

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK
Prirodoslovno-matematički fakultet

Igor Horvat

Diplomski rad

**Veza između meteoroloških mezoskalnih procesa i
pojave nestandardnih refrakcija radio valova u
atmosferi**

Voditelj: Doc. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak

Zagreb, 2013.

Volio bih zahvaliti dr. sc. Mladenu Viheru, dr. sc. Željku Večenaju, Mili Karlici, Marku Kvakiću, Iris Odak i Ivani Turčin na pomoći i savjetima pri izradi ovog diplomskog rada.

Posebno bih zahvalio svojoj mentorici dr. sc. Maji Telišman Prtenjak na svesrdnoj pomoći, korisnim savjetima i velikom strpljenju.

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

Kratice

RADAR - eng. RAdio Detecting And Ranging

UTC - eng. Universal Time Code

SEV (SEV) - Srednje europsko vrijeme (eng. Central European Time)

AGS (ABL) - Atmosferski granični sloj (eng. Atmospheric Boundary Layer)

MAGS (MABL) - Morski atmosferski granični sloj (eng. Marine Atmospheric Boundary Layer)

SST - Površinska temperatura mora (eng. Sea Surface Temperature)

CAPE - Raspoloživa konvektivna potencijalna energija (eng. Convective Available Potential Energy)

BRN - Bulk Richardsonov broj (eng. Bulk Richardson Number)

WRF - eng. Weather and Research Forecasting

ARW - eng. Advanced Research WRF

NNM - eng. Nonhydrostatic Mesoscale Model

ECMWF - eng. European Center for Medium Range Weather Forecasts

COAMPS - eng. Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System

MetUM - eng. Met Office's Unified Model

GEM - eng. Global Environmental Multiscale Model

MM5 - eng. Atmospheric Research Mesoscale Model

Anaprop - eng. Anomalous Propagation

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Radio valovi u atmosferi	1
1.1.1. Indeks loma i modificirani indeks loma za radio valove	1
1.1.2. Tipovi nestandardne refrakcije radio valova u atmosferi	3
1.2. Analizirani mezoskalni meteorološki procesi	5
1.2.1. Obalna cirkulacija zraka	6
1.2.2. Bura.....	8
1.2.3. Kumulonimbus (Cb)	9
1.3. Dosadašnja istraživanja povezanosti meteoroloških procesa i nestandardne refrakcije.....	11
1.4. Dosadašnja istraživanja povezanosti meteoroloških procesa i nestandardne refrakcije na Jadranu	13
2. Podaci i metode.....	17
2.1. Radiosondažni podaci.....	17
2.2. Opis numeričkog mezoskalnog (WRF) modela.....	17
2.3. Proračun gradijenta dM/dh iz profila	19
2.4. Statistički parametri korišteni u analizi	20
3. Karakteristike odabranog slučaja: 13-19. kolovoza 2000.....	22
3.1. Konvektivna aktivnost u domeni interesa.....	22
3.2. Bura na obali Jadrana	25
3.3. Smorac/kopnenjak na obali Jadrana	27
4. Rezultati.....	30
4.1. Usporedba radiosondaža i vertikalnih profila iz modela.....	30
4.2. Prostorna raspodjela (ne)standardne refrakcije radio valova.....	38
4.2.1. Konvektivna aktivnost u području domene (13. kolovoza 2000.).....	38
4.2.2. Bura u području domene (14.-15. kolovoza 2000.).....	42
4.2.3. Smorac/kopnenjak u području domene (17.-18. kolovoza 2000.).....	47
5. Zaključak	55
6. Literatura	57
7. Sažetak	59

1. Uvod

Otkriće radio valova te njihovo korištenje u svakodnevnom životu uvelike je promijenilo današnji način života. Radio valovi dio su spektra elektromagnetskog (EM) zračenja, frekvencijskog raspona od 300GHz do 3kHz (valnih duljina od 1 mm do 100 km), te se kao i ostatak EM zračenja kroz prostor šire brzinom svjetlosti. Podijeljeni su na frekventno uža područja koja se nazivaju *bendovi* (intervali), gdje je frekvencija svakog intervala deset puta veća od frekvencije prethodnog intervala. Prirodno ih generiraju munje i općenito iskrenja, kao i neki astronomski objekti s promjenjivim magnetskim poljem poput Sunca i drugih zvijezda, Jupitera, Zemlje, te crnih rupa, galaksijskih centara i sl. Umjetno proizvedeni radio valovi dobivaju se pomoću uređaja koji istosmjernu ili izmjeničnu električnu struju pretvaraju u radio valove. Područje primjene radio valova je ogromno. Koriste se za prijenos audio i video signala, radio-komunikaciju, radare i druge navigacijske sustave, satelitsku komunikaciju i mnoge druge primjene. Radari (eng. *RAdio Detection And Ranging*) su uređaji koji služe za otkrivanje objekata pomoću radio valova, a u meteorologiji se koriste za detekciju oblačnih sustava i oborine. S obzirom da je radio val u atmosferi podložan značajnim modifikacijama ovisno o njezinoj strukturi, poznavanje njihovog ponašanja je ne samo poželjno, već i nužno.

1.1. Radio valovi u atmosferi

Radio valovi se šire kroz atmosferu i zbog njihove valne prirode, mogu se javiti pojave poput refrakcije, difrakcije, refleksije, apsorpcije, interferencije i raspršenja radio valova. Ti se fenomeni ne manifestiraju za sve frekvencije jednako, pa proučavanje tih pojava omogućuje kvalitetniji odabir frekvencijskog intervala radio valova za određene svrhe. U ovom radu fokus je na standardnoj odnosno nestandardnoj refrakciji radio valova u atmosferi u literaturi često nazvanoj *anaprop*. Refrakcija radio valova slična je svjetlosnoj refrakciji te se može opisati zakonima geometrijske optike i Snellovim zakonom loma. To znači da će rasprostiranje radio vala kroz atmosferske slojeve različitih gustoća rezultirati promjenom smjera (lomom) radio vala u odnosu na prethodni smjer rasprostiranja. Najvažniji razlog pojave refrakcije je razlika u temperaturi, vlažnosti i tlaku zraka uzrokovanih visinskim razlikama i različitim svojstvima atmosfere.

1.1.1. Indeks loma i modificirani indeks loma za radio valove

Širenje radio valova u atmosferi ovisi o indeksu loma, n (jed. (1)). Općenito indeks loma EM valova prema Maxwellovim jednadžbama ovisi o relativnoj permitivnosti (ϵ_r) i relativnoj permeabilnosti (μ_r) medija (Battan, 1973.) kroz koji se valovi šire:

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1)$$

S obzirom da su permitivnost i permeabilnost teško odredive za atmosferu, koristi se empirička relacija izvedena na temelju mjerljivih veličina u atmosferi. Treba spomenuti da indeks loma radio valova ima vrijednost od oko 1.000340 na površini Zemlje te se smanjuje s visinom do vrijednosti 1.0 u međuplanetarnom prostoru. Iz tog razloga predloženo je (Skolnik, 1980.) korištenje samo značajnih decimalnih znamenki indeksa loma izraženih pomoću veličine N (jed. (2)). Empirijski indeks loma, N , za radio valove u atmosferi (Patterson i sur., 1994.; Rüeger, 2002.), ovisi o temperaturi (T [K]), tlaku (p [hPa]) i količini vodene pare u zraku, izražene pomoću relativne vlažnosti (rh [%]). Izraz glasi:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = \frac{77.6 \cdot p}{T} + \frac{y \cdot 3.73 \cdot 10^5}{T^2} \quad (2)$$

gdje je:

$$y = \frac{rh \cdot 6.105 \cdot \exp(x)}{100} \quad (3)$$

$$x = 25.22 \frac{T - 273.15}{T} - 5.31 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (4)$$

Konstanta T_0 iznosi 273.15 K, a rh predstavlja omjer parcijalnog tlaka vodene pare (e [hPa]) i parcijalnog tlaka zasićene vodene pare (e_s [hPa]):

$$rh = 100 \frac{e}{e_s} \quad (5)$$

koji su dani sljedećim izrazima:

$$e = \frac{p \cdot r}{0.6225 + r} \quad (6)$$

$$e_s = e_{s0} \cdot \exp\left[-\frac{l_v}{R_v} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (7)$$

gdje je r omjer miješanja vodene pare (eng. *water vapour mixing ratio*), $e_{s0} = 6.11$ hPa tlak zasićene vodene pare, $l_v = 2.5 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ latentna toplina isparavanja i $R_v = 461.5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ plinska konstanta vodene pare. Iako je indeks loma N je bezdimenzionalna veličina često se koristi jedinična oznaka N *jedinica* (eng. *N units*).

Gornje jednadžbe vrijede samo za površinu. Budući da tip refrakcije radio valova na nekoj visini h iznad tla ovisi o odnosu zakriviljenosti trajektorije zrake radio vala i zakriviljenosti lokalne horizontale ($R_z + h$), uvodi se modificirani indeks loma za radio valove

M (Skolnik, 1980.). Indeksi loma N i M na proizvoljnoj visini h povezani su na sljedeći način:

$$M = \left[\frac{h}{R_z} + (n-1) \right] \cdot 10^6 = 157 [km^{-1}] \cdot h + N \quad (8)$$

gdje je R_z radijus Zemlje ($= 6371$ km). Modificirani indeks loma, M , također je bezdimenzionalna veličina, pokazuje samo značajne znamenke indeksa loma, a kao jedinična oznaka se često koristi M jedinica (eng. M units).

1.1.2. Tipovi nestandardne refrakcije radio valova u atmosferi

Tip refrakcije radio valova (tab.1) određuje se iz vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma dM/dh .

$$\frac{dM}{dh} = \frac{10^6}{R_z} + \frac{dN}{dh} = 157 [km^{-1}] + \frac{dN}{dh} \quad (9)$$

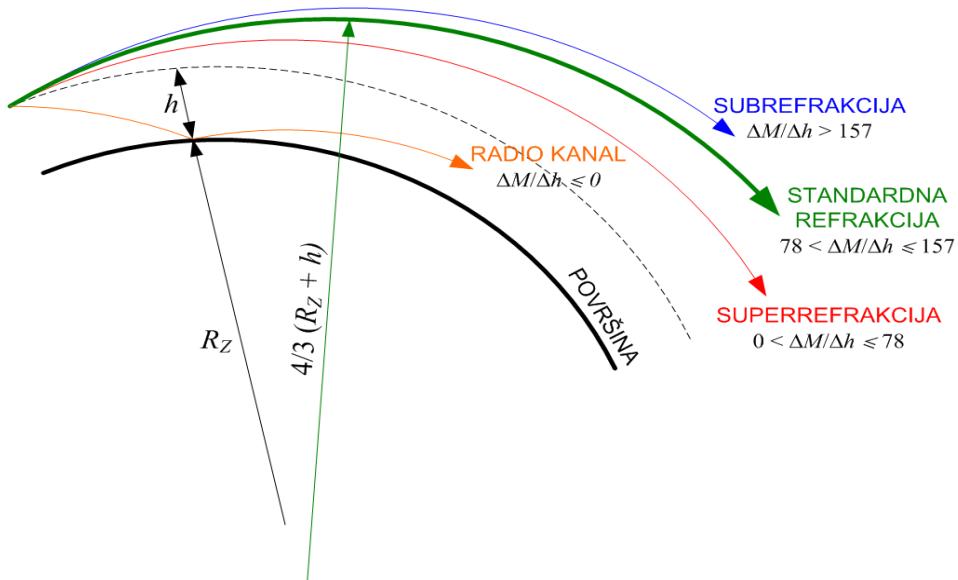
Kako su vrlo male promjene u vrijednostima indeksa loma odgovorne za refrakciju radio valova, razlikujemo standardnu i nestandardnu refrakciju u koju spadaju subrefrakcija, superrefrakcija i radio kanal (eng. *radio duct*). Nestandardna refrakcija javlja se uslijed naglih promjena po vertikali prvenstveno u polju vlažnosti zraka, zatim u polju temperature pa tlaka mijenjajući stazu širenja radio vala (Burk i sur., 2003.).

Trajektorija zrake radio valova je luk kružnice (sl. 1) čiji radijus iznosi k ($R_z + h$). Koeficijent k u slučaju standardne refrakcije iznosi otprilike $4/3$. U slučaju nestandardne refrakcije ta se vrijednost mijenja ovisno o tipu refrakcije (Viher i Telišman Prtenjak, 2012.).

Tablica 1: Tipovi refrakcije radio valova i pripadajući intervali vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma (dM/dh), te opći meteorološki uvjeti karakteristični za određeni tip atmosferske refrakcije.

$\frac{dM}{dh}$	TIP REFRAKCIJE	KARAKTERISTIČNI METEOROLOŠKI UVJETI
> 157	SUBREFRAKCIJA	Omjer miješanja raste, a temperatura i tlak padaju s visinom.
$\in \langle 78, 157 \rangle$	STANDARDNA REFRAKCIJA	Omjer miješanja, temperatura i tlak padaju s visinom.
$\in \langle 0, 78 \rangle$	SUPERREFRAKCIJA	Temperatura raste, a omjer miješanja i tlak padaju s visinom.
≤ 0	RADIO KANAL	Intenzivne promjene vertikalnih profila temperature i vlažnosti (jake prizemne inverzije obično u obalnom pojusu).

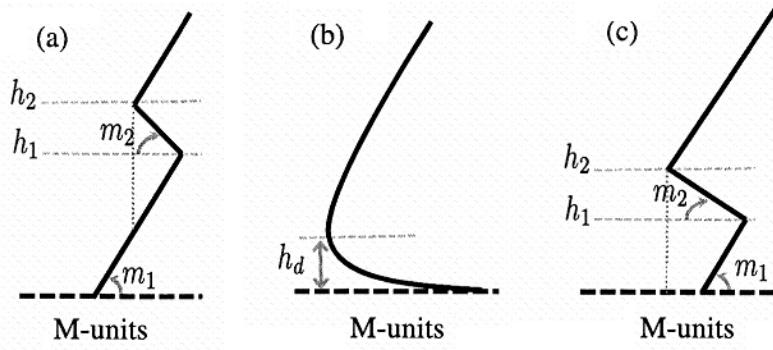
U slučaju subrefrakcije (sl. 1), brzina širenja radio valova raste s visinom te je zakrivljenost trajektorije manja nego pri uvjetima standardne refrakcije budući da je iznos vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma velik. Dolazi do pojava radarskih "rupa" u kojima se objekti ne mogu locirati. Kao posljedica javlja se slabiji površinski domet radio valova i teže ostvarenje radio veze na površini no bolja pokrivenost većih visina, budući da se zraka otklanja prema većim visinama.



Slika 1: Shematski prikaz trajektorija radio valova kod pojava refrakcije u odnosu na lokalnu horizontalu i pripadni intervali vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma radio valova, $\Delta M/\Delta h$, (preuzeto iz Viher i Telišman Prtenjak, 2012.)

Kod superrefrakcije zakrivljenost trajektorije je veća nego pri standardnoj refrakciji, tj. nešto je jače otklonjena prema površini, međutim zakrivljenost je još uvijek manja od lokalne horizontale. Posljedica je slabija pokrivenost većih visina radio valovima, ali i povećan domet u nižim slojevima atmosfere.

Ako vertikalni gradijent modificiranog indeksa loma pada s visinom javljaju se radio kanali. Zakrivljenost trajektorije veća je od zakrivljenosti lokalne horizontale, brzina širenja valova se smanjuje s visinom te se zrake otklanjaju prema tlu. Kod radio kanala može doći do višestrukih refleksija valova ukoliko imamo dobru vodljivost površine nad kojom se kanal pojavljuje. Posljedica je veliki domet radio valova pri površini, ali prilično slab domet na većim visinama. Iznad radio kanala može doći do stvaranja radarskih "rupa". Neuvažavanje ovih nestandardnih refrakcija također dovodi do velikih pogrešaka u otkrivanju objekata i procjeni njihovog kretanja.



Slika 2: Shematski pojednostavljen prikaz geometrije radio kanala: (a) povišeni radio kanali, (b) evaporacijski radio kanali, (c) površinski radio kanali (prema Karimian i sur., 2011.)

Radio kanali (sl. 2), se mogu pojaviti na nekoj visini (eng. *elevated ducts*, sl. 2a), obično pri vrhu atmosferskog graničnog sloja (AGS) ili blizu površine koja može biti bilo morska ili kopnena. Postoji razlika između prizemnih radio kanala koji nastaju uslijed isparavanja vodene pare tzv. evaporacijski radio kanali (eng. *evaporation ducts*, sl. 2b) i dubljih površinskih radio kanala (eng. *surface-based ducts*, sl. 2c), koji mnogo više utječe na širenje radio valova za širi spektar EM frekvencija. Pa ipak, za razliku od drugog tipa koji je znatno rjeđi, prvi tip radio kanala je učestalo prisutan iznad velikog dijela morske površine (Burk i sur., 2003.; Karimian i sur., 2011.). Prilikom modeliranja širenja radio valova, površinski radio kanali se mogu aproksimirati bi-linearnom ili tri-linearnom funkcijom za površinske radio kanale i eksponencijalnom funkcijom za evaporacijske radio kanale (Karimian i sur., 2011.). Površinski radio kanali obično se javljaju uslijed advekcije toplog i suhog obalnog zraka nad more, dok su povišeni radio kanali česti nad kopnom.

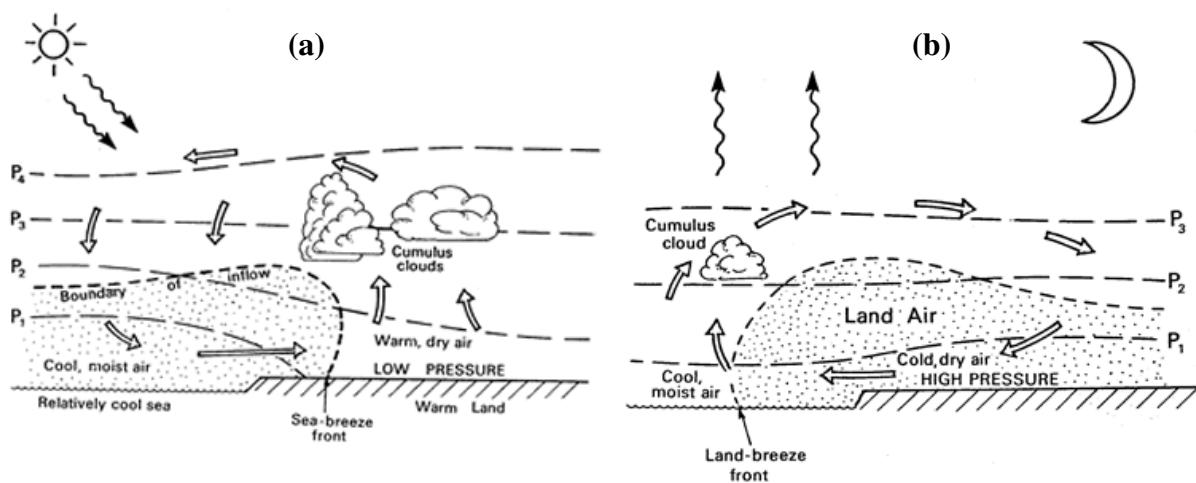
1.2. Analizirani mezoskalni meteorološki procesi

U prethodnom poglavlju je spomenuto i pokazano da različite karakteristike atmosfere kao što su vertikalne promjene u vlažnosti zraka, temperaturi i tlaku utječe na smjer i domet širenja radio valova. Procesi u atmosferi posljedica su opće cirkulacije atmosfere koja pak određuje sinoptičke i mezoskalne uvjete neke regije ili lokaliteta. Poznato je da su vertikalni gradijenti koje generiraju procesi velike (sinoptičke) skale učestalo modificirani mezoskalnim strukturama (npr. dimenzija od 4 do 400 km prema Fujita (1981.)). Do sada je uočeno da mezoskalni procesi, između ostalog, utječe i na visinu AGS-a i na pojavu lokalnih fronti te su tako usko povezani s naglim prostornim promjenama temperature i vlažnosti važnima za širenje radio valova (Wang i sur., 2012.). Jedna od mezoskalnih pojava u obalnom području koja modificira refrakciju u atmosferi je obalna cirkulacija zraka i to je jedna od najistraživanijih pojava (npr., Burk i Thompson, 1997.; Atkinson i Zhu, 2005., 2006.; Haack i sur., 2010.). Utjecaj prizemnih uvjeta na širenje radio valova i procjenu oborine za vrijeme duboke konvekcije nedavno su pokušali odrediti Park i Fabry (2011.).

U ovom radu promatrat će se utjecaj tri (dominantna) mezoskalna fenomena (na Jadranu i nad Hrvatskom) na pojavu nestandardne refrakcije radio valova: obalne cirkulacije zraka, bure i pojave kumulonimbusa (duboke mokre konvekcije). Utjecaj bure (ili sličnog tipa olujnog vjetra) na nestandardnu refrakciju radio valova do sada se nigdje nije istraživao.

1.2.1 Obalna cirkulacija

Obalna cirkulacija zraka je mezoskalno strujanje zraka unutar cirkulacijske ćelije. Karakteristična je za obalna područja diljem svijeta uslijed diferencijalnog zagrijavanja morske i kopnene podloge kao posljedice različitih toplinskih kapaciteta kopna i mora. Sunce u jutarnjim satima zagrijava zrak iznad kopna te dolazi do dizanja toplog zraka unutar konvektivnog AGS-a. Posljedica je nejednolika raspodjela tlaka u priobalju, s relativno nižim tlakom nad kopnom u odnosu na tlak nad morem. Kao posljedica stvorenog (mezoskalnog) gradijenta tlaka javlja se prizemno strujanje zraka od mora prema kopnu, smorac (eng. *see breeze*), slika 3. Fronta smorca označava granicu na kopnu do koje dopire vlažni morski zrak i povezana je s naglim promjenama temperature, tlaka, količine vlažnosti zraka, te vertikalnim strujanjem (konvekcijom). Zrak koji se diže nad kopnom se brže hlađi (često popraćeno kumulusnim tipom oblaka), a kad dođe do odgovarajuće visine (kvazi-horizontalne izobarne plohe) javlja se povratno visinsko strujanje zraka prema moru. Spuštanje zraka nad morem zatvara cirkulacijsku ćeliju. U večernjim i noćnim satima smjer cirkuliranja zraka se mijenja. Kopno se uvečer brže hlađi od mora budući da ima manji toplinski kapacitet pa se nad kopnom formira relativno viši tlak nego nad morem. Rezultat je prizemno strujanje zraka od kopna prema moru, kopnenjak (eng. *land breeze*). Vrlo iscrpan prikaz pojave dostupan je u npr. Miller i sur. (2003.).



Slika 3: Shematski prikaz obalne cirkulacije zraka: (a) smorac, (b) kopnenjak (preuzeto s <http://www.q8classroom.net>).

Na Jadranu (sl. 4), obalna cirkulacija se često pojavljuje, ljeti u prosjeku svaki drugi

dan (Telišman Prtenjak i Grisogono, 2007). Neporemećen smorac u Istri i Kvarneru ljeti obično počinje oko 8 h (po srednjeeuropskom vremenu, SEV) i traje do 19 h s manjim prostornim i vremenskim razlikama. Maksimalni razvoj odvija se u ranim poslijepodnevnim satima između 14 i 15 h. Područje oko Senja predstavlja anomaliju u klimatološkim karakteristikama smorca/kopnenjaka. Tamo je smorac najrjeđa (pojavljuje se u svega u 37% ljetnih dana), najslabija (s maksimalnim brzinama oko 11 h zbog izrazitog efekta kanaliziranja) i najkraća pojava. Značajno dugotrajniji noćni lokalni vjetar dvostruko je jači od dnevnog. U promatranoj regiji, najveće brzine smorca izmjerene su na zapadnom dijelu Istre sve do zračne luke Pula, a najučestaliji smorac je u Riječkom zaljevu (s frekvencijom do 60% od svih ljetnih dana). Maksimalne brzine lokalnog dnevnog vjetra najčešće su povezane s razlikama u temperaturi između kopna i mora od oko 4.5°C.

Numeričke simulacije regije (Telišman Prtenjak i sur., 2006.) pokazale su neke specifične strukture u polju strujanja na maloj skali. Uočeni su meso-γ vrtlozi unutar Riječkog zaljeva s periodom od 24 sata, zona konvergencije nad Istrom te dvije gotovo okomite zone konvergencije nad otokom Krkom. Mali dnevni anticiklonalni mezoskalni vrtlog unutar plitkog AGS nad morem tvore smorac i superponirani anabatički vjetar modificiran obalnom geometrijom i visinom obalne topografije. Noćni ciklonalni vrtlog se razvija tijekom superpozicije kopnenjaka i katabatičkog strujanja s okolnih planina. Iznad Istre, interakcija zapadnog i jugoistočnog smorca stvara zonu konvergencije koja se tijekom dana pomiče prema istoku. Često je povezana i s pojavom ljetne dnevne duboke konvekcije.



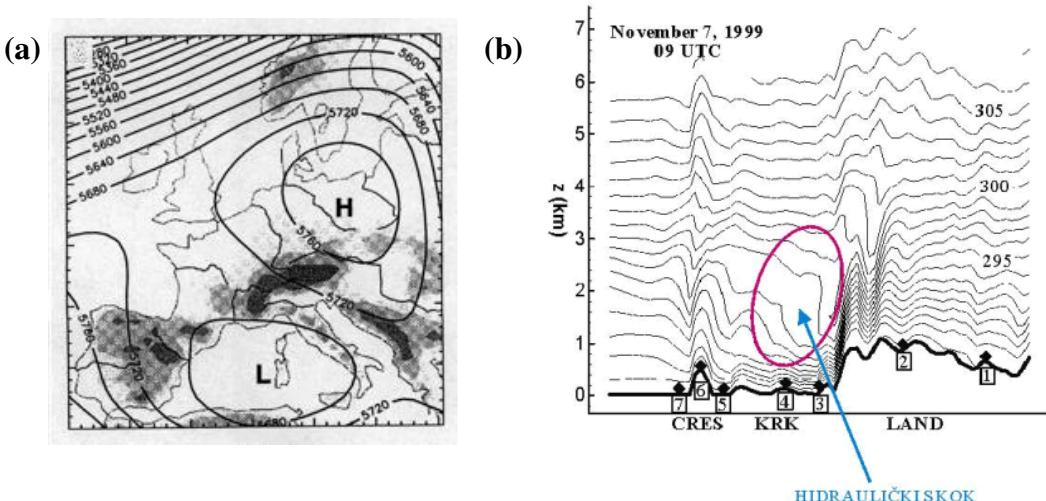
Slika 4: Radiosondažne postaje duž Jadrana: Brindisi (40.65°N, 17.95°E, 10 m), San Pietro Capofiume (44.65°N, 11.61°E, 11 m), Udine (46.03°N, 13.18°E, 94 m), Zadar. (44.10°N, 15.35°E, 0 m).

1.2.2 Bura

Bura je jak, mahovit vjetar karakterističan za istočnu obalu Jadrana, uglavnom zabilježen u hladnom dijelu godine. Već stotinjak godina je predmet istraživanja brojnih autora (opsežan pregled se može naći u Grisogono i Belušić, 2009.). Srednja brzina vjetra iznosi između 10 i 20 ms^{-1} dok na mahove brzina može iznositi i do 70 ms^{-1} . Pokazano je da su područja oko Šibenika i Splita, te Senja, a osobito podno Velebita, područja s najvećom učestalošću bure. Tijekom godine u Senju (Lukšić, 1975.) bura je najčešća u siječnju, a najmanje je imala u lipnju (ipak zabilježena u 20% ljetnih dana). Ima prosječnu brzinu od $\sim 11 \text{ m s}^{-1}$ i dnevni hod koji pokazuje jutarnji maksimum te poslijepodnevni minimum u brzinama vjetra. Trajanje i frekvencija bure smanjuje se prema jugu duž čitave obale Jadrana s prosječnim vremenom trajanja od 20-70 h (Poje, 1992.).

Sinoptički gledano, postoje tri tipa bure. Prvi tip je ciklonalni tip bure nazvan još i "tamna" bura, koja je povezana s velikom naoblakom i obilnim oborinama. Puše na sjevernom Jadranu i obično je popraćena jugom na južnom dijelu. Posljedica je ciklonalnog poremećaja, nastalog u Genovskom zaljevu (sl. 5a) koji se spušta prema jugu duž Jadranu. Javlja se cijele godine s relativno kratkim trajanjem do dva dana. Ljeti se češće javlja drugi tip, tzv. frontalni tip bure povezan s prodom hladne fronte nad Hrvatsku kao južni dio udaljene ciklone. Ponekad predstavlja najintenzivnije slučajeve bure s naglim povećanjem brzine i kratkim trajanjem. Treći tip bure je anticiklonalni tip bure nazvan još i "vedra" bura, koja nastaje pod utjecajem duboke, prostrane anticiklone iznad Hrvatske, bez ciklone na jugu. Obično je strujanje u dubljem sloju i slabijeg intenziteta nego kod ciklonalnog tipa. Ovaj tip bure je češći zimi.

Numeričke simulacije bure pokazale su prostornu raspodjelu mlazova bure duž jadranske obale koji su povezani s visinom obale i planinskim usjecima (Grisogono i Belušić, 2009). Izmjenjuju se s područjima burinog minimuma (zapadna obala Istre, zapadni dio Riječkog zaljeva, istočni dio otoka Krka..., Telišman Prtenjak i sur., 2010.). Nad sjevernim dijelom Jadranu ističu se tri dominantne pruge mlazova bure: u blizini Trsta, iznad Riječkog zaljeva te u blizini Senja. Često se prilikom najintenzivnije faze bure, mlazovi nad Kvarnerom združuju te dopiru do otoka Cresa i Lošinja pa pritom zahvaćaju i vrh istarskog poluotoka. Dinamički proces prelaženja planinske prepreke kod bure odvija se u hidrauličkom režimu strujanja koje završava hidrauličkim skokom (sl. 5b) i gubitkom energije.



