

PROSTORNA RAZDIOBA BRZINE VJETRA NA PODRUČJU HRVATSKE DOBIVENA NUMERIČKIM MODELOM ATMOSFERE ALADIN

Spatial distribution of wind speed in Croatia obtained using the ALADIN model

ALICA BAJIĆ, STJEPAN IVATEK-ŠAHDAN, KRISTIAN HORVATH

Meteorological and Hydrological Service,
Grič 3, 10000 Zagreb, Croatia

bajic@cirus.dhz.hr

Prihvaćeno 21.5.2009. u konačnom obliku 28.9.2009.

Sažetak: U radu su dani prvi rezultati izrade klimatski reprezentativne prostorne razdiobe brzine vjetra kao osnovne veličine za procjenu energetskeg potencijala vjetra na složenom terenu Hrvatske. Pri tome je korištena metoda dinamičke prilagodbe globalnih reanaliza ERA-40 na mrežu točaka veće horizontalne razlučivosti (8 km) upotrebom spektralnog, prognostičkog modela ALADIN. Podaci su potom adaptirani na mrežu točaka od 2 km horizontalne razlučivosti metodom dinamičke adaptacije. Klimatologija vjetra u prizemnom graničnom sloju proračunata je kroz razdoblje od 10 godina (1992-2001) s podacima vremenske razlučivosti 60 minuta za parametre brzine i smjera vjetra te maksimalnih 10-min udara.

Konvencionalna verifikacija modeliranih vrijednosti brzine vjetra, napravljena na 5 mjernih postaja koje reprezentiraju različite klimatske zone u Hrvatskoj, ukazuje da je primijenjena metoda uspješno provedena. Najbolji rezultati postignuti su u području kontinentalne Hrvatske gdje sistematska pogreška iznosi oko 1% srednje godišnje brzine vjetra, dok u obalnom području u blizini složenog terena te vrijednosti dosežu oko 10% srednje godišnje brzine vjetra. Srednja kvadratična pogreška je manja u ravnom nego u složenom terenu, no neovisno o lokaciji u prosjeku iznosi oko 10% srednje godišnje brzine vjetra. Iznimka je postaja Zagreb Maskimir, gdje je manja točnost modela rezultat njezine urbane okoline. Spektralna usporedba izmjerenih i modeliranih vrijednosti vjetra u vremenskoj domeni ukazuje da je primarni maksimum spektralne snage koji karakterizira prolasku sinoptičkih procesa dobro modeliran, kao i sekundarni dnevni i tercijarni poludnevni maksimumi vezani za obalnu cirkulaciju. Nasuprot tome, spektralna snaga dnevnih cirkulacija u kontinentalnoj Hrvatskoj donekle je podcijenjena, slično kao i snaga u području vremenskih perioda manjih od poludnevni.

Abstract: This paper presents the first results of a climatologically representative spatial distribution of wind speed, a primary component of wind resource assessment in the complex terrain of Croatia. For this purpose, a dynamical downscaling of ERA-40 reanalysis was performed to an 8-km horizontal grid resolution, using the ALADIN spectral prognostic model. Subsequently, the model data were dynamically adapted to a 2-km horizontal grid resolution. Wind climatology in the planetary boundary layer was assessed over a 10-year period (1992-2001) with 60-min frequency of wind speed and direction, and maximal 10-min gust data.

Conventional verification of the modelled wind speeds, carried out at 5 measurement stations representing the different climate regimes of Croatia, suggests that the downscaling was successful. The best results were achieved in continental Croatia, where the bias equals 1% of mean wind speed, while in the coastal area, in the vicinity of complex terrain, these values are close to 10%. The root-mean square error is smaller in flat than in complex terrain, equalling almost 10% of mean wind speed, independently of the station location. The exception is the Zagreb-Maksimiri station, where lower model accuracy is due to its urban surroundings. Spectral verification in the temporal domain indicates good model performance in the spectral power primary maximum related to synoptic systems, as well as in the secondary diurnal and tertiary semidiurnal maxima associated with sea/land breeze circulation. By contrast, the spec-

tral power of diurnal circulation in continental Croatia is somewhat underestimated, as is the spectral power of periods less than semidiurnal.

1. UVOD

Usljed pomanjkanja osnovnih energenata, sve većih potreba za dodatnim količinama energije, kao i zbog očuvanja okoliša, već duže vrijeme nameće se potreba za istraživanjem mogućnosti upotrebe tzv. obnovljivih izvora energije. Jedan od takvih prirodnih obnovljivih izvora energije je i vjetar. Najizravnija i najtočnija metoda određivanja energetskog potencijala vjetra na nekoj lokaciji je uspostava višegodišnjih mjerenja brzine i smjera vjetra. Mjerenje omogućava opis svih značajki strujanja relevantnih za energetsko iskorištavanje energije vjetra, primjerice proračun snage vjetra, učestalost pojedinih brzina, sezonski hod i dr. No, zbog velike prostorne varijabilnosti atmosfere, brojnih lokalnih utjecaja na strujanje, kao i zbog prisutnosti termički uzrokovane lokalne cirkulacije, izmjereni podaci reprezentativni su samo za usko područje oko mjerne lokacije. Ako se zbog cijene isključi mjerenje vjetra na nerazumno gustoj mreži točaka, jedini znanstveno utemeljeni način da se dobije klimatski reprezentativna razdioba brzine vjetra koja je osnova za procjenu energetskog potencijala je korištenje numeričkih modela atmosfere.

U meteorološkoj je praksi uobičajeno da se za procjenu energetskog potencijala vjetra u složenom terenu koriste mezoskalni modeli atmosfere, kao oblik dinamičke prilagodbe na mrežu točaka veće horizontalne razlučivosti (eng. „*downscaling*”) podataka reanalize dobivenih na osnovi rezultata globalnih modela atmosfere ili klimatskih modela.

