Oke, 1987.; Jeričević, 2007.). Za tu pojavu su karakteristične zatvorene linije izotermi iznad urbanog područja koja ga odvajaju od ruralnih (primjer na sl. 3).

Slika 4 shematski prikazuje temperaturu zraka u vedroj noći s malim brzinama (ili bez) vjetra. Vidljiv je porast temperature od ruralnih područja prema središtu grada (Oke, 1987.). Maksimalna razlika između temperatura u središtu grada i ruralnog područja u okolici grada, $\Delta T_{u\text{-}r}$, određuje intenzitet UHI. Intenzitet UHI ima dnevni hod s minimumom u podnevnom dijelu dana i maksimumom oko ponoći.

Neki od uzroka nastanka UHI su povećana apsorpcija i re-emisija dugovalnog zračenja u donjem sloju zbog onečišćenja urbane atmosfere, smanjenje ukupnog odlaznog dugovalnog zračenja, povećanje apsorpcije kratkovalnog zračenja zbog učestalih višestrukih refleksija u uličnim kanjonima, veća dnevna pohrana topline zbog termalnih svojstava urbanih materijala i noćnog toplinskog zračenja, antropogeni utjecaj, itd. (Oke, 1987.).

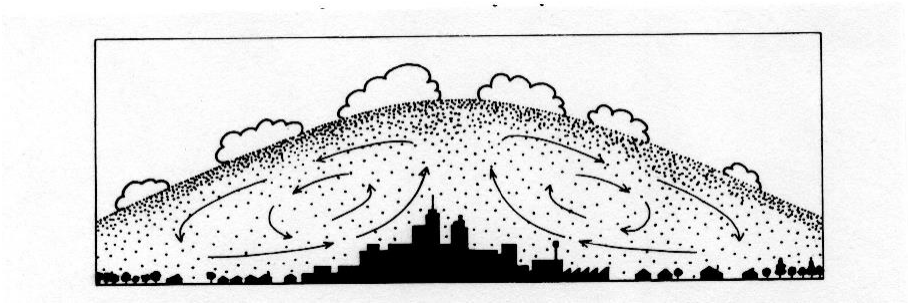


Slika 3: Temperatura zraka na 2m visine, Pariz, 22 UTC, ljeto 2003. (izvor: *http://www.gislounge.com/urban-heat-island-analysis/*).



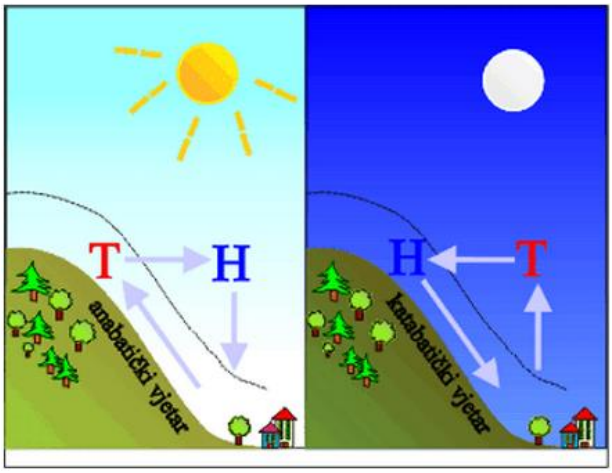
Slika 4: Shematski prikaz temperature zraka na istoj visini za ruralno i urbano područje (Oke, 1987.)

Povećana površinska hrapavost, z_0, i UHI, te znatno modificirani urbani noćni AGS utječu na stvaranje lokalne cirkulacije zraka u urbanom AGS-u. Idealizirana termički uzrokovana cirkulacija (sl. 5) se formira tako da se zrak uzdiže prema višim slojevima u središtu grada i spušta se prema površini kako ide prema ruralnim dijelovima (npr. Jeričević, 2007.). Noću se suburbani AGS smanjuje na nekoliko stotina metara zbog stabilnosti ruralnog noćnog AGS-a, ali nad središtem grada još uvijek ostaje dosta visok.



Slika 5: Shematski prikaz strujanja nad urbanim područjem u uvjetima mirnog vremena sa slabim vjetrom (Lowry, 1967).

Neke od studija su trendove promjene/smanjenja broja dana s maglom pripisali urbanizaciji ispitivanog područja zbog generiranja UHI-a (LaDochy, 2005.; Li i sur., 2012.).



a) b)

Slika 6: Cirkulacija vjetra obronka (izvor: *http://jadran.gfz.hr/pojmovnik_c.html*).

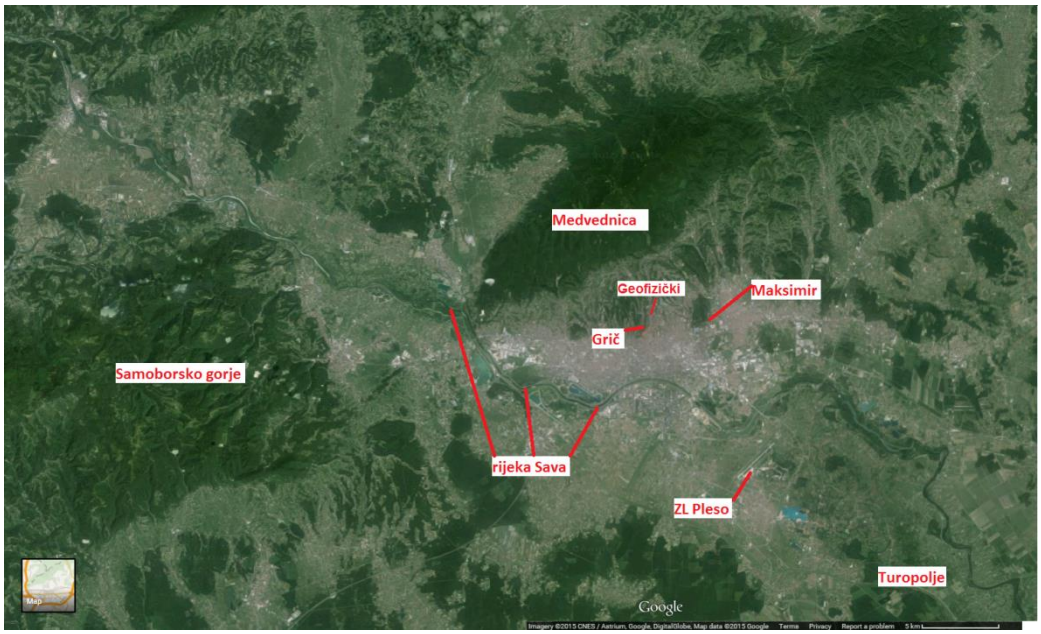
Anabatički i katabatički vjetar čine cirkulaciju vjetra obronka. Ona je orografski modificirana periodička cirkulacija u vertikalnoj ravnini uzrokovana horizontalnim gradijentima temperature, pa se takva vrsta cirkulacije naziva još i termički uzrokovana cirkulacija (Pandžić, 2002.). Javlja se najčešće na južnoj strani obronka gdje je najizraženiji dnevni hod intenziteta Sunčevog zračenja. Zagrijavanje tla uzrokuje povećanje temperature donjeg sloja zraka uz obronak koja je tada viša od temperature okolnog zraka na istoj nadmorskoj visini (sl. 6a). Topao zrak se tada diže uz obronak (anabatički vjetar), a hladni zrak se spušta prema podnožju planine na većim visinama formirajući (idealiziranu) cirkulacijsku ćeliju. Strujanje niz padinu odnosno katabatičko strujanje javlja se kada više nema dozračenog Sunčevog zračenja koje bi zagrijavalo tlo (sl. 6b). Tada se obronak hladi uslijed gubljenja energije dugovalnim ižaravanjem. Pri tome se formira hladniji sloj zraka uz površinu obronka u odnosu na okolni topliji zrak na

istoj nadmorskoj visini. Hladni zrak se „slijeva“ niz obronak prema dolini, a na njegovo mjesto na većim visinama zbog očuvanja mase dolazi topli zrak koji se ponovno hladi. Golding (1993.) je zaključio da razvoj noćnog lokalnog strujanja u kompleksnom terenu često određuje mjesto i vrijeme nastanka magle. Ukoliko postoji sloj magle, padine planine u uvjetima vedrog vremena, imaju dnevni hod temperature i tokova energije koji onda generiraju gibanje iznad sloja magle. Pri tome takva lokalna strujanja međudjeluju s gornjim slojem magle (Cuxart i Jimenez, 2012.).

1.3. Karakteristike istraživanog područja i mjerne postaje

1.3.1. Geografske karakteristike istraživanog područja i odabrane postaje

Glavne geografske karakteristike istraživanog područja su nizinski i brežuljkasti reljef peripanonskog prostora sjeverozapadne Hrvatske koje je razdijeljen rijekom Savom (sl. 7). Sava je najveća rijeka u promatranoj domeni koja dotječe iz Alpskog masiva, protječe udolinom između Samoborskog gorja (Žumberka) i Medvednice, teče kroz sam Zagreb i nastavlja dalje kroz Turopolje na jugoistok.



Slika 7: Zemljopisna karta područje Zagreba i okolice s osnovnim geografskim pojmovima (izvor: Google Earth).

“Otočni“ karakter Medvednice pokazuje oblik hrpta koji se proteže u dužinu oko 40 km u smjeru sjeveroistok-jugozapad te u širinu 10 km. Najviši vrh Medvednice je Sljeme na visini od 1035 m. Sam grad Zagreb smješten je na južnim obroncima planine Medvednice

i obalama rijeke Save. Prostire se na eliptičnoj površini od 641 km^2 te ima dužu istok-zapad os (~ 25 km) i kraću sjever-jug os (~ 15 km). Unutar te površine nalaze se tri postaje: u užem centru grada Zagreb-Grič (45°49' N; 15°59' E, h=157 m) i Zagreb-Geofizički odsjek PMF-a (Zagreb-GO), (45°50' N; 15°59' E, h=182 m), te u istočnom dijelu grada, Zagreb-Maksimir (45°49' N; 16°02' E, h=128 m). Na udaljenosti oko 20 km od Medvednice smještena je zračna luka Zagreb (45°44' N; 16°04' E, h=106 m). Istočno od zagrebačkog aerodroma dominira prostrano nizinsko Turopolje, s relativno udaljenom Moslavačkom gorom (h ~ 487 m). Na udaljenosti 10 km južno od zračne luke nalazi se brežuljkast teren kojeg čine Vukomeričke gorice (h ~ 255 m) dok je prema zapadu na udaljenosti od oko 35 km smješteno Samoborsko gorje (h ~ 880 m).

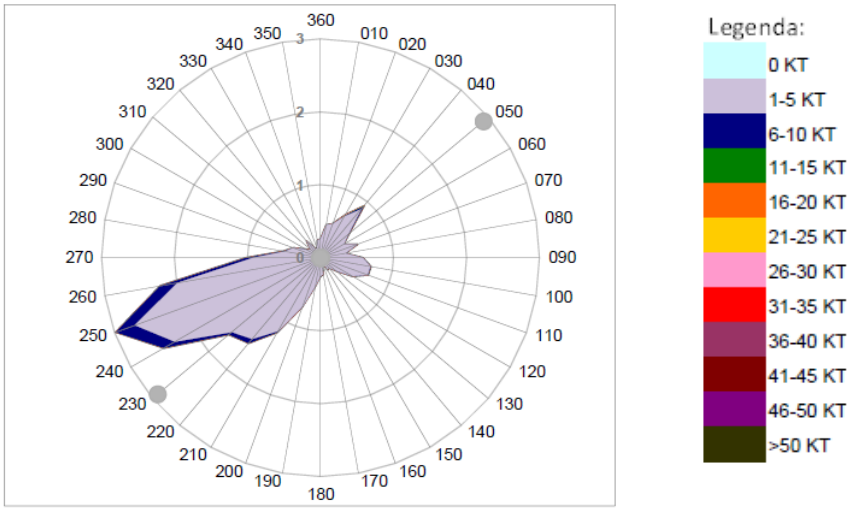
1.3.2. Klima Zagreba i istraživanje magle na zagrebačkom području

Klima Zagreba formirana je karakteristikama opće cirkulacije atmosfere u umjerenim širinama. Od listopada do ožujka prevladavaju dva utjecaja: ciklonalna aktivnost generirana Atlantskim oceanom i Sredozemnim morem, te djelovanje anticiklona iznad Euroazije i Azora. Tijekom toplijeg perioda (razdoblje travanj-rujan), česta izmjena zračnih masa je u travnju. Najmirnije je u kasno ljeto i ranu jesen, kad ljetni prodori svježeg zraka prestaju, a ciklonalni poremećaji još nisu počeli ili ih visoki tlak nad srednjom Europom otklanja u drugim smjerovima. Istovremeno lokalna topografija, kao što su Medvednica i rijeka Sava, značajno utječu na klimu grada Zagreba (Makjanić, 1977.). Zagrebačka gora štiti Zagreb od direktnog upada hladnih struja sa sjevera, a sinoptičko strujanje koje dolazi sa sjevera i sjeverozapada često zaobilazi planinsku prepreku. Medvednica značajno modificira strujanje iz južnih smjerova (Makjanić, 1977.; Lisac, 1984.) i smanjuje brzinu njegova napredovanja ili ga prisiljava na uspon i eventualno na promjenu smjera. Ujedno Medvednica generira lokalni vjetar (Lisac, 1984.) za mirna i neporemećena vremena. Utjecaj Save je manji, ograničen je na bližu okolicu rijeke, a potencijalno doprinosi stvaranju magle u gradu (Makjanić, 1977.). Iznad Zagreba uočena je pojava UHI pomoću pozitivnih anomalija temperature u gradu cijele godine (Makjanić, 1977.; Pleško i sur., 1974.; Perčec Tadić, 2010.). Iako se ona mijenja sezonski i tijekom dana u prosjeku je grad topliji od svoje okolice za barem 1 °C, čime je ujedno produljen i vegetacijski ciklus za oko 3 tjedna (Makjanić, 1977.). Sve su to parametri koji mogu imati utjecaj na pojavu magle u Zagrebu.

U kopnenom području Hrvatske magla je češća na području uz Savu gdje u Slavonskom Brodu ima prosječno 130 dana s maglom, u Sisku 81 dan, a sjeverozapadnoj Hrvatskoj više od 50 dana s maglom u godini (Zaninović i sur., 2008.). Detaljnije klimatološke analize magle na sjeverozapadu Hrvatske rađene su za zagrebačke postaje (npr. Pleško i sur., 1974., Koračin, 1978.; Ivatek-Šahdan, 1997., Brzoja, 2012.; Leko, 2014.). Usporedba broja dana s maglom na postajama Zagreb-Grič, Zagreb-Maksimir i u

zračnoj luci Zagreb je pokazala da je područje aerodroma područje s najviše broja dana u godini s maglom na širem zagrebačkom području; više nego dvostruko u usporedbi s postajom Zagreb-Grič. Na postaji Zagreb-Maksimir uočeno je ~ 25% dana s maglom više nego na postaji Zagreb-Grič (Brzoja, 2012.). Za razdoblje 1981-2008., srednji broj dana s maglom u godini po postajama iznosi ~35 dana za Zagreb-Grič, ~43 dana za Zagreb-Maksimir i ~78 dana za zračnu luku Zagreb.

Koračin (1978.) i Ivatek-Šahdan (1997.) su koristeći podatke vidljivosti (h < 1000 m) pokazali neke karakteristike magle za zagrebačku zračnu luku. U razdoblju 1976.-1977., najviše je magle u jesen (rujan-studeni, 45%) zatim u zimi (prosinac-veljača, 34%), sa znatnim smanjenjem u proljeće (ožujak-svibanj, 12%) i u ljeto (lipanj-kolovoz, 9%) (Koračin, 1978.). Uočena je dominacija gustih magli (h < 100 m) u 54% slučajeva i umjerenih (h < 500 m) u 33% slučajeva. Sličan rezultat dobiva i (Ivatek-Šahdan, 1997.) za duže analizirano razdoblje, 1976-1996. Srednji broj dana s maglom najveći je u listopadu (13.4), a zatim slijedi prosinac (13.2), ali s različitim trajanjem. Analiza satnih termina je pokazala da je za cjelodnevne magle učestalost najveća u prosincu i iznosi 13.2%. Promatrajući samo jutarnje termine, nekoliko sati prije i poslije izlaska Sunca (1-2 h), magla je najučestalija u listopadu (u 06 h ujutro = 28%), zatim u rujnu i studenom. Najmanja učestalost magle je u poslijepodnevnim satima.



Slika 8: Ruža vjetra uz pojavu vidljivosti < 1000 m za zračnu luku Zagreb koja pokazuje postotke učestalosti klasa brzine vjetra po smjerovima (010°-360° i VRB (varijabilan)) i tišinu. Korišteni podaci su iz razdoblja 1.1.1998.-31.8.2013. Sivim točkama označeni su pragovi piste (Jadran Jurković, osobna komunikacija).

Koračin (1978.) je pokazao da formiranje magle u 71% slučajeva kod pozitivnih, a svega u 29% kod negativnih temperatura. Prilikom detektiranja magle najčešći smjer

vjetra je iz 230°-260° smjerova (sl. 8). Kako brzina vjetra raste smanjuje se udio vjetra iz južnog i zapadnog kvadranta i istovremeno se povećava iz smjera sjevera-sjeveroistoka (N-NE). Takva strujanja ne donose znatnu vlagu i ukoliko nisu suviše jaka (povezana s jakim smicanjem i turbulencijom) procesi formiranja i trajanja magle teku neometano u prizemnom sloju temperaturne inverzije ili izotermije. I prema Koračinu (1978.) i Ivatek-Šahdanu (1997.) radijacijska magla je najčešći tip magle na zagrebačkom aerodromu. Prevladava u proljeće, ljeto i jesen (55% slučajeva) za vrijeme anticiklonalnog (u 67%) i bezgradijentnog (~20%) tipa vremena (Koračin, 1978.). Tijekom ciklonalnog tipa zabilježeno je svega 10% slučajeva i tada se obično radi o advekcijskoj magli. Čisto advekcijska i frontalna su slabo prisutne (obično kao umjerene).

Za razliku od zračne luke Zagreb gdje je najviše dana maglom u listopadu, maksimum na postaji Zagreb-Grič registrirani su u prosincu i siječnju, a na Zagreb-Maksimiru najveći prosječni broj dana s maglom pripada prosincu.

U skladu s europskim trendovima (Vautard i sur., 2009.), i zagrebačke postaje pokazuju smanjenje broja dana sa smanjenom (*h*) (Ivatek-Šahdan, 1997.; Brzoja, 2012.; Leko 2014.) u zadnjih 40-tak godina. Prema njihovim analizama broj dana s maglom svoj vrhunac ostvaruje šezdesetih godina prošlog stoljeća, nakon čega je u konstantnom padu. Pad je najbolje vidljiv u jesen i zimi, postoji i u proljeće, dok je slabo izražen u ljetnim mjesecima. Broj dana s maglom u jesen opada na sve tri postaje, ali s različitim trendovima po sezonama, najmanje na postaji zračna luka Zagreb (više u jesen, ljeto i proljeće te gotovo nimalo u zimi), a najviše na postaji Zagreb-Grič, osobito u zimskim mjesecima (Brzoja, 2012.). Na zračnoj luci Zagreb broj dana s maglom na godišnjoj razini, za razdoblje 1976.-1996., smanjio se s 98,7 dana na 83,8 dana, što znači smanjenje za ~15%. (Ivatek-Šahdan, 1997.).

Autori ističi dva razloga za to; plinofikacija grada Zagreba čime je povećano korištenje prirodnog plina (osobito od 90-ih kao zamjena za drvo i ugljen) i posljedično kemijski sastav atmosfere, te utjecaj UHI-a nad Zagrebom. Kako su postaje Zagreb-Grič i Zagreb-Maksimir u urbaniziranom području, najvjerojatnije se zbog djelovanja UHI-a maksimum javlja u prosincu i u siječnju, u skladu sa sezonom grijanja (Brzoja, 2012.). Leko (2014.) smatra da je smanjenje broja dana s maglom u gradu Zagrebu zbog godišnjeg smanjenja koncentracija ukupnih lebdećih čestica, dima i SO_2. Postaja zračna luka Zagreb smještena je u ruralnom/suburbanom okruženju, s različitim maksimumom (onim u listopadu) i nepromijenjenim trendom smanjenja broja maglovitih dana u zimskim mjesecima. Time je antropogen utjecaj nejasan, a uzroci takvih karakteristika vjerojatno su pod jačim utjecajem nekih drugih procesa. Moguće je, npr., da je jesenski maksimum broja dana s maglom većim djelom odraz sinoptičkih i mezoskalnih uvjeta, a tek manjim dijelom zbog urbanizacije.

1.3.3. Mjerne postaje i podaci

U ovom radu koriste se raspoloživi prizemni podaci smjera i brzine vjetra (*V*, m/s), *T* (°C), *rh* (%), prizemnog tlaka (*p*, hPa), naoblake (*N*, 1/10) i vidljivosti (*h,* m) s postaja Zagreb – Maksimir, Zagreb – Grič, Zagreb – GO, zračne luke Zagreb, te radiosondažni podaci s postaje Zagreb-Maksimir. Radiosondažni podaci su preuzeti sa stranice: *http:// weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html*. Prizemni podaci zračne luke Zagreb preuzeti su iz METAR izvješća. Meteorološka vidljivost, *h*, je najmanja vidljivost u krugu od 360° oko postaje. Ona se za potrebe zrakoplovstva uz motrenje (pomoću repera, tj. objekata poznate udaljenosti) mjeri i instrumentalno tako da bi horizontalna vidljivost do 5 km trebala biti određena sa 100 m točnosti (Ivatek-Šahdan, 1997.). Na visini od 2 metra mjere se *T* i *rh*, a *V* na visini od 10 metara. Za postaje Zagreb – Maksimir i Zagreb – Grič korišteni su 10-minutni srednjaci *V*, a s postaje Zagreb-GO trenutna mjerenja *V*. Mjerenja su u izvornom obliku u formatu srednjeeuropskog vremena (engl. *Central European Time*, CET=UTC+1h), no radi lakše usporedbe s modelom prebačena su u UTC (engl. *Coordinated Universal Time*).

Pri analizi magle koristili su se satelitske slike Meteosat (MSG) satelita treće generacije. Za uočavanje magle sa satelitskih snimki korišten je produkt MSG satelita naziva noćna mikrofizika RGB (engl. *Night-time Microphysics Red, Green, Blue* (NM-RGB)) gdje kratica RGB označava crveni, zeleni i plavi filtar valnih duljina. Karakteristika tog produkta je razlikovanje niskih oblaka i magle. Prije uvođenja NM-RGB-a razlika između niskih oblaka i magle pokušavala se uočiti kroz kanale 10.8 μm i 3.9 μm (crveni i zeleni filtar), a NM-RGB dodaje još jedan kanal kako bi se mogla uočiti debljina oblaka (plavi filtar). Pri tome se ponavlja uporaba 10.8 μm termičkog kanala kako bi NM-RGB uočio područja toplih oblaka gdje je magla izglednija (gdje se očekuje pojava magle). Snimke MSG satelita koje se koriste u ovom radu obuhvaćaju područje Apeninskog poluotoka, Austrije, Mađarske i gotovo cijelog Balkanskog poluotoka. Područje interesa (Zagreb i okolica) je vrlo malo u odnosu na područje koje obuhvaćaju originalne snimke, pa je rezolucija i kvaliteta snimki malo lošija, ali i dalje dovoljno kvalitetna kako bi se raspoznale najbitnije karakteristike magle za analizu slučaja.

1.4. Motivacija i cilj rada

Dosadašnje su analize pokazale da postoji podudaranje u višegodišnjim hodovima broja dana s maglom i onečišćenjem atmosfere u gradu Zagrebu. Ipak, direktna (dinamička) povezanost učestalosti magle i njenog smanjenja na aerodromu s antropogenim utjecajem grada Zagreba nije jasna. Ujedno postoji i lokalni sustav strujanja iznad Medvednice (koja se uzdiže 1 km iznad razine mora), UHI, te dodatni izvor vlažnosti iz rijeke Save koji do sada nije ispitivan. Zbog toga je ovdje cilj ispitati odabrani jesenski

slučaj magle numeričkim modelom fine rezolucije te analizirati povezanost lokalnih fenomena u formiranju magle nad zračnom lukom Zagreb.

Cilj je ispitati nekoliko utjecaja i odgovoriti na pitanja:

1) Jesu li dominantni mikrofizički procesi ili je nastanak magle na aerodromu uglavnom termodinamička pojava?
2) Stvara li se pri pojavi magle katabatički vjetar niz Medvednicu i mijenjaju li se njegova svojstva prelaskom preko (zagrijanog) grada?
3) Kako katabatički vjetar utječe na životni vijek magle (njezin nastanak, razvoj i nestanak)?
4) Postoji li direktan ili indirektan utjecaj UHI na formiranje magle na zračnoj luci Zagreb?
5) Koliki je utjecaj rijeke Save?

Analiza navedenih utjecaja omogućila bi bolje razumijevanje formiranja magle iznad Zagreba i zračne luke Zagreb što bi pospješilo prognoziranje magle.

2. Opis numeričkog mezoskalnog modela

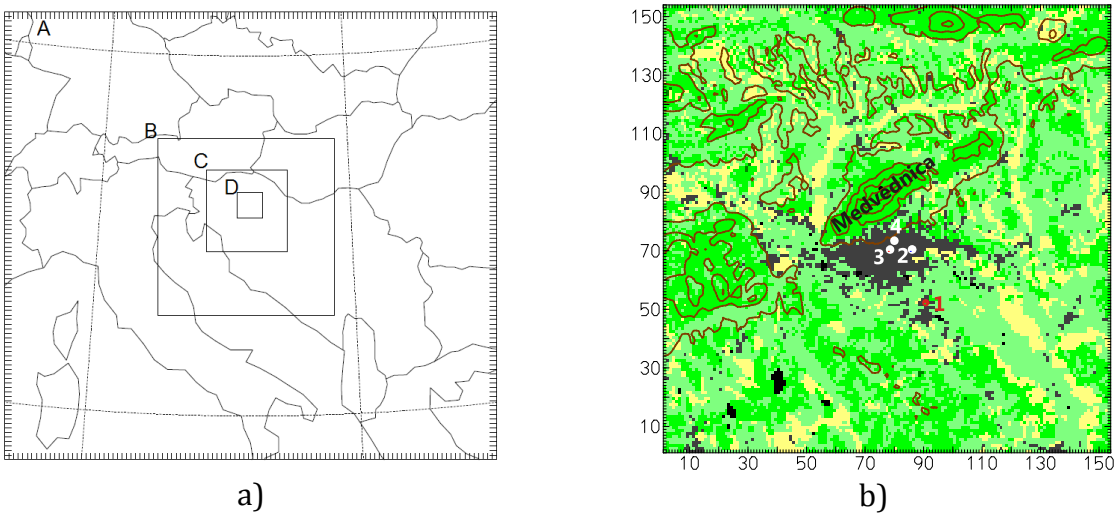
2.1. Opće karakteristike i postavke WRF modela

WRF (engl. *Weather Research and Forecasting*) model je naširoko korišten mezoskalni numerički model namijenjen za istraživanje i prognozu vremena. Model se sastoji od nehidrostatičkih trodimenzionalnih (3D) jednadžbi u Eulerovom sustavu za potpuno stlačiv fluid (Skamarock i sur., 2008.) za termodinamičke varijable u perturbacijskom obliku. Pri tome koristi prognostičke jednadžbe za sve tri komponente brzine vjetra (u, v, w), perturbaciju potencijalne temperature, perturbaciju geopotencijala, perturbaciju prizemnog tlaka suhog zraka i skalara kao što su turbulentna kinetička energija (*TKE*) te omjera miješanja (q) za različite faze vodene pare. Jednadžbe su raspisane u formi toka u horizontalnoj ravnini pomoću razmaknute Arakawa C-mreže. Vertikalna mreža koristi η–koordinatu koja prati teren te varira od 1 na površini do 0 na gornjoj granici definiranoj konstantnim tlakom. Pri vrhu modela koristi se apsorbirajući sloj radi prigušivanja težinskih valova. U tablici 1 prikazane su korištene parametrizacije u modelu za više kategorija fizikalnih procesa (za dugovalno i kratkovalno zračenje, model tla, kumulusnu naoblaku, mikrofiziku, prizemni sloj i AGS). Zbog potencijalne osjetljivosti modela na odabir shema korištene su dvije verzije seta parametrizacija (WRF1 i WRF2) koje su se razlikovale po odabiru shema za mikrofiziku i AGS. Prvi odabir shema sadrži parametrizacije *Lin* i *MYJ*, a drugi *Morrison 2-Moment* i *MYNN* dok su ostale postavke nepromijenjene (tab. 1).