Slika 5: (a) Prikaz sinoptičke situacije koja pogoduje nastanku bure prikazane pomoću razdioba geopotencijala na 500 hPa plohi; (b) Prikaz hidrauličkog skoka kod bure (verikalna raspodjela izentropa) (<http://jadran.gfz.hr>)

1.2.3 Kumulonimbus (Cb)

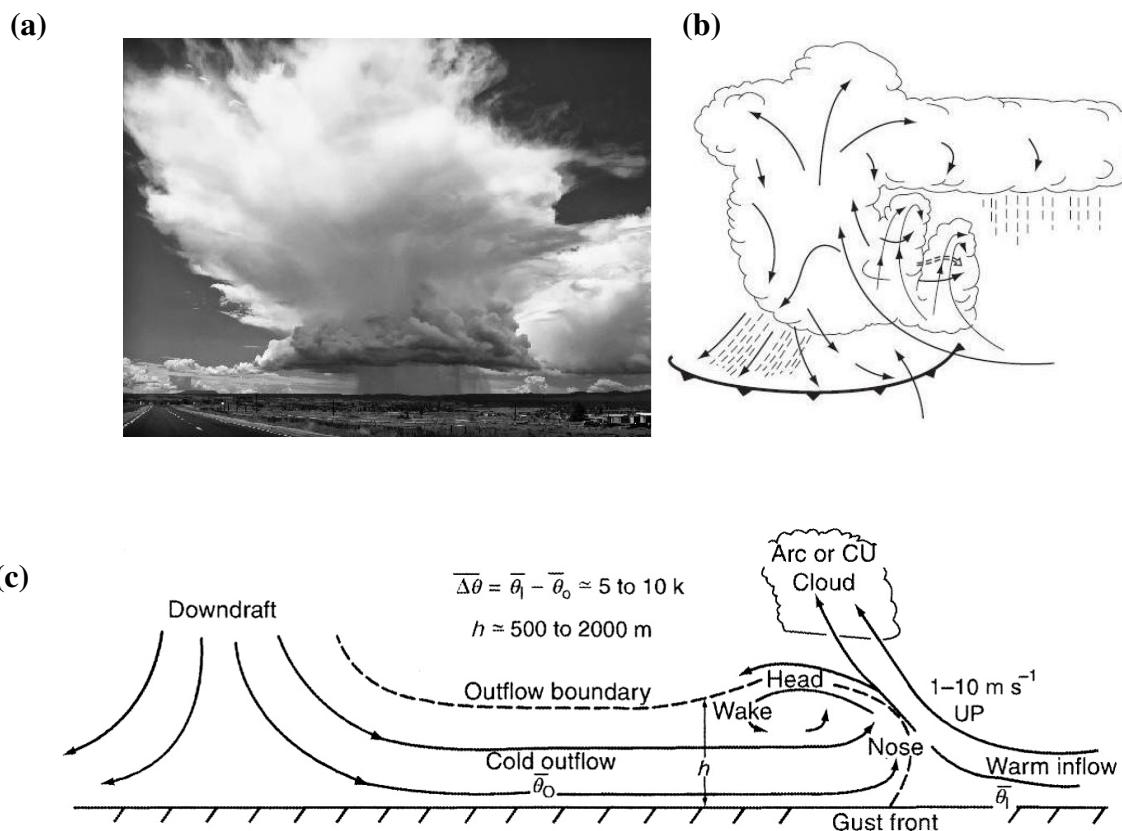
Kumulonimbus (Cb) je konvektivni oblak ili sustav oblaka, najčešće popraćen jakom oborinom (pljusak, tuča, snijeg), električnim pražnjenjem (munjama) i snažnim vertikalnim strujanjem zraka. Može nastati slobodnom termalnom konvekcijom, tj. vertikalnim uzdizanjem toplog i vlagom bogatog zraka pri termički nestabilnim uvjetima. U uvjetima prisilne konvekcije zračna masa je prisiljena dizati se u visinu zbog orografske prepreke ili zbog sudara dviju zračnih masa različitih termičkih i higroskopskih svojstava.

Pri vertikalnom uzdizanju, vлага u zraku se kondenzira i oslobađa se latentna toplina koja dozvoljava daljnje uzdizanje zraka. Ukoliko su uvjeti povoljni, tj. ako je atmosfera dovoljno nestabilna te ima dovoljno vlage u zraku, proces se nastavlja sve dok zrak ne dođe na visinu na kojoj gubi uzgon (tropopauza) i nastaje karakteristični oblik nakovnja u kumulonimbusu (sl. 6a,b). U početnoj fazi stvaranja oblaka, dominantno je strujanje zraka uvis (eng. *updraft*) dok je u završnoj fazi, najčešće nakon oborine, dominantno strujanje prema tlu (eng. *downdraft*). U ovoj fazi silazna strujanja formiraju frontu udara vjetra, slika 6c, (eng. *gust front*; Cotton i sur., 2011.) koja je po dinamici i strukturi vrlo slična fronti smorca. Iako su istih visina, koje idu do 2 km unutar AGS-a, fronta udara vjetra ima mnogo kraći životni vijek (10 puta kraći od fronte smorca) i puno veće vertikalne brzine, do 20 m s^{-1} (10 puta veće od onih duž fronte smorca). Kumulonimbus se u završnoj fazi najčešće raspada na ciruse (cirrus spissatus) pri vrhu, manje kumuluse (cumulus congestus) te stratokumuluse i altostratuse.

U Hrvatskoj je sjeverni Jadran najkonvektivniji dio, s najvećim brojem grmljavinskih oluja, nakon kojeg slijedi sjeverozapadni dio Hrvatske (Mikuš i sur., 2012.). U razdoblju od 2006. do 2009. godine na temelju mjerenja munja, dobio se postotak od 62.4% dana u topлом dijelu godine. Učestalost grmljavinskih oluja iznad Like i Gorskog kotara je najmanja i iznosi 40.1% od travnja do listopada. Maksimumi aktivnosti zapadnog dijela Hrvatske zabilježeni su

od lipnja do kolovoza s vrlo malim varijacijama u tri ljetna mjeseca. Dnevne grmljavinske oluje dominiraju tijekom dana u lipnju i srpnju. Grmljavinske oluje obično počinju oko 13 h u proljeće, 1-2 sata ranije ljeti i bez preferiranog sata u jesen. Obično završavaju između 17 i 20 h. Noćna duboka konvekcija pojavljuje se učestalije duž obale, osobito u proljeće i jesen u prva tri sata nakon ponoći i završavaju u prijepodnevnim satima.

Jedan od dominantnih tipova vremena tijekom kojeg se pojavljuju grmljavinske oluje je bez-gradijentno polje tlaka (23%) s maksimumom u srpnju. Jugozapadno strujanje (SW, 38%) u cikloni (u 51% slučajeva) ili na prednjoj strani doline (11%) jedan je od najčešćih tipova strujanja, osobito u proljeće i jesen. U kontinentalnom dijelu Hrvatske, SW vjetar je povezan s velikim vrijednostima konvektivne raspoložive potencijalne energije (*CAPE*) i K-indeksa ukazujući na velik potencijal i za dinamički i za termički generiranu konvekciju. Bulk Richardsonov broj (*BRN*) pokazuje na pojavu super-ćelija. Drugi najčešći tip strujanja je sjeveroistočni vjetar (NE, 23%) koji se obično pojavljuje u ljetnim mjesecima na stražnjoj strani ciklone s centrom iznad Crnog mora ili iza hladne fronte koja je dio ciklone s centrom znatno sjevernije od Hrvatske. Tada *BRN* vrijednosti pokazuju uvjete za razvoj jednostrukih i multi-ćelija. Treći tip vjetra sa sjeverozapada (NW, 18%) češći je u proljeće i ljeto i generira se na stražnjoj strani dobro razvijene visinske ciklone ili doline koja se nalazi sjeveroistočno od Hrvatske. Zapadni vjetar (W, 12%), iako izrazito povoljan za razvoj konvekcije na zapadnoj obali Jadrana, ima nešto rjeđu povezanost s grmljavinskim olujama nad Hrvatskom.



Slika 6: (a) Fotografija kumulonimbusa u zreloj fazi (<http://stevetaylorimages.com>); shematski prikazi (b) kumulonimbusa u zreloj fazi i (c) fronte udara vjetra (Cotton i sur., 2011.)

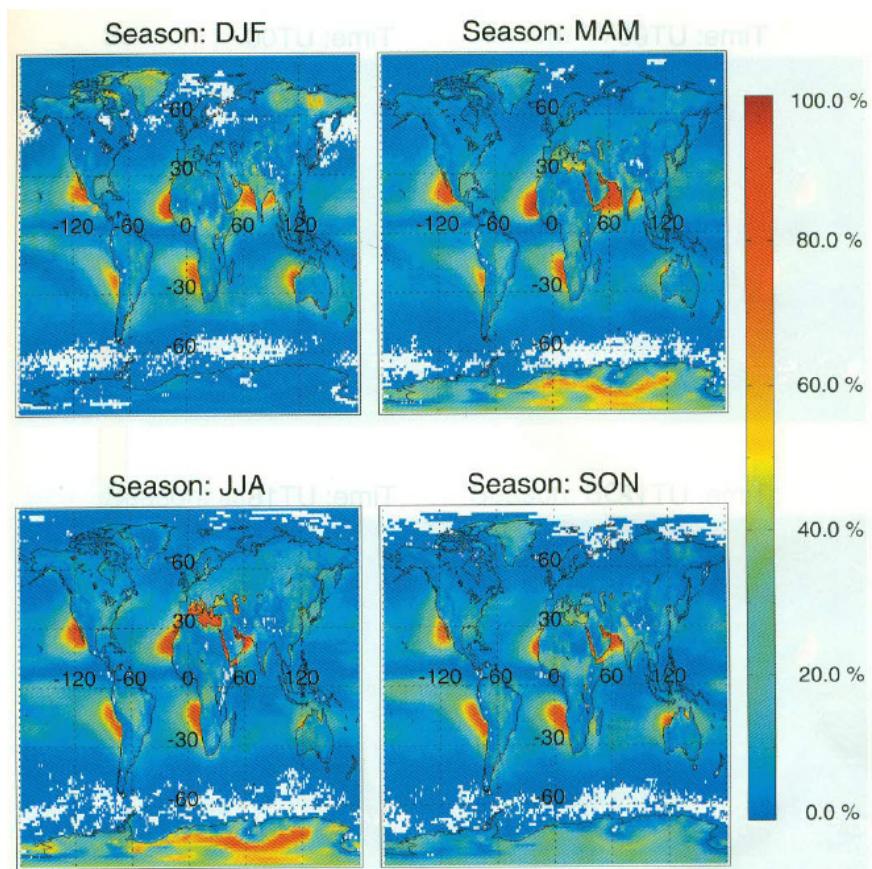
1.3. Dosadašnja istraživanja povezanosti meteoroloških procesa i nestandardne refrakcije

Istraživanja utjecaja meteoroloških procesa na (nestandardno) širenje radio valova već se dugo proučava. Jedan od prvih izvještaja o osobinama nestandardne refrakcije nad morem bio je tijekom Drugog svjetskog rata. Tada su britanski radari na sjeverozapadnoj obali Indije mogli detektirati pojave na obali Arapskog zaljeva udaljenoj 2700 km tijekom monsunskog razdoblja (Karimian i sur. 2011.). Dugi niz godina jedina mogućnost dobivanja prostornih i vremenskih karakteristika nestandardne refrakcije bila je na temelju radiosondažnih mjerena. Upravo zato je do sredine 90-ih godina 20. stoljeća istraživana veza uglavnom sinoptičkih procesa i refrakcije radio valova (npr. Rosenthal i Helvey, 1979.; Helvey i sur. 1995.). Helvey i sur. (1995.) su na temelju svog modela povezanosti sinoptičkih uvjeta i refrakcije radio valova pronašli povećanu učestalost radio kanala na istočnim i donjim dijelovima formacija povišenog tlaka u umjerenim širinama. Na tim dijelovima dolazi do pojave najjače supsidencije i pojave inverzije. Rezultate su potvrdili von Engeln i Teixeira (2004.) na podacima modela za srednjoročnu prognozu (*ECMWF*) na prostornom koraku od 1.5° (sl. 7). Međutim, upotreba istog modela nije pokazala dobre rezultate uz obalna područja zbog nerazlučivanja pojave mezoskalnih struktura (pregrube rezolucije).

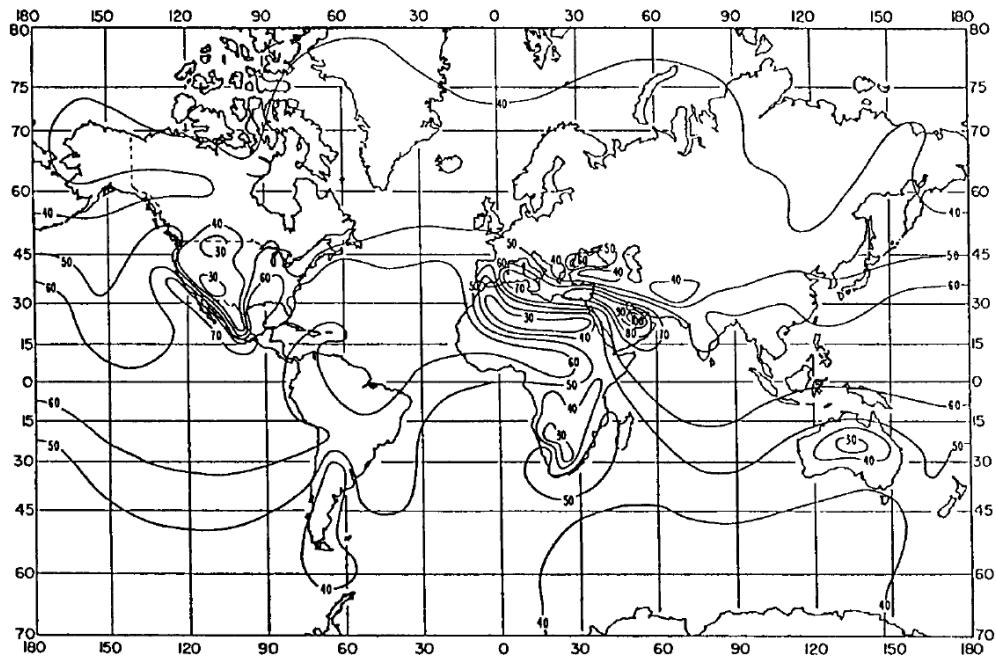
Prostorne raspodjele dobivene na temelju radiosondaža (sl. 8) i na temelju globalnog modela (sl. 7) ipak pokazuju neka područja s učestalom nestandardnom refrakcijom. Razdiobe pokazuju da su neka od najosjetljivijih područja za širenje radio valova smještena na zapadnim obalama Afrike, Australije, Sjeverne i Južne Amerike te na širem području Sredozemlja i Perzijskog zaljeva. Efekt nad Sredozemljem ima maksimum ljeti. Takav rezultat dobili su i Bech i sur. (2002.) na temelju dvogodišnjeg niza radiosondažnih mjerena za područje Katalonije (Barcelona). Oni uočavaju sezonske varijacije u visini sloja u kojem se pojavljuje radio kanal te intenzitetu pojave. Najmanja visina, a time i najveći gradijenti vlažnosti i temperature javljaju se između svibnja i kolovoza, kad su pojave radio kanala najintenzivnije.

Gledajući rijetko vremensko uzorkovanje (obično svakih 12 sati) u još rjeđoj prostornoj mreži radiosondažnih mjerena, odnosno veliki mrežni korak globalnih modela, poboljšanje dolazi tek s primjenom mezoskalnih meteoroloških modela visoke horizontalne razlučivosti. Takva istraživanja relativno su nova i vrše se u zadnjih 10-ak godina budući da u velikoj mjeri ovise o razvoju atmosferskih modela, ali i kapaciteta računala.

Na zapadnoj obali (južna Kalifornija), na temelju opsežnog istraživanja (radiosondažna i avionska mjerena) u kombinaciji s numeričkim modelom COAMPS (*Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System*), Haack i Burk (2001.) dovode u vezu strukturu i dubinu AGS-a nad morem (MAGS) i pojave radio kanala. Pokazalo se da radio kanali nastaju uglavnom nad morem, pri vrhu AGS-a (čija visina varira ovisno o strujanju zraka i orografiji obale), gdje su gradijenti vlažnosti zraka i temperature najizraženiji. Prognoziranje pojave radio kanala modelom COAMPS pokazalo se uspješnim, ali autori naglašavaju potrebu za većom vertikalnom rezolucijom.



Slika 7: Vjerovatnost pojave radio kanala u svim točkama ECMWF mreže razlučivosti $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ u razdoblju od 1998-2003.
Bijela boja pokazuje područja bez pojave radio kanala (prema von Engeln i Teixeira, 2004.)



Slika 8: Razdioba petogodišnjeg mjesečnog srednjaka (1955 - 1959) promjene vertikalnog gradijenta indeksa loma (N) u vertikalnom sloju 1 km, za mjesec kolovoz, dobivena na temelju radiosondažnih mjerena na 99 postaja (preuzeto iz ITU, 2003.)

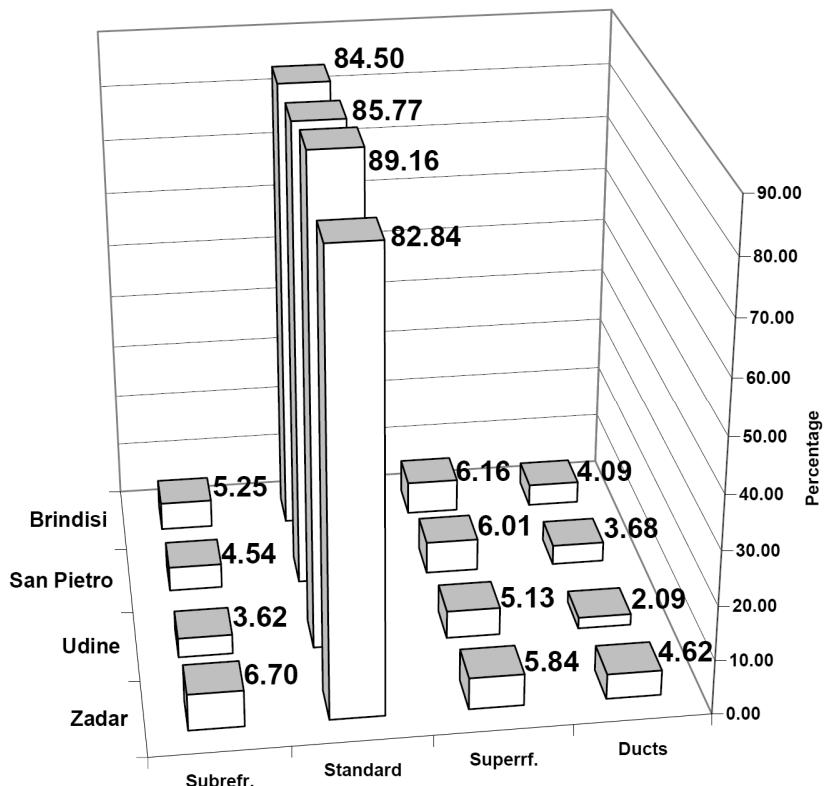
Možda najopsežnije istraživanje veze mezoskalnih procesa i pojave nestandardne refrakcije radio valova (radio kanala) obuhvaća istočnu obalu SAD-a (područje oko otoka Wallops, Virginia), u sklopu projekta *The Wallops-2000 Experiment* (Haack i sur., 2010.; Thompson i Haack, 2011.; Wang i sur., 2012.). Mjerenja su izvršena pomoću oceanografskih plutača, raketnim sondama, brodom, radarom i helikopterom, te su naknadno meteorološki uvjeti simulirani pomoću numeričkih modela: COAMPS, MetUM (eng. *Met Office's Unified Model*), GEM (eng. *Global Environmental Multiscale Model*) i MM5 (eng. *Atmospheric Research Mesoscale Model*). Pokazalo se da modeli uglavnom podcjenjuju vertikalni gradijent specifične vlažnosti, a time i pojavu radio kanala. Pojava radio kanala te njihova prostorna razdioba uglavnom ovisi o dubini i strukturi AGS nad morem i nad kopnom te obalnoj cirkulaciji i drugim lokalnim strujanjima zraka. Granični slojevi su najviše pod utjecajem gradijenata vlažnosti i temperature unutar slojeva koji ovise o površinskoj temperaturi mora (eng. *sea surface temperature*, SST). Glavni nedostatak modela je spora promjena informacije o SST ($\Delta t=12h$) u modelu kroz rubne uvjete. Bolja vremenska rezolucija SST-a, veća vertikalna rezolucija unutar prvog kilometra visine atmosfere te kvalitetnija inicijalizacija sinoptičkih uvjeta u modelima rezultira pouzdanim prognozom pojave radio kanala (Haack i sur., 2010.).

Slično je istraživanje izvršeno i u Perzijskom zaljevu. Pojava radio kanala i AGS-a simulirana je numeričkim modelima MM5V3 i AREPS (eng. *Advanced Refractive Effects Prediction System*), te su rezultati uspoređeni s dostupnim meteorološkim i radarskim mjeranjima. Pojava radio kanala nad morem u Perzijskom zaljevu prisutna je tijekom cijelog dana. Nad kopnom nastaju uglavnom u noćnim satima, zbog jake temperaturne inverzije izazvane naglim hlađenjem zagrijane površine kopna. Na južnoj obali zaljeva vlažni morski zrak nošen smorcem izaziva podizanje graničnog sloja do 400 m visine te se pojava radio kanala proteže do 150 km u unutrašnjost Arapskog poluotoka (Atkinson i Zhu, 2006.). Autori su napravili i opsežan set testova osjetljivosti, ispitujući utjecaj oblika obale, visine topografije, vjetra velike (sinoptičke) skale i SST. Testovi osjetljivosti modela pokazali su da na mezo- γ -skali najviše utjecaja na intenzitet, dubinu i razdiobu radio kanala ima konfiguracija obale, dok na mezo- β -skali najviše utjecaja imaju temperaturni gradijent između kopna i mora, visina topografije i vjetar velike skale (Atkinson i Zhu, 2005.).

1.4. Dosadašnja istraživanja veze meteoroloških procesa i nestandardne refrakcije na Jadranu

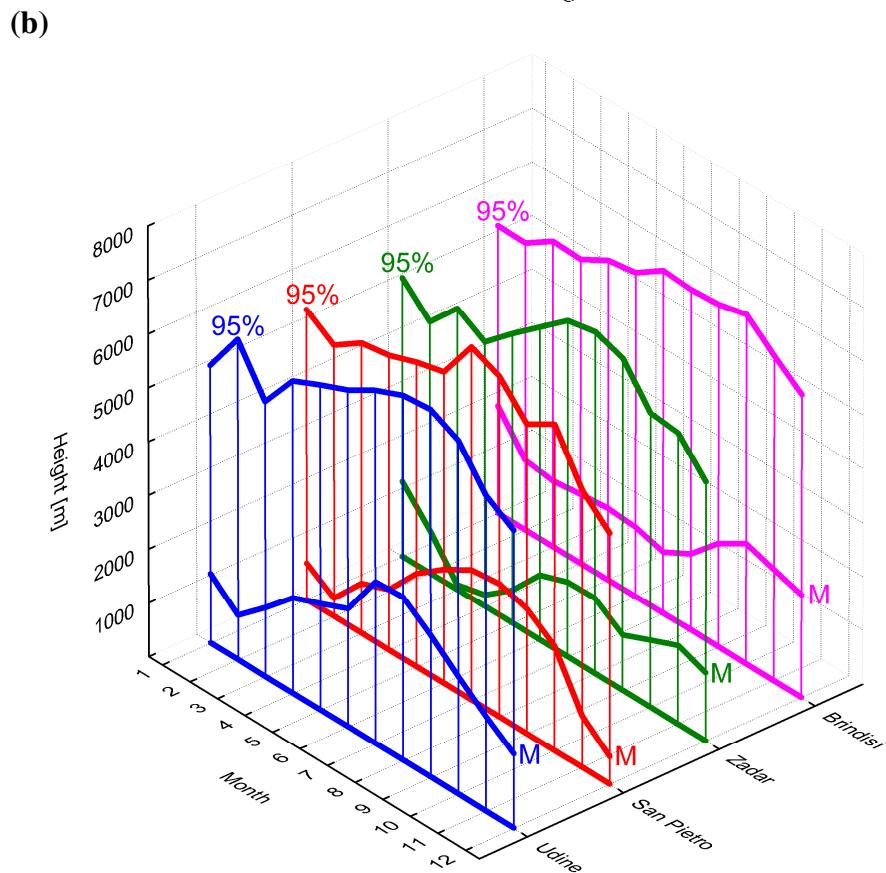
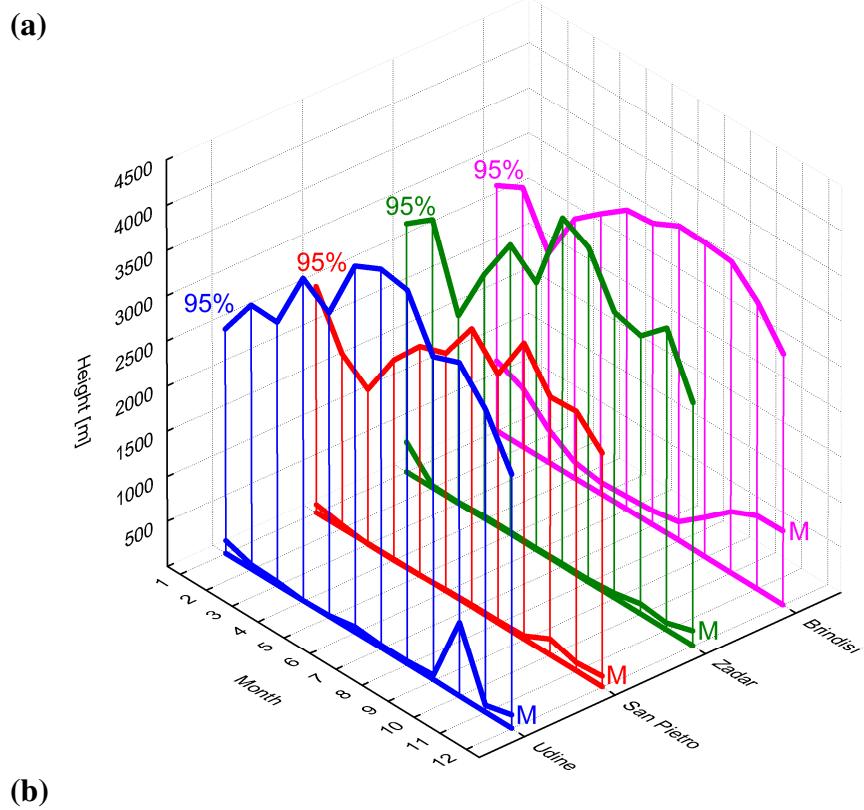
Za područje obale Jadrana (sl. 4) provedena je analiza nestandardne refrakcije na temelju radiosondažnih podataka u razdoblju 1994.-2009. na četiri dostupne postaje: Zadar, Udine, San Pietro i Brindisi (Viher, 2006.; Viher i Telišman Prtenjak, 2012.; Viher i sur., 2013.). Izračunati vertikalni profili modificiranog M -indeksa (jed. 8) pokazuju značajnu učestalost nestandardnih refrakcija na svim lokacijama (sl. 9). Najviše se pojava javlja u periodu od svibnja do rujna, osim nad Zadrom. Dobivena sezonska ovisnost podudara se i s globalnim raspodjelama na slikama 7 i 8. Pojave se uglavnom javljaju na relativno malim visinama ili pri površini (sl. 10). Radio kanali (sl. 10a) se kao najrjeđi tip na sve četiri postaje pojavljuju

(i) blizu površine tla, osobito u slučaju vrlo vlažnog sloja inverzije te (ii) na ~ 1500 m zbog nagle promjene temperature na vrhu AGS-a. Ipak, postoji i značajan broj povišenih radio kanala u donjoj trećini troposfere. Dok se superrefrakcije kao najčešća pojava nestandardne refrakcije javljaju u donjoj polovici troposfere, subrefrakcije (sl. 10b) dosežu 6800 m iznad tla (Viher i sur., 2013).



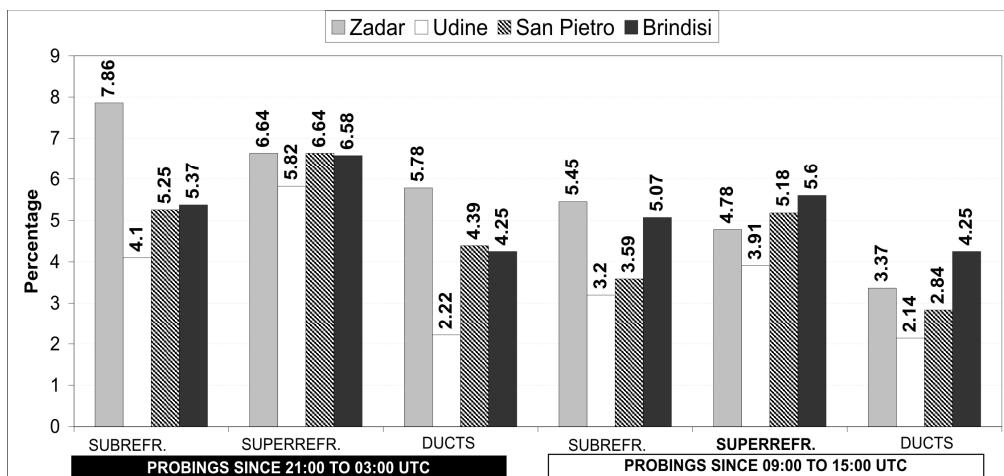
Slika 9: Postotni udio tipova (ne)standardne refrakcije (prema Tab. 1) izračunatih za četiri postaje (Brindisi, San Pietro, Udine, Zadar) na svim troposferskim profilima radiosondaža (uključujući i prizemna mjerena) za razdoblje 1994-2009 (iz Viher i sur., 2013.).

Subrefrakcije se često pojavljuju u hladnom i suhom zraku karakterističnom za višu atmosferu, stoga vertikalna raspodjela pokazuje značajan broj povišenih subrefrakcija, čak i u stratosferi (Viher i Telišman Prtenjak, 2012.). Jedinstveno postojanje subrefrakcija u stratosferi javlja se zbog: (i) suhog stratosferskog zraka te (ii) promjene vertikalnog gradijenta temperature (odnosno porasta temperature visinom) što daje stratosferski vertikalni gradijent M od oko 152 km^{-1} . Treba napomenuti da je ta vrijednost vrlo blizu rubne vrijednosti za subrefrakciju čime se otvara pitanje definicije samih nestandardnih refrakcija (Viher i Telišman Prtenjak, 2012.).



Slika 10: Godišnja varijabilnost vertikalnih profila za nestandardnu refrakciju prikazanu pomoću srednjeg mjesecnog medijana (M) i srednje mjesecne visine 95. percentila cjelokupnog niza pojava na četiri postaje (Brindisi, San Pietro, Udine, Zadar): (a) radio kanali i (b) subrefrakcije (iz Viher i sur., 2013.).

Ispitivanje utjecaja položaja postaje s obzirom na udaljenost od mora, odnosno doba dana (00 i 12 UTC) ukazalo je na veliku ovisnost o mezoskalnim (lokalnim) meteorološkim procesima (sl. 11). S obzirom na lokaciju postaje, uočen je relativno visok postotak nestandardne refrakcije u Zadru i relativno nizak postotak u Udinama. San Pietro i Brindisi imaju slične noćne postotke. Na dnevnoj skali, ukupan broj noćnih nestandardnih refrakcija je veći nego dnevni na svim postajama. Međutim, razlika u broju nestandardnih refrakcija danju je manja ako je postaja (i) bliže moru (npr. Brindisi) i (ii) više pod utjecajem brdovitog terena (npr. Udine). Stoga se iznad Zadra i San Pietra, tijekom dana udio dnevnih nestandardnih refrakcija smanjuju za oko 30-50%, u Udinama za oko ~ 25%, dok u Brindisiju, samo ~ 10%.



Slika 11: Frekvencije troposferskih nestandardnih refrakcija (tab. 1) za noćne (00 UTC) i dnevne (12 UTC) radiosondaže za na četiri postaje (Brindisi, San Pietro, Udine, Zadar) duž jadranske obale (iz Viher i sur., 2013.).