Reanalize globalnih modela su uobičajeno dostupne na mrežama točaka male horizontalne razlučivosti (>100 km). Iako ti podaci mogu biti korisni za procjenu energetskog potencijala vjetra iznad planetarnog graničnog sloja, procjena brzine i smjera prizemnog vjetra globalnim modelima je ograničene točnosti. Razlog tome je da postavke modela i donji rubni uvjeti (teren, prizemne nehomogenosti) nisu formulirani tako da simuliraju procese na skali manjoj od više stotina kilometara i nekoliko sati. Međutim, upravo te prostorne i vremen-

ske skale značajno utječu na klimatologiju vjetra u složenom terenu Hrvatske, gdje su česte mezoskalne pojave kao što su bura i jugo te lokalne obalne i planinske cirkulacije. Stoga, u našim krajevima reanalize globalnih modela nužno moraju biti prilagođene na veću horizontalnu razlučivost da bi pružile reprezentativniju i točniju informaciju o brzini i smjeru vjetra i njihovoj prostornoj promjenjivosti.

Zbog svoje učestalosti i jačine, bura (npr. Smith, 1987; Bajić, 1989) i jugo (Jurčec i sur., 1996) su osobito važni za procjenu energetskog potencijala vjetra u našem području. Kako se ova prostorno i vremenski vrlo promjenjiva atmosferska strujanja najčešće javljaju u sklopu mezoskalnih ciklonalnih sustava u Sredozemlju (Horvath i sur., 2008), a i sama su određena mezoskalnom orografskom perturbacijom, sposobnost mezoskalnih meteoroloških modela za simuliranje nelinearne dinamike i termalnih karakteristika (npr. statičke stabilnosti) zračnih masa vezanih za ove pojave od izrazite je važnosti. Uspješnost modela ALADIN i metode dinamičke adaptacije u simulaciji mezoskalnog strujanja u regiji (npr. Ivatek-Šahdan i Tudor, 2004) stoga je važna prednost u usporedbi s drugim metodama procjene energetskog potencijala vjetra u našem području, poput statističke prilagodbe na veću horizontalnu razlučivost ili horizontalne (vertikalne) interpolacije (ekstrapolacije na veće visine) izmjerenih podataka.

Kako se mezoskalnim modelom uvode nove prostorne i vremenske skale strujanja, verifikacija simulacije mezoskalnih procesa (tj. vjetra) je važno pitanje za kojega prikladni pristup nije jedinstveno određen. Konvencionalna verifikacija modela korištenjem srednje kvadratične pogreške (RMSE) i sistematske pogreške (BIAS) izgleda nedostatna, jer male pogreške u vremenu (ili području nastanka određenog mezoskalnog sustava) mogu značajno pokvariti rezultate ovakve statistike (npr. Mass i sur., 2002). Stoga se sposobnost mezoskalnog modela ALADIN za simuliranje mezoskalnih procesa verificira i spektralnom usporedbom s mjerenjima u vremenskoj do-

meni. Analiza i podjela strujanja na kraće nego dnevne, dnevne i dulje nego dnevne vremenske periode omogućuje komplemetaran i fizikaln uvid u sposobnost mezoskalnog modela ALADIN za simulaciju procesa na ovim vremenskim skalama.

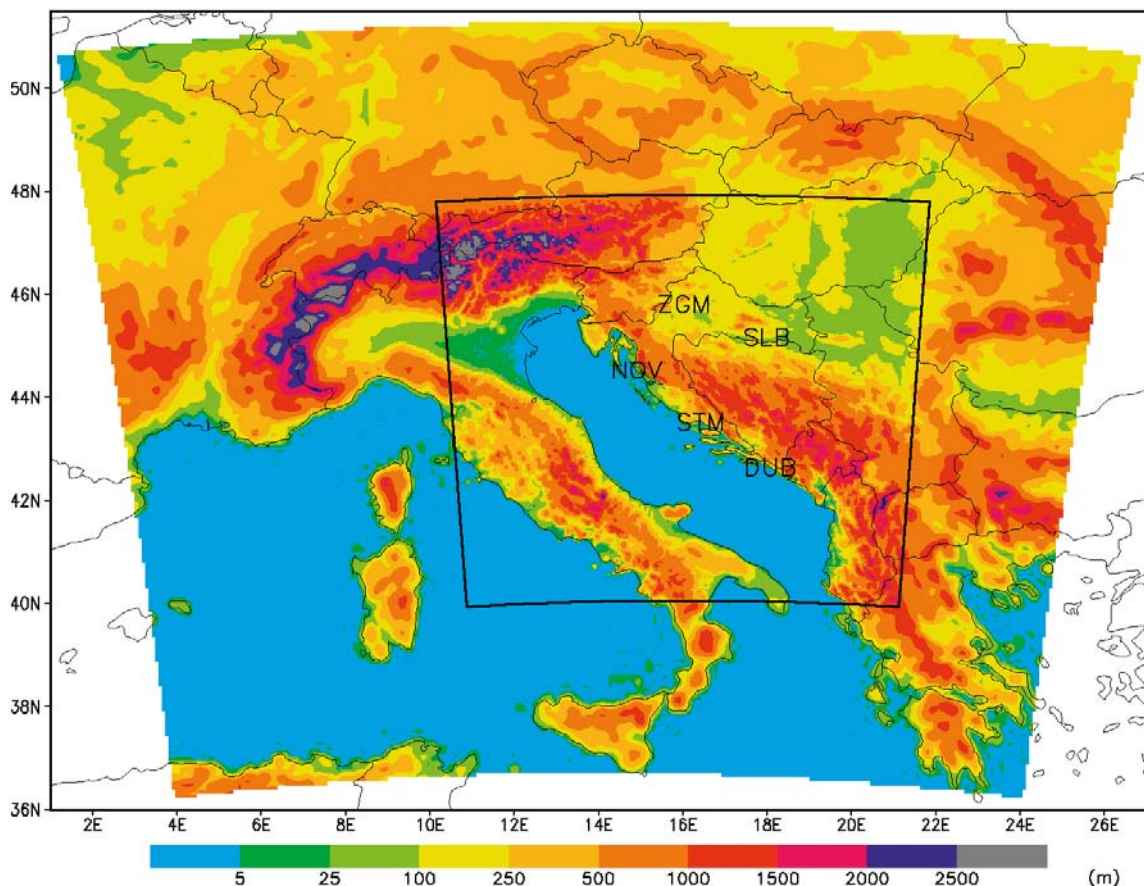
Svrha ovog rada je procjena klimatski reprezentativne prostorne razdiobe brzine vjetra s naglaskom na opis metodologije i verifikaciju dobivenih rezultata, kao i analiza mezoskalne promjenjivosti vjetra putem spektralne dekompozicije.