Tablica 1. Postavke numeričkih simulacija u WRF modelu. *MYNN shema uvažava gravitacijsko taloženje kapljica magle.

Parametrizacije:	WRF1	WRF2
Kratkovalno i dugovalno zračenje	*Dudhia & RRTM*	*Dudhia & RRTM*
Kumulusna naoblaka (primijenjena u domenama A i B ($\Delta x \geq 4.5$ km)	*Betts-Miller-Janjić*	*Betts-Miller-Janjić*
Mikrofizika	*Morrison 2-Moment*	*Lin*
Model tla	*5-layer*	*5-layer*
AGS	*MYNN**	*MYJ*
Urbana prizemna shema	*single-layer UCM*	*single-layer UCM*
Visine vertikalnih među-nivoa u prvih 1 km, z (m)	5, 16, 28, 41, 54, 67, 81, 95, 110, 125, 142, 159, 177, 195, 215, 235, 256, 278, 302, 328, 369, 433, 525, 663, 838, 1025…	

Kod primjene modela u prognozi magle potrebno je zadovoljiti nekoliko uvjeta (Gultepe i sur., 2007.; Roman-Cascon i sur., 2012.; Menut i sur., 2014.): korištenje izuzetno fine horizontalne i vertikalne rezolucije uz vrlo dobru tipizaciju zemljišnog pokrova (engl., *land-use*) i topografiju kako bi se pokrio široki spektar procesa uključenih u iznimno kompliciran proces formiranja i razvoja magle. Istraživanja (Gultepe i sur., 2007.) su također pokazala veliku osjetljivost na odabir početnih uvjeta i ovisnost dobre prognoze magle o početnom satu simulacije; najbolje je vrijeme prije početka nastanka magle. Stoga ovdje odabrani slučaj obuhvaća simulirano razdoblje od 05. studenoga 2013. u 12 UTC do 09. studenoga 2013. u 00 UTC; započevši 12 sati prije formiranja magle. Simulacije se izvode u Lambertovoj stožastoj projekciji na četiri ugniježđene domene (sl. 9), s rezolucijama 13,5 km, 4,5 km i 1,5 km i 0,5 km koje komuniciraju u jednom smjeru (engl. *one-way nesting*).



Slika 9: (a) Ugniježđene četiri domene modela (A-D) s horizontalnom razlučivošću od 13,5 km (A), 4,5 km (B), 1,5 km (C), 0,5 km (D). (b) Topografija i zemljišni pokrov u najmanjoj domeni (D, šire područje Zagreba) i mjerne postaje: zračna luka Zagreb (1), Zagreb-Maksimir (2), Zagreb-Grič (3) i Zagreb-GO (4).

Najveća domena (A na sl. 9a) obuhvaća Apeninski poluotok, zapadni dio Balkanskog poluotoka te Alpe. Fokusirajući se na domenu interesa, najmanja (D) domena prikazuje područje grada Zagreba, područje sjeverno od Medvednice, Samoborsko gorje, Turopolje i Moslavačku goru (sl. 9b). S obzirom na kompleksan teren uključena je opcija koja uvažava dnevni hod intenziteta sunčevog zračenja na obroncima (engl. *topographic shading*). Broj vertikalnih nivoa u sve četiri domene je jednak i iznosi 97, s 25 nivoadefiniranih u prvih 1 km (tab. 1) te prvim nivoom s podacima o vjetru i temperaturi na ~ 5 m iznad tla. Početni i rubni uvjeti su preuzeti iz analize *ECMWF* centra (*European Centre for Medium-range Weather Forecasts*) na rezoluciji ~ 16 km na standardnim izobarnim plohama svakih 6 sati. Topografija i tipizacija pokrova zemljišta preuzete su iz

USGS (United States Geological Survey) baze podataka rezolucije 30'' za prve tri domene (A-C). Najmanja domena razlučena je na udaljenosti od 100 m podacima iz *CORINE (Coordination of Information on the Environment Land Cover, CLC)* baze pokrova zemljišta.

2.2. Statistički parametri korišteni u evaluaciji modela

Radi procjene pouzdanosti rezultata modela, kvaliteta simulacija se određivala odabranim statističkim parametrima (tab. 2) i metodologijom koju je predložio Pielke (2002.). Pri tome se izračunava koeficijent korelacije (r), korijen srednje kvadratne pogreške (*RMSE*), pristranost (*BIAS*) koja govori o sistematskoj pogreški koju model posjeduje, korijen srednje kvadratne pogreške iz koje je isključena pristranost (*RMSD*) i srednja apsolutna pogreška (*MAE*). Koeficijent korelacije daje uvid u linearnu vezu između izmjerenih podataka i numeričkih simulacija. Da bi model bio pouzdan, potrebno je da koeficijent korelacije bude što bliži vrijednosti 1. Vrijednosti M i O predstavljaju nizove od N podataka iz numeričkih simulacija i opaženih vrijednosti za određenu meteorološku varijablu, M_i i O_i su i-te modelirane i izmjerene vrijednosti, $\overline{M}$ i $\overline{O}$ su srednje vrijednosti nizova, a σ_M i σ_O su standardne devijacije nizova numeričkih simulacija i opaženih vrijednosti. Standardna devijacija označava mjeru raspršenosti podataka u skupu i ona je okarakterizirana kao prosječno odstupanje od srednje vrijednosti skupa.

Tablica 2. Statističke veličine korištene u evaluaciji modela

Statistička veličina	Formula
Koeficijent korelacije (r)	$r = \frac{1}{N}\frac{\sum_{i=1}^{N}(M_i - \overline{M})(O_i - \overline{O})}{\sigma_M \sigma_O}$; $\sigma_M^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(M_i - \overline{M})^2$; $\sigma_O^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(O_i - \overline{O})^2$
Korijen srednje kvadratne pogreške *(RMSE)*	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(M_i - O_i)^2}$
Pristranost (*BIAS*)	$BIAS = \overline{O} - \overline{M}$
Korijen srednje kvadratne pogreške iz koje je uklonjena pristranost *(RMSD)*	$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[(M_i - \overline{M}) - (O_i - \overline{O})]^2}$
Srednja apsolutna pogreška (*MAE*)	$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\lvert M_i - O_i \rvert$

Korijeni srednje kvadratne pogreške (*RMSE i RMSD*) i srednja apsolutna pogreška (*MAE*) su mjere pogrešaka modela u odnosu na izmjerene podatke. Pouzdanost modela je bolja što su *RMSE*, *RMSD* i *MAE* manji. Idealni slučaj je kada *RMSE*, *RMSD* i *MAE* iznose 0.

Na temelju metode iz Pielke (2002) u evaluaciji modela potrebno je provjeriti vrijede li sljedeći odnosi među statističkim veličinama:

(1) $\sigma_M \sim \sigma_O$
(2) $RMSE < \sigma_M$
(3) $RMSD < \sigma_M$.

Ukoliko su odnosi zadovoljeni tada je model bio uspješan u svojoj prognozi.

Za prikaz statističkih parametara usporedbe korišten je Taylorov dijagram (Taylor, 2001.) koji istovremeno prikazuje više statističkih veličina *r*, *RMSD* i σ_M (sl. B1).

2.3. Algoritmi za procjenu horizontalne vidljivosti, *h*

Za procjenu *h* iz numeričkih simulacija modela korištena su dva algoritma po uzoru na Bang i sur. (2008.), Zhou i sur. (2012.), Gokhoz i sur. (2014.). Prvi korišteni algoritam je preuzet iz RUC (*Rapid Update Cycle*; *http://ruc.noaa.gov*) modela. To je algoritam koji izračunava *h*, na temelju *rh*, a relacija po kojoj se računa dana je jednadžbom (1). U ovom algoritmu *h* ovisi isključivo o *rh*.

Drugi korišteni algoritam je razvijen od strane FSL (*Forecast Systems Laboratory; now NOAA Earth System Research Laboratory*; http://esrl.noaa.gov/) i za razliku od prethodnog algoritma ne ovisi isključivo o *rh* već i o *T* (K) i temperaturi rosišta (*Td*, K). Ovaj algoritam je dan jednadžbom (2).

$$h\ (km) = 60 * e^{-2{,}5 * \frac{rh\ -15}{80}} \tag{1}$$

$$h\ (km) = \frac{1}{1{,}6} * 6000 * \ \frac{T\ - T_d}{rh^{1.75}} * 1{,}60953 \tag{2}$$

Ovi algoritmi su dosta jednostavni jer se baziraju na jednoj do tri meteorološke varijable. Stoga se kao direktna mjera pojave magle iz modela često koristi varijabla *LWC* (engl. *liquid water content*), koja za maglu poprima vrijednosti od 0.01 do 0.4 g/m^3 (Gultepe i sur., 2007.) odnosno do 1 g/kg (Steeneveld i sur., 2015.). Često se pri tome koristi informacija o *LWC* s prvog nivoa modela te se pokušava proračunati *h*. U operativnim modelima proračun *h* temeljen na *LWC* nije osobito uspješan iz dva razloga: obično pregrube prostorne rezolucije i nedovoljno opisane fizike magle u modelima (Zhou i sur., 2012.). Zbog toga se prognoza magle pokušava poboljšati korištenjem nekoliko meteoroloških veličina koji moraju zadovoljiti sljedeće uvjete:

(a) *LWC* na najnižem nivou modela ≥ 0,015 g/kg ili
(b) *rh* ≥ 95% (Gultepe i sur., 2007.) uz brzinu vjetra (na 10 m) ≤ 3 m/s (van Schalkwyk i Dyson, 2013.).

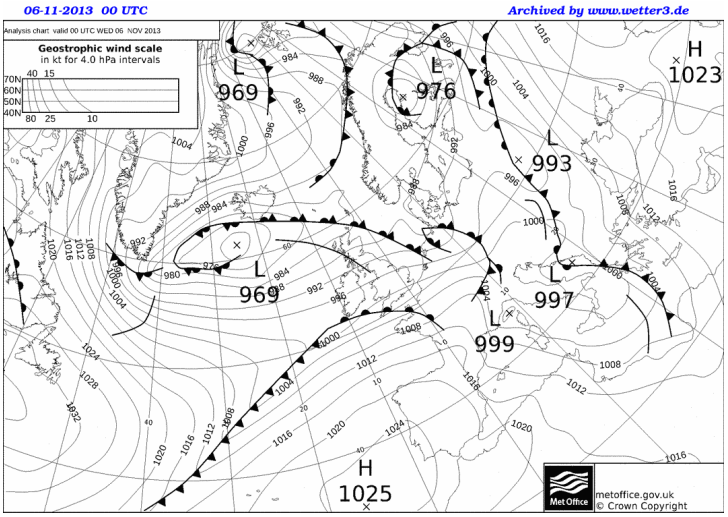
Kod analize simulacija u detekciji magle ispitat će se navedeni algoritmi.

3. Karakteristike odabranog slučaja magle 5.-9. studenoga 2013.

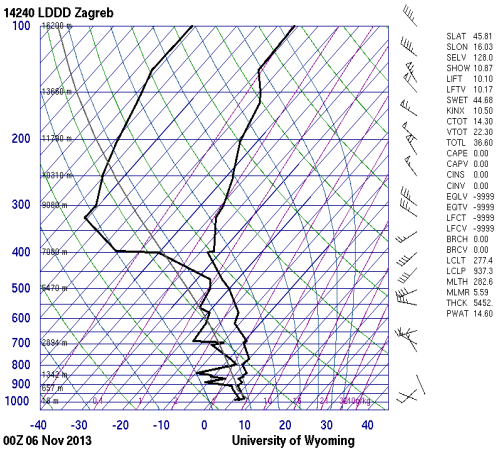
Za analizu je odabrano razdoblje od 5-9. studenoga 2013.; mjeseca kada je magla nad Zagrebom česta. Tijekom ovog razdoblja opažena je magla kako u gradu, tako i na zračnoj luci Zagreb.

3.1. Sinoptička analiza i radiosondaže

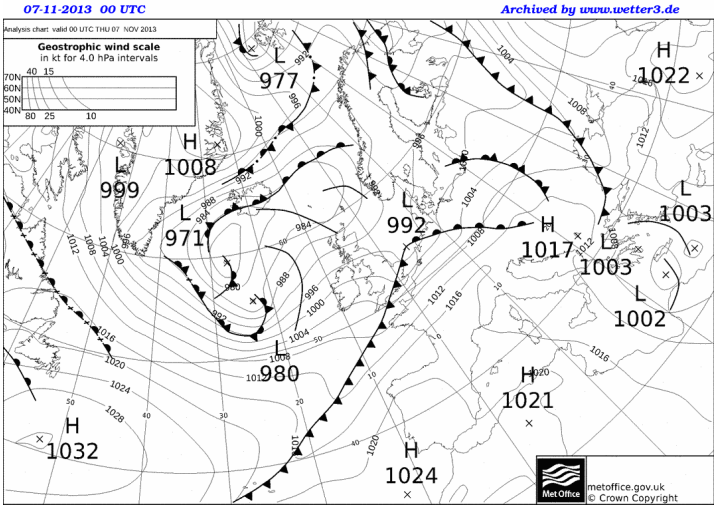
Prizemne sinoptičke karte na slici 10 pokazuju raspodjelu prizemnog tlaka i vertikalne profile u atmosferi nad Zagrebom u tri termina iz odabranog razdoblja. Slika 10a prikazuje raspodjelu prizemnog tlaka za 06.11.2013. u 00 UTC na kojoj je vidljiv utjecaj ciklone na području Hrvatske sa središtem nad Jadranom. Zagrebačko područje kao područje interesa je zahvaćeno stražnjim dijelom sustava ciklone, a koji se u toku dana brzo pomiče prema Crnom moru. Zapadno od Portugala nad Atlantskim oceanom jača Azorska anticiklona. Prolaskom ciklone, odnosno fronte okluzije prema jugoistoku prizemni tlak počinje rasti te jača utjecaj povišenog tlaka zraka u sljedeća dva dana (sl. 10c, e). Tijekom tog razdoblja frontalne strukture nalaze se sjeverno od Hrvatske. U takvim okolnostima, na početku ispitivanog razdoblja, u cijeloj troposferi prevladava SW-W strujanje s malim brzinama (sl. 10b). Nad Zagrebom, u prvih 300 m iznad tla jugozapadni vjetar je do 2 m/s, a maksimalne brzine vjetra u prvih 3 km ne prelaze 8 m/s. Na visini oko 200 m iznad tla uočava se blago povećanje T s visinom, odnosno stvaranje temperaturne inverzije, što upućuje na povećanu statičku stabilnost pri tlu. Nadalje, unutar prvih 900 m, T i T_d su približno jednake, a njihova razlika je manja od 2,8 K, pa je moguće stvaranje niskih oblaka i magle (Brzoja, 2012.). Vertikalna struktura noćnog AGS s formiranom temperaturnom inverzijom do 500 m visine nastavlja se i sljedećih dana (sl. 10d, f). Profili pokazuju veliku količinu vlažnosti u sloju od 400 m i 3000 m s malim razlikama u deficitu rosišta (T-T_d), što označava zasićenje zraka i mogućnost stvaranja oblaka. Od tla do prvih 500 m vjetar ne prelazi 6 m/s. Smjer se u najnižem sloju mijenja od prizemnog WNW (06. i 07.11., sl. 10b, d) i WSW (08.11. sl. 10f) prema SW strujanju koje iznad 2 km okreće na NW strujanje praćeno porastom brzine vjetra.



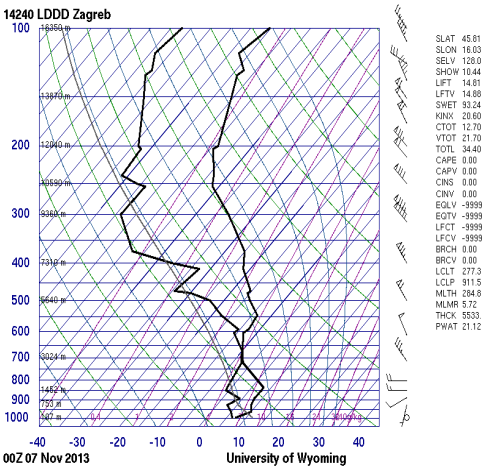
a) 06.11.2013. 00 UTC



b)

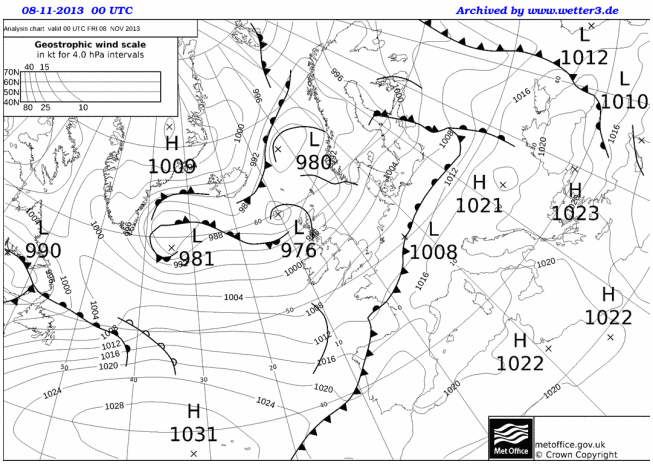


(c) 07.11.2013. 00 UTC

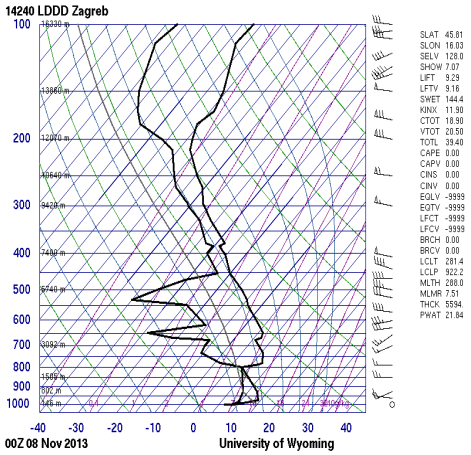


d)

Slika 10: (a, c, e) Prizemni tlak nad Europom (izvor: *http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html*) i (b, d, f) noćne radiosondaže za postaju Zagreb-Maksimir u 00 UTC na dane 06.11.2013. (a, b), 07.11.2013. (c,d) i 08.11. 2013.(e,f). Desno od dijagrama su prikazani neki od indeksa nestabilnosti (izvor: *http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html*).



e) 08.11.2013. 00 UTC



f)

Slika 10: Nastavak.

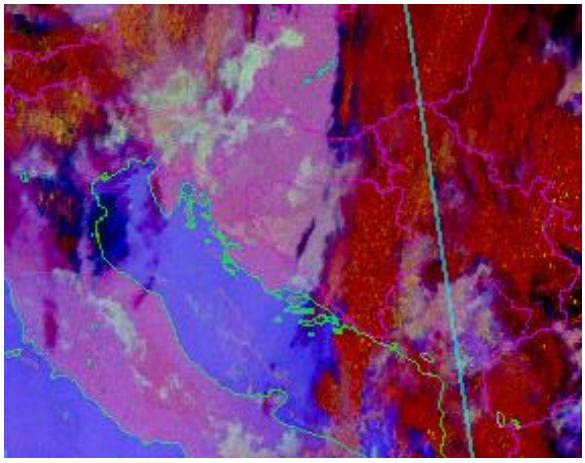
3.2. Satelitske slike

Kako bi se uočila i procijenila naoblaka nad područjem interesa, korištene su satelitske snimke geostacionarnog MSG satelita.

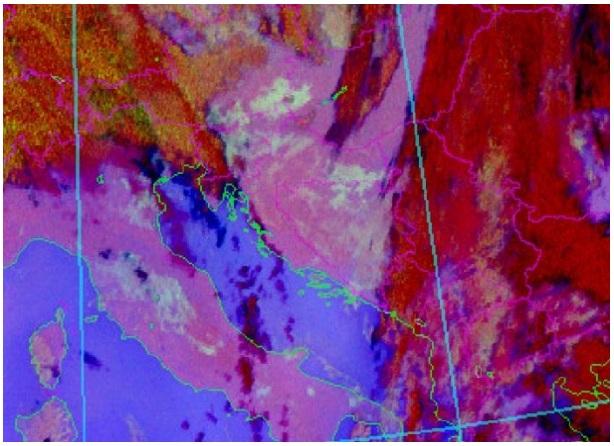
Na slici 11 prikazani su noćni i jutarnji termini 6.11.2013. Vidljiva je evolucija magle nad zagrebačkim područjem i njeno nestajanje u jutarnjim satima. Niski oblaci su na slici 11b prikazani svijetlozelenom bojom na području Međimurja. Za razliku od takve svijetlozelene boje, malo prljavija zelena (koja označava maglu) je nad područjem Zagreba i okolice, te sjeverno od tog područja. Nad Medvednicom nema magle ili oblaka uopće. Prizemna standardna mjerenja na postajama potvrđuju smanjenu vidljivost/maglu na postajama zračne luke Zagreb i Zagreb-Maksimir u terminu prikazanom na slici 11b. Također je vidljivo kako je maglom obuhvaćeno i područje oko Karlovca te veliki dio Bosne i Hercegovine. Produkt svijetlozelene boje vidljiv na granici Istočne Hrvatske i sjeverne Bosne i Hercegovine označava niske oblake.

Sljedećih dana magla je prisutna na području interesa; tako se može utvrditi da je u terminu 07.11.2013. u 5:00 UTC (sl. A1, dodatak A), područje središnje Hrvatske obuhvaćeno maglom. Sjeverno od Medvednice su niski oblaci, a južno od nje je magla koja nad zagrebačkim područjem traje od 01 UTC do 09 UTC.

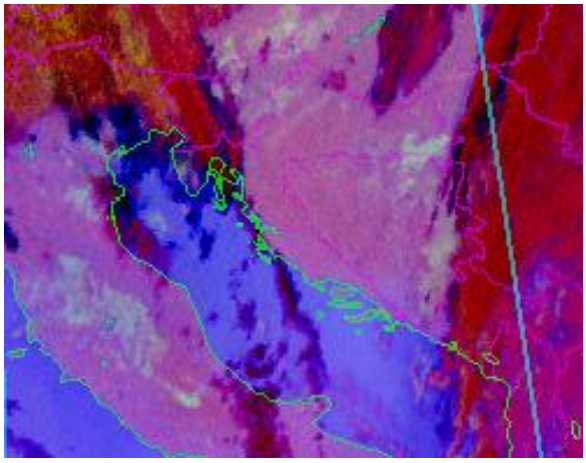
U popodnevnim satima 7.11.2013. nad Slovenijom i sjevernim Jadranom razvili su se niski oblaci (sl. A2) te su nakon toga advektirani nad područje središnje Hrvatske. Posljedica toga je smanjena vidljivost nad zagrebačkim područjem. Boja produkta sa slike ne upućuje na klasičnu pojavu magle, ali je svakako prijelazni oblik između niskih oblaka i magle.



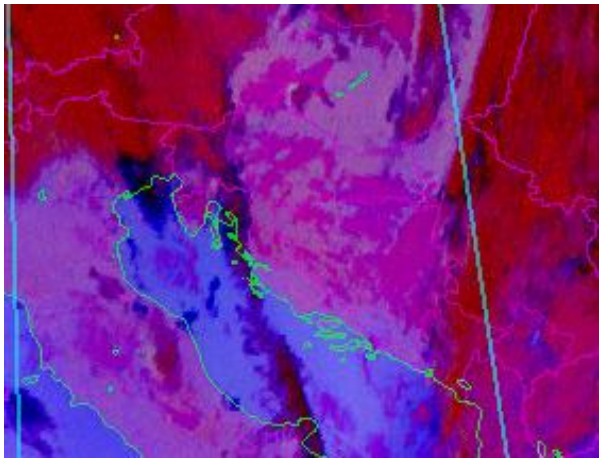
a) 00:15 UTC



b) 05:30 UTC



c) 06:00 UTC



d) 07:00 UTC

Slika 11: 06.11.2013. a) 00:15 UTC, b) 05:30 UTC, c) 06:00 UTC, d) 07:00 UTC. NM-RGB product MSG satelita. Za opis značenja boja pogledati tekst.

Što se tiče ukupne naoblake u promatranom periodu, sa satelitskih snimki je vidljivo kako je u prve dvije noći (06. i 07.11.2013.) nakon 00 UTC prevladavalo vedro vrijeme, što je rezultiralo negativnom bilancom toplinskog zračenja gdje tlo dugovalnim zračenjem gubi više topline nego što je prima, jer ne postoji oblačni sustav koji bi apsorbirao Zemljino zračenje i time zadržao toplinsku ravnotežu donjih dijelova atmosfere. Vedre noću su, kao što je već ranije navedeno, jedan od uvjeta stvaranja magle radijacijskog tipa. Posljednje noći promatranog razdoblja opažena je gusta naoblaka koju čine niski oblaci do jutarnjih sati. Tijekom 10 UTC do 13 UTC zadnjeg dana (08.11.2013.) niski oblaci se uzdižu formirajući srednje oblake.

3.3. Prizemna mjerenja

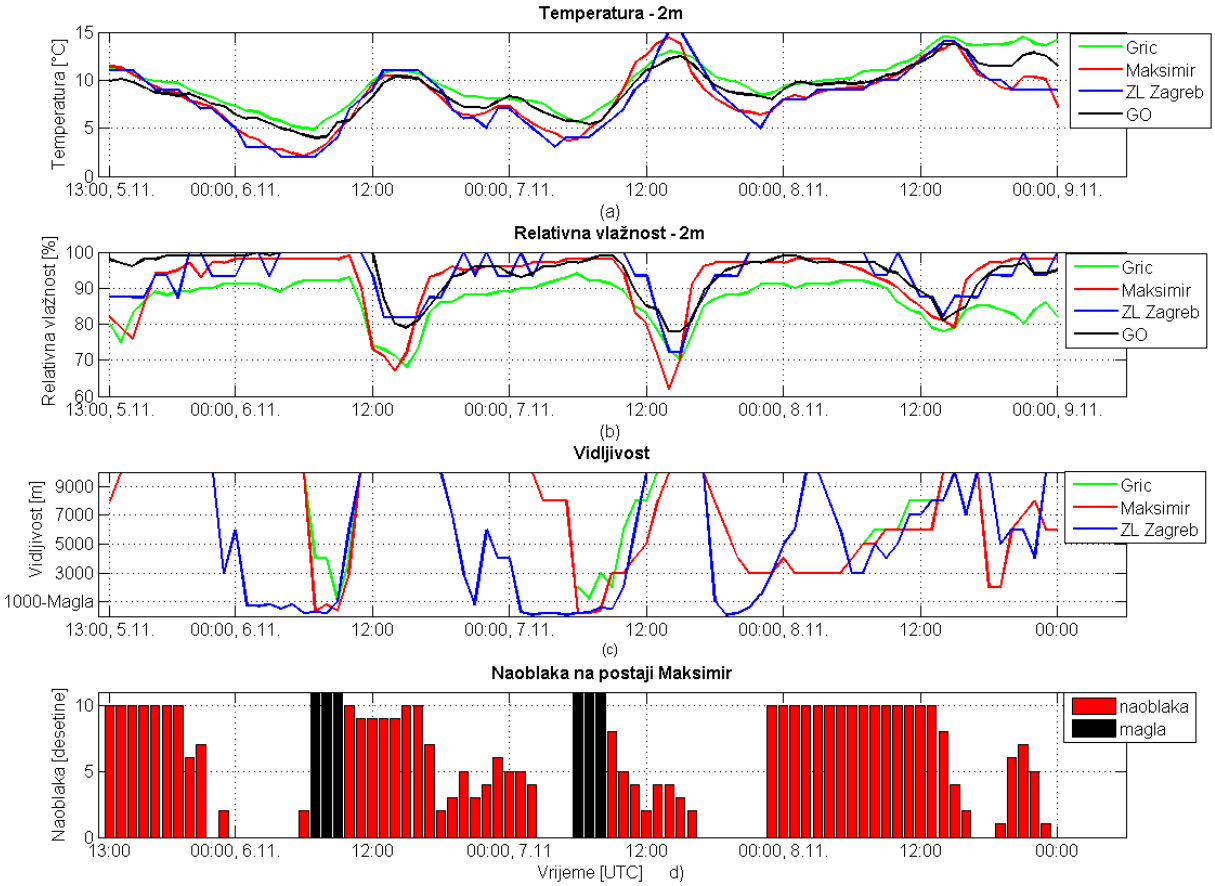
3.3.1. Temperatura, relativna vlažnost i vidljivost

Analiza prizemnih podataka pokazana je na slici 12 za postaje Zagreb–Grič, Zagreb–Maksimir, Zagreb–GO i zračnu luku Zagreb. Slika 12a, prikazuje dnevni hod *T* na 2 metra iznad tla za promatrano razdoblje, gdje se na početku razdoblja uočava minimalna *T* u terminima prije izlaska Sunca oko 04 UTC (05 CET), a maksimalna *T* oko 13 UTC (14 CET). Važno je napomenuti da u ispitivanom razdoblju nema negativnih *T*. U noći s 07.11. na 08.11.2013. na sve tri postaje minimalna *T* je zabilježena prije ponoći i nakon toga *T* raste sve do svog maksimuma u ranim poslijepodnevnim satima 08.11. Iako sve tri postaje pokazuju tipični dnevni hod *T* s maksimumom nakon podneva i minimum pred svitanje, noću je *T* na postajama Zagreb-Grič i Zagreb-GO viša za ~1,5°C od druge dvije postaje. Kako je postaja Zagreb-Grič u samom centru grada Zagreba, viša noćna *T* u odnosu na preostale dvije postaje najvjerojatnije je posljedica UHI. Postaje zračna luka Zagreb i Zagreb-Maksimir su smještene u području suburbanih karakteristika.