Pa ipak, iako sami profili daju određenu detekciju ovisnosti o terenu i dobu dana, njihov uzrok je samo pomoću radiosondaža neodrediv. Moguće je da su mjereni radiosondažni profili (a osobito pojava najvećeg broja radio kanala u prvih 400 m) pod izrazitim utjecajem mezoskalnih procesa, kao što je i pokazano u drugim geografskim regijama povoljnima za stvaranje nestandardne refrakcije (npr. u Virginiji ili Perzijskom zaljevu). Međutim, samo daljnja istraživanja na temelju trodimenzionalnih meteoroloških modela visoke razlučivosti mogu ponuditi dodatni uvid u karakteristike (ne)standardne refrakcije na širem području Jadrana. To je ujedno i glavni motiv ovog istraživanja. Cilj je upotrebom numeričkog modela WRF (eng. *Weather and Research Forecasting*) simulirati i prognozirati mezoskalne pojave smorac/kopnenjak, buru i duboku konvekciju te vidjeti imaju li i koliki im je utjecaj na pojavu nestandardne refrakcije nad širim područjem Jadrana (Hrvatske). Na temelju dobivenih mezoskalnih meteoroloških polja ovdje će se procijeniti relativno gusta prostorna (na svakih 1.5 km) i vremenska (svakih sat vremena) raspodjela ne/standardne refrakcije (prema tab. 1). Proučavanje te pojave na Jadranu je važno budući da se radi o području s vrlo gustim pomorskim i zračnim prometom koji se u velikoj mjeri koristi radarskom detekcijom i radio komunikacijom.

2. Podaci i metode

U ovom radu za analizu je odabранo razdoblje od 12. do 20. kolovoza 2000. jer se tijekom tog razdoblja izmjenjuju svi željeni mezoskalni fenomeni: konvekcija, smorac i bura u domeni interesa. Analiza je rađena na temelju radiosondažnih podataka i modelskih rezultata WRF na vrlo finoj rezoluciji.

2.1. Radiosondažni i prizemni podaci

Radiosondažni podaci su korišteni zbog usporedbe s modeliranim podacima na promatranom području sjevernog Jadrana. Originalni podaci preuzeti su s internetskog repozitorija radiosondažnih podataka iz cijelog svijeta koji se nalazi na službenim internetskim stranicama NOAA-e (eng. *National Oceanic and Atmospheric Administration*; <http://www.esrl.noaa.gov/raobs/>) i službenim internetskim stranicama Sveučilišta u Wyomingu (SAD), (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Drugi set podataka preuzet sa stranica Sveučilišta u Wyomingu korišten je za kontrolu prvog NOAA-seta podataka.

Koristili su se radiosondažni profili s dvije postaje Udine (WMO#16044) s uzorkovanjem svakih 6 sati (00, 06, 12 i 18 UTC) i San Pietro Capofiume (WMO#16144) s uzorkovanjem od 12 sati (00 i 12 UTC) (sl. 4). Korišteni profili sadržavaju podatke p , T , rh na standardnim i značajnim nivoima. Za procjenu nestandardne refrakcije osobito su važni značajni nivoi, budući da sadržavaju informaciju o iznenadnim promjenama iznosa vertikalnih gradijenata T i rh . Postaja San Pietro je smještena na Apeninskom poluotoku na udaljenosti od oko 40 km od sjeverozapadne obale Jadrana, na 38 m nadmorske visine. Postaja u Udinama se nalazi na 94 m nadmorske visine na sjeveroistočnom dijelu Italije između Jadrana i Alpa, 10 km sjeverno od Tršćanskog zaljeva. Podaci s jedine hrvatske radiosondažne postaje Zadar ne postoje jer su redovita mjerena započela 2002. godine.

U radu se također koriste i podaci prizemnih mjerena vjetra na 10 m visine i temperature zraka na visini od 2 m preuzetih s glavnih i klimatoloških mjernih postaja u domeni interesa. Postaje su smještene u Istri, Kvarneru, riječkom zaleđu i na otocima Krk, Cres, Lošinj i Rab te pokrivaju obalna područja i unutrašnjost. Prizemna mjerena pružaju informaciju o vremenskoj varijabilnosti brzine i smjera vjetra te ovdje daju kvalitativnu procjenu pouzdanosti modela.

2.2. Opis numeričkog mezoskalnog (WRF) modela

Mezoskalni numerički model WRF stvoren je u suradnji oko 150 znanstvenih i obrazovnih institucija i primjenjuje se u istraživačkom radu i prognoziranju vremena u zadnjih 10-ak godina. Razlikuju se dvije glavne inačice modela. Prva je WRF_ARW (eng. *Advanced*

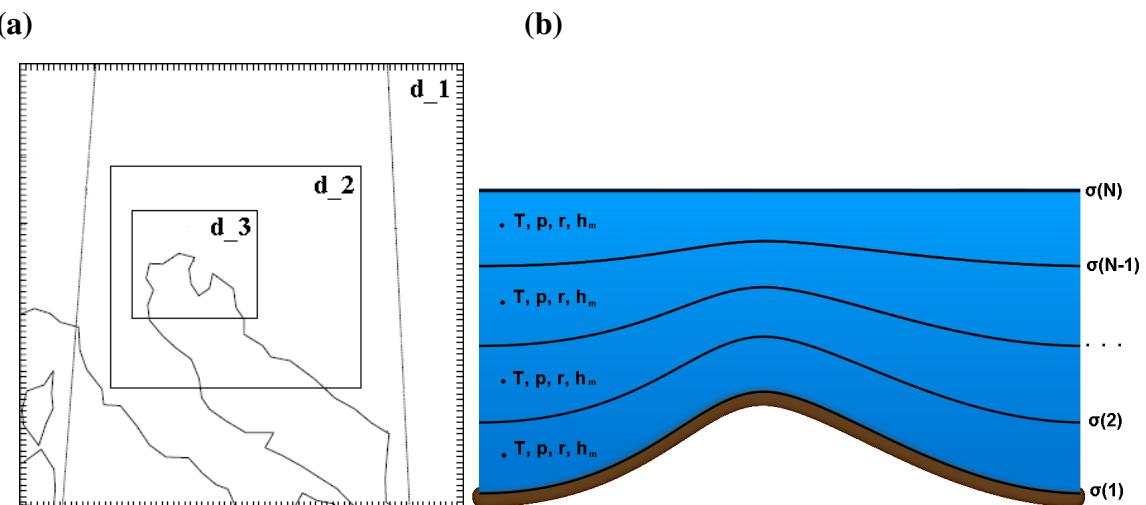
Research WRF), napredni istraživački model kojeg odlikuje mogućnost odabira visoke vremenske i prostorne rezolucije i koristi se uglavnom za istraživačke studije. Druga inačica je WRF_NMM (eng. *Nonhydrostatic Mesoscale Model*) i uglavnom se koristi za dobivanje svakodnevne vremenske prognoze. Numerička simulacija odabrane epizode u ovom radu izvedena je pomoću WRF_ARW (verzija 3) numeričkog modela na računalu Geofizičkog odsjeka PMF-a.

Kako je već spomenuto, simulacija odabranog slučaja obuhvaća termine od 12 UTC 12. 08. 2000. do 00 UTC 20. 08. 2000. i sadrži uspješnu reprodukciju mezoskalnih pojava nad promatranim područjem sjevernog Jadrana. Izvedena je u Lambertovoj stožastoj projekciji na tri dvosmjerno ugniježđene domene (sl. 12a) s horizontalnim rezolucijama od (d1), 4.5 km (d2) i 1.5 km (d3) na 70 nivoa u vertikalnoj rastezljivoj mreži. Najveća domena obuhvaća Apeninski poluotok, zapadni dio Balkanskog poluotoka i Alpski masiv. Fokusirajući se na domenu interesa, najmanja domena prikazuje područje sjevernog dijela Jadrana te obuhvaća Istru i Kvarner sa zaledem.

U modelu u horizontali koristi se Arakawa-C mreža, a vertikalni nivoi su definirani hibridnim sigma (σ) plohama kao:

$$\sigma = \frac{p_h - p_{ht}}{p_{hs} - p_{ht}} \quad (10)$$

gdje je p_h hidrostatička komponenta tlaka. Veličine p_{hs} i p_{ht} se odnose na hidrostatički tlak na površini i hidrostatički tlak na vrhu domene. Vertikalna koordinata prati topografiju (sl. 12b). Vrijednosti joj se mijenjaju od 0 pri tlu do 1 na vrhu domene. Prednosti su joj (1) što nikad ne siječe površinu tla, (2) koristi jednostavne rubne uvjete te se (3) tokovi u graničnom sloju razlučuju na konstantnim i malim visinama. Nedostaci su joj što je (1) nagib vertikalnih ploha vrlo strm iznad strme topografije te time (2) uzrokuje pogreške u blizini planina, osobito u izračunu sile gradijenta tlaka i (3) što se pogreške povećavaju s povećanjem rezolucije modela pri kojoj se nagibi planina bolje razlučuju.



Slika 12: Prikaz (a) 3 ugniježđene domene simulacije numeričkog modela WRF korištene u ovom radu (b) vertikalne raspodjelu hibridnih sigma ploha (preuzeto s http://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_weather_prediction)

Ostale postavke modela su *Rapid Radiative Transfer Model - RRTM* shema za dugovalno zračenje, *MM5 (Dudhia)* shema za kratkovalno zračenje te model s pet slojeva kojim se parametrizira tlo. Za opis AGS-a koristi se o *Mellor-Yamada-Janjić (MYJ)* shema s *Eta Monin-Obukhovljevom* shemom prizemnog sloja. U domenama d1 i d2 koristi se *Bettis-Miller-Janjić* shema za kumulusnu naoblaku. Za mikrofizičke procese koristi se *Linova* shema za parametrizaciju različitih oblika vode (vodena para, voda u oblacima, led u oblacima, kiša, snijeg, tuča) u točkama mreže modela. U prvih 2 km modela nalazi se 12 nivoa, a udaljenost između 70 vertikalnih nivoa raste od početnih 50-ak m do 300 m u srednjoj i gornjoj troposferi. Pri vrhu domene modela udaljenost između nivoa iznosi ~ 400 m. Početni i rubni uvjeti su preuzeti od *ECMWF* centra na rezoluciji 0.25° (~ 25 km) na standardnim izobarnim ploham svakih 6 sati. Topografija i kategorije karakteristike površine (eng. *landuse*) preuzete su od *USGS (United States Geological Survey)* baze podataka rezolucije od $30''$.

2.3. Proračun gradijenta dM/dh iz profila

U analizi su se koristili rezultati simulacije najmanje (najfinije) domene (d3) sa satnim ispisom rezultata. Varijable potrebne za izračun M i dM/dh iz modeliranih podataka su prognozirana temperatura (T_m), prognoziran tlak (p_m), prognoziran omjer miješanja vodene pare (r_m) i geopotencijalna visina vertikalnih hibridnih sigma nivoa (h). Rezultati modela sadrže referentna i perturbirana stanja većine potrebnih varijabli te su stoga meteorološke varijable korištene u izračunu rekonstruirane prema sljedećim izrazima:

$$T_m [K] = T + 300 \quad (11)$$

$$p_m [hPa] = \frac{PB + P}{100} \quad (12)$$

$$h [km] = \frac{PHB + PH}{1000 \cdot g} \quad (13)$$

gdje su T [K] perturbacija temperature, PB [Pa] i P [Pa] referentni hidrostatički tlak i perturbacija tlaka, PHB [$m^2 s^{-2}$] i PH [$m^2 s^{-2}$] referentna geopotencijalna visina i i perturbacija geopotencijalne visine te g ($= 9.81$ m s^{-2}) akceleracija sile teže. Zbog korištenja Arakawa C mreže, p_m , T_m i r_m , smješteni su po vertikali između dvije hibridne sigma plohe (sl. 12b), pa se njihova visina h_m računa prema formuli (14):

$$h_{m(i)} = \frac{h_{(i+1)} + h_{(i)}}{2}; \quad i = 1 \dots N - 1 \quad (14)$$

gdje je $h_{(i)}$ visina i-te sigma plohe, a N broj vertikalnih nivoa u modelu.

Podaci su korišteni za računanje N (jed. 2) te M (jed. 8) i promjene M po visini, dM/dh (jed. 9). Račun i grafički prikazi su napravljeni pomoću programskog paketa *Matlab*. Za izračun N , M i dM/dh iz modeliranih podataka korišteni su p_m , T_m , r_m i visina sigma ploha (h). S obzirom da je u radu rađena usporedba modela s radiosondažnim mjeranjima prema kojima su dostupni mjereni profili rh , T i p , bilo je potrebno preračunati vrijednosti omjera miješanja iz modela u relativnu vlažnost, rh . Postupak je bio:

- (1) odrediti parcijalni tlak vodene pare, e (jed. 6) iz modeliranih polja tlaka i omjera miješanja (p_m , r_m)
- (2) odrediti parcijalni tlak zasićene vodene pare, e_s (jed. 7) iz modeliranog polja temperature (T_m)
- (3) izračunati rh kao omjer e (korak 1) i e_s (korak 2).

Za radiosondažne podatke tlaka (p_s), temperature (T_s) i temperature rosišta (T_{ds}), rh je izračunata na visinama (h_s) na sličan način, prema jednadžbama (5) i (7), s iznimkom parcijalnog tlaka vodene pare (e) koji je izračunat prema jednadžbi (15), budući da je bio dostupan podatak o T_{ds} ,

$$e = e_{s0} \cdot \exp\left[-\frac{l_v}{R_v}\left(\frac{1}{T_{ds}} - \frac{1}{T_0}\right)\right]. \quad (15)$$

U nastavku su izračunati N prema izrazima (2), (3) i (4), M prema izrazu (8) i njegova promjena po visini (dM/dh) prema izrazu (16) za obje skupine podataka (radiosondažne i modelirane).

$$\frac{dM}{dh}_{(i)} = \frac{M_{(i+1)} - M_{(i)}}{h_{(i+1)} - h_{(i)}} \quad (16)$$

Gornji izraz predstavlja shemu necentralnih razlika gdje indeks i označava redni broj vertikalnog sloja za koji se računa dM/dh .

2.4. Statistički parametri korišteni u analizi

Korištenje numeričkih modela u meteorologiji izuzetno je korisno i praktično jer omogućuje relativno jeftin, lagan i brz pristup velikoj količini podataka. Mjerenja pružaju znatno manju količinu podataka u usporedbi s modelom, te mogu biti prilično skupa i teško izvediva. Rezultati modela (domena s horizontalnom rezolucijom od 1.5 km) koji su korišteni u ovome radu daju informaciju o skalarnim termodinamičkim meteorološkim veličinama u 171×198 točaka na 69 vertikalnih među-nivoa (ukupno 2336202 točaka) svakih sat vremena. Radiosondažna mjerenja na promatranom području sjevernog Jadrana daju podatke u samo dvije točke na otprilike stotinjak nivoa (oko 200 točaka) svakih 6 (Udine) ili 12 (San Pietro) sati. Iako su modelirani podaci mnogobrojniji, tj. prostorno i vremenski gušće raspoređeni,

mjereni podaci su vjerodostojniji budući da su preuzeti iz realne atmosfere. Numeričko modeliranje zasniva se na rješavanju diskretiziranih diferencijalnih jednadžbi u diskretiziranom prostoru i parametrizacijama određenih fizikalnih procesa što dovodi do numeričkih pogrešaka i nestabilnosti numeričkih rješenja. Upravo zato je potrebna procjena pouzdanosti numeričkog modela statističkom usporedbom modeliranih i izmjerениh podataka. Korišteni statistički parametri navedeni su u tablici 2, gdje su P_i i-ta modelirana a O_i i-ta izmjerena vrijednost uspoređivane varijable, \bar{P} i \bar{O} pripadajući srednjaci, te N duljina niza uspoređivanih podataka.

Srednja kvadratna pogreška (MSE), korijen srednje kvadratne pogreške ($RMSE$) i srednja apsolutna pogreška (MAE) statističke su veličine koje izražavaju odstupanje modelirane od izmjerene vrijednosti. Što su te veličine manje, to je model pouzdaniji. Pristranost ($Bias$) je statistička veličina koja u ovom slučaju govori o sistemskoj pogrešci unutar modela. Model je točniji što je vrijednost pristranosti bliža nuli. Indeks slaganja (d -indeks) je veličina koja ocjenjuje točnost modela. Indeks slaganja poprima vrijednosti unutar intervala $[0,1]$ i što je njegova vrijednost bliža nuli, to je model točniji. Koeficijent korelacije (r) mjeri je linearnosti skupova modeliranih i mjerensih vrijednosti i poprima vrijednosti unutar intervala $[-1,1]$. Ukoliko je vrijednost koeficijenta korelacije bliska nuli, linearna veza između dva skupa je slaba, odnosno nema je. Što je njegova vrijednost bliža vrijednostima na rubovima intervala, to je proporcionalna (1) ili obrnuto proporcionalna (-1) veza među skupovima snažnija.

Tablica 2: Statistički parametri korišteni u procjeni pouzdanosti modela.

STATISTIČKI PARAMETAR	FORMULA
Srednja kvadratna pogreška (MSE)	$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2$
Korijen srednje kvadratne pogreške ($RMSE$)	$RMSE = \sqrt{MSE}$
Srednja apsolutna pogreška (MAE)	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - O_i $
Pristranost ($Bias$)	$Bias = \bar{P} - \bar{O}$
Indeks slaganja (d -indeks)	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})^2}$
Koeficijent korelacije (r)	$r = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sigma_P \sigma_O};$ $\sigma_P^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2; \sigma_O^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2$

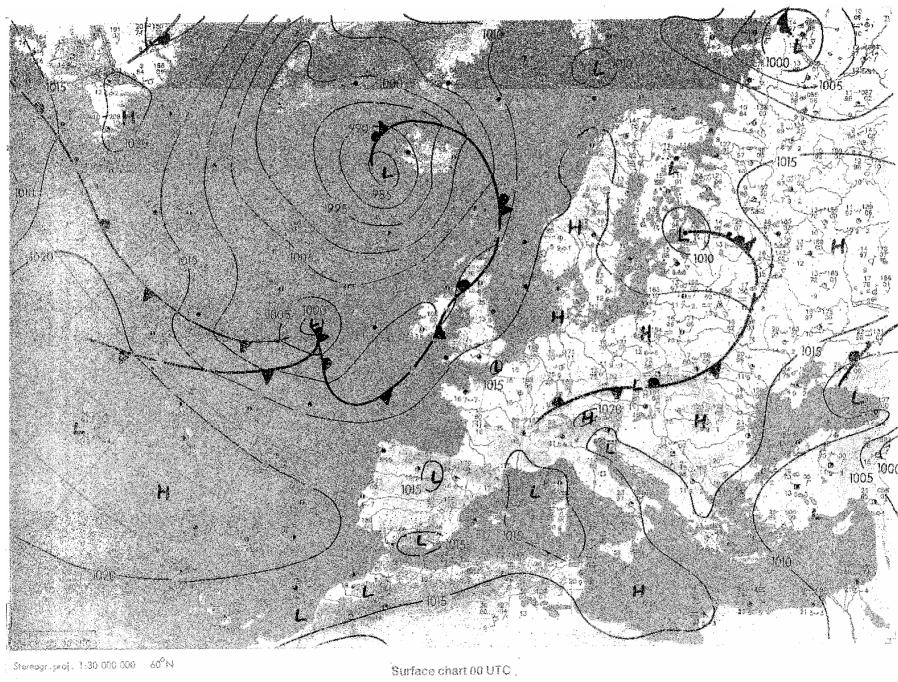
3. Karakteristike odabranog slučaja: 13. - 19. kolovoza 2000.

Kao sto je već spomenuto, odabrana epizoda simulacija obuhvaća razdoblje između 12.-20.08. 2000. unutar kojeg model zadovoljavajuće reproducira pojavu mezoskalnih procesa poput duboke konvekcije nad kopnenim dijelom sjeverozapadne Hrvatske (13. 08. 2000.), bure u podvelebitskom akvatoriju i Tršćanskem zaljevu (14. i 15. 08. 2000.) te smorca i kopnenjaka nad Istrom (17. i 18. 08. 2000.). Za promatrano razdoblje osim radiosondaža bile su dostupne površinske i visinske (850 hPa, 700 hPa i 500 hPa) dijagnostičke karte njemačke meteorološke službe (*Europäischer Wetterbericht – Deutschen Wetterdienstes*) u sinoptičkim terminima 00 UTC i 12 UTC.

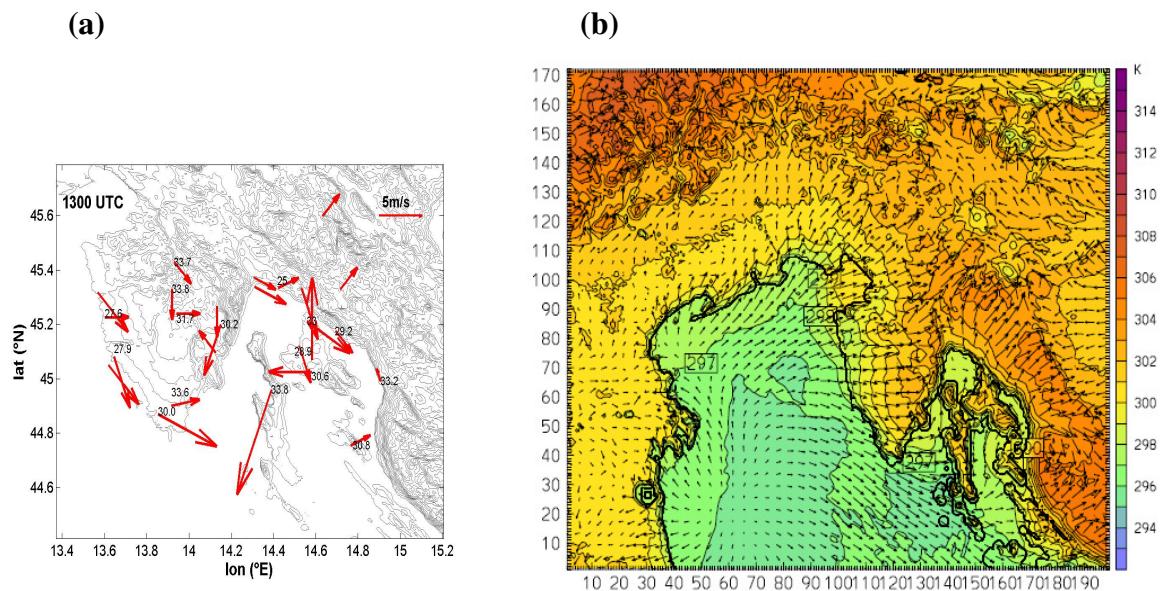
3.1. Konvektivna aktivnost u domeni interesa

U početku promatranog perioda 13. kolovoza 2000. (sl. 13), greben Azorske anticiklone pruža se do središnjeg dijela Sredozemlja i stvara gotovo bez-gradijentno polje površinskog tlaka što rezultira relativno neporemećenim vremenskim uvjetima na većem dijelu Jadrana. Preko Srednje Europe prelazi veći oslabljeni ciklonalni poremećaj, čiji najjužniji dio zahvaća sjeverni kopneni dio Hrvatske donoseći nestabilan zrak nad to područje. Duž obale sjevernog Jadrana sinoptički vjetar je uglavnom slabog intenziteta i promjenjivog (južnog do zapadnog) smjera. Radiosondažna mjerena u Udinama (u središtu Friuli-Venezia Giulia regije) pokazuju dominaciju jugozapadnog strujanja zraka u predalpskom području sjeveroistočne Italije čija brzina ne prelazi 7 m s^{-1} unutar prvih 3 km visine atmosfere. Nad srednjim i južnim Jadranom prevladava sjeverozapadno strujanje zraka (sezonska etežija). Takav raspored u polju tlaka iznad promatranog područja omogućio je razvoj mezoskalnih formacija, posebice termalno inducirane obalne cirkulacije duž cijele sjeverne obale Jadrana, te prizemnog, južnog do jugozapadnog strujanja zraka u smjeru Alpa (sl. 14). Zbog toga se nad Jadranom uočava veće područje divergencije u prizemnom polju strujanja s vrlo malim brzinama vjetra ($\sim 1 \text{ m s}^{-1}$)

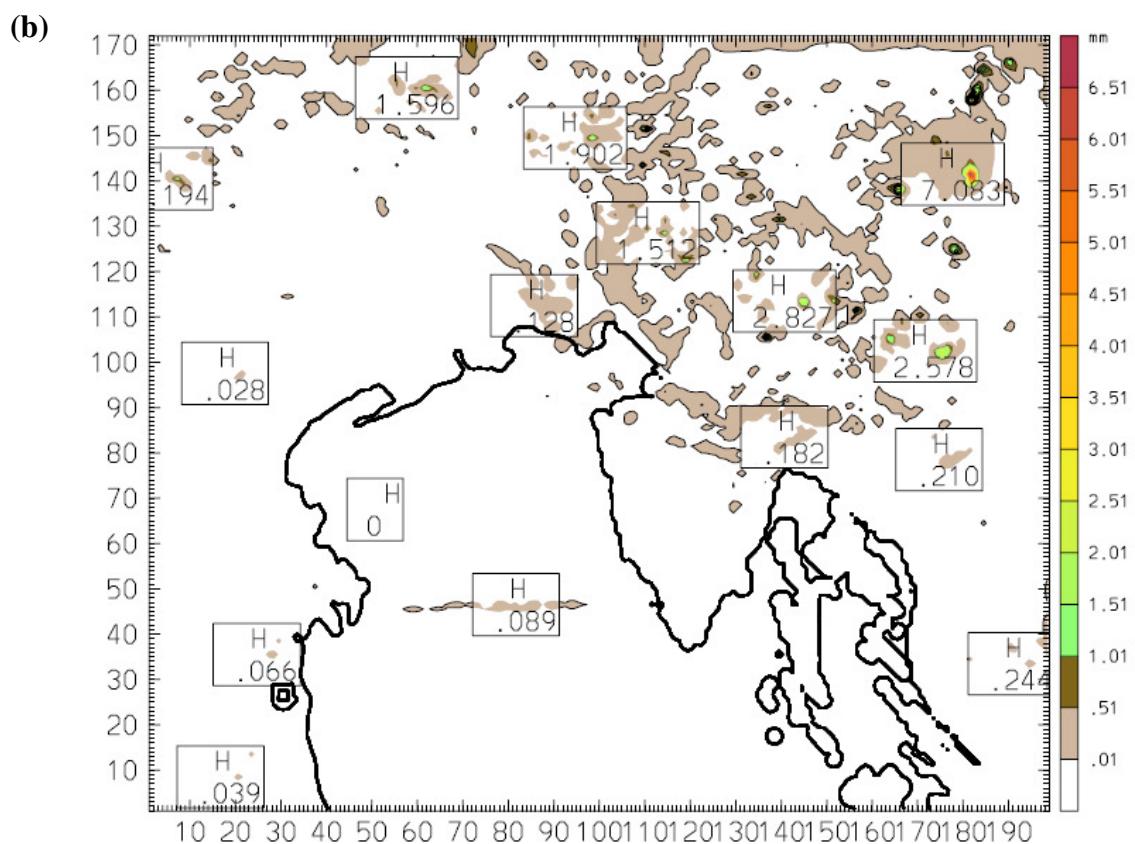
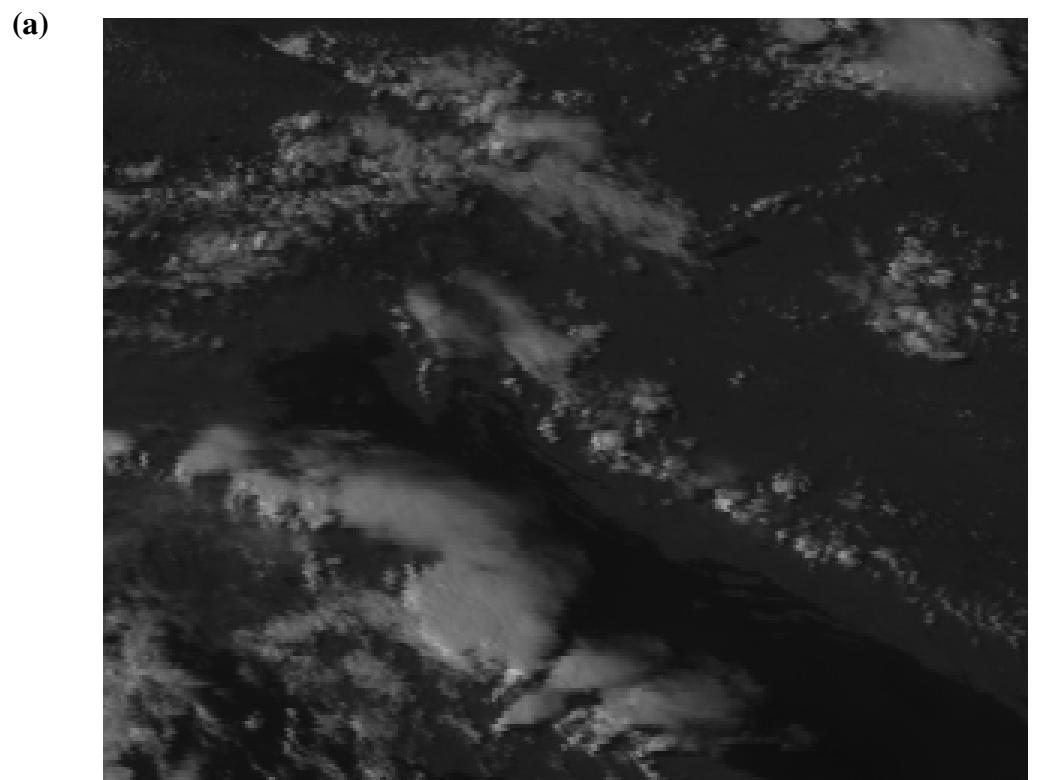
Na zapadnoj obali Jadrana, smorac je iz smjera sjeveroistoka dok na drugoj, istočnoj obali smorac dolazi pretežito iz smjera zapada i sjeverozapada, potpomognut sezonskom etežjom (maestral) te znatno modificiran otocima. Navedeno je vidljivo i u prizemnim mjerjenjima vjetra (sl. 14a) te potvrđeno rezultatima numeričke simulacije (sl. 14b). Nad zapadnom Istrom brzine su do 6 m s^{-1} , sjeverozapadni smorac puše u prvih 700 m te prodire oko 30 km u unutrašnjost u poslijepodnevnim satima. U isto vrijeme osim termički generiranog strujanja, javlja se i konvekcija nad širim područjem Rijeke, nad Slovenijom i sjeverozapadnom Hrvatskom (sl. 15). Konvektivni potencijal prisutan u indeksima nestabilnosti za Udinsku radiosondažu (u 00 UTC; $CAPE=898 \text{ J/kg}$, K-indeks =25.7, $BRN = 1348$) vidljiv je i na satelitskoj slici (sl.15a). U modelu konvektivna aktivnost je nešto slabijeg intenziteta u području interesa (osobito nad riječkim područjem) s kasnije dosegnutim maksimumom (oko 16-17 SEV) u sjeverozapadnom dijelu domene. Konvekcija je osim u naoblaci (sl. 15b) u modelu vidljiva i kao divergencija u polju vjetra praćena stvaranjem prizemnih bazena hladnijeg zraka (sl. 14b).



