

UNIVERZITET U BEOGRADU  
FIZIČKI FAKULTET  
INSTITUT ZA METEOROLOGIJU

Katarina V. Veljović

POBOLJŠANJA REGIONALNIH PROGNOZA U  
ODNOSU NA GLOBALNE KOD DUGOTRAJNIH  
INTEGRACIJA

Doktorska disertacija

Beograd, 2012

University of Belgrade  
Faculty of Physics  
Department of Meteorology

Katarina V. Veljovic

IMPROVEMENTS OF REGIONAL COMPARED  
TO THE GLOBAL FORECASTS IN LONG TERM  
INTEGRATIONS

*Ph.D. Dissertation*

*Belgrade, 2012*

**Mentori:**

*dr Fedor Mesinger, akademik*

*SANU*

*i*

*Earth System Science Interdisciplinary Center, Univ. Maryland, College Park, Maryland*

*i*

*dr Borivoj Rajković, vanredni profesor*

*Univerzitet u Beogradu, Fizički fakultet*

**Članovi komisije za pregled i ocenu disertacije:**

*dr Borivoj Rajković, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Fizički fakultet*

*dr Lazar Lazić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Fizički fakultet*

*dr Mirjana Ruml, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet*

**Datum odbrane:**

*Decembar 2012.*

**Naslov doktorske disertacije:**

*Poboljšanja regionalnih prognoza u odnosu na globalne kod dugotrajnih integracija*

**Naučna oblast:**

*Meteorologija*

**Uža naučna oblast:**

*Sinoptička meteorologija*

**UDK:**

551.509.33(043.3)

## Rezime

U okviru disertacije ispituje se zaključak bojnih autora koji su predstavili eksperimente u kojima se beleži slabljenje cirkulacije velikih razmera u integracijama klimatskim regionalnim modelom kada se ne primenjuje spektralno forsiranje velikih razmera (npr. VON STORCH i dr., 2000; BINER i dr., 2000; ROCKEL i dr., 2008; SANCHEZ-GOMEZ i dr., 2008; ALEXANDRU i dr., 2009; između ostalih). Porede se uspeši prognoziranja velikih razmera regionalnim Eta modelom i globalnim ECMWF modelom u slučaju ansambla koji čini 26 32-dnevnih prognoza. Dalje, ispituje se šema za bočne granične uslove. Pitanje na koje se traži odgovor je, da li je uveliko zastupljena, ali računski zahtevnija, relaksaciona šema za bočne granične uslove neophodna za uspešno prognoziranje/simuliranje velikih razmera regionalnim klimatskim modelom. Odgovor će se dobiti poređenjem rezultata dobijenih integracijama Eta modela u dve verzije, koje se razlikuju samo po šemi za bočne granične uslove. Jedna šema je, uveliko zastupljena, relaksaciona šema, a druga je originalna Etina šema kod koje se informacija iz globalnog modela dobija samo u jednom spoljašnjem redu tačaka i na izlaznoj granici se ne definišu sve promenljive. Uspeši ova dva skupa prognoza regionalnog Eta modela se porede kako međusobno, tako i sa uspehom globalnog modela od kojeg se uzimaju granični uslovi.

Novina u eksperimentu je metod za verifikaciju. U cilju ocene uspeha prognoziranja velikih razmera, prati se tačnost prognoze položaja najjačih vetrova na nivou mlazne struje, za koji se uzima da odgovara nivou pritiska od 250 hPa. Računaju se dva skora: nepristrasna mera šanse da događaj potpadne pod određenu kategoriju (da brzina vetra na nivou 250 hPa potpada pod kategoriju vetra većeg od  $45 \text{ m s}^{-1}$ ) podešena odnosom čestina prognoziranog i osmotrenog događaja (MESINGER, 2008) i odnos čestina prognoziranog i osmotrenog događaja. Za verifikaciju se koriste ECMWF analize. Takođe se računaju u verifikaciji uobičajeni skorovi – RMS razlike kao i odstupanja između prognoziranog i analiziranog vetra na istom nivou tj. standardni bias.

Rezultati eksperimenta pokazuju da je uspeh prognoze velikih razmera Eta modelom, bez dodatnog forsiranja, gotovo isti ili čak bolji nego globalnim modelom od koga dolaze granični uslovi. Što se tiče šeme za bočne granične uslove, nije uočljiva prednost relaksacione šeme u odnosu na originalnu Etinu šemu, uprkos tome što originalna šema koristi informacije iz globalnog modela u samo jednom spoljašnjem redu tačaka. Naprotiv, rezultati Ete sa Etinim LBC su bili mnogo češće bolji od onih sa relaksacionim LBC.

**Ključne reči:** regionalni klimatski model; velike razmere; mlazna struja; šema za bočne granične uslove.

**Mentors:**

*Academy member Fedor Mesinger,*

*SANU*

*and*

*Earth System Science Interdisciplinary Center, Univ. Maryland, College Park, Maryland*

*and*

*professor, Dr. Borivoj Rajković,*

*University of Belgrade, Faculty of Physics*

**Dissertation defence board:**

*professor, Dr. Borivoj Rajković, University of Belgrade, Faculty of Physics*

*professor, Dr. Lazar Lazić, University of Belgrade, Faculty of Physics*

*professor, Dr. Mirjana Ruml, University of Belgrade, Faculty of Agriculture*

**Publication date:**

*December 2012.*

**Dissertation title:**

*Improvement of regional compared to global forecasts in long term integrations*

**Scientific field:**

*Meteorology*

**Scientific discipline:**

*Synoptic meteorology*

**UDC:**

551.509.33(043.3)

## Abstract

A considerable number of authors presented experiments in which degradation of large scale circulation occurred in regional climate integrations when large-scale nudging was not used (e.g., VON STORCH et al., 2000; BINER et al., 2000; ROCKEL et al., 2008; SANCHEZ-GOMEZ et al., 2008; ALEXANDRU et al., 2009). We here revisit this issue by comparing the large scale skill of the Eta RCM against that of the global ECMWF forecasts used as its driver. Another issue we are looking into is that of the lateral boundary condition (LBC) scheme. Specifically, the question we ask is whether the almost universally used but somewhat costly relaxation scheme is necessary for a desirable RCM performance? We address this by running the Eta model in two versions differing in the lateral boundary scheme used. One of these is the traditional relaxation scheme and the other is the Eta model scheme in which information is used at the outermost boundary only and not all variables are prescribed at the outflow boundary. The skills of these two RCM forecasts are compared against each other and also against that of their driver. Our global data dynamically downscaled to address these issues is an ECMWF 32-day ensemble forecast.

A novelty in our experiments is the verification used. In order to test the large scale skill we are looking at the forecast position accuracy of the strongest winds at the jet stream level, which we have taken as 250 hPa. We do this by calculating bias adjusted equitable threat scores (MESINGER, 2008) and frequency bias scores for wind speeds greater than a chosen wind speed threshold, with the ECMWF analyses used as truth. For greater confidence we also calculate a traditional RMS difference between the forecast and analyzed winds at this same level.

Our results show the Eta RCM skill in forecasting large scales with no interior nudging to be just about the same as that of the driver model. As to the LBC impact no disadvantage compared to relaxation was seen from using the Eta LBC scheme, in spite of its requiring information from the outermost RCM boundary only. Moreover, results of the Eta with standard were more times better than those with relaxation LBC scheme.

**Keywords:** Regional climate model; Large scale skill; Jet stream; Lateral boundary condition scheme.



## SADRŽAJ

1. Uvod.....	10
1.1 Motivacija .....	10
1.2 Problem bočnih graničnih uslova.....	12
1.2.1 Davies-ova šema za relaksaciju.....	18
2. Eksperiment.....	20
2.1 Eta regionalni model .....	20
2.1.1 Geometrija Eta modela i transformacija horizontalne mreže tačaka .....	20
2.1.2 Vertikalna struktura.....	22
2.1.3 Dinamika Eta modela i parametrizacije .....	24
2.1.4 Bočni granični uslovi u Eta modelu .....	25
2.2 Eksperiment sa ansamblom mesečnih prognoza.....	27
2.2.1 Metod za verifikaciju.....	29
3. Rezultati eksperimenta sa ansamblom mesečnih prognoza.....	32
4. Da li je oblik funkcije zavisnosti koeficijenata relaksacije od rastojanja od značaja za rezultat? .....	47
5. Diskusija i zaključci .....	49
Prilog .....	51
Literatura .....	52

# 1. Uvod

## 1.1 Motivacija

Studija graničnih uslova u regionalnim klimatskim modelima je posao za koji u brojnim svetskim centrima koji se bave regionalnim modeliranjem i prognozom klime vlada živ interes, jer postoje realni izgledi da su rezultati bitno uslovljeni načinom zadavanja graničnih uslova (JONES i dr., 1995; GIORGI i dr., 1999; LIANG i dr., 2001; MARBAIX i dr., 2003). U okviru istraživanja na datu temu akcenat je na nemogućnosti velikog broja regionalnih modela da na adekvatan način simuliraju/prognoziraju cirkulaciju velikih razmera, a da se pri tome ne služe forsiranjem velikih razmera. Tu se pre svega misli da informacija koju regionalni modeli dobijaju kroz bočne granične uslove ne biva očuvana tokom integracija čiji je vremenski razmer izvan razmera numeričke prognoze vremena [NWP, Numerical Weather Prediction]. Primenom forsiranja velikih razmera, regionalni klimatski model [RCM, Regional Climate Model] je sprečen da napravi cirkulaciju velikih razmera bittno drugačiju od one kod globalnog modela koji mu isporučuje granične uslove (npr., LAPRISE i dr., 2008; CASTRO i dr., 2005). Drugi razlozi za primenu forsiranja velikih razmera su uklanjanje zavisnosti rezultata kako od položaja i geometrije oblasti integracije (MIGUEZ-MACHO i dr., 2004) tako i od grešaka RCM-a (MIGUEZ-MACHO i dr., 2005).

U okviru NCEP-ovih [U.S. National Centers for Environmental Prediction] eksperimenata iz prognoze regionalnim Eta modelom pokazano je da se dobije bolji rezultat ako se koristi veća oblast integracije i da se to jedino može objasniti poboljšanjem velikih razmera u odnosu na globalni model koji mu daje bočne granične uslove. Zbog toga se kod primene Eta modela kao RCM-a uvek teži izboru što veće oblasti integracije (npr., MITCHELL i dr., 2001; ALTSHULER i dr., 2002; KATSAFADOS i dr., 2005; CHOU i dr., 2005). Pri tome, izbor veličine oblasti integracije je ograničen jer treba imati u vidu da je integracija na većoj oblasti računski skuplja.

Ideja izbora što veće oblasti integracije je u suprotnosti sa većinom mišljenja koja su proistekla iz grupa koje se bave RCM-ima. LO i dr. (2008) citiraju GIORGI-a (2006) da

se od RCM-a ne očekuje da izmeni/koriguje cirkulaciju velikih razmera atmosfere-okeanskog globalnog klimatskog modela [AOGCM, Atmosphere-Ocean GCM] već samo da doda detalje manjih – pod mrežnih razmera koji su posledica lokalnih forsiranja (npr. orografije, vegetacije, tipa tla, prelaza kopno – more) i interakcije sa cirkulacijom velikih razmera.

Skoro svi eksperimenti gde se ocenjuje koliko je poboljšanje prognoza izračunatih RCM-om su pravljani tako da se kao bočni granični uslovi [LBC, Lateral Boundary Conditions] koriste globalne reanalize ili globalne analize, ili su iz grupe tzv. „Big Brother“ eksperimenata (DENIS i dr., 2002, Prilog), što znači da, zbog načina na koji su postavljeni, nije ni moguća ispravna verifikacija poboljšanja u prognozama velikih razmera RCM-om. Prema klasifikaciji koju daju CASTRO i dr. (2005), tabela 1, eksperimenti koji se tiču regionalnog modeliranja vremena/klime se mogu, u zavisnosti od toga kakvi donji i bočni granični uslovi se koriste kao i od uticaja početnih uslova, svrstati u 4 tipa:

- Tip 1 ~ NWP; rezultati zavise od početnih uslova, donjeg graničnog uslova i LBC.
- Tip 2 ~ „Idealni“ LBC; nema uticaja početnih uslova, dok su LBC dobijeni iz reanalize, „Big Brother“ eksperimenti.
- Tip 3 ~ GCM; prognozirani LBC dok je SST iz AOGCM-a ili iz analiza).
- Tip 4 ~ IPCC; prognozirani i LBC i SST.

Tab. 1 Zavisnost regionalnog modela od početnih i graničnih uslova (CASTRO i dr., 2005).

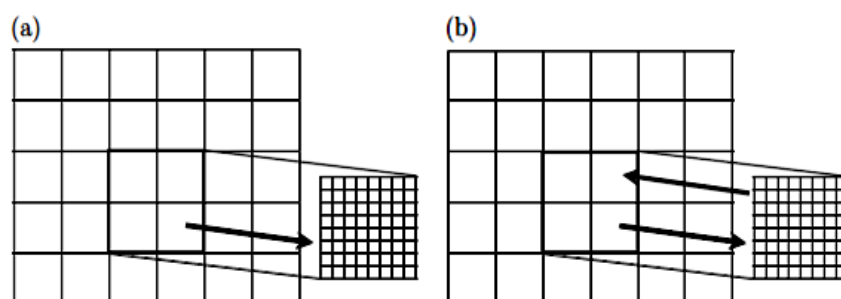
	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
Donji granični uslovi	orografija; osmotrena SST	orografija; klimatološka vegetacija; osmotreni SST; vlažnost dubljih slojeva tla	orografija; klimatološka vegetacija; osmotreni SST; vlažnost dubljih slojeva tla	orografija; tle
Početni uslovi		nema	nema	nema
Bočni granični uslovi	GFS	NCEP reanalize	globalni model forsiran osmotrenim SST	IPCC
Regionalni model	Eta, MM5, RAMS, ARPS	PIRCS	COLA/Eta	RegCM

Eksperiment koji su uradili CASTRO i dr. (2005), sa RAMS modelom, po navedenoj klasifikaciji pripada tipu 2 – sa idealnim LBC i njihov zaključak je: RCM nije mogao očuvati velike razmere kada se ne primenjuje njihovo forsiranje – model je potprognozirao kinetičku energiju. Brojna prethodna istraživanja takođe ukazuju da je najbolje rešenje da se izbegne ovaj problem da se u RCM-u dodatno forsiraju velike razmere koje model dobija iz reanaliza ili iz modela sa grubljim razlaganjem.

Međutim, kao pravilan test poboljšanja rezultata RCM-om treba uraditi eksperiment u kome se kao LBC kod RCM-a koriste prognoze AOGCM-a. Verifikacijom velikih razmera kod oba modela, globalnog i regionalnog, korišćenjem analiza se može postići pravilan uvid u to da li RCM može čak bolje nego AOGCM prognozirati cirkulaciju velikih razmera. Ovakav eksperiment biće predstavljen nadalje u disertaciji.

## 1.2 Problem bočnih graničnih uslova

Simulacija regionalne klime umetanjem modela koji je za ograničenu oblast (LAM, Limited Area Model) u AOGCM je postala standardan način za dobijanje detaljnije prognoze klime. Tako, RCM nije ništa drugo do model za prognozu za ograničenu oblast čije je integraciono vreme duže od dve nedelje pa je osetljivost na početne uslove izgubljena. Upotreba regionalnih modela za prognozu vremena je proistekla iz želje da se putem povećanja horizontalnog razlaganja, koje se nije moglo priuštiti u globalnim modelima, smanje greške modela. Regionalni modeli su operativno umetnuti u hemisferske ili globalne modele sa grubljim razlaganjem početkom 70-tih. Model sa finim razlaganjem se umeće u model sa grubim razlaganjem jednosmerno ili dvosmerno (slika 1).



Sl. 1 Šematski prikaz jednosmernog (a) i dvosmernog (b) umetanja. Strelice označavaju smer razmene informacija između modela sa grubim – veći kvadrat, i finim – manji kvadrat, razlaganjem.

Nezaobilazan problem koji se javlja u primeni modela za ograničenu oblast su LBC. Umetanje regionalnih modela se zasniva na uključivanju LBC, dobijenih iz globalnog modela, u određenim vremenskim intervalima (npr. 6-h, 12-h). Za razliku od globalnih/hemisferskih modela koji su definisani na celom globusu/hemisferi pa nemaju probleme vezane za LBC, jer se LBC zadaju kao periodični, kod regionalnih modela su neophodni „dobro definisani LBC“, da bi se na pravilan način obezbedila „komunikacija“ između atmosfere unutar i izvan oblasti integracije, jer će u suprotnom rešenje u oblasti integracije ubrzo biti narušeno. Granični uslovi mogu biti zasnovani na osmotrenim podacima, kao što se to većinom radi u istraživanjima, i poznati su kao idealni LBC. Međutim, najbolje što se može uraditi u prognozi vremena je da se koriste granični uslovi iz drugog prognostičkog modela. Zbog toga, LBC mogu imati presudnu ulogu u formiranju prognostičkih polja, jer se njima može transportovati greška sa granica ka unutrašnjosti oblasti integracije.

Greške na granicama oblasti integracije postoje jer:

- LBC se dobijaju iz modela sa grubljim razlaganjem u prostoru i vremenu. Ona su slabija od razlaganja u modelu za ograničenu oblast, pa se prilikom interpolacije na finiju mrežu tačaka sigurno oslabi kvalitet rešenja modela za ograničenu oblast;
- prognostički model od koga se uzimaju LBC može imati pogrešne prognoze bez obzira na razlaganje kod tog modela;
- modeli iz kojih se dobijaju LBC mogu imati jednostavnije parametrizacije fizičkih procesa od modela za ograničenu oblast. To onda rezultira lažnim gradijentima i povratnim efektima između grube i fine mreže tačaka što može uticati na rešenje modela za ograničenu oblast.

Zbog ovoga se mora razumeti priroda problema kako bi se maksimalno ublažio negativan uticaj LBC na konkretnu primenu modela. Najjednostavnije je udaljiti bočne granice modela od oblasti koja je od interesa, ali tako da uticaj LBC bude prihvatljiv tj. da greška koju unose LBC ne bude veća od grešaka koje su posledice numeričkih aproksimacija, parametrizacija fizičkih procesa i površinskih forsiranja. Međutim, odluka o adekvatnoj veličini oblasti integracije je proizvoljna i bazira se na probama. Tu treba imati u vidu i računarske mogućnosti kojima se raspolaže.