Izmjerena *rh* na sve tri postaje prikazana je na slici 12b te prikazuje hod nasuprotan *T*. Vidljivo je kako su vrijednosti *rh* na postajama Zagreb-Maksimir i zračna luka Zagreb visoke u popodnevnim satima i tijekom noći te prelaze 95%, dok se nakon izlaska Sunca i povećanjem *T* vrijednosti *rh* smanjuju ispod 75%. Na mjernoj postaji Zagreb-Grič vrijednosti *rh* u dnevnom hodu ne prelaze 95% i općenito su niže nego na drugim postajama.

Na slici 12c je prikazana opažena vrijednost *h* na postajama Zagreb-Grič, Zagreb-Maksimir i zračnoj luci Zagreb. Na postaji Zagreb-Grič postoji samo limitiran broj sati s *h*, a na Zagreb-GO nema opažanja. Vrijednosti *h* se spuštaju ispod 1000 m na sve tri postaje, s najduljim trajanjima na zračnoj luci Zagreb.

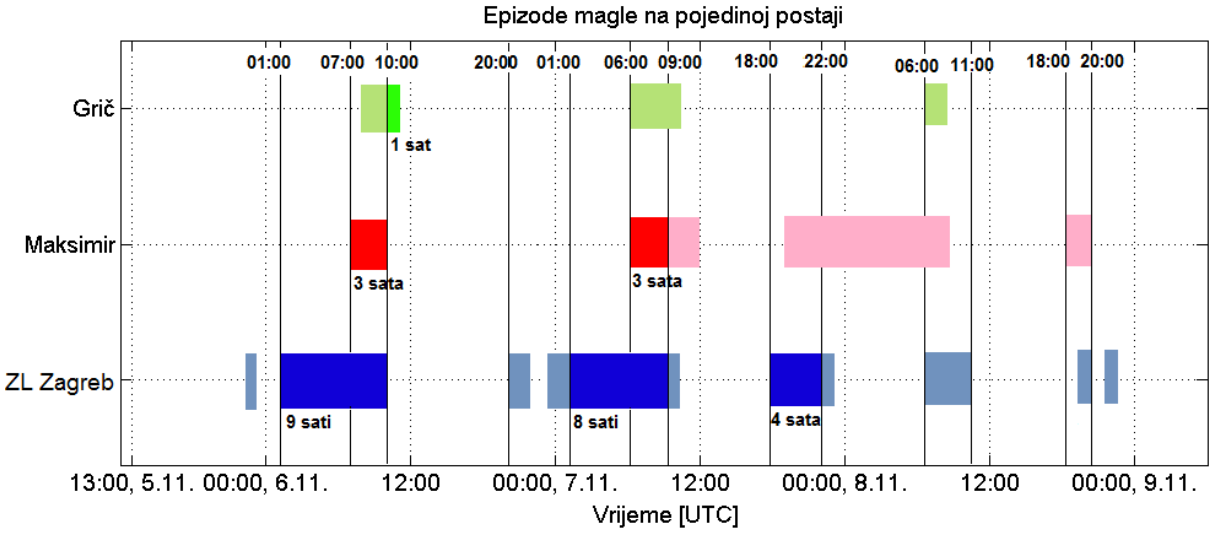
Slika 12d prikazuje naoblaku nad mjernom postajom Zagreb-Maksimir. Na postaji je tijekom prve noći bilo vedro od 22 UTC do 04 UTC nakon čega se formirala magla i trajala je do 10 UTC. Cijeli sljedeći dan uočava se jaka naoblaka do predvečernjih sati, nakon čega započinje razvedravanje i potpuno se razvedrava u 03 UTC. Magla se formira u 06 UTC i traje do 09 UTC. Na satelitskim snimkama je vidljivo kako se tijekom cijelog promatranog razdoblja kod pojave jake i umjerene naoblake radi pretežito o niskim oblacima izuzev pojave srednjih oblaka 08.11.2013. od 10 do 13 UTC.



Slika 12: Mjerenja na postajama Zagreb-Grič (zelena linija), Zagreb-Maksimir (crvena linija), zračna luka Zagreb (plava linija), Zagreb-GO (crna linija) u razdoblju od 05.11.2013. u 13 UTC do 09.11.2013 u 00 UTC; (a) temperatura [*T*,°C], (b) relativna vlažnost [*rh*, %], (c) horizontalna vidljivost [*h*, m], (d) naoblaka Zagreb-Maksimir [desetine]. Na (d) crni stupići predstavljaju termine u kojima zbog magle naoblaka nije mogla biti uočena.

3.3.2. Epizode magle i primjena algoritama

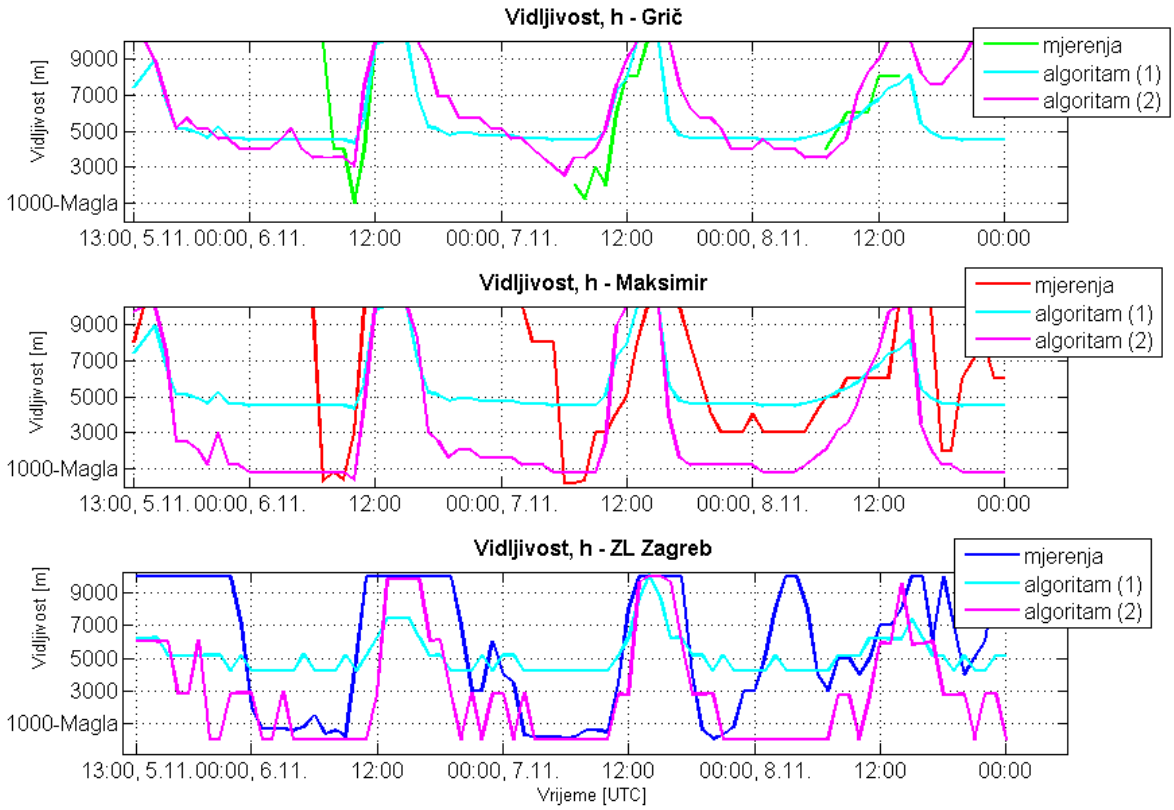
Mnoge studije (npr. Gultepe i sur., 2007.; Brzoja, 2012.) su istaknule prednost isticanja *događaja magle* u odnosu na *dane s maglom* jer je formiranje magle vezano uz sinoptičke/mezoskalne atmosferske uvjete, a ne definiciju dana. Prilikom definiranja dana s maglom događaj s maglom može se (neprirodno) presjeći tijekom noći na dva dana s maglom iako čine jedan događaj. U skladu s time (i metodologijom koju su predložili Tardif i Rasmussen, 2007.), ovdje smo definirali tri događaja/epizode magle s obzirom na zračnu luku Zagreb tijekom kojeg je $h < 1000$ m bila barem tri uzastopna sata. Osim epizoda magle, opažane su i epizode sumaglice.



Slika 13: Trajanje magle na pojedinoj postaji prikazano je trakama u razdoblju od 05.11.2013. u 13 UTC do 09.11.2013 u 00 UTC. Svijetlim bojama prikazani su početak i kraj magle za svaku postaju, te ukupno trajanje magle ispod svake trake. Blijedim nijansama svake boje je prikazana sumaglica (h < 5000 m).

U promatranom razdoblju magla se na zračnoj luci Zagreb javlja prvi puta 6.11. u 01 UTC i traje do 10 UTC (11 CET) (sl. 13). Istog dana na postaji Zagreb-Maksimir magla se javlja u 07 UTC i traje također do 10 UTC, nakon čega se h povećava. Druga epizoda magle na zračnoj luci Zagreb je zabilježena drugog dana 07.11. od 01 UTC do 09 UTC (10 CET) što znači da je magla trajala 8 sati. Na postaji Zagreb-Maksimir magla se javlja u 06 UTC i također traje do 09 UTC. Posljednja i najkraća epizoda smanjene h na aerodromskoj postaji je večer 07.11., od 18 do 22 UTC. Te se večeri smanjena h (< 1000 m) javila samo na zračnoj luci Zagreb, dok su na postaji Maksimir opaženi uvjeti sumaglice, (h nije bila manja od 3000 m). Na postaji Zagreb-Grič opažanja pokazuju maglu samo u jednom terminu, 06.11. u 10 UTC, u trajanju kraćem od jednog sata. Drugi puta se smanjena h na postaji Zagreb-Grič dogodila 7.11. pred jutro, no zabilježeni su uvjeti sumaglice jer h nije bila manja od 1400 m. Posljednje smanjenje vidljivosti ponovno traje kraće od jednog sata, a događa se 8.11. u 06 UTC (h nije bila manja od 3000 m).

Kako na postaji Zagreb-Grič nema kontinuiranih mjerenja h ovdje smo ih procijenili pomoću algoritama (iz poglavlja 2.4). Na slici 14 i u tablici 3 su prikazane usporedbe izmjerenih i procijenjenih vrijednosti h koju daju algoritmi (1) i (2) za sve postaje kako bi se testirala pouzdanosti tih algoritama. Na postaji Zagreb-Grič je vidljivo kako izračunate vrijednosti oba algoritma prate opažene h (sl. 14a). Prema statističkim parametrima (tab. 3), algoritam (2) ima viši r, usporedive standardne devijacije i manji *RMSD* i *MAE* čime proizlazi da je algoritam (2) uspješniji.



Slika 14: Usporedba dostupne izmjerene horizontalne vidljivosti za Zagreb-Grič (zelena linija), Zagreb-Maksimir (crvena linija), zračna luka Zagreb (plava linija) s rezultatima koje daju algoritam (1) (cijan linija) i algoritam (2) (roza linija).

Za postaju Zagreb-Maksimir (sl. 14b), noćna *h* procijenjena algoritmom (2) pokazuje mnogo niže vrijednosti od izmjerenih, a do podudaranja vrijednosti dolazi u jutarnjim satima kada je na postaji Zagreb-Maksimir izmjerena magla. Iako su vrijednosti *r* isti kod oba algoritma (tab. 3), a statističke pogreške veće u primjeni algoritma (2), njegova standardna devijacija je bliža opaženoj.

Na aerodromu (sl. 14c), primjena algoritma (2) čini relativno razumnu aproksimaciju mjerenja. U najvažnijim terminima (kada se javlja magla) procijenjena *h* je također mala tijekom trajanja magle. Veća odstupanja javljaju se u noćnim satima zadnjeg dana analize. To je očekivani rezultat s obzirom na važnu ulogu *rh* u algoritmu, stoga se za slučaj kada je ona velika vidljivost u algoritmu smanjuje. I sa slike 14 i usporedbom statističkih parametara, vidljivo je kako algoritam (1) ne daje realne vrijednosti niti za Zagreb-Maksimir niti za zračnu luku Zagreb.

Tablica 3: Statistički parametri iz usporedbe horizontalne vidljivosti iz mjerenja i procijenjene horizontalne vidljivosti iz algoritama (1) i (2) za postaje Zagreb-Grič (a), Zagreb-Maksimir (b) i zračna luka Zagreb (c). (Mean je srednja vrijednost).

	Mean	STD	RMSD	r	MAE
Grič	7478,9	3021,5	0,0	1,0	0,0
algoritam (1)	6019,5	1878,1	3011,4	0,3	2568,1
algoritam (2)	6757,2	2523,7	2676,2	0,5	2097,8

a)

	Mean	STD	RMSD	r	MAE
Maksimir	7110,7	3311,1	0,0	1,0	0,0
algoritam(1)	5561,3	1674,9	3176,9	0,3	2977,3
algoritam(2)	3304,2	3424,6	3913,4	0,3	4319,8

b)

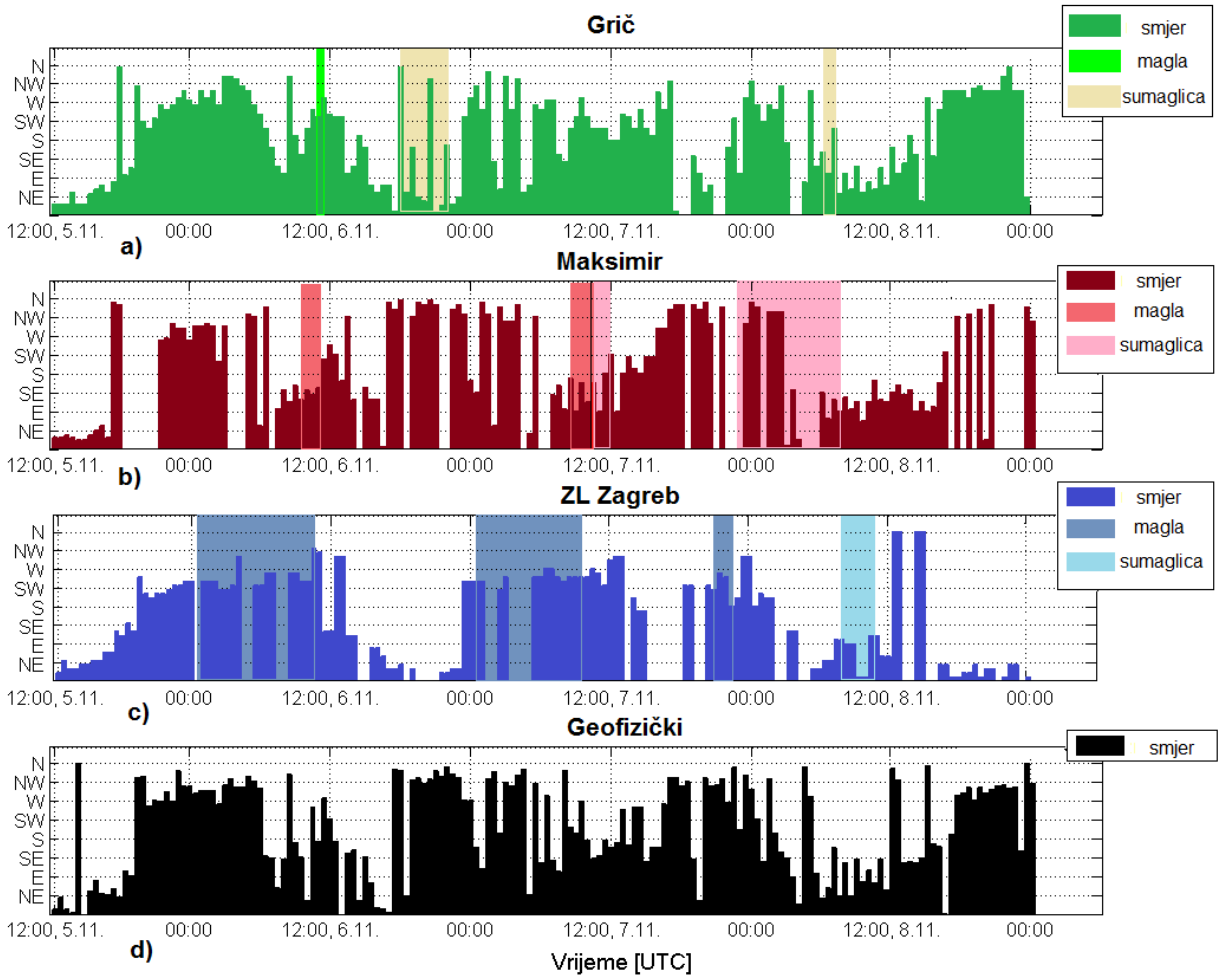
	Mean	STD	RMSD	r	MAE
ZL Zagreb	5712,7	3900,7	0,0	1,0	0,0
algoritam (1)	5219,1	1254,6	3362,0	0,6	2950,5
algoritam (2)	2819,4	3210,5	3252,9	0,6	3185,9

c)

S obzirom da je srednja vrijednost *h* iz algoritma (1) uvijek između 5-6 km (tab. 3), a standardna devijacija u intervalu 1-2 km to znači da algoritam (1) nije u stanju prikazati pojavu slabe vidljivosti odnosno magle. Nadalje, srednja vrijednost *h* na postajama Zagreb-Maksimir i zračne luke Zagreb dobivena iz algoritma (2) je dvostruko manja od stvarne vrijednosti što nas vodi na zaključak da algoritam (2) ipak podcjenjuje iznos *h* (precjenjuje maglu), pa je tu činjenicu potrebno imati u vidu kod analize rezultata iz modela.

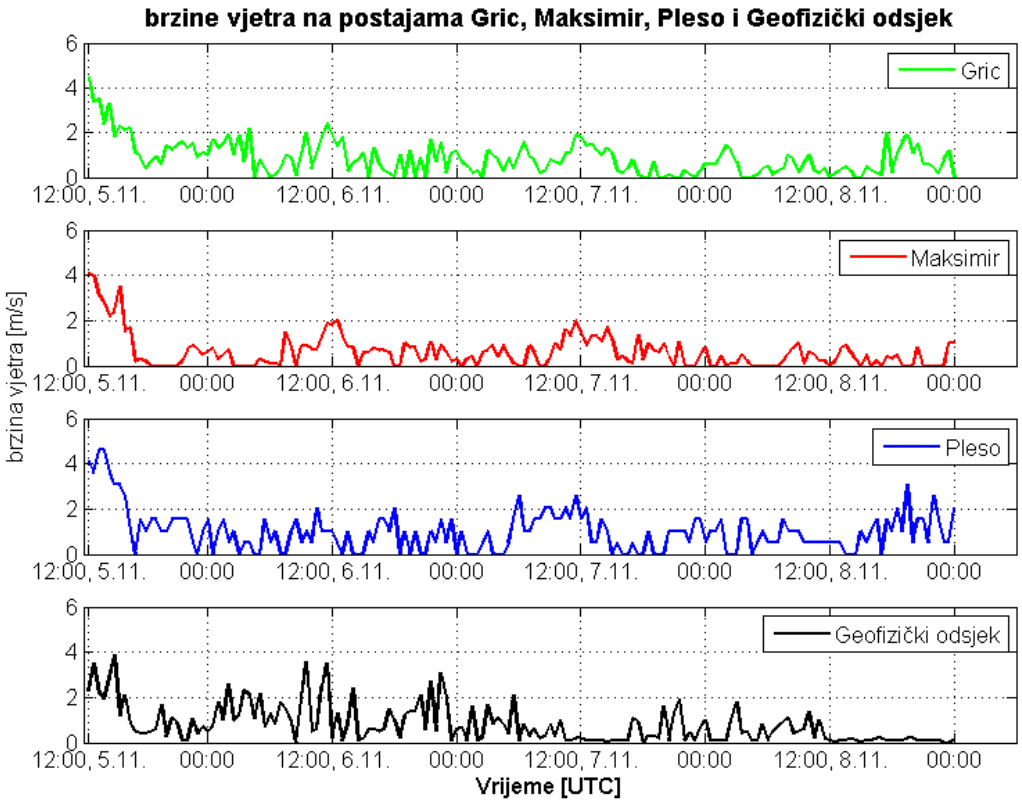
3.4. Prizemni vjetar i epizode magle

Smjer i brzina vjetra prikazani su na slikama 15 i 16. Na postaji Zagreb-Grič (sl. 15a) noću prevladava zapadno (W), sjeverozapadno (NW) i sjeverno (N) strujanje, dok danju prevladava vjetar sjeveroistočnog (NE), istočnog (E) i jugoistočnog (SE) smjera. Sličan dnevni hod smjera vjetra je i na postaji Zagreb-Maksimir (sl. 15b) uz veću učestalost vjetra iz NW-N smjera u noćnim satima u skladu s Lisac (1984.). Vjetar iz NW-N smjerova je najčešći na Zagreb-GO (sl. 15d). Na zračnoj luci Zagreb (sl. 15c), prevladavalo je jugozapadno-zapadno (SW-W) strujanje uz veliku učestalost tijekom epizoda magle, što je u skladu i s klimatologijom vjetra za događaje magle na sl. 8. Zadnjeg dana analize, a tijekom pojave sumaglice dominantni su NE i E smjerovi vjetra.



Slika 15: Mjerenja smjera vjetra na postajama Zagreb-Grič (zeleni stupići), Zagreb-Maksimir (crveni stupići), zračna luka Zagreb (plavi stupići) i Zagreb-GO (crni stupići) u razdoblju od 05.11.2013. u 13 UTC do 09.11.2013. u 00 UTC . U terminima kada brzina vjetra manja od 0.5 m/s smjer nije prikazan. Lijevo na grafovima je smjer vjetra sa kraticama E –istok, NE – sjeveroistok itd. Osjenčana područja označavaju maglu i sumaglicu.

Brzina je na svim postajama povećana u početku promatranog razdoblja (sl. 16), te se nakon podneva 5.11. smanjuje i ne prelazi 2.5 m/s niti na jednoj od postaja do kraja promatranog razdoblja. Time zadovoljavaju uvjet za pojavu magle radijacijskog tipa prema van Schalkwyk i Dyson (2013.). Također, noću je brzina vjetra manja u odnosu na brzinu tijekom dana. Brzina vjetra na postajama Zagreb-Grič i Zagreb-GO je tijekom noći nešto veća od brzine izmjerene na postaji Zagreb-Maksimir. Uočeno noćno NW–N strujanje i mala brzina vjetra na sve tri postaje upućuje na pojavu silaznog vjetra obronka s Medvednice.



Slika 16: Mjerenja brzine vjetra na postajama Zagreb-Grič (zelena linija), Zagreb-Maksimir (crvena linija), zračna luka Zagreb (plava linija)) i Zagreb-GO (crna linija) u razdoblju od 05.11.2013. u 13 UTC do 09.11.2013 u 00 UTC.

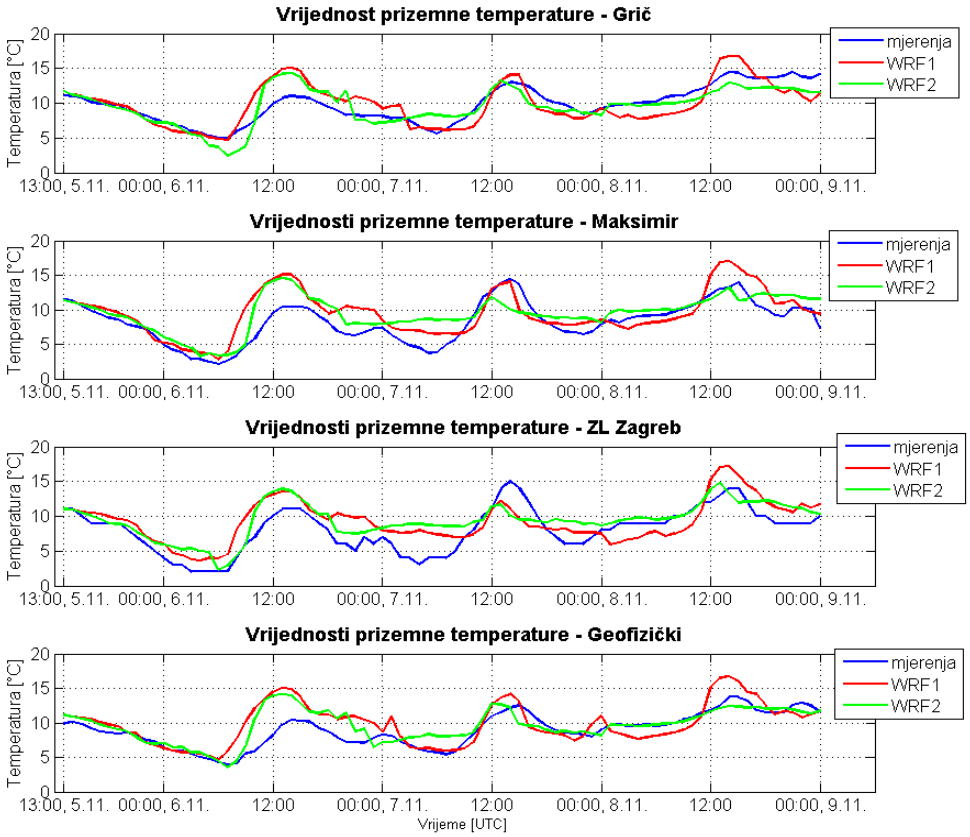
Promatrajući prizemna mjerenja može se zaključiti kako magla formirana u promatranom razdoblju pokazuje elemente radijacijskog tipa. Uslijed prve dvije vedre noći dolazi do relativno velikog pada *T* i povećanja *rh* što dovodi do smanjenja vidljivosti. U noći sa 07.11. na 08.11. smanjena *h* je kraćeg trajanja, a *h* se povećala nakon što je formirana gusta naoblaka. Što se tiče drugih utjecaja, u prve dvije noći magla na postaji Maksimir formirana je nekoliko sati nakon NW-N strujanja. Na zračnoj luci Zagreb je u prvoj noći magla formirana nakon SW strujanja, što se podudara sa dosadašnjim rezultatima (npr. Koračin, 1978.). U drugoj noći magla se pojavila nakon razdoblja vrlo malih brzina vjetra. Kratkotrajno smanjenje *h* na zračnoj luci Zagreb u predvečerje 07.11. također se javilo nakon SW strujanja. Potrebno je naglasiti da su brzine vjetra kroz cijeli promatrani period bile vrlo male i uglavnom nisu prelazile 2m/s. Također je potrebno spomenuti da je na postaji Zagreb-Maksimir u noći sa 07. na 08.11. uočena sumaglica, a ona se javlja nakon večernjeg NW strujanja.