Slika 13: Prizemna dijagnostička karta Europe u 00 UTC na dan 13. kolovoza 2000. (izvor: *Deutschen Wetterdienstes*)



Slika 14: (a) Izmjerene vrijednosti temperature zraka (2 m) i brzine vjetra (10 m) i (b) modelirane vrijednosti brzine vjetra na (10 m) za 13. kolovoza 2000. u 13 UTC (=14 SEV). Temperatura je iscrtana svaki stupanj (1 K), a maksimalna brzina vjetra je 7.8 m s^{-1} . U gornjem desnom dijelu domene mogu se uočiti mjestimice manji bazeni hladnog zraka koju ukazuju na konvektivnu aktivnost.



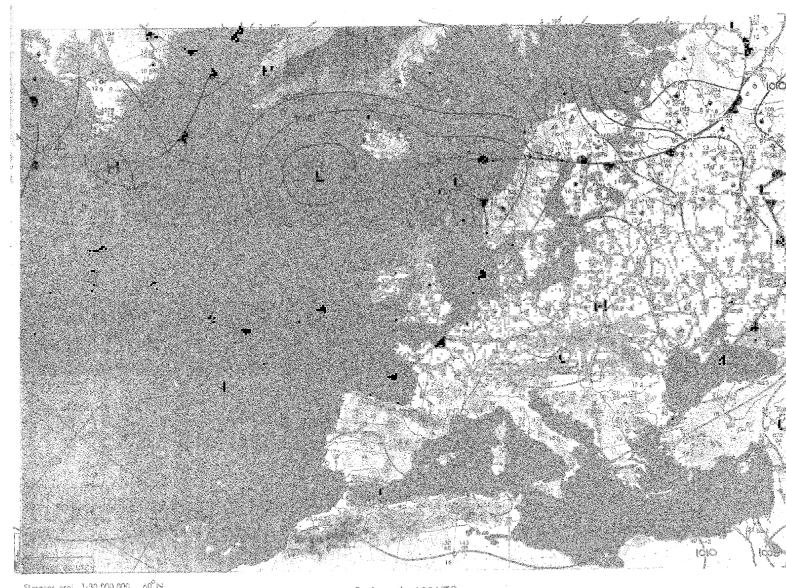
Slika 15: (a) Satelitska slika sjevernog dijela Apeninskog i Balkanskog poluotoka u vidljivom dijelu spektra za 13. kolovoza 2000. u 14 UTC (=15 SEV). (b) Prostorna raspodjela ukupne integrirane naoblake iz modela za isti termin kao i u (a).

3.2. Bura na obali Jadrana

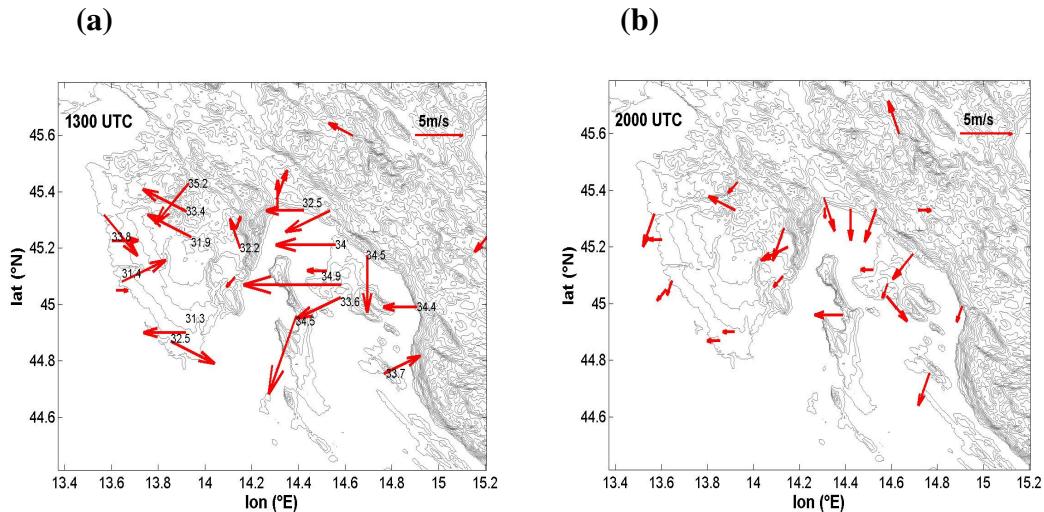
Tijekom 14. kolovoza 2000., oslabljeni sustav niskog tlaka giba se iznad središta kontinenta prema istoku. Nad južnom i jugoistočnom Europom s prolaskom plitke hladne fronte preko jugoistočnog dijela Alpa (kao dio sustava) dolazi do prodora hladnog zraka u unutrašnjosti Hrvatske (sl. 16). Takav razvoj sinoptičke situacije rezultira pojavom kratkotrajnije, slabije, frontalne bure duž hrvatske obale Jadrana (sl. 16). Prema radiosondažnim podacima (Udine), sjeveroistočno strujanje zraka prisutno je unutar sloja dubine 5 km. Bura počinje puhati nad Istrom u kasno poslijepodne 14. kolovoza te nad Kvarnerskim zaljevom nekoliko sati kasnije. Intenzitet bure postepeno raste, te u popodnevnim satima 15. kolovoza u mjerjenjima dostiže svoj maksimum (sl. 17).

U noćnim satima (sl. 18), u modelu, bura poprima karakterističan oblik strujanja s pojавom mlazova bure u Tršćanskem i Kvarnerskom zaljevu, te podvelebitskom akvatoriju (Senj). Duž zapadne obale Jadrana, mlazovi bure zakreću u sjeverozapadnu struju duž talijanske obale. Povremeno se uočavaju i minimumi intenziteta strujanja na zapadnoj obali Istre i zaklonjenim dijelovima Kvarnerskog zaljeva (slično kao i u Telišman Prtenjak i sur., 2010.). Relativna vlažnost u modelu pokazuje povećane vrijednosti nad navjetrinskim padinama planina riječkog zaleđa (Risnjak, Grobničke alpe) i nad Velebitom zbog prisilnog dizanja zraka. Uslijed dizanja dolazi do kondenzacije vodene pare (karakteristična "kapa", tj. altocumulus lenticularis nad Velebitom). Nad morem u večernjim satima, advekcija sušeg kontinentalnog zraka pojačanim strujanjem poklapa se sa smanjenom relativnom vlažnosti (sl. 18b). Veza je osobito uočljivija u mlazovima bure duž istočne obale Jadrana (zavjetrina Velike Kapele i Velebita) te u tršćanskom zaljevu.

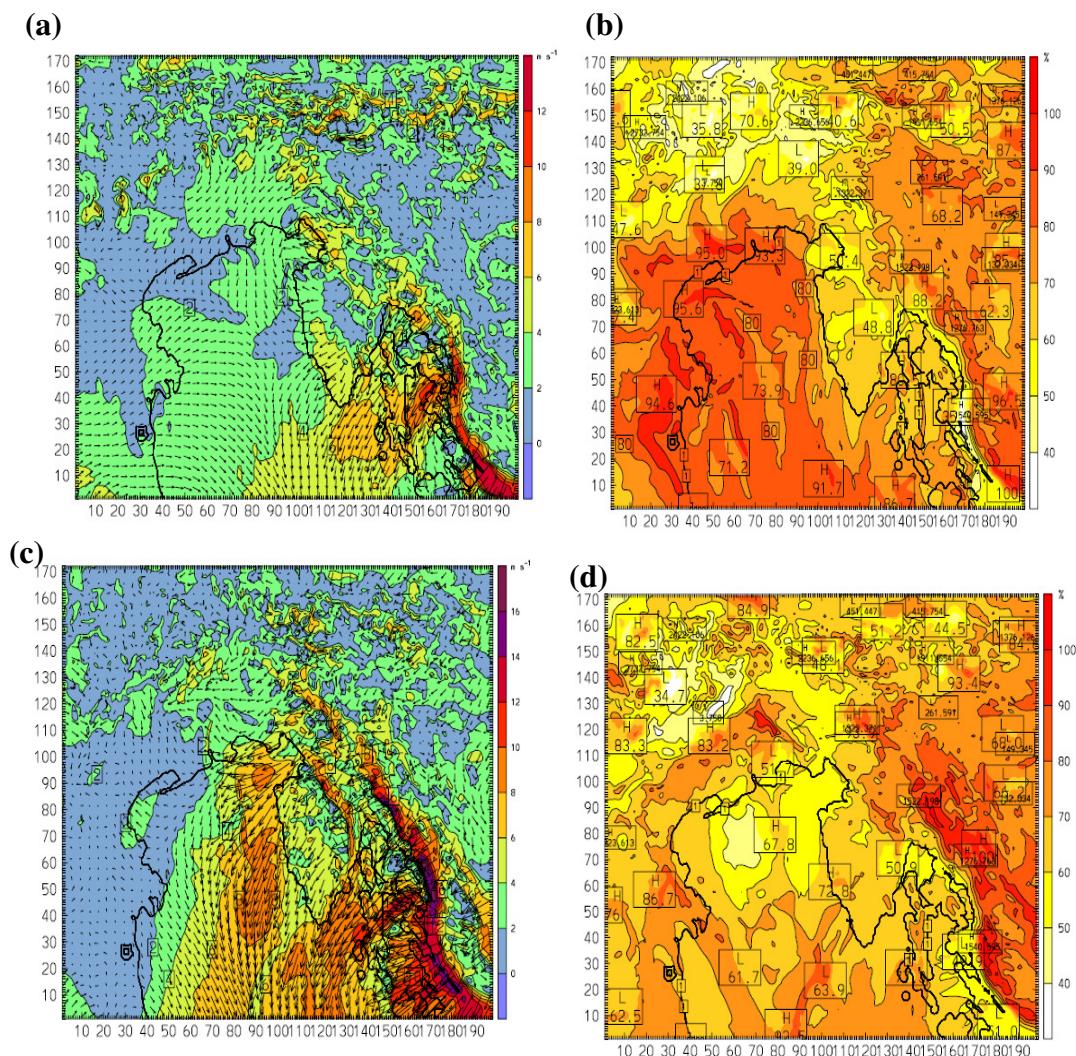
Iako je iz usporedbe prizemnih mjerjenja i rezultata modela vjetra vidljivo da model (ponegdje i znatno) precjenjuje intenzitet promatrane epizode bure, njezine glavne karakteristike su reproducirane. Bura prestaje u jutarnjim satima 16. kolovoza 2000.



Slika 16: Prizemna dijagnostička karta Europe u 00 UTC na dan 15. kolovoza 2000. (izvor: Deutschen Wetterdienstes)



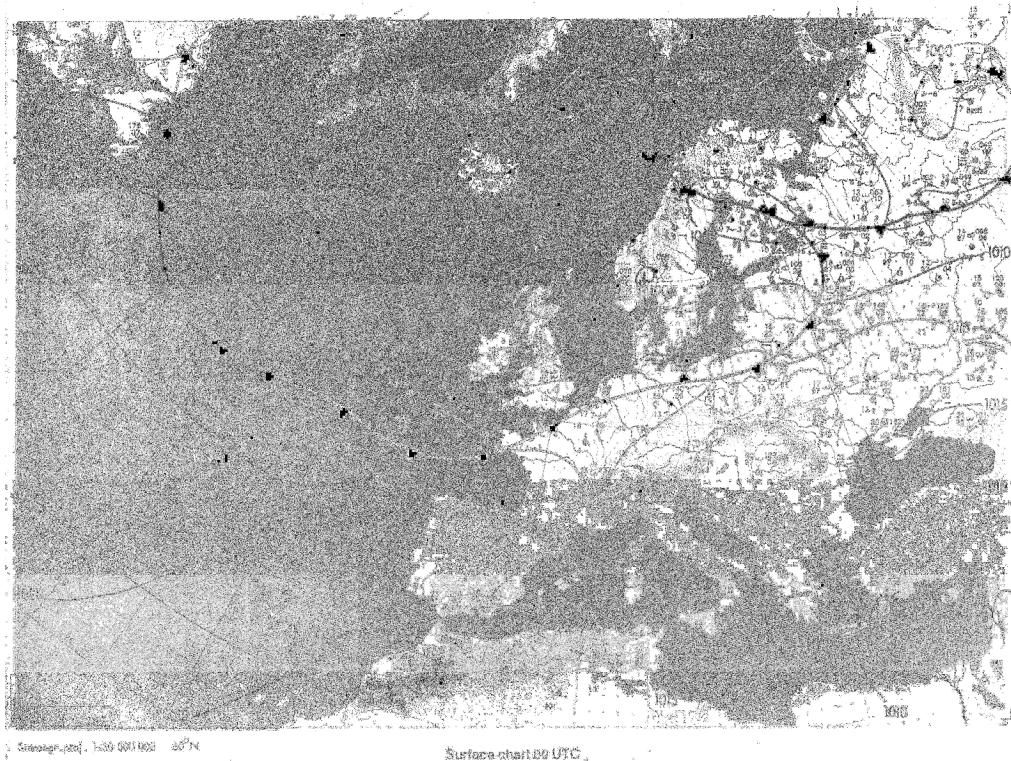
Slika 17: Izmjerene vrijednosti temperature zraka (2 m) i brzine vjetra (10 m) za 15 kolovoza 2000. u (a) 13 UTC (14 SEV) i (b) 20 UTC (21 SEV).



Slika 18: Modelirana polja smjera i brzine vjetra na 10 m visine (a,c) i relativna vlažnost (%) (b,d) za 15. kolovoza 2000.: (a,b) u 00 UTC (01 SEV) i (c,d) u 20 UTC (21 SEV). Brzina vjetra iscrtana je svaka 2 m s^{-1} , s maksimalnim brzinama vjetra od oko 14 m s^{-1} .

3.3. Smorac/kopnenjak na obali Jadrana

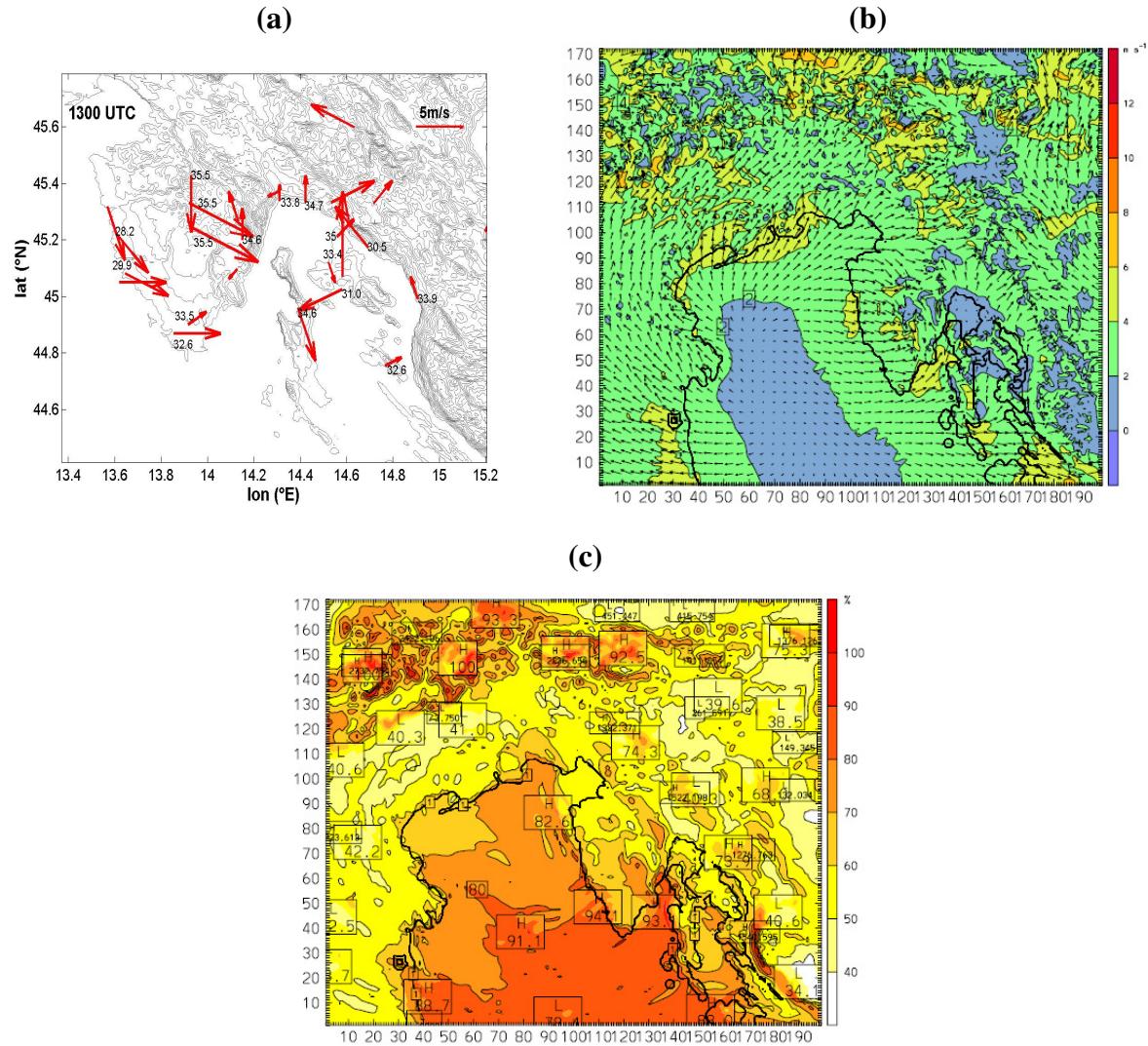
Tijekom sljedećeg dana (16. kolovoza) bura se smiruje, a sinoptička situacija poprima stanje gotovo bez-gradijentnog površinskog tlaka (slabije forsiranje) nad južnom i jugoistočnom Europom (sl. 19), slično već opisanoj situaciji 13. kolovoza (sl. 13). Nad sjevernom Europom stvara se nova, relativno duboka ciklona čiji frontalni dijelovi zahvaćaju i središnju Europu (Austriju). Dijagnostičke visinske karte pokazuju na formirani greben visokog tlaka smjera pružanja sjeveroistok-jugozapad, sa središtem iznad Hrvatske. Iako se polje visokog tlaka premješta u smjeru istoka, vremenska situacija nad Hrvatskom ostaje uglavnom nepromjenjena do 19. kolovoza. Takva vremenska situacija rezultira pretežno sjeverozapadnim strujanjem zraka nad južnim dijelom Jadrana, te umjerenim, jugozapadnim strujanjem zraka na sjevernom dijelu Jadrana koje prodire prema Alpama. Prizemno strujanje najjačeg je intenziteta 17. kolovoza, u prvih 3000 m doseže 10 m s^{-1} , a tijekom ostatka razdoblja slab. Na zapadnoj obali Istre, 17. kolovoza ponovo dolazi do formiranja smorca u prvih 1000 m, koji zbog interakcije s jugozapadnim sinoptičkim strujanjem prodire u poslijepodnevnim satima čak do 45 km u unutrašnjost Istre (sl. 20). Duž Istarskog poluotoka dolazi do interakcije sa smorcem koji puše iz smjera jugoistoka (sl. 20b).



Slika 19: Prizemna dijagnostička karta Europe u 00 UTC na dan 17. kolovoza 2000. (izvor: Deutschen Wetterdienstes)

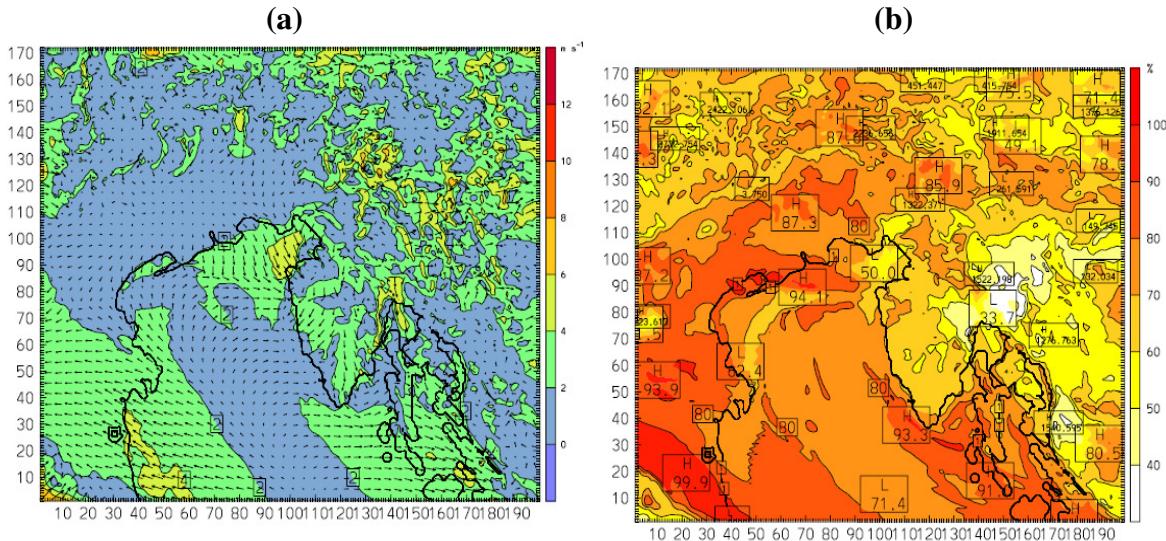
Tijekom noći, prizemni vjetar je slab u velikom dijelu domene (sl. 21). Nad planinskim područjem Apeninskog poluotoka javlja se noćni silazni vjetar obronka. Unatoč izmjeni dnevnog i noćnog režima strujanja nad većim dijelom obale, uočava se stalno jugoistočno strujanje zraka s mora nad područjem doline rijeke Po, koje ondje ostaje prisutno

do kraja promatranog razdoblja. Takva karakteristika vjetra se javlja zbog pojave plitkog površinskog poremećaja niskog tlaka nad sjevernom Italijom 18. kolovoza. Time je potaknut razvoj smorca, ali i onemogućen razvoj kopnenjaka duž doline rijeke Po. Iznad mora prevladava uglavnom slabo sjeverozapadno strujanje dok je nad Istrom prisutan lagani sjeverni i sjeveroistočni kopnenjak, s maksimumom intenziteta prema vrhu Istre (sl. 21a). Zbog (konveksnog) oblika obale, duž zapadne obale Istre se stvara plitka konvergentna zona, a vjetar je kanaliziran između Ćićarije i planine Risnjak prema Riječkom zaljevu.



Slika 20: (a) Izmjerene vrijednosti temperature zraka (2 m) i brzine vjetra (10 m) za 17. kolovoza 2000. u 13 UTC (=14 SEV). Modelirane vrijednosti (b) brzine vjetra na (10 m) za 17. kolovoza 2000. u 13 UTC (=14 SEV) i (c) relativna vlažnost (%). Brzina vjetra je iscrtana svaka 2 m s^{-1} s postignutim maksimumom od 6 m s^{-1} .

Relativna vlažnost (10 m) pokazuje maksimume nad morem i kopnom uz zapadnu obalu Jadrana, dok se nad Istrom i sjevernim primorjem sa zaleđem uočavaju minimumi. Budući da se radi o noćnom terminu, isparavanje nad kopnom je oslabljeno, a kopnenjak nad Istrom i riječkim zaleđem uzrokuje advekciju vlažnog zraka s kopna prema moru. Povećanu relativnu vlažnost (od 70 do 100 %) nad sjeveroistočnom Italijom uzrokuje plitki površinski poremećaj niskog tlaka i vjetar koji donosi vlažniji morski zrak na kopno.



Slika 21: Modelirane vrijednosti (a) brzine vjetra na (10 m) za 18. kolovoza 2000. u 00 UTC (=01 SEV) i pripadna (b) relativna vlažnost zraka (%). Brzina vjetra je iscrtana svaka 2 m s^{-1} s postignutim maksimumom od 6.6 m s^{-1} .

Treba spomenuti da je tijekom cijelog razdoblja zabilježena visoka temperatura zraka koja se kontinuirano povećavala prema kraju promatranog razdoblja, s maksimalnim temperaturama zraka od početnih 30 pa do 36 °C. Niže temperature početkom razdoblja posljedica su i formiranih oblaka (jer su smanjili dozračenu Sunčevu energiju) kojih je nakon 16. kolovoza bilo znatno manje.

4. Rezultati

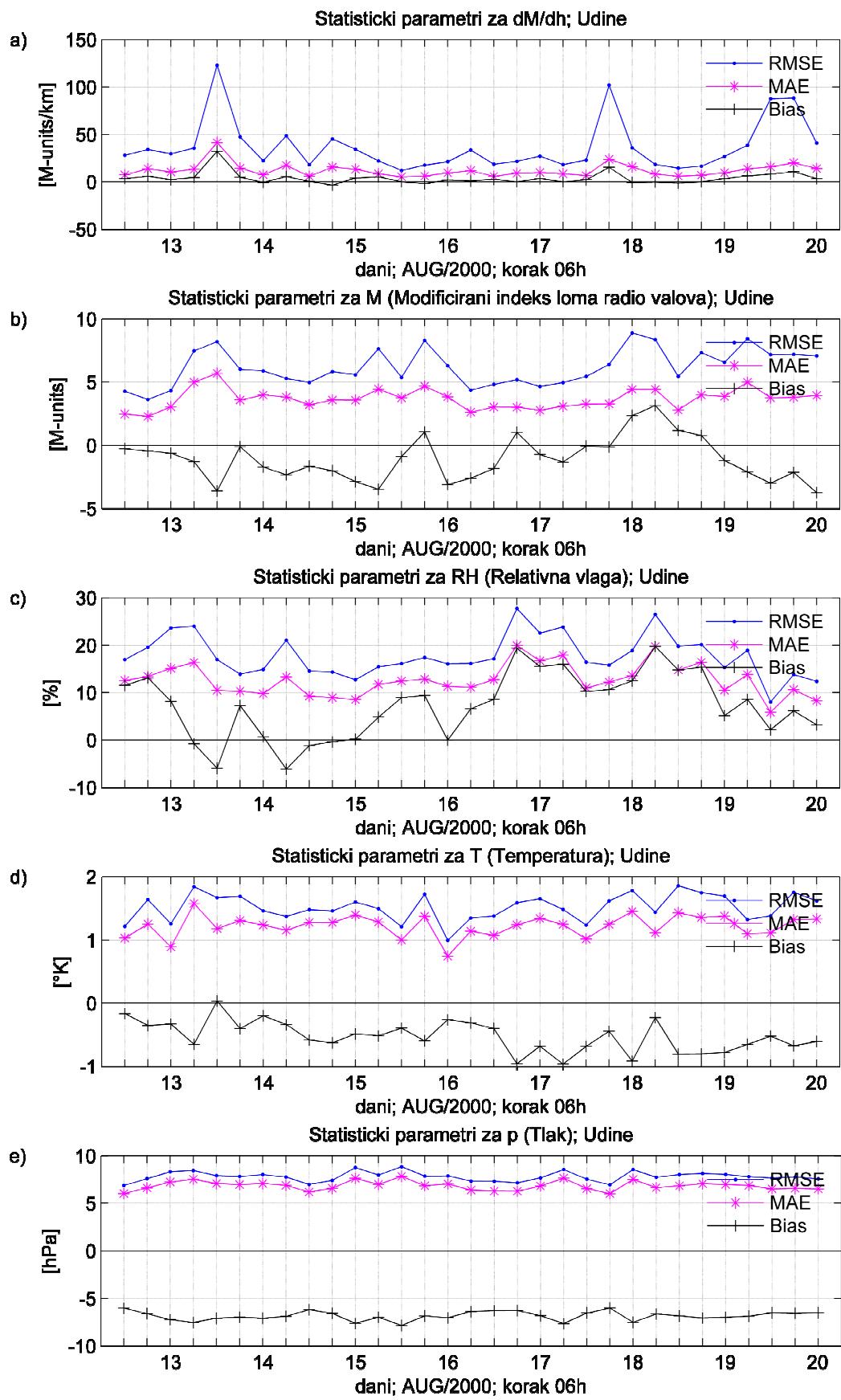
Prvi dio analize rezultata je statistička usporedba M i dM/dh kao i tlaka, temperature i relativne vlažnosti dobivenih iz radiosondažnih i modeliranih podataka za dostupne lokacije (San Pietro Capofiume i Udine). Za potrebe statističke analize, rezultati modeliranih podataka numerički su interpolirani na visinske nivoe radiosondažnih podataka. Cilj drugog dijela analize bio je grafički prikazati vertikalnu i horizontalnu raspodjelu dM/dh dobivenu iz modeliranih podataka te usporediti ih s meteorološkim poljima. Usporedba bi trebala pokazati o kojem se tipu nestandardne refrakcije radi i koji je njihov meteorološki uzrok. Koordinate i termini vertikalnih i horizontalnih presjeka odabrani su prema terminima i položajima simuliranih mezoskalnih pojava detaljnije opisanih u prethodnom poglavlju.

4.1 Usporedba radiosondaža i vertikalnih profila iz modela

S obzirom da su unutar domene dostupne dvije radiosondaže (kao jedini izvor mjerjenih podataka), prvo je učinjena usporedba modela u Udinama i San Pietru uz detekciju pojave nestandardne refrakcije. U nastavku teksta provedena je diskusija rezultata za Udine, budući da se San Pietro nalazi na samom rubu domene, a rubna područja domene pod utjecajem su rubnih uvjeta i treba ih se uzimati s određenim oprezom. Dakako, treba naglasiti da se rezultati za San Pietro ponašaju slično rezultatima za Udine. Također, vremensko je uzorkovanje u Udinama gušće (svakih 6h) nego u San Pietru (svakih 12h).

Statistički parametri (vidi tab. 2) izračunati su za modificirani indeks loma M , njegovu promjenu po visini dM/dh , relativnu vlažnost rh , temperaturu T i tlak p , te su grafički prikazani parametri odstupanja $RMSE$ (plavo), MAE (ružičasto) i parametar pristranosti ($Bias$, crno) na slici 22.

Statistička usporedba pokazuje zadovoljavajuću uspješnost modela, koja varira ovisno o terminu. Odstupanje temperature i tlaka ($RMSE$) ne prelazi 2 K odnosno 10 hPa, no u oba je slučaja model njihove vrijednosti podcijenio, što se vidi iz slike 22d i f ($Bias$). Odstupanje relativne vlažnosti varira od oko 5 do 30 %. Iako u modelu postoji i podcenjivanje i precjenjivanje relativne vlažnosti profila u Udinama, model u prosjeku precjenjuje vlažnost. Rezultat o hladnijoj i vlažnijoj atmosferi u modelu nije neočekivan jer je već uočeno da kod ovdje već korištenog seta odabranih shema (npr. Weisman i sur., 2008.), *MYJ* shema za granični sloj ima svojstvo generiranja hladnijih, nižih i vlažnijih AGS-a od opaženih. Modificirani indeks loma M uglavnom je vrlo dobro reproduciran, s maksimalnim odstupanjem koje ne prelazi 10 M -jedinica. Odstupanje modeliranog M -a najizraženije je u prvih 4 km gdje su njegove promjene najintenzivnije.