Ukoliko se granica računске oblasti poklapa sa pravom, fizičkom granicom, odgovarajući granični uslovi mogu da se izvedu iz fizičkih zakonitosti i relativno lako primene kod numeričkih modela. Npr. veoma je lako da se izvede uslov da brzina fluida normalna na čvrstu granicu mora biti jednaka nuli na granici i, ukoliko je oblik granice jednostavan, lako je zadati ovaj uslov pri rešavanju numeričkog problema. Teškoće nastaju kada se računska oblast završava na proizvoljnom mestu unutar fluida i stoga, kada god je moguće, dobro je izbegavati veštačke granice proširenjem oblasti na čitav fluid. U mnogim slučajevima, pojave koje su od interesa se javljaju u ograničenoj oblasti i nije praktično uključiti kompletan fluid u računsku oblast. To znači da se npr. izolovana nepogoda nikada ne bi simulirala globalnim atmosferskim modelom samo da bi se izbegli mogući problemi na bočnim granicama oblasti. Međutim, kod modela za ograničenu oblast bočne granice ne predstavljaju fizičke, već veštačke granice za strujanje, jer su nametnute našom željom da prognoziramo buduće stanje atmosfere u podoblasti globalne atmosfere. Da bi se rešio rezultujući „problem početne i granične vrednosti“ moraju se postaviti uslovi na (veštačkim) granicama. Kod rešavanja PDJ modela u početnom trenutku moraju biti zadate vrednosti svih prognostičkih veličina. Za LBC koji zavise od vremena, mora biti zadat samo određeni broj/podskup ovih veličina. Ukoliko je ovaj podskup veličina pravilno izabran kaže se da je problem „dobro postavljen“ i obrnuto, ako nije, problem je „loše postavljen“. Primer loše postavljenog problema bi bio ako se pri rešavanju sistema jednačina za plitku vodu definišu sve tri promenljive  $u$ ,  $v$  i  $\Phi$  u svakoj tački duž bočnih granica. Kada se računska oblast završava duž neke propisane granice unutar veće zapremine fluida, uslovi postavljeni na granici oblasti imitiraju prisustvo okolnog fluida. Granični uslovi bi trebalo stoga da dozvole da poremećenja izađu kroz granicu bez lažne refleksije koja se prostire unazad, u pravcu unutrašnjosti doma. Granični uslovi definisani da minimiziraju lažnu refleksiju unazad su poznati kao „nereflektujući“, „otvoreni“, „talasno propustljivi“ ili „radijacioni“ granični uslovi. Izraz „radijacioni granični uslovi“ potiče od SOMMERFELD-a (1949, str. 189) koji ih je definisao za skalarno polje koje zadovoljava Helmholtz-ovu PDJ. Međutim, Sommerfeld-ov radijacioni uslov se primenjuje na beskonačnost, a u svim praktičnim primenama granični uslov se zadaje na nekom konačnom rastojanju.

Kod čistih hiperboličkih jednačina potrebno je onoliko graničnih uslova koliki je broj dolaznih karakteristika. Paraboličke jednačine sa difuzijom drugog reda iziskuju jedan

granični uslov na granici za svaku prognostičku jednačinu. Eliptičke jednačine drugog reda (Laplace-ova, Poisson-ova i Helmholtz-ova jednačina) takođe zahtevaju jedan granični uslov.

Da bi se shvatila osnovna ideja dobro postavljenih LBC može se posmatrati jedno-dimenzionalna advektivna jednačina:

$$\frac{\partial \phi(x, t)}{\partial t} + u_0 \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial x} = 0,$$

gde je početni uslov zadat sa  $\phi(x, 0) = f(x)$ ;  $0 \leq x \leq L$ . Ako je  $u_0 > 0$ , rešenje jednačine je

$$\phi(x, t) = f(x - u_0 t).$$

Za  $t > 0$ , na osnovu početnog uslova se ne može imati informacija o  $\phi(0, t)$ , pa se za integraciju unapred u vremenu moraju zadati granične vrednosti na svim nivoima u vremenu. Sa druge strane,  $\phi(L, t)$  se dobija prognozom koristeći ili samo početni uslov i tada je jednako  $f(L - u_0 t)$ , ili samo granični uslov za  $x = 0$  kada je  $t > L/u_0$ . Odavde se vidi da je pogrešno zadati granični uslov za  $x = L$ . Navedena 1D advektivna jednačina translira/advektira rešenje duž  $x$  ose. Potrebno je da rešenje napusti oblast u  $x = L$  bez promene oblika, a to će se dogoditi ukoliko je problem dobro postavljen. Sa druge strane, ako se zada uslov  $\phi(L, t)$  onda će se pojaviti diskontinuitet sem ako slučajno nije  $\phi(L, t) = f(L - u_0 t)$ . Ovako predefinisani LBC mogu dovesti do neprirodne refleksije koja prostire greške unazad, duž  $x$  pravca. Način na koji se može izbeći ovaj problem je da se prilikom predstavljanja funkcije konačnim razlikama nikada ne koriste tačke na izlaznoj granici. Izraz „izlazna/ulazna granica“ se odnosi na granicu duž koje je *prognozirana* normalna komponenta brzine,  $v_n$ , usmerena prema spolja/unutra od oblasti integracije. Dakle, ako položaju  $x = L$  pri pravljenju konačnih razlika odgovara tačka  $i = im$ , tada će problem biti rešen primenom šeme koja ne uključuje vrednost u krajnjoj tački,  $\phi_{im}^n$  ( $n$  se odnosi na nivo u vremenu).

Na sličan način se pokaže da je u slučaju trodimenzionalnog sistema jednačina za plitku vodu, ako se LBC predefinišu, neminovno prostiranje greške sa granice i to najmanje brzinom zvuka kod nehidrostatičkih jednačina ili najmanje brzinom najbržeg talasa

u slučaju hidrostatičkog sistema jednačina. Tako, kod sistema jednačina za plitku vodu, na ulaznoj granici ( $v_n < 0$ ) moraju biti definisana dva granična uslova, ako je  $|v_n| < \sqrt{\phi}$  i tri uslova, ako je  $|v_n| > \sqrt{\phi}$ . Na izlaznoj granici ( $v_n > 0$ ) je, ukoliko je  $|v_n| < \sqrt{\phi}$ , potreban jedan granični uslov, dok za  $|v_n| > \sqrt{\phi}$ , granični uslov nije potreban.

Prvi eksperiment sa prognozom od CHARNEY-a i dr. (1950), odnosio se na rešavanje jednačine za barotropnu vrtložnost (očuvanje apsolutne vrtložnosti), za šta je potrebno zadati granične uslove. Sistem jednačina koji oni rešavaju čine jednačina za barotropnu vrtložnost, koja je hiperboličkog tipa,  $\partial \zeta / \partial t = -\mathbf{v} \cdot \nabla (\zeta + f)$  i Poisson-ova (eliptička) jednačina,  $\nabla^2 \psi / \partial t = \partial \zeta / \partial t$ . Kod ovog sistema potreban je granični uslov za vrtložnost u tačkama na ulaznoj granici i granični uslov za strujnu funkciju na svakoj granici (za Poisson-ovu jednačinu). Za vrtložnost uzimaju da je konstantna na ulaznoj granici tj.  $\partial \nabla^2 \psi / \partial t = 0$ , dok je na izlaznoj granici dobijena ekstrapolacijom, koristeći šemu za uzvodno diferenciranje. Za eliptičku jednačinu koriste granični uslov za strujnu funkciju  $\partial \psi / \partial t = 0$  (tj. normalna komponenta vetra ostaje konstantna).

CHARNEY (1962) je analizirao rešenja sistema primitivnih jednačina u pogledu broja karakteristika, kao i probleme koji nastaju usled predefinisane LBC. Za 1D linearizovani sistem jednačina postoje 3 karakteristike: jedna koja odgovara geostrofskom rešenju i koja se kreće brzinom  $U$ , i druge dve koje odgovaraju gravitaciono-inercijalnim talasima i kreću se brzinom  $U \pm \sqrt{f^2 k^2 + \Phi}$ . Na granicama, ukoliko je brzina gravitaciono-inercijalnih talasa veća od  $U$  i strujanje je usmereno ka unutrašnjosti domena, moramo definisati dva granična uslova. Ako je strujanje usmereno na spolja, moramo definisati jedan granični uslov (on odgovara inercijalno-gravitacionim talasima koji se kreću na unutra). Ako je  $U$  veće od brzine gravitaciono-inercijalnih talasa, moraju se definisati sva tri granična uslova i to samo na ulaznoj granici. Kod paraboličkih jednačina (sa horizontalnom difuzijom), svaka prognozirana promenljiva mora biti definisana i na ulaznim i na izlaznim granicama.

OLIGER i SUNDSTRÖM (1978) su pokazali da primitivne jednačine sa hidrostatičkom aproksimacijom nisu čisto hiperboličke (jer je tu izgubljen izvod vertikalne brzine u vremenu) pa stoga nemaju „dobro postavljene“ granične uslove.



Najvažniji zaključak je da LBC koji su definisani lokalno u svakoj tački na granici nisu dobro postavljeni. Ako se na granici zadaju sve promenljive iz globalnog modela tada se, zbog toga što globalni i regionalni model nezavisno jedan od drugog računaju prognoze, pojavljuje skok u vrednostima promenljivih u prvom susednom redu u odnosu na spoljašnji red tačaka, pa ako se na neki način ne priguše rezultujuće greške, one će se prostirati u oblast integracije brzinom zvučnih ili gravitacionih talasa i ubrzo će napraviti šum u prognozi. Zato se u praksi primenjuje filtriranje nestabilnosti koja je posledica predefinisane LBC. Pored ovoga, kao mogućnost da se reši problem predefinisane LBC, McDONALD (1997) ističe uključivanje člana horizontalne difuzije u modele, čime se povećava potreban broj LBC, pa se „LBC mogu blago predefinisati, a da se ne napravi značajan šum“.

U praksi su numerički testirane brojne šeme za LBC da bi se ispitala njihova pogodnost. Nekoliko šema je probano dugi niz godina: „pseudo-radijaciona“ šema (ORLANSKI, 1976), šema za difuziju u graničnoj zoni (BURRIDGE, 1975; MESINGER, 1977), šema sa korigovanom tendencijom (PERKEY i KREITZBERG, 1976) i relaksaciona šema (DAVIES, 1976; 1983). U zavisnosti od toga kako rešavaju problem predefinisane, šeme bi se mogle svrstati u pet vrsta:

- Zadaju se polja iz globalnog modela samo u spoljašnjem redu tačaka, a u redu/zoni do granice se primeni jako prigušenje talasa uvođenjem člana difuzije u jednačini kretanja.
- Koristi se radijacioni uslov kako bi se videlo da li talasi na granici izlaze iz oblasti ili se vraćaju nazad u oblast, pa se u tačkama u kojima su fazne brzine usmerene ka oblasti integracije uzimaju vrednosti iz globalnog modela. Kod ovog metoda je predefinisana LBC svedena na najmanju moguću meru.
- Relaksacija tendencija iz globalnog modela duž zone tačaka (do 4) na granici, tako da su u spoljašnjem redu tačaka uzete tendencije iz globalnog modela, a idući ka unutrašnjosti oblasti kombinuju se vrednosti tendencija iz globalnog i regionalnog modela.

- Relaksacija vrednosti iz globalnog modela duž šire zone tačaka (do 10) na granici, tako da se ima postepen prelaz između prognoza globalnog i regionalnog modela.
- Na ulaznoj granici duž jednog spoljašnjeg reda su zadate sve vrednosti iz globalnog modela, dok su na izlaznoj granici zadate sve prognostičke promenljive izuzev tangencijalne komponente brzine. Ova komponenta se dobija ekstrapolacijom iz unutrašnjosti oblasti integracije.

Najšire zastupljena je Davies-ova šema za relaksaciju LBC. DAVIES (1983) ispituje uticaj različitih tipova graničnih uslova i njihovo generisanje lažne refleksije koristeći jednostavne primere talasnih jednačina i sistema jednačina za plitku vodu. Zaključuje da je, kod regionalnog modela, šema sa predefinisanim graničnim uslovima zadovoljavajuća ako: a) bez vidljive promene faze ili amplitude emituje dolazne talase iz globalnog modela koji daje granične uslove, i b) na izlaznoj granici, reflektovani talasi ne prodiru opet u oblast integracije sa приметno većom amplitudom. Ovoj temi se detaljno posvetio DURRAN (1999).

### 1.2.1 Davies-ova šema za relaksaciju

Kao rešenje problema predefinisane LBC, kod Davies-ove šeme se primenjuje relaksacija polja u široj zoni tačaka, blizu granice oblasti integracije. Davies-ova šema primenjena na 1D advektivnu jednačinu ima oblik:

$$\frac{\partial \phi(x,t)}{\partial t} + u_0 \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} = -K(x) [\phi(x,t) - \phi^e(x,t)]$$

gde je  $\phi^e(x, t)$  vrednost zadata iz globalnog modela i funkcija  $K(x) \neq 0$  u zoni tačaka duž granice, koja ima najveću vrednost u prvom spoljašnjem redu tačaka (rešenje se približava vrednosti iz globalnog modela), zatim postepeno slabi idući prema unutrašnjosti oblasti integracije i jednaka je nuli u unutrašnjosti oblasti.

Za  $u_0 = 0$ ,  $K = \text{const.}$  i  $\phi^e = \text{const.}$  rešenje je:

$$\phi(t) = \phi(0) \exp(-Kt) + \phi^e [1 - \exp(-Kt)].$$

Tako, za veliko  $K$  rešenje teži vrednosti koja je zadata iz globalnog modela, dok je za  $K = 0$  rešenje nepromenjeno,  $\phi(0)$ . Ova šema je najpopularnija zbog svoje osobine da je rešenje modela za ograničenu oblast očuvano ukoliko se polja regionalnog i globalnog modela poklapaju. Međutim, kod ove šeme refleksija na granici nije eliminisana i jedino se može svesti na minimum pažljivim izborom širine relaksacione zone i funkcije  $K$ . Širina zone relaksacije varira i u radovima se mogu naći eksperimenti u kojima je zona relaksacije široka od 4-20 tačaka. GIORGI (2006) ukazuje na različite oblike funkcionalne zavisnosti koeficijenata relaksacije od rastojanja duž zone relaksacije i ističe da je u slučaju velikih oblasti integracije neophodno da širina zone bude veća od 3 reda tačaka (GIORGI i dr., 1993b).

U slučaju npr. linearne relaksacije kroz zonu široku 8 redova tačaka, Davies-ova šema primenjena na polje  $\phi$  bi imala sledeći izgled:

- u spoljašnjem redu tačaka vrednosti su zadate iz globalnog modela,  $\phi^e$ ,
- u drugom redu tačaka polje  $\phi$  se računa kao:  $0.875 \phi^e + 0.125 \phi^l$ , gde je  $\phi^l$  vrednost izračunata LAM-om,
- u trećem kao:  $0.750 \phi^e + 0.250 \phi$  itd.

## 2. Eksperiment

### 2.1 Eta regionalni model

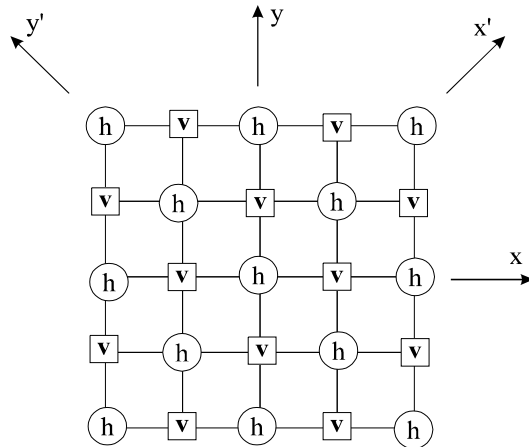
Eta numerički model za prognozu vremena u ograničenoj oblasti se koristi i za potrebe istraživanja regionalnih promena klime i pokazao se kao pogodan jer se njim može napraviti kontinualna simulacija za period mnogo duži od onog koji je tipičan za kratkoročnu prognozu vremena bez nekog uočenog sistematskog generisanja greške (npr. VELJOVIC i dr., 2010). Reklo bi se da greška koju Eta model pravi prilikom dugotrajne integracije ostaje u okviru one koja se pravi kada se model pušta operativno.

U eksperimentu koji će biti prikazan je korišćena verzija Eta modela koja je dopunjena u odnosu na poslednju NCEP-ovu operativnu verziju. Opis svih promena se može naći u članku MESINGER i dr. (2012). Jedna od dopuna se odnosi na diskretizaciju eta koordinate, gde se koriste kose stepenice (MESINGER i JOVIC, 2004). S obzirom na to da je eksperiment fokusiran na vetrove u gornjoj troposferi ne očekuje se da ove promene daju značajniji doprinos dobijenim rezultatima.

#### 2.1.1 Geometrija Eta modela i transformacija horizontalne mreže tačaka

Eta model je trodimenzionalni model sa primitivnim jednačinama definisan na polurazmaknutoj Arakavinoj E mreži tačaka (ARAKAWA i LAMB, 1977) koja je šematski prikazana na slici 2. U tačkama označenim slovom  $h$  definisani su površinski pritisak, temperatura, specifična vlažnost, vertikalna brzina, turbulentna kinetička energija, oblačna voda i pasivne supstance. U tačkama označenim slovom  $v$  definisan je vetar, odnosno horizontalne komponente brzine,  $u$  i  $v$ . Prizemna polja uključuju prizemnu potencijalnu temperaturu, vlažnost tla i akumulirane padavine.

Pri numeričkom definisanju modela koriste se osnovni  $(x, y)$  i pomoćni  $(x', y')$  koordinatni sistem. Ova dva sistema su zarotirana za  $45^\circ$  jedan u odnosu na drugi.



SI. 2 Arakavina polurazmaknuta horizontalna E mreža.

Osnovne jednačine modela za adijabatski slučaj bez trenja su:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} + f\mathbf{k} \times \mathbf{v} + \nabla\Phi + \frac{RT}{p}\nabla p = 0$$

$$\frac{dT}{dt} + \kappa \frac{T\omega}{p} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\partial p}{\partial t} \right) + \nabla \cdot \left( \mathbf{v} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = - \frac{RT}{p} \frac{\partial p}{\partial \eta}$$

$$\omega \equiv \frac{dp}{dt} = - \int_0^\eta \nabla \cdot \left( \mathbf{v} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta + \mathbf{v} \cdot \nabla p$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} = - \int_0^\eta \nabla \cdot \left( \mathbf{v} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta$$

$$\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial t} - \int_0^\eta \nabla \cdot \left( \mathbf{v} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta$$

gde su:  $d/dt$  individualni izvod,  $\mathbf{v}$  vektor horizontalne brzine,  $f$  Koriolisov parametar,  $\mathbf{k}$  jedinični vektor u  $z$  pravcu,  $\Phi$  geopotencijal,  $R$  gasna konstanta i  $\kappa = R/c_p$  pri čemu je  $c_p$  specifična toplota vazduha pri konstantnom pritisku. Površinski pritisak je označen sa  $p_s$ .