Detalji primjenjene metodologije opisani su u Pogl. 2. Rezultati primjene modela ALADIN za procjenu prostorne razdiobe vjetra te konvencionalne i spektralne verifikacije prezentirani su u Pogl. 3, dok su zaključci dani u Pogl. 4.

2. METODOLOGIJA

2.1 Model i strategija gniježđenja

Dinamička prilagodba na veću horizontalnu razlučivost je napravljena s hrvatskom verzijom modela ALADIN (Bubnova i sur., 1995), ALADIN/HR. ALADIN je spektralni model sa hibridnom koordinatom (Simmons i Burridge, 1981), koji koristi semi-implicitnu semi-lagrangijansku shemu integracije s dva vremenska koraka (eng. „two-time-level semi-implicit semi-lagrangian scheme”). Fizikalne parametrizacije uključuju parametrizaciju vertikalne difuzije (Louis i sur., 1982) i plitke konvekcije (Geleyn, 1987). Stratiformni i konvektivni procesi razmatraju se pojedinačno s Kessler-ovom vrstom parametrizacije velike skale tzv. „razlučenom oborinom” (Kessler, 1969) i



Slika 1. Integracijska domena modela ALADIN/HR na 8 km horizontalne razlučivosti (vanjska domena) i domena dinamičke adaptacije na 2 km horizontalne razlučivosti (unutrašnja domena) s pripadajućim modelima terena i mjernim postajama odabranim za verifikaciju rezultata modela.

Figure 1. Integration area of the ALADIN/HR model at an 8-km horizontal grid resolution (outer domain) and the domain of dynamical adaptation at a 2-km horizontal grid (inner domain) with the corresponding orography and locations selected for the verification of the model results.

modificiranom Kuo-ovom shemom duboke konvekcije (Geleyn i sur., 1982). Zračenje je opisano prema Geleyn i Hollingsworth (1979) te Ritter i Geleyn (1992). Vertikalni transport vlage i topline u tlu s dva sloja u modelu parametriziran je prema Giard i Bazile (2000).

Postavke modela ALADIN/HR uključuju hidrostatsku verziju s 37 vertikalnih nivoa (najniži nivo modela na 17 m) i 8 km horizontalne razlučivosti. Domena integracije modela prikazana je na Slici 1. Kao početni i rubni uvjeti koristile su se reanalize Europskog centra za srednjeročne prognoze vremena (ECMWF) ERA-40 (Kållberg i sur., 2004), dostupne na prostornoj razlučivosti od ~125 km i vremenskom intervalu od 6 sati. Kako su rezultati dinamičke prilagodbe ERA-40 podataka modelom ALADIN na mrežu točaka od ~10 km horizontalne razlučivosti usporedivi bez obzira koristi li se međudomena (Beck i sur., 2004; Žagar i sur., 2006), napravljeno je direktno gniježđenje (eng. „*nesting*”) modela na globalne podatke. Priprema globalnih podataka za integraciju uključila je prostornu interpolaciju i korištenje filtra za digitalnu inicijalizaciju analize (Lynch i Huang, 1994). Model je inicijaliziran svakodnevno u 12 UTC i integriran kroz prognostičko razdoblje od 42 sata. Nakon starta ALADIN modela postepeno dolaze do izražaja mezoskalni procesi, te do stabilizacije rezultata dolazi nakon prvih nekoliko sati prognoze (eng. „*spin-up*”). Podaci su spremni s vremenskim intervalom od 60 minuta, pri čemu se kao vrijeme stabilizacije uzelo prvih 12 sati integracije. Ta je vrijednost konzistentna s nešto većim omjerom razlučivosti u ulaznim globalnim i izlaznim mezoskalnim podacima te dovoljna da se razvije mezoskalna energija u ALADIN modelu (Žagar i sur., 2006).

Nakon integracije podaci od 12-satnog do 35-satnog prognostičkog razdoblja (s vremenskim razlučivanjem od 60 minuta svaki su dan kroz 10 godina dinamički adaptirani (Žagar i Rakovec, 1999) na mrežu točaka horizontalne razlučivosti od 2 km na smanjenoj domeni (vidi unutrašnju domenu na Sl. 1). Dinamička adaptacija je napravljena upotrebom 30 vremenskih koraka, s reduciranim brojem nivoa iznad 1 km visine iznad tla i uz isključene sve parametrizacije osim parametrizacije vertikalne difuzije.

Za klimatsku sliku strujanja koja reprezentira razdiobu smjera i brzine vjetra na nekom pro-

storu potrebno je raspolagati rezultatima modeliranja u razdoblju od najmanje 10 godina. Kako bi dobiveni rezultati bili što je manje moguće pod utjecajem promjena u postavkama modela (fizici, dinamici i numerici) do kojih dolazi tijekom razvoja i unapređenja svakog modela, kao osnova za svođenje na manju rezoluciju koriste se podaci reanalize koja sadrži rezultate istog modela s istim ulaznim podacima u dužem vremenskom razdoblju. Stoga su u ovom radu korišteni podaci ERA40 reanalize u zadnjem raspoloživom 10-godišnjem razdoblju 1992-2001.

2.2 Opis verifikacije modela

Verifikacija modela napravljena je korištenjem podataka mjerenja smjera i brzine vjetra na 10 m iznad tla na 5 mjernih postaja (vidi Sl. 1) koje reprezentiraju različite klimatske režime u Hrvatskoj tijekom jednogodišnjeg razdoblja (2001). Postaja Slavonski Brod (SLB) je odabrana kao reprezentativna za umjereno kontinentalnu Hrvatsku, Zagreb Maksimir (ZGM) za urbanu kontinentalnu klimu, dok su postaje Novalja (NOV), Split Marjan (STM) i Dubrovnik (DUB) odabrane za verifikaciju modela u primorskoj klimi Hrvatske (npr. Zaninović i sur., 2008). Podaci modela bilinearно su interpolirani na lokaciju mjerne postaje.