Slika 22: Grafički prikaz statističkih parametara (RMSE, MAE i Bias) za Udine (od 12.08.2000. u 12 UTC do 20.08.2000. u 00 UTC); (a) dM/dh , (b) M , (c) relativna vlažnost (%), (d) temperatura ($^{\circ}$ K) i (e) tlak (hPa)

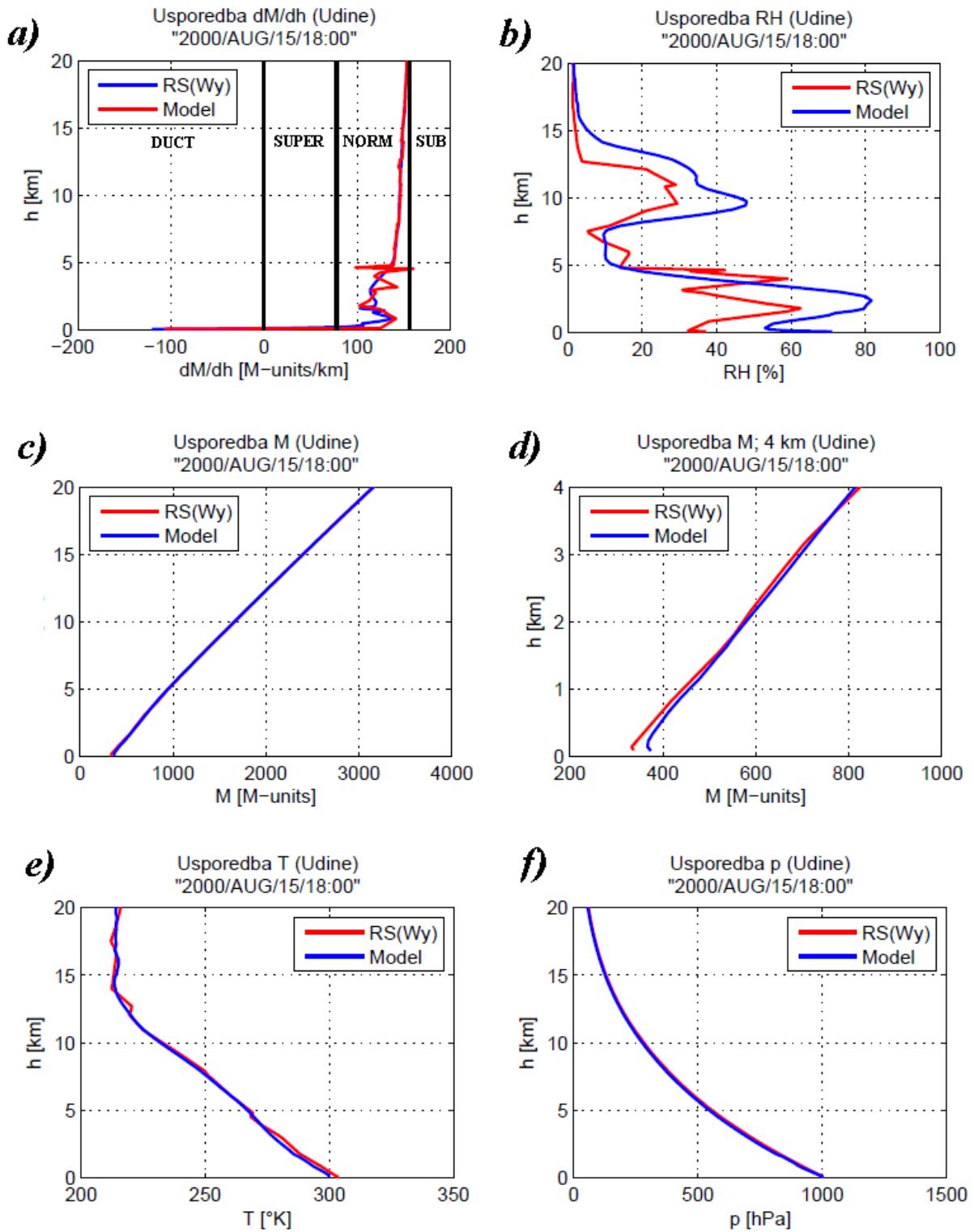
Pristranost modela u slučaju M -a uglavnom ima naglasak na podcjenjivanju opaženih vrijednosti. Modelska reprodukcija dM/dh u većini termina je zadovoljavajuća, korijen srednjeg kvadratnog odstupanja ($RMSE$) ne prelazi 50 M -jedinica/km, dok značajnije odskače (oko 100 M -jedinica/km) u četiri termina (sl. 22a). Rezultati dobiveni statističkom analizom prilično se dobro slažu s analizom koja je provedena na podacima prikupljenim u sklopu projekta *The Wallops-2000 Experiment* (Thompson i Haack, 2011.).

Odstupanja p , T i M -a su relativno mala, dok su odstupanja rh i dM/dh nešto veća, ali otprilike u intervalu pogrešaka koje su i ovdje navedene.

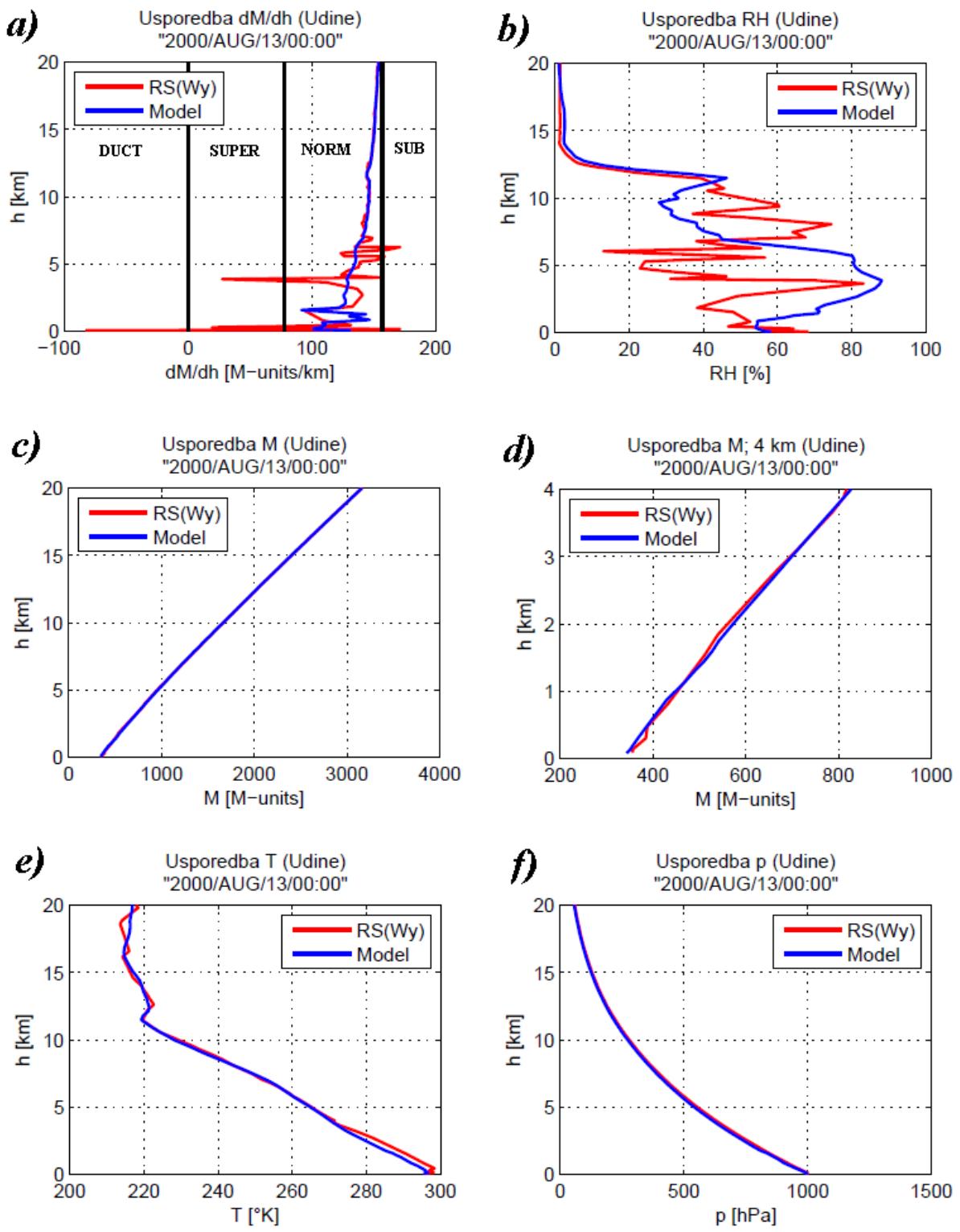
Za ovaj rad najzanimljivija je uspješnost reprodukcije pojave nestandardne refrakcije (dM/dh). Grafički prikaz vertikalnih raspodjela dM/dh temelji se na grupaciji vrijednosti dM/dh u četiri intervala, tj. četiri slučaja refrakcije radio valova (tab. 1) koji su na radiosondažama prikazani pomoću četiri intervala. Pokazalo se da model može uspješno simulirati pojave nestandardne refrakcije (sl. 23), iako često podcjenjuje njihov intenzitet (sl. 25c) te ne prognozira uvijek dobro njihovu visinu. Na slici 23 prikazana je situacija u kojoj su intenzitet i visina pojave radio kanala (sl. 23a) prilično dobro prognozirane. Uspješnost reprodukcije vertikalnog profila dM/dh i detektiranje pojave u našem slučaju najviše ovisi o reproduciranoj varijabilnosti relativne vlažnosti po visini, budući da su temperatura i tlak (sl. 23e i f) prilično dobro reproducirani. Ukoliko model dobro simulira vertikalnu promjenu relativne vlažnosti, tada je i vertikalni profil M -a točniji. Tada sadrži točniju informaciju o promjeni M s visinom, što je najvažnije za uspješnu detekciju pojave nestandardne refrakcije. Termin koji je prikazan pokazuje pojavu radio kanala u donjem dijelu AGS-a, kojeg slijedi standardna refrakcija radio valova kroz čitavu atmosferu.

Na slici 24 prikazan je termin u kojemu radiosondažni podaci ukazuju na veće odstupanje modela od mjerena. Model tada nije uspio reproducirati atmosferske uvjete u potpunosti. Radiosondažni podaci pokazuju sva četiri tipa refrakcije (evaporacijski radio kanal (94 m), superrefrakciju (305 m, 3.8 km), subrefrakciju (170 m, 5.5 km, 6.2 km) i standardnu refrakciju), dok se modelirani dM/dh kreće u granicama standardne refrakcije (sl. 24a). Glavni je razlog slaba reprodukcija varijabilnosti relativne vlažnosti po visini u modelu (sl. 24b) u odnosu na mjerena, što je u ovom slučaju rezultiralo slabom prognozom pojave.

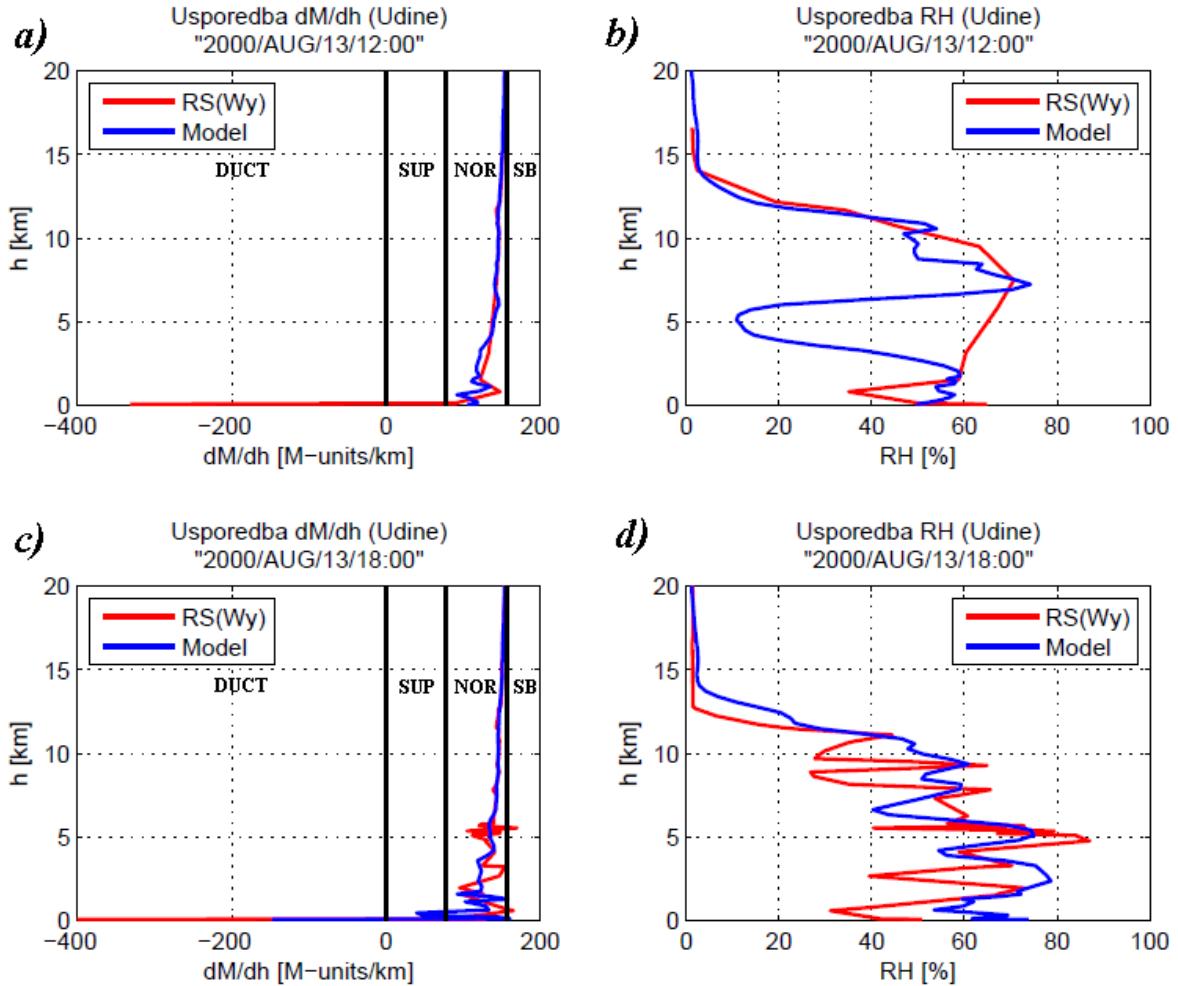
U nastavku grafički su prikazani i analizirani vertikalni profili dM/dh i relativne vlažnosti (Udine) u terminima u kojima se pojavljuju konvekcija, bura, smorac i kopnenjak. Konvektivna aktivnost u promatranoj domeni, prema satelitskim snimkama (sl. 15), doseže svoj maksimum u ranim poslijepodnevnim satima, dok se taj maksimum u modelu pojavljuje nešto kasnije. U 12 UTC (sl. 25a i b) model značajno podcjenjuje relativnu vlažnost na visini oko 5 km i ne uspijeva detektirati pojavu evaporacijskog radio kanala dok je u 18 UTC (sl. 25d) unutar prvih 5 km visine relativna vlažnost blago precijenjena. Dosta vjeran profil rh reproducirao je pojavu evaporacijskog radio kanala i superrefrakcije u AGS-u.



Slika 23: Vertikalni profili (a) dM/dh , (b) relativne vlažnosti (%), (c) M , (d) M do visine 4 km, (e) temperature (K), (f) tlaka (hPa) za Udine, 15. 08. 2000. u 18 UTC

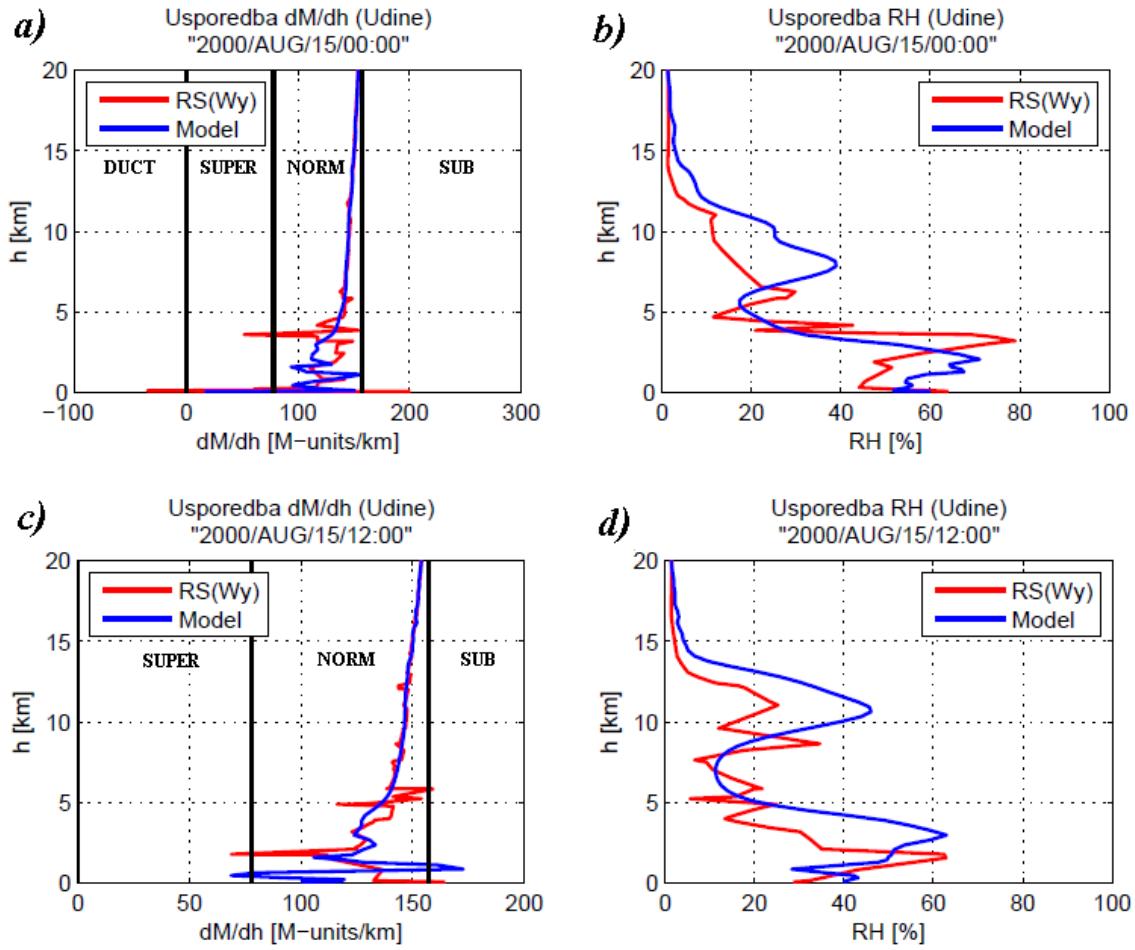


Slika 24: Vertikalni profili (a) dM/dh , (b) relativne vlažnosti (%), (c) M , (d) M do visine 4 km, (e) temperature (K), (f) tlaka (hPa) za Udine, 13. 08. 2000. u 00 UTC



Slika 25: Vertikalni profili dM/dh (a, c) i relativne vlažnosti [%] (b, d) za 13. 08. 2000. u 12 UTC (a, b) i 18 UTC (c, d)

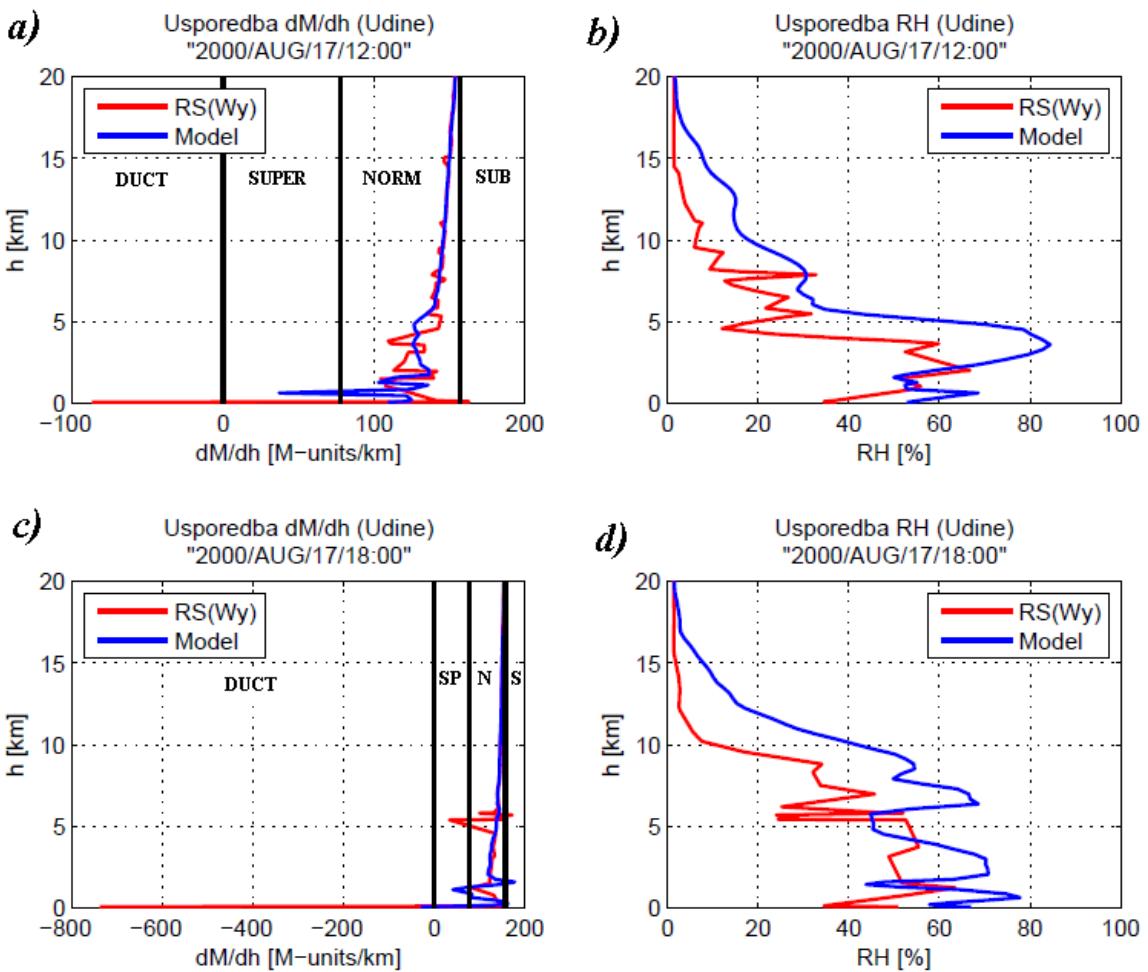
Prognoza relativne vlažnosti i pojava refrakcije za razdoblje od 14. do 16. kolovoza unutar kojeg je zabilježena epizoda bure je prilično dobra, što se može vidjeti na slikama 23 i 26. Uspješnost prognoze nam potvrđuju i statistički parametri ($RMSE$ i MAE) koji pokazuju relativno mala odstupanja dM/dh u tom razdoblju (sl. 22a). U ranim poslijepodnevnim satima 15. kolovoza bure doseže maksimum intenziteta, a vrijednost relativne vlažnosti unutar prvog kilometra visine (sl. 26b) kreće se oko 40% (mjerena oko 30%), što je najvjerojatnije utjecaj bure koja uglavnom donosi suh i vlagom nezasićen zrak. Pojave nestandardne refrakcije uglavnom su detektirane, iako je intenzitet podcijenjen. U slučaju 15. kolovoza u 00 UTC (sl. 26a) radiosondaža pokazuje površinsku subrefrakciju i površinski radio kanal (140 m) dok model na tim visinama podcjenjuje intenzitet i detektira standardnu i superrefrakciju. U 12 UTC (sl. 26b) pojave super i subrefrakcije su uspješno prognozirane, iako na netočnim visinama.



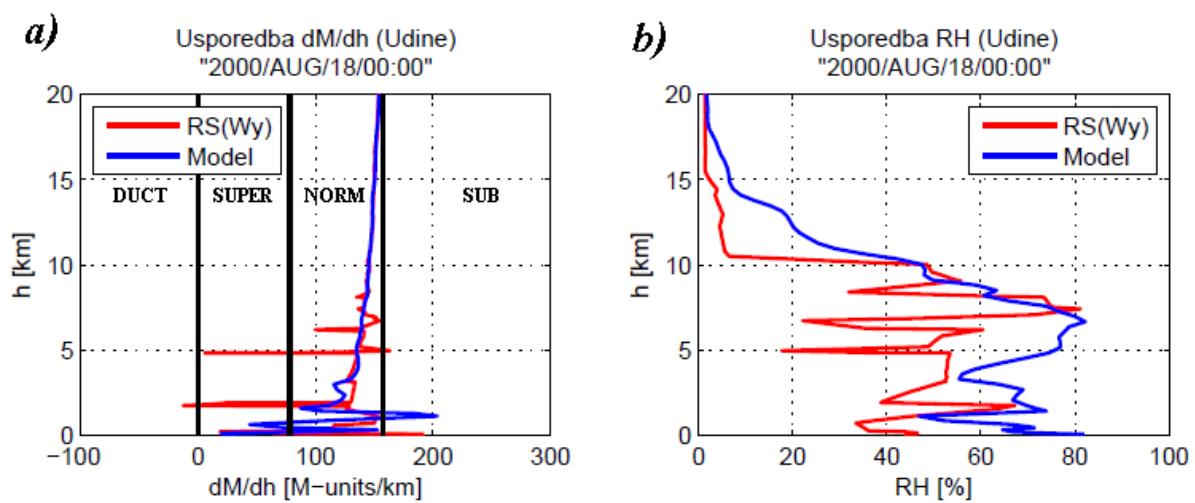
Slika 26: Vertikalni profili dM/dh (a, c) i relativne vlažnosti [%] (b, d) za 15. 08. 2000. u 00 UTC (a, b) i 12 UTC (c, d)

Na slici 27 prikazani su vertikalni profili relativne vlažnosti i dM/dh 17. kolovoza u 12 UTC i 18 UTC (nad zapadnim dijelom Istre dobro razvijen smorac). U oba termina model je unatoč dobroj reprodukciji polja strujanja imao poteškoće u prognoziranju promjene intenziteta relativne vlažnosti s visinom, što se naravno odražava i na modelsku detekciju pojave nestandardne refrakcije. U 12 UTC 17. kolovoza model daje pojavu superrefrakcije na nešto većoj visini umjesto površinskog evaporacijskog radio kanala na 94 m nadmorske visine koju pokazuju mjerena (sl. 27a). U 18 UTC model dobro prognozirao pojavu površinskog evaporacijskog radio kanala ipak slabijeg intenziteta (sl. 27c), što se vidi i na slici 22a kao značajnije odstupanje (RMSE i MAE). Slično ponašanje u smislu podcjenjivanja intenziteta same pojave (ali ne nužno i detekcije pojave) prisutno je i u ostala četiri ekstremna odstupanja (npr. RMSE) na slici 22a.

U noćnim satima 18. kolovoza nad Istrom puše lagani kopnenjak, a na istočnoj obali Jadrana javlja se strujanje s mora na kopno (u dolini rijeke Po). Raspodjele relativne vlažnosti i dM/dh 18. kolovoza u 00 UTC prikazane su na slici 28. U tom terminu relativna vlažnost uglavnom je precijenjena, ali u prva 2 km visine je pogodena njezina varijabilnost, pa je unutar tog sloja i prognoza površinske superrefrakcije uspješna. Međutim, model ne uspijeva reproducirati pojave povišenog radio kanala na visini od 1.7 km i superrefrakcije na 4.8 km.



Slika 27: Vertikalni profili dM/dh (a, c) i relativne vlažnosti [%] (b, d) za 17. 08. 2000. u 12 UTC (a, b) i 18 UTC (c, d)



Slika 28: Vertikalni profili dM/dh (a) i relativne vlažnosti [%] (b); 18. 08. 2000. u 00 UTC

Na temelju ove usporedbe modeliranih i mjereneih podataka, možemo zaključiti da se numerički model WRF može koristiti u svrhu prognoziranja pojave nestandardne refrakcije radio valova. Iako su tlak i temperatura uglavnom dobro reproducirani, temperatura ukazuje na nešto "hladnije" uvjete u modelu, te najčešće na precjenjivanje relativne vlažnosti. Odstupanja modela moguća su zbog izglađene topografije modela, odabira shema u modelu (osobito *MYJ AGS* shema) te nedovoljne, ali i matematički određene vertikalne rezolucije. Unatoč brojnim vertikalnim nivoima, model nije u mogućnosti reproducirati sve mjerene značajne nivoe, pa time ni vjeran profil rh o kojem najviše ovisi dM/dh , odnosno tip nestandardne refrakcije. Rezultati do 2.5 km visine, dakle površinske pojave, relativno su dobro prognozirane. Nestandardna refrakcija na većim visinama, poput visinskih (povišenih) radio kanala, prognozirana je nešto lošije. Uvezvi u obzir ograničenja modela i rezultate statističke analize M vrijednosti za Udine (ovdje pokazane) i San Pietro u cjelini, koji pokazuju odstupanja slična onima koja se navode u drugim radovima srodne problematike, možemo reći da su rezultati numeričke simulacije zadovoljavajući.

4.2. Prostorna raspodjela (ne)standardne refrakcije radio valova

Drugi dio rezultata sadrži grafičke prikaze prostornih (horizontalnih i vertikalnih) raspodjela modeliranog dM/dh u terminima od interesa i analizu tih prikaza u smislu detekcije pojava i usporedbe s modeliranim meteorološkim poljima. Grafički prikaz temelji se na grupaciji vrijednosti dM/dh u četiri intervala gdje su radio kanali prikazani plavom, superrefrakcija žutom, normalna refrakcija sivom i subrefrakcija crvenom bojom. Termin, položaj i visina horizontalnih i vertikalnih profila dM/dh odabrani su na temelju prizemnih horizontalnih profila strujanja i potencijalne temperature koji ukazuju na prisustvo nekog od navedenih mezoskalnih procesa. Horizontalni i vertikalni profili su grupirani u dvije kategorije. Prva grupa prikazuje dM/dh dok druga prikazuje meteorološka polja modeliranog strujanja zraka (vektori), potencijalnu temperaturu (izolinije) i omjer miješanja vodene pare (boje). Sve prikazane horizontalne raspodjele prikazuju prostor cijele domene, a ne samo područje interesa.