### 2.1.2 Vertikalna struktura

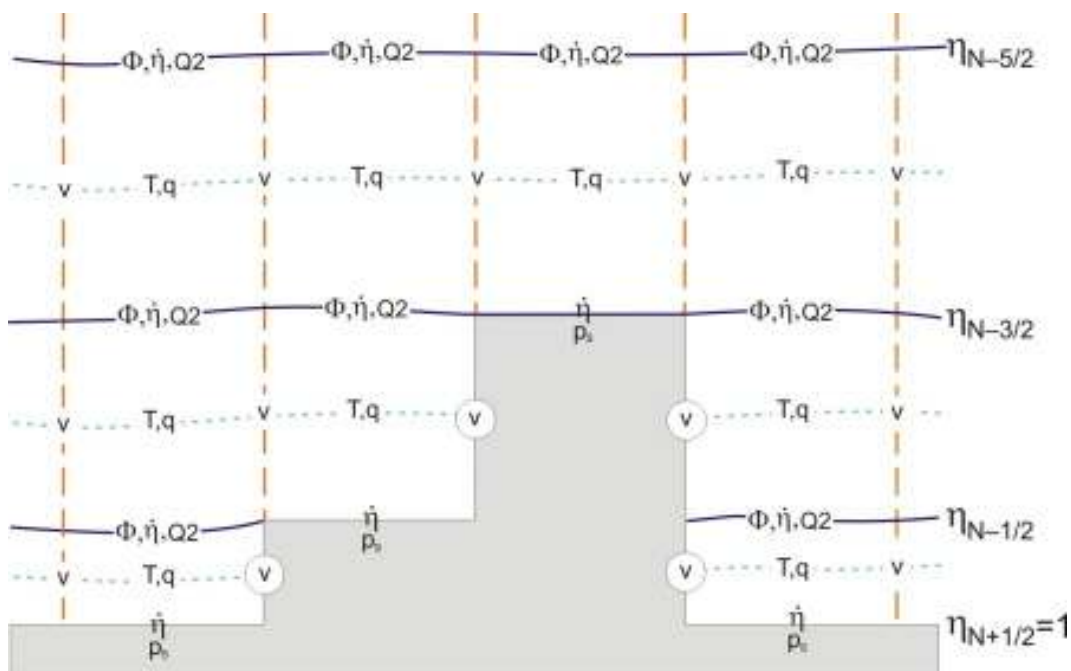
Vertikalna koordinata u Eta modelu je  $\eta$  koordinata (MESINGER, 1984) definisana kao:

$$\eta = \left( \frac{p - p_T}{p_s - p_T} \right) \eta_s,$$

gde je

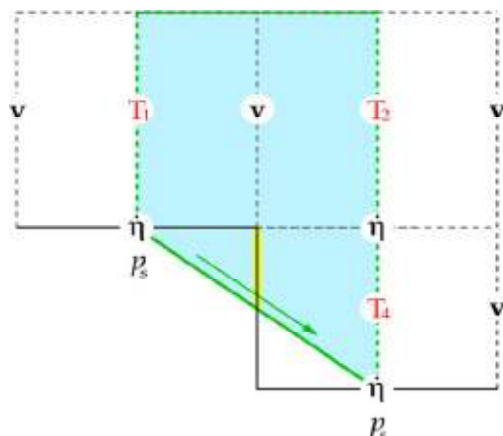
$$\eta_s = \frac{p_{ref}(z_s) - p_T}{p_{ref}(0) - p_T}.$$

$p_T$  je pritisak na vrhu atmosfere u modelu,  $p_s$  je pritisak na donjoj granici modela, a  $z_s$  je visina donje granice, odnosno orografije;  $p_{ref}$  je referentni vertikalni profil pritiska, npr. profil u standardnoj atmosferi. Visine donje granice dozvoljavaju uzimanje samo diskretnih vrednosti, tako da su planine konstruisane od „kutija“ nad tačkama mreže (trodimenzionalna stepenasta prezentacija). Prvi činilac u izrazu za eta koordinatu je zapravo definicija sigma koordinate (PHILLIPS, 1957), pa je eta koordinata uopštenje sigma koordinate sa stepenastom prezentacijom planina (slika 3). Promenljive su u vertikalnom pravcu raspoređene na sledeći način: temperatura  $T$ , specifična vlažnost  $q$  i horizontalne komponente vetra  $u$  i  $v$ , su postavljene na sredinama vertikalnih slojeva, dok su vertikalna brzina  $w$ , geopotencijal  $\Phi$  i turbulentna kinetička energija  $Q_2$  smešteni na površinama slojeva. Komponente vetra na vertikalnim bočnim stranama stepenica su jednake nuli u skladu sa unutrašnjim graničnim uslovima korišćenim u modelu. Vertikalna raspodela promenljivih u modelu je data na slici 3.



Sl. 3 Stepenasta prezentacija planina u eta vertikalnom koordinatnom sistemu ( $\eta$ ) i vertikalna raspodela modelskih promenljivih.

Šematski izgled modelove vertikalne mreže sa „kosim“ stepenicama je dat na slici 4. Gallus i Klemp (2000) su uočili da stepenasta prezentacija planina kod Eta modela može na zavetrenoj strani planina proizvesti razdvajanje strujanja kakvo se u prirodi ne dešava. Name, struja koja prelazi preko kocke koja prekriva vrh planine (npr. slika 4, kocka sa temperaturom  $T_1$ ), nastavlja horizontalno da se kreće (ulazi u kocku sa temperaturom  $T_2$ ) i potom ne bude u potpunosti naniže spuštenu u susednu kocku (sa temperaturom  $T_4$ ) koliko bi trebalo, već glavni deo struje nastavlja da se kreće horizontalno i ulazi u susednu kocku (nije prikazana, desno od kocke sa temperaturom  $T_2$ ). Dakle, nedostatak je bio nepostojanje direktnog strujanja iz kocke sa temperaturom  $T_1$  u kocku sa temperaturom  $T_4$ . Zbog ovoga su kasnije definisane tzv. kose stepenice, tj nagibi u v tačkama koristeći 4 okolne h tačke ( $p_s$  tačke na slici 4). Nagib se definiše ukoliko postoji najviša od 4 okolne h tačke, jer je ona odgovorna za blokiranje strujanja. Isto tako, nagib se definiše i ako su dve najbliže susedne h tačke najviše. U ostalim slučajevima nagib ostaje jednak nuli. Nagib se definiše tako da se vertikalna stranica kocke koja nije omogućavala strujanje direktno nadole (ili direktno uvis) sada smatra da je do polovine otvorena. Na ovaj način v-kocka koja je neposredno iznad nagiba razmenjuje količinu kretanja sa susednim v-kockama iz dva sloja sa desne strane. Istovremeno, postoji direktna razmena temperature između kocki kojima na prikazanoj slici pripadaju  $T_1$  i  $T_4$ .



Sl. 4 Šematski izgled prezentacije planina putem „kosih“ stepenica na vertikalnom preseku kod Eta modela. (MESINGER i dr., 2012)

### 2.1.3 Dinamika Eta modela i parametrizacije

Osnovni dinamički proces u atmosferi je geostrofsko podešavanje. Pokazalo se da su u slučaju ovog problema C i E mreža, na kojoj je definisan Eta model, vidno bolje od ostalih, tj. numeričko rešenje prostiranja gravitaciono – inercijalnih talasa na ovim mrežama je najpribližnije analitičkom rešenju (RANDALL, 1994).

Problem razdvajanja rešenja, za slučaj čistih gravitacionih talasa na E mreži rešen je uvođenjem člana popravke u jednačini kontinuiteta (MESINGER, 1974; JANJIĆ, 1979). Za vremensko diferenciranje, u slučaju članova podešavanja, koristi se eksplicitna unapred – unatrag šema u vremenu u kombinaciji sa implicitnom trapezoidnom šemom za Koriolisov član. Za vremensko diferenciranje horizontalnih komponentata brzine koristi se šema unapred u kombinaciji sa centriranom šemom. Za vertikalnu advekciju, temperaturu, specifičnu vlažnost i turbulentnu kinetičku energiju koristi se Ojlerova šema unatrag. Radi povećanja računске efikasnosti modela, koristi se metod rascepljivanja u vremenu, tako da se za računanje advektivnih članova koristi dva puta duži vremenski korak od osnovnog, koji se koristi za članove podešavanja (MESINGER, 1981). Za računanje fizičkih procesa u modelu koristi se četiri puta duži vremenski korak u odnosu na osnovni (JANJIĆ, 1990).



Nelinearni članovi u jednačini kretanja su rešeni Janjićevom šemom koja ne dopušta nelinearnu kaskadu energije ka malim razmerama tj. nema nagomilavanja energije u oblasti velikih talasnih brojeva (JANJIĆ, 1984).

U trećem, četvrtom i petom redu tačaka od bočnih granica oblasti koristi se šema sa uzvodnom advekcijom. Model ima ugrađenu kontrolu vrednosti divergencije.

Faktor koji može da utiče na varijabilnost rešenja RCM-a su parametrizacije fizičkih procesa. Paket parametrizacija u Eta modelu sadrži:

- površinske procese,
- turbulenciju,
- konvekciju,
- padavine velikih razmera,
- horizontalnu difuziju i
- zračenje.

Model koristi parametризационе šeme za turbulenciju Mellor-Yamada sa nivoom zatvaranja 2 i 2,5 (JANJIĆ, 1994).

#### **2.1.4 Bočni granični uslovi u Eta modelu**

Etina šema za LBC se odnosi na tzv. jednosmerno umetanje. Kod Eta modela se u svakom koraku u vremenu duž spoljašnje granice oblasti integracije (slika 5, crveni ram) ažuriraju četiri prognostičke veličine: horizontalne komponente brzine, temperatura i specifična vlažnost (MESINGER, 1977). Tendencije prognostičkih promenljivih u prvom spoljašnjem redu tačaka se dobijaju iz globalnih prognoza i to u različitim vremenskim intervalima (npr. na 6 h). Za stanje atmosfere unutar tog intervala, dakle između raspoloživih prognoza odnosno analiza, pretpostavlja se linearna promena. Nove vrednosti prognostičkih promenljivih u prvom spoljašnjem redu tačaka se računaju po šemi:

$$T^{\tau} = T^{\tau-1} + \Delta t \delta_i T^{\tau-1, \tau}$$

$$q^{\tau} = q^{\tau-1} + \Delta t \delta_i q^{\tau-1, \tau}$$

$$u^\tau = u^{\tau-1} + \Delta t \delta_t u^{\tau-1, \tau}$$

$$v^\tau = v^{\tau-1} + \Delta t \delta_t v^{\tau-1, \tau}$$

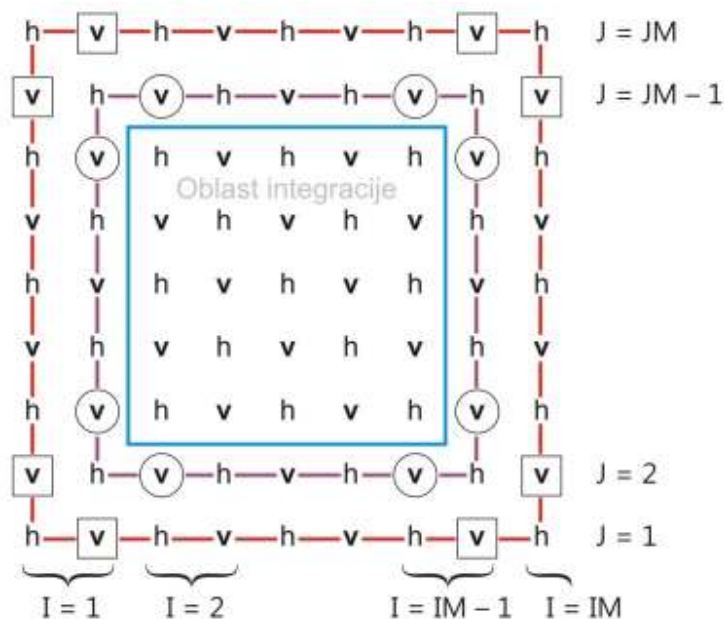
Vrednosti prognostičkih promenljivih u drugom spoljašnjem redu tačaka (slika 5, ljubičasti ram) se dobijaju kombinacijom vrednosti iz prvog spoljašnjeg reda tačaka i trećeg reda, koji ulazi u oblast integracije (oblast integracije kreće od trećeg reda tačaka duž svake granice, plavi ram na slici 5). Osrednjavanje iz četiri tačke duž granice oblasti je osobina modela da kontroliše šum od parova rešenja na dve C podmreže od kojih je sastavljena E mreža. Promenljive  $T$  i  $q$  se nakon svakog koraka u vremenu dobijaju u  $h$  tačkama kao srednjak iz četiri tačke, dve iz prvog i dve iz trećeg reda tačaka:

$$T(i-1, j) = \frac{1}{4} [T(i, j+1) + T(i-1, j+1) + T(i-1, j-1) + T(i, j-1)]$$

$$q(i-1, j) = \frac{1}{4} [q(i, j+1) + q(i-1, j+1) + q(i-1, j-1) + q(i, j-1)].$$

Komponente vetra se nakon svakog ažuriranja u spoljašnjem redu tačaka proveravaju, osim u onim tačkama koje su najbliže ugaonim  $h$  tačkama (tačke u kvadratima na slici 5). Ako je normalna komponenta vetra usmerena izvan oblasti (na izlaznoj granici), onda se tangencijalna komponenta zamenjuje linearnom ekstrapolacijom tangencijalne komponente unutar oblasti integracije.

Vrednosti komponenti vetra u drugom redu spoljašnjih tačaka se dobijaju osrednjavanjem vrednosti iz četiri okolne tačke, osim za zaokružene  $v$  tačke sa slici 5 koje se dobijaju osrednjavanjem iz šest tačaka sa tačno određenim težinskim faktorima. Potprogram modela u kome se ažuriraju LBC u  $h$  tačkama je BOCOH, a u  $v$  tačkama je BOCOV. Polu-Lagranževska advektivna šema u trećem redu modelske oblasti bi se mogla smatrati da je od koristi za uspešnu eliminaciju lažne refleksije na izlaznoj granici.



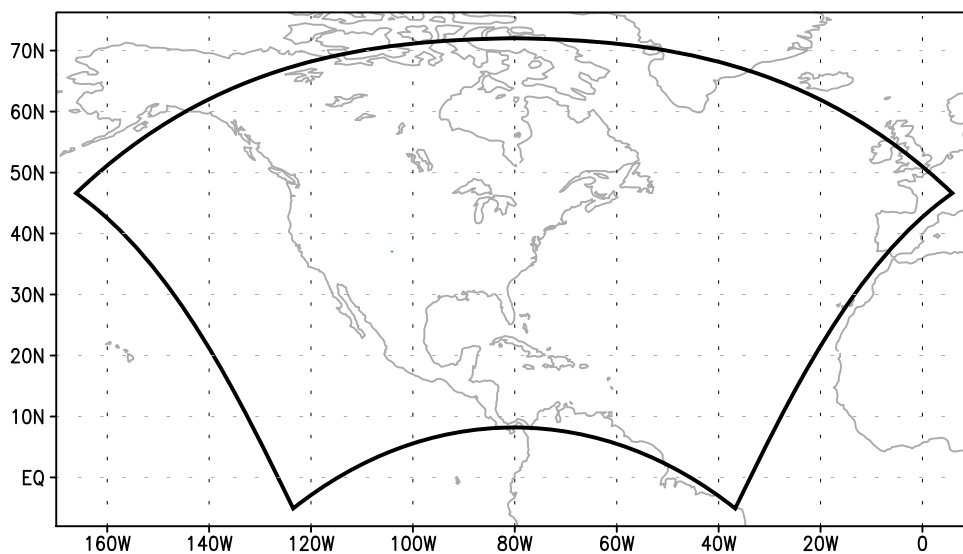
Sl. 5 Oblast integracije modela sa dva spoljašnja reda tačaka.

## 2.2 Eksperiment sa ansamblom mesečnih prognoza

Skup od 26 ansambl-prognoza za 32 dana unapred, regionalnim Eta modelom, je napravljen tako što su za početni i granični uslov Eta modela uzeti kontrolna prognoza i prvih 25, od ukupno 50 dodatnih članova ECMWF ansambla [poznatog kao EPS, Ensemble Prediction System]. U vreme pravljenja eksperimenta, januara 2009, ansambl ECMWF prognoza je do 10 dana unapred izračunat na horizontalnom razlaganju T399 (~50 km) i 62 vertikalna nivoa, i sa smanjenim horizontalnim razlaganjem (T255 ~80 km) u preostalom delu integracionog perioda (VITARTi dr., 2008). U prvih 15 dana integracije vremenski interval u kom su raspoloživi izlazi iz ECMWF globalnog modela je 6-točasovni, a potom je 12-točasovni. U skladu sa tim, čestina uključivanja LBC kod Eta modela je na isti način smanjena nakon 15-tog dana integracije. Start globalnog, ECMWF ansambla je u 0000 UTC 1. januara 2009. SST je u okviru EPS-a koji startuje u 0000 UTC prvih 10 dana integracije konstantan, a u ostatku integracionog perioda se prognozira povezanim okeanskim modelom. Tako, prema Castro i dr. klasifikaciji, navedenoj u uvodnom delu, eksperiment potpada pod „tip 3“.

Horizontalno razlaganje kod Eta RCM-a je 31 km i u vertikalnom pravcu model ima 45 slojeva. Zimska situacija i oblast integracije su izabrani u skladu sa problemom koji

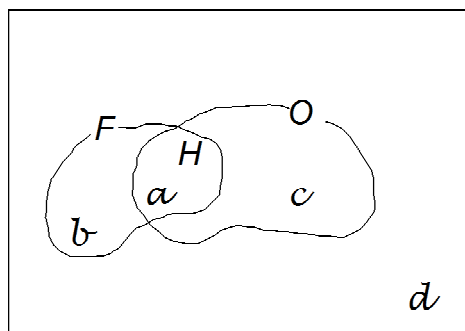
se razmatra – mogućnost regionalnog modela da uspešno prognozira velike razmere, u ovom slučaju mlaznu struju. Mlazna struja je na Severnoj hemisferi upravo najizrazitija zimi. Oblast integracije je prikazana na slici 6. Prekriva Severnoamerički kontinent i Severni Atlantik i nešto je manja od oblasti koja se operativno poslednja koristila kod NCEP-a. Veličina oblasti je  $12000 \times 7111$  km što odgovara površini segmenta na Zemljinoj kugli od  $80.9657 \times 10^6$  km<sup>2</sup>. Zapadna granica oblasti je udaljena od Stenovitih planina sa idejom da se Eta modelu omogući dovoljno prostora da razvije svoje zapadno strujanje detaljnije od strujanja u globalnom modelu. Eta model je i ranije davao vrlo dobre rezultate u oblasti gde se glavna planinska prepreka pruža u pravcu sever – jug. Gornji granični uslov je uobičajeni uslov u slučaju hidrostatičke verzije modela: na gornjoj granici atmosfere, za koju je izabran nivo od 25 hPa, vertikalna brzina je jednaka nuli. U skladu sa izabranim horizontalnim razlaganjem, radi ispunjenosti CFL kriterijuma, osnovni vremenski korak je 90 s.



**Sl. 6** Oblast integracije Eta modela koja je korišćena u eksperimentu.  
Veličina oblasti je  $12000 \times 7111$  km.

## 2.2.1 Metod za verifikaciju

S obzirom na to da se testira uspeh regionalnog Eta modela u prognozi „velikih razmera“ neophodno je prvo ustanoviti metod kojim se mogu izdvojiti velike razmere. Kao pogodan reprezent velikih razmera izabrani su najjači vetrovi na nivou mlazne struje. Ovo je prvi eksperiment te vrste, gde se za velike razmere bira veličina koja je direktno prognozirana modelom, a da se prethodno ne pravi tzv. filtriranje malih razmera, i u LBC i u prognozama regionalnim modelom, kako bi se izdvojile samo velike razmere kao što se to čini u „Big Brother“ eksperimentima. Takođe, treba naglasiti da na ovaj način definisane „velike razmere“ neće zavisiti od veličine i geometrije oblasti integracije. Za najjače vetrove na nivou mlazne struje izabrane su brzine vetra veće od  $45 \text{ m s}^{-1}$ . Uzeto je da je nivo mlazne struje na nivou pritiska od 250 hPa. Cilj je da se oceni prognoza položaja i površine koju zauzimaju najjači vetrovi. Tako, ovde je primenljiv metod koji se koristi za verifikaciju padavina, putem statističkih ocena po kategorijama. Statistike po kategorijama se definišu koristeći binarnu tabelu mogućnosti (tabela 2) gde su parovi prognoziran-osmotren događaj grupisani u 4 grupe ( $a, b, c$  i  $d$  na slici 7 i u tabeli 2): pogodak ( $a$ ), promašaj ( $c$ ), pogrešna prognoza – događaj je prognoziran, a nije osmotren ( $b$ ) i ispravna prognoza – događaj nije ni osmotren ni prognoziran ( $d$ ).



Sl. 7 Skupovi prognoziranih F, osmotrenih O i ispravno prognoziranih/pogođenih H događaja u oblasti integracije. Oznake  $a, b, c$  i  $d$  odgovaraju definicijama u tabeli 2.

Tab 2. Binarna tabela mogućnosti.

Događaj je prognoziran	Događaj je osmotren		
	DA	NE	Marginalne sume
DA	Pogodak (H, „hit“) $a$	Pogrešno prognoziran $b$	Suma prognoziranih (F, „forecasted“) $a+b$
NE	Promašaj $c$	Ispravno – niti osmotren niti prognoziran $d$	Suma neprognoziranih (N – F) $c+d$
Marginalne sume	Suma osmotrenih (O, „observed“) $a+c$	Suma neosmotrenih (N – O) $b+d$	Ukupan broj događaja (N)

Za procenu tačnosti položaja korišćena je nepristrasna mera šanse da događaj potpadne pod određenu kategoriju podešena odnosom čestina prognoziranog i osmotrenog događaja tj. bias-om (ETSa, bias adjusted equitable threat score, MESINGER, 2008), definisana kao:

$$ETSa = \frac{H_a - O^2 / N}{2O - H_a - O^2 / N}. \quad (1)$$

Ovde i nadalje se koriste standardne oznake u verifikaciji padavina:  $F$ ,  $H$ ,  $O$ , gde  $F$  označava broj tačaka u kojima je događaj prognoziran,  $H$  je broj „pogodaka“, tj. tačaka u kojima je događaj dobro prognoziran,  $O$  je broj tačaka u kojima je događaj osmotren i  $N$  je ukupan broj tačaka u oblasti modela (slika 7 i tabela 2).  $H_a$  je broj pogodaka/tačaka u kojim je bias podešen na jedinicu:

$$H_a = O - \frac{F - H}{\ln\left(\frac{O}{O - H}\right)} \text{lambertw}\left(\frac{O}{F - H} \ln\left(\frac{O}{O - H}\right)\right) \quad (2)$$

i odgovara broju pogodaka interpolisanom ili ekstrapolisanom na prognozu koja nema bias, kada je  $F = O$  (bias jednak jedinici). Razlog da se napravi bias-podešavanje ETS-a je proistekao iz potrebe da se dobije mera koja će oceniti tačnost prognoze položaja događaja tj. promenljive koja se verifikuje. Naime, standardni ETS je osetljiv na bias, tako da, kao i kod drugih mera za verifikaciju bolji broj će se dobiti namernim pod- ili pre-prognoziranjem promenljive koja se ocenjuje (HAMILL 1999; MESINGER 2008; BRILL 2009; BRILL and MESINGER 2009; HOGAN i dr., 2010).

Takođe je, kao ocena koja će dati dopunske informacije o prognozi, izračunat odnos čestina prognoziranog i osmotrenog događaja – bias skor. Bias se računa po formuli:

$$B = \frac{F}{O}. \quad (3)$$

i meri tendenciju modela da prognozira premalu ili preveliku površinu za dati događaj.

*Lambertw* funkcija u (2), poznata još kao omega funkcija, je inverzna funkcija od  $f(w) = we^w$ , gde je  $w$  kompleksan broj. Vrednosti *ETSa* i *B* jednake jedinici odgovaraju idealnoj prognozi.

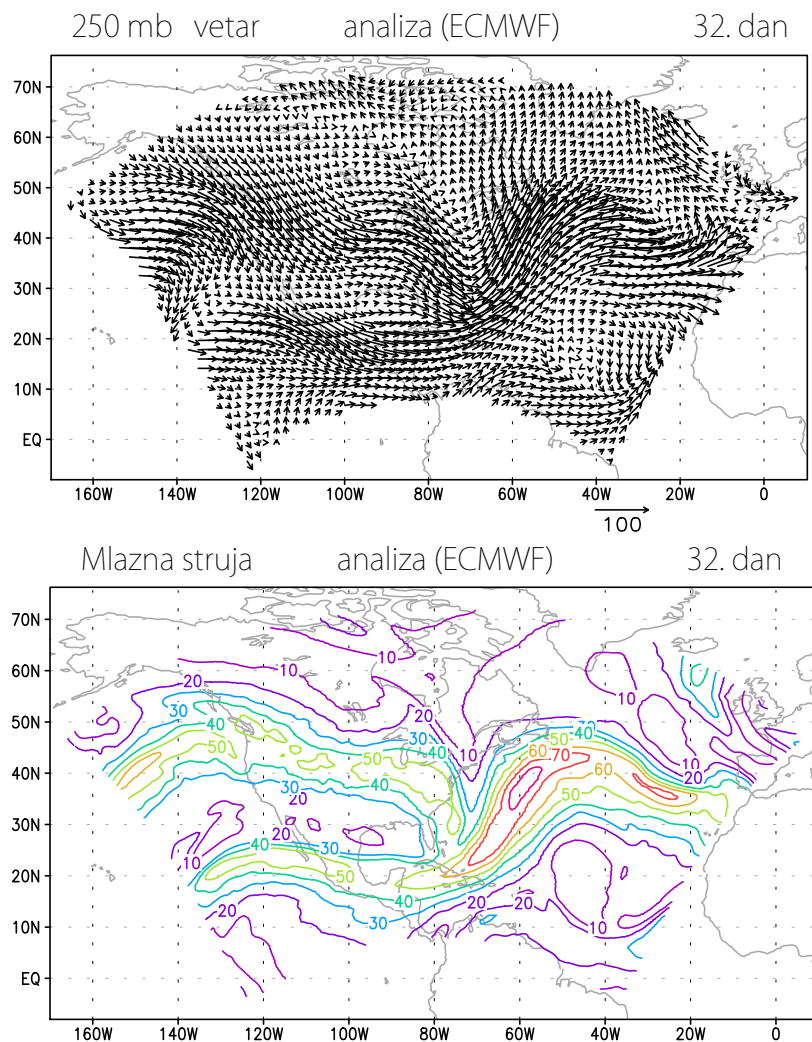
Verifikacija je napravljena u odnosu na ECMWF analize, koje su zadate na horizontalnom razlaganju T799 (~25 km). Iz analiza je još izračunata čestina pojave određenog događaja, definisana kao odnos broja tačaka u kojima je dati događaj osmotren i ukupnog broja tačaka u oblasti, *O/N*.

Pored ovih ocena računate su i standardne ocene: koren srednje kvadratne greške ili RMS razlike između prognoze i analize tj. „rms greška“ [RMSE, **R**oot **M**ean **S**quare **E**rror] kao i standardni bias (SB) tj. odstupanja između prognoziranog i analiziranog vetra na istom nivou mlazne struje. Svaka od ocena je u slučaju prognoza Eta modela računata u šestočasovnim intervalima, dok je za članove ECMWF ansambla računata u skladu sa njihovom dostupnošću – prvih 15 dana u šestočasovnim, a potom u dvanaes-točasovnim intervalima.

Porede se kumulativni skorovi odnosno skorovi unije 26 prognoza dobijenih regionalnim Eta modelom koristeći standardnu Etinu šemu za LBC sa skorovima odgovarajuće unije prognoza globalnog ECMWF modela. Nakon ovoga, porede se skorovi tri (verzije) modela, kako za pojedinačne članove ansambla tako i za uniju od prvih 6 članova ansambla za koje su izračunate prognoze Eta modelom koristeći relaksacionu šemu za LBC. Davies-ova šema za relaksaciju LBC je u eksperimentu primenjena duž 6/12 spoljašnjih redova oblasti integracije. S obzirom na sugestije dvojice anonimnih recenzenata našeg rada na ovu temu, da izbor *linearne* zavisnosti koeficijenata relaksacije od rastojanja nije uobičajen kada se primenjuje relaksacija LBC, jedna od prognoza je izračunata koristeći Lehmann-ove (1993) koeficijente u zoni relaksacije.

### 3. Rezultati eksperimenta sa ansamblom mesečnih prognoza

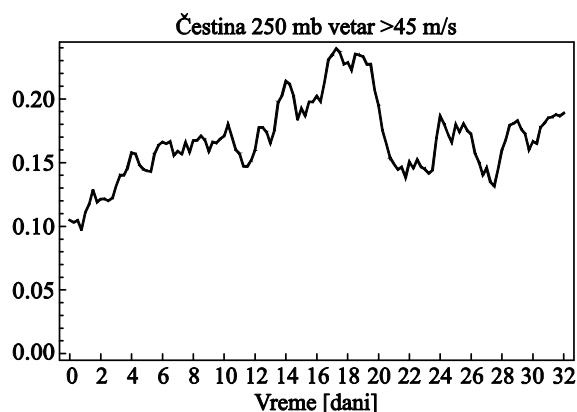
Pogodnost metoda kojim su izdvojene *velike razmere* je najbolje prepoznatljiva ako se pogleda slika 8. Na slici je prikazana analiza smera i intenziteta vetra na nivou pritiska od 250 hPa unutar Etine oblasti za termin 0000 UTC 2. februara 2009, odnosno kraj integracionog perioda. Zelene, narandžaste i crvene izolinije označavaju položaj mlazne struje u datom terminu, sa jezgrom mlazne struje iznad severnoameričke obale Atlantika u kome brzina prelazi vrednosti od 70 i 80  $\text{m s}^{-1}$ , označenim crvenim izolinijama.



**Sl. 8** 250 hPa analiza vetra, ECMWF T799, za termin 0000 UTC 2. februar 2009, u oblasti u kojoj su izračunate prognoze Eta modelom. Na gornjem panelu je strelicama prikazan smer vetra, i to za svaku 9-tu tačku mreže. Na donjem panelu su prikazane izolinije vetra ( $\text{m s}^{-1}$ ) u intervalu od po 10  $\text{m s}^{-1}$ .



Za uvid u pravilnost odabira praga vrednosti koji se koristi za definiciju „najjačih vetrova“ na slici 9 prikazana je relativna čestina pojave vetrova većih od  $45 \text{ m s}^{-1}$  u funkciji vremena, za period od 32 dana prognoze. Preciznije, ova čestina označava koliki procenat date oblasti je tokom vremena zahvaćen vetrovima jačim od  $45 \text{ m s}^{-1}$ . Vidi se da je čestina u oblasti integracije porasla sa oko 10%, na početku integracije, na skoro 25% od osamnaestog do dvadesetog dana prognoze, a u nastavku integracionog perioda je u proseku oko 15%. Ovi podaci će biti nadalje značajni za razumevanje prirode skorova koji će biti prikazani u nastavku.

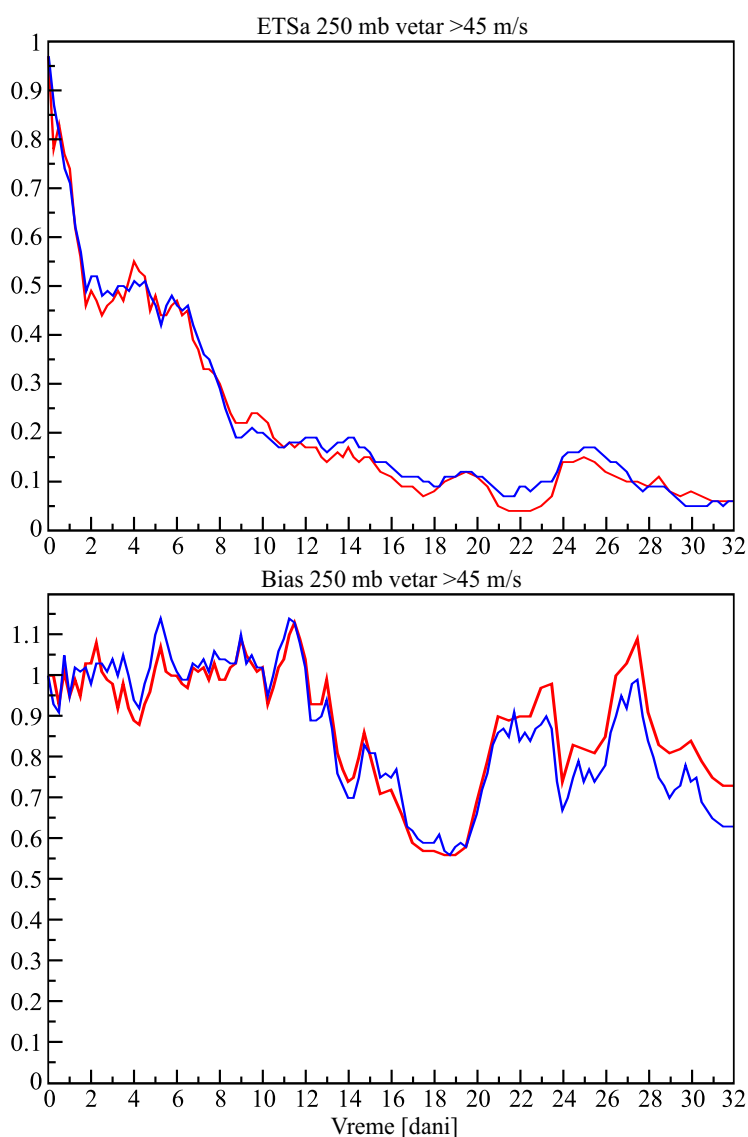


Sl. 9 Čestina pojave vetrova jačih od  $45 \text{ m s}^{-1}$  u toku vremena (dani) izračunata na osnovu ECMWF T799 analiza u oblasti prikazanoj na sl. 6 za period 0000 UTC 1.1. – 0000 UTC 2.2.2009.

Na slikama 10 i 11 su prikazani sveukupni, kumulativni skorovi za dva ansambla prognoza, globalnog ECMWF i regionalnog Eta modela. Skorovi su izračunati za uniju od 26 članova ansambla: kontrolni plus 25 dodatnih članova. Kumulativni ETSa, odnosno nepristrasna mera šanse da se prognozira vetar koji je jači od  $45 \text{ m s}^{-1}$  podešena biasom, kao i bias skor su dobijeni sabiranjem pojedinačnih prognoziranih (F), pogođenih (H) i osmotrenih (O) događaja u vremenu; osrednjavanje individualnih skorova ne bi bilo dobar izbor (npr., HAMILL and JURAS 2006). Rezultati ansambla globalnog modela su predstavljeni crvenim linijama. Rezultati za regionalni model se odnose na Eta koja koristi standardnu šemu za LBC (Eta\_o) i prikazani su plavim linijama. Na gornjem panelu slike 10 vidi se da je u prvih 9 dana prognoze ETSa skor kod Etinog ansambla prognoza gotovo isti kao u slučaju ansambla prognoza modela sa grubljim razlaganjem. Blaga prednost Eta modela uočljiva je kasnije u određenim periodima integracije: od 12-15, 16-18, 22-24. i 25-27. dana. Ovde je dobro podsetiti se da ETSa ne podržava slučajne pogotke, tako da u skor za ceo ansambl vidimo da oba modela

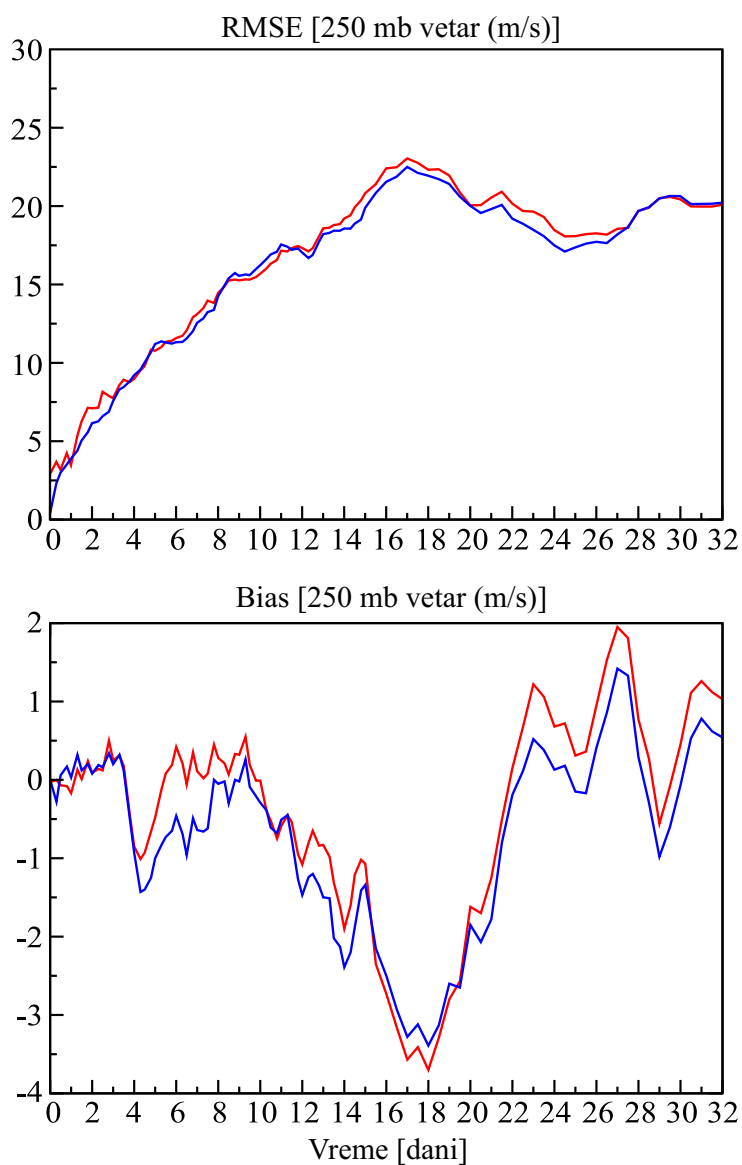
pokazuju približno istu veštinu prognoziranja velikih razmera tokom čitavog integracionog perioda od 32 dana.

Moglo bi se sumnjati da je u verifikaciji rezultata ECMWF analizama Eta model u malo „podređenijem“ položaju u odnosu na globalni model, s obzirom na to da je za pravljenje analiza korišćen isti model kojim su dobijene ECMWF prognoze. Iz tog razloga, napravljena je identična verifikacija prognoza oba modela NCEP-ovim analizama i dobijeno je potpuno poklapanje sa skorovima koji su ovde prikazani, pa se sumnja može odbaciti.



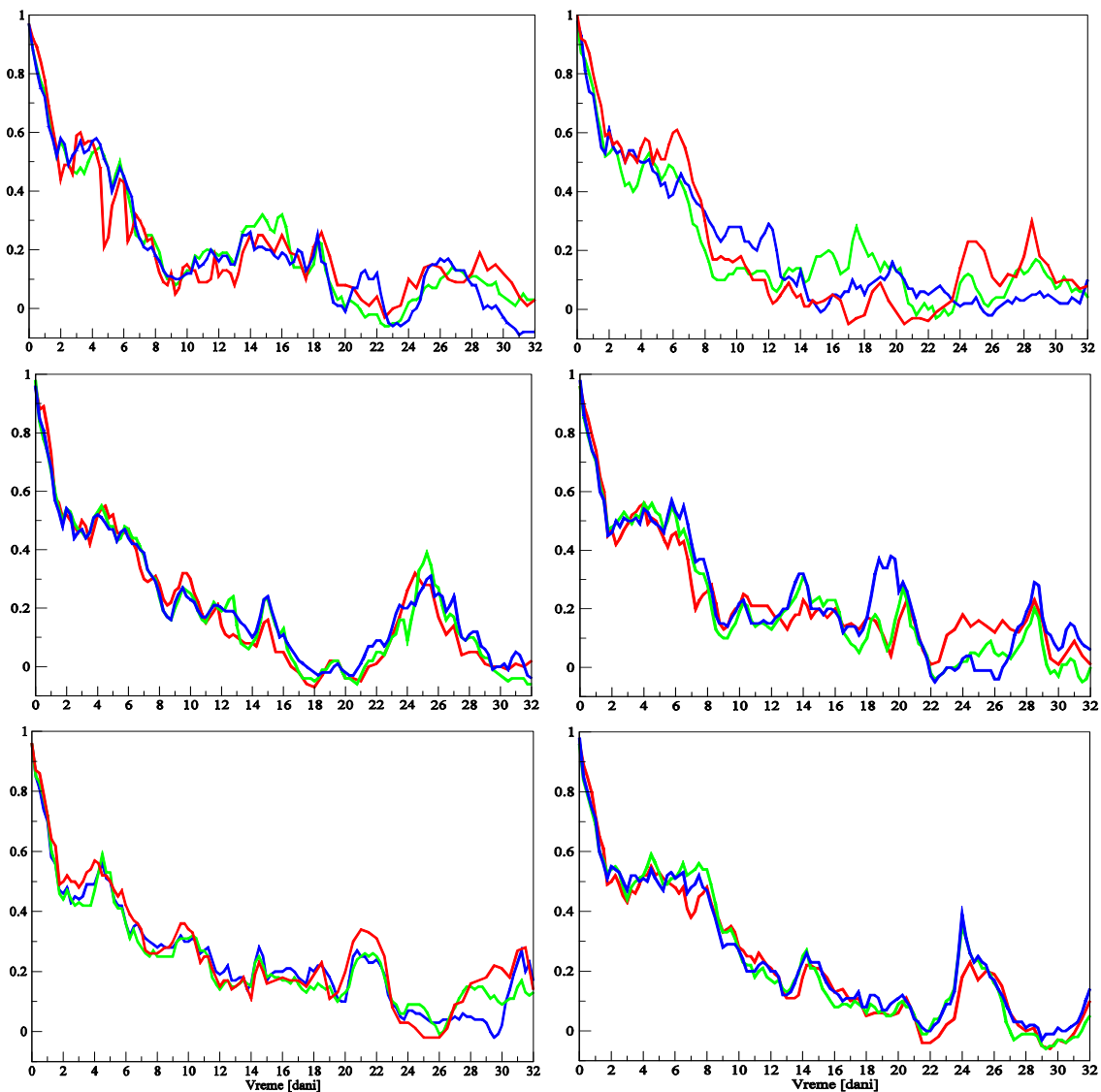
**Sl. 10** Biasom podešeni ETS skor (ETSa), gornji panel, i bias, donji panel, brzine vetra na nivou 250 hPa koja je  $\geq 45 \text{ m s}^{-1}$ , globalnog ECMWF T399 ansambla (kontrolni plus 25 članova, crvene linije) koji je korišćen za početne i bočne granične uslove u 32-dnevnim Eta prognozama čiji skorovi su prikazani plavim linijama u funkciji vremena (dani); verifikovani ECMWF T799 analizama. Start prognoza je u 0000 UTC 1. januara 2009.

Na gornjem panelu slike 11 su prikazane RMS razlike vetra na nivou pritiska od 250 hPa za oba ansambla: Etin ansambl prognoza opet pokazuje blago bolji skor od ansambla ECMWF modela. Plava linija, kojom je prikazan skor Eta modela, je gotovo 15 dana u kontinuitetu blago ispod crvene linije, kojom je prikazan skor ansambla ECMWF-a. Pri kraju integracije, u poslednjih 4 dana, vidi se mala razlika između RMS razlika dva ansambla. Oba ansambla pokazuju iste trendove rasta i pada u pogledu bias skora (slika 11, donji panel).



**Sl. 11** Ista kao sl. 10 osim za verifikacione mere – RMS razliku prognoza i analize (gornji panel) i standardni bias (donji panel) vetra na nivou pritiska 250 hPa.

Na slici 12 prikazan je ETSa skor koji se odnosi na izabrani prag brzine vetra veće od  $45 \text{ m s}^{-1}$  za 6 pojedinačnih članova ansambla kod tri verzije modela i to: prognozu globalnog ECMWF modela (crvena linija) i dve verzije prognoza Eta modela dobijene koristeći originalnu Etinu šemu za LBC (u daljem tekstu Eta\_o, plava linija) i relaksacionu šemu za LBC (u daljem tekstu Eta\_r, zelena linija). Prikazani su redom: gore levo – kontrolni član, a zatim idući na dole, a potom na desno i opet odozgo na dole, članovi od 1 do 5.



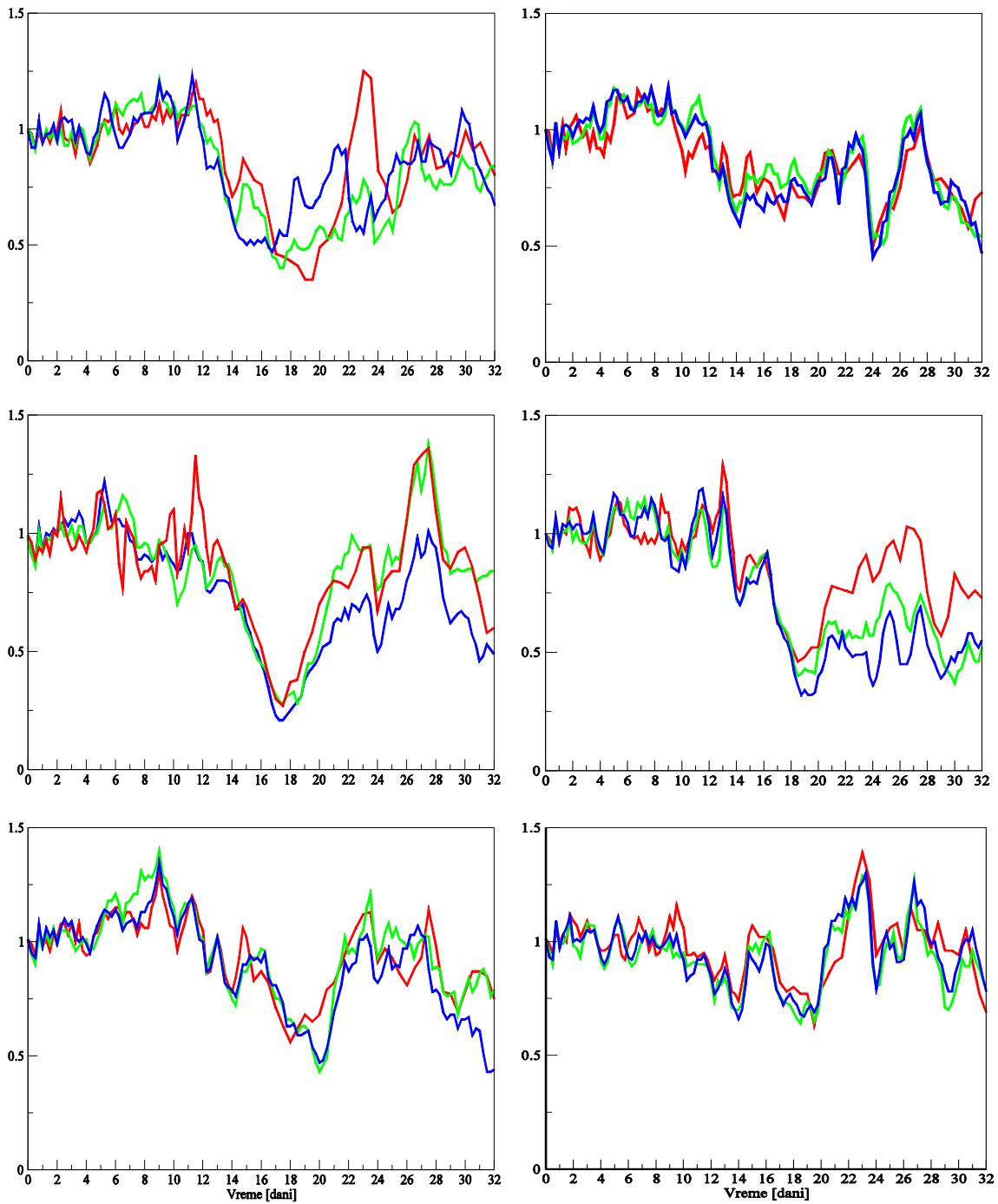
Sl. 12 Biasom podešeni ETSa skor (ETSa) za šest 32-dnevnih prognoza položaja 250 hPa vetrova jačih od  $45 \text{ m s}^{-1}$ , svaki dobijen za grupu od tri modela/verzije modela: ECMWF globalni model (crvena linija), Eta model sa originalnom šemom za LBC (plava linija) i Eta model sa relaksacionom šemom za LBC (zelena linija). Skorovi su prikazani idući odozgo na dole pa zatim na desno, redom za kontrolni član ansambla (gore levo) i članove od 1-5.

Osim kod kontrolnog i člana br. 4, ne vidi se značajnija prednost jedne verzije modela nad drugim dvema, tokom vremenskog perioda dužeg od 3-4 dana. Što se tiče prognoza dve verzije Eta modela, izuzeci u ovom smislu su dva perioda kontrolne prognoze sa prednošću Eta\_o u periodu 9-13 dana i relaksacije za period 15-19. dan. Najizrazitija prednost jedne verzije prognoze Eta modelom u odnosu na drugu je vidljiva kod člana br. 4 u periodu od 18-20. dana. Najveća prednost Eta\_o nad Eta\_r je u 18.5 danu, i iznosi 0.29. Najveća prednost Eta\_r nad Eta\_o je kod kontrolnog člana, 16.5 dana i iznosi 0.22. Sa druge strane, deluje ohrabrujuće da svaki od modela veći deo vremena pri kraju integracionog perioda od 32 dana, dakle izvan perioda determinističke prognozljivosti, pokazuju prilično dobru prognozljivost položaja najjačih vetrova na nivou mlazne struje.

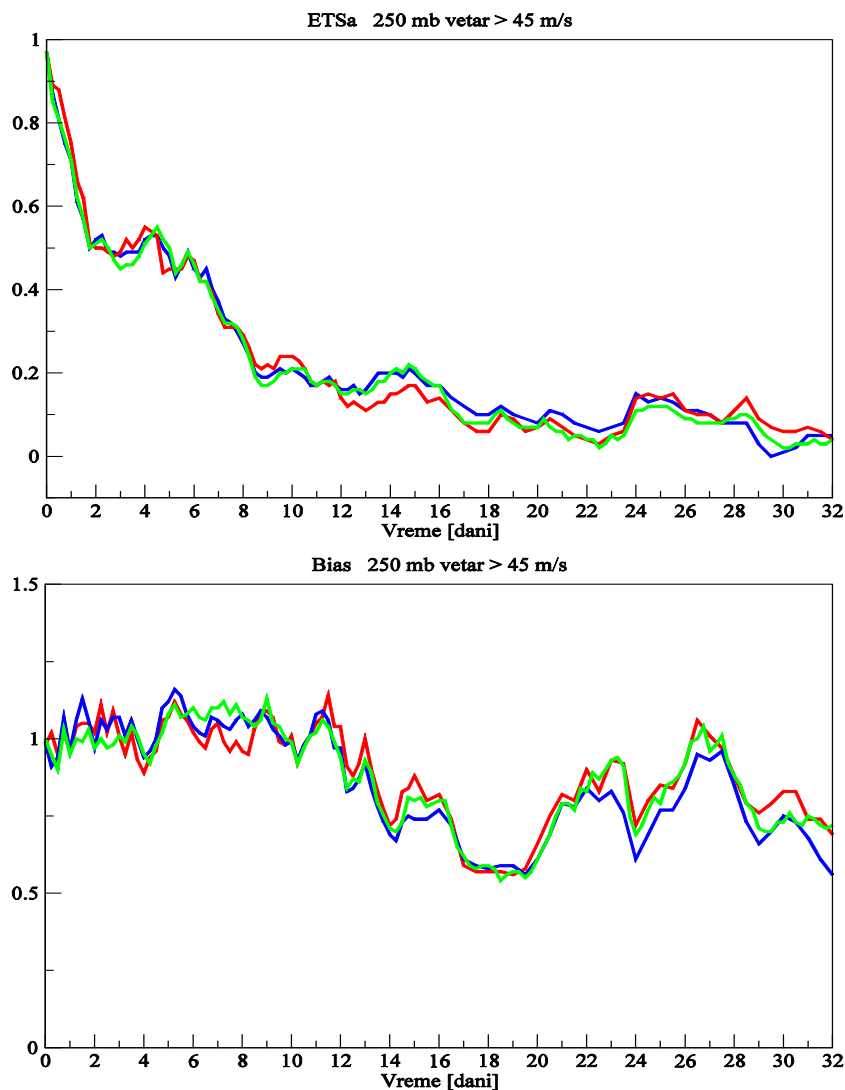
Paralelno sa ETSa skorom računat je odgovarajući bias skor, takođe za vetrove na nivou 250 hPa čija brzina prelazi  $45 \text{ m s}^{-1}$ . Oni su prikazani na slici 13 po istom šablonu kao u slučaju ETSa skora. Gotovo sve prognoze imaju teškoće da pokažu analizirani veliki porast u površini koju zahvataju najjači vetrovi, a koji kulminira u periodu od 18-21. dana (slika 9). Njihovi bias-i pretežno opadaju sa približavanjem tom periodu vremena. Međutim, uočljive su velike razlike u ponašanju setova individualnih članova.

Glavni cilj je videti kakav je sveukupni skor ansambla u pogledu izbora šema za LBC. ETSa skor za skup od 6 članova ansambla za svaku od verzija modela je prikazan na gornjem panelu slike 14. Odgovarajući bias je prikazan na donjem panelu slike 14.

Što se tiče ETSa skora, u prvih 16 dana prognoze ne vidi se značajna prednost jedne verzije Eta modela u odnosu na drugu. Nakon toga vidljiva je mala prednost Eta\_o u periodu od 16-20. dana. Ovo je praćeno periodom od oko 7 dana iako male, veoma održive prednosti Eta\_o sve do pred kraj integracionog perioda, kada Eta\_r tokom kraćeg perioda, od 2.5 dana, ima prednost. Iako nije uočljiva ubedljiva prednost jednog Eta ansambla nad drugim može se zasigurno konstatovati blaga prednost prognoze sa Etinom originalnom šemom za LBC, vidljiva na gornjem panelu slike 14. Bias razlika između pojedinačnih setova ansambala koja je bila uočljiva na slici 13 je nestala u oceni celog ansambla.



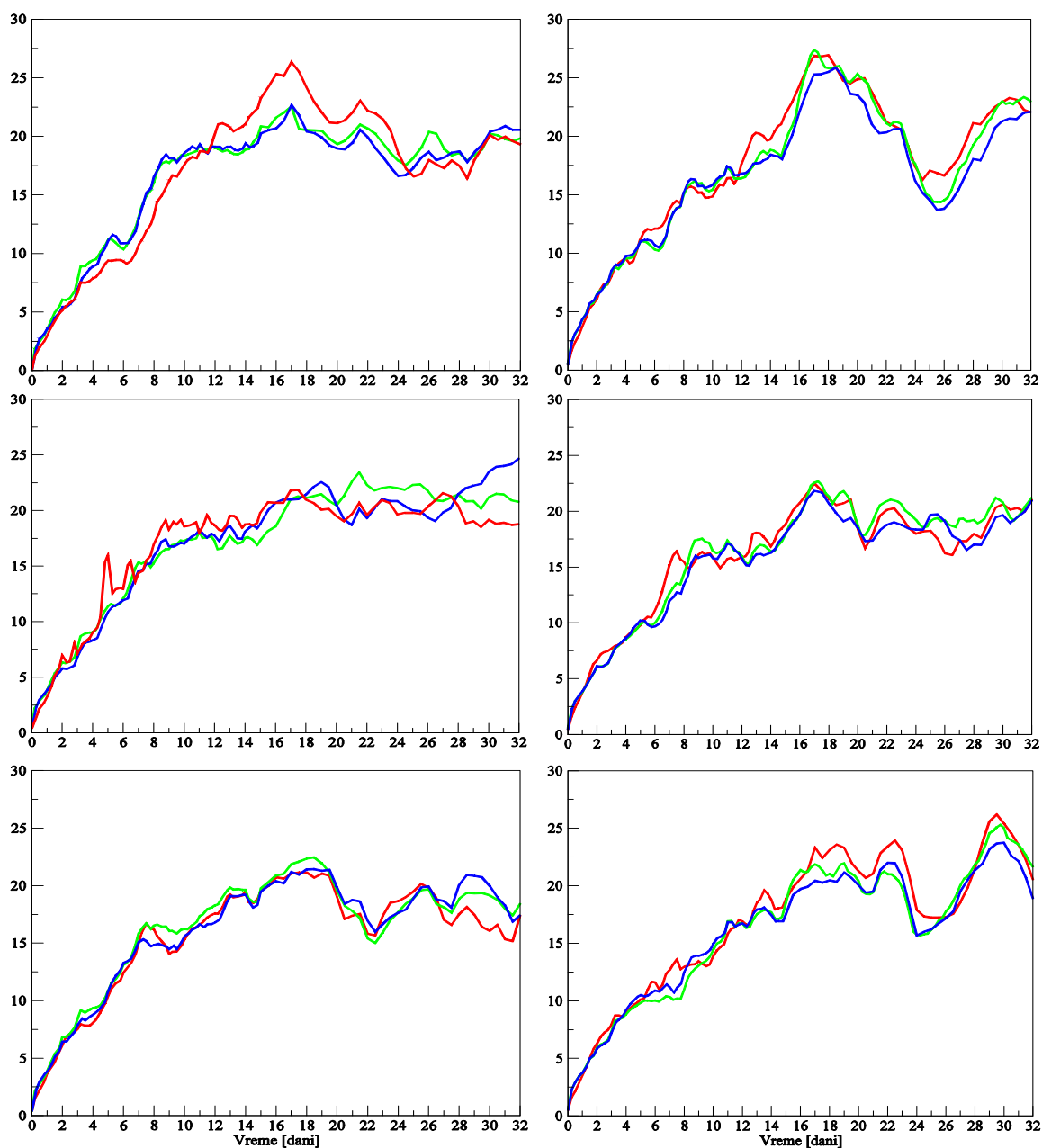
Sl. 13 Isto kao na sl. 12, samo za bias.



**Sl. 14** Bias podešeni ETS skor (ETSa), gornji panel, i bias, donji panel, brzine vetra na nivou 250 hPa koja je  $\geq 45 \text{ m s}^{-1}$ , gornji panel, i standardni bias, donji panel, za tri ansambla od po šest prognoza: Eta modela u dve verzije – koristeći standardnu šemu za LBC, plave linije, i Davies-ovu relaksacionu šemu, zelene linije i ECMWF globalnog modela, crvene linije.

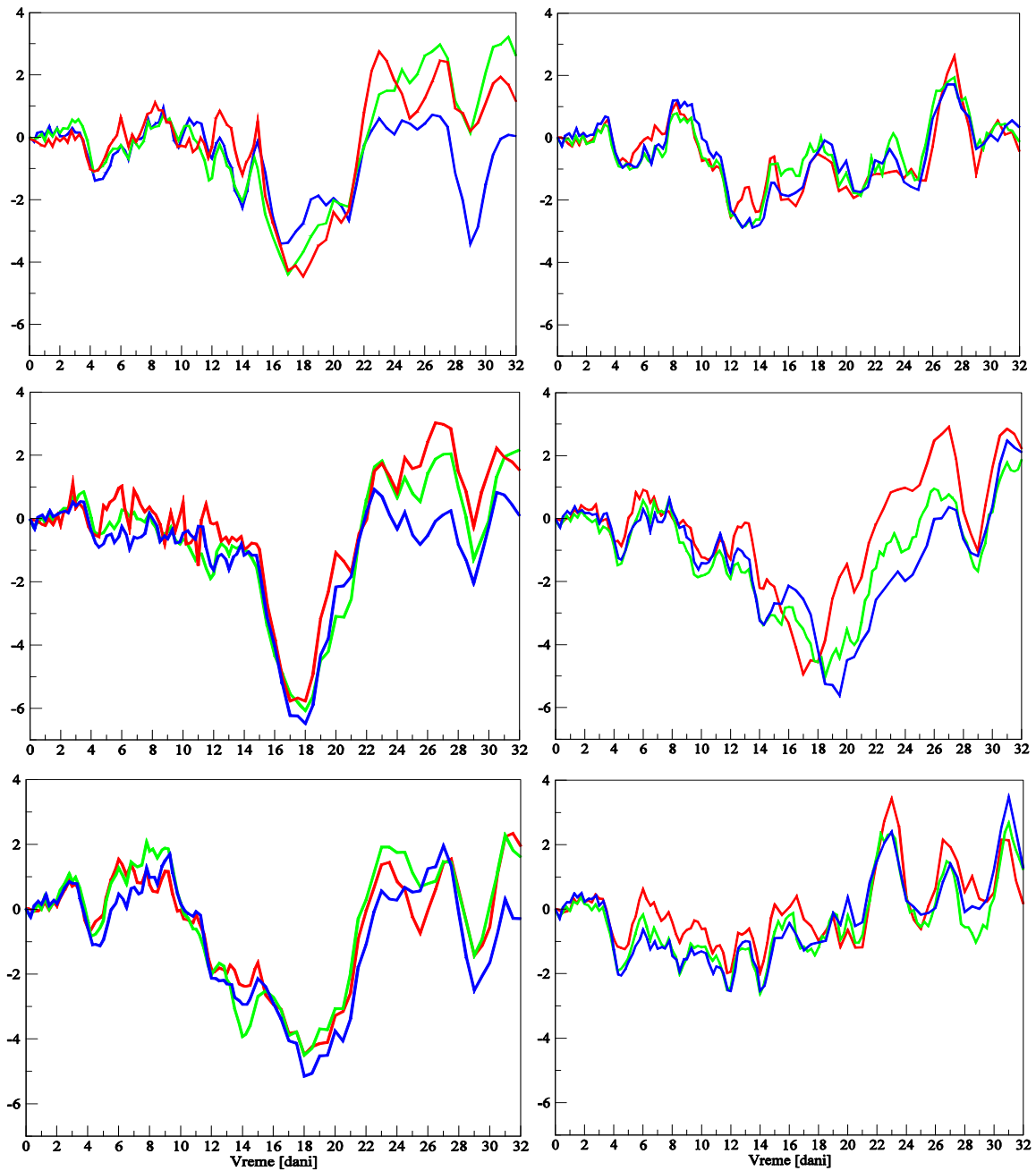
Tradicionalno se u verifikaciji prave RMSE i standardni bias, pa su ovde izračunate rms razlike za 250 hPa vetar između prognoza i ECMWF analiza, za globalni i dve verzije Eta modela. Šablon po kom su ovi skorovi predstavljeni na slikama 15 i 16 je isti kao u slučaju slika 12 i 13. Iako ova verifikacija nije fokusirana na sinoptički najdominantnije osobine kao što je to u slučaju slike 12, rms razlika je verovatno najveća na mestima gde je brzina vetra najveća, dok se na ostalim delovima ne može očekivati neka bitnija razlika u odnosu na ono što je vidljivo praćenjem ETSa skora. Može se videti refleksija rezultata sa slike 12 na rezultate na slici 15, kao što su: relativno loš ETSa skor kontrolnog člana globalnog modela u periodu od 17-22. dana, veoma loš

ETSa skor za član br. 1 kod Eta\_o prognoze na kraju integracionog perioda, dva računava ETSa pika kod člana br. 4 u prognozi Eta\_o centrirana oko 19. dana i veoma upadljiv pik kod člana br. 5 u obe verzije prognoza Eta modelom. Maksimalna prednost Eta\_o nad odgovarajućom Eta\_r se vidi kod člana br. 1, 21. dana i iznosi oko  $3,9 \text{ m s}^{-1}$ , dok je, gotovo iste veličine, maksimalna prednost Eta\_r nad odgovarajućom Eta\_o zabeležena kod istog člana na kraju prognoze. Neke od osobina istaknute ovde su reflektovane i na slike koje se odnose na standardni bias 6 setova prognoza, prikazan na slici 16. Međutim, SB neće biti značajno visok u slučaju loše prognoze položaja najjačih vetrova.



Sl. 15 Isto kao na sl. 12, samo za RMS razlike prognoza i ECMWF analiza 250 hPa vetra, u  $\text{m s}^{-1}$ .

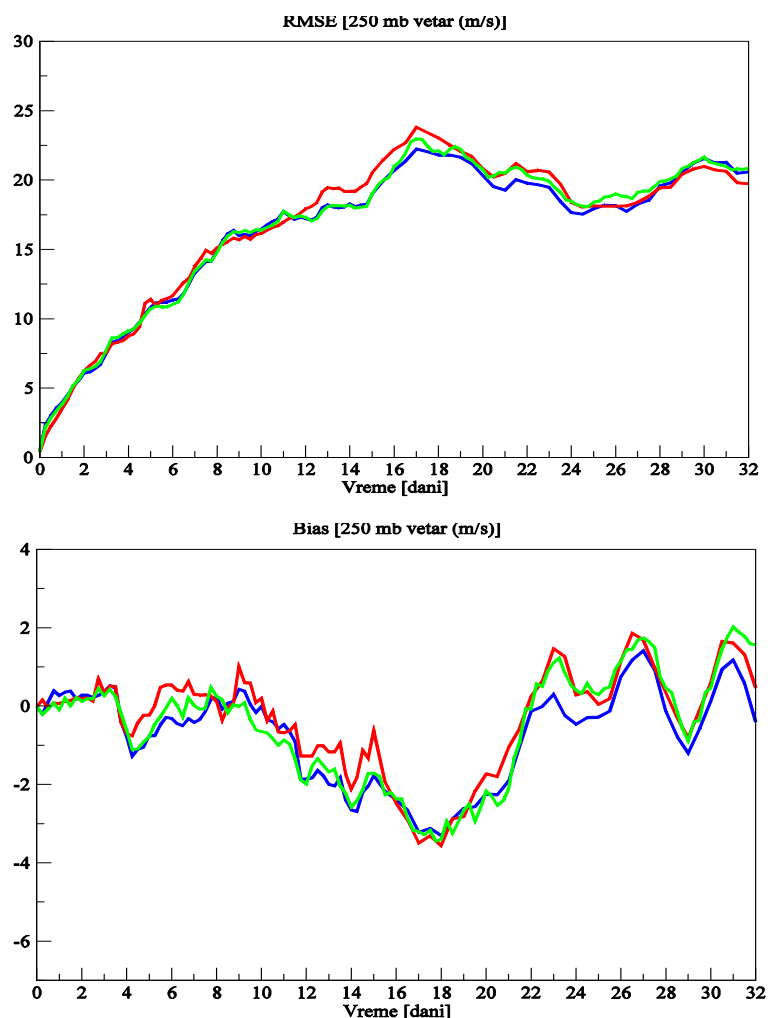




SI. 16 Isto kao na sl. 12, samo za standardni bias 250 hPa vetra, u  $\text{m s}^{-1}$ .

Kao krajnja verifikacija, na slici 17, gornji panel, prikazana je rms razlika između tri seta ansambl prognoza 250 hPa vetra i odgovarajućih ECMWF analiza koristeći isti šablon za boju linija kao na prethodnim slikama. Osim dva pika kod Eta\_r ansambla, 17. i na sredini između 18. i 19. dana postoji jako mala razlika u prikazanim rms skorovima između dva Eta ansambla do sredine 21. dana, odakle nadalje, uključujući i 27. dan, se vidi održiva prednost Eta\_o ansambla. U poslednja četiri dana integracionog perioda opet se vidi veoma mala razlika između dva ansambla Eta modela. U pogledu

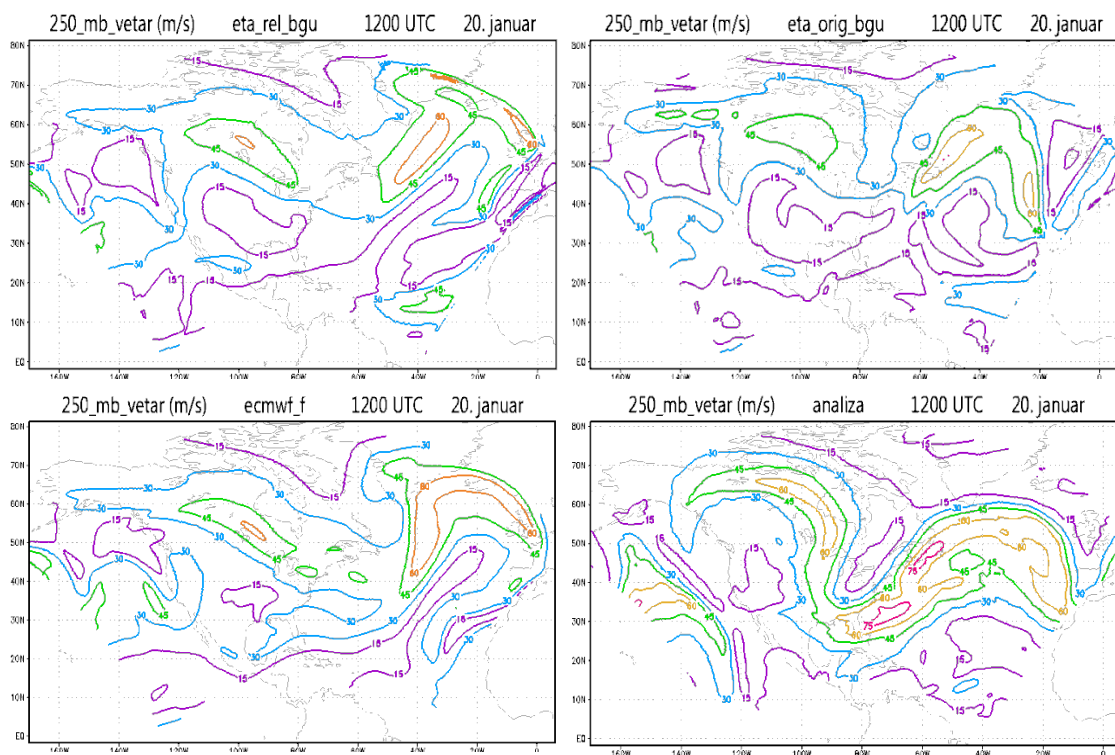
SB skorova, donji panel slike 17, tri ansambla prognoza imaju gotovo isti trend. Uočava se mali bias kod Eta\_o ansambla u periodu od 23-25. dana, koji je u skladu sa prednošću Eta\_o ansambla kada se gleda prethodno opisana rms razlika. Interesantno je da nije uočljiva glavna razlika u *biasima* između ijednog ansambla pri kraju integracionog perioda uprkos značajnim bias-deficitima sva tri ansambla u smislu površine koju zahvataju vetrovi čiji je intenzitet iznad  $45 \text{ m s}^{-1}$ , što se videlo na donjem panelu slike 14. Jedan od razloga zbog koga se ovo moglo dobiti je da je mlazna struja intenzivnija u Etinim prognozama nego u analizama, sa vetrovima iznad  $45 \text{ m s}^{-1}$  koji u isto vreme zahvataju manju površinu od one koja je analizirana. Upravo ovo je prisutno u setu mapa intenziteta vetra na nivou 250 hPa, koji će kasnije biti detaljnije analiziran.



Sl. 17 RMS razlika prognoza i ECMWF analiza, gornji panel, i standardni bias, donji panel, 250 hPa vetra, u  $\text{m s}^{-1}$ , za tri ansambla od po šest prognoza: Eta modela u dve verzije – koristeći standardnu šemu za LBC, plave linije, i Davies-ovu relaksacionu šemu, zelene linije, i ECMWF globalnog modela, crvene linije.

Kada je u pitanju prednost jedne verzije Eta modela nad drugom u pogledu brojnih vrednosti skorova, pažljivim uvidom u prikazane rezultate, naročito na slici 12, može se uočiti da je maksimalna prednost Eta\_o nad Eta\_r vidljiva kod člana br. 4, u trenutku koji je 19.5 dana od starta prognoze i iznosi 0.29. Maksimalna prednost Eta\_r u odnosu na Eta\_o je vidljiva kod kontrolnog člana na sredini između 18. i 19. dana prognoze i iznosi oko 0.22. Maksimalna prednost u pogledu rms razlika se za obe prognoze uočava kod člana br. 1 i to, za Eta\_o 21. dana, a za relaksaciju 32. dana. Oba su oko  $3.9 \text{ m s}^{-1}$ .

Radi pronalazjenja razloga za moguću prednost Eta\_o nad Eta\_r na slici 18 su prikazane karte izoliranja 250 hPa vetra za dve varijante Etine prognoze u slučaju člana br. 4 i to za termin koji se odnosi na 19.5 dana od starta prognoze. Prognoza modela sa relaksacijom je prikazana na gornjem levom panelu, a odgovarajuća Eta\_o na gornjem desnom panelu. Na donjim panelima su prikazani redom, sa leve strane – prognoza globalnog ECMWF modela, član br. 4 i sa desne strane – ECMWF analiza za pomenuti termin. Uočava se da obe varijante Eta modela kao i globalni model daju dobro prognoziran položaje vetrova intenzivnijih od  $45 \text{ m s}^{-1}$  iznad zapadne Kanade. Međutim, ni jedna od tri prognoze ne napravi izolirane oblasti koje se pružaju sa juga u pravcu jugoistoka USA, ali svaka od prognoza daje nastavak ovog oblika koji se pruža preko zapadnog Atlantika na severoistok USA. Međutim, položaj prognoziranog oblika Eta modelom sa originalnom šemom za LBC je mnogo tačniji nego kod druga dva modela, sa najjačim vetrom iznad i severoistočno od Newfoundland-a, gde se vide dva jezgra vetrova iznad  $75 \text{ m s}^{-1}$  koji su prisutni i u analizi, ali zahvataju veću površinu. Na prikazanim kartama se vidi i da je „jezero“ jakih vetrova, iznad  $45 \text{ m s}^{-1}$ , duž severne granice oblasti prilično loše prognozirano globalnim i Eta\_r modelom za razliku od Eta\_o, kod čije prognoze se ne vidi greben koji se pruža severozapadno od ovog jezgra jakih vetrova, što se slaže sa kartom analize.