Konvencionalna verifikacija modeliranih podataka uključila je proračun srednje kvadratične pogreške (RMSE), multiplikativne sistemske pogreške (MBIAS), srednje pogreške i srednje apsolutne pogreške po uobičajenim jednadžbama (npr. Wilks, 1995). Kako se dio postaja nalazi u složenom terenu i u blizini mora, očekuje se da je značajan dio energije strujanja na tim postajama zastupljen u mezoskalnim dnevnim i kraće nego dnevnim vremenskim skalama i procesima, čije je simuliranje jedna od dodatnih vrijednosti mezoskalnih u usporedbi s globalnim modelima. Komplementarna verifikacija u vremenskoj domeni napravljena je pomoću spektralne dekompozicije izmjerenih i modeliranih vrijednosti brzine vjetra napravljenom metodom Welch (1967). Prije proračuna spektralne snage podacima je uklonjen trend. Postaje odabrane za spektralnu analizu su Slavonski Brod i Dubrovnik, a glavni kriterij za odabir ovih postaja bio je broj nedostajućih podataka, odnosno redovitost rada. Mali broj nedostajućih poda-

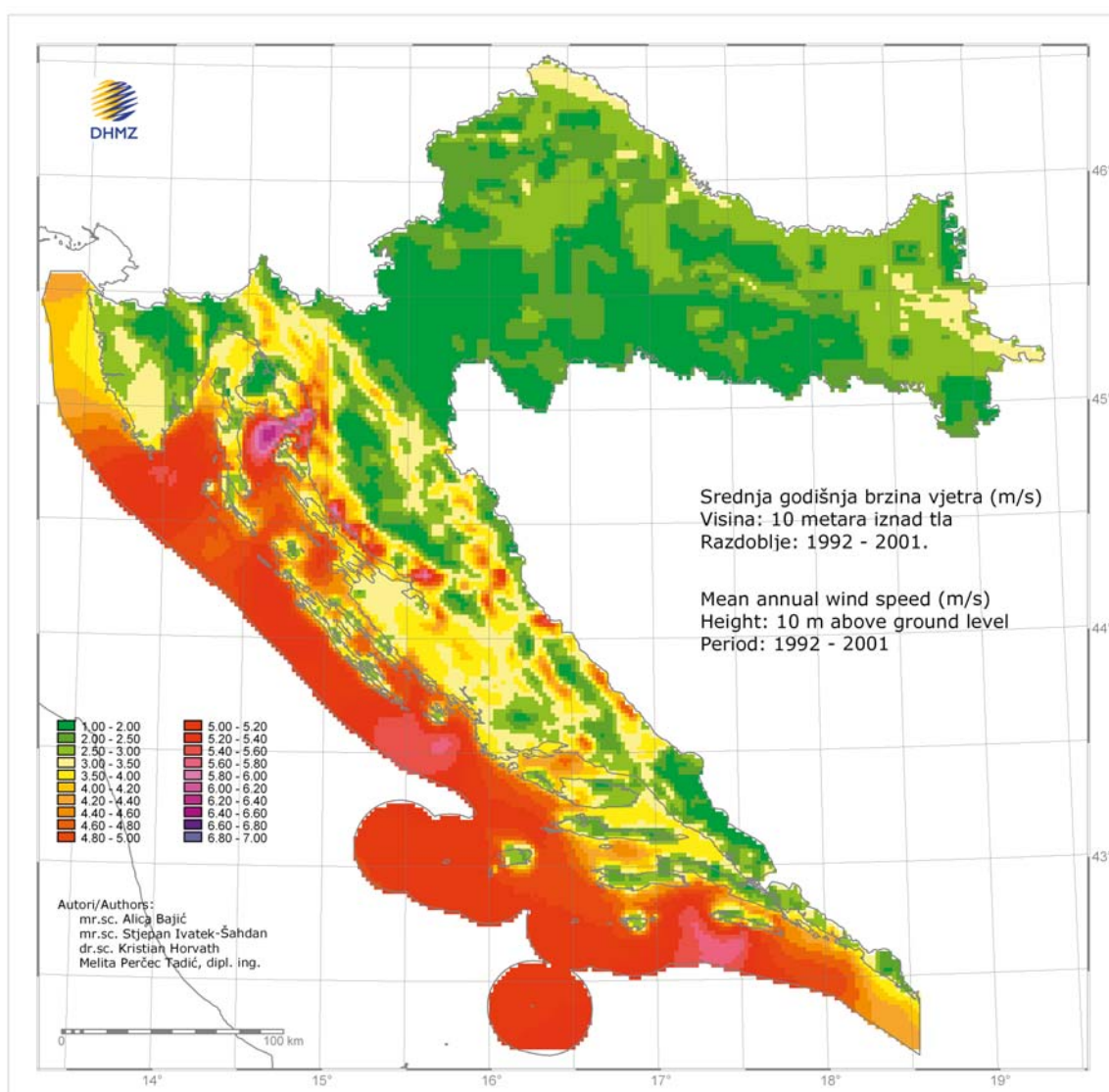
taka je nadomješten upotrebom regresijske analize između podataka modela i samih mjerenja.

Iako rezultati verifikacije uključuju i pogrešku mjerenja i pogrešku modela, pogreške točnosti instrumenta, kalibracije i reprezentativnosti nisu uzete u obzir pri verifikaciji. Procjene posljednje, najveće među tim greškama, kreću se oko 1 ms^{-1} za prizemni vjetar u dobro izmiješanom prizemnom graničnom sloju i u složenom terenu (npr. Rife i sur., 2004).

3. REZULTATI

3.1 Prostorna razdioba brzine vjetra

Srednja 10-godišnja brzina vjetra na 10 m iznad tla dobivena prethodno opisanom metodom prikazana je na Slici 2. Osnovna značajka dobivene prostorne razdiobe ovog meteorološkog elementa je znatno veća srednja brzina vjetra u priobalju i na otocima nego u kontinentalnim dijelovima Hrvatske. Kopnena područja najvećih srednjih vrijednosti brzine vjetra su više planine i primorska strana Velebita. Prvo



Slika 2. Prostorna razdioba srednje 10-godišnje (1992-2001) brzine vjetra [ms^{-1}] na 10 m iznad tla, kao direktni izlaz modela dinamičke adaptacije na mreži od 2 km horizontalne razlučivosti.

Figure 2. Spatial distribution of the 10-year mean wind speed (1992-2001) [ms^{-1}], at 10 m AGL, as a direct model output of the dynamical adaptation to a 2-km horizontal grid resolution.

područje primarno je povezano s planinama Velebit, Lička Plješivica i Dinara. Drugo područje uključuje zapadne obronke Velebita i obalno područje u njihovoj blizini, pri čemu je maksimum vidljiv kao strujanje zraka kroz prijevoj Vratnik. Dok su vrhovi navedenih planina najčešće regije povećanog energetskog potencijala vjetra zbog svoje nadmorske visine, velike vrijednosti srednje brzine vjetra na zapadnim obroncima Velebita prisutne su prvenstveno zbog bure, najjačeg vjetra u regiji (Bajić, 1989). Izostanak takvog maksimuma na zapadnoj strani južnih Dinarida može se povezati s manjom učestalošću bure u tom području, ali isto tako i njezinom manjom prediktabilnošću, koju karakterizira podcjenjivanje snage bure na južnom Jadranu (Horvath i sur., 2009). Kanaliziranje strujanja kroz prolaz Vratnik (npr. Göhm i sur., 2008), dobro poznato područje učestale i jake bure, dodatno pogoduje povećanju energetskog potencijala vjetra u tom području. Zavjetrinsko područje povećanih vrijednosti brzine vjetra proteže se gotovo do otoka Cresa poprimajući pritom prostornu razdiobu bure prema hidrauličkoj teoriji (Smith, 1985) i dostižući apsolutni maksimum srednje brzine vjetra u Hrvatskoj između Cresa, Krka i Raba oko 6.5 ms^{-1} . S druge strane, nepostojanje takvog područja povećanih srednjih vrijednosti brzine vjetra nad morem u blizini južnog dijela Velebita ukazuje na drugačiji mehanizam nastajanja bure, povezan s jakim navjetrinskim blokingom, izokretanjem izentropa i slamanjem težinskih valova

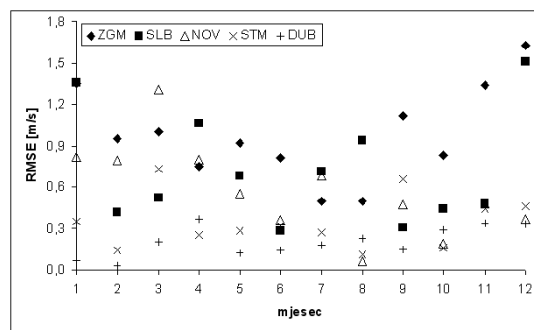
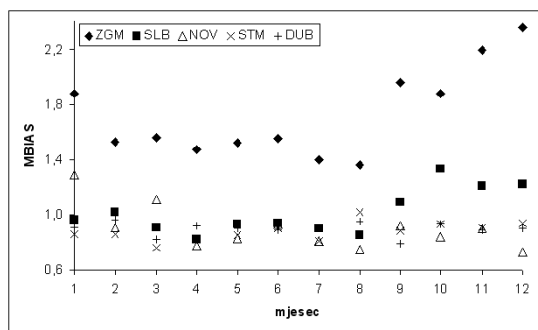
odnosno stvaranjem lokalnih kritičnih nivoa u zavjetrini (npr. vidi reviziju novih saznanja o buri u Grisogono i Belušić, 2009).

Područja s najmanjim srednjim 10-godišnjim brzinama vjetra su područje središnje Hrvatske, Ličkog polja, unutrašnjosti Istre i zaleđa Ploča (na 10 m iznad tla srednja godišnja brzina vjetra manja od 2 ms^{-1}).

Ovi rezultati nedvojbeno pokazuju da je bura izrazito važna za proizvodnju energije korištenjem energetskog potencijala vjetra u našim obalnim područjima. Međutim, zbog njezina mahovitog karaktera, nove procjene energetskog potencijala vjetra u Hrvatskoj moraju uključiti i analizu turbulencije bure zbog smanjenja iskoristivosti nominalnog energetskog potencijala vjetra pri isključivanju vjetroagregata zbog udara bure, što se može dogoditi već i pri srednjim 10-minutnim brzinama vjetra od 15 ms^{-1} (L. Horvath, osobna komunikacija). Stoga je sljedeći korak upotreba naprednih modela višeg reda zatvaranja i novih mjerenja vertikalnih profila bure kako bi se našlo kvalitetnije rješenje praktične strane problema turbulentnosti vjetra pri procjeni energetskog potencijala vjetra u našim obalnim krajevima. Ti će se problemi istraživati u okviru projekta „Wind resources and forecasting in complex terrain of Croatia” (www.windex.hr).

3.2 Konvencionalna verifikacija

Da bi se ocijenila pouzdanost podataka dobivenih proračunom modelom napravljena je



Slika 3. Srednja mjesečna multiplikativna sistematska pogreška MBIAS (lijevo) i srednja kvadratična pogreška RMSE [ms^{-1}] (desno) za 10 m brzinu vjetra tijekom 2001. godine za postaje Zagreb Maksimir (ZGM), Slavonski Brod (SLB), Novalja (NOV), Split Marjan (STM) i Dubrovnik (DUB) (vidi Sl. 1), kao direktan izlaz iz modela ALADIN.

Figure 3. The MBIAS mean monthly multiplicative systematic error (left) and the RMSE root-mean square error [ms^{-1}] (right) for 10 m wind speed during 2001 for the Zagreb-Maksimir (ZGM), Slavonski Brod (SLB), Novalja (NOV), Split-Marjan (STM) and Dubrovnik (DUB) stations (cf. Fig. 1), as a direct model output of the ALADIN model.

Tablica 1. Multiplikativna sistematska pogreška (MBIAS), srednja kvadratična pogreška (RMSE) i 10 m brzina vjetra tijekom 2001. godine za odabrane postaje (vidi Sl. 1), kao direktan izlaz iz modela ALADIN. Jedinični MBIAS (MBIAS=1) označava podatke bez sistematske pogreške, dok MBIAS > 1 označava modelsko precjenjivanje izmjerenih vrijednosti.

Table 1. The multiplicative systematic error (MBIAS), root-mean square error (RMSE) and 10 m wind speed, during 2001, for selected stations (cf. Fig. 1), as a direct output of the ALADIN model. The MBIAS=1 denotes the unbiased dataset, while MBIAS > 1 denotes model overestimation of measured data.

	ZGM	SLB	NOV	STM	DUB
MBIAS	1.69	0.99	0.91	0.87	0.90
RMSE [ms^{-1}]	0.98	0.21	0.71	0.56	0.35
VOBS [ms^{-1}]	1.42	1.72	4.32	4.40	3.35

verifikacija rezultata koristeći uobičajene statističke veličine kao što su srednja kvadratična pogreška (RMSE) i multiplikativna sistematska pogreška (MBIAS) (vidi Pog. 2.2.). MBIAS i RMSE izračunati su iz direktnog izlaza dinamičke adaptacije i mjerenja na 10 m iznad tla na odabranim postajama tijekom 2001. godine. Dobivene vrijednosti proračunate su za svaki mjesec i prikazane u obliku godišnjeg hoda (Sl. 3), dok su srednje godišnje vrijednosti prikazane u Tablici 1. U skladu s očekivanjima, MBIAS i RMSE su najveći za postaju Zagreb Maksimir zbog lokacije mjerne postaje u urbanom okruženju. Kako urbani efekti (npr. urbana hrapavost, termalne karakteristike, turbulentna duljina miješanja, itd.) na strujanje nisu prikazani u modelu ALADIN/HR, modelirane vrijednosti su značajno precjenjene. Iz tog razloga je točnost prizemnih rezultata direktnog izlaza dinamičke adaptacije u urbanom području ograničena u slučaju kad je visina željene analize nad tlom ispod skale duljine vertikalnog miješanja.

Rezultati verifikacije za ostale mjerne postaje ukazuju na znatno veću točnost modeliranih podataka. Za postaju Slavonski Brod, koja se nalazi u ravnijem terenu, srednji godišnji BIAS pokazuje sistematsko podcjenjivanje izmjerenih vrijednosti u iznosu od 1% srednje godišnje vrijednosti vjetra, dok je točnost modela nešto manja na obalnim postajama, gdje su izmjerene vrijednosti podcjenjene za oko 10%. RMSE je manji u ravnom terenu (na postaji SLB 0.21 ms^{-1}) nego u složenom terenu istočne obale Jadrana (u prosjeku oko 0.5 ms^{-1}). Međutim, relativne RMSE vrijednosti su usporedive neovisno o lokaciji postaje i iznose

oko 10% srednje brzine vjetra. Iznimka je postaja Zagreb Maksimir, gdje su lošiji rezultati modela rezultat urbanog okruženja same postaje. Najvjerojatniji uzrok sistematskom podcjenjivanju brzine vjetra u obalnom području je podcjenjivanje jačih vjetrova. Naime, ukoliko se podaci podijele u razrede brzine vjetra, učestalost jačih vjetrova ($V > 6 \text{ ms}^{-1}$) podcjenjena je na račun slabijih vjetrova ($V < 6 \text{ ms}^{-1}$).

Zbog učestalosti jačih vjetrova, kao što su bura i jugo, od velike je važnosti za procjenu energetskog potencijala vjetra daljnji napredak u točnosti modeliranja vjetra modelom ALADIN, putem smanjenja sistematskog podcjenjivanja intenziteta jačih vjetrova u obalnom području.

3.3 Spektralna verifikacija

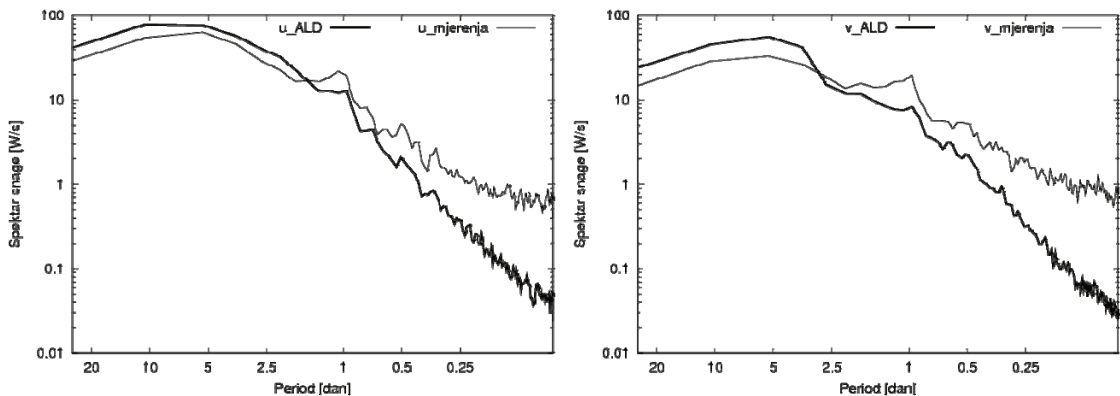
Spektralna verifikacija u vremenskoj domeni napravljena je za postaje Slavonski Brod i Dubrovnik, putem usporedbe izmjerenog i modeliranog (modelom ALADIN na 8 km horizontalne razlučivosti) spektra snage za u i v komponentu vjetra. Slično kao u Rife i sur. (2004) vremenska domena spektra snage podijeljena je na 3 područja: kraće od dnevnog s periodom 2-22 sata, dnevno s periodom 22-26 sati i duže od dnevnog s periodom većim od 26 sati.

Spektri snage za horizontalne komponente vjetra za postaju Slavonski Brod prikazani su na Slici 4. Najveći dio spektra snage nalazi se u području perioda oko tjedan dana. Ta su sinoptička strujanja dobro modelirana, uz malu precijenjenost u obje komponente vjetra. Sekundarni maksimum u spektru snage nalazi se u dnevnom području, i taj je maksimum u mo-

delu prisutan, iako je donekle podcijenjen. Vjerojatan razlog za prisutnost dnevnog maksimuma je blaga planinska cirkulacija zbog postojanja niskog gorja (Dilj) sjeverno od postaje. Ta je cirkulacija uglavnom bimodalnog smjera, što je vidljivo iz ruže vjetra koja ukazuje na dominantne smjerove od oko 60° i 240° . Osnovno obilježje analiziranih spektara je nedostatak snage kraće nego dnevnih cirkulacija u modelu, posebno za periode manje od 12 sati. Nedostatak spektralne energije u tom području biti će dodatno komentiran kasnije.

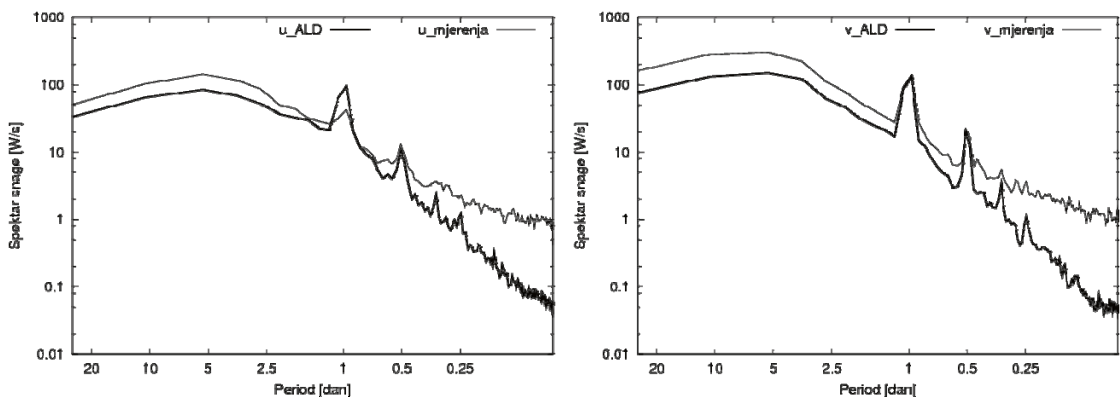
Rezultati spektralne dekompozicije za postaju Dubrovnik prikazani su na Slici 5. Ukupno, spektralna snaga veća je nego na postaji Sla-

vonski Brod za strujanja zraka svih vremenskih perioda. I na ovoj postaji dio spektra na skalama dužim od dnevne dobro je prikazan modelom, koji za razliku od postaje Slavonski Brod donekle podcijenjuje spektralnu snagu na tim vremenskim skalama. Sekundarni maksimum spektralne snage postoji za dnevne skale gibanja, gdje model vrlo točno procjenjuje spektralnu snagu, uz manje precjenjivanje snage u u komponenti vjetra. U suprotnosti s postajom Slavonski Brod je postojanje i tercijarnog maksimuma na vremenskim skalama od 12 sati, koji je modelom izvrsno reprezentiran. Međutim, kao i na postaji Slavonski Brod, dio spektralnog područja s periodima manjima od 12 sati je modeliranim vrijednosti-



Slika 4. Spektralna snaga izmjerenih i modeliranih u (lijevo) i v (desno) komponenta vjetra za postaju Slavonski Brod.

Figure 4. The power spectrum of measured and modelled u (left) and v (right) wind speed components for the Slavonski Brod station.



Slika 5. Spektralna snaga izmjerenih i modeliranih u (lijevo) i v (desno) komponenta vjetra za postaju Dubrovnik.

Figure 5. The power spectrum of measured and modelled u (left) and v (right) wind speed components for the Dubrovnik station.

ma značajno podcijenjen. Sličan rezultat dobio je i dinamičkom prilagodbom za područje Slovenije neovisno o veličini domene i strategiji gniježđenja (Žagar i sur., 2006). To ukazuje da model ALADIN ima teškoća s formiranjem dijela mezoskalne energije na malim vremenskim skalama. Kao mogući razlog tome vjerojatno se može isključiti utjecaj vremena stabilizacije (eng. „*spin-up*”), zbog njegova razdoblja od 12 sati. Vjerojatnije je da su za to odgovorni slaba prediktabilnost kraće nego dnevnih gibanja, kako prostorna tako i vremenska, teškoće u njihovu prikazu tijekom asimilacije podataka i/ili prejaka numerička difuzija u modelu. Dok je pronalaženje točnog razloga ovog podcijenjivanja izvan ciljeva ova rada, nedostatak energije u gibanjima s periodom manjim od 12 sati može ograničiti primjenu mezoskalnih modela za procjenu sadašnjih i budućih klimatologija vjetra, ukoliko je dio energije u tom spektralnom području usporediv s energijom cirkulacija na većim vremenskim skalama.

4. ZAKLJUČAK

Prostorna razdioba srednje brzine vjetra dobivena korištenjem numeričkih modela atmosfere u razdoblju od 10-godina ukazala je na područja sa znatnim energetskim potencijalom vjetra i time dala osnovu za odabir lokacija pogodnih za izgradnju vjetroelektrana. Područja najvećih srednjih brzina vjetra su: 1) vrhovi planina, kao što su Velebit, Lička Plješevica i Dinara, zbog svoje visine te 2) zapadni obronci Velebita i bliskog obalnog područja, zbog učestalosti i jačine bure u tom području. S druge strane, područja s najmanjim vrijednostima srednje brzine vjetra su dijelovi kontinentalne Hrvatske, unutrašnjost Istre, Ličko polje i zaleđe Ploča.

Rezultat konvencionalne verifikacije brzine vjetra na 10 m iznad tla pokazuje da se veća točnost prizemnih srednjih vrijednosti brzine vjetra dobivenih dinamičkom adaptacijom postigla u kontinentalnoj Hrvatskoj (BIAS ~ 1%) nego u obalnom i orografski složenom planinskom terenu (BIAS ~10%). Prizemne srednje vrijednosti brzine vjetra su najmanje

točne u urbanim područjima zbog nepostojanja opisa urbanih efekata na strujanje. Srednja kvadratična pogreška je manja u ravnom, nego u složenom terenu, i iznosi oko 10% srednje godišnje brzine vjetra. Najlošiji rezultati postignuti su za postaju Zagreb Maksimir, zbog nepostojanja opisa urbanih efekata u modelu..

Komplementarna verifikacija uspješnosti modela u vremenskoj domeni, napravljena spektralnom dekompozicijom, ukazuje da su periodi prizemnog strujanja duži od dnevnih dobro modelirani, kako u kontinentalnoj Hrvatskoj (Slavonski Brod), tako i u obalnom području u blizini kompleksnog terena (Dubrovnik), s maksimumom za periode životnog ciklusa sinoptičkih procesa. Po spektralnoj snazi sekundarni maksimum na obje je analizirane postaje povezan sa dnevnim strujanjima. Dok je spektar snage obalne cirkulacije dobro prikazan u modelu ALADIN, po smjeru bimodalna cirkulacija dnevnih perioda u Slavskom Brodu (vjerojatno vezana za Diljsko gorje) umjereno je podcijenjena. Dobro modeliran tercijarni maksimum (vremenskog perioda oko 12 sati) spektralne snage prisutan je isključivo na obalnoj postaji. Spektralna snaga slabije prediktabilnih strujanja perioda manjih od 12 sati modelom ALADIN je podcijenjena, što može ograničiti točnost rezultata dinamičke prilagodbe u onim područjima gdje se značajan dio energije strujanja nalazi na tim vremenskim skalama.

Zbog važnosti učestalih i jačih vjetrova kao što su bura i jugo, za poboljšanje procjene raspoloživosti energije iz vjetra u obalnom dijelu Hrvatske nužno je smanjenje sistematske pogreške u njihovu modeliranju, kao i procjena utjecaja mahovitosti bure na nominalni energetski potencijal vjetra, što ukazuje na nužnost razvoja naprednijih formulacija prizemnog graničnog sloja u mezoskalnim modelima.

Zahvala: Ovaj rad poduprijet je od strane HEP-OIE d.o.o., a Kristian Horvath je djelomično poduprijet i UKF ugovorom br. 16/08. Zahvaljujemo se Meliti Perčec-Tadić na pomoći pri grafičkoj obradi prostorne razdiobe vjetra i anonimnom/j recenzentu/ici na prijedlozima i komentarima koji su poboljšali ovaj rad.

REFERENCES

- Bajić, A., 1989: Severe bora on the northern Adriatic. Part I: Statistical analysis. *Rasprave-Papers*, **24**, 1-9.
- Beck A., Ahrens B. i Stadlbacker K., 2004: Impact of nesting strategies in dynamical downscaling of reanalysis data. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L19101, doi:10.1029/2004GL020115.
- Bubnova R, Hello G, Benard P i Geleyn JF, 1995: Integration of fully elastic equations cast in the hydrostatic pressure terrain-following coordinate in the framework of ARPEGE/ALADIN NWP system. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 515-535.
- Geleyn, J-F., 1987: Use of a modified Richardson number for parametrizing the effect of shallow convection. In: Matsuno Z. (ed), Short and medium range weather prediction, Special volume of *J. Meteor. Soc. Japan*, 141-149.
- Geleyn, J-F., C. Girard i J-F. Louis, 1982: A simple parametrization of moist convection for large-scale atmospheric models. *Beitr. Phys. Atmos.*, **55**, 325-334.
- Geleyn, J-F. i A. Hollingsworth, 1979: An economical analytical method for computation of the interaction between scattering and line absorption of radiation. *Contr. Atmos. Phys.*, **52**, 1-16.
- Giard, D. i E. Bazile, 2000: Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 997-1015.
- Göhm, A., G. J. Mayr, A. Fix i A. Giez, 2008: On the onset of Bora and the formation of rotors and jumps near a mountain gap. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **134**, 21-46.
- Grisogono B. i D. Belušić, 2009: A review of recent advances in understanding the meso- and microscale properties of the severe Bora wind. *Tellus*, **61**, 1-16.
- Horvath, K., Y.-L. Lin i B. Ivančan-Picek, 2008: Classification of Cyclone Tracks over Apennines and the Adriatic Sea. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2210-2227.
- Horvath, K., Ivatek-Šahdan, S., Ivančan-Picek, B. i V. Grubišić, 2009: Evolution and structure of two severe cyclonic Bora events: Contrast between the northern and southern Adriatic. *Weather and Forecast*, **24**, 4; 946-964.
- Ivatek-Šahdan S i Tudor M., 2004: Use of high-resolution dynamical adaptation in operational suite and research impact studies. *Meteorol. Z.*, **13**, 99-108.
- Jurčec, V., B., Ivančan-Picek, V. Tutiš, and V. Vukičević, 1996: Severe Adriatic Jugo wind. *Meteorol. Z.*, **5**, 67-75.
- Kållberg P, Simmons A, Uppala S, Fuentes M, 2004: The ERA-40 archive. *ECMWF ERA-40 Project Report Series*, **17**, 1-35.
- Kessler, E., 1969: On distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. *Met. Mon. Am. Met. Soc.*, **10**, br. 32, 84 str.
- Louis JF, Tiedke M, Geleyn JF, 1982: A short history of PBL parametrisation at ECMWF. *Proceedings from the ECMWF Workshop on Planetary Boundary Layer Parametrisation*, 59 – 79.
- Lynch, P. i X. Y. Huang, 1994: Diabatic initialization using recursive filters. *Tellus*, **46A**, 583-597.
- Mass, C. F., Ovens, D., Westrick, K. i Colle, B. A. 2002. Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecast? *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **83**, 407-430.
- Rife, D. L., Davis, C. A. and Liu, Y. 2004. Predictability of low-level winds by mesoscale meteorological models. *Mon. Wea. Rev.* **132**, 2553-2569.
- Ritter, B. I J-F. Geleyn, 1992: A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 303-325.
- Simmons, A. J. i D. M. Burridge, 1981: An energy and angular momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinate. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 758-766.
- Smith R. B., 1985: On severe downslope winds. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 2597-2603.
- Smith, R. B., 1987: Aerial observations of the Yugoslavian bora. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 269-297.

- Welch P. D., 1967: The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio Electroacoustics*, Vol. **AU-15** (6), 70-73.
- Wilks, D. S., 1995: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction. Vol. **59**, International Geophysics Series, Academic Press, str. 467.
- Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec-Tadić, M. i sur., 2008: Klimatski atlas Hrvatske / Climate atlas of Croatia 1961-1990, 1971-2000. *Državni hidrometeorološki zavod*, Zagreb, 200 str.
- Žagar N., Žagar M., Cedilnik J., Gregorič G. i J. Rakovec, 2006: Validation of mesoscale low-level winds obtained by dynamical downscaling of ERA-40 over complex terrain. *Tellus*, **58**, 445-455.
- Žagar M. i J. Rakovec, 1999: Small-scale surface wind prediction using dynamic adaptation. *Tellus*, **51**, 489-504.