4.2.1. Konvektivna aktivnost u području domene (13. kolovoza 2000.)

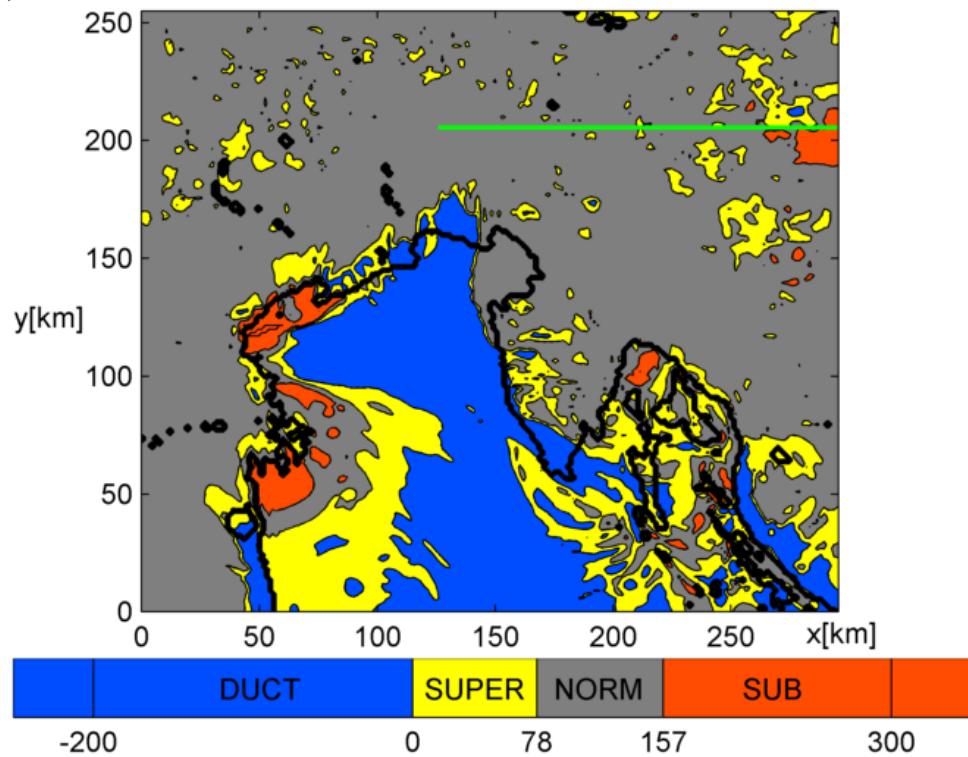
Modelirana konvektivna aktivnost 13. kolovoza unutar promatrane domene najbolje se uočava na sjeveroistočnom dijelu domene. Od 11 do 18 UTC, u prizemnim horizontalnim poljima strujanja i temperature konvektivna se aktivnost uočava kao divergencija ili konvergencija strujanja zraka (ovisno o stadiju razvoja) i prizemnim bazenima hladnijeg zraka (slike 14b i 30a).

Horizontalna raspodjela dM/dh računala se za sve vertikalne nivoe, a fokus je bio na šest nivoa iznad tla ($z1 = 30$ m, $z2 = 100$ m, $z3 = 200$ m, $z4 = 330$ m, $z8 = 1150$ m, $z11 = 1600$ m). Do visine ($z11$), sve horizontalne distribucije od 14 do 18 UTC ukazale su na pojave radio kanala, superrefrakcije i subrefrakcije ($z2$ na sl. 29). Prema horizontalnoj raspodjeli dominacija nestandardne refrakcije je nad morem, a tek manji dio nad kopnom. Na otprilike 100 m iznad površine, morska površina je uglavnom pokrivena radio kanalima i superrefrakcijom. Pojava subrefrakcije prati obalnu liniju s talijanske strane Jadrana. Nad hrvatskom obalom Jadrana (Kvarnerom) nepravilno se izmjenjuju radio kanali i supererfrakcije uz dominaciju radio kanala iznad vrha Istre i duž uzlaznih padina Velebita. Iznad kopna prevladava standardna refrakcija, osim u sjeveroistočnom dijelu domene koji je pod utjecajem konvekcije. U tom dijelu je uočen razvoj nekoliko konvektivnih ćelija (eng. *updrafta*) s maksimumom intenziteta na visinama do 6.5 km u 14 i 15 UTC ovisno o ćeliji, nakon čega intenzitet konvekcije opada.

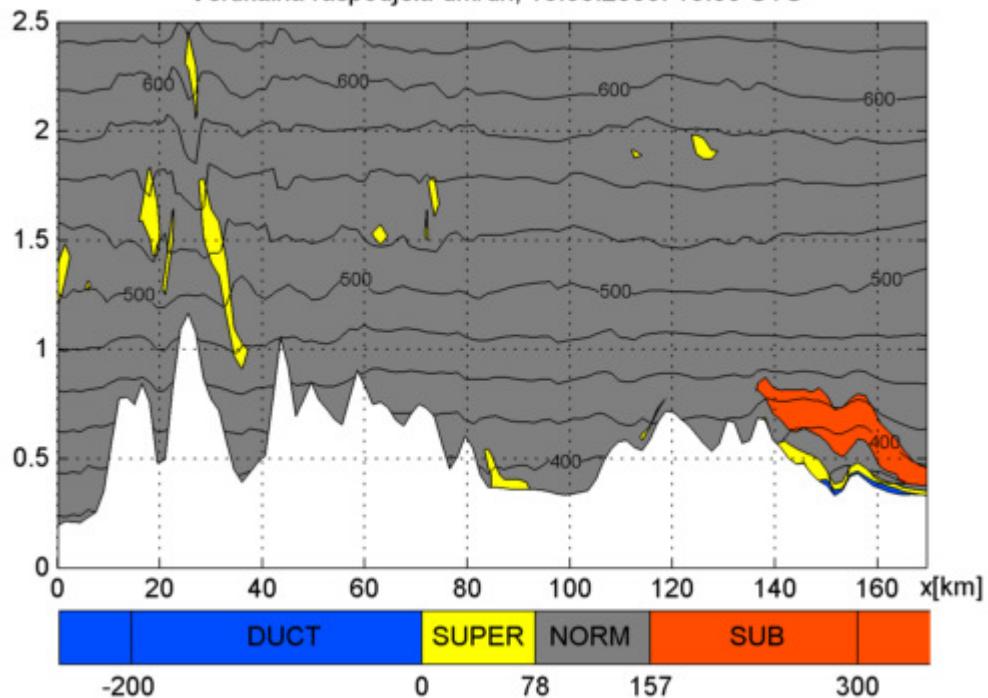
Vertikalni profil na sl. 29b (zelena linija na slici 29a, smjer zapad - istok) pokazuje kako se izmjenjuju tipovi nestandardne refrakcije po visini, uzrokovani konvektivnom aktivnošću. Na visinama od 1.5 do 2.5 km, vertikalni profili dM/dh kroz cijeli promatrani period (od 11 do 18 UTC) unutar konvektivnog dizanja zraka (iznad Julijskih Alpa, lijeva strana presjeka) ukazuju na pojavu superrefrakcije. Nad Slovenijom i sjeverozapadnim dijelom Hrvatske pojavljaju se visinske superrefrakcije, ali i subrefrakcije na visini između 0.5 i 1 km (sjeveroistočni dio domene na sl. 29a, i desna strana na sl. 29b). Pojava subrefrakcije na tom području uzrokovana je vertikalnom promjenom omjera miješanja vodene pare (sl. 30b), gdje zasićenje zraka vodenom parom raste od tla (oko 7 g/kg) prema visini od oko 1.5 km (11 g/kg), nakon čega opada s visinom. Nad istim područjem primjećuje se silazno strujanje hladnjeg, ali i sušeg zraka ispod oblaka (eng. *downdraft*) koji se nalazi u svojoj završnoj fazi, što je uzrok tog neuobičajenog gradijenta omjera miješanja. Ispod subrefrakcije, u prvih 200-njak metara prema tlu, mijenja se predznak dM/dh . Intenzitet nestandardne refrakcije se pojačava tako da prelazi iz superrefrakcije u evaporacijski radio kanal. Relativno hladan zrak (za oko 5°C hladniji od okolnog, sl. 30) koji se širi ispod baze olujnih oblaka stvara temperaturnu inverziju i promjenu vlažnosti po visini. U ostalim dijelovima domene spomenutog gradijenta nema, maksimum omjera miješanja je pri tlu i postepeno pada s visinom.

Iako je pojava nestandardne refrakcije već uočena kod pojave fronte udara vjetra povezana sa silaznim strujanjem *downdrafta*, Park i Fabry (2011.) ističu da su to tipični uvjeti za nastanak superrefrakcije, a Skolnik (1980.) da je *downdraft* povezan s radio kanalima i kao takvi mogu biti dobar detektor oluja. Ovdje se konačni zaključak ponešto razlikuje, jer se tijekom životnog vijeka konvektivnog oblaka pojavljuje i sloj sa subrefrakcijom.

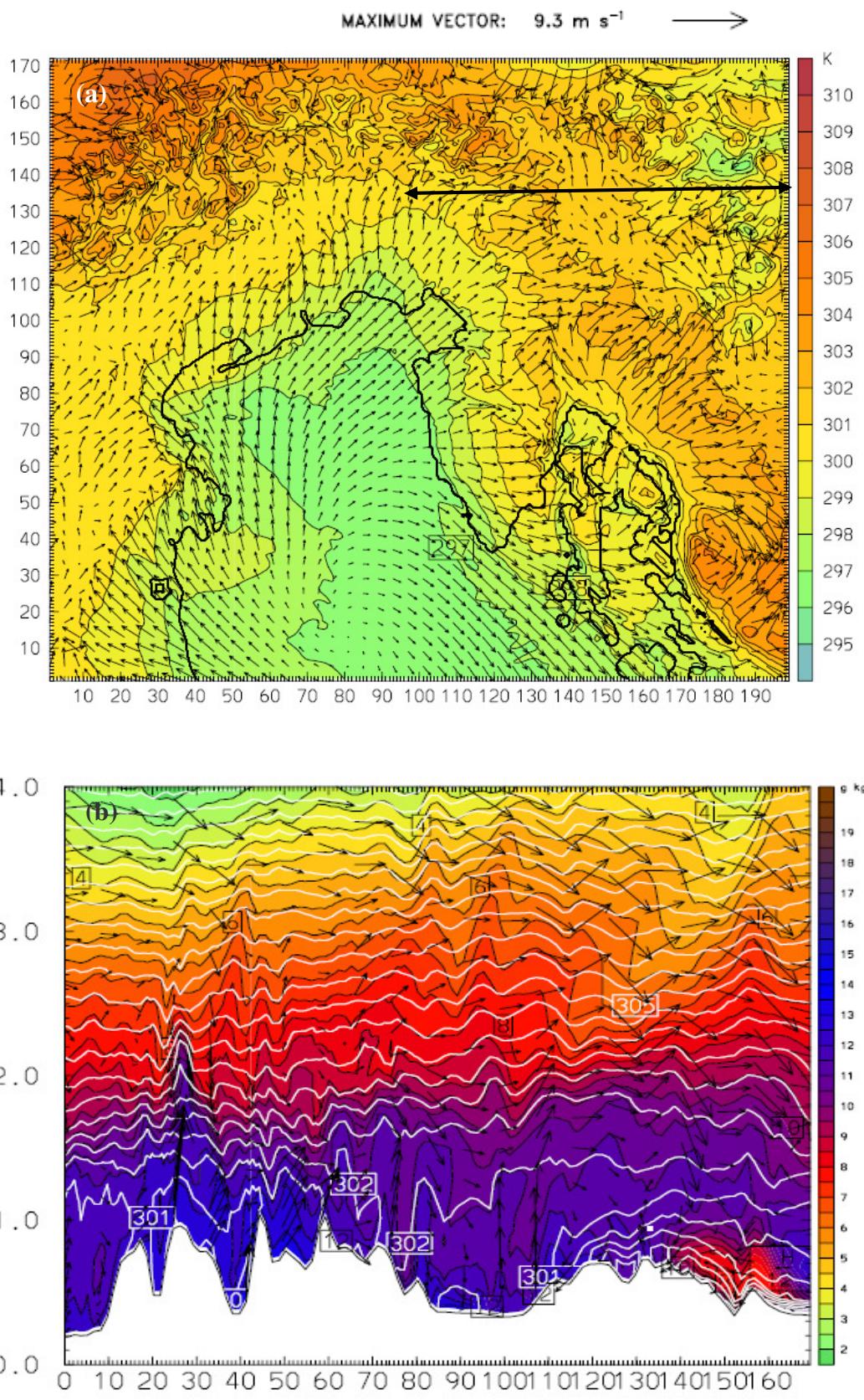
(a) Horizontalna raspodjela dM/dh ($z=02$); 13.08.2000. 16:00 UTC



(b) h [km] Vertikalna raspodjela dM/dh ; 13.08.2000. 16:00 UTC



Slika 29: (a) Horizontalna raspodjela modeliranog dM/dh (vertikalni nivo $z = 2$), 13. kolovoza 2000. u 16 UTC. Zelena linija označava područje odabranog vertikalnog profila na (b).



Slika 30: Raspodjela modeliranih meteoroloških polja strujanja zraka za 13. kolovoza 2000. u 16 UTC (=17 SEV). **(a)** Horizontalna raspodjela potencijalne temperature (K) i polja strujanja (m s^{-1}) na istom nivou kao i na sl. 29a i **(b)** vertikalna raspodjela potencijalne temperature (bijele izolinije) i omjera miješanja vodene pare (obojane konture) i vektori vjetra.

Vertikalni presjek odgovara crnoj liniji na (a) i zelenoj na sl. 29a.

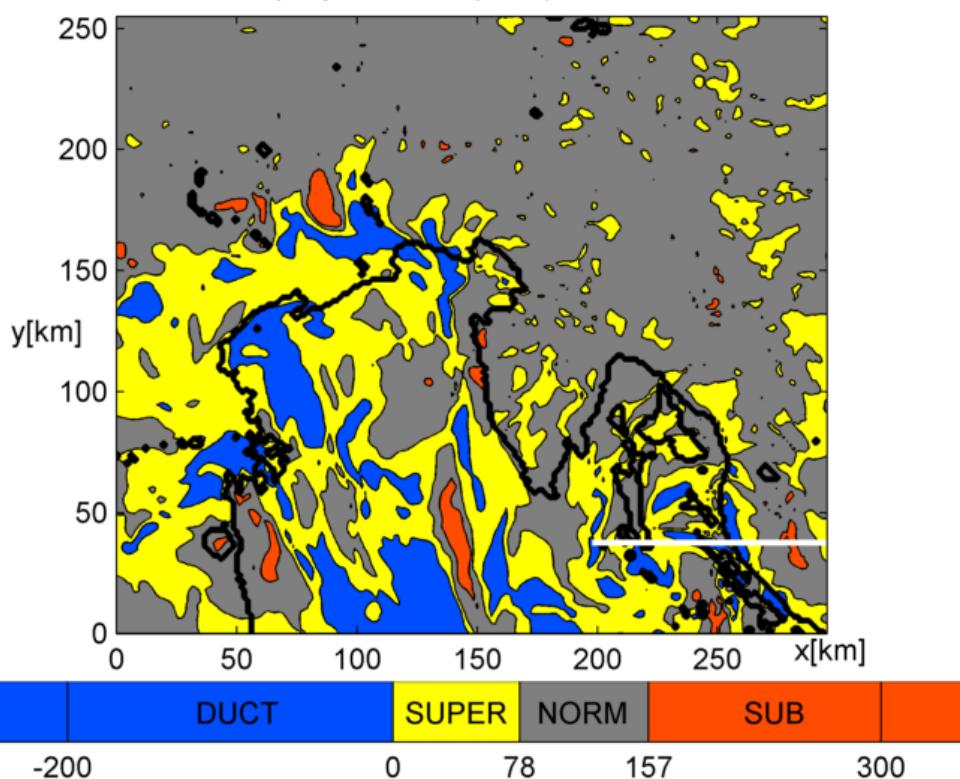
4.2.2. Bura u području domene (14.-15. kolovoza 2000.)

Modelirana bura u periodu od 14. kolovoza u 21 UTC do 15. kolovoza u 22 UTC dobro se uočava u polju strujanja zraka na sjeveroistočnoj obali Jadrana (Velebit, Senj) i Tršćanskom zaljevu (sl. 18a i c). U noćnim satima s 14. na 15. kolovoza maksimumi strujanja zraka pojavljuju se na sjeveroistočnoj obali Jadrana u području Sj. Velebita, dok je strujanje nad Tršćanskim zaljevom u tom periodu slabije. U jutarnjim satima 15. kolovoza bura slabiti u popodnevni satima ponovo jača, s maksimumom u ranim poslijepodnevni satima. S ponovnim jačanjem bure moguće je uočiti snažnije strujanje i nad Tršćanskim zaljevom do kraja promatranog razdoblja (sl. 18c). Horizontalne i vertikalne raspodjele dM/dh su računate i prikazane na isti način kao i za konvekciju i ostale promatrane mezoskalne procese u nastavku teksta. Naglasak vertikalnih profila je na području Senja, Sj. Velebita i Tršćanskog zaljeva gdje se vide maksimumi strujanja zraka unutar mlazova bure. Iako su napravljena četiri profila za područje sjeveroistočne obale Jadrana i tri profila za područje Tršćanskog zaljeva, ovdje je prikazan po jedan za svako područje budući da pokazuju slično ponašanje u smislu detekcije anaprop pojave.

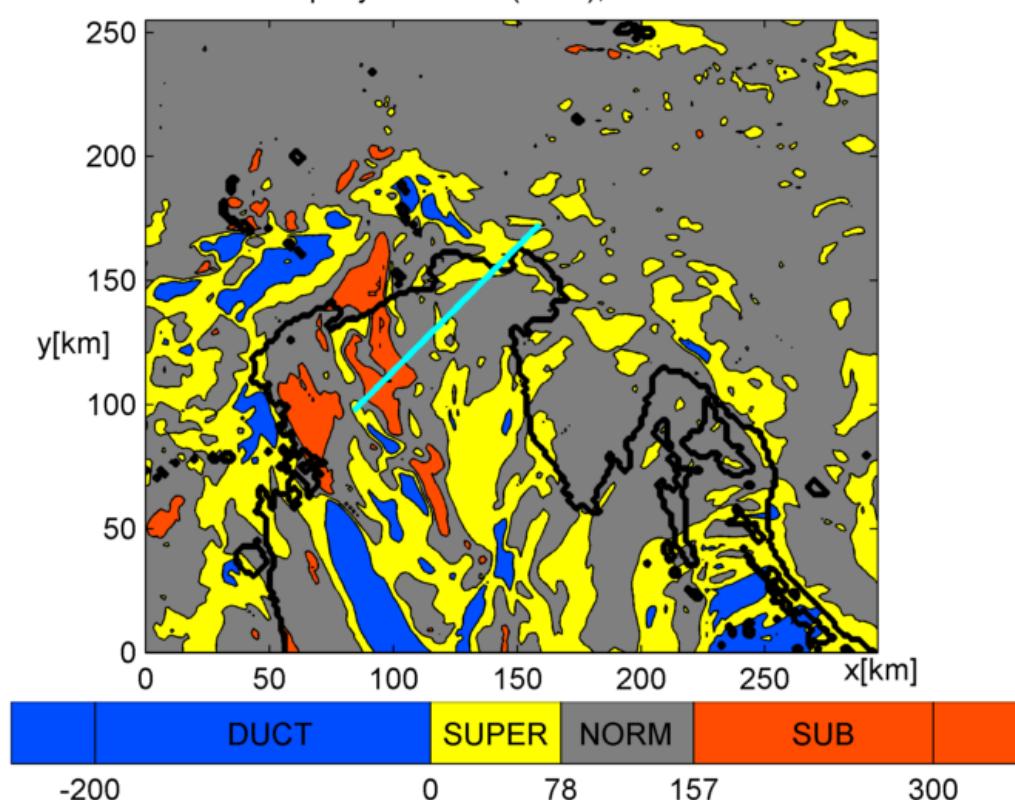
Svih šest nivoa horizontalnih profila dM/dh detektiraju sve četiri pojave s dominantnom pojavom standardne refrakcije nad kopnjom te evaporacijskih površinskih radio kanala i superrefrakcije nad morem (npr. sl. 31). Osim nad morem, površinski radio kanali prisutni su i uz šire obalno područje sjeveroistočne Italije (nad kopnjom i nad morem) i manjim dijelom uz zapadnu obalu Istre i podno Velebita. Superrefrakcija je prisutna i nad kopnjom i nad morem, međutim treba napomenuti da je gotovo stalno prisutna oko promatranih područja gdje bure pokazuje maksimum intenziteta, posebice nad Velebitom, njegovim zaleđem te uzlaznim i silaznim padinama i podvelebitskim akvatorijem. Subrefrakcija se pojavljuje uglavnom nad morem u Tršćanskem zaljevu, uz zapadnu obalu Istre, i nad otvorenim morem jugozapadno od vrha Istre, ali pojavljuje se i nad kopnjom, npr. sjeverno od delte rijeke Po na visini od oko 1 km. Nad širim područjem delte rijeke Po na visini od oko 1 km u periodu od 11 do 19 UTC 15. kolovoza pojavljuje se i područje s povišenim radio kanalom (eng. *elevated duct*).

Na slici 31 prikazane su horizontalne raspodjele dM/dh na nivou (z2, oko 60 m) 14. kolovoza u 22 UTC i 15. kolovoza u 20 UTC s označenim vertikalnim profilima u području Velebita (sl. 31a) i Tršćanskog zaljeva (sl. 31b). U slučaju 14. kolovoza u 22 UTC uglavnom se uočavaju pojave superrefrakcije i radio kanala na oba područja interesa. Prisutna su i manja područja površinske subrefrakcije u zaleđu Velebita, nad kopnjom sjeverno od Tršćanskog zaljeva te na još nekim područjima koja nisu bitna za analizu bure. Na slici 31b (15. kolovoza u 20 UTC) u Tršćanskem zaljevu vide se područja subrefrakcije i superrefrakcije, a u području Velebita s pripadnim akvatorijem (otoci Rab i Pag) dominiraju pojave superrefrakcije i radio kanala.

(a) Horizontalna raspodjela dM/dh ($z=02$); 14.08.2000. 22:00 UTC



(b) Horizontalna raspodjela dM/dh ($z=02$); 15.08.2000. 20:00 UTC

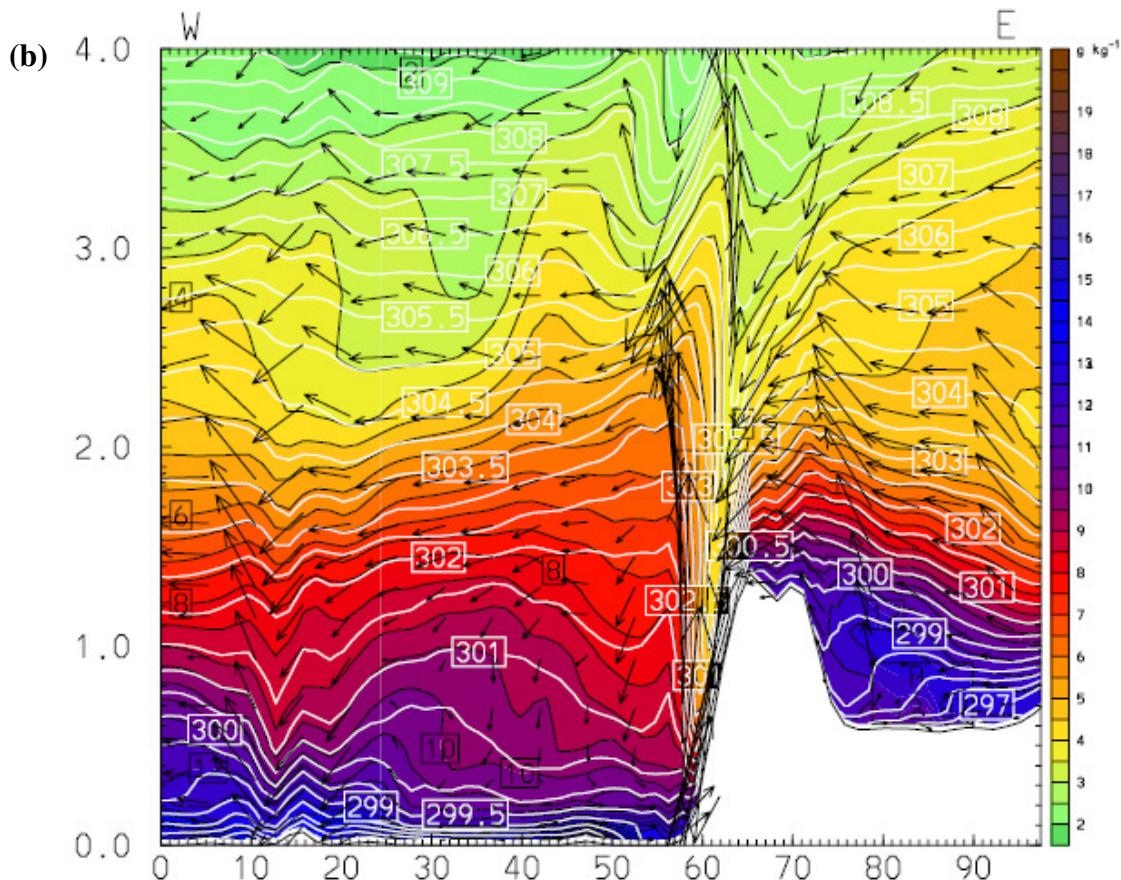
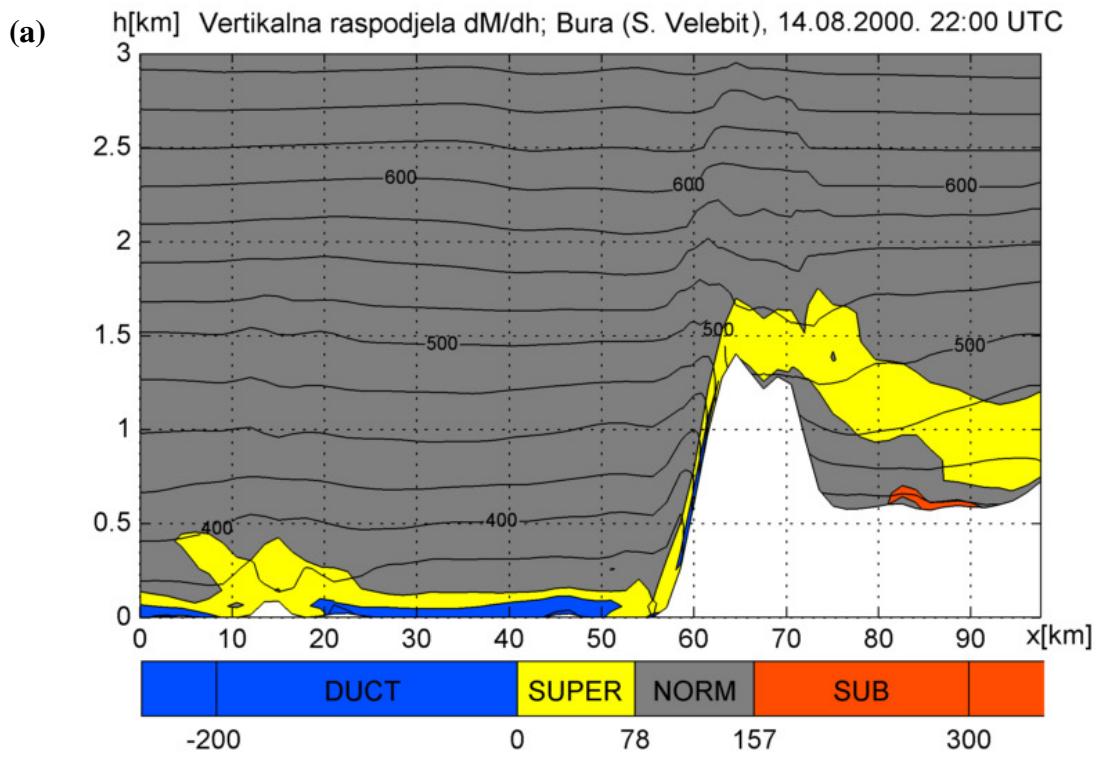


Slika 31: Horizontalna raspodjela modeliranog dM/dh (vertikalni nivo $z = 2$, oko 60 m), (a) 14. kolovoza 2000. u 22 UTC, (b) 15. kolovoza u 20 UTC; bijela i plava linija označavaju položaj pripadnih vertikalnih profila na slikama 32 i 33.

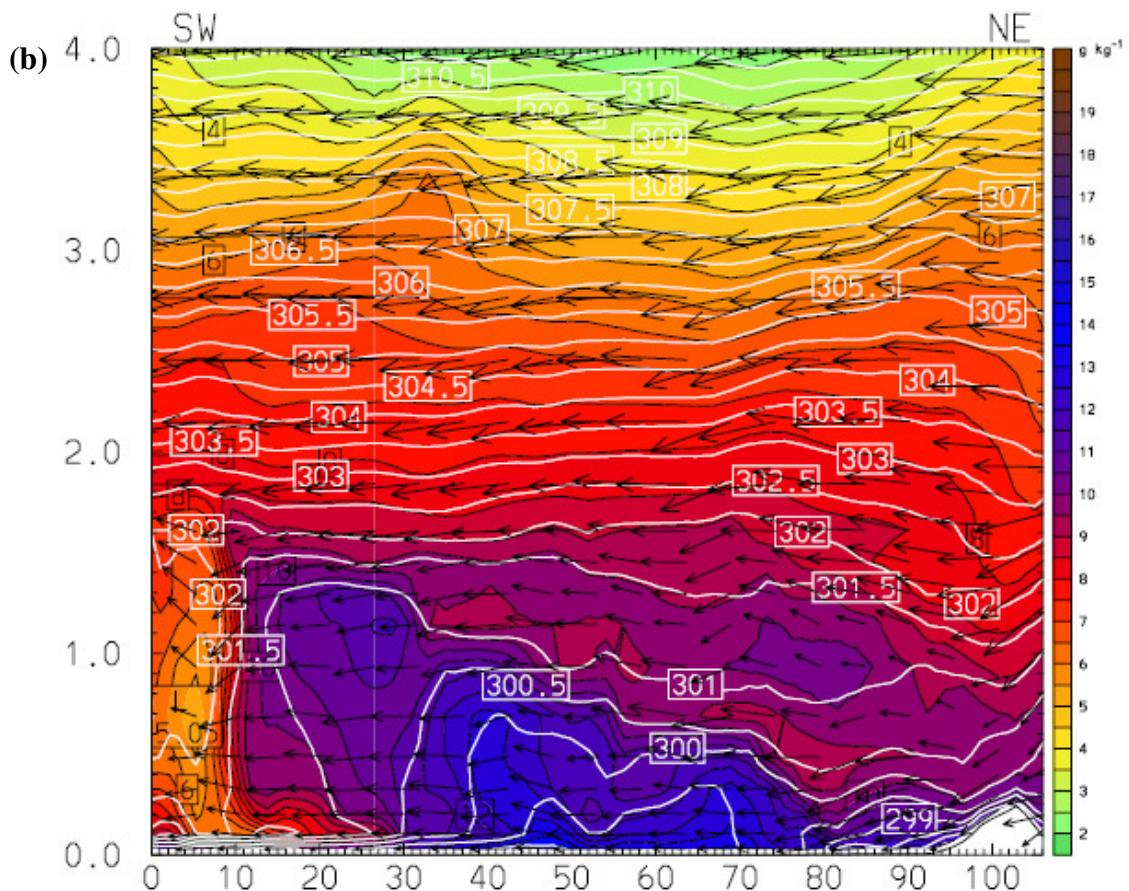
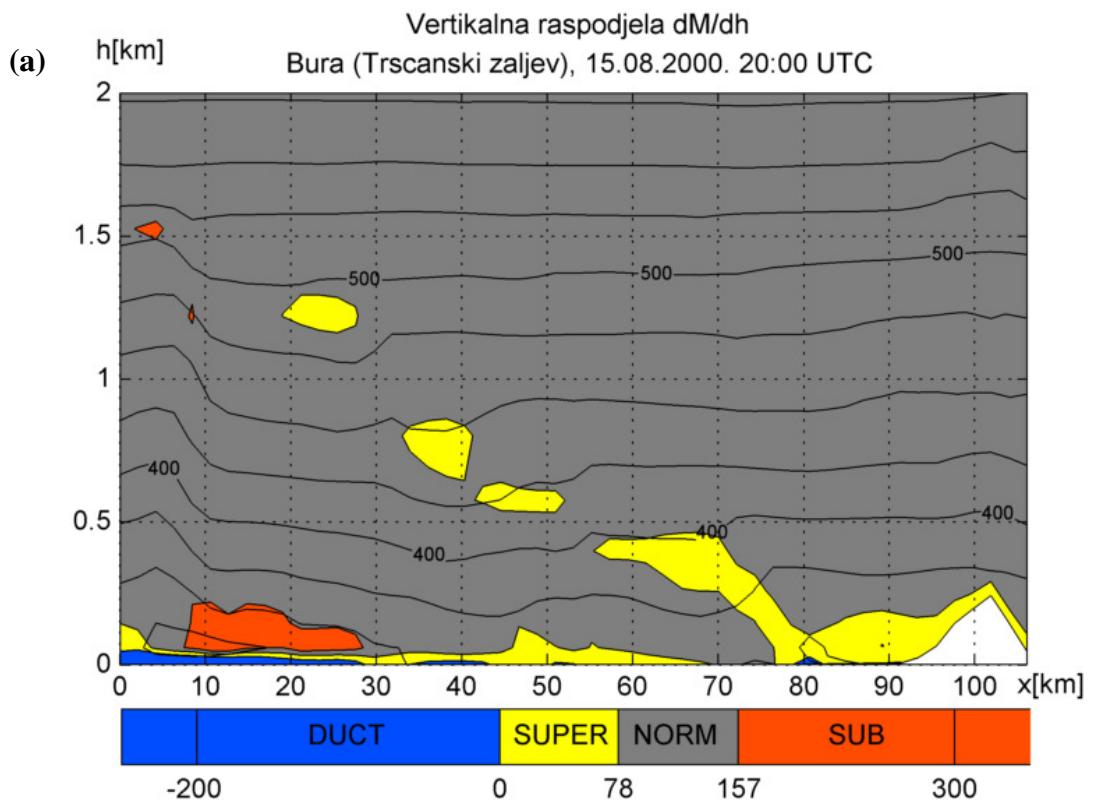
Vertikalni profili dM/dh s pripadnim profilima meteoroloških polja strujanja vjetra, potencijalne temperature i omjera miješanja vodene pare u zanimljivim terminima prikazani su na slikama 32 i 33.

Prvi profil (Cres – Pag – Sjeverni Velebit, sl. 32) prikazuje situaciju 14. kolovoza u 22 UTC gdje je moguće vidjeti pojas superrefrakcije neposredno nad Velebitom i njegovim zaleđem na nadmorskoj visini između 700 m i 1.5 km. Područje superrefrakcije posljedica je većeg gradijenta temperature i vlažnosti nastalih prije hidrauličkog skoka ($Fr \sim 0.9$ na navjetrinskoj strani, $Fr \sim 1.4$ na zavjetrinskoj strani). U zaleđu, pri površini je uočljivo manje područje subrefrakcije, što je posljedica prizemnog sloja u kojem omjer miješanja raste s visinom (sl. 32b, navjetrina planine). Porast vlažnosti s visinom nastaje zbog formiranja manjeg ciklonalnog vrtloga promjera 10-15 km u prvih 500 m atmosfere. Nastanak vrtloga povezan je s blokirajućim efektom planine na smjer (sjeveroistočnog) strujanja. S obzirom da je fokus istraživanja bure obično povezan sa zavjetrinom, a ne navjetrinom, na temelju ove simulacije teško je procijeniti (prema postojećoj literaturi) radi li se o tipičnoj ili atipičnoj sub-mezostrukturi. Duž zavjetrine, unutar hidrauličkog skoka i dalje prema otvorenom moru, dominiraju dva tipa anapropa: radio kanali i superrefrakcija. Interesantno je područje zavjetinske padine (i hidrauličkog skoka) na kojoj se može uočiti plitak sloj površinskog radio kanala i superrefrakcije izazvan snažnim gradijentom omjera miješanja (naglo pada od oko 12 do 5 g/kg) i potencijalne temperature (združeni utjecaj temperature i tlaka) u uskom pojasu dubokom oko 100 m uslijed dotoka hladnog i sušeg zraka. Nešto dublji sloj s pojavom nestandardne refrakcije javlja se u prvih 400 m (sa smanjenjem r_m od 15 do 10 g/kg i $\Delta\Theta \sim 5$ K) dalje prema otvorenom moru. Jaki intenzitet pojave potvrđuje i nagla promjena u polju M -a koje prikazuju označene crne izolinije (sl. 32a).

Drugi profil (Tršćanski zaljev) pokazuje situaciju 15. kolovoza u 20 UTC kad nad kopnom imamo pojavu superrefrakcije, a nad morem se pojavljuju sva četiri tipa refrakcije. Površinske evaporacijske radio kanale nad morem kao i superrefrakciju nad morem i kopnom uzrokuju jaki gradijenți r_m tj. naglo opadanje omjera miješanja i potencijalne temperature s visinom (sl. 33b). Superrefrakcija se pojavljuje pri površini iznad radio kanala, ali i samostalno na većim visinama do 1.2 km. Na desnoj, jugozapadnoj strani profila na visini od oko 50 m nalazi se područje na kojemu omjer miješanja s visinom raste (sl. 33b), prvo naglo, a zatim sporije do visine od oko 1.5 km. Na lokaciji naglijeg porasta omjera miješanja javlja se područje subrefrakcije (sl. 33a). Pojava subrefrakcije vezana je uz područje snižene relativne vlažnosti (na sl. 18d, $rh \sim 50\%$) koje odgovara rubnom dijelu mlaza bure. Burin mlaz zakreće duž Istre i ne dopire do zapadne talijanske obale čime se duž zone prijelaza miješa zrak različite vlažnosti. Sličnu je situaciju moguće uočiti i na samom rubu profila na visini od oko 1.5 km.



Slika 32: Vertikalni profili (bijela linija sl. 31a) (a) dM/dh , (b) meteorološka polja strujanja zraka, potencijalne temperature i omjera miješanja vodene pare; 14. kolovoza u 22 UTC. Maksimalne zabilježene vertikalne brzine su 3.2 m s^{-1} , a horizontalne 11.3 m s^{-1} .



Slika 33: Vertikalni profili (plava linija sl. 31b) (a) dM/dh , (b) meteorološka polja strujanja zraka, potencijalne temperature i omjera miješanja vodene pare; 15. kolovoza u 20 UTC

Treba naglasiti da je ovo prva analiza povezanosti anaprop pojave i bure, pa se dobiveni rezultati nisu mogli uspoređivati s već postojećima. Model je pokazao da postoji povezanost bure i nestandardne refrakcije kroz efekt advekcije hladnijeg i sušeg zraka unutar plitkog površinskog sloja koji obično stvara radio kanale i superrefrakciju. Nad kopnom je to unutar hidrauličkog skoka, a nad morem i otocima u nešto dubljem sloju. Pojava subrefrakcije je također prisutna kod bure; nad morem na rubovima mlazova bure gdje postoji lateralna izmjena zraka različite vlažnosti (zbog konvergencije strujanja i pojačanog vrtloženja zraka). Subrefrakciju je moguće uočiti i na navjetrinskoj strani planinskog lanca pri nailasku sjeveroistočnog strujanja gdje se mogu generirati lokalni vrtlozi koji utječu na profil vlažnosti. Unatoč navedenom, neka pitanja su i dalje otvorena pa je vezu između bure i anapropa potrebno i dalje istraživati.

4.2.3. Smorac/kopnenjak u području domene (17. -18. kolovoza 2000.)

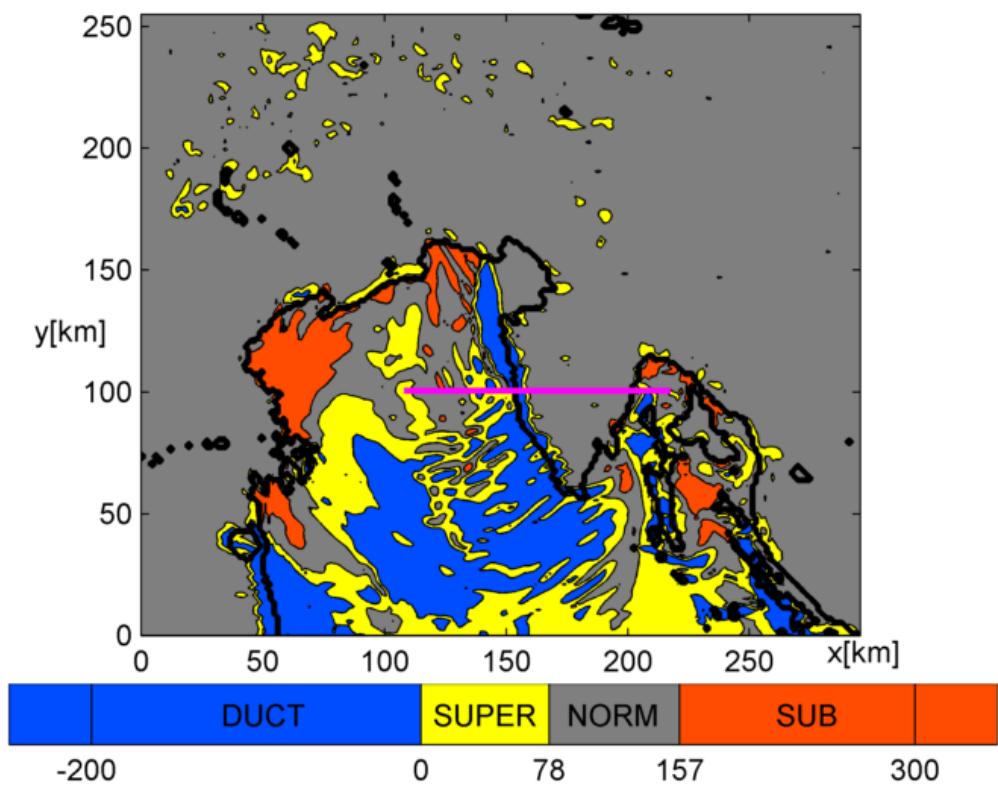
U periodu od 17. kolovoza u 8 UTC do 18. kolovoza u 5 UTC model je uspješno reproducirao pojavu smorca i kopnenjaka na zapadnoj obali Istre (sl. 20 i 21), što se može vidjeti u horizontalnom polju strujanja zraka nad tim područjem.

U jutarnjim satima 17. kolovoza na području duž zapadne obale Istre javlja se dominantan zapadni smorac s maksimumom u ranim poslijepodnevnim satima tog dana. Donja grana smorca pri maksimumu strujanja prodire duboko nad kopno Istarskog poluotoka. U kasnim poslijepodnevnim satima (17 UTC) zapadno strujanje slabi, a zatim okreće smjer prvo u sjeverozapadno i sjeverno te konačno u sjeveroistočno strujanje (kopnenjak). Perzistentno južno strujanje nad kopno sjeveroistočne Italije nosi vlažan morski zrak.

U skladu s atmosferskim uvjetima, horizontalna raspodjela dM/dh na šest visinskih nivoa tokom cijelog promatranog perioda detektira sva četiri tipa refrakcije, što je i vidljivo sa slika 34a i b u terminima zrele faze smorca (17. kolovoza 13 UTC, sl.34a) i kopnenjaka (18. kolovoza, sl. 34b) na 100 m iznad tla. Standardna refrakcija zapaža se uglavnom nad kopnom (danju), dok se nad morem i obalom uglavnom pojavljuju površinski radio kanali kao i površinska i visinska superrefrakcija (posebno uz obalna područja cijele domene). Subrefrakcija se pojavljuje uz zapadnu obalu Jadrana (šira okolica delte rijeke Po), u Tršćanskom zaljevu, uz zapadnu obalu i nad kopnom Istre, te manjim dijelom nad širim područjem Kvarnerskog zaljeva (npr. slika 34a). Manja nepravilno raspoređena područja prisutna su i nad ostatkom domene. Najveća područja obuhvaćena visinskim radio kanalima (oko 1 km visine, nije prikazano) pojavljuju se nad Istrom kao i nad njezinom zapadnom obalom, te sjeverno od Tršćanskog zaljeva, u terminima zrele faze smorca.

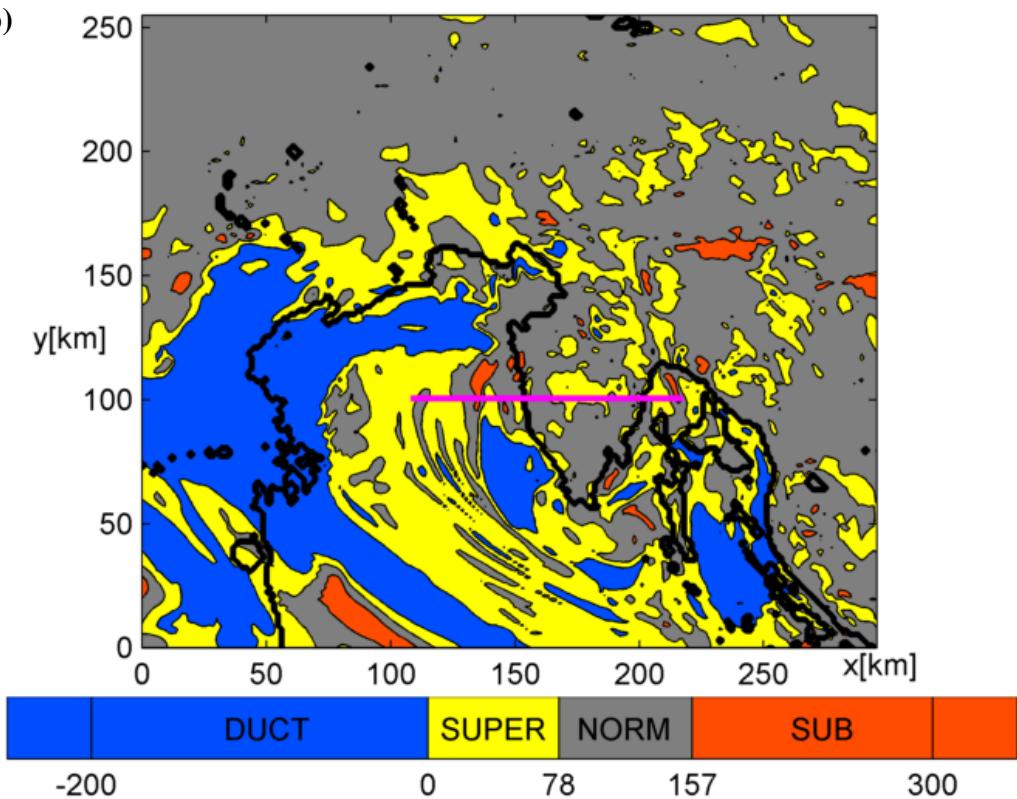
Zbog kontinuiranog južnog i jugozapadnog vjetra koji nosi vlažan morski zrak, nad kopnenim dijelom sjeverne Italije noću se uočavaju velika područja površinskih radio kanala i superrefrakcije (sl. 34b). Nepravilno raspoređena područja superrefrakcije i površinskih radio kanala mogu se uočiti i nad drugim kopnenim dijelovima domene, posebno nad njezinim sjevernim i sjeveroistočnim dijelom.

(a) Horizontalna raspodjela dM/dh ($z=02$); 17.08.1300. 13:00 UTC



Horizontalna raspodjela dM/dh ($z=02$); 18.08.0000. 00:00 UTC

(b)

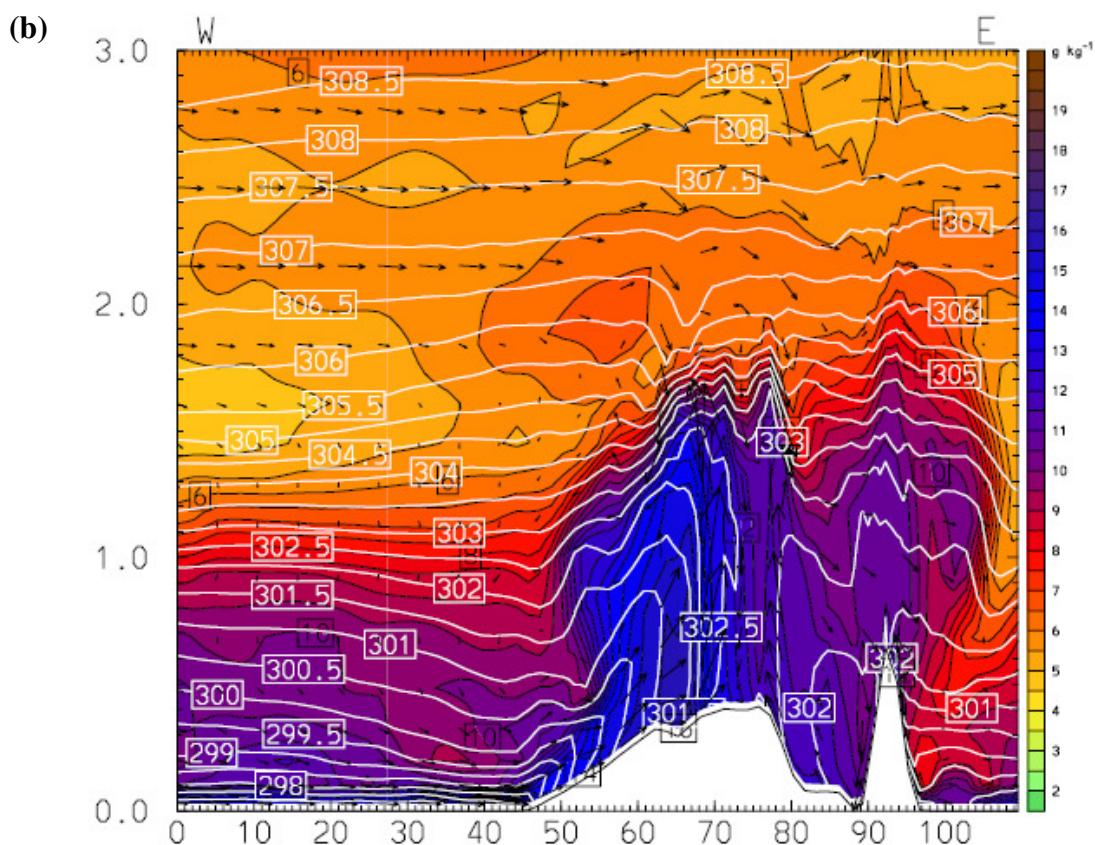
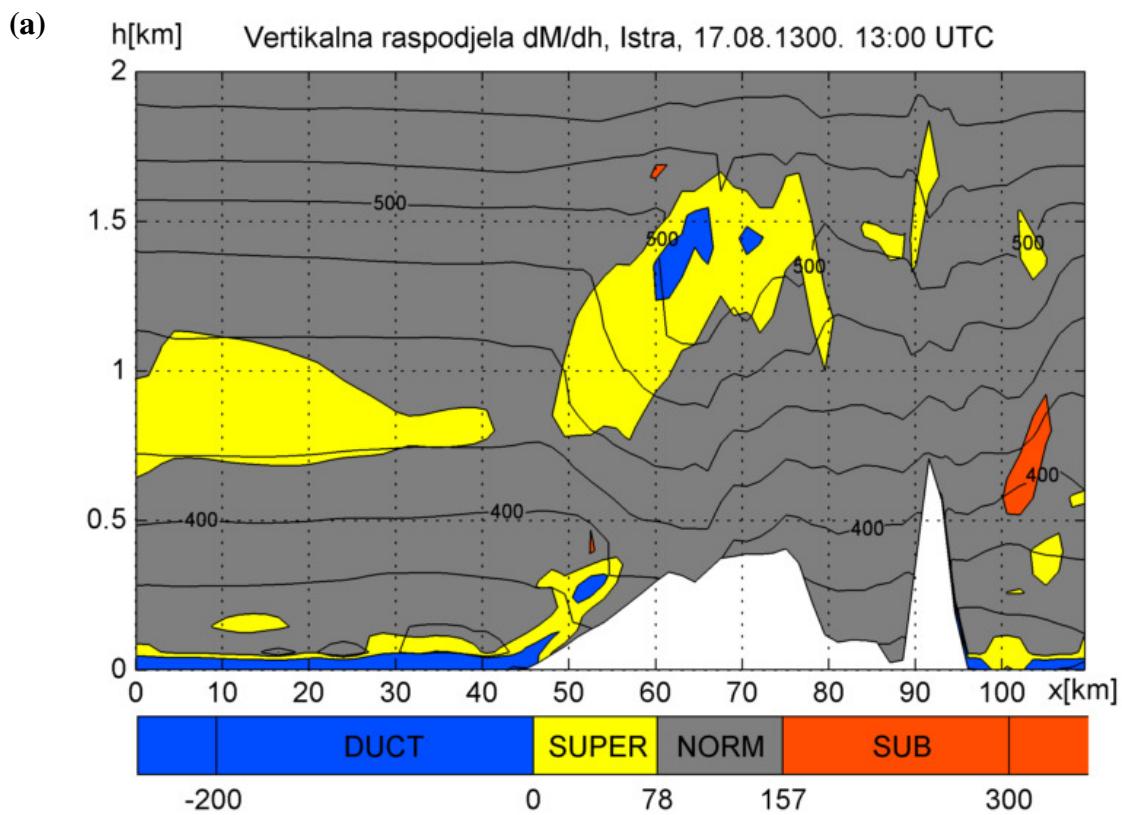


Slika 34: Horizontalna raspodjela modeliranog dM/dh (vertikalni nivo $z = 2$, oko 60 m), (a) 17. kolovoza 2000. u 13 UTC, (b) 18. kolovoza u 00 UTC; ljubičasta linija označava položaj vertikalnog profila na slikama 35, 36, 37 i 38

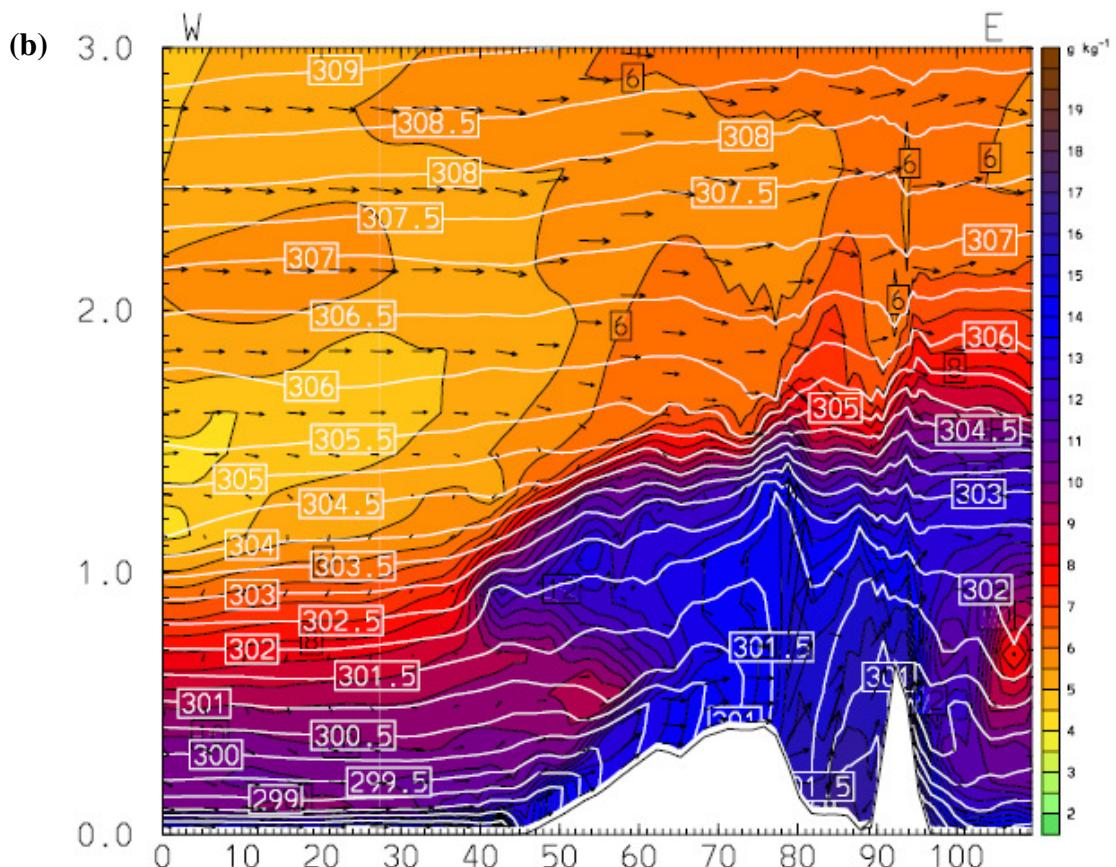
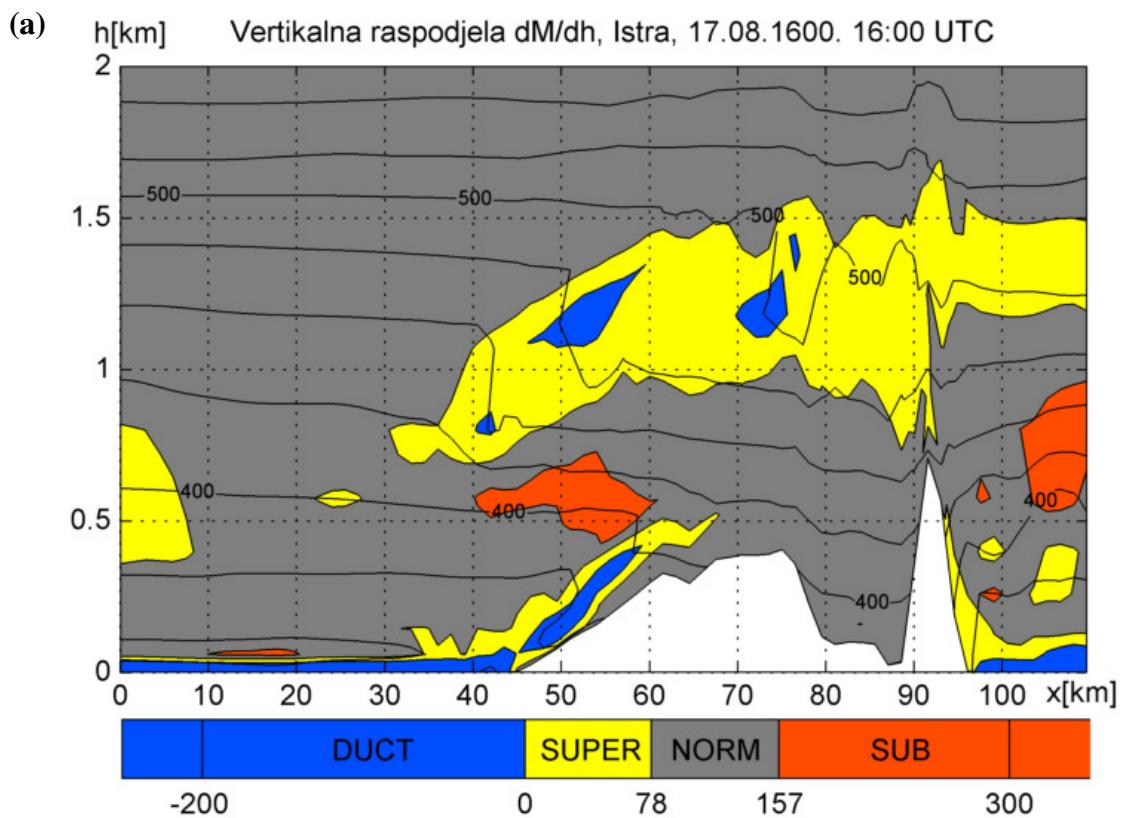
Vertikalni profil dM/dh s pripadajućim meteorološkim poljima strujanja zraka, potencijalne temperature i omjera miješanja vodene pare (ljubičasta linija na slici 34) obuhvaća područje središnje Istre te njezinu zapadnu i istočnu obalu (sjeverni Kvarner). Prikazana su četiri zanimljiva termina: dva dnevna termina u 13 i 16 UTC (sl. 35 i 36) 17. kolovoza, jedan prijelazni termin 20 UTC, 17. kolovoza (sl. 37) i noćni termin 18. kolovoza u 00 UTC (sl. 38).

Iz prvog profila (sl. 35) nad morem uz istočnu i zapadnu obalu Istre prisutan je sloj površinskog evaporacijskog radio kanala iznad kojeg se nalazi sloj superrefrakcije (na oko 100 m iznad nivoa mora). Unutar obalne cirkulacije, anaprop nad morem posljedica je advekcije zraka s kopna na more što stvara jake gradijente vlažnosti zraka, ali i temperature u prizemnom sloju nad vodenom površinom. Na zapadnom dijelu profila (desna strana), na visini od oko 700 m iznad mora, nalazi se 40 km dug pojas superrefrakcije širok oko 300 m također uzrokovani jačim opadanjem omjera miješanja. Na visinama između 250 m i 1.5 km iznad sjevernog Kvarnera mjestimice se uočavaju manja područja superrefrakcije i jedno područje subrefrakcije (na oko 600 m visine istočno od Učke). Subrefrakcija u tom području uzrokovana je miješanjem zraka različite vlažnosti, sušeg zraka nad Kvarnerom i vlažnijeg nad Učkom, pri čemu istočno od Učke na visini od oko 600 m dolazi do porasta omjera miješanja s visinom. Posljedica su zatvorene termičke cirkulacije (kao superpozicije cirkulacije vjetra obronka i obalne cirkulacije) odnosno prijelaza između gornje i donje grane cirkulacije. Gotovo nad cijelim kopnenim dijelom profila (središnji dio Istre) prisutni su povišeni radio kanali (oko 1.4 km n. v.) okruženi slojem superrefrakcije (od 700 m do 1.6 km n. v.). Te se visinske pojave nad kopnjom poklapaju s položajem fronte smorca karakterizirane uzlaznim strujanjem vlažnog morskog zraka i jakim gradijentima omjera miješanja i temperature u AGS-u (sl. 35b). Područje fronte smorca moguće je uočiti i u naglim promjenama u polju M -a (sl. 35a). Područja površinskog radio kanala, povišenog radio kanala i superrefrakcije uz zapadnu obalu Istre na visinama od oko 100 m do 500 m uzrokovana su advekcijom vlažnog morskog zraka nad kopnjom (donja grana smorca). Gornja, povratna grana smorca u polju strujanja zraka očituje se kao slabljenje zapadnog strujanja na sinoptičkoj skali (sl. 35b, visine od 1 do 2 km).

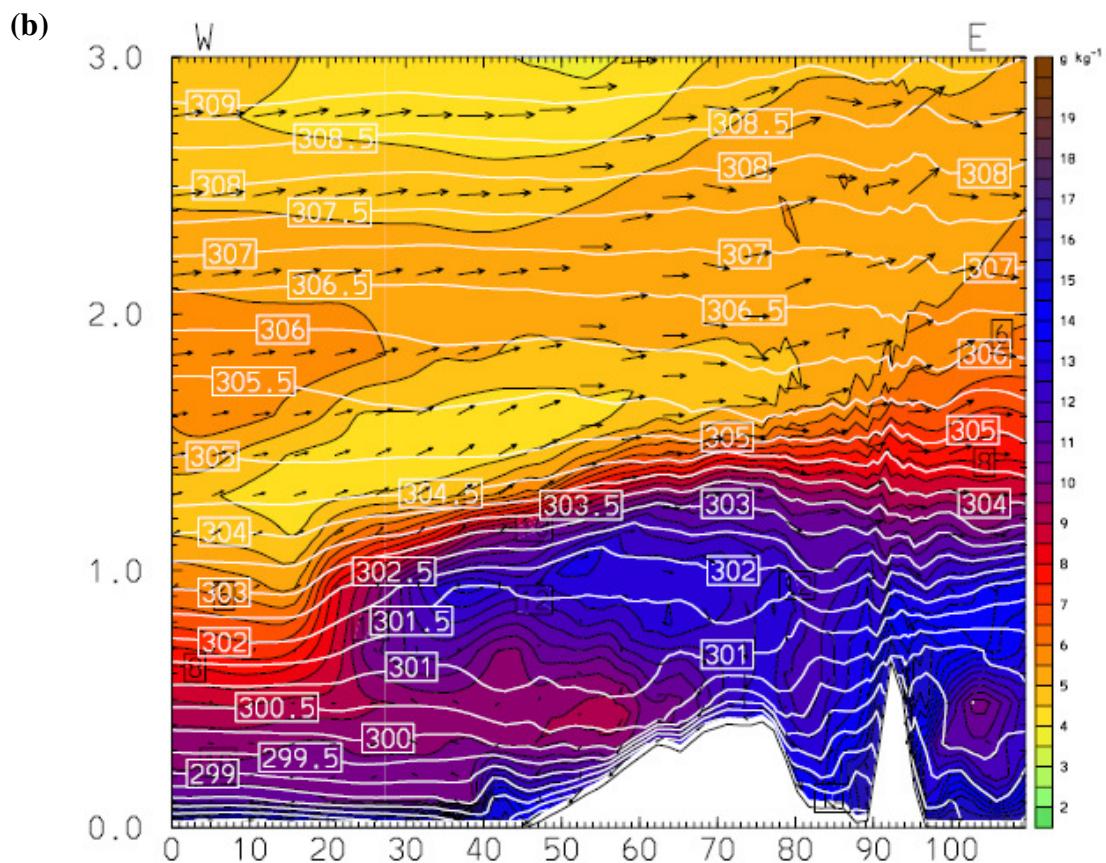
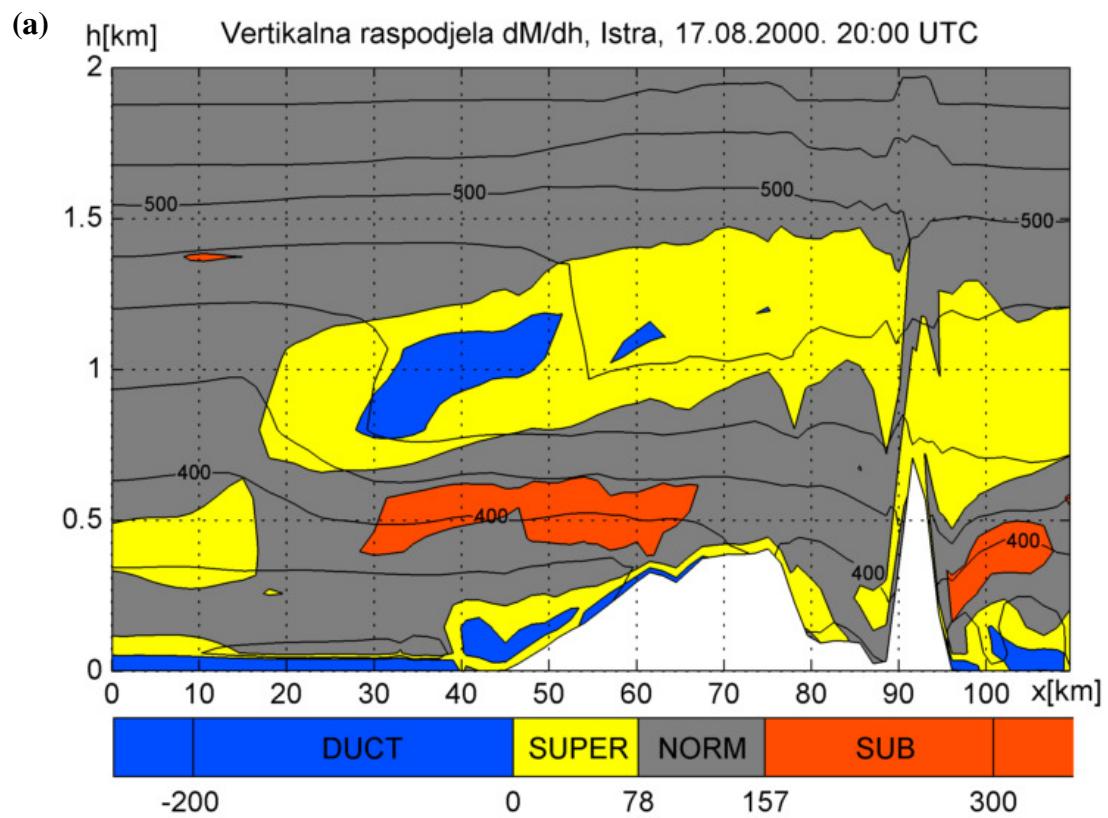
Tri sata kasnije (sl. 36) smorac prodire dublje nad kopno (za oko 10 km). S razvojem obalne cirkulacije, povećao se i njezin utjecaj na distribuciju vlažnosti zraka: bilo advekcijom prema podnožju planina, bilo povratnim strujanjem iza glave/fronte smorca. Time se povećao i pojas superrefrakcije i povišenih radio kanala nad tlom (između 100 i 400 m), odnosno pojas superrefrakcije s visinskim radio kanalima u AGS-u prema zapadnoj obali Istre. U zoni prelaska iz sloja smorca u povratno strujanje, stvara se slojevita struktura u polju vlažnosti (zona sušeg zraka) koja je uzrok pojavljivanja subrefrakcije (na oko 600 m). Nad morem situacija ostaje vrlo slična u vremenu, osim što se na oko 40 km od zapadne obale Istre javlja tanak sloj subrefrakcije (na oko 150 m). Na istočnoj padini Učke uzlazno strujnje nosi morski zrak i javlja se deblji sloj superrefrakcije u odnosu na 13 UTC, bez ranije prisutnog sloja površinskog radio kanala. Područje subrefrakcije istočno od Učke povećano je u odnosu na 13 UTC. Ovdje prikazana prostorna distribucija anapropa kompleksnija je od one dobivene u Perzijskom zaljevu (Atkinson i Zhu, 2006).



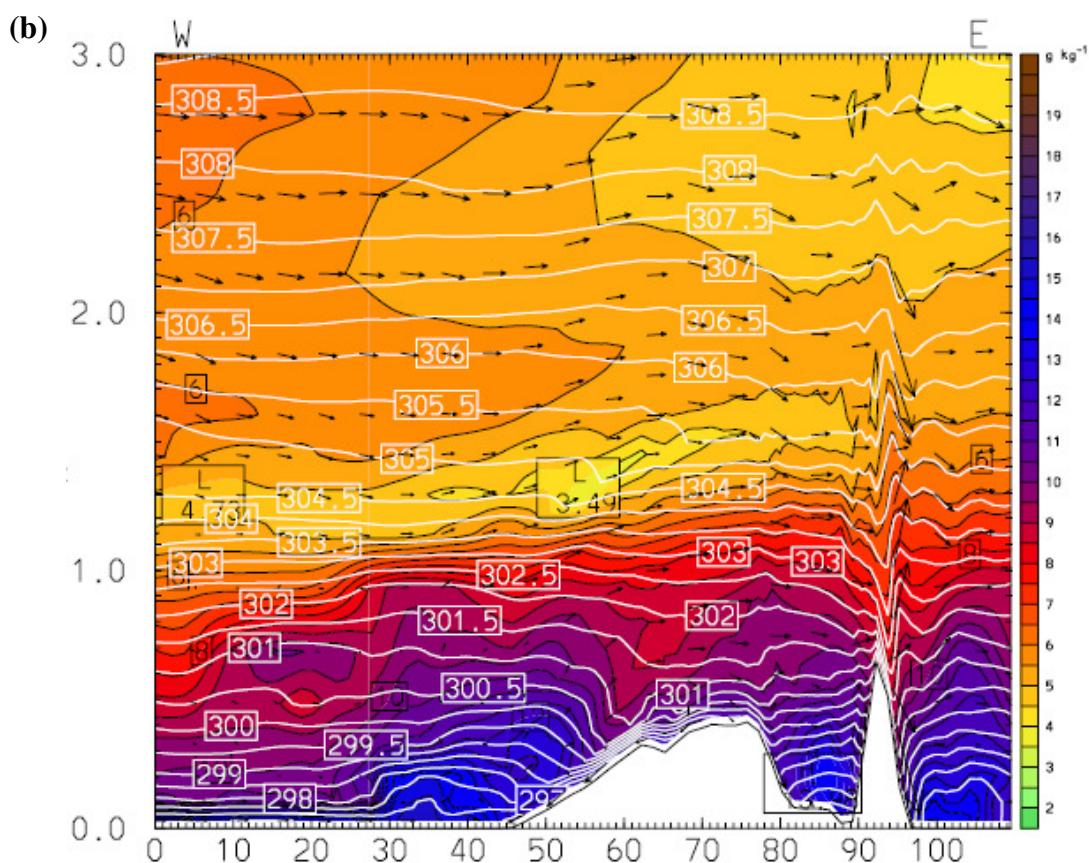
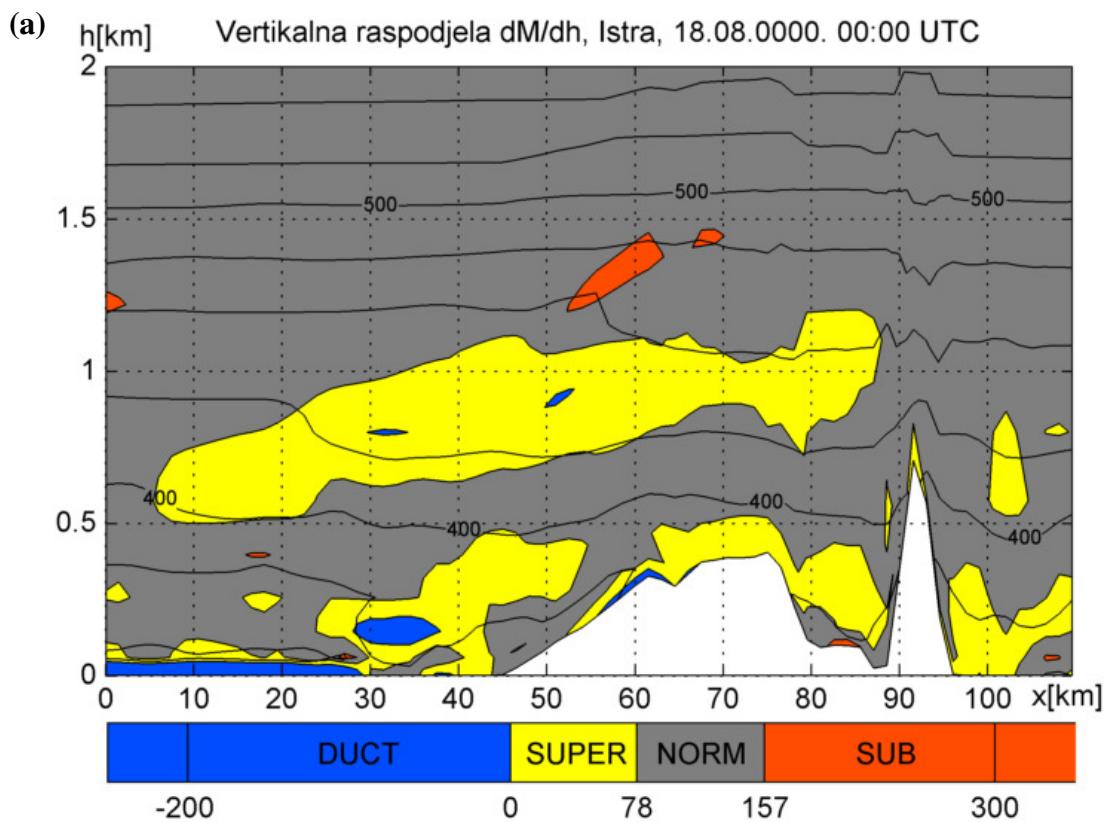
Slika 35: Vertikalni profili (ljubičasta linija sl. 34) (a) dM/dh , (b) meteorološka polja strujanja zraka, potencijalne temperature i omjera miješanja vodene pare; 17. kolovoza u 13 UTC



Slika 36: Vertikalni profili (ljubičasta linija sl. 34) (a) dM/dh , (b) meteorološka polja strujanja zraka, potencijalne temperature i omjera miješanja vodene pare; 17. kolovoza u 16 UTC



Slika 37: Vertikalni profili (ljubičasta linija sl. 34) (a) dM/dh , (b) meteorološka polja strujanja zraka, potencijalne temperature i omjera miješanja vodene pare; 17. kolovoza u 20 UTC



Slika 38: Vertikalni profili (ljubičasta linija sl. 34) (a) dM/dh , (b) meteorološka polja strujanja zraka, potencijalne temperature i omjera miješanja vodene pare; 18. kolovoza u 00 UTC

U večernjem terminu koji je odabran kao prijelazni (kvazi-barotropni) termin (sl. 37), počinje se razvijati kopnenjak nad Istrom. Konvektivna aktivnost nad kopnom prestaje, međutim gotovo sve anaprop pojave i gradijenti koji su uočeni u 16 UTC još uvijek su prisutni. Visinski radio kanali i superrefrakcija u ABL-u spuštaju se za oko 300 m prema površini. Na kopnu pri tlu javlja se strujanje prema moru. Uz samu obalu zapadne Istre vidljivo je slabo uzdizanje vlažnog morskog zraka (sl. 37b) što ukazuje na razvoj fronte kopnenjaka, iznad koje se lagano počinje uspostavljati gornja, povratna grana strujanja zraka prema kopnu.

Noćna situacija (sl 38) prikazuje zrelu fazu kopnenjaka. Zona povećane vlažnosti od oko 15 km nalazi se uz zapadnu obalu Istre. Na tom se mjestu uočava izdizanje vlažnog morskog zraka, pri čemu se na visini od oko 250 m nalazi sloj povišenog radio kanala okružen superrefrakcijom. Nad Istrom, uz donju granu kopnenjaka jaki gradijenti omjera miješanja i potencijalne temperature uzrokuju sloj površinskog evaporacijskog radio kanala i superrefrakcije. Iznad 500 m visine izmjenjuju se anapropi: na oko 750 m iznad tla uočavaju se dva manja područja povišenih radio kanala okruženih 300 m dubokim i gotovo 90 km dugačkim slojem superrefrakcije koji se proteže od Učke na istoku pa skoro do samog kraja profila na zapadu, a na oko 1.3 km nalazi se područje subrefrakcije (u skladu s jezgrom sušeg zraka). U blizini morske površine, zapadno od Istre se formira površinski evaporacijski radio kanal, a iznad njega sloj superrefrakcije.

Ova analiza pojava nestandardnih refrakcija radio valova uzrokovanih izmjenom smorca i kopnenjaka pokazala je povezanost visinskih radio kanala i superrefrakcije s konvekcijom vlažnog zraka na fronti smorca i kopnenjaka u području AGS-a. Također, advekcija vlažnog morskog zraka (smorac) na kopno uzrokuje pojavu površinskih i visinskih radio kanala i superrefrakcije uz obalu pa i dublje u unutrašnosti kopna kod dobro razvijenog smorca. Treba napomenuti da je moguća i pojava subrefrakcije u zoni prijelaza između dvije gornje i donje grane strujanja unutar cirkulacije zbog vertikalne varijabilnosti u polju vlažnosti zraka koje npr. Atkinson i Zhu (2005, 2006) u Perzijskom zaljevu nisu uočili.

5. Zaključak

Cilj ovog rada bio je ispitati imaju li mezoskalni atmosferski procesi utjecaja na pojavu nestandardnih refrakcija radio valova (anaprop). U tu svrhu korišteni su rezultati WRF numeričke simulacije područja sjevernog Jadrana u periodu od 12 UTC 12. kolovoza do 00 UTC 20. kolovoza 2000. Za kontrolu pouzdanosti modela korištena su radiosondažna mjerena iz tog perioda s dvije postaje unutar promatrane domene. Radiosondažna mjerena mogu dati informaciju o prisutnosti anaprop pojave na nekom području, no međutim ne mogu objasniti složenu prostornu i vremensku mezoskalnu dinamiku uslijed koje te pojave nastaju. Stoga je za ispitivanje veze anaprop pojava i dinamike mezoskalnih procesa korištenje modela nužno.

U promatranoj domeni na sjevernom Jadranu unutar simuliranog razdoblja analizirani su mezoskalni procesi konvekcije 13. kolovoza u sjeverozapadnoj Hrvatskoj, bure 14./15. kolovoza na sjeveroistočnoj obali Jadrana i Tršćanskem zaljevu, te obalne cirkulacije (smorac/kopnenjak) 17./18. kolovoza na zapadnoj obali Istre. Dostupna radiosondažna mjerena potječu iz Udina i San Pietra u Italiji, gdje spomenuti procesi nisu direktno opaženi (osim bure u Udinama). Bez obzira na to, anaprop pojave detektirane radiosondažama također su analizirane pomoću simuliranih meteoroloških polja.

Statistička i grafička usporedba radiosondažnih i modeliranih podataka u Udinama i San Pietru pokazala je da model relativno uspješno prognozira pojave refrakcije do visina od oko 2.5 km, međutim na većim visinama prognoza je slabija. Iako je modelska reprodukcija temperature i tlaka prilično dobra, glavni problem predstavlja reprodukcija naglih promjena u vertikalnom profilu relativne vlažnosti, posebno na visinama iznad ABL-a, što najviše utječe na prognozu anaprop pojave.

Drugi dio analize bio je usporedba horizontalnih i vertikalnih profila anaprop pojava s modeliranim meteorološkim poljima u području interesa. Ta usporedba je istaknula određeno karakteristično ponašanje anaprop pojave uzrokovano mezoskalnim procesima konvekcije, bure i obalne cirkulacije. U normalnim, neporemećenim uvjetima nad kopnom dominiraju uvjeti standardne refrakcije, dok nad morem prevladavaju površinski evaporacijski radio kanali.

Konvektivna aktivnost u svojoj ranijoj fazi jakim uzlaznim strujanjima može uzrokovati pojavu superrefrakcije u području AGS-a, dok u fazi silaznog strujanja pri površini mogu nastati radio kanali i superrefrakcija. Prema podacima koje iznose Skolnik (1980.) ili Park i Fabry (2011.) takvo ponašanje bilo je donekle očekivano. Međutim, ovdje se pokazalo da se u fazi silaznog strujanja mogu stvoriti uvjeti za subrefrakciju.

U slučaju bure, strujanje hladnog i suhog zraka na zavjetrinskoj strani orografske prepreke uzrokuje plitak sloj površinskih radio kanala i superrefrakcije. Slična se situacija, u nešto dubljem sloju, primjećuje i nad morem. Subrefrakcija se također može povezati s burom, na rubnim dijelovima mlazova bure zbog pojačane konvergencije strujanja i pojačanog vrtloženja te na navjetrinskoj strani gdje naleti vjetra mogu izazvati znatna vrtloženja ispod vrha prepreke.

Obalna cirkulacija prilično je aktivan proces u smislu pojava nestandardnih refrakcija. U AGS-u, pri vrhu konvektivne aktivnosti na fronti smorca i kopnenjaka javljaju se veća područja povišenih radio kanala i superrefrakcije. Donja grana smorca koja nosi vlažan morski zrak nad kopno također uzrokuje povišene radio kanale i superrefrakciju. U slučaju kopnenjaka, donja grana strujanja zraka prema moru, uzrokuje plitke površinske evaporacijske radio kanale i superrefrakciju, slično kao kod bure. Subrefrakcija se uglavnom javlja u području između AGS-a i donje grane smorca, unutar cirkulacijske ćelije gdje se nalazi "zarobljeni" suši zrak u odnosu na područja ispod i iznad njega.

Na temelju rezultata u ovome radu možemo zaključiti da se povezanost mezoskalnih procesa i anaprop pojave može prilično detaljno proučavati i prognozirati pomoću numeričkih modela. Međutim, pojave dobivene numeričkim simulacijama treba uzeti s dozom opreza. Statistička usporedba pokazala je da nedovoljno vjerna reprodukcija relativne vlažnosti u atmosferi utječe na prognozu intenziteta promjene modificiranog indeksa loma s visinom, kao i visinu same pojave. Buduća ispitivanja veze anapropa i mezoskalnih procesa trebalo bi napraviti na više epizoda odabranih mezoskalnih procesa u istoj ili sličnoj domeni kako bi se mogli utvrditi određeni obrasci pojave. Također, potrebno je više mjerena kako bi se mogla napraviti detaljnija analiza pouzdanosti modela.

6. Literatura

1. Atkinson, B.W. & Zhu, M. (2005.): Radar-duct and boundary-layer characteristics over the area of The Gulf, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 1923-1954
2. Atkinson, B.W. & Zhu, M. (2006.): Coastal effects on radar propagation in atmospheric ducting conditions, *Meteorological Applications*, 13, 53-62
3. Battan, L. J. (1973.): Radar Observation of the atmosphere, University of Chicago Press, Chicago, USA
4. Bech, J.; Codina, B.; Lorente, J. & Bebbington, D. (2002.): Monthly and daily variations of radar anomalous propagation conditions: How "normal" is normal propagation?, *Proceedings of ERAD*, Copernicus GmbH, 310-314
5. Burk, S. D. & Thompson, W. T. (1997.): Mesoscale Modeling of Summertime Refractive Conditions in the Southern California Bight, *Journal of Applied Meteorology*, 36, 22-31
6. Burk, S. D.; Haack, T.; Rogers, L. T. & Wagner, L. J. (2003.): Island Wake Dynamics and Wake Influence on the Evaporation Duct and Radar Propagation, *Journal of Applied Meteorology*, 42, 349-367
7. Cotton, W. R.; Bryan, G. H. & Van den Heever, S. (2011.): Storm and Cloud Dynamics, 2nd Edition, Academic Press, USA
8. Von Engeln, A. & Teixeira, J. (2004.): A ducting climatology derived from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts global analysis fields, *Journal of Geophysical Research*, 109 (D18104)
9. Fujita, T. T. (1981.): Tornadoes and Downbursts in the Context of Generalized Planetary Scales, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 38, 1511-1534
10. Grisogono, B. & Belušić, D. (2009.): A review of recent advances in understanding the meso- and microscale properties of the severe bora wind, *Tellus*, 61A, 1-16
11. Haack, T. & Burk, S.D. (2001.): Summertime marine refractivity conditions along coastal California, *Journal of Applied Meteorology*, 40, 673-687
12. Haack, T.; Wang, C.; Garrett, S.; Glazer, A.; Mailhot, J. & Marshall, R. (2010.): Mesoscale Modeling of Boundary Layer Refractivity and Atmospheric Ducting, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 2437-2457
13. Helvey, R.; Rosenthal, J.; Eddington, L.; Greiman, P. & Fisk, C. (1995.): Use of satellite imagery and other indicators to assess variability and climatology of oceanic elevated ducts, *Proc. AGARD/NATO Conf. on Propagation Assessment in Coastal Environments*, Bremerhaven, Germany, North Atlantic Treaty Organization, 14
14. International Telecommunications Union (ITU), (2003.): Recommendation ITU-R P.453-9 the radio refractive index; its formula and refractivity data, ITU
15. Karimian, A.; Yardim, C.; Gerstoft, P.; Hodgkiss, W. S. & Barrios A. E. (2011.): Refractivity estimation from sea clutter: An invited review, *Radio Science*, 46, 1-16
16. Lukšić, I. (1975.): Bura u Senju, *Senjski zbornik*, 6, 467-494
17. Mikuš, P.; Prtenjak, M. T. & Mahović, N. S. (2012.): Analysis of the convective activity and its synoptic background over Croatia, *Atmospheric research*, 104/105, 139-153
18. Miller, S. T. K.; Kein, B. D.; Talbot, R. W. & Mao, H. (2003.): Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts, *Reviews of Geophysics*, 42/3, 1-31

19. Park, S. & Fabry, F. (2011.): Estimation of Near-Ground Propagation Conditions Using Radar Ground Echo Coverage, *American Meteorology Society*, 28, 165-180
20. Patterson, W. L.; Hattan, C. P.; Lindem, G. E.; Paulus, R. A.; Hitney, H. V.; Anderson, K. D. & Barrios, A. E. (1994.): Engineer's Refractive Effects Prediction System (EREPS), Version 23, Naval Research and Development Tech. Doc. 2648, 113
21. Poje, D. (1992.): Wind persistence in Croatia, *International Journal of Climatology*, 12, 569-586
22. Rosenthal, J. & Helvey, R. (1979.): Some synoptic considerations relative to the refractive effects guidebook (REG), Naval Ocean Systems Center Tech. Doc. 260, 167
23. Rüeger, J.M. (2002.): Refractive Index Formulae for Electronic Distance Measurement with Radio and Millimetre Waves, Unisurv Report S-68, School of Surveying and Spatial Information Systems, University of New South Wales, UNSW SYDNEY NSW 2052, 1-52
24. Skolnik M.I. (1980.): *Introduction to Radar Systems*, 2nd Edition, McGraw-Hill, 441-469.
25. Telišman Prtenjak, M.; Grisogono, B. & Nitis, T. (2006.): Shallow mesoscale flows at the north-eastern Adriatic coast, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132, 620; 2191-2216
26. Telišman Prtenjak, M. & Grisogono, B. (2007.): Sea/land breezes climatological characteristics along the northeastern Adriatic coast, *Theoretical and Applied Climatology*, 90, 201-215
27. Telišman Prtenjak, M. Viher, M. & Jurković, J. (2010.): Sea/land breeze development during a summer bora event along the north-eastern Adriatic coast, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136, 1554-1571
28. Thompson, W. T. & Haack T. (2011.): An Investigation of Sea Surface Temperature Influence on Microwave Refractivity: The Wallops-2000 Experiment, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 2319-2337
29. Viher, M. (2006.): A Study of the Modified Refraction Indices over Alpine and Sub-Alpine Region, *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 625-630
30. Viher, M. & Prtenjak, M. T. (2012.): A multi-year study of radio-wave refractivity profiles above the Adriatic Sea up to an altitude of 40 km, *Meteorologische Zeitschrift*, 21, 4, 365-370
31. Viher, M.; Prtenjak, M. T. & Grisogono, B. (2013.): A multi-year study of the anomalous propagation conditions along the coast of the Adriatic sea, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 97, 75-84
32. Wang, C.; Wilson, D.; Haack, T.; Clark, P.; Lean, H. & Marshall, R. (2012.): Effects of Initial and Boundary Conditions of Mesoscale Models on Simulated Atmospheric Refractivity, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51, 115-132
33. Weisman, M. L.; Christopher, D.; Wang, W.; Manning, K. W. & Klemp, J.B. (2008.): Experiences with 0-36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model, *Weather and Forecasting*, 23, 407-437

7. Sažetak

Nestandardne refrakcije radio valova (tzv. *anaprop* pojave), koje dijelimo na radio kanale, superrefrakciju i subrefrakciju, nastaju zbog prostorne promjene temperature, vlažnosti i tlaka zraka. Atmosferska varijabilnost temperature, vlažnosti i tlaka zraka rezultat je vremenske situacije na sinoptičkoj skali, kontinuirano modificirane lokalnim mezoskalnim strukturama. Lokalne mezo-strukture utječu na visinu AGS-a te generiraju lokalne fronte koje su karakterizirane naglim prostornim promjenama temperature i vlažnosti što bitno utječe na širenje radio valova.

U ovom radu ispituje se utjecaj tri dominantna mezoskalna fenomena nad sjevernim Jadranom: smorca/kopnenjaka, bure i duboke konvekcije, u periodu od 12. do 20. kolovoza 2000. Za analizu odabranog slučaja korišteni su numerički model WRF-ARW horizontalne rezolucije 1.5 km i satnim ispisom rezultata, te radiosondažna mjerena iz Udina sa šestosatnim periodom uzorkovanja. Dobiveni rezultati za Udine pokazuju da se pomoću numeričkog modela anaprop pojave mogu uspješno prognozirati iako su katkad prognozirane na netočnim visinama i/ili podcijenjenog intenziteta. Model pokazuje najveće poteškoće u reprodukciji vertikalne promjene relativne vlažnosti što najviše utječe na točnost vertikalnog profila modificiranog indeksa loma, a time i na detekciju pojave nestandardne refrakcije.

Prostorna raspodjela anapropa, kroz cijeli promatrani period pokazuje dominaciju evaporacijskih radio kanala i superrefrakcije nad morem (do oko 100 m iznad površine) i obalnim područjem, dok nad kopnom prevladavaju uvjeti standardne refrakcije. Obalna cirkulacija se pokazala kao prilično aktivno područje u smislu pojave nestandardnih refrakcija. Advekcijom hladnijeg i vlažnijeg morskog zraka na kopno u prvih 100 m visine stvara se sloj radio kanala i superrefrakcije. Gornji dio fronte smorca obično je povezan s pojavama superrefrakcije i povišenih radio kanala. Subrefrakcija se pojavljuje unutar prijelaznog sloja između donje i gornje grane smorca. Duboka konvekcija nad kopnom prouzročila je područja superrefrakcije i subrefrakcije na visinama između 0.5 i 1 km iznad površine. Subrefrakcija nastaje uslijed silaznog strujanja u zreloj fazi nastanka kumulonimbusa koje stvara sloj hladnijeg i sušeg zraka. Ispod tog područja subrefrakcije, do 200 m visine iznad tla nalazi se sloj superrefrakcije i površinskih radio kanala. Advekcijom sušeg i hladnijeg zraka, bura unutar hidrauličkog skoka pri površini tla stvara plitak sloj radio kanala i superrefrakcije, a iznad mora i otoka te se pojave javljaju u nešto dubljem sloju. Subrefrakcija se kod bure javlja nad morem na rubovima mlazova, gdje lateralna izmjena zraka različitih higroskopskih svojstava nastaje uslijed konvergencije strujanja i povećane vrtložnosti, kao i na navjetrinskoj strani Dinarida gdje lokalna vrtloženja zraka utječu na vertikalnu promjenu količine vlage u zraku.