4. Evaluacija i analiza rezultata WRF modela

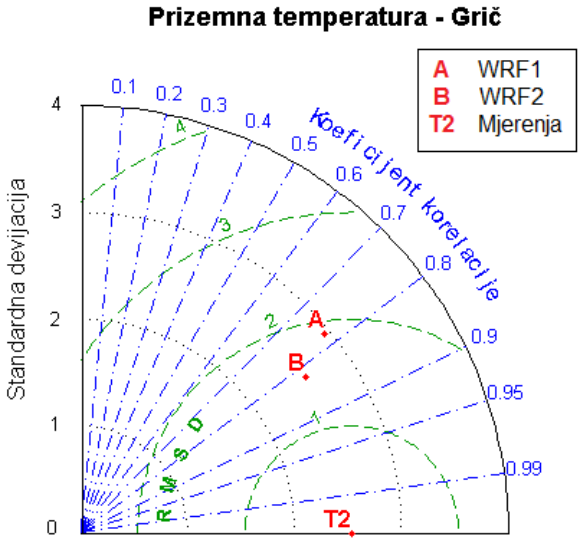
4.1. Analiza statističkih parametara osnovnih meteoroloških veličina

4.1.1. Prizemna mjerenja

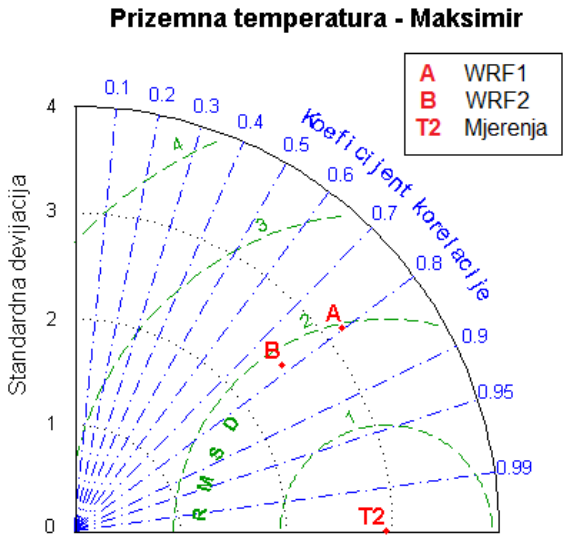
Statistička analiza je obavljena na 84-satnom nizu podataka za postaje Zagreb-Grič, Zagreb-Maksimir, zračna luka Zagreb i Zagreb-GO. Neki mjereni podaci su bili dostupni u polusatnim intervalima (METAR izvješće za aerodromsku postaju, brzina i smjer vjetra za ostale postaje), pa je za te postaje obavljena statistička analiza za 168 podataka. Nizovi su dovoljno dugački da bi ocjena pouzdanosti modela bila referentna. Ujedno se ovdje ispitao utjecaj odabranih parametrizacija (postavki) modela na uspješnost simulacija.



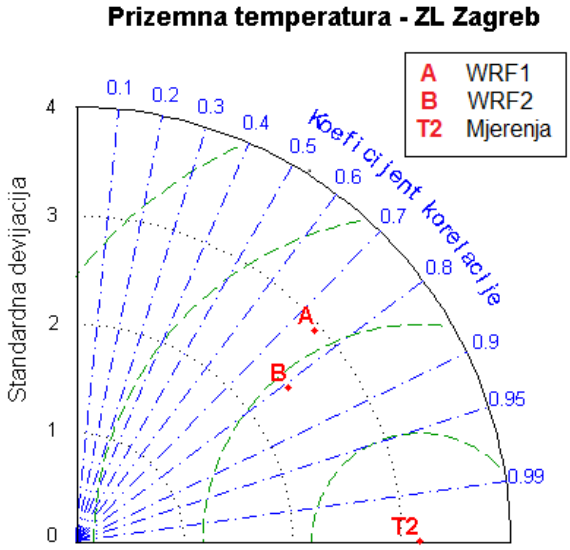
Slika 17: Vrijednosti prizemne temperature (°C) za postaje Zagreb-Grič, Zagreb-Maksimir, zračna luka Zagreb i Zagreb-GO. Za svaku postaju plavom bojom su prikazane izmjerene vrijednosti, crvenom bojom skupina numerička shema koja koristi opciju WRF1 postavki modela, a zelenom bojom skupina numeričkih shema koja koristi opciju WRF2 postavki modela.



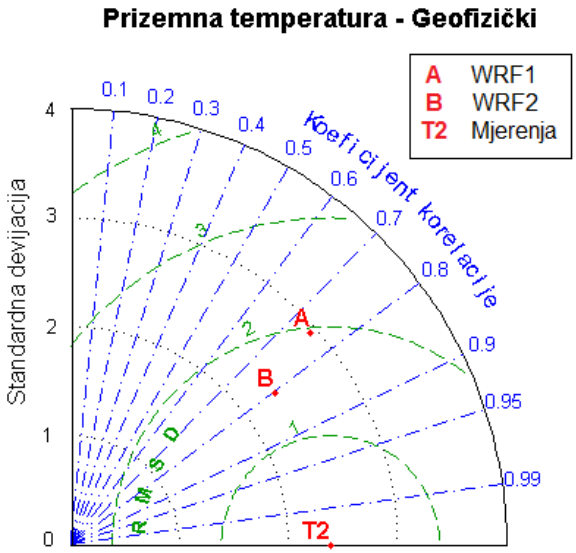
	Mean	STD	RMSD	r	MAE
Grič	9,8	2,5	0,0	1,0	0,0
WRF1	9,8	2,9	1,9	0,8	1,5
WRF2	9,6	2,6	1,5	0,8	1,2



	Mean	STD	RMSD	r	MAE
Maksimir	8,2	2,9	0,0	1,0	0,0
WRF1	9,5	3,2	2,0	0,8	1,8
WRF2	9,5	2,5	1,8	0,8	1,7



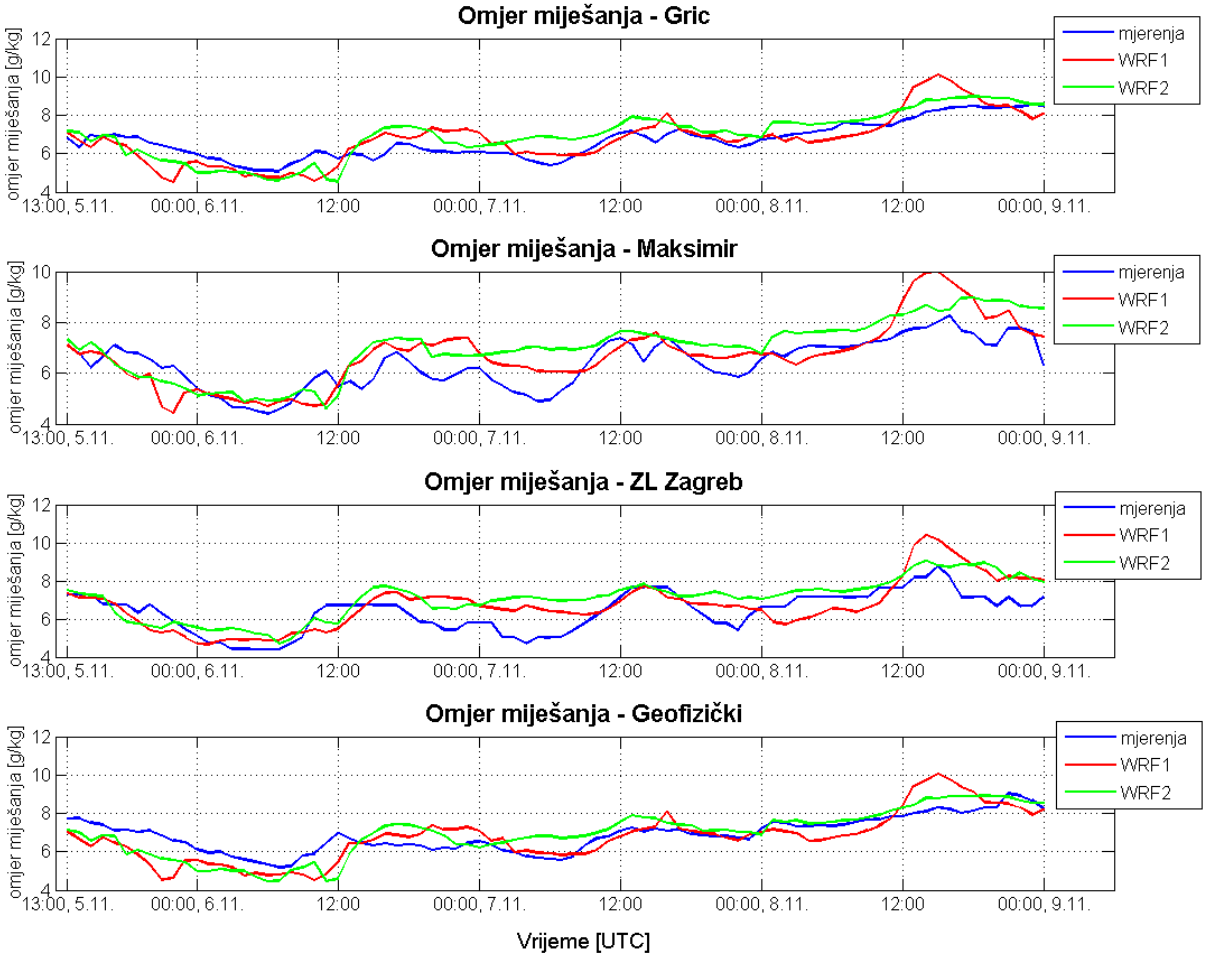
	Mean	STD	RMSD	r	MAE
ZL Zagreb	8,1	3,2	0,0	1,0	0,0
WRF1	9,3	2,9	2,2	0,7	2,1
WRF2	9,4	2,4	1,9	0,8	1,8



	Mean	STD	RMSD	r	MAE
Geofizički	8,9	2,4	0,0	1,0	0,0
WRF1	9,9	2,9	1,9	0,8	1,7
WRF2	9,6	2,3	1,5	0,8	1,1

Slika 18: Taylorovi dijagrami za 2-m temperaturu i pripadne vrijednosti statističkih parametara za sve četiri postaje (a) Zagreb-Grič, (b) Zagreb-Maksimir, (c) zračna luka Zagreb i (d) Zagreb-GO postaju. (Mean je srednja vrijednost).

Vrijednosti *T* 2-m iz mjerenja i numeričkih simulacija (WRF1 i WRF2) za sve postaje prikazane su na slici 17. Iz slike je vidljivo zadovoljavajuće slaganje dnevnih hodova mjerenja i numeričkih simulacija, no opcija WRF1 daje veće vrijednosti maksimalne i manje minimalne *T* (odnosno veću dnevnu amplitudu *T*), kao i veći srednjak *T* za postaje Zagreb-Maksimir i Zagreb-Grič.



Slika 19: Vrijednosti omjera miješanja (g/kg) za postaje Zagreb-Grič, Zagreb-Maksimir, zračna luka Zagreb i Zagreb-GO. Za svaku postaju plavom bojom su prikazane izmjerene vrijednosti, crvenom bojom skupina numeričkih shema koja koristi opciju WRF1 postavki modela, a zelenom bojom skupina numeričkih shema koja koristi opciju WRF2 postavki modela.

Na slici 18 su Taylorovim dijagramima prikazani statistički parametri koji opisuju 2-m *T* izmjerenu na određenoj postaji i numeričke simulacije u točki mreže najmanje domene modela koja je najbliža navedenoj postaji. U tablicama koje se nalaze uz dijagrame prikazane su točne vrijednosti određenog parametra. Iz prikazanih vrijednosti i metodologije u poglavlju 2.3. može se uočiti da model vrlo dobro simulira *T* sa

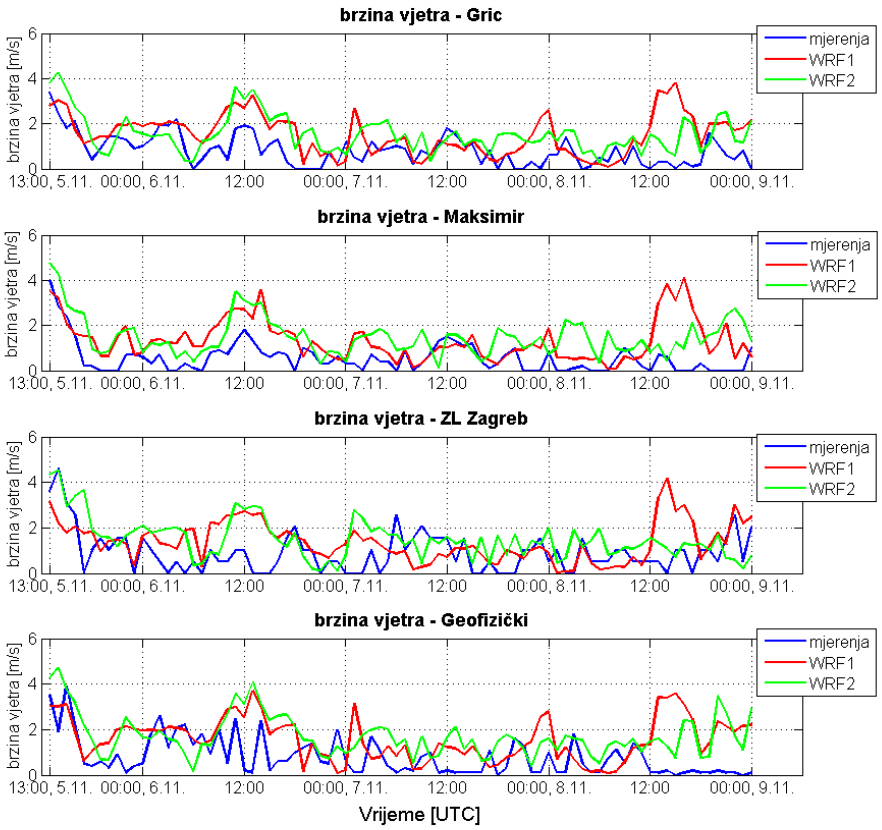
zadovoljavajućom korelacijom (r) za svaku postaju za obje postavke modela. Ipak, r je nešto viši za WRF2 opciju na postajama Zagreb-Grič, zračna luka Zagreb i Zagreb-GO, a na postaji Zagreb-Maksimir je gotovo jednak za obje varijante postavki modela. *RMSD* za obje verzije modela na svim postajama je manji od σ_M što je vrlo zadovoljavajuće u smislu pouzdanosti simuliranja T (Pielke, 2002.). Temperatura je bitan faktor za proces formiranja magle, pa je važno da je dobro reproducirana numeričkim simulacijama modela.

Na slici 19 prikazane su vrijednosti prizemnog omjera miješanja (q) izračunatog iz vrijednosti mjerenja na postajama i dobivenog numeričkim simulacijama iz modela. Na svim postajama hod q u mjerenjima i numeričkim simulacijama nalazi se unutar intervala vrijednosti 4-11 g/kg. Usporedba na slikama 19 i B2 (Dodatak B) ukazuje da model precjenjuje vlažnost tijekom simulacije, što nije neočekivano jer je već uočeno i u drugim studijama (Weisman i sur., 2008.; Prtenjak i sur., 2015.). Posljedica je to korištenja same sheme MYJ AGS (i njene izvedenice MYNN), koja često generira hladniji, niži i vlažniji AGS od opaženog. Od dvije opcije postavki modela WRF2 opcija pokazuje manje oscilacije između ekstrema, pogotovo tijekom noći i dana 7.11. Jedino veće odstupanje numeričkih simulacija od mjerenja događa se tijekom noći 7.11. na postajama Zagreb-Maksimir i zračna luka Zagreb, te tijekom dana 8.11. kada opcija WRF1 daje dosta veliki maksimum q.

Statistička analiza (sl. B2, Dodatak B) pokazuje zadovoljavajuće vrijednosti korelacije (r>0,7) između mjerenja i simulacija. Za postaje koje se nalaze u gradu (Zagreb-Grič i Zagreb-Maksimir), r je veći (~0,8-0,9) nego za zračnu luku Zagreb (~0,7). Obje postavke modela daju nešto veće σ_M od σ_O, ali su ipak usporedive. Male vrijednosti *MAE* parametra i povoljan odnos *RMSD* prema σ_O (*RMSD*<σ_O) ukazuju na uspješnost simulacija. Ovdje su *MAE* manje od 1 g/kg što je jednako uspješno ili uspješnije nego u drugim sličnim mezoskalnim studijama (npr. Prtenjak i sur., 2015.). Općenito, na svim postajama WRF2 opcija daje nešto bliže vrijednosti stvarnim vrijednostima u odnosu na opciju WRF1. Najslabije podudaranje u statističkim parametrima (najmanji r i najveći *RMSD* i *MAE*), pojavljuje se za zračnu luku Zagreb. Pri tome je važno spomenuti da su uzroci najvjerojatnije višestruki. Iako neka od ograničenja modela svakako pridonose razlikama, dio izvora odstupanja moguć je zbog reprezentativnosti samih mjerenja. Za izračun q koristili su se podaci *rh*, T i p iz METAR izvješća, a gdje su *rh* podaci izračunati na temelju T zaokružene na cijeli stupanj. To znači da se za ΔT od 0,9 °C (npr. 15 °C vrijedit će i za mjerene vrijednosti 14,5 °C i 15,4 °C) dobiva isti podatak za *rh*. Navedena odstupanja od stvarnih *rh* vrijednosti mogu biti 5-10%, ovisno o vrijednostima temperature.

Brzina vjetra dobivena numeričkim simulacijama za obje opcije postavki modela i izmjerena brzina vjetra na svakoj od postaja prikazana je na slici 20. Na svim postajama

mjerene brzine uglavnom ne prelaze 2m/s. Iako se radi o vrlo malim brzinama vjetra koje model teško točno reproducira, model ponekad precjenjuje brzine (sporadično daje do 4 m/s) i to najčešće u noćnim satima. Pri tome odgovarajuća statistika ide u korist opcije WRF2. Opcija WRF1 zadnji dan (8.11. poslijepodne) daje veće brzine vjetra u odnosu na ostatak promatranog razdoblja. Unatoč precjenjivanju stvarne brzine vjetra (što je dosta tipično za WRF model, npr. Prtenjak i sur., 2015.), σ između modela i mjerenja su uglavnom usporedive (sl. B3, Dodatak B), kao i *RMSD* i σ. Uspješnost modela je manje očita, ali prema statističkim parametrima opcija WRF2 daje bolje rezultate od WRF1 opcije.

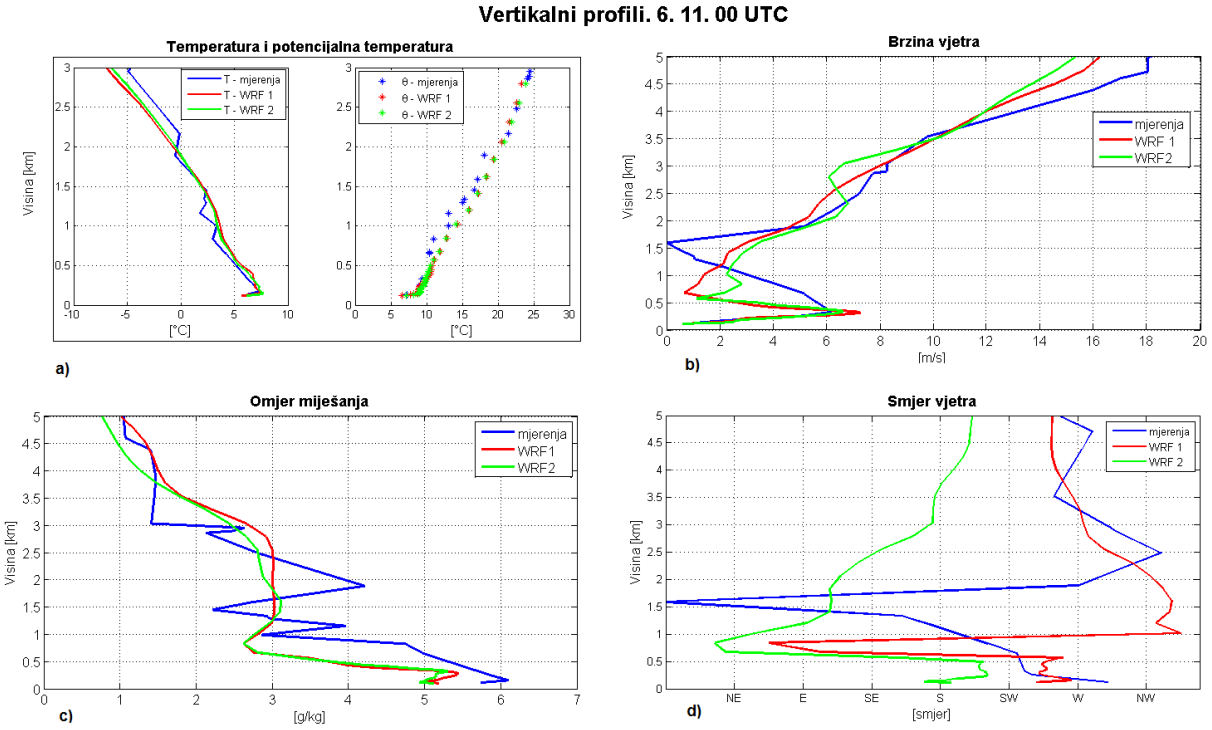


Slika 20: Vrijednosti brzine vjetra na 10 m (m/s) za postaje Zagreb-Grič, Zagreb-Maksimir, zračna luka Zagreb i Zagreb-GO. Za svaku postaju plavom bojom su prikazane izmjerene vrijednosti, crvenom bojom skupina numeričkih shema koja koristi opciju WRF1 postavki modela, a zelenom bojom skupina numeričkih shema koja koristi opciju WRF2 postavki modela.

4.1.2. Radiosondažna mjerenja - usporedba

Vertikalni profili za termin 06.11. u 00 UTC prikazani su na slici 21. Parametri T i θ (potencijalna temperatura) iz radiosondažnih podataka i iz numeričkih simulacija za obje postavke modela pokazuju dobru podudaranost do 5 km visine (sl. 21a). Opažena

temperaturna inverzija na ~170 m visine vrlo dobro je reproducirana u modelu gledajući visinu i intenzitet ΔT (za 170 m sloj) = +1,2 °C u mjerenjima i ΔT (za 170 m sloj) = +1,5 °C u modelu). Brzina vjetra i obje postavke modela vrlo se dobro slažu (sl. 21b) i pokazuju jednaki maksimum brzine vjetra na 400 m visine, a opcija WRF1 daje nešto veći iznos maksimuma. Omjer miješanja (sl. 21c) je zadovoljavajuće reproduciran u numeričkim simulacijama. Mjereni vjetar (sl. 21d) u prvih 170 m je iz W-NW smjera, koji zakreće visinom. Do ~3 km postepeno prelazi na SE smjer. Nakon 3,5 km ponovno se javlja zapadno strujanje. Obje postavke modela pokazuju SW i W komponentu strujanja u najnižem sloju atmosfere (~170 m), uz manje zakretanje vjetra po visini prema južnim smjerovima (E i NE). U sloju ~1-2 km vjetar mijenja smjer od NE do NW, dok se iznad tog javlja tipično visinsko zapadno strujanje.



Slika 21: Vertikalni profili temperature i potencijalne temperature (a), brzine vjetra (b), omjera miješanja (c) i smjera vjetra (d) u terminu 06.11.2013. u 00 UTC. Na slikama su prikazana radiosondažna mjerenja sa postaje Zagreb-Maksimir (plava boja), te dobivene vrijednosti iz dvije postavke modela: WRF 1 (crvena boja) i WRF 2 (zelena boja).

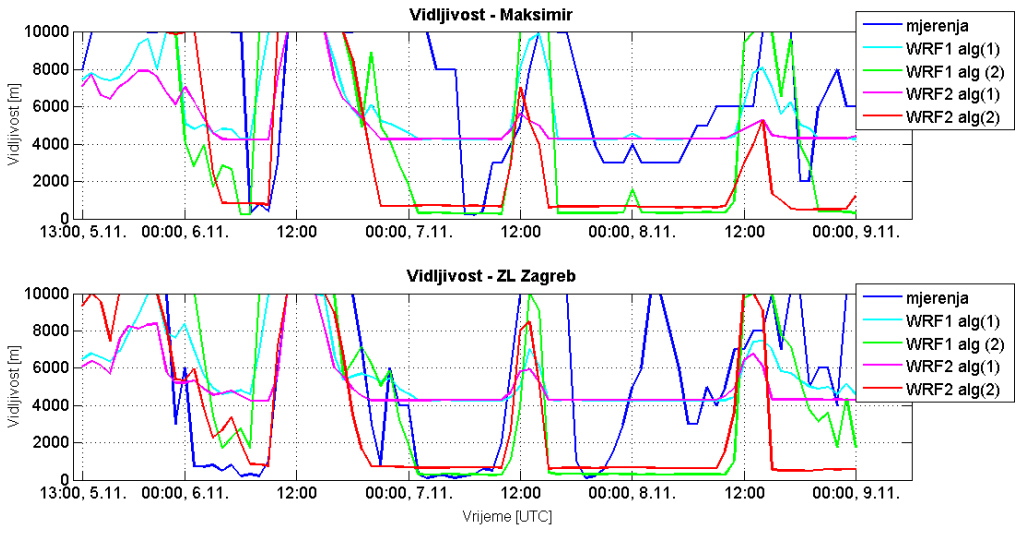
Veličine T i θ za sljedeći noćni termin 7.11. (sl. C1, Dodatak C) su nešto lošije reproducirali temperaturne uvjete. Ipak, i u mjerenjima i u modelu vidljiva je formacija temperaturne inverzije na točnoj visini (~420 m), iako je ona u modelu dvostruko intenzivnija. Brzina vjetra je veća u obje simulacije u odnosu na mjerenja, ukazujući na formiranje niske mlazne struje na ~500 m visine. Hod omjera miješanja je dobro simuliran s neznatno većim prizemnim vrijednostima. Smjer vjetra i njegove promjene

visinom u najnižem 400-m sloju bolje je reproduciran WRF2 opcijom modela. Dobro podudaranje u smjeru vjetra vidljivo je u ostatku troposfere i vrijedi za obje opcije WRF modela.

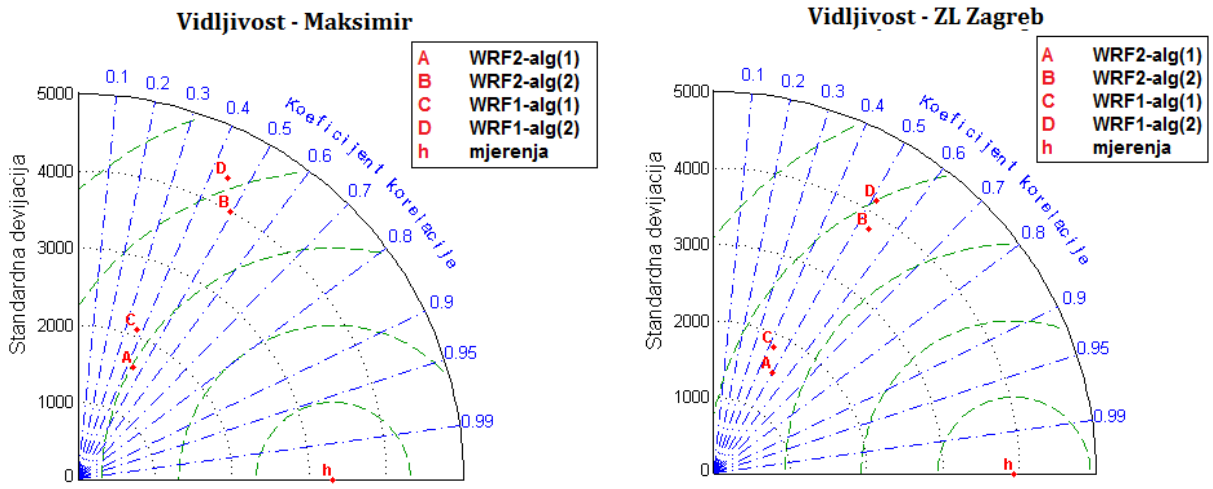
Za termin 8.11. (sl. C2, Dodatak C) simulacije daju vrlo dobro slaganje s izmjerenim radiosondažnim podacima. Profili T i θ su vrlo slični, prizemna inverzija na ~350 m dobro je simulirana modelom, a simulacije ne uočavaju jedino temperaturnu inverziju na 2 km visine. Formirana mlazna struja u mjerenjima na 1,5 km visine reproducirana je na nižoj visini u simulacijama, na 0.5 – 1 km visine, no ostatak profila pokazuje sličan hod. Omjer miješanja bolje prati opcija WRF2 iako u prizemnom sloju (500 m) daje ponešto precijenjeni iznos. Smjer vjetra je sličan i u mjerenjima i u simulacijama, a prevladava zapadna komponenta strujanja kroz cijelu visinu do 5 km. Općenito WRF2 opcija daje nešto bliže vrijednosti stvarnima u najnižem sloju.

4.2. Analiza statističkih parametara horizontalne vidljivosti

U poglavlju 2.4 spomenuto je više načina detekcije magle iz modela, a jedan od ciljeva je vidjeti uspješnost algoritama u njenoj detekciji. Treba imati na umu da se magla definira s h. Na slici 22 dana je usporedba opaženih i procijenjenih h pomoću algoritama (1) i (2) za postaje Zagreb-Maksimir i zračnu luku Zagreb. Postaja Zagreb-GO je izostavljena iz ove analize jer za nju ne postoje izmjereni podaci za h, a za postaju Zagreb-Grič podaci nisu kompletni zbog nedostatka mjerenja tijekom noći.



Slika 22: Usporedba vidljivosti (m) iz opažanja i modela na temelju algoritma za maglu (poglavlje 2.4) za tri postaje; Zagreb-Grič, Zagreb-Maksimir, zračnu luku Zagreb. Mjerenja su prikazana plavo, opcija WRF1 postavki modela i algoritam (1) cijan linijom, te algoritam (2) zelenom linijom. Opcija WRF2 modela uz algoritam (1) rozom krivuljom, a algoritam (2) crvenom bojom.



	Mean	STD	RMSD	r	MAE
Maksimir	7110,5	3310,9	0,0	1,0	0,0
alg (1) WRF2	5296,7	1621,8	2979,6	0,4	2948,6
alg (2) WRF2	3618,6	3999,7	3719,8	0,5	3806,2
alg(1) WRF1	5974,4	2093,7	3200,8	0,4	2718,0
alg(2) WRF1	4561,1	4363,3	4134,3	0,4	3628,9

	Mean	STD	RMSD	r	MAE
ZL Zagreb	5683,0	3927,2	0,0	1,0	0,0
alg (1) WRF2	5195,4	1531,6	3423,7	0,5	2966,2
alg (2) WRF2	3463,3	3789,9	3719,3	0,5	3000,7
alg(1) WRF1	5763,4	1833,3	3551,3	0,4	2938,2
alg(2) WRF1	4644,9	4153,1	3991,3	0,5	2806,5

Slika 23: Taylorovi dijagrami za vidljivost [m], i pripadne vrijednosti statističkih parametara za postaje (a) Zagreb-Maksimir i (b) zračna luka Zagreb za obje postavke modela (WRF1 i WRF2) i oba algoritma (pogl. 2.4.).

Kao ni za mjerenja, algoritam (1) niti u jednom trenutku promatranog razdoblja ne daje maglu, odnosno *h* manju od 1000 m. Algoritam (2) za obje postavke modela daje puno realnije vrijednosti *h,* kao i one manje od 1000 m, ali u dužem trajanju u odnosu na opažene podatke. Gledajući sve tri postaje najbolje poklapanje se uočava za zračnu luku Zagreb. Ondje se magla prvi puta javlja u noći 6.11. i traje 9 sati, a WRF 2-alg (2) kombinacija jedina daje kratkotrajnu maglu posljednja 2 sata trajanja. Drugi termin pojave magle na aerodromu je 07.11. u 01 UTC, a ukupno trajanje je 8 sati. Za taj termin kombinacije WRF1-alg(2) i WRF2-alg(2) također daju smanjenu vidljivost, ali se opcija WRF1-alg(2) pokazuje nešto boljom i gotovo se poklapa s izmjerenim *h* vrijednostima. Opcija WRF2-alg(2) za taj termin daje pojavu magle 6 sati ranije. Posljednji termin smanjene *h* u zračnoj luci Zagreb je 07.11. u 18 UTC i trajanje je 4 sata dok WRF1-alg(2) i WRF2-alg(2) prikazuju pojavu magle u 14 UTC i njezino trajanje od gotovo 18 sati.

Statistička analiza *h* za postaje Zagreb-Maksimir i zračnu luku Zagreb je prikazana na slici 23. Najveća korelacija na postajama Zagreb-Maksimir i zračnoj luci Zagreb je za kombinaciju WRF2-alg(2). Za obje verzije modelskih postavki i primjenom algoritma (2) prisutna je veća varijabilnost *h* u dnevnom hodu (veće σ_M). Time je uglavnom σ_M usporediva sa σ_0 te je $RMSD<\sigma_M$. Kod primjene algoritma (1), kao i kod opaženih vrijednosti, srednjaci su oko 5-6 km s vrlo malim σ vrijednostima. Time se potvrdilo da

je tim algoritmom nemoguće detektirati maglu iz modela te se više neće uzimati u obzir prilikom daljnje analize.

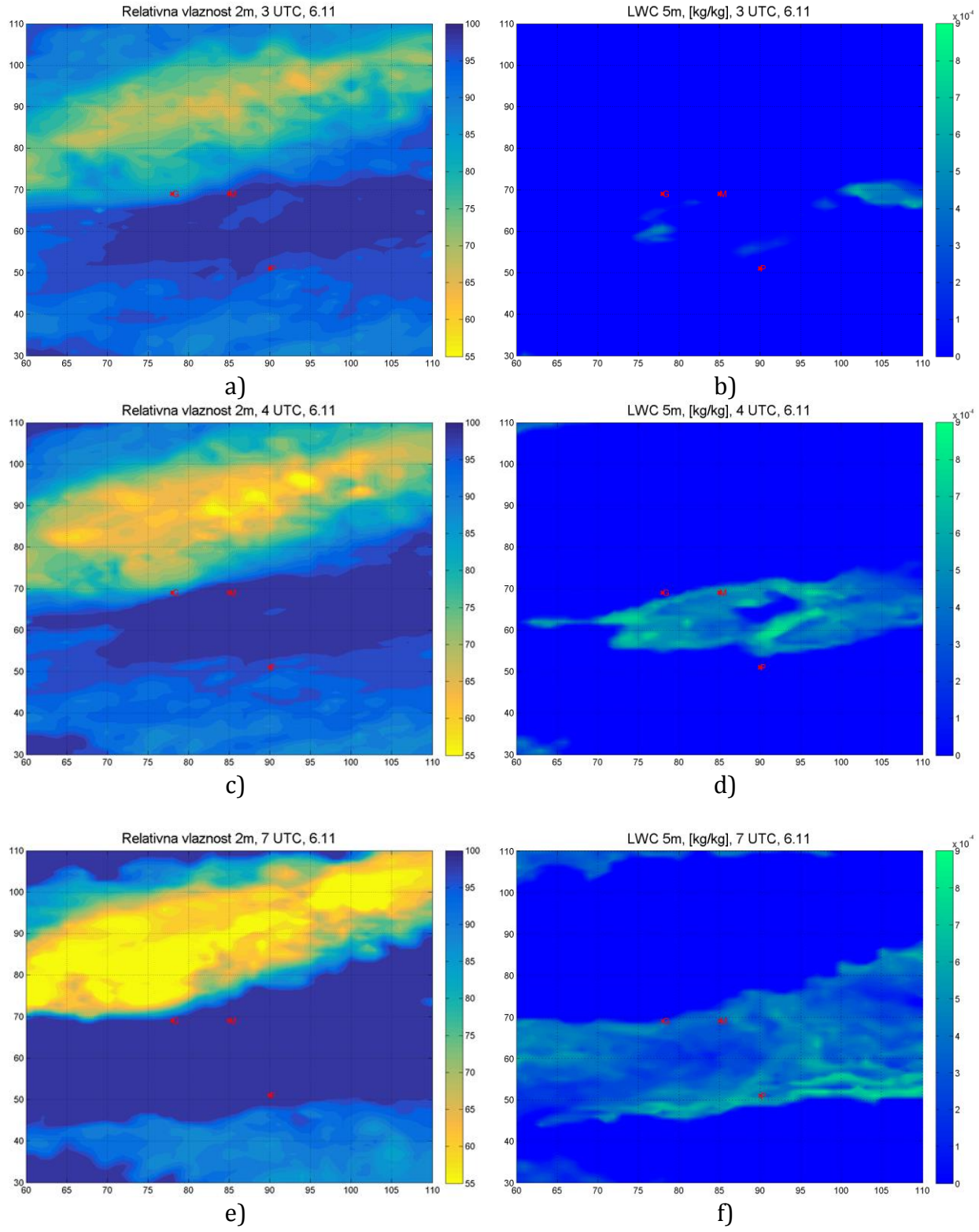
4.3. Analiza slučaja

Kako bi se dobio kompletan uvid u termodinamičke procese koji se odvijaju u određenim situacijama, meteorološki parametri će se prikazati horizontalnim i vertikalnim presjecima. Ovdje će biti prikazana simulacija napravljena s WRF2 postavkama (tab. 1), jer se pokazala statistički uspješnija. Kako je cilj utvrditi potencijalnu povezanost silaznog vjetra obronka s pojavom magle fokus je bio na terminima prije i za vrijeme pojave magle na zračnoj luci Zagreb (sl. 13). Zbog toga su odabrani sljedeći termini u kojima postoji kombinacija vjetra iz sjevernih smjerova (NW-NE) i magle/sumaglice: predvečerje 05.11. i noć 06.11., predvečerje 06.11. i noć 07.11., te predvečerja 07.11. i 08.11.2013. Za detekciju magle iz modela se koristi varijabla *LWC*.

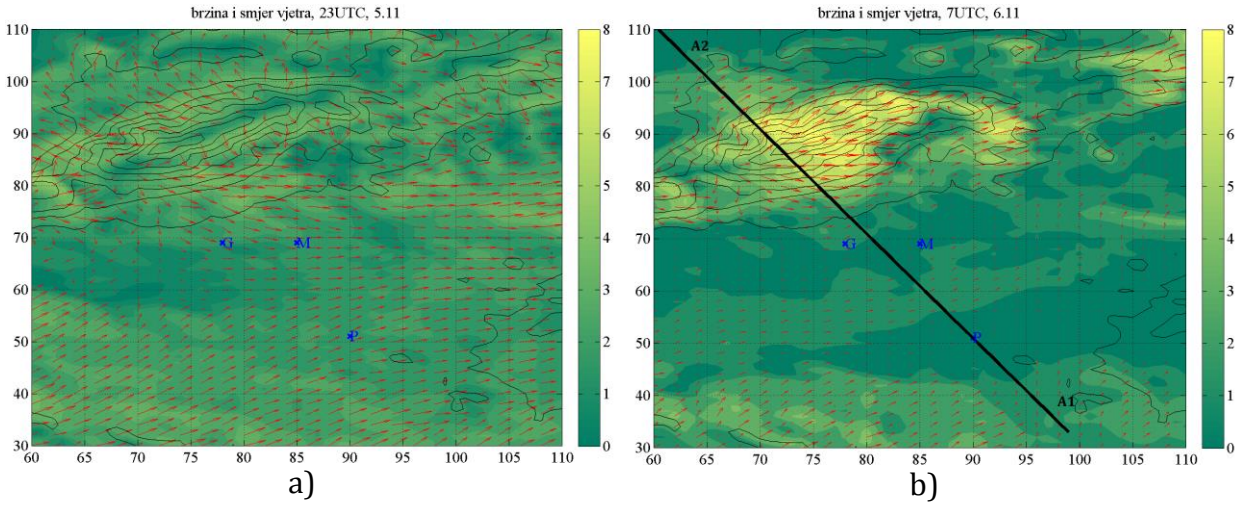
4.3.1. Prva epizoda magle (predvečerje 05.11.2013., noć i jutro 06.11.2013.)

Na slici 24 prikazana je evolucija prizemnih *rh* i *LWC*-a u horizontalnom presjeku na 2m i 5m visine za prvi termin pojavljivanja magle. Već je ranije spomenuto kako se smanjena *h* (magla) u modelu interpretira kao vrijednost *LWC*-a ≥ 0,015 g/kg uz *rh*>95%. U 03 UTC *rh* dostiže vrijednosti >95% na području grada i uže okolice (sl. 24a) dok se povećan *LWC* javlja mjestimično (sl. 24b). Nakon sat vremena područje visoke *rh* se povećava (sl. 24c), a *LWC* je prati i pokazuje dobro slaganje s *rh* (sl. 24d). Do 07 UTC područje grada i šire okolice obuhvaćeno je maglom (sl. 24e, f). *LWC* upućuje na najveće zasićenje zraka (pa zbog toga i na najgušću maglu) oko zračne luke Zagreb (sl. 24f). Nakon toga počinje postupno smanjenje *rh* i *LWC*-a vrijednosti te oko 10 UTC magla potpuno disipira. Prema prikazanim rezultatima može se zaključiti da se područja visokih vrijednosti *LWC*-a i *rh* vrlo dobro podudaraju i time pokazuju visoku međuovisnost.

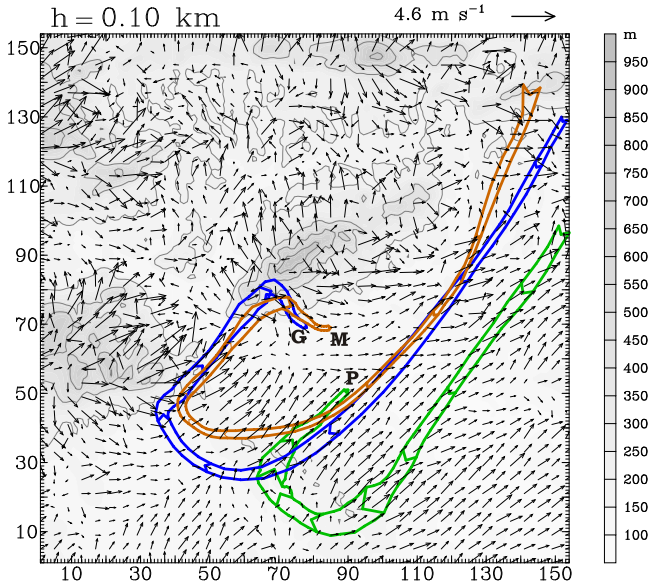
U 23 UTC (sl. 25a) prikazano je polje strujanja vjetra na 10-m visine iznad tla. Južni dijelovi domene, pa tako i zračna luka Zagreb, pod utjecajem su dosta uniformnog SW strujanja. Nasuprot tome, zbog utjecaja Medvednice, nad sjevernim dijelovima grada stvara se superponirano prizemno NW –W strujanje nad gradom. Do 07 UTC brzina vjetra se u gradu i na zračnoj luci smanjuje (sl. 25b). Karakteristike prizemnog strujanja potvrđuju i 3D trajektorije izračunate na temelju polja strujanja 100 m iznad tla. Na urbanim postajama Zagreb-Grič i Zagreb-Maksimir (slova G i M na sl. 26) jasan je doprinos katabatičkog vjetra, dok je taj utjecaj izostao kod zračne luke Zagreb (slovo P na sl. 26).



Slika 24: Relativna vlažnost (*rh*, %) i *LWC* (g/kg) prikazani su na slikama (a), (b) (06.11.2013., 03 UTC), (c), (d) (06.11.2013., 04 UTC), te (e) i (f) (06.11.2013., 07 UTC). Postaje su označene slovima G (Zagreb-Grič), M (Zagreb-Maksimir) i P (zračna luka Zagreb).



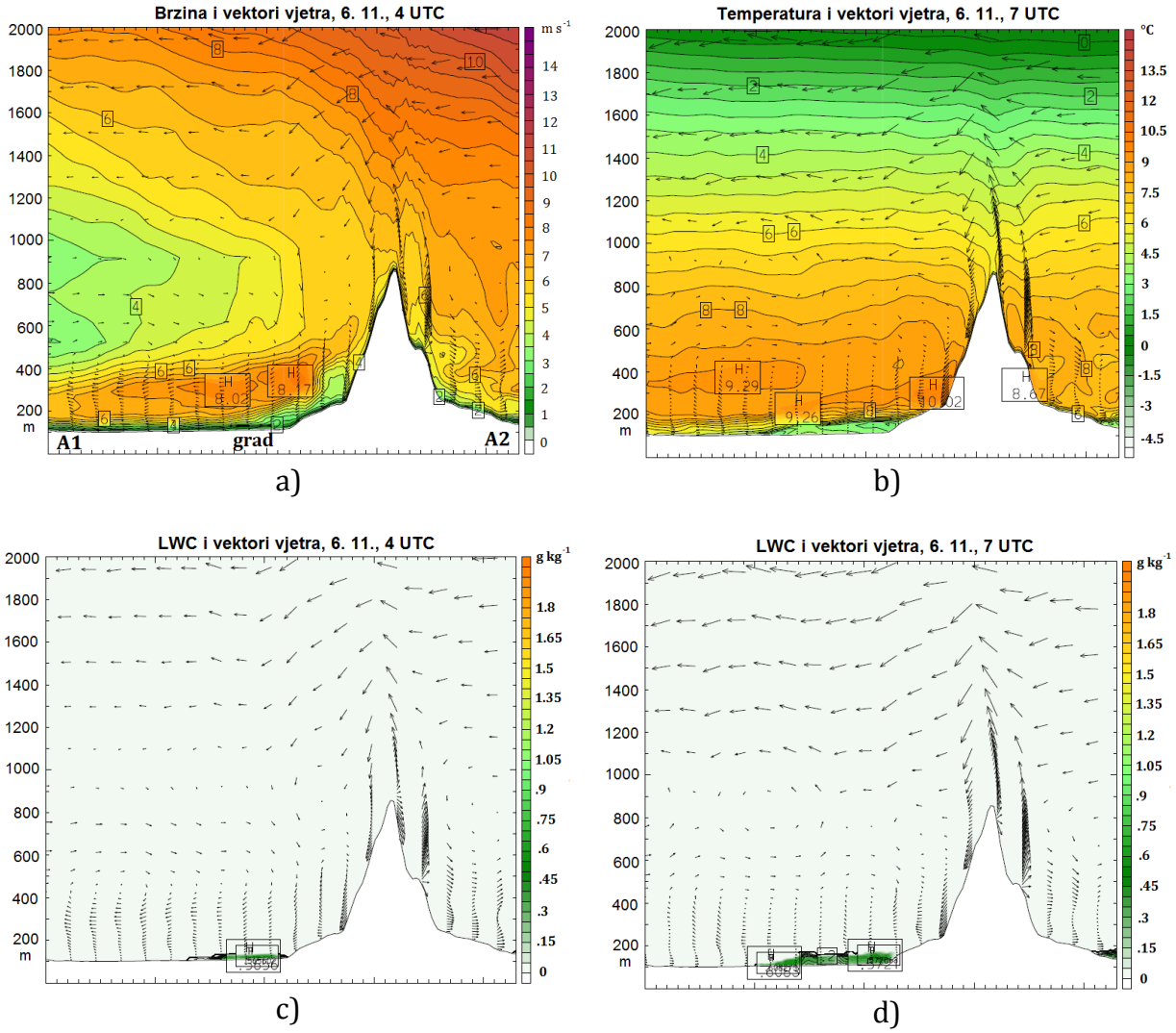
Slika 25: Brzina (m/s) i smjer vjetra. (a) 05. 11. 2013. 23 UTC; (b) 06.11.2013., 07 UTC. Postaje su označene slovima G (Zagreb-Grič), M (Zagreb-Maksimir) i P (zračna luka Zagreb). Na slici (b) crnom linijom označen je korišteni vertikalni presjek, a oznakama A1 i A2 početak i kraj vertikalnog presjeka. Tankim crnim linijama označena je topografija i položaj Medvednice u odnosu na grad.



Slika 26: Trajektorije česti zraka unatrag 13 sati simulacije pokazuje putanje koje je čest prešla do 06.11.2013. u 00 UTC do postaja Zagreb-Grič (plavo), Zagreb-Maksimir (smeđe), zračna luka Zagreb (zeleno)) uz polje strujanja (m/s) u 00 UTC. Trajektorije su izračunate na temelju vjetra 100 m iznad tla.

Na slici 27 prikazane su vertikalne raspodjele *T* i *LWC* popraćene vektorima vjetra u prvih 2 km visine atmosfere za dva termina: 04 UTC i 07 UTC. Presjek prelazi preko Medvednice, grada te zračne luke Zagreb. Na slikama 27a, b vidljivo je kako se do 07 UTC

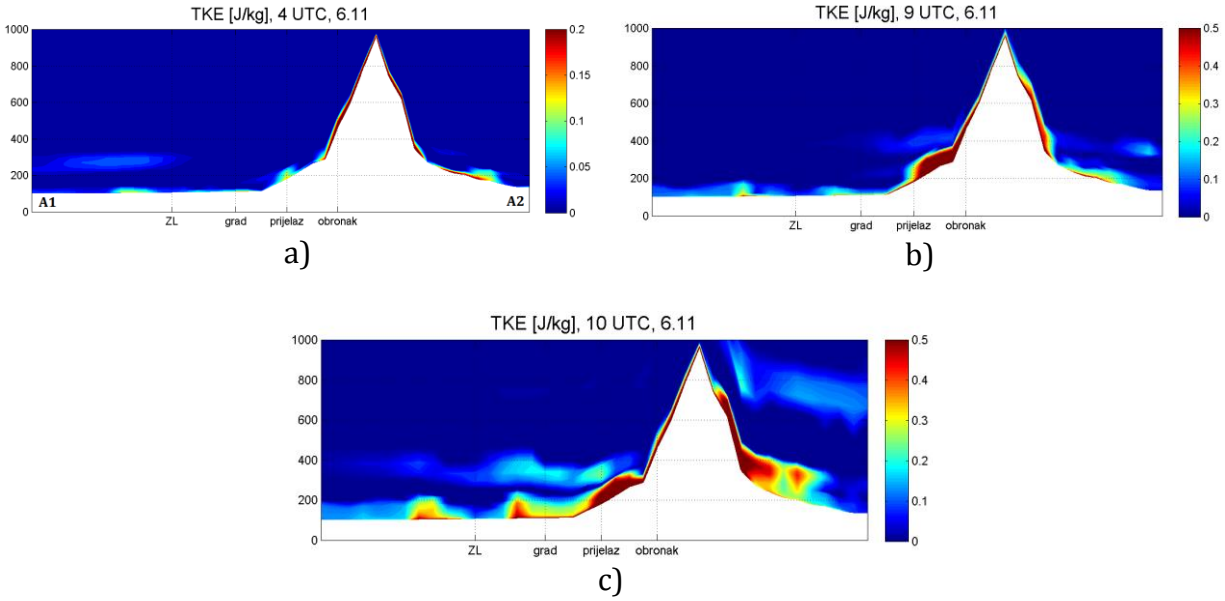
formirala jaka temperaturna inverzija koja je postepeno rasla tijekom noći. Kada je temperaturna inverzija dovoljno ojačala javlja se vrlo tanki prizemni sloj magle (sl. 27d).



Slika 27: (a,b) Vertikalna struktura temperature [°C] za 6.11.2013. u (a) 04 UTC i (b) 07 UTC. (c, d) Vertikalna struktura *LWC*-a [g/kg] za 6.11.2013. u (c) 04 UTC i (d) 07 UTC.

U razdoblju formiranja magle prizemni atmosferski sloj bio je statički stabilan s malo ili niti malo turbulentnog miješanja (sl. 28a). U 09 UTC (sl. 28b) polje *TKE* ukazuje na više procesa koji ju generiraju. Javlja se pruga pojačanog generiranja *TKE* pri tlu uz padinu planine te na visini oko 400 m (odnosno 200 m iznad tla) zbog smicanja vjetra. Mehanički generirana *TKE* pri tlu je zbog hrapavosti podloge te se javlja turbulentno miješanje između nižih i viših slojeva prizemnog graničnog sloja. Na visini, sloj povećane *TKE* je povezan sa slojem jačeg strujanja i smicanja iznad temperaturne inverzije. Pojava pruge s povećanom *TKE* po visini utječe na destrukciju gornjeg sloja magle tijekom

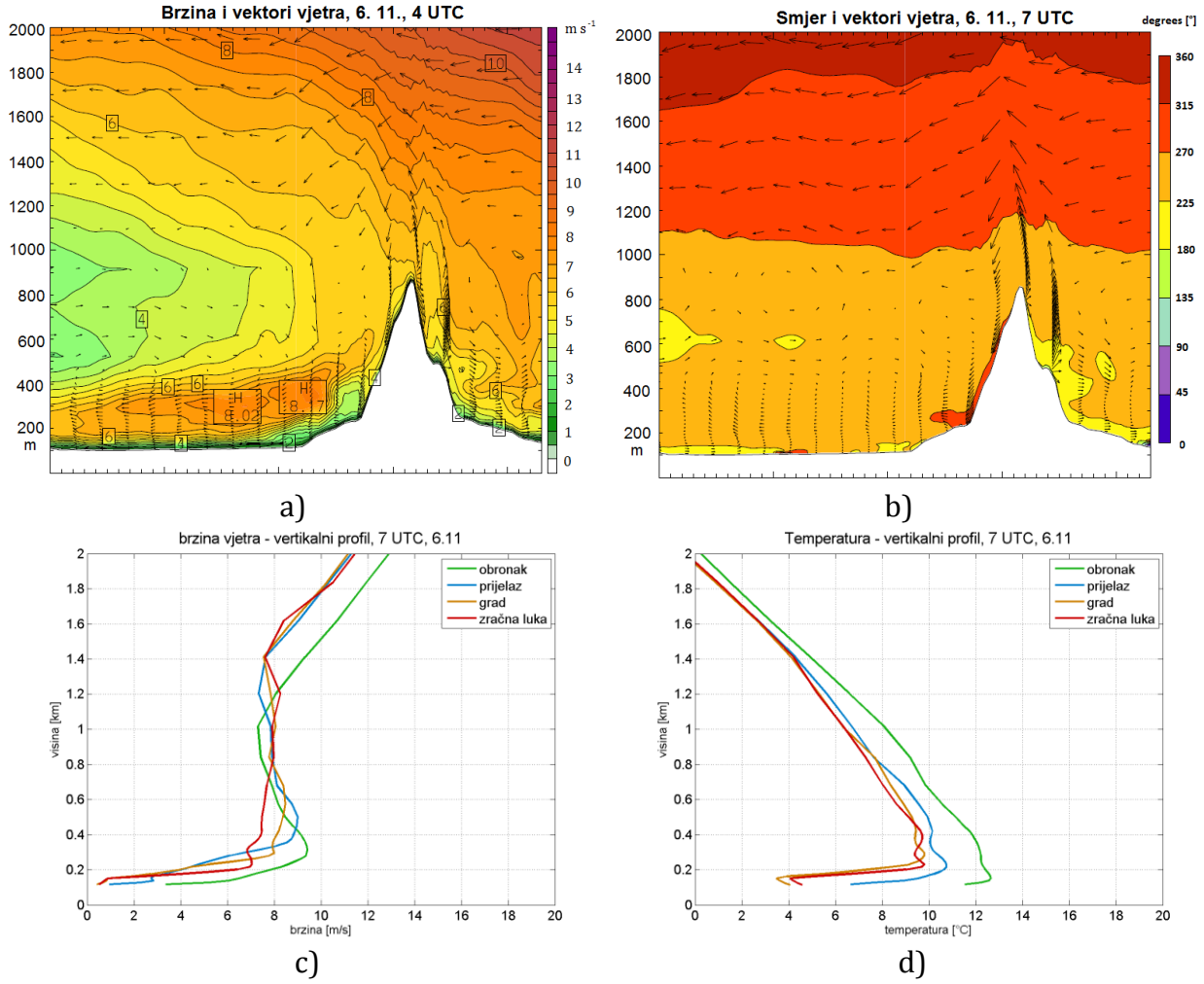
narednih sati (sl. 28c). Uočen porast turbulencije u prvih 400 m općenito uzrokuje destrukciju temperaturne inverzije, a potom i magle. Slično je uočeno i u drugim studijama (npr. Cuxart i Jimenez, 2012.).



Slika 28: Vertikalna struktura turbulentne kinetičke energije (TKE, m^2/s^2). Prikazani su termini 6.11.2013. u (a) 04 UTC, (b) 09 UTC i (c) u 10 UTC.

Obzirom da je jedan od zadataka ovog rada bio procijeniti utjecaj katabatičkog vjetra na životni vijek magle cilj nam je detaljnije analizirati odnos silaznog vjetra obronka i temperaturne strukture prizemnog graničnog sloja (sl. 29).

Večer 5.11. i noć 6.11. upućuju na povećanu brzinu sjeverozapadnog strujanja na visini 300-500 m, dok je u prizemnom sloju do 200 m brzina vjetra vrlo mala (sl. 29a). Takav režim strujanja traje do jutra s blagim mjestimičnim izmjenama povećane brzine vjetra. Tijekom cijele noći na južnom obronku Medvednice (sl. 29b) javlja se plitak sloj s katabatičkim strujanjem vidljiv u jeziku smjera vjetra (NW) sa sjevera odnosno strukturi niske mlazne struje u profilu brzine vjetra na obronku Medvednice (sl. 29c). Maksimalne brzine se javljaju na visini od oko 300 m malo iznad temperaturne inverzije na prijelazu između obronka i grada (sl. 29c). Profil temperature (u točkama obronka i prijelaza na sl. 29d) prikazuje toplije strujanje koje dolazi s Medvednice što je u skladu s adijabatičkim zagrijavanjem tijekom spuštanja zraka. Nad gradom i niz strujanje zraka, temperaturna inverzija



Slika 29: Vertikalni presjek polja strujanja za 06.11.2013. (a) brzina (m/s-legenda sa strane) i vektori vjetra (m/s) u 04 UTC, (b) smjer (po sektorima svakih 45°-legenda sa strane) i vektori vjetra (m/s) u 07 UTC. Na slikama vektori vjetra predstavljaju tangencijalnu komponentu strujanja u odnosu na vertikalni presjek. Vertikalni profili (c) brzine vjetra (m/s) i (d) temperature (°C) 6.11.2013. u 07 UTC.

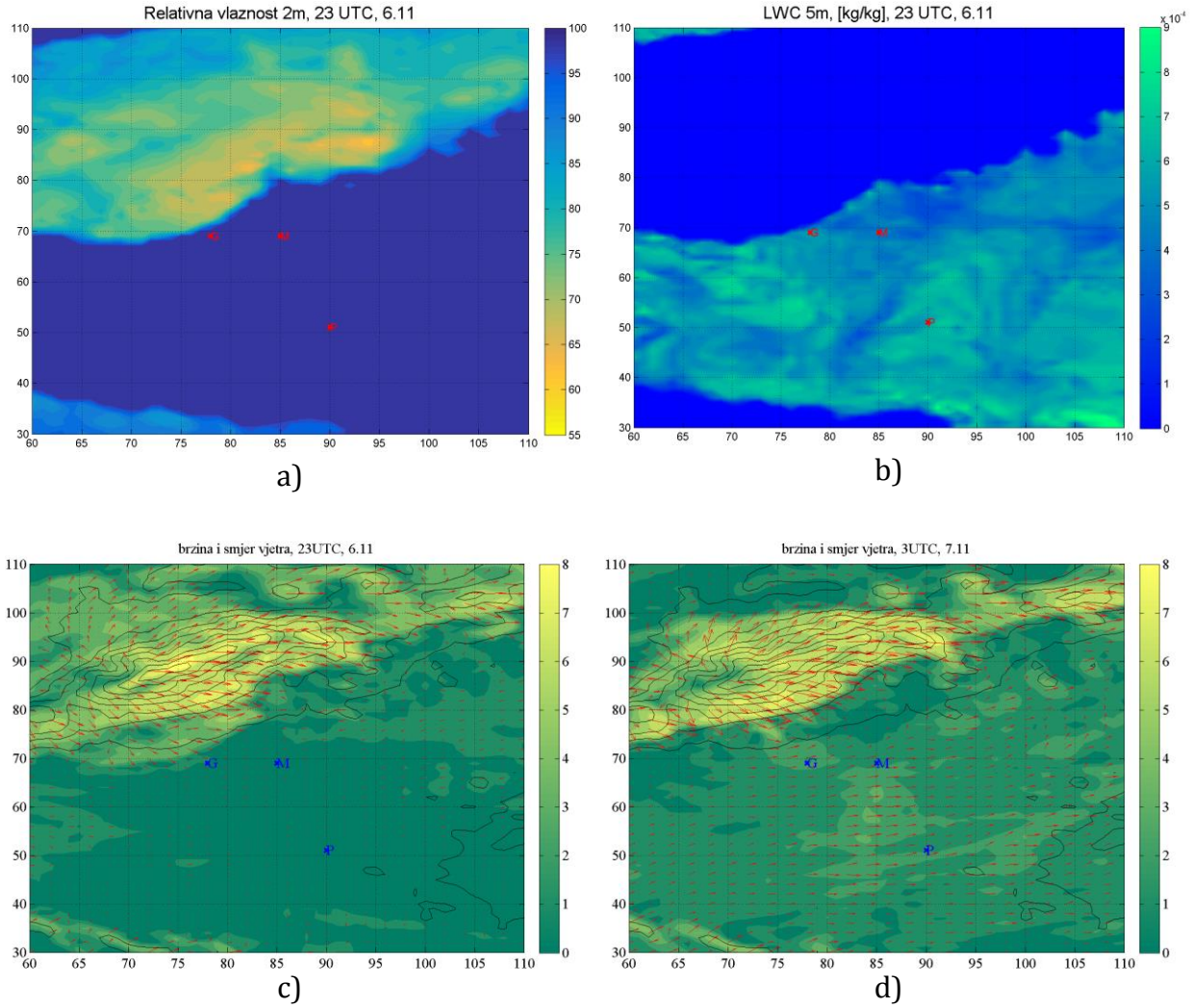
se povisuje i produbljuje, a mlazna struja biva disipirana. Sve ukazuje na ograničen ali i dvojak utjecaj katabatičkog strujanja na pojavu magle. Sjeverno strujanje na većim visinama koje se javlja na južnom obronku Medvednice odgovorno je za dovođenje toplijeg zraka nad područje grada i pojačavanje/održavanje temperaturne inverzije nad centrom grada, te tako izravno utječe na stvaranje i održavanje prizemnog sloja magle. Drugi proces je vezan uz generiranje *TKE* uslijed smicanja vjetra što predstavlja faktor destrukcije u očuvanju temperaturne inverzije a onda i sloja magle.

S obzirom na atmosferske uvjete ovaj događaj magle nad zagrebačkim područjem se klasificira kao radijacijski tip. Zadovoljeni su svi uvjeti takvog tipa magle, a oni su: prizemna brzina vjetra je manja od 3 m/s, stvorena temperaturna inverzija, te visoka

zasićenost zraka (*LWC* > 0,015 g/kg i *rh* > 95%).

4.3.2. Druga epizoda magle (večer 06.11.2013., noć i jutro 07.11.2013.)

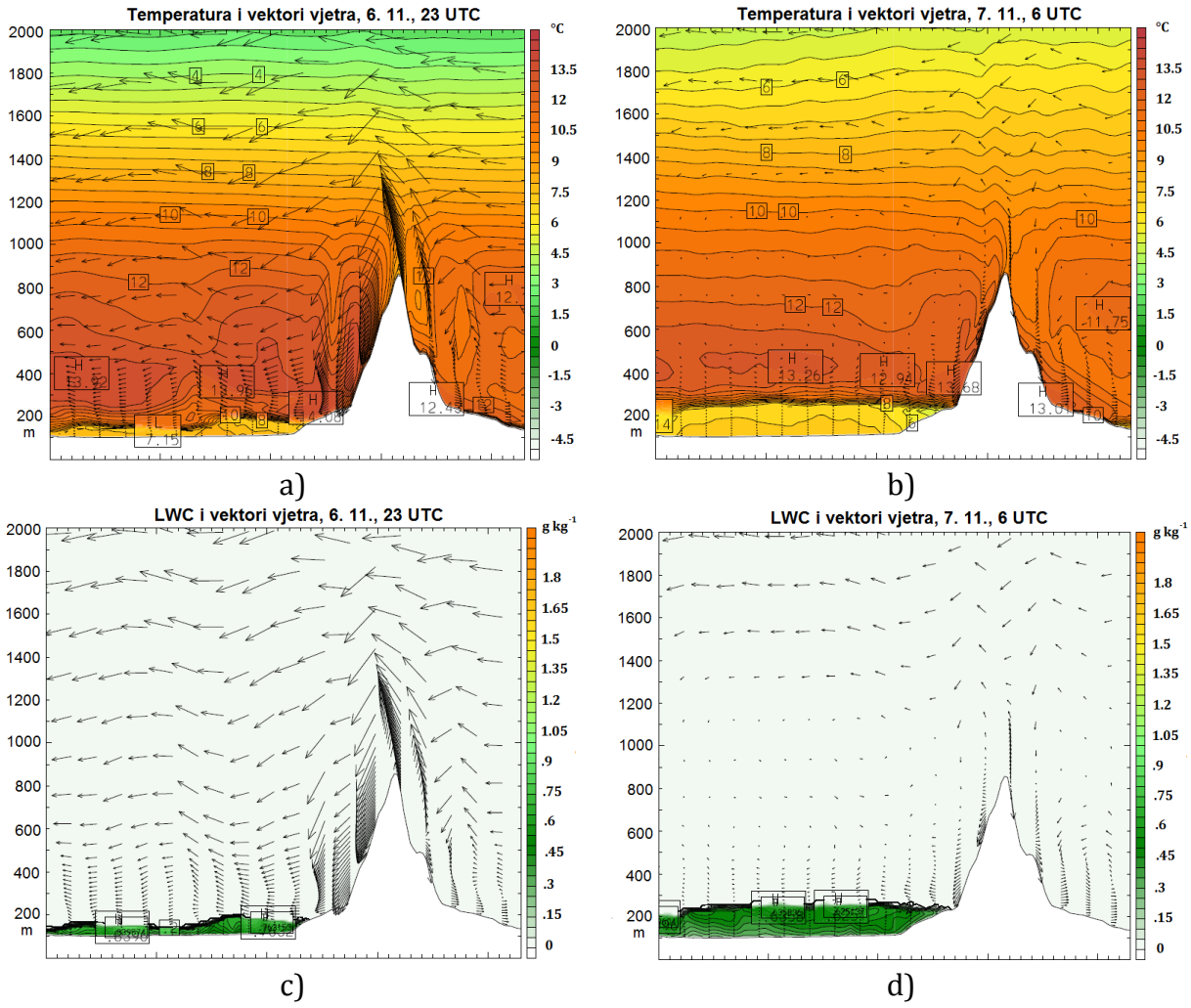
Na slici 30 prikazana je horizontalna raspodjela *rh* i *LWC*-a 06.11. u 23 UTC te brzina i smjer vjetra 06.11. u 23 UTC i 07.11. u 03 UTC.



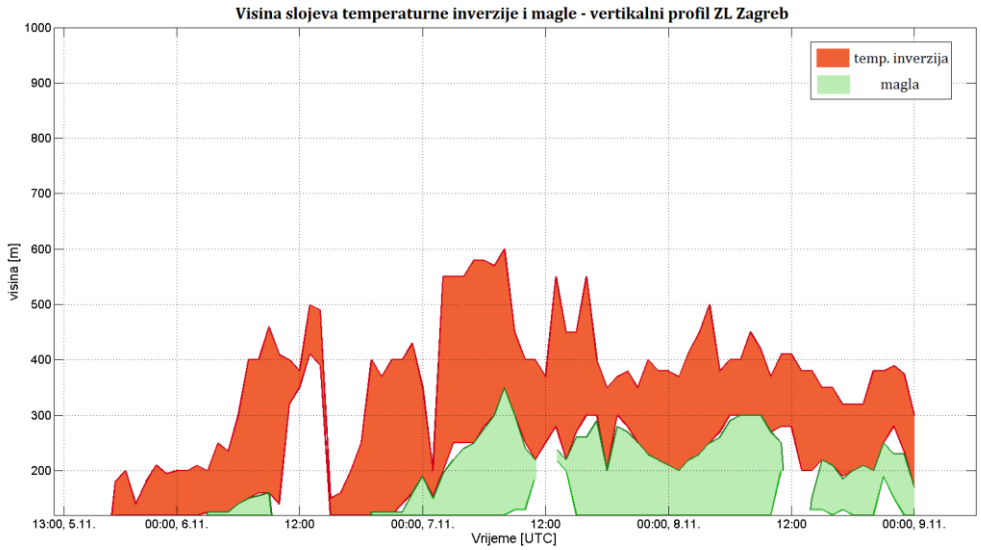
Slika 30: Relativna vlažnost (a) i *LWC* (b) prikazani su na slikama za 06.11.2013. u 23 UTC. Brzina (m/s) i smjer vjetra prikazane su za termine (c) 06.11.2013. u 23 UTC; (d) 07.11.2013. u 03 UTC. Postaje su označene slovima G (Zagreb-Grič), M (Zagreb-Maksimir) i P (zračna luka Zagreb). Crnim linijama označena je topografija i položaj Medvednice u odnosu na grad.

U uvjetima vrlo visoke *rh* (sl. 30a), 6.11. u 23 UTC, vrlo slab vjetar se izmjenjuje s područjima tišina na širem području grada (sl. 30c). To je područe ujedno pod jakim utjecajem visokih *LWC* što upućuje na smanjenu vidljivost i pojavu magle (sl. 30b).

Tijekom noći se uspostavlja slabo zapadno-jugozapadno strujanje (sl. 30d) i održava se do kasnih jutarnjih sati. U tom razdoblju *rh* i *LWC* (nije prikazano) su još uvijek visoki na području grada i okolice, te svojim vrijednostima (*rh*>95% i *LWC*>0,015 g/kg) ispunjavaju uvjete za nastanak magle. Brzina vjetra, *LWC* i *rh* smanjuju se prije podneva.

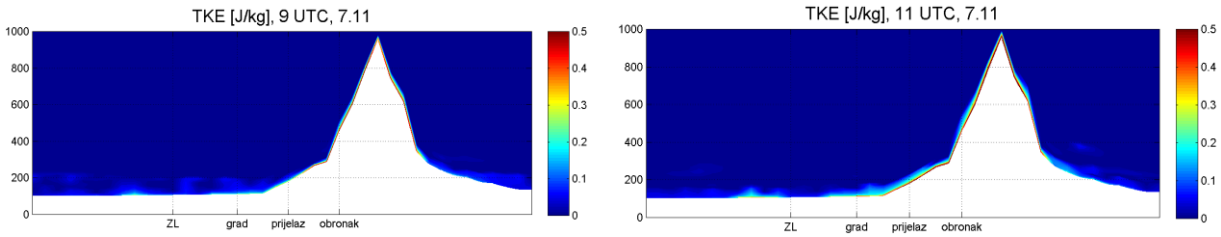


Slika 31: Vertikalna struktura temperature [°C] 06.11.2013. u 23 UTC (a) i 07.11.2013. u 06 UTC (b) te *LWC*-a [g/kg] 06.11.2013.u 23 UTC (c) i 07.11.2013. u 06 UTC (d). Strelicama je prikazana tangecijalna komponenta strujanja (m/s) na odabrani presjek.

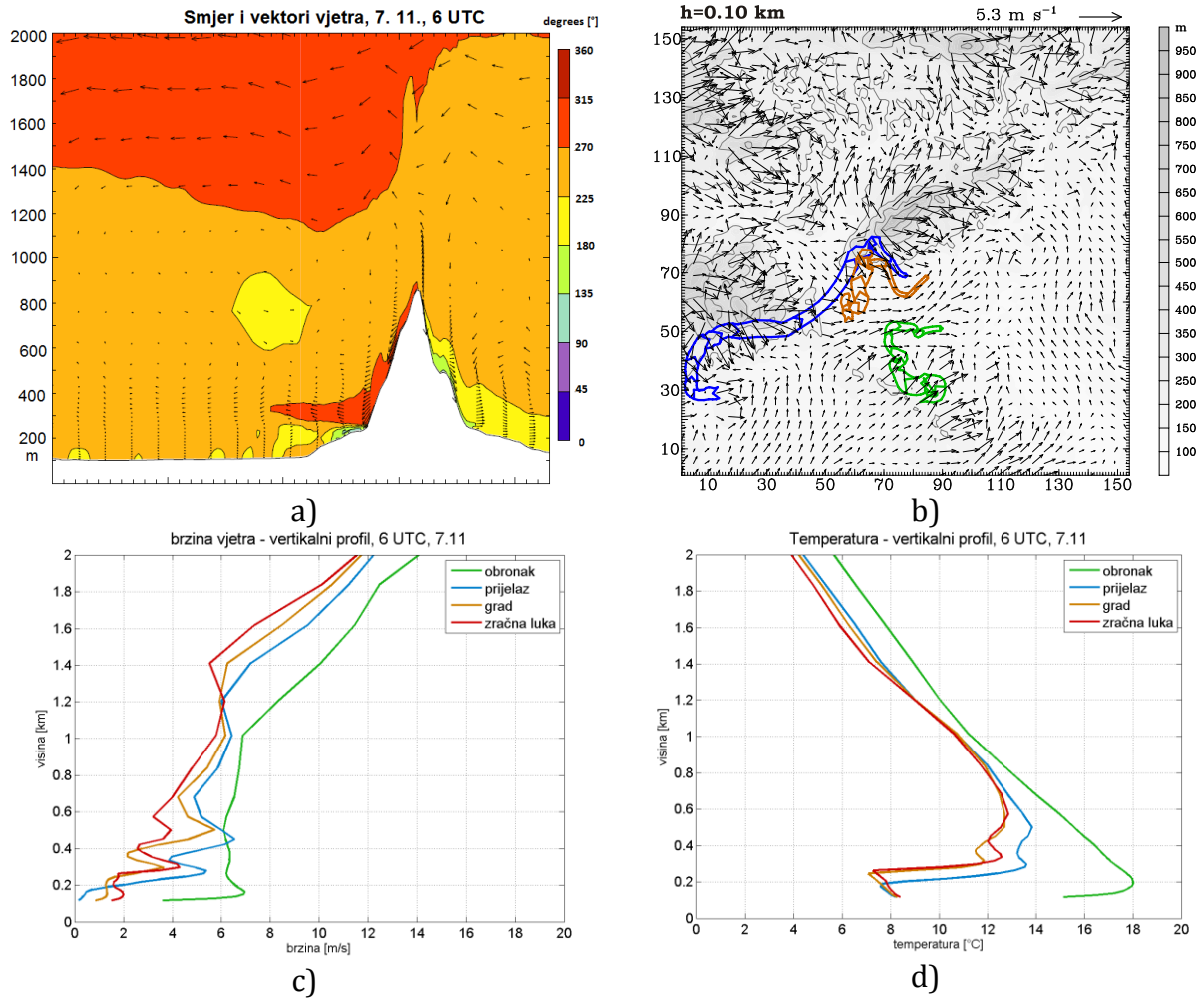


Slika 32: Vremenski nizovi visine sloja temperaturne inverzije i visine sloja magle nad zračnom lukom Zagreb od 05.-09.11.2013. godine.

Kako je u ovom razdoblju zasićenost zraka visoka tijekom cijele noći uzrok nastanka magle potrebno je potražiti u vertikalnoj strukturi prizemnog sloja. U 23 UTC, 06.11.2013. formirana je slaba temperaturna inverzija (sl. 31a, 32), a kako je od popodneva tog dana zrak bio jako zasićen stvoreni su uvjeti za stvaranje prizemnog sloja magle (sl. 31c, 32). Tijekom noći temperaturna inverzija postupno se pojačava i do jutra u 06 UTC *LWC* i temperaturna inverzija dosežu svoj maksimum (sl. 31b, d). Iako jutro donosi blago smanjenje temperaturne inverzije i nestajanje magle, temperaturna inverzija je ipak još uvijek prisutna zbog nedovoljno snažne turbulencije koja bi izmiješala prizemne i više slojeve (sl. 32, 33) i „razbila“ tu inverziju. Promatrajući vertikalnu strukturu vjetra od 23 UTC pa nadalje javlja se sjeverno strujanje (sl. 31a) koje na visini od 300–350m donosi adijabatički zagrijan zrak s južnog obronka Medvednice nad grad. Time pojačava temperaturnu inverziju iznad noćnog stabilnog graničnog sloja (sl. 34d). Takvo strujanje nastavlja se do 06 UTC kada se brzina vjetra smanjuje (sl. 31b).



Slika 33: Vertikalna struktura turbulentne kinetičke energije (*TKE*, m^2/s^2). Prikazani su termini 07.11.2013. u 09 UTC (a) i u 11 UTC (b).



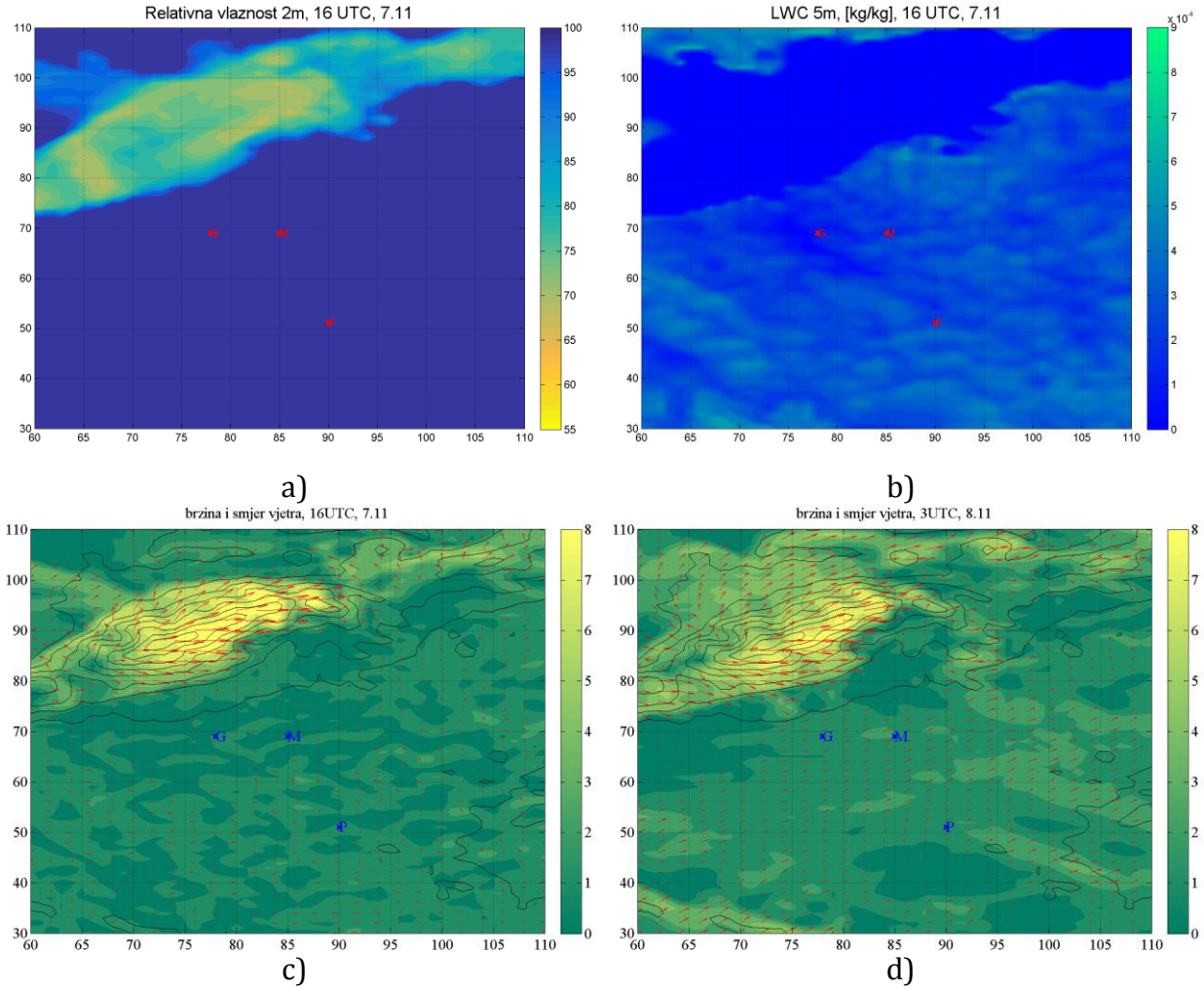
Slika 34: Smjer (a) i vertikalni profil brzine vjetra (c) i temperature (d) 07.11.2013. u 06 UTC. Na slici (a) svaka boja označava određeni interval smjera vjetra u stupnjevima, a na slikama c) i d) prikazana su četiri vertikalna profila brzine vjetra i temperature označena na slici 33. (b) Trajektorije česti zraka unatrag 13 sati simulacije pokazuje putanje koje je čest prešla do 07.11.2013. u 00 UTC do postaja Zagreb-Grič (plavo), Zagreb-Maksimir (smeđe), zračna luka Zagreb (zeleno) uz polje strujanja (m/s) u 00 UTC. Trajektorije su izračunate na temelju vjetra 100 m iznad tla.

Kao što pokazuju trajektorije (sl. 34b), tijekom noći se silazni vjetar obronka ne može promatrati odvojeno od sinoptičkog strujanja koje prelazi Medvednicu već je superponiran na njega. Pri manjim brzinama sinoptičkog strujanja (pred jutro), utjecaj silaznog vjetra obronka je vidljiviji (sl. 34a). Slika 34c prikazuje vertikalni profil brzine vjetra kako bi se mogao razlučiti doseg i intenzitet silaznog vjetra obronka. Na obronku je brzina vjetra najveća, a postupno slabi kako dolazi nad grad i uzdiže se na veću visinu, te struji iznad temperaturne inverzije. Ovaj katabatički vjetar je nad obronkom dosta

topliji u odnosu na zrak iznad grada (sl. 34d), te je odgovoran za dovođenje toplijeg zraka nad grad i održavanje inverzije.

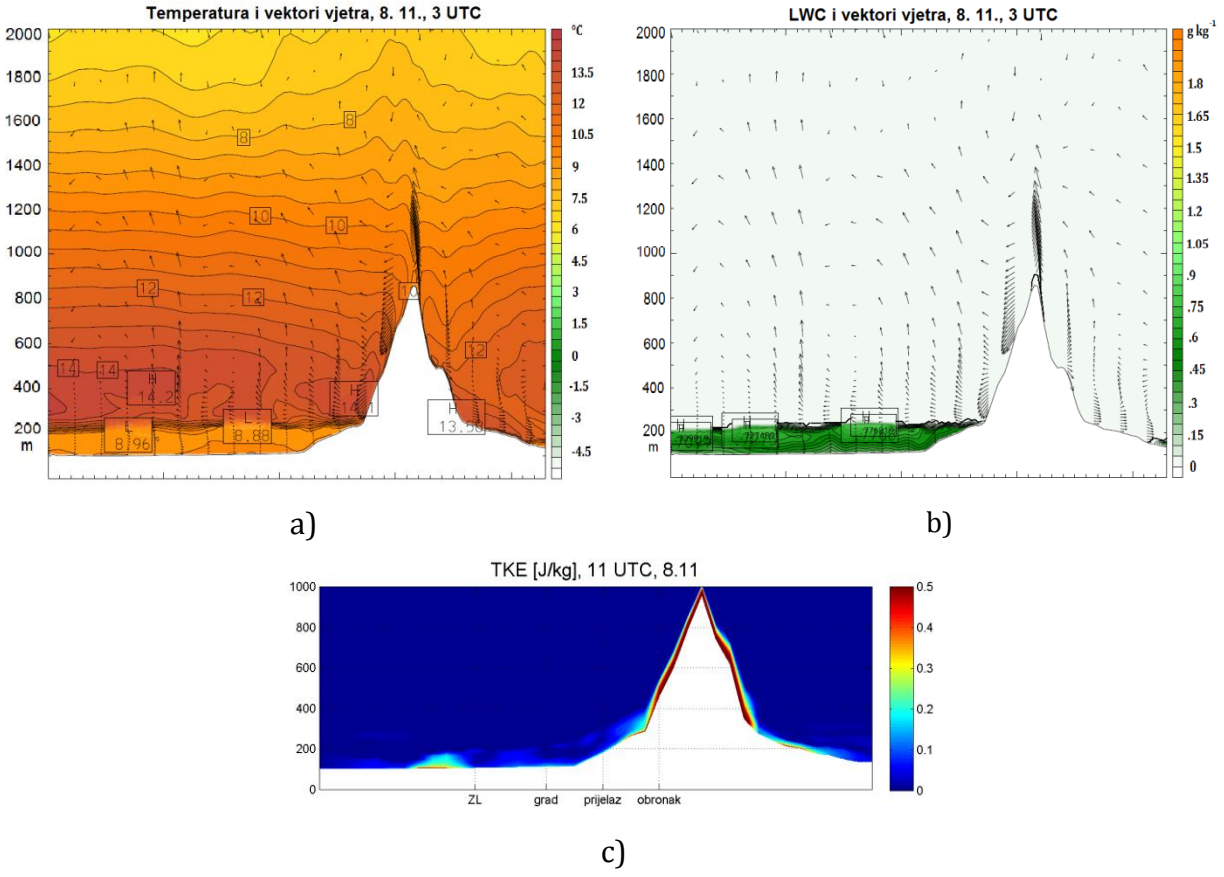
4.3.3. Treća epizoda magle (poslijepodne 07.11.2013., noć i jutro 08.11.2013.)

Evolucija *rh* i *LWC* za zadnji termin pojave magle prikazana je na slici 35. Visoke *rh* i *LWC* bile su prisutne od popodnevnih sati (sl. 35a, b). Takve vrijednosti su imale gotovo do kraja promatranog razdoblja te su se zadržale na jednakim mjestima. Vrijednosti visoke *rh* i *LWC* poklapaju se kao i u prethodnim slučajevima.



Slika 35: Relativna vlažnost, % (a) i *LWC*, g/kg (b) za 07.11.2013., u 16 UTC. (c) Brzina (m/s) i smjer vjetra. (c) 07.11.2013. u 16 UTC; (d) 08.11.2013. u 03 UTC. Postaje su označene slovima G (Zagreb-Grič), M (Zagreb-Maksimir) i P (zračna luka Zagreb). Crnim linijama na slikama (c, d) označena je topografija i položaj Medvednice u odnosu na grad.

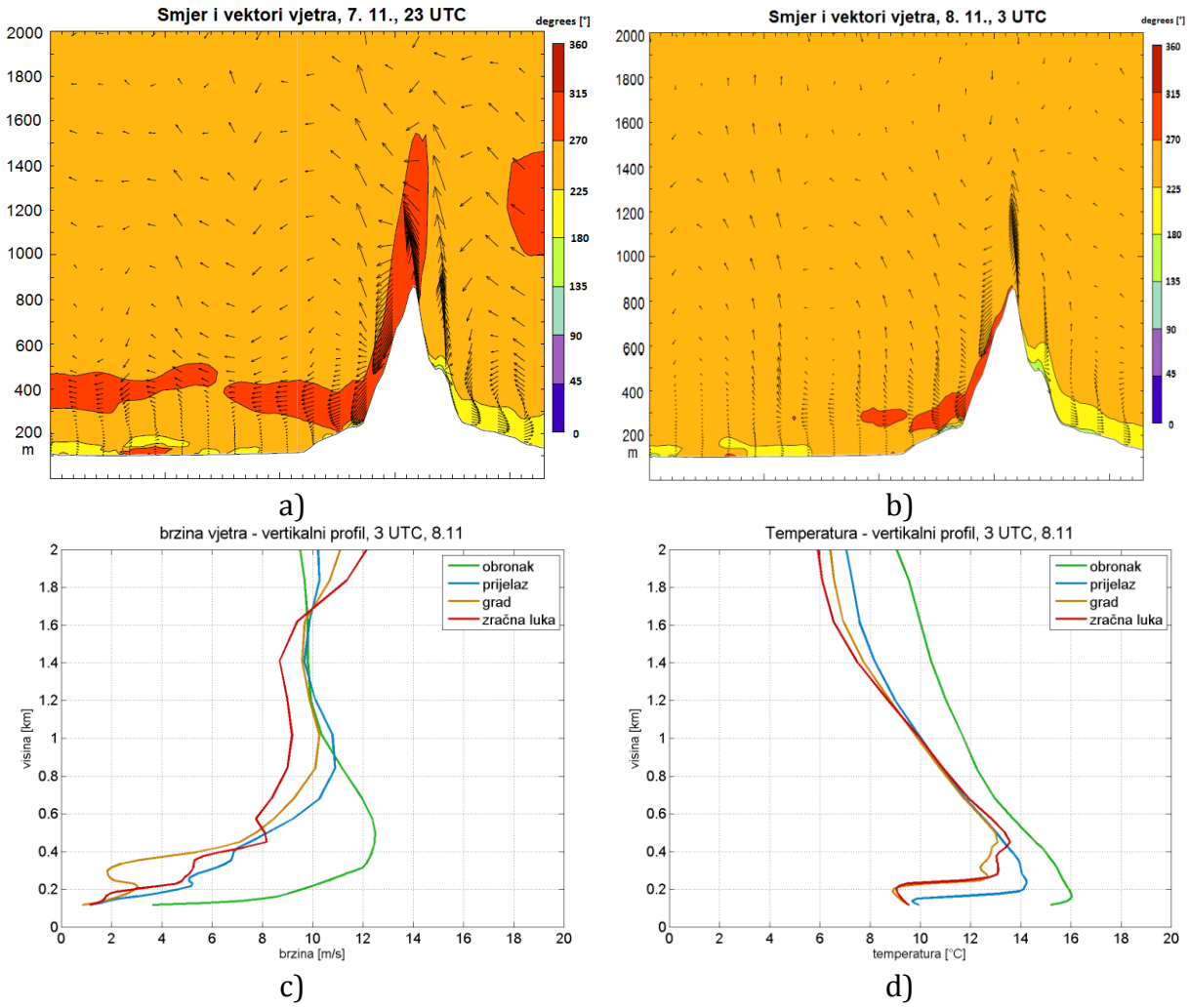
Popodne 07.11. donosi vrlo slabo strujanje, vrlo varijabilnog smjera (sl. 35c). Unatoč malim brzinama, vjetar ima W-SW komponentu i kao takav se zadržava cijele noći i gotovo cijeli sljedeći dan (sl. 35d).



Slika 36: Vertikalna struktura temperature [°C], vektora vjetra (a), *LWC*-a [g/kg] (b) i turbulentne kinetičke energije (*TKE*, m^2/s^2). Prikazani su termini 08.11.2013. u 03 UTC (a i b) i 11 UTC (c).

Na slici 36 prikazane su vertikalne strukture *T* i *LWC*. Temperaturna inverzija koja se održala cijeli dan 07.11.2013. (sl. 32) je i dalje prisutna te s vremenom jača (sl. 36a). Kako temperaturna inverzija jača tako je zrak sve zasićeniji, pa se javlja magla u prizemnom sloju i vidljivost se sve više smanjuje (sl. 36b). Takav režim temperaturne inverzije i *LWC*-a ostaje sve do 8.11.2013. oko podneva kada se uočava smanjenje intenziteta temperaturne inverzije (sl. 32) i smanjenje *LWC*-a. Do kraja dana temperaturna inverzija slabi (smanji se temperaturna razlika između prizemnih i viših slojeva zraka), te se tako smanji i zasićenost zraka. Koliko god bila slaba, temperaturna inverzija i dalje postoji, te pridonosi povremenim lokalnim smanjenjima vidljivosti i pojavi sumaglice tijekom dana 8.11.2013. Na slici 36a vidljiv je utjecaj urbanog toplinskog otoka grada Zagreba gdje je temperatura povišena u odnosu na okolicu.

Prema rezultatima modela, utjecaj UHI kod formirane magle je malen. Pa ipak njegov utjecaj moguć je kroz lakše iniciranje silaznog vjetra obronka doprinoseći većem gradijentu temperature (a onda i mezoskalnog tlaka) duž padine.



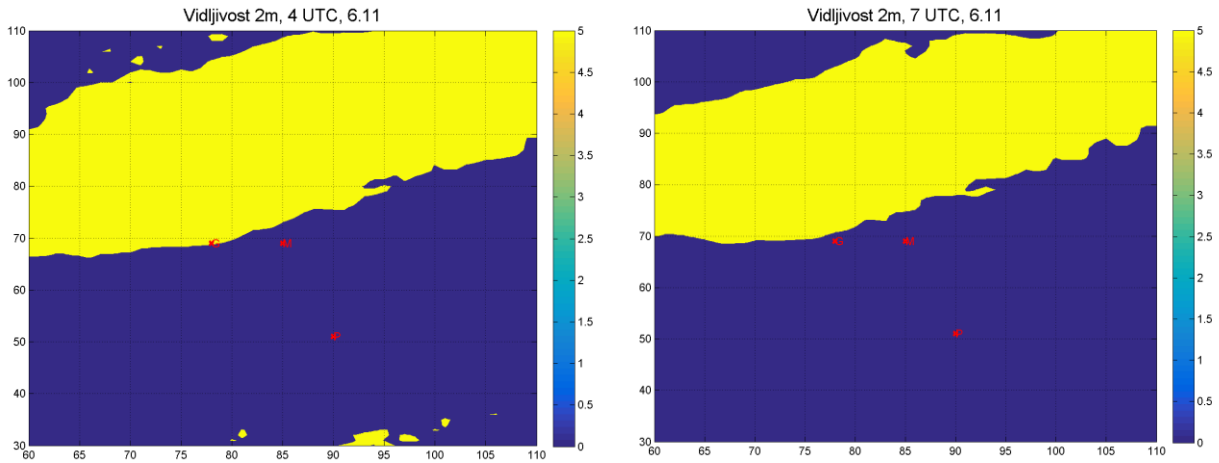
Slika 37: Smjer (a) 07.11.2013. u 23 UTC, (b) 08.11.2013. u 03 UTC i vertikalni profil brzine vjetra (c) 08. 11.2013. u 03 UTC. Na slikama (a) i (b) svaka boja označava određeni interval smjera vjetra u stupnjevima, a na slikama c) i d) prikazana su četiri vertikalna profila brzine vjetra i temperature označena na slici 36c.

Za smanjenje temperaturne inverzije u prizemnom sloju svakako je zaslužno turbulentno miješanje koje ipak nije bilo dovoljno za njeno potpuno razbijanje do kraja dana (sl. 36c). Kao i u dvije prethodne noći, silazno strujanje se formira i puše povrh graničnog sloja na visini od ~300m (sl. 37a,b), donosi topliji zrak iznad temperaturne inverzije, te ima svoj maksimum na obronku i smanjuje se prema gradu (sl. 37c, d).

4.4. Analiza uspješnosti algoritma za procjenu vidljivosti

Model omogućava prostornu procjenu uspješnosti algoritma (2) za vidljivost jer se on pokazao pouzdanijim u statističkoj analizi u odnosu na algoritam (1). Kako se u dosadašnjem dijelu magla interpretirala kao kombinacija vrijednosti *rh* i *LWC*-a, procijenjena *h* pomoću algoritma će se usporediti upravo s tim varijablama.

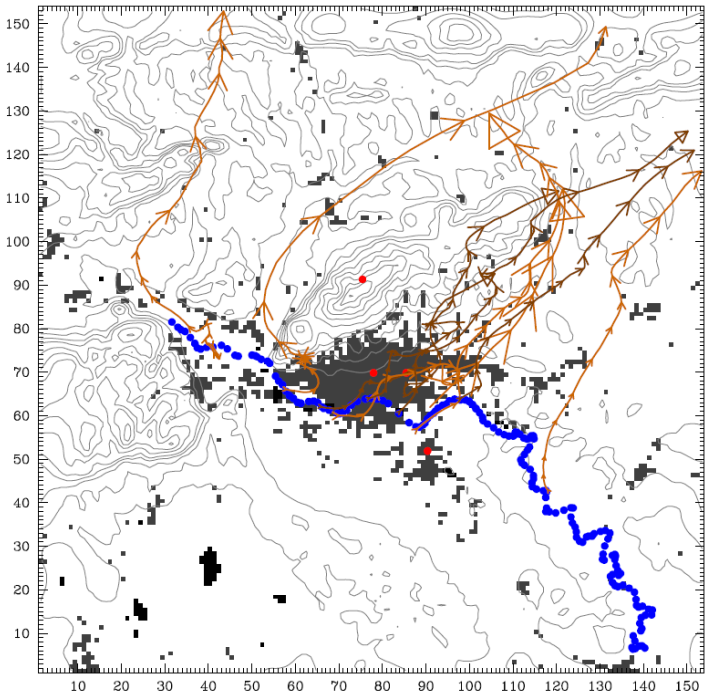
Na slici 38 prikazana je *h* u dva termina: 06.11.2013. u 04 UTC i u 07 UTC. Usporedbom ovih presjeka s onima na slici 24 prikazuje dobro podudaranje u procijenjenoj distribuciji *h.* Međutim treba naglasiti dosta veliku "neosjetljivost" algoritma na prostorne promjene vidljivosti, *h*. Vidljivost je ili vrlo mala (ispod 200 m) ili je iznad 5 km. Rezultat pokazuje da algoritam ne uočava područja sumaglice i ne može razlikovati intenzitet magle. Razloga za ovako grubu procjenu ima više. Algoritam (2) je izrazito ovisan o *rh* čime su male promjene u vrijednostima *rh* dovoljne za skokovite promjene u *h*. Istovremeno svaka nepreciznost modela koja je često na strani precjenjivanja vlažnosti u modelu (na najnižim slojevima) daje pogrešnu procjenu vidljivosti *h*. Velike modelske *rh* (iznad 95%) dat će vidljivosti za gustu maglu (*h*<200m). S obzirom na prikazano, svakako bi bilo točnije koristiti *LWC* varijablu za detekciju magle u modelima.



Slika 38: Vidljivost [*h,* km] izračunata na temelju algoritma (2) u terminima 06.11.2013. 04 UTC (a) i u 07 UTC (b). Postaje su označene slovima G (Zagreb –Grič), M (Zagreb-Maksimir) i P (zračna luka Zagreb).

4.5. Analiza utjecaja rijeke Save na formiranje magle nad gradom

Rezolucija modela (od 500 m) ne omogućava eksplicitno razlučivanje Save u modelu. Moguće je vidjeti manja jezera, odnosno šire rukavce koji prelaze 500 m širine. Unatoč tome, utjecaj Save moguće je hipotetski procijeniti pomoću trajektorija. Ovdje je korišten numerički izračun trajektorija gibanja česti zraka na temelju polja strujanja sa 100 metara visine. Trajektorije prikazane na slici 39 su od 07.11.2013. u 00 UTC do 07.11.2013. u 14 UTC, a početak im je na koordinatama rijeke Save.



Slika 39: Trajektorije česti zraka unaprijed 14 sati. Simulacije pokazuju putanje koje je čest prešla od određenih točaka rijeke Save (plave točke), 07.11.2013. u 00 UTC do 07.11.2013. u 14 UTC. Trajektorije su izračunate na temelju vjetra 100 m iznad tla.

Vidljivo je kako se čest zraka iz svake točke na rijeci Savi giba u smjeru NE i na svojoj putanji prolazi područje grada. Zbog toga se može zaključiti kako je rijeka ipak izvor vodene pare koje mogu doprinijeti povećanju vlažnosti pri formiranje magle u gradu. Pri tome njen doprinos je relativno malen za postaju Zagreb-Grič, ali i za zračnu luku Zagreb. Najveći je za postaju Zagreb-Maksimir. Ovime se potencijalno može objasniti povećani broj dana s maglom na postaji Zagreb-Maksimir u odnosu na postaju Zagreb-Grič; manji destruktivni utjecaj silaznog strujanja te pojačana advekcija vlažnosti za SW strujanja nad gradom. Iako advekcija toplijeg zraka po visini sa padina Medvednice može podržavati temperaturnu inverziju čak i iznad zračne luke Zagreb; prema prikazanim rezultatima utjecaj Save je dosta limitiran.

5. Zaključak

U ovom radu su se ispitivali meteorološki uvjeti za vrijeme opažene magle u nekoliko višesatnih trajanja na više zagrebačkih postaja. Odabrano razdoblje je 5-9.11.2013. godine. Fokus je bio na analizi termodinamičkih i fizikalnih procesa koji potencijalno imaju utjecaj na stvaranje i disipaciju magle nad područjem grada Zagreba i okolice. Najviše pažnje je posvećeno katabatičkom strujanju koje se javlja na južnim obroncima Medvednice kada bilanca zračenja postane negativna (tijekom noći).

U analizi su se koristila sva dostupna mjerenja: prizemna standardna s četiri postaje (Zagreb-Grič, Zagreb-Geofizički odsjek PMF-a, Zagreb-Maksimir i zračna luka Zagreb), radiosondažna mjerenja na postaji Zagreb-Maksimir te satelitska mjerenja. Osim za analizu, mjerenja su se koristila i za evaluaciju numeričkog mezoskalnog modela WRF-ARW. Numerički WRF model omogućio je prostornu i vremensku reprodukciju meteoroloških uvjeta na finoj skali od 500 m. Pri tome su se koristile dvije postavke modela, zemljišni pokrov i topografija iz *CORINE* baze, vrlo fina vertikalna razlučivost modela te trajektorije koje su određivale putanje česti zraka do zagrebačkih postaja te utjecaj Save. Od dvije opcije odabira parametrizacijskih shema za atmosferski granični sloj (sheme MYJ i MYNN) i mikrofizičke procese (Lin i Morisson-2-moment) statističkom analizom i usporedbom s mjerenjima boljom se pokazala kombinacija MYJ-Lin shema.

Kako se magla/sumaglica kao meteorološka pojava definira vidljivošću (*h*) ispod nekog praga (ovdje h<1000 m odnosno 5000 m) koja nije rezultat modela, detekcija magle iz modela nije jednostavna, a niti jednoznačna. Postoji nekoliko načina koji se koriste kod definiranja magle. Pri tome se mogu koristiti algoritmi za procjenu vidljivosti čiji se rezultat temelji na relativnoj vlažnosti, temperaturi i temperaturi rosišta. Osim algoritma magla je u numeričkim simulacijama karakterizirana pragom relativne vlažnosti i kondenzirane vodene pare oblaka (*LWC*). Svaki od pristupa ima svoja ograničenja, a ovdje je testirana uspješnost i pouzdanost poznatih koncepata. Analizom rezultata algoritama boljim se pokazao algoritam razvijen od strane *FSL* (*Forecast Systems Laboratory*), a koji uvažava više parametara za računanje vidljivosti od *RUC* (*Rapid Update Cycle*) algoritma. On kao takav vrlo dobro procjenjuje smanjenu vidljivost na područjima koja su uistinu obuhvaćena maglom, no njegova loša strana je što je procjena vidljivosti dosta gruba – ili je vidljivost vrlo niska (ispod 200 m) ili je visoka (iznad 5 km). Zbog toga je pouzdanije promatrati maglu kroz *LWC* i relativnu vlažnost jer se dobiva bolja informacija o samom intenzitetu magle/sumaglice, ukoliko taj izlaz iz modela postoji. Problem je što mjerenja varijable *LWC* nema na zagrebačkim postajama.

Podjelom promatranog razdoblja na tri događaja magle (1. noć s 5. na 6. 11.2013.; 2. noć sa 6. na 7. 11.2013.; 3. drugi dio dana 7. 11.2013. i noć na 8. 11.2013.) detaljno je analiziran razvoj, trajanje i nestajanje magle. Detaljnom analizom svakoga od tri slučaja

utvrđeno je kako oni međusobno imaju neke slične karakteristike. U sva tri slučaja kroz cijelo razdoblje u graničnom sloju nad zračnom lukom Zagreb tijekom noći prevladava zapadno-jugozapadno strujanje. Takav rezultat je u skladu i s klimatologijom vjetra za tu postaju dobivenu za događaje magle. Na padinama Medvednice javlja se katabatičko strujanje ograničenog dometa nad gradom. Tijekom noći vjetar struji prema sjevernom dijelu grada, no zbog trenja s podlogom i zbog temperaturne inverzije ne uspijeva se održati kao prizemno strujanje već nastavlja advektirati zrak iznad temperaturne inverzije. Svojstvo ovog katabatičkog vjetra je dvojako; osim što se tijekom spuštanja zagrijava te donosi topliji zrak nad grad, ovaj vjetar utječe i na stvaranje turbulentne kinetičke energije (*TKE*). Toplije strujanje iznad sloja temperaturne inverzije dodatno pojačava inverziju, a time produljuje trajanje magle nizvodno od Medvednice. Silazno strujanje pokazalo je i svoj destruktivni udio u disipaciji magle prilikom smicanja vjetra po visini odnosno generiranja *TKE*. Polje *TKE* pokazalo je izvore nastanka *TKE* uglavnom preko dana; povećana *TKE* nastala je u interakciji strujanja pri tlu uslijed trenja s podlogom, te pri vrhu temperaturne inverzije uslijed smicanja vjetra visinom. Pojačana *TKE* s dovoljno snažnim turbulentnim vrtlozima djelovala je disipirajuće na pojavu magle eliminirajući stabilan graničan sloj odozdo i odozgo. Efekt je jače izražen na padinama, a potvrđen je trajektorijama. Utjecaj rijeke Save na stvaranje magle je također ispitan računanjem trajektorija unaprijed. S polaznim točkama duž toka rijeke Save kroz Zagreb, trajektorije su ukazale na potencijalnu advekciju vlažnosti. Prema rezultatima simulacije, za razliku od ostalih postaja, njen utjecaj je najveći za postaju Zagreb-Maksimir. Time se potencijalno može objasniti i razlika u broju dana s maglom; ~25% više dana s maglom na postaji Zagreb- Maksimir u odnosu na Zagreb-Grič.

Utjecaj urbanog toplinskog otoka vidljiv je i u podacima i stidljivo u modelu, ali je njegov doprinos na stvaranje i nestajanje magle relativno malen. Međutim zagrijana urbana površina potiče stvaranje silaznog vjetra obronka kreirajući veće gradijente temperature (lokalnog tlaka) duž padine.

I na kraju, katabatičko strujanje zbog male visine Medvednice i njezine šumovite podloge ima veći doprinos na (ne)formiranje magle u sjevernim dijelovima grada. Iako nema dominantan utjecaj na događaj magle na zračnoj luci Zagreb, on se ipak ne smije zanemariti, jer predstavlja jedan od važnijih indirektnih utjecaja za produljenje trajanja magle nad aerodromom doprinoseći očuvanju temperaturne inverzije na vrhu stabilnog graničnog sloja.

6. Literatura

1. Byers HR, (1959): General Meteorology, Third Ed., (*McGraw Hill*, New York, 1959).
2. Bang CH, Lee JW, Hong JW, (2008): Predictability Experiments of Fog and Visibility in Local Airports over Korea using the WRF Model. *J. KOSAE,* 24, 92-101.
3. Brzoja D, (2012): Analiza pojave magle na širem području Zagreba. *Diplomski rad*. PMF Zagreb, str. 74.
4. Cuxart J, Jimenez MA, (2012): Deep Radiation Fog in a Wide Closed Valley: Study by Numerical Modeling and Remote Sensing. *Pure and Applied Geophysics*, 169, 911-926.
5. Fast J, Easter R, (2006): Report on development of a Lagrangian Particle Dispersion Model Compatible with the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *7th Annual WRF User's Workshop*
6. Gokhoz M, Oztaner YB, Unal A, Kindap T, (2014): Comparative analysis of fog prediction algorithms via use of WRF model over Istanbul. Presented at: *14th EMS Annual Meeting & 10th European Conference on Applied Climatology (ECAC)*
7. Gultepe I, Tardif R,Michaelides S, Cermak J, Bott A, Bendix J, Muller MD, Pagowski M, Hansen B, Ellrod G, Jacobs W, Toth G, Cober SG (2007): Fog research : a review of past achievements and future perspectives. *Pure Appl Geophys,* 164, 1121–1159.
8. Ivatek-Šahdan S, (1997): Horizontalna vidljivost na aerodromu Zagreb-Pleso. *Diplomski rad*. PMF Zagreb, str. 76.
9. Jeričević A, (2007): Atmosferski granični sloj urbanog područja. *Magistarski rad*. PMF Zagreb, str. 63.
10. Koračin D, (1978): Glavni uzroci magle na zagrebačkom aerodromu Pleso. *Diplomski rad*. PMF Zagreb, str. 69.
11. Koračin D, Lewis J, Thompson WT, Dorman CE, Businger JA, (2001): Transition of stratus into fog along the California Coast: Observations and modeling. *Journal of Atmospheric Science,* 58, 1714–1731.
12. LaDochy S, (2005): The disappearance of dense fog in Los Angeles: Another urban impact?, *Physical Geography*, 26, 177–191.
13. Leko N, (2014): Utjecaj onečišćenja zraka i sinoptičkog strujanja na čestinu magle u Zagrebu. *Diplomski rad*. PMF Zagreb, str. 84.
14. Li, Yang J, Shi CE, Pu MJ, (2012): Urbanization Effects on Fog in China: Field Research and Modeling. *Pure and Applied Geophysics*, 169, 927-939.
15. Lisac I, (1984): The wind in Zagreb (A contribution to the knowledge of climate of the city of Zagreb, II). *Geofizika*, 1, 47-134.
16. Lowry WP, (1967): The climate of cities. *Scientific American,* 217(2), 15–24.
17. Makjanić B, (1977): Kratki prikaz klime Zagreba. *Radovi-Geofizički Institut III serija*,

Zagreb; Zagreb, 125-176.

18. Menut L, Mailler S, Dupont JC, Haeffelin M, Elias T, (2014): Predictability of the Meteorological Conditions Favourable to Radiative Fog Formation During the 2011 Paris Fog Campaign. *Boundary-Layer Meteorolology,* 150, 277–297.
19. Oke TR, (1987): Boundary Layer Climates. *2nd edition, Halsted, New York*, 423 str.
20. Pandžić K, (2002): Analiza meteoroloških polja i sustava. *Zagreb, HINUS, 2002. Udžbenici Sveučilišta u Zagreb,* 311 str.
21. Perčec Tadić M, (2010): Gridded Croatian climatology for 1961–1990. *Theoretical and Applied Climatology,* 102, 87–103
22. Pielke RA, (2002): *Mesoscale meteorological modeling*, 2nd Edition, Academic Press, USA, 675 str.
23. Roman-Cascon C, Yague C, Sastre M, Maqueda G, Salamanca F, Viana S, (2012): Observations and WRF simulations of fog events at the Spanish Northern Plateau. *Advanced Scientific Research*, 8, 11–18.
24. Tardif R, Rasmussen RM, (2007): Event-Based Climatology and Typology of Fog in the New York City Region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, 1141-168.
25. Stohl A, Sodemann H, Eckhardt S, Frank A, Seibert P, Wotawa G, (2005): The Lagrangian particle dispresion model FLEXPART version 8.2. *Atmospheric Chemistry ad Physics*, 5, 2461-2474.
26. Stolaki S, Haeffelin M, Lac C, Dupont JC, Elias T, Masson V, (2015): Influence of aerosols on the life cycle of a radiation fog event: A numerical and observational study. *Atmospheric Research,* 151, 146-161.
27. Taylor KE, (2001): Summarizing multiple aspects of model performance in a sigle diagram. *Journal of Geophysical Research*, 106, 7183-7192.
28. van Oldenborgh GJ, Yiou P, Vautard R, (2010): On the roles of circulation and aerosols in the decline of mist and dense fog in Europe over the last 30 years. *Atmosphere Chemistry ad Physics*, 10, 4597-4609.
29. van Schalkwyk L, Dyson LL, (2013): Climatological characteristics of fog at Cape Town international airport. *Weather Forecast*, 28, 631-646.
30. WMO (1966): International Meteorological Vocabulary. *World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland*, 141 str.
31. Willett HC, (1928): Fog and haze, their causes, distribution, and forecasting, *Monthly Weather Review*, 56, 435–468.
32. Zhou B, Du J, Gultepe I, Dimego A, (2012): Forecast of Low Visibility and Fog from NCEP: Current Status and Efforts. *Pure and Applied Geophysics*, 169, 895–909.

7. Sažetak

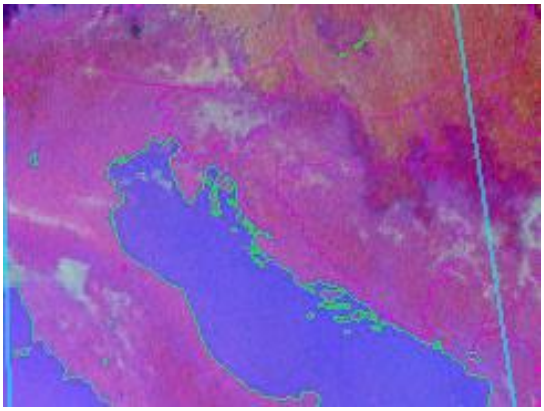
U ovom radu istražuje se razvoj magle na širem području grada Zagreba. Prema klimatološkim podacima, sumaglica i magla javljaju se vrlo često nad zračnom lukom Zagreb i uzrokuju smanjenu vidljivost koja može trajati i po nekoliko dana. Zračna luka Zagreb smještena je na ravnom terenu južno od grada Zagreba u blizini rijeke Save na 108 m nadmorske visine (nv). Sjevernije, grad Zagreb (~120 m nv) je glavni izvor urbanog zagađenja (polutanata) uključujući kondenzacijske jezgre. U okolici zračne luke Zagreb odvija se teški cestovni promet koji je također uzročnik emisije polutanata. Sjeverno od Zagreba uzdiže se planina Medvednica, visine oko 1000 m, na relativno maloj udaljenosti od grada.

Napravljena je analiza slučaja dugotrajnijeg događaja magle koji se dogodio od 5.-9. studenog 2013. kako bi se bolje razumjeli dinamički procesi nastanka, razvoja, održavanja i nestanka magle. Odabrani slučajevi analizirani su pomoću dostupnih mjerenja i numeričkih simulacija izvršenima s WRF-ARW visoko-rezolucijskim numeričkim modelom s nekoliko postavki modela. U radu su također ispitani algoritmi za procjenu vidljivosti iz modela. Model je uspio reproducirati događaj magle s malim razlikama između različitih postavki modela. Rezultati su otkrili utjecaj silaznog vjetra obronka koji se uočava kada nad gradom bilanca zračenja postane negativna i pred jutro kada sinoptičko strujanje oslabi. Iako nije uočljiv u prizemnom sloju u gradu i na zračnoj luci, njegovo se strujanje odvija iznad temperaturne inverzije i donosi topli zrak nad temperaturnu inverziju, što produljuje trajanje magle. Utjecaj rijeke Save je također procijenjen i raspravljen, što je zahtijevalo dodatne izračune trajektorija unaprijed u vremenu.

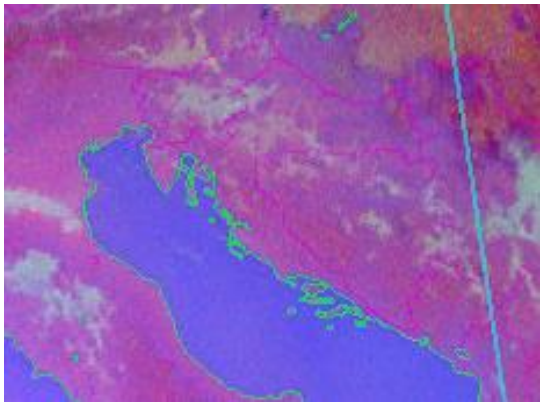
Ključne riječi: magla, urbano područje grada Zagreba, silazni vjetar obronka, WRF

Dodatak A: Satelitske slike

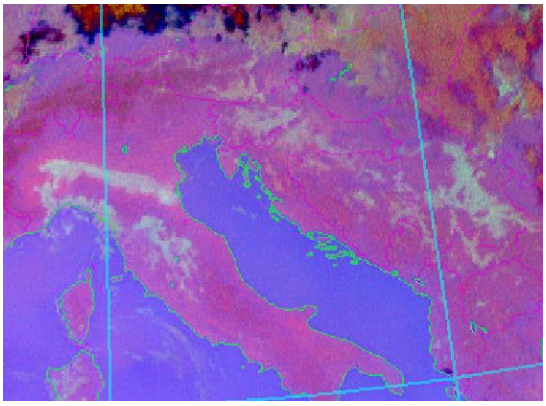
Na NM-RGB produktima, magla i niski oblaci su svijetlozelene boje iako nijansa tih boja varira ovisno o visini i debljini sloja oblaka. Kako se mijenja visina i debljina oblaka, tako varira i udio zelene i crvene boje u RGB spektru. Debeli slojevi oblaka i magle pri tlu imaju gotovo isti udio crvene i plave s velikim količinama zelene. No relativno tanak sloj magle na površini ima manji udio zelene i crvene boje, pa je rezultirajuća boja ljubičasto-plava (prljavo plava), s naznakama mješavine između svijetlo-plave i ljubičasto-plave. Općenito je u udjelu puno više plave (temperatura površine) nego crvene (tanki oblaci), a udio zelenog kanala je smanjen jer se uočava površina zbog tankog sloja magle. Ta promjena zelenkasto-plave prema prljavo plavoj i od svijetlozelene prema prljavo zelenoj omogućava razlikovanje magle od niskih oblaka.



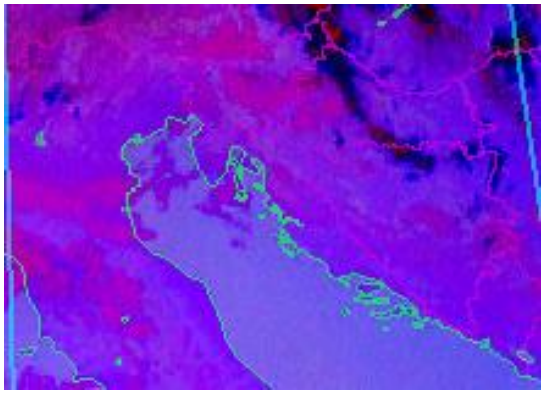
a) 01:00 UTC



b) 03:45 UTC

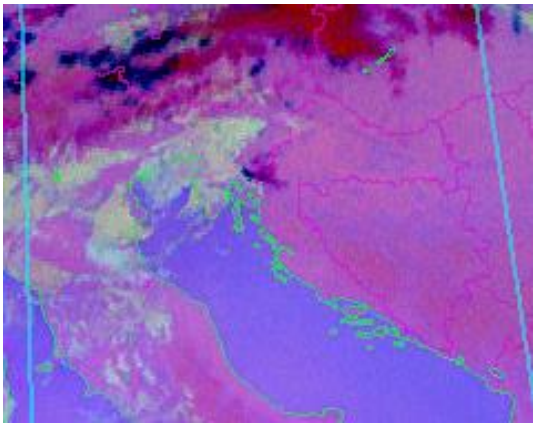


c) 05:00 UTC

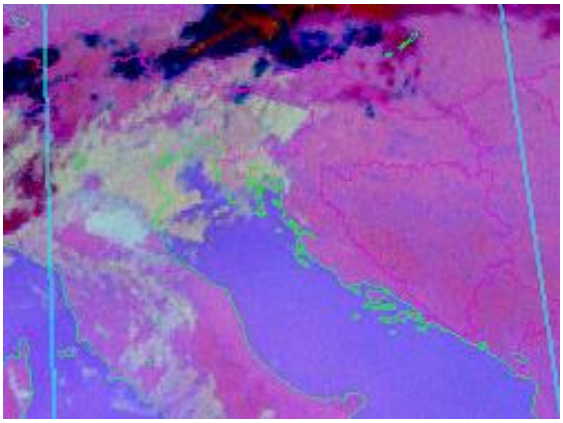


d) 10:00 UTC

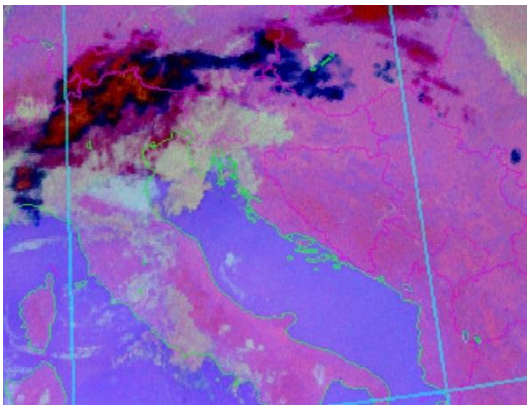
Slika A1: 07.11.2013. a) 01:00 UTC, b) 03:45 UTC, c) 05:00 UTC, d) 10:00 UTC. NM-RGB produkt MSG satelita.



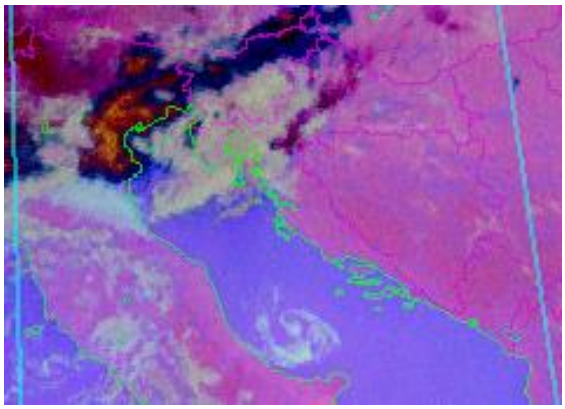
a) 18:00 UTC



b) 20:00 UTC



c) 22:15 UTC

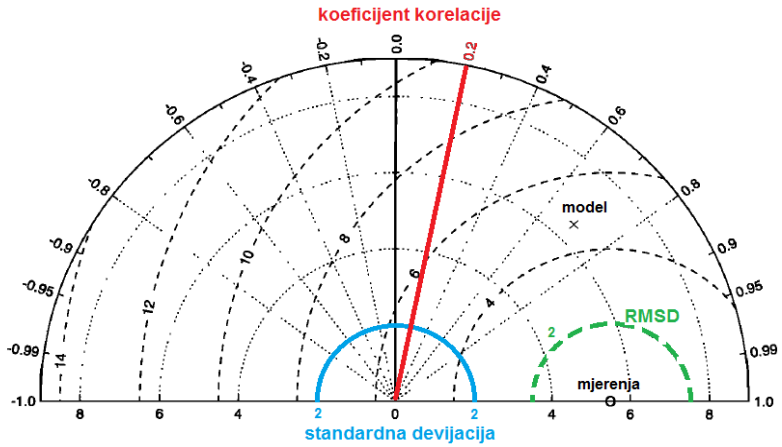


d) 01:00 UTC

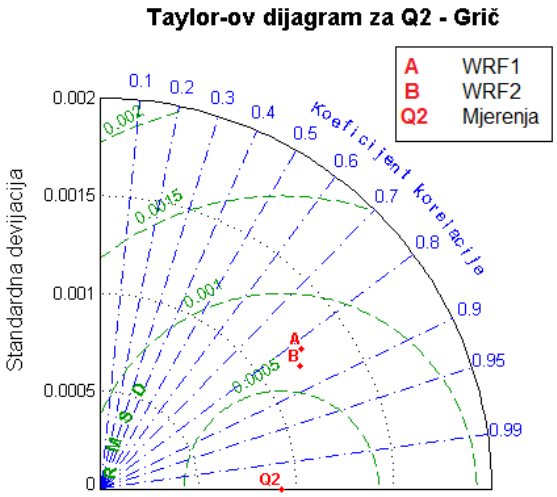
Slika A2: 07.11.2013. a) 18:00 UTC. (b) 07.11.2013. 20:00 UTC. (c) 07.11.2013. 22:15 UTC d) 08.11.2013. 01:00 UTC. NM-RGB produkt MSG satelita

Dodatak B: Taylorovi dijagrami i statistički parametri

Dijagram za prikaz statističkih parametara koji se odnose na usporedbu numeričkih simulacija i opaženih vrijednosti, tzv. Taylorov dijagram. Na apscisi je vrijednost standardne devijacije i iznos joj je u istim mjernim jedinicama kao i korijen srednje kvadratne pogreške (*RMSD*). Vrijednost *RMSD* se nalazi na radijalnoj osi. Vrijednost koeficijenta korelacije između dva niza nalazi se na azimutalnoj poziciji.

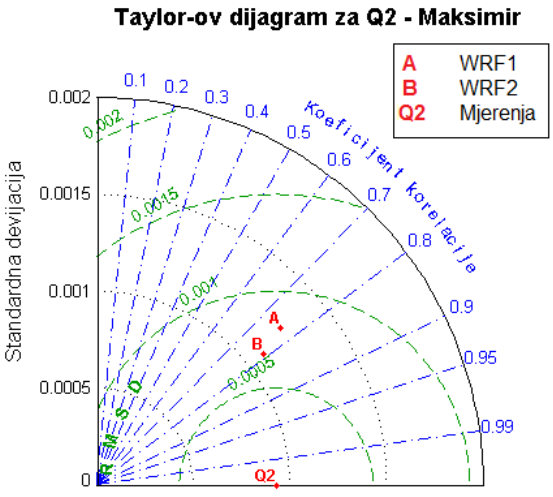


Slika B1: Taylorov dijagram (prevedeno i uređeno; Taylor, 2001.)



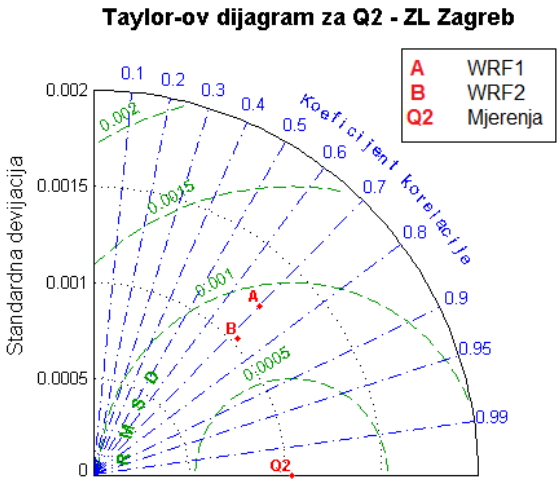
	Mean	STD	RMSD	r	MAE
Grič	0,00668	0,00092	0,00000	1,0	0,00000
WRF1	0,00674	0,00125	0,00072	0,8	0,00057
WRF2	0,00695	0,00120	0,00063	0,9	0,00060

a)



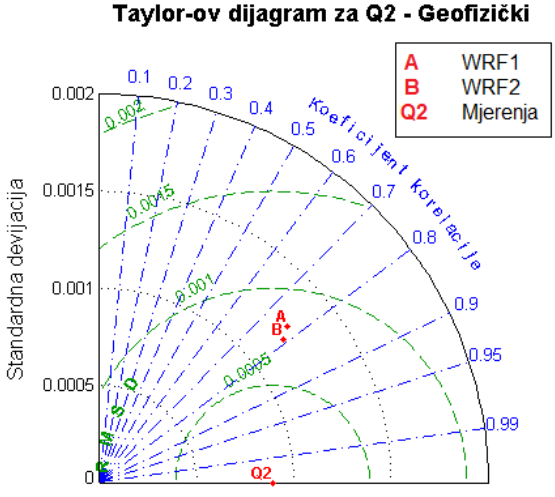
	Mean	STD	RMSD	r	MAE
Maksimir	0,00637	0,00093	0,00000	1,0	0,00000
WRF1	0,00670	0,00125	0,00081	0,8	0,00069
WRF2	0,00698	0,00110	0,00068	0,8	0,00077

b)



	Mean	STD	RMSD	r	MAE
ZL Zagreb	0,00637	0,00103	0,00000	1,0	0,00000
WRF1	0,00672	0,00123	0,00089	0,7	0,00080
WRF2	0,00705	0,00103	0,00076	0,7	0,00083

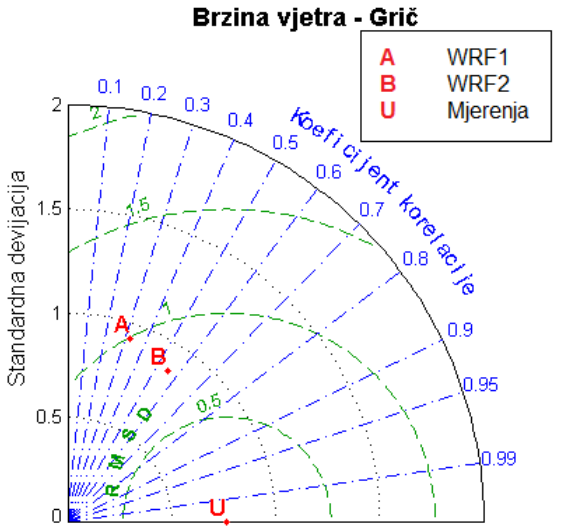
c)



	Mean	STD	RMSD	r	MAE
Geofizički	0,00689	0,00089	0,00000	1,0	0,00000
WRF1	0,00673	0,00126	0,00081	0,8	0,00065
WRF2	0,00693	0,00120	0,00074	0,8	0,00061

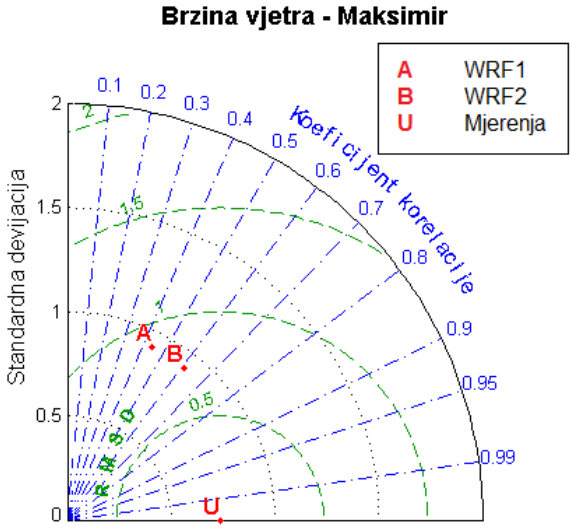
d)

Slika B2: Taylorovi dijagrami za omjer miješanja i pripadne vrijednosti statističkih parametara za sve četiri postaje: (a) Zagreb-Grič, (b) Zagreb-Maksimir, (c) zračna luka Zagreb i (d) Zagreb-GO.



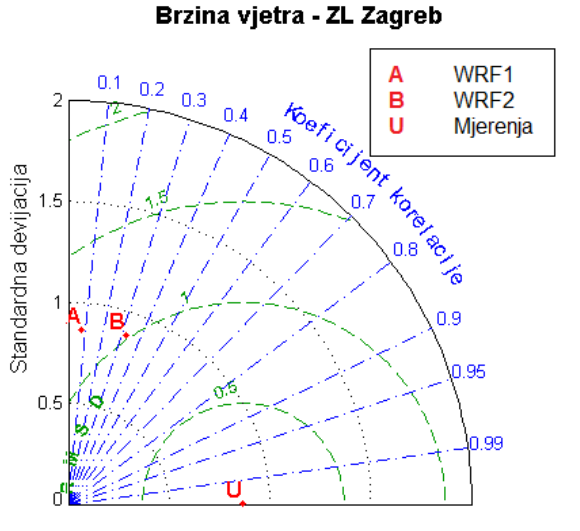
	Mean	STD	RMSD	r	MAE
Grič	0,9	0,8	0,0	1,0	0,0
WRF1	1,5	0,9	1,0	0,3	0,9
WRF2	1,6	0,9	0,8	0,6	0,9

a)



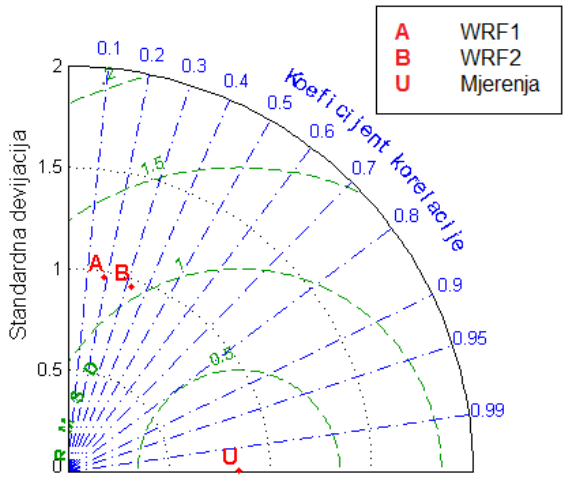
	Mean	STD	RMSD	r	MAE
Maksimir	0,6	0,7	0,0	1,0	0,0
WRF1	1,3	0,9	0,9	0,4	0,9
WRF2	1,5	0,9	0,8	0,6	1,0

b)



	Mean	STD	RMSD	r	MAE
ZL Zagreb	1,1	0,9	0,0	1,0	0,0
WRF1	1,4	0,9	1,2	0,1	1,0
WRF2	1,5	0,9	1,0	0,3	0,9

c)

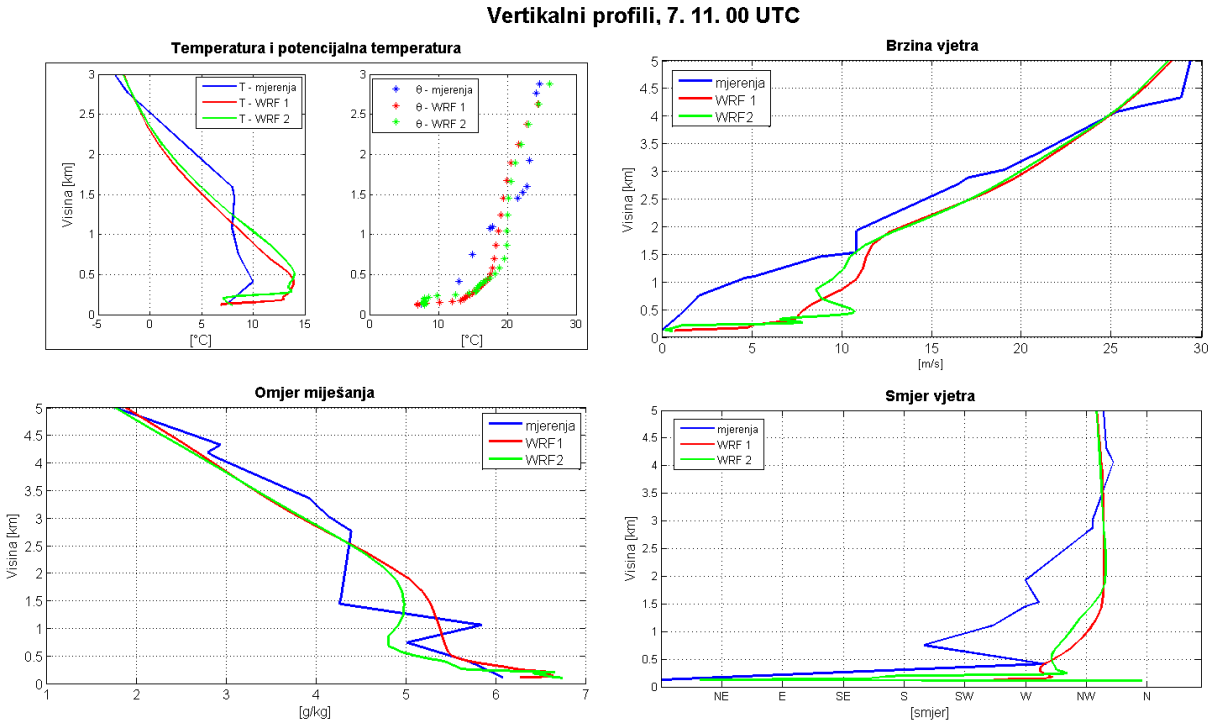


	Mean	STD	RMSD	r	MAE
Geofizički	0,8	0,8	0,0	1,0	0,0
WRF1	1,6	1,0	1,2	0,2	1,1
WRF2	1,7	1,0	1,1	0,3	1,1

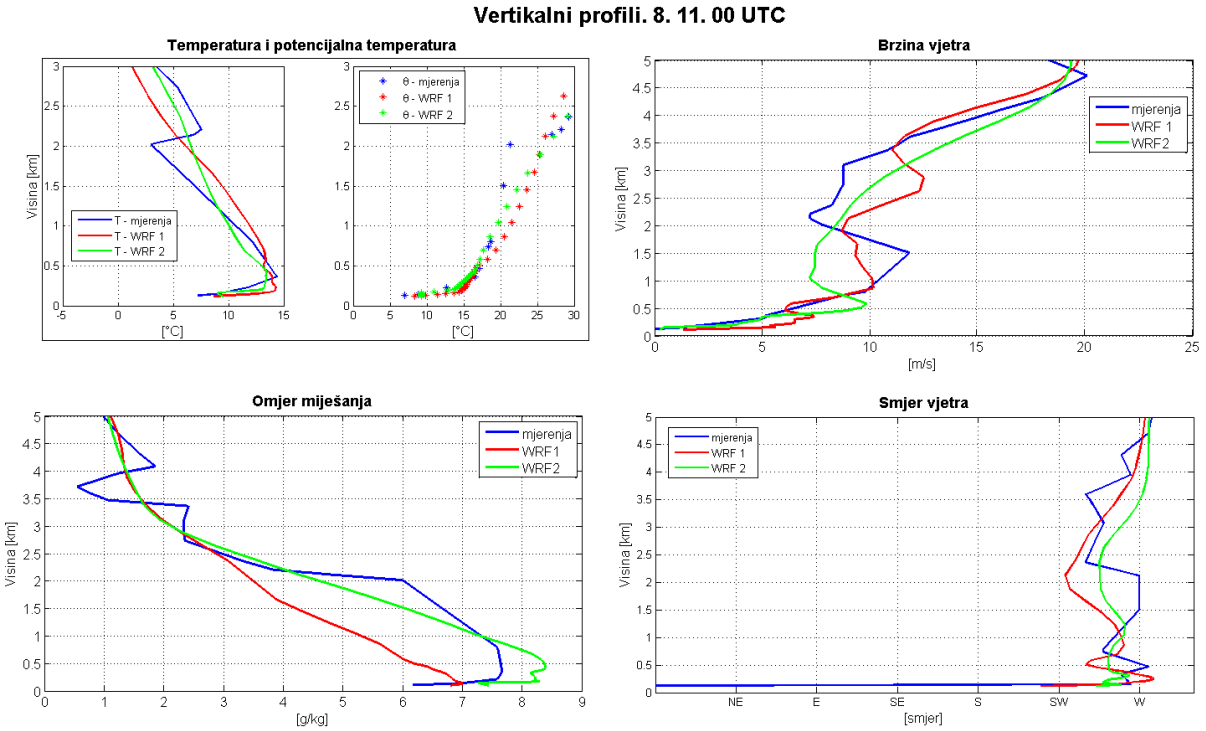
d)

Slika B3: Taylorovi dijagrami za 10-m brzinu vjetra i pripadne vrijednosti statističkih parametara za sve četiri postaje: (a) Zagreb-Grič, (b) Zagreb-Maksimir, (c) zračna luka Zagreb i (d) Zagreb-GO.

Dodatak C: Radiosondažna mjerenja i vertikalni profili – slike



Slika C1: Vertikalni profili temperature i potencijalne temperature (a), brzine vjetra (b), omjera miješanja (c) i smjera vjetra(d) za 07.11.2013. u 00 UTC. Na slikama su prikazana radiosondažna mjerenja sa postaje Zagreb-Maksimir (plava boja), te dobivene vrijednosti iz dvije postavke modela: WRF 1 (crvena boja) i WRF 2 (zelena boja).



Slika C2: Vertikalni profili temperature i potencijalne temperature (a), brzine vjetra (b), omjera miješanja (c) i smjera vjetra(d) za 8.11.2013. u 00 UTC. Na slikama su prikazana radiosondažna mjerenja sa postaje Zagreb-Maksimir (plava boja), te dobivene vrijednosti iz dvije postavke modela: WRF 1 (crvena boja) i WRF 2 (zelena boja).