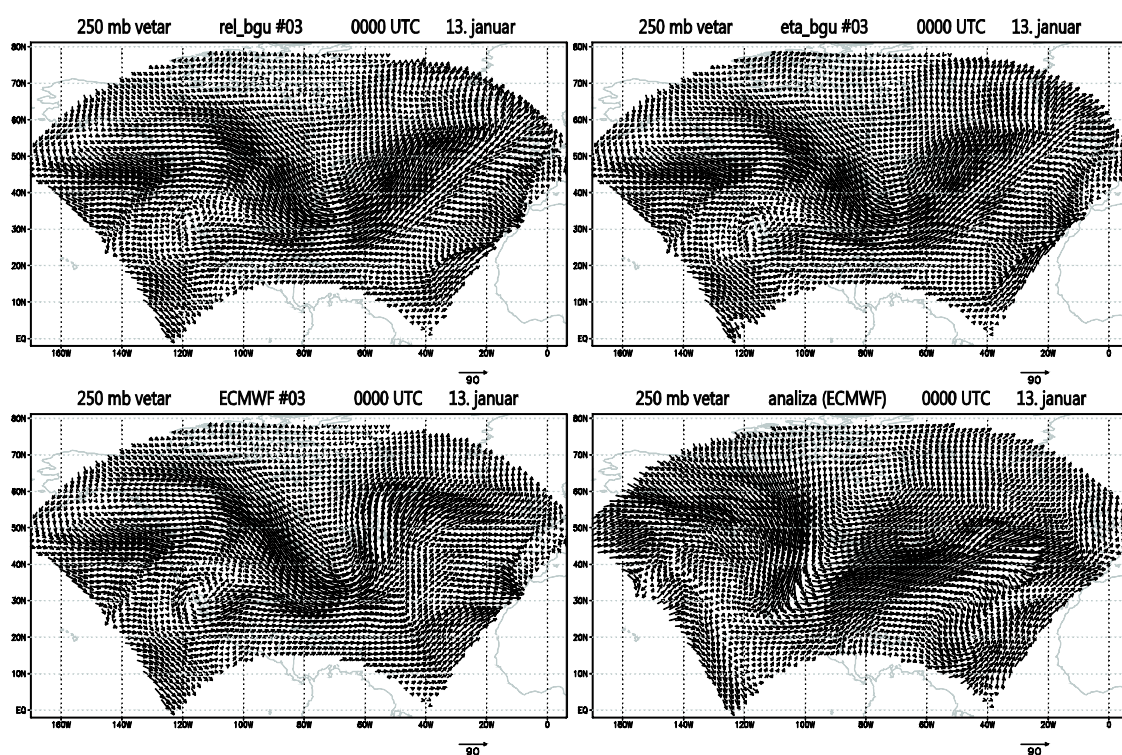


**Sl. 18** Izolinije brzine vetra ( $\text{m s}^{-1}$ ) na nivou pritiska od 250 hPa u intervalu od po  $15 \text{ m s}^{-1}$  za termin 1200 UTC 20. januara 2009: dve prognoze Eta modelom koji je umetnut u ECMWF model, dobijene za član ansambla br. 4 koristeći šemu za relaksaciju LBC, gornji levi panel, i standardnu Etinu šemu za LBC, gornji desni panel; prognoza ECMWF modela za član ansambla br. 4, donji levi panel; i ECMWF analiza, donji desni panel.

Dalje, na gornjem levom panelu slike 18, tj. na karti Eta\_r prognoze, uočljivo je da su na zapadnoj granici konture veoma nepovezane, što može biti odraz teškoća koje je model imao u pogledu uspostavljanja ravnoteže između dinamike unutar oblasti i jake kontrole na bočnim granicama usled primene relaksacione šeme. Takođe, šema je proizvela šta se i očekivalo – vrlo upadljivu sličnost sa onim što se vidi u istočnom delu oblasti na karti prognoze globalnog modela od koga dolaze granični uslovi, a kada je u pitanju tzv. izlazna granica. Ako se, sa druge strane, analizira položaj i oblik površine koju zahvataju vetrovi slabiji od  $15 \text{ m s}^{-1}$  u istočnom delu oblasti vidi se da je upravo usled smanjene kontrole sa granica model prognozirao polje vetra približnije onom koje se zaista dogodilo.

Veoma interesantno zapažanje sugerisano od strane jednog od anonimnih recenzenta je da gotovo da nema razlike između ECMWF prognoze/a i dve varijante Etine prognoze prvih 10 dana, što je približno period determinističke prognizljivosti. Međutim, nakon 10 dana je Eta model imao bolji skor od globalnog ECMWF modela: ako se

pogleda slika 17, gornji panel, vidi se da je Eta model u obe varijante imao manju rms razliku od modela koji mu daje granične uslove počev od 11. dana prognoze duži period vremena, od približno 5.5 dana. Slično se može zaključiti i ako se prati prikazani ETSa skor šestočlanog (mini) ansambla, s tim što se Eta model „odlepi“ od ECMWF-a počev od 12. dana prognoze. Ova pojava se ne može smatrati slučajnom, s obzirom da je u istom vremenskom intervalu i kod skorova za ansamble od 26 članova uočljiva prednost Ete nad ECMWF modelom. Radi pronalaženja razloga za ovakvu prednost, analizirani su individualni članovi mini ansambla, čiji su skorovi prikazani na slikama 12, 13, 15 i 16 i kao najreprezentativniji, izabran je član br. 3. Na slici 19 su za izabrani član ansambla prikazane karte vetrova nivoa 250 hPa kod tri prognoze kao i odgovarajuća analiza, za termin 0000 UTC 13. januar 2009. odnosno dvanaesti dan prognoze. Redosled po kome su karte poređane je isti kao u slučaju slike 18. Kao što su i skorovi



**Sl. 19** Vetar ( $m s^{-1}$ ) na nivou pritiska od 250 hPa na Etinoj oblasti integracije u svakoj šestoj tački mreže, za termin 0000 UTC 13. januara 2009: dve prognoze Eta modelom koji je umetnut u ECMWF model, dobijene za član ansambla br. 3 koristeći šemu za relaksaciju LBC, gornji levi panel, i standardnu Etinu šemu za LBC, gornji desni panel; prognoza ECMWF modela za član ansambla br. 3, donji levi panel; i ECMWF analiza, donji desni panel.

pokazali, dve Etine prognoze, prikazane na gornjim panelima, su veoma slične: preovlađuje dolina u polju vetra. Nagib doline je, neosporno, karakteristika velikih razmera.

Kod ECMWF modela, donji levi panel, se vidi da se dolina premestila brže i ima negativan nagib. Analiza, prikazana na donjem desnom panelu, pokazuje izraženiji *pozitivan* nagib. Uočljivo je da je Eta model umanjio negativan nagib doline prisutan kod modela koji mu daje granične uslove.

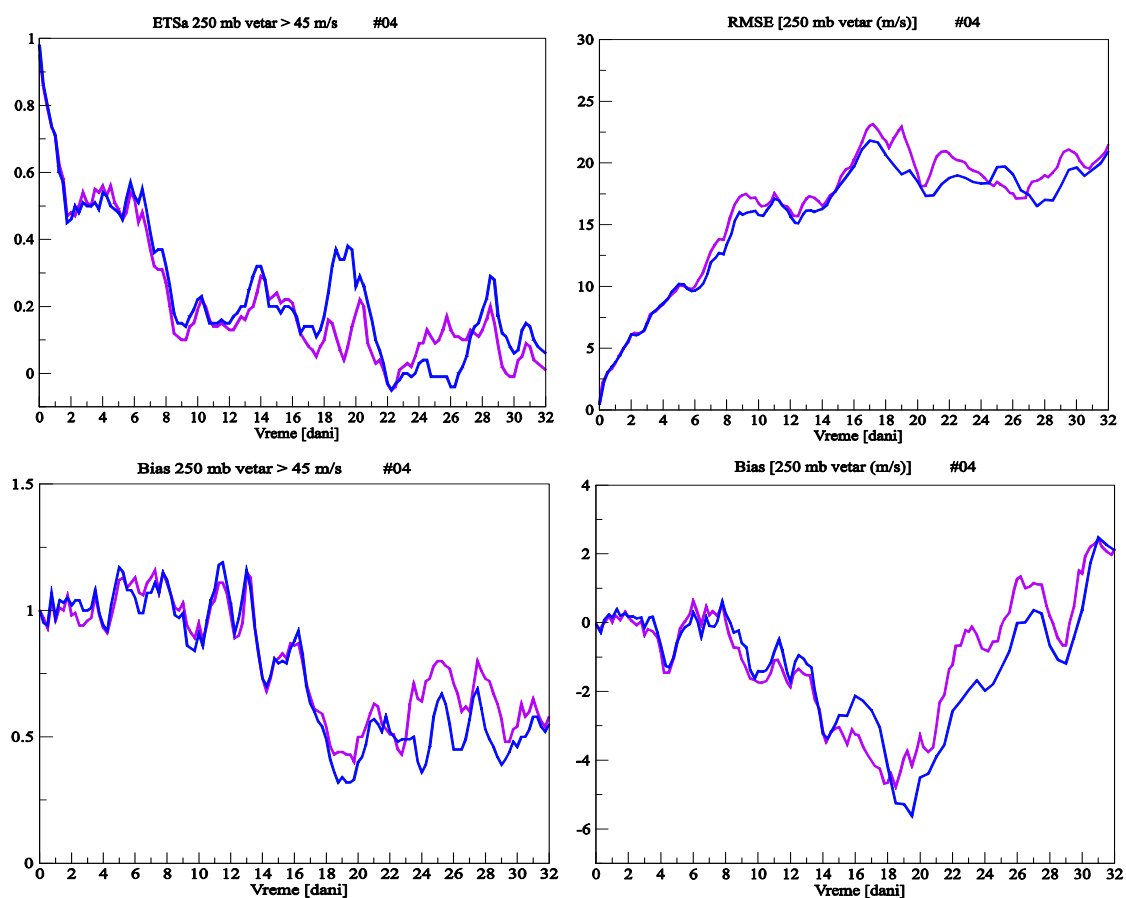
Ranije je više puta pokazano da je u situacijama forsiranja uslovljenog orografijom Stenovitih planina Eta model imao poboljšane prognoze u odnosu na model u koji je umetnut, a da je to poboljšanje bilo manje ili je izostalo kada se eta koordinata zameni sigma koordinatom. Reference u vezi sa ovim se mogu naći kod MESINGER i dr. (2012).

## 4. Da li je oblik funkcije zavisnosti koeficijenata relaksacije od rastojanja od značaja za rezultat?

Prethodno je istaknuto da su dvojica anonimnih recenzenata našeg članka za časopis insistirali na zameni linearne zavisnosti koeficijenata relaksacije od rastojanja nekom od funkcija koje su u novije doba šire zastupljene kada se primenjuje relaksacija LBC. Jedan od recenzenata čak naglašava da se u društvu LAM modelara linearna relaksacija LBC smatra pristupom koji nije dobar. Da bismo ispitali kakav je uticaj promene oblika funkcije zavisnosti koeficijenata relaksacije od rastojanja, izračunali smo jednu prognozu primenom relaksacionih koeficijenata opisanih u radu LEHMANN (1993). Na osnovu ETsa skorova pojedinačnih članova ansambla prognoza (slika 12), izabrali smo da prognozu izračunamo za član br. 4, jer je kod ovog člana prognoza Eta modelom sa originalnom šemom za LBC imala najveću prednost u odnosu na onu koja koristi linearnu relaksacionu šemu. Na slici 20 su prikazani skorovi analogni onim prikazanim na slikama 12 i 13, kao i 15 i 16, izuzev što se sada porede skorovi Etinih prognoza sa originalnom šemom za LBC (plave linije) i nelinearnom relaksacionom šemom (ciklama linije). Analizom ETsa skora, prikazanog na gornjem levom panelu, može se uočiti da prednost šeme sa nelinearnim koeficijentima u odnosu na originalnu etinu šemu počinje nakon 22 dana integracije i najveća je od 25. do 26. dana. Slično se može zaključiti i na osnovu skora rms razlika, prikazanog na gornjem desnom panelu, gde je vidljiva prednost Eta\_r nad Eta\_o od 25. do 26. dana. Međutim, 19. i 20. dana upadljiva je velika prednost prognoze sa Eta\_o i, ako se uporedi sa onom kod linearne relaksacije, vidi se da je prednost blago uvećana. U pogledu rms razlika uočljivo je da se sa nelinearnom relaksacijom dobije malo poboljšanje u odnosu na linearnu relaksaciju u periodu od 25. do 27. dana. U desetodnevnom periodu od 12. do 22. dana rms razlike su blago veće kod prognoze sa nelinearnim u odnosu na prognozu sa linearnim koeficijentima relaksacije.

Radi potvrde pretpostavke da nelinearna relaksacija nije od većeg značaja za rezultate u poređenju sa linearnom relaksacijom, ista prognoza je izračunata i sa primenom

Lehmann-ovih koeficijenata u zoni širokoj 8 tačaka. U pogledu skorova nije dobijeno vidno poboljšanje.



**Sl. 20** Skorovi za verifikaciju analogni onim prikazanim na sl. 11,12,14 i 15, samo za 4-ti član ansambla. Etine prognoze sa originalnom šemom za LBC (plave linije) i relaksacionom šemom sa Lehmann-ovim (1993) koeficijentima (pink linije). Gornji paneli: levo – ETSa, desno – rms razlike. Donji paneli: levo – bias, desno – standardni bias.

Mali uticaj oblika funkcije zavisnosti relaksacionih koeficijenata od rastojanja, koji je dobijen u ovom eksperimentu, može biti posledica toga što Eta model ima šemu za uzvodnu advekciju u tri spoljašnja reda oblasti integracije, tako da je sprečena refleksija talasa na granici koja se pojavljuje usled predefinisaniosti LBC.



## 5. Diskusija i zaključci

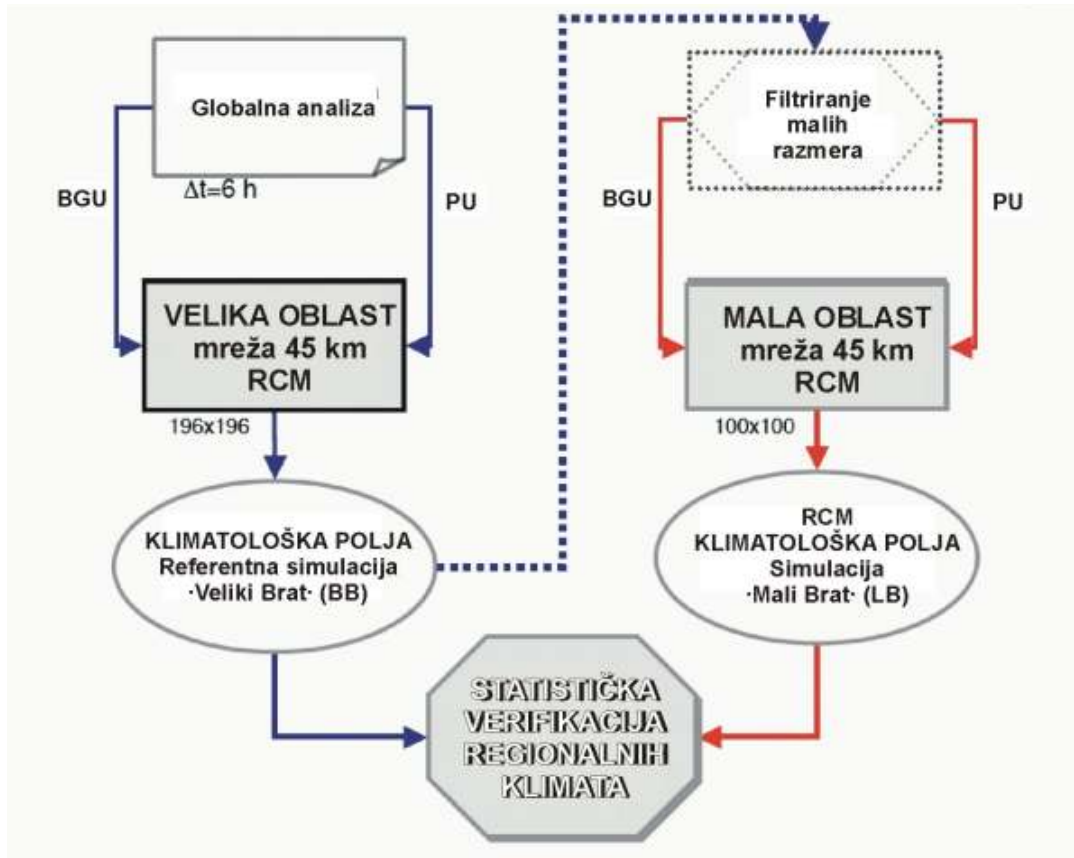
Sa ciljem dobijanja odgovora na glavno pitanje, da li regionalni klimatski model, u ovom slučaju Eta, može da očuva cirkulaciju velikih razmera koja je prisutna kod modela sa grubljim razlaganjem, od koga dolaze bočni granični uslovi, urađen je eksperiment u kom je Eta model umetnut u ECMWF globalni model koji pravi 32-dnevne ansambl prognoze. Ansambl se sastojao od kontrolnog i još 25 članova. Takođe se tražio odgovor na pitanje da li je uveliko zastupljena Davies-ova relaksaciona šema za bočne granične uslove neophodna u pogledu prognoze velikih razmera regionalnim modelom, s obzirom na to da je računski zahtevnija i skuplja od Etine standardne šeme, a i sa matematičke tačke gledišta nije najbolji izbor. U tom cilju napravljeno je šest prognoza Eta modelom koristeći linearnu relaksacionu šemu, gde su za LBC uzete kontrolna i prognoze još 5 članova ansambla ECMWF-a. Na taj način, na raspolaganju su dva seta od po šest prognoza Eta modelom koji se razlikuju samo po šemi koja se koristi za bočne granične uslove.

Kada su u pitanju tri seta prognoza, gde se ispituje uticaj šeme za LBC analizirani su *biasom* podešeni ETS, ovde označen sa ETSa, i bias skor za 250 hPa vetar jači od  $45 \text{ m s}^{-1}$ . Za razliku od standardnog ETS skora, ETSa skor je mnogo manje osetljiv na slučajne pogotke (slika 2 u radu BRILL i MESINGER, 2009) tako da je manje mesta za sumnju da bi se više vrednosti skora dobile usled postojanja modelovog *biasa*, s obzirom na to da se međusobno razlikuju. Analizirajući ETSa skorove tri modela, slike 12 i 14, vidi se da su nakon perioda podešavanja od oko 10 dana, prognoze Eta modelom koji koristi standardnu šemu za LBC imale bolji ETSa skor nego prognoze sa uključenom relaksacijom LBC. Grafici sa verifikacijom vetra putem RMS razlike i standardnog bias-a, dati na slici 17, su takođe pokazali prednost prognoze Eta modelom koji koristi standardnu šemu za LBC (naročito kod kontrolnog člana, na slici 15). Ovi rezultati jasno ukazuju na to da upotreba relaksacione šeme nije neophodna. Naime, Etina standardna i računski manje zahtevna šema za LBC, kod koje su vrednosti iz globalnog modela propisane samo duž spoljašnjeg reda integracione oblasti čime, u terminologiji MCDONALD-a (2003), spada u „sasvim dobro postavljene“ LBC je upotrebljiva, a da ne narušava rešenje unutar oblasti integracije.

Što se tiče glavnog pitanja – veštine prognoziranja velikih razmera umetnutim Eta RCM-om u poređenju sa globalnim modelom od koga dolaze granični uslovi pokazani su skorovi za ansamble koji se sastoje od 26 članova, kontrolni plus 25 dodatnih članova. Fokusirajući se na rezultate posle prvih 10 dana integracije, videlo se da oko 2/3 preostalog integracionog vremena set prognoza Eta modelom sa originalnom šemom za LBC ima blago bolji ETsa skor od modela od koga su uzeti LBC. U preostalom delu integracionog perioda skorovi dva modela, regionalnog i globalnog, su uglavnom izjednačeni. Verifikacija putem rms razlike je povoljnija za Etu. Kao što je već istaknuto, za očekivati je da verifikacija ovog tipa bude povoljnija za ECMWF globalni model, jer je isti model korišćen u asimilaciji. Stoga, ovi rezultati potkrepljuju gledište da u prognozama/simulacijama RCM-om nije neophodno dodatno forsirati velike razmere, kako bi se očuvale cirkulacije velikih razmera koje dolaze iz globalnog modela/reanaliza. Štaviše, u ovom eksperimentu se, načinom na koji je napravljena verifikacija, videlo da je Eta RCM više puta poboljšao cirkulaciju velikih razmera. Nagib doline u polju najjačih vetrova, na nivou mlazne struje, je zasigurno karakteristika velikih razmera. Videlo se da je Eta model smanjio negativan nagib doline koji postoji kod modela od koga je dobio granične uslove, što dodatno potvrđuje zaključak da regionalni Eta model može poboljšati cirkulaciju velikih razmera.

Na kraju, može se postaviti pitanje koja to osobina/e doprinosi da Eta RCM „pobedi“ globalni model i greške koje dolaze kroz LBCe, čak i kada je globalni model favorizovan u smislu analiza koje se koriste za verifikaciju. Prvo što pada na pamet je razlaganje. Razlaganje zasigurno ima pozitivan doprinos rezultatima. Ovde su predstavljeni rezultati za zimsku situaciju kada je dinamika modela od velikog značaja s obzirom na razvijenost mlazne struje koja nailazi na Stenovite planine, tako da se fizički paket parametrizacija modela ne može smatrati da je od presudnog značaja za postignute rezultate. Reklo bi se da reprezentacija orografije, u skladu sa ranijim Eta NWP rezultatima, i eta koordinata (npr. kod MESINGER, 2004) igraju ključnu ulogu u pozitivnim doprinosima rezultatima Eta modela.

# Prilog



Sl. 21 Šematski prikaz sadržaja eksperimenta „Big Brother“. BGU – bočni granični uslovi, PU – početni uslovi. DENIS i dr. (2002)

# Literatura

- ALEXANDRU, A., R. DE ELÍA, R. LAPRISE, L. SEPAROVIC, S. BINER, 2009: Sensitivity study of regional climate model simulations to large-scale nudging parameters. – *Mon. Wea. Rev.* 137, 1666–1686.
- ARAKAWA, A., and V. LAMB, 1977: Computational design of the basic dynamical processes in the UCLA general circulation model. – In *General circulation models of the atmosphere, Methods in computational physics*, 17, J. Chang, editor, Academic press, New York, pp. 174–264.
- BINER, S., D. CAYA, R. LAPRISE, L. SPACEK, 2000: Nesting of RCMs by imposing large scales. – In: Ritchie H. (Ed.): *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. – WMO/TD, No. 987, Report No. 30, 7.3–7.4.
- BRILL, K.F. 2009: A general analytic method for assessing sensitivity to bias of performance measures for dichotomous forecasts. – *Wea Forecast.* 24:307–318.
- BRILL, K.F., F. MESINGER, 2009: Applying a general analytic method for assessing bias sensitivity to bias adjusted threat and equitable threat scores. – *Wea. Forecast.* 24, 1748–1754.
- BURRIDGE, D., 1975: A split semi-implicit reformulation of the Bushby–Timpson 10 level model. – *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 101, 777–792.
- CASTRO, C. L., R.A. PIELKE, SR., G. LEONCINI, 2005: Dynamical downscaling: Assessment of value retained and added using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). – *J. Geophys. Res.* 110, D05108, DOI:10.1029/2004JD004721.
- CHARNEY, J.G., 1962: Integration of the primitive and balance equations. – *Proc. Intern. Symp. Numerical Weather Prediction*, Tokyo, Japan Meteorol Agency, pp 131–152.
- CHARNEY, J.G., R. FJØRTOFT, J. von NEUMANN 1950: Numerical integration of the barotropic vorticity equation. – *Tellus* 2, 237–254.
- CHOU, S.C., J.F. BUSTAMANTE, J.L. GOMES, 2005: Evaluation of seasonal precipitation forecasts over South America using Eta model. – *Nonlin. Proc. Geophys.* 12, 537–555.
- DAVIES, H.C., 1976: A lateral boundary formulation for multi-level prediction models. – *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 102, 405–418.
- , 1983: Limitations on some lateral boundary schemes used in regional NWP models. – *Mon. Wea. Rev.* 111, 1002–1012.
- DENIS, B., R. LAPRISE, D. CAYA, J. COTE, 2002: Downscaling ability of one-way nested regional climate models: The Big-Brother experiment. – *Climate Dynamics* 18, 627–646.
- DURRAN, D. R., 1999: *Numerical methods for wave equations in geophysical fluid dynamics*. – Springer, New York.
- GALLUS, W.A. Jr, J.B. KLEMP, 2000: Behavior of flow over steporography. – *Mon. Wea. Rev.* 128(4), 1153–1164.
- GIORGI, F., 2006: Regional climate modeling: Status and perspectives. – *J. Phys. IV France* 139, 101–118.
- GIORGI, F., M.R. MARINUCCI, G.T. BATES, G. DECANIO, 1993b: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. – *Mon. Wea. Rev.* 121, 2814–2832.
- GIORGI, F., L. O. MEARNES, 1999: Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. – *J. Geophys. Res.* 104(D6), 6335–6352, DOI:10.1029/98JD02072.
- HAMILL, T.M., 1999: Hypothesis tests for evaluating numerical precipitation forecasts. – *Wea. Forecast* 14, 155–167.
- HAMILL, T. M., J. JURAS, 2006: Measuring forecast skill: is it real skill or is it the varying climatology? – *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 132, 2905–2923.

- HOGAN, R.J., A.T.F. CHRISTOPHER, I.T. JOLLIFFE, D.B. STEPHENSON, 2010: Equitability revisited: Why the “Equitable Threat Score” is not equitable. – *Wea. Forecast* 25, 710–726.
- JANJIC, Z.I., 1979: Forward-backward scheme modified to prevent two-grid-interval noise and its application in sigma coordinate models. – *Contrib. Atmos. Phys.*, 52, 69–84.
- , 1984: Nonlinear advection schemes and energy cascade on semi-staggered grids. – *Mon. Wea. Rev.* 112, 1234–1245.
- , 1990: The step-mountain coordinate: Physical package. – *Mon. Wea. Rev.* 118, 1429–1443.
- , 1994: The step-mountain Eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. – *Mon. Wea. Rev.* 122, 927–945.
- JONES, R. G., J. M. MURPHY, M. NOGUER, 1995: Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. – *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 121, 1413–1449.
- KATSAFADOS, P., A. PAPADOPOULOS, G. KALLOS, 2005: Regional atmospheric response to tropical Pacific SST perturbations. – *Geophys. Res. Lett.* 32, L04806, DOI:10.1029/2004GL021828.
- LAPRISE, R., R. DE ELÍA, D. CAYA, S. BINER, P. LUCAS-PICHER, E. DIACONESCU, M. LEDUC, A. ALEXANDRU, L. SEPAROVIC, 2008: Challenging some tenets of Regional Climate Modelling. – *Meteor. Atmos. Phys.* 100, 3–22.
- LEHMANN R., 1993: On the choice of relaxation coefficients for Davies’ lateral boundary scheme for regional weather prediction models. *Meteorol. Atmos. Phys.* 52, 1–14.
- LIANG, X.-Z., K. E. KUNKEL, A. N. SAMEL, 2001: Development of a regional climate model for U.S. Midwest applications. Part I: Sensitivity to buffer zone treatment. – *J. Climate* 14, 4363–4378.
- LO, J. C.-F., Z.-L. YANG, R. A. PIELKE, SR., 2008: Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. – *J. Geophys. Res.* 113, D09112, DOI:10.1029/2007JD009216.
- MARBAIX, P., H. GALLÉE, O. BRASSEUR, J. P. VAN YPERSELE, 2003: Lateral Boundary Conditions in Regional Climate Models: A Detailed Study of the Relaxation Procedure. – *Mon. Wea. Rev.* 131, 461–479.
- MCDONALD, A., 1997: Lateral boundary conditions for operational regional forecast models; a review. – HIRLAM Tech Rep 32, p 32. [Available from Irish Meteorological Service, Glasnevin Hill, Dublin 9, Ireland.]
- MCDONALD, A., 2003: Transparent boundary conditions for the shallow-water equations: Testing in a nested environment. – *Mon. Wea. Rev.* 131, 698–705.
- MESINGER, F., 1974: An economical explicit scheme which inherently prevents the false two-grid-interval wave in the forecast fields. Proc. Symp. “Difference and Spectral Methods for Atmosphere and Ocean Dynamics Problems”, Academy of Sciences, Novosibirsk 1973; Part II, pp 18–34.
- , 1977: Forward-backward scheme, and its use in a limited area model. – *Contrib. Atmos. Phys.* 50, 200–210.
- , 1981: Horizontal advection schemes of a staggered grid - an enstrophy and energy-conserving model. – *Mon. Wea. Rev.* 109, 467–478.
- , 1984: A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. – *Riv. Meteor. Aeronautica* 44, 195–202.
- , 2004: The Eta model: Design, history, performance, what lessons have we learned? – In: Symposium on the 50th anniversary of operational numerical weather prediction, Univ. of Maryland, College Park, MD, 14–17 June 2004, 20 pp., preprints CD-ROM, available from NCEP, 5200 Auth Road, Room 101, Camp Springs, MD 20746-4304, ppt at <http://www.ncep.noaa.gov/nwp50/Presentations/>
- , 2008: Bias adjusted precipitation threat scores. – *Adv. Geosciences* 16, 137–143, available at [www.advgeosci.net/16/index.html](http://www.advgeosci.net/16/index.html).

- MESINGER, F., D. JOVIC, 2004: Vertical coordinate, QPF, and resolution. The 2004 Workshop on the Solution of Partial Differential Equations on the Sphere, Frontier Res. Center for Global Change (FRCGC), Yokohama, Japan, 20-23 July 2004. – CD-ROM, Vol. 2, available at [www.jamstec.go.jp/frcgc/eng/workshop/pde2004/agenda.html](http://www.jamstec.go.jp/frcgc/eng/workshop/pde2004/agenda.html)
- MESINGER, F., S.C. CHOU, J.L. GOMES, D. JOVIC, P.J. BASTOS, J.F. BUSTAMANTE, L. LAZIC, A.A. LYRA, S. MORELLI, I. RISTIC, K. VELJOVIC, 2012: An upgraded version of the Eta model. – *Meteorol. Atmos. Phys.* 116, 63–79.
- MIGUEZ-MACHO, G., G.L. STENCHIKOV, A. ROBOCK, 2004: Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations. – *J. Geophys. Res.* 109, D13104, DOI:10.1029/2003JD004495.
- , 2005: Regional climate simulations over North America: Interaction of local processes with improved large-scale flow. – *J. Climate* 18, 1227–1246.
- MITCHELL, K., M.J. FENNESSY, E. ROGERS, J. SHUKLA, T. BLACK, J. KINTER, F. MESINGER, Z. JANJIC, E. ALTSHULER, 2001: Simulation of North American summertime climate with the NCEP Eta Model nested in the COLA GCM. – *GEWEX News*, 11, No. 1, 3–6, available at [www.gewex.org/gewex\\_nwsltr.html](http://www.gewex.org/gewex_nwsltr.html).
- OLIGER, J., A. SUNDSTRÖM, 1978: Theoretical and practical aspects of some initial boundary value problems in fluid dynamics. – *SIAM J. Appl. Math.* 35, 419–446.
- ORLANSKI, I., 1976: A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. – *J. Comp. Phys.* 21, 251–269.
- PERKEY, D. J., and C. KREITZBERG, 1976: A time dependent lateral boundary scheme for limited area primitive equations models. – *Mon. Wea. Rev.* 104, 744–755.
- PHILLIPS, N.A., 1957: A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting. – *J. Met. Soc.* 14, 184–185.
- RANDALL, D. A., 1994: Geostrophic adjustment and the finite-difference shallow-water equations. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 1371–1377.
- ROCKEL, B., C.L. CASTRO, R.A. PIELKE SR., H. VON STORCH, G. LEONCINI, 2008: Dynamical downscaling: Assessment of model system dependent retained and added variability for two different regional climate models. – *J. Geophys. Res.* 113, D21107, DOI:10.1029/2007JD009461.
- SANCHEZ-GOMEZ, E., S. SOMOT, M. DÉQUÉ, 2008: Ability of an ensemble of regional climate models to reproduce weather regimes over Europe-Atlantic during the period 1961–2000. – *Climate Dynamics* 33, 723–736.
- SOMMERFELD, A., 1949: *Partial Differential Equations in Physics*. New York: Academic press.
- VELJOVIC, K., B. RAJKOVIC, M.J. FENNESSY, E.L. ALTSHULER, F. MESINGER, 2010: Regional climate modeling: Should one attempt improving on the large scales? Lateral boundary condition scheme: Any impact? – *Meteorol. Zeitschrift* 19, 237–246.
- VITART, F., R. BUIZZA, M.A. BALMASEDA, G. BALSAMO, J.-R. BIDLOT, A. BONET, M. FUENTES, A. HOFSTADLER, F. MOLteni, T.N. PALMER, 2008: The new VarEPS-monthly forecasting system: A first step towards seamless prediction. – *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 134, 1789–1799.
- VON STORCH, H., H. LANGENBERG, F. FESER, 2000: A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. – *Mon. Wea. Rev.* 128, 3664–3673.

## Biografija autora

Katarina Veljović je rođena 22. jula 1976. u Kolašinu. Osnovnu i srednju školu je završila u Kolašinu kao nosilac diplome „Luča“. Diplomirala je 23. novembra 2000. godine na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer meteorologija, sa srednjom ocenom 9.03. Tema diplomskog rada je bila „Primena potencijalne vrtložnosti u analizi i prognozi vremena“. Na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu počela je da radi 1. septembra 2001. godine, kada je izabrana u zvanje asistenta-pripravnika. Magistrirala je 1. decembra 2005. godine i tema magistarske teze je bila: „Uticaj bočnih graničnih uslova na dugotrajne integracije Eta modela“. Izabrana je u zvanje asistenta iz uže naučne oblasti Sinoptička meteorologija. Drži vežbe iz predmeta *Analiza vremena*, *Dinamika oblaka* i *Mikrofizika oblaka*.

Najznačajnije međunarodne naučne publikacije proistekle iz izrade doktorske disertacije su:

- Mesinger F, K. Veljovic, 2012, Limited area NWP and regional climate modeling: a test of the relaxation vs Eta lateral boundary conditions. – *Meteorology and Atmospheric Physics*, DOI 10.1007/s00703-012-0217-5.
- Veljovic K., B. Rajkovic, M. J. Fennessy, E. L. Altshuler, F. Mesinger, 2010, Regional climate modeling: Should one attempt improving on the large scales? Lateral boundary condition scheme: Any impact? – *Meteorologische Zeitschrift*, **19**: 237-246.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а Катарина Вељовић  
број индекса D12/2006

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ПОБОЉШАЊА РЕГИОНАЛНИХ ПРОГНОЗА У ОДНОСУ НА  
ГЛОБАЛНЕ КФД ДУГОТРАЈНИХ ИНТЕГРАЦИЈА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 29. НОВЕМБРА 2012.

Katarina Veljovic



Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора КАТАРИНА ВЕЉОВИЋ  
Број индекса D12/2006  
Студијски програм МЕТЕОРОЛОГИЈА  
Наслов рада ПОБОЉШАЊА РЕГИОНАЛНИХ ПРОГНОЗА УДАНОСУ НА ГЛОБАЛНЕ  
КОД АУТРОТАЛНИХ ИНТЕГРАЦИЈА  
Ментори АКАДЕМИК ФЕДОР МЕСИНГЕР И ПРОФ. ДР БОРИВОЈ РАЈКОВИЋ

Потписани/а КАТАРИНА ВЕЉОВИЋ

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 29. НОВЕМБРА 2012.

Katarina Veljovic

Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ПОБОЉШАЊА РЕГИОНАЛНИХ ПРОГНОЗА У ОДНОСУ НА ГЛОБАЛНЕ  
КОД ДУГОТРАЈНИХ ИНТЕГРАЦИЈА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 29. НОВЕМБРА 2012.

Katarina Marković

1. Ауторство - Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.