

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Diplomski rad

**OCJENA USPJEŠNOSTI BRZINE I
SMICANJA VJETRA U MODELU
ALADIN/HR**

Stjepana Brzaj

Voditelj: dr. sc. Kristian Horvath
Suvoditelj: prof. dr. sc. Branko Grisogono

Zagreb, 2014.

Povjerenstvo:

1. Prof. dr. sc. Branko Grisogono, predsjednik
2. Dr. sc. Kristian Horvath, član
3. Doc. dr. sc. Maja Telišman-Prtenjak, članica
4. Doc. dr. sc. Snježana Markušić, članica
5. V. pred. mr. sc. Ivica Sović, zamjenik
6. V. pred. dr. sc. Antun Marki, zamjenik

Ovim putem želim zahvaliti neposrednom voditelju ovog diplomskog rada dr. sc. Kristianu Horvathu na stručnoj podršci, motivaciji, razumijevanju i strpljenju koje mi je pružio te vremenu utrošenom na mnoge komentare i savjete.

Posebno želim zahvaliti prof. dr. sc. Branku Grisogonu na razumijevanju i strpljenju koje je iskazao pristavši biti suvoditelj ovog diplomskog rada.

Podaci s mjernih stupova korišteni u ovome radu prikupljeni su kroz projekt Weather Intelligence for Wind Energy – WILL4WIND (www.will4wind.hr), koji provodi Državni hidrometeorološki zavod, uz suglasnost Energetskog instituta Hrvoje Požar i tvrtke WPD Enersys d.o.o. Mjerenja na stupu 8 organizirana su u sklopu projekta Wind resources and forecasting in complex terrain of Croatia – WINDEX (www.windex.hr), financiranog od fonda Unity through knowledge, uz podršku projekta Basic orographic atmospheric circulations – BORA, financiranog od Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa, uz podršku Energetskog Instituta Hrvoje Požar i tvrtke Končar – Obnovljivi izvori d.o.o.

Mag. phys.-geophys. Iris Odak zahvaljujem na savjetima u vezi s kontrolom i obradom izmjerenih podataka.

Zahvaljujem dipl. ing. Antoniu Stanešiću te mr. sc. Stjepanu Ivatek-Šahdanu na utrošenom vremenu za ALADIN trening, Državnom hidrometeorološkom zavodu na ustupljenim podacima modela te mag. phys.-geophys. Mariu Hrastinskom na vremenu utrošenom na vađenje odgovarajućih podataka iz modela.

Na pomoći i savjetima oko rješavanja administrativnih pitanja zahvaljujem doc. dr. sc. Snježani Markušić.

Zahvaljujem Geofizičkom i Fizičkom odsjeku te nastavnom i stručnom osoblju na prenesenom znanju, kao i svim kolegama zbog kojih je studiranje bilo ugodnije.

Mojim prijateljima hvala na neograničenoj moralnoj podršci tijekom cijelog studija, a pogotovo zadnjih tjedana. Posebna hvala mojoj stručnoj lektorici Ružici Stanić, uvijek spremnoj ispraviti bilo kakav oblik pisane ili izgovorene pogreške u vezi s hrvatski jezikom, pravopisom i gramatikom.

Roditeljima dugujem zahvalnost na podršci i strpljenju koje su mi pružili tijekom cijelog školovanja.

I na kraju, Domagoju hvala na svemu!

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Fenomenološki i teorijski pregled	2
2.1	Vjetar	2
2.2	Smicanje vjetra	5
3	Metodologija i podaci	7
3.1	Mjerni stupovi	7
3.2	Model ALADIN	10
3.3	Metodologija	12
4	Rezultati	14
4.1	Analiza smjera i brzine vjetra	14
4.2	Statistička i spektralna verifikacija smjera i brzine vjetra	24
4.3	Analiza smicanja brzine vjetra	33
4.4	Statistička i spektralna verifikacija smicanja brzine vjetra	42
5	Zaključak	49
	Literatura	52
	Prilozi	55
A	Statistički parametri	55
B	Histogrami	58
C	Ruže vjetra	60
D	Vertikalni profili	62
E	Relativne frekvencije i smicanje brzine vjetra po brzinama	63
F	Spektralna gustoća energije	64

1 Uvod

Vjetar je jedan od prirodnih obnovljivih izvora energije. Klimatologija vjetra ključan je element za ocjenu energetskeg potencijala vjetra. Iako su višegodišnja mjerenja brzine i smjera vjetra najizravnija i najtočnija metoda određivanja energetskeg potencijala vjetra, zbog velike prostorne varijabilnosti atmosfere i raznih lokalnih utjecaja na strujanje izmjereni podaci reprezentativni su samo za usko područje oko mjerne lokacije. Kako bi se izbjeglo mjerenje na nerazumno gusto mreži točaka, za procjenu klime koriste se mezoskalni numerički modeli atmosfere (npr. Bajić i dr., 2010). Svi modeli imaju ograničenu točnost opisa fizikalne stvarnosti i stoga je važno znati njihove mogućnosti i ograničenja. Zbog kompleksnog terena i površinskih nehomogenosti istočna jadranska obala odlično je područje za ocjenu uspješnosti mezoskalnih modela (npr. Horvath i dr., 2011).

Cilj je ovog rada statistički i spektralno analizirati vjetar i smicanje vjetra na mjernim lokacijama na području Dalmacije i južne Like te pomoću tih podataka ocijeni uspješnost prognoze brzine i smicanja vjetra u hrvatskoj verziji mezoskalnog numeričkog modela atmosfere ALADIN.

2 Fenomenološki i teorijski pregled

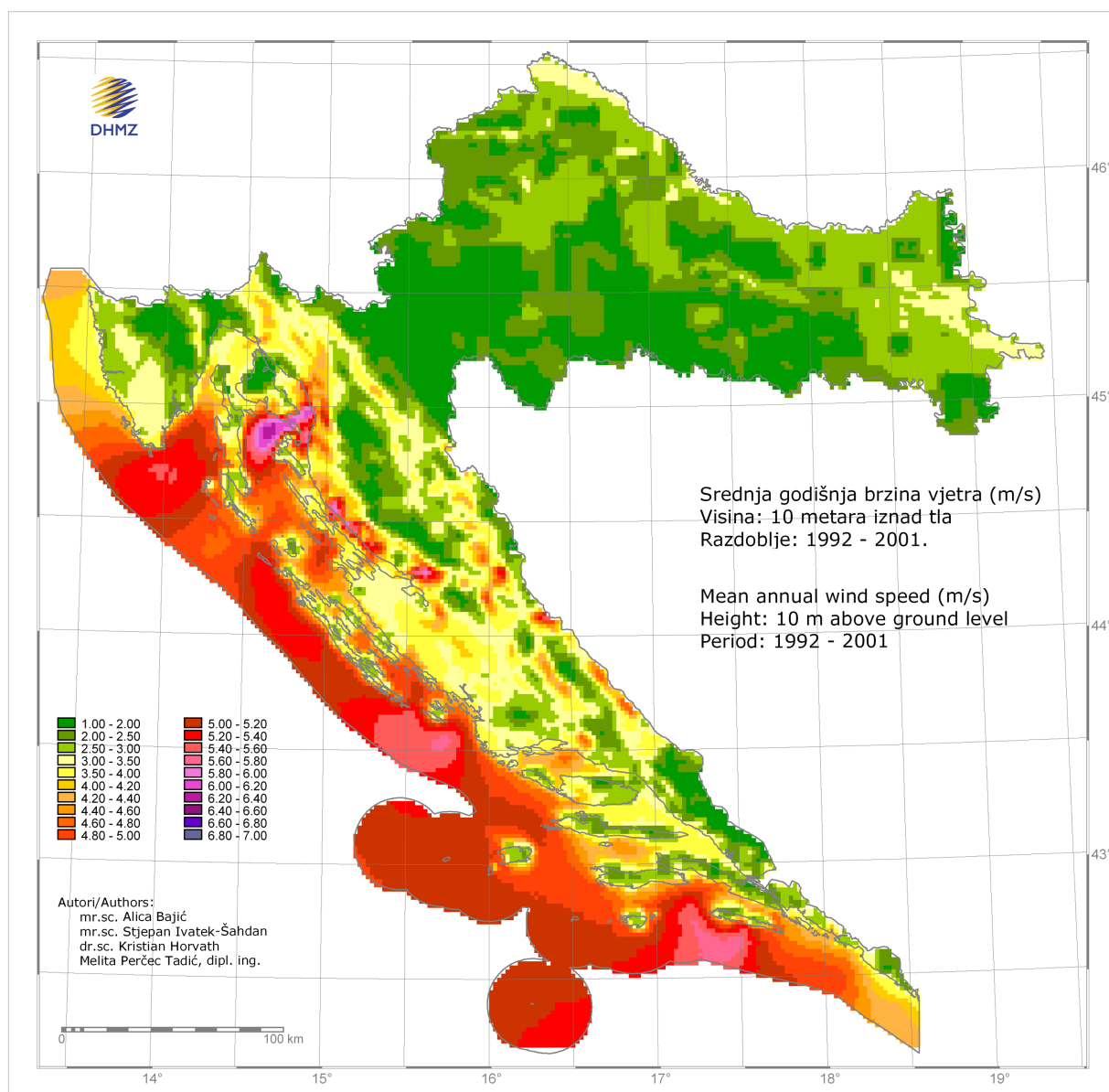
2.1 Vjetar

Vjetar je vektorska veličina određena brzinom i smjerom strujanja zraka. U meteorologiji se smjer horizontalnog vjetra određuje prema strani odakle vjetar puše. Označava se stupnjevima u smjeru kazaljke sata i to tako da se za sjever uzima 0° ili 360° . Kada se govori o brzini vjetra, obično se govori o srednjoj brzini u nekom vremenskom razdoblju. Svjetska meteorološka organizacija (engl. *World Meteorological Organization*) odredila je standardni period usrednjavanja od 10 minuta. Vjetar nastaje zbog sile gradijenta tlaka. Sila teže, Coriolisova sila te trenje dodatno ga oblikuju. Relativan doprinos sila ovisi o skali promatranog strujanja. Prizemni vjetar pod utjecajem je lokalnih uvjeta poput orografije, hrapavosti i diferencijalnog zagrijavanja (npr. Balling Jr i Cervený, 2005).

Horvath i dr. (2011) su pomoću modela ALADIN napravili klimatski reprezentativnu razdiobu prizemne brzine vjetra za prostor Hrvatske. Na slici 2.1 prikazana je prostorna razdioba srednje desetogodišnje brzine vjetra na 10 m. Srednja brzina vjetra na otocima i u priobalju znatno je veća nego u kontinentalnom dijelu Hrvatske. Ako se zanemari morska površina, područja najvećih brzina su više planine i zapadni obronci Velebita.

Vjetar ima važnu ulogu u oblikovanju vremena i klime Jadrana. Jadran se nalazi u prijelaznom prostoru između visokog tlaka subtropskog područja te područja umjerenih širina u kojem prevladavaju zapadni vjetrovi i ciklonske aktivnosti. Iako položaj, razvedenost istočne obale i orografija kopnenog zaleđa te fizička svojstva mora imaju velik utjecaj na strujanje zraka, prema Pandžić i Likso (2005) stanje sinoptičke skale ima primaran utjecaj. Ljetne i zimske situacije bitno se razlikuju. Bura i jugo dominantni su vjetrovi na Jadranu u hladno doba godine. Često pušu istodobno (na različim dijelovima Jadrana) ili nastupaju jedno iza drugog. U toplom dijelu godine prevladavaju vjetrovi obalne cirkulacije te etezije (Makjanić, 1978). U unutrašnjosti, na planinskim vrhovima, najdugotrajniji je sjeverni i zapadni vjetar, a u nizinskom području jugozapadni i istočni (Poje, 1992).

Bura je jedan od najpoznatijih tipova lokalnog vjetra. To je jak, mahovit, hladan i (relativno) suh vjetar koji puše iz sjeveroistočnog kvadranta na istočnoj jadranskoj obali i sjeverozapadnom dijelu Dinarida. Puše cijele godine, no češće u hladnom dijelu kada je i snažnija. Kod Senja može puhati i preko 15 uzastopnih dana. Obično je noću jača. Prema Bajić (1989) brzina vjetra uniformnija je za vrijeme bure duga trajanja, odnosno za vrijeme bure duga trajanja razlika između maksimalnih srednjih satnih brzina i maksimalnih satnih udara je relativno mala. Jedan



Slika 2.1: Prostorna razdioba srednje desetogodišnje (1992.–2001.) brzine vjetra [ms^{-1}] na 10 m iznad tla. Direktnan izlaz iz modela ALADIN uz dinamičku adaptaciju na mreži horizontalne rezolucije 2 km (preuzeto: mars.dhz.hr/web/index.html).

je od razloga nastanka bure jak gradijent tlaka između anticiklone iznad sjeveroistočne Europe i doline tlaka u srednjem ili zapadnom Sredozemlju. Druga pogodna situacija za pojavu bure povezana je s hladnom zračnom masom iznad Panonske nizine i razvojem ciklona u zapadnom Sredozemlju. U ovoj situaciji ciklona povlači hladan zrak preko planinskog lanca duž istočne obale Jadrana. Kratka bura može nastati i prolaskom hladne fronte. Bura je najizraženija u sjevernom dijelu jadranske obale, osobito u Velebitskom kanalu. Intenzitet i trajanje vjetra ovisi o orografiji te može značajno varirati na relativno malim udaljenostima (Poje, 1992; Grisogono i Belušić, 2009). Bura južnog Jadrana može biti jednako snažna kao i bura sjevernog, no nije jednako učestala ni dugotrajna. Učestalost i dugotrajnost bure smanjuje se prema jugu. Jaka bura rijetko se istovremeno javlja duž cijele jadranske obale. Najčešće započinje

na sjevernom Jadranu te se proširi na južni ako je sinoptička situacija povoljna. Pozadinsko strujanje sjeverne bure češće je plitko s visinskom inverzijom ili sinoptički induciranim kritičnim slojem, dok je na južnom Jadranu češća duboka bura (bez inverzija ili sinoptički induciranih kritičnih slojeva) (Ivančan-Picek i Tutiš, 1996; Horvath i dr., 2009). Maksimum strujanja na slici 2.1, kao i ostala područja velikih vrijednosti srednje brzine vjetra primorske strane Velebita, prisutna su zbog bure (Bajić i dr., 2010). Službena najveća brzina bure u Hrvatskoj izmjerena je na Masleničkom mostu i iznosi 69 ms^{-1} (Bajić i dr., 2001). Malo dalje, oko Zadra, nalazi se područje izrazito malih srednjih brzina vjetra. Za vrijeme jake bure u ovom području moguće je formiranje strujanja suprotnog smjera od bure (Stiperski i dr., 2009).

Burin je katabatički vjetar povezan s obalnom cirkulacijom. Javlja se samo kada nije prisutna cirkulacija sinoptičke skale. Ne pripada porodici bure, gdje je bitna orografska modulacija tijekom prelaska zraka preko planine.

Jugo je vjetar koji jadranskom obalom puše iz jugoistočnog kvadranta. Uz obalu je jugoistočnog, a na otvorenom moru južnog smjera. Pripada grupi južnih i jugoistočnih vjetrova koji potječu iz sjeverne Afrike, Izraela, Libanona i Sirije, a na Mediteranu su poznati pod nazivom *sirocco*. *Sirocco* je uglavnom topao i vlažan, umjereno jak do jak vjetar koji se javlja kada je dolina tlaka smještena u zapadnom Sredozemlju dok se u jadranskom području nalazi topli sektor ciklone. Jugo može dugo trajati i stvoriti visoke valove ako se ciklona produbi, biva stacionarna ili ako se giba prema Jadranu. Južni vjetar nastaje kada je iznad zapadne Europe velika ciklona ili duboka dolina tlaka. Toplo i suho jugo može se javiti za vedra vremena kada se greben visokog tlaka nalazi iznad Balkanskog poluotoka. Jugo je najizraženije na otvorenom moru i pučinskim otocima. Uz dalmatinsku obalu može puhati i nekoliko dana. U slučaju ciklone na nekim lokacijama može poprimiti karakteristike orkanskoj vjetra (Poje, 1992).

Etezijski je sjeverozapadni vjetar koji ljeti puše na vanjskim otocima srednjeg i južnog Jadrana. Prati ga vedro i suho vrijeme. Nastaje zbog velikog područja niskog tlaka nad Arabijom, Iranom i Afganistanom (Karachi depresija) te istovremenog grebena Azorskog maksimuma koji se prostire preko zapadne i središnje Europe. Etezijski je uglavnom slab do umjeren vjetar. Dio je prostrane struje etezijske koja puše od Atlantskog oceana prema Perzijskom zaljevu (Poje, 1992; Makjanić, 1978).

Maestral nastaje kao superpozicija etezijske i dnevne grane obalne cirkulacije (Makjanić, 1978).

2.2 Smicanje vjetra

Prizemni dio atmosfere, u kojem živimo i u kojem se odvija najveći dio ljudske aktivnosti (uključujući i prizemna mjerenja vjetra), zove se planetarni granični sloj (engl. *planetary boundary layer* ili *atmospheric boundary layer*). Planetarni granični sloj jest osjetljiva i neprestano promjenjiva zona kroz koju se izmijenjuju energija, impuls i masa između atmosfere i mora ili tla (Baklanov i dr., 2011). Sva meteorološka polja graničnog sloja pod direktnim su utjecajem Zemljine površine. Granični sloj sastoji se, u principu, od tri podsloja: viskoznog, prizemnog te vanjskog sloja ili sloja miješanja. Debljina viskoznog sloja reda je veličine 1 mm. On je meteorološki nevažan. Debljina prizemnog sloja ovisi o statičkoj stabilnosti. Njime dominiraju vertikalni turbulentni tokovi. Veličina dominantnih vrtloga u prosjeku raste s visinom graničnog sloja. Debljina sloja je reda veličine 1 m do 100 m, ponekad do 300 m. Najčešće je plići od 10% ukupne visine graničnog sloja. Vanjski sloj obično je najdeblji, reda veličine 1 km. Vrtlozi u njemu približno su konstantnih dimenzija određenih visinom prizemnog sloja i inverzijom koja se često nalazi iznad. Iznad inverzije je slobodna atmosfera u kojoj se turbulentna gibanja najčešće mogu zanemariti. Noću, u uvjetima ekstremno velike statičke stabilnosti i slaba vjetra, debljina graničnog sloja može se spustiti i do 20 m. U pustinjskom području, u poslijepodnevnim satima debljina može biti i preko 5 km. Na našim geografskim širinama, uz standardne atmosferske uvjete, debljina je graničnog sloja reda veličine 1 km. Postoji dnevni i godišnji hod debljine te pripadnih meteoroloških polja. Granični sloj je obično dublji ljeti i danju te plići i stabilniji zimi i noću (npr. Bretherton, 2013; Grisogono i dr., 2014).

Pod pretpostavkom stacionarnog strujanja paralelnog osi x predviđa se logaritamski vertikalni profil brzine vjetra:

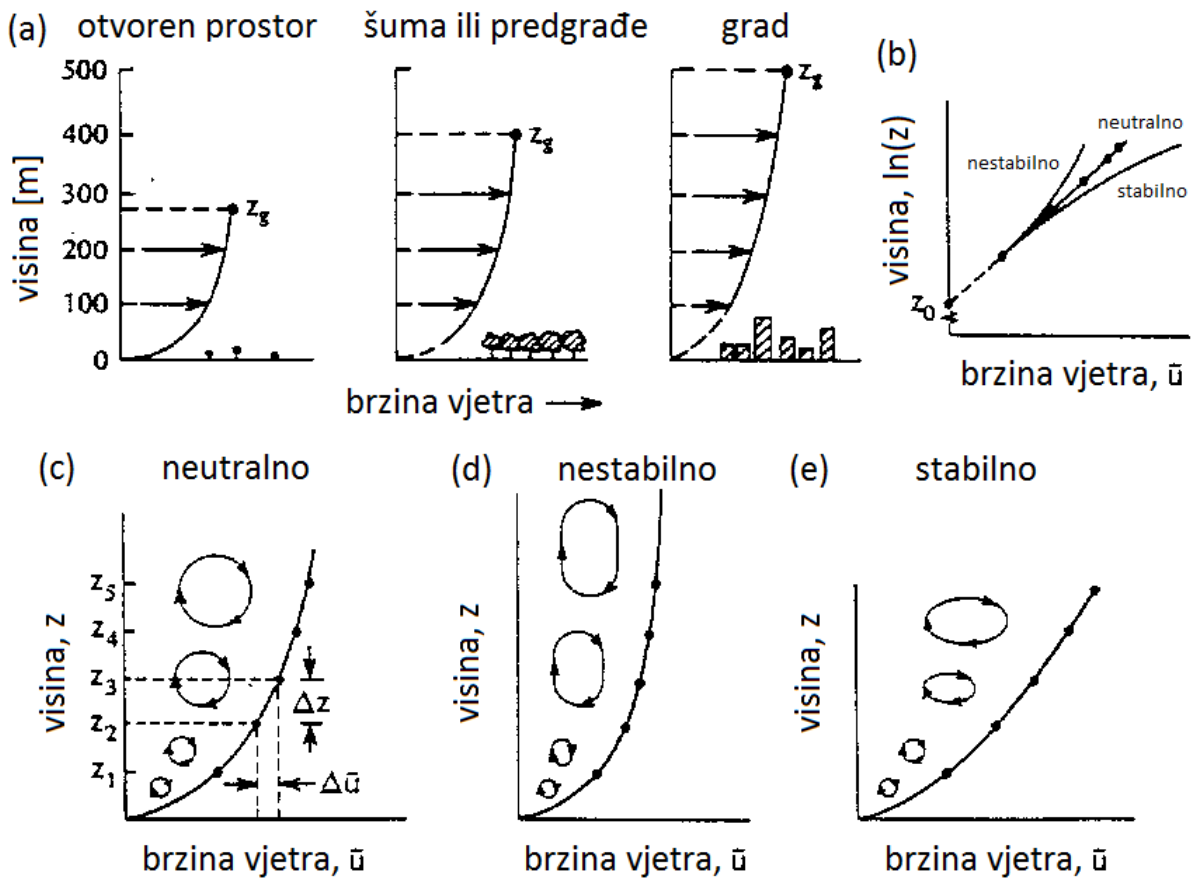
$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + \psi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right] \quad (2.1)$$

Brzina vjetra u na visini z određena je brzinom trenja u_* , visinom hrapavosti $z_0 \leq z$, Von Kármánovom konstantom κ , Obukhovom duljinom L te bezdimenzijskom univerzalnom funkcijom sličnosti ψ_m , koja korigira logaritamski profil. U neutralnoj stratifikaciji ψ_m jest jednaka nuli. Za stabilan prizemni sloj ψ_m je linearna, dok je za nestabilan sloj komplicirana transcendentna funkcija. Teorija sličnosti, pomoću koje su dobivene funkcije sličnosti, ne vrijedi uvijek u prizemnom sloju (npr. Grisogono i dr., 2014).

U gradu i šumskim krajevima javlja se dodatan sloj između visine hrapavosti i logaritamskog prizemnog sloja. U tom se slučaju logaritamski sloj ekstrapolira iznad dodatnog sloja debljine δ tako da logaritamski član $\ln(z/z_0)$ postaje $\ln((z + \delta)/z_0)$ (npr. Grisogono i dr., 2014).

Slika 2.2 prikazuje jednostavne idealizirane primjere logaritamskih vertikalnih profila brzine vjetra prizemnog sloja. Na slici (a) prikazan je utjecaj hrapavosti površine na visinu sloja, slika

(b) prikazuje razliku u nagibu profila ovisno o stabilnosti, a na slikama (c)–(e) ilustriran je utjecaj stabilnosti na strukturu turbulentnih vrtloga te oblik i visinu profila vjetra prizemnog sloja.



Slika 2.2: Primjeri idealiziranih vertikalnih profila brzine vjetra u prizemnom sloju planetarnog graničnog sloja: (a) utjecaj hrapavosti površine; (b) utjecaj stabilnosti na nagib profila; (c)–(e) utjecaj stabilnosti na strukturu turbulentnih vrtloga i oblik profila (preuzeto: http://old.ecmwf.int/newsevents/training/rcourse_notes/PARAMETRIZATION/BOUNDARY_LAYER/Boundary_layer2.html).

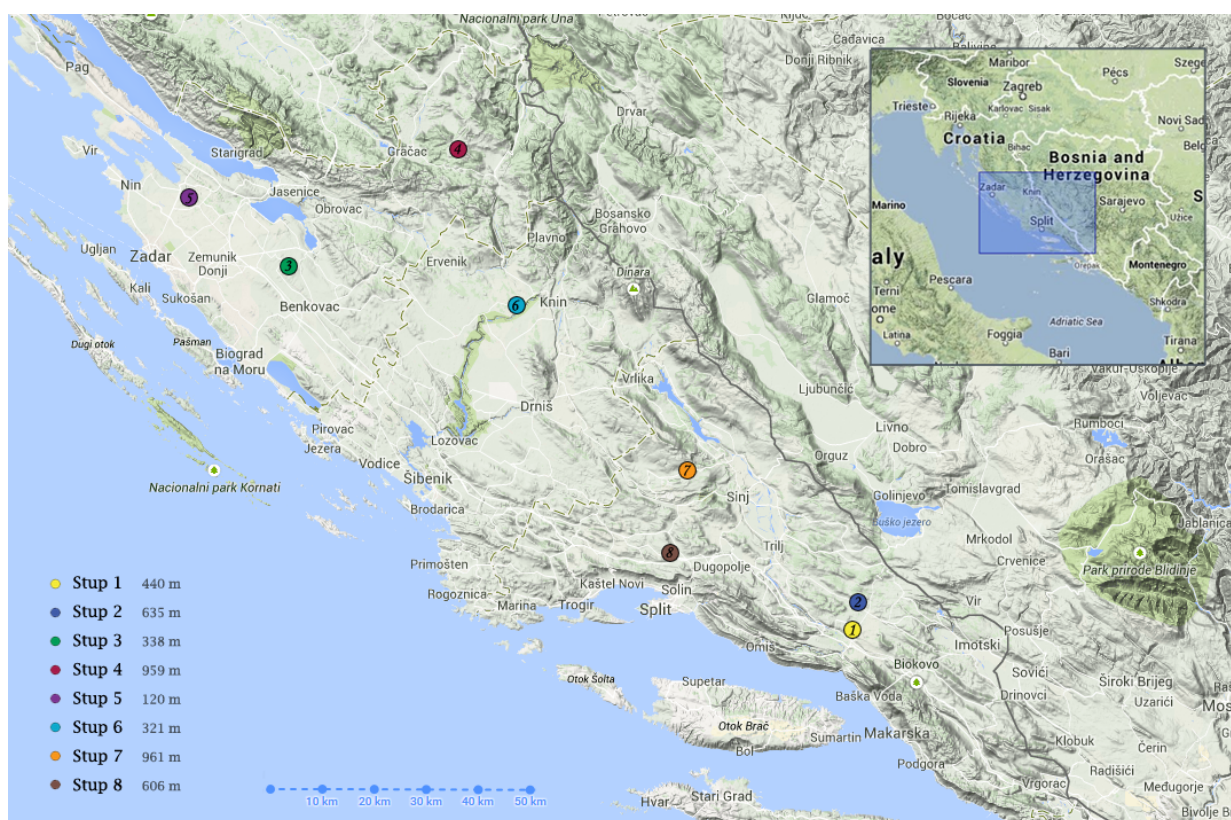
Američko meteorološko društvo (engl. *American Meteorological Society*, 2014) definira vertikalno smicanje vjetra kao lokalnu promjenu vektora vjetra ili bilo koje njegove komponente u promatranom smjeru. Smicanje vjetra ovime nije jednoznačno određeno. Razni autori smicanje vjetra promatraju na različite načine. Najčešće se promatra promjena iznosa brzine vjetra visinom te promjena smjera vektora brzine vjetra visinom (npr. Markowski i Richardson, 2006). U ovom radu promatrat će se promjena iznosa brzine vjetra visinom.

3 Metodologija i podaci

U radu su korišteni podaci brzine i smjera vjetra dobiveni na osam mjernih stupova tijekom 2010. godine. Ovi podaci uspoređivani su s prognostičkim podacima modela ALADIN.

3.1 Mjerni stupovi

Položaj mjernih stupova prikazan je na slici 3.1. Stup 8 nalazi se unutar vjetroelektrane Pometeno Brdo.



Slika 3.1: Lokacije mjernih stupova korištenih u ovom radu (karta djelomično napravljena pomoću mapsengine.google.com/map/).

Na svim stupovima, osim stupa 8, za mjerenje brzine vjetra korišteni su šalični anemometri. Smjer je određen vjetrokazom. Za mjerenje brzine i smjera vjetra na stupu 8 korišteni su ultrasonični anemometri. Ovi anemometri mjere tri komponente brzine vjetra frekvencijom uzorkovanja 5 Hz. Kako bi se smanjio utjecaj mjernog stupa na mjerenja, svi su instrumenti postavljeni na krajeve vodoravnih krakova koji su pričvršćeni za mjerni stup. Na istoj visini može biti postavljeno više instrumenata, svaki na svom kraku. Mjerni stup s instrumentima

prikazan je na slici 3.2. Dostupne visine mjerenja svakog mjernog stupa mogu se naći u tablici 3.1.



(a)



(b)



(c)



(d)

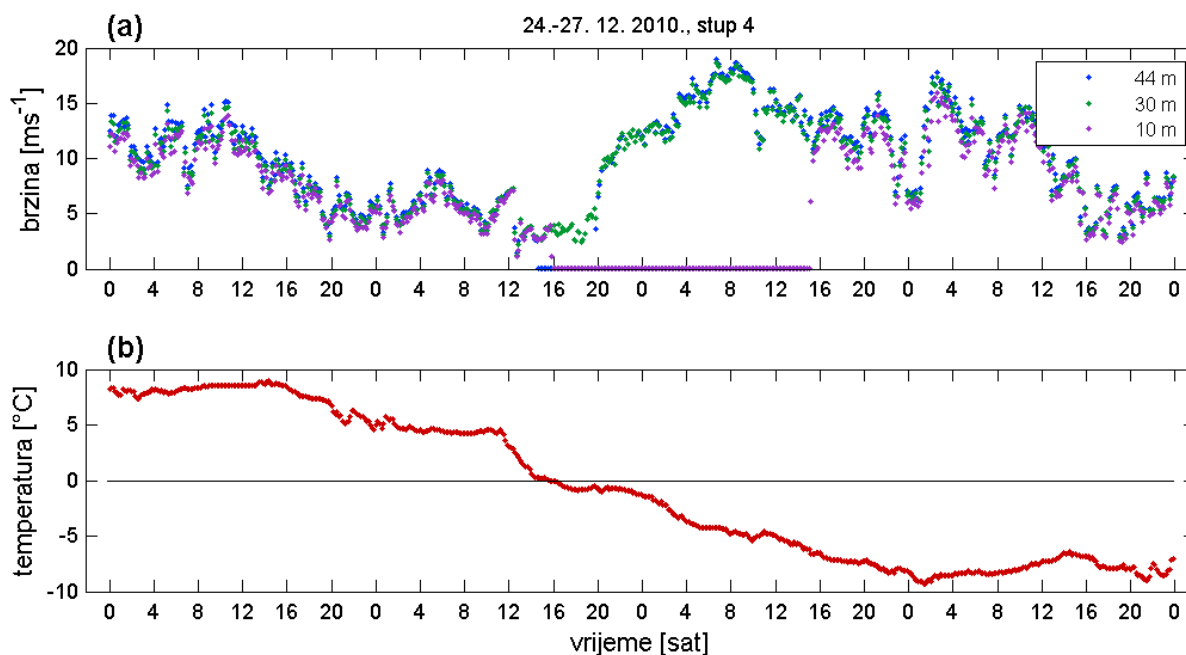
Slika 3.2: Instrumenti korišteni za mjerenje brzine i smjera vjetra: (a) mjerni stup s postavljenim instrumentima; (b) šalični anemometar *NRG #40* korišten na stupu 1 i 2 (preuzeto: www.renewablenrgsystems.com); (c) vjetrokaz *NRG #200p* korišten na stupu 1 i 2 (preuzeto: www.renewablenrgsystems.com); (d) ultrasonični anemometar *WindMaster Pro* korišten na stupu 8 (preuzeto: www.gillinstruments.com).

U ovom radu koriste se 10-minutni srednjaci skalarne horizontalne brzine i smjera vjetra. Podaci su podvrgnuti gruboj logičkoj kontroli kvalitete (Pandžić, 2002). Kontrola se sastojala od pregledavanja vremenskih nizova brzine i smjera vjetra te temperature i uspoređivanja nizova različitih visina. Pregledavani su i dijagrami raspršenja. Sumnjivi podaci ručno su uklonjeni i nije napravljena interpolacija. Na slici 3.3 prikazana je jedna od uočenih nepravilnosti u mjerenju na stupu 4 koja je najvjerojatnije nastala zbog smrzavanja instrumenta. Nakon kontrole kvalitete podataka izdvojeni su mjeseci s manje od 10% nedostajućih podataka. Samo

	visina mjerenja (m)	razdoblje (mjesec)	dostupni podaci
stup 1	10	1.–12.	brzina i smjer
	30	1.–12.	brzina
	50a	1.–12.	brzina
	50b	1.–12.	brzina
	60a	1.–12.	brzina i smjer
	60b	1.–12.	brzina i smjer
stup 2	10	1.–12.	brzina
	30	1.–12.	brzina i smjer
	40a	1.–12.	brzina
	40b	1.–12.	brzina
	60	1.–2.	brzina i smjer
stup 3	10	3.–12.	brzina i smjer
	30	3.–12.	brzina
stup 4	10	1.–7., 10.–12.	brzina i smjer
	30	1.–7., 10.–12.	brzina
	44	1.–7., 10.–12.	brzina
stup 5	10	1.–3., 5.–12.	brzina i smjer
	30	1.–3., 5.–12.	brzina
	44	1.–3., 5.–12.	brzina i smjer
stup 6	10	8.–12.	brzina i smjer
	30	3.–12.	brzina
	44	3.–12.	brzina i smjer
	46	3.–12.	brzina
stup 7	10	1., 6., 9.–12.	brzina i smjer
	30	1., 6., 9.–12.	brzina
	44	1., 6., 9.–12.	brzina
	46	1., 6., 9.–12.	brzina
stup 8	10	5.–6., 8.–12.	brzina i smjer
	20	5., 7.–12.	brzina i smjer
	40	5.–12.	brzina i smjer

Tablica 3.1: Popis mjernih stupova uz visine instrumenata (iznad tla) te odgovarajuća razdoblja analize podataka (2010. godina). Oznake a i b uz visinu instrumenta odgovaraju nizovima podataka dobivenim na istoj visini, ali s različitih strana mjernog stupa.

ti mjeseci korišteni su u daljnjoj obradi i analizi. Konačna razdoblja analize podataka zapisana su u tablici 3.1. Podaci dobiveni na stupu 3 nisu korišteni za usporedbu s modelom ALADIN jer su dostupna samo mjerenja na dvije najniže razine. Podaci stupova 6 i 7 također nisu korišteni za usporedbu jer su vremenski nizovi brzine i smjera na 10 m kraći od devet mjeseci. Unatoč kratkoći nizova stupa 8 ovi podaci jesu korišteni za usporedbu. Iznimka je napravljena jer se stup 8 nalazi unutar vjetroelektrane. Također podaci stupa 8 već su korišteni u drugim radovima (npr. Horvath i dr., 2013; Babić, 2013).



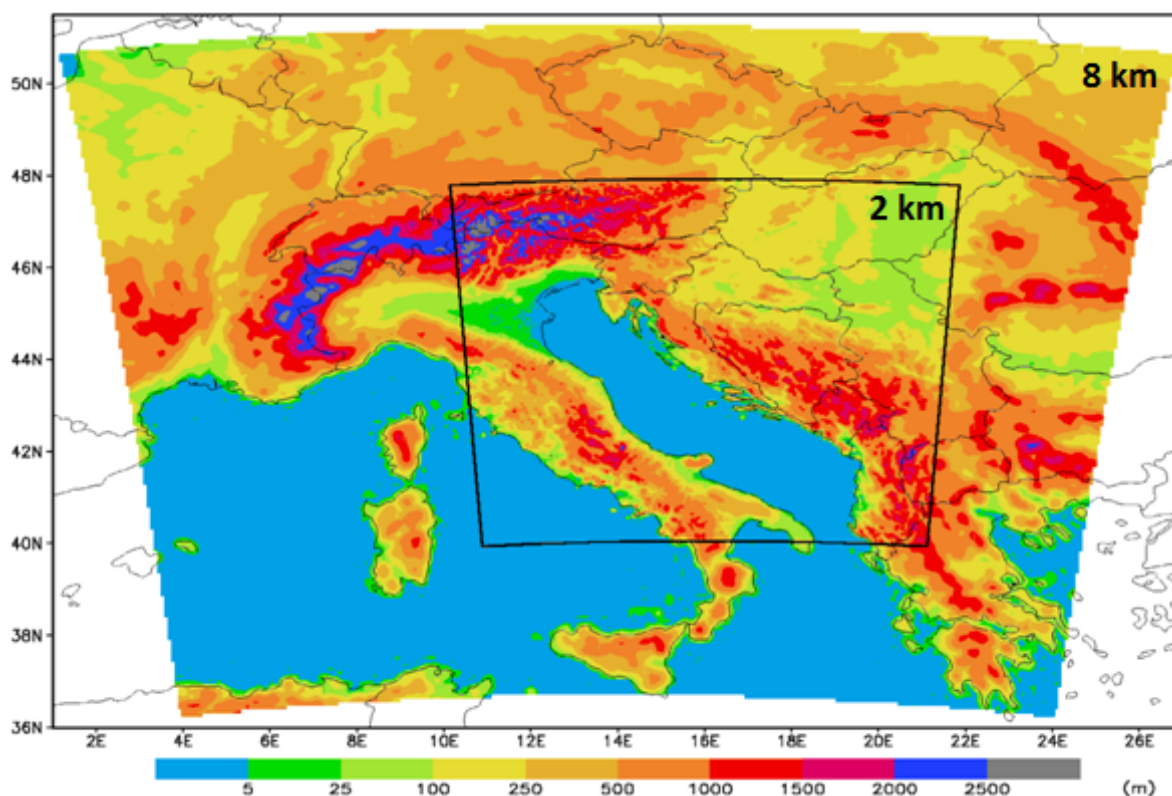
Slika 3.3: Prikaz neobrađenih podataka stupa 4 za razdoblje 24.–27. prosinca 2010. godine u terminima UTC+1 (vremenska zona kojoj Hrvatska pripada, zimsko računanje vremena): (a) vremenski nizovi brzine vjetra na 10, 30 i 44 m; (b) temperatura na 2 m. Temperatura je 25. 12. u 15:50 pala ispod nule. Uočene su nepravilnosti 25. 12. na 44 m u razdoblju 14:30–19:50 te na 10 m u razdoblju 25.12. 15:50–26.12. 15:10. Oba su sumnjiva razdoblja uklonjena. Ova situacija vjerojatno je posljedica smrzavanja instrumenta.

3.2 Model ALADIN

ALADIN (fr. *Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International*) mezoskalni je meteorološki numerički spektralni prognostički model za ograničeno područje. Zasniva se na globalnim modelima ARPEGE (fr. *Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle*) i IFS (engl. *Integrated Forecast System*). Osnova su modela prognostičke primitivne jednadžbe koje se rješavaju za komponente horizontalnog vjetra, temperature, specifične vlage i prizemnog tlaka pomoću semi-implicitne semi-lagrangijanske sheme integracije s dva vremenska koraka (engl. *two-time-level semi-implicit semi-lagrangian scheme*). ALADIN-u su za rad potrebni početni i rubni uvjeti te rubno područje u kojem se koriste podaci nekog drugog modela (ARPEGE ili IFS) (Ivatek-Šahdan, 2007).

Dinamika modela predstavlja procese u modelu koji su direktno opisani prognostičkim jednadžbama. Svi procesi u modelu koje nije moguće direktno opisati dinamikom nazivaju se fizikom modela. Za te procese kažemo da su parametrizirani. Paket fizikalnih parametrizacija uključuje parametrizaciju vertikalne difuzije (Louis i dr., 1982). Zračenje je opisano prema Ritter i Geleyn (1992). Opis mikrofizike može se naći u Catry i dr. (2007) te konvekcije u Gerard i dr. (2009). Koeficijenti turbulentne difuzivnosti računaju se prema Geleyn i dr. (2006). Izmjena vlage i topline s tlom parametrizirana je prema Giard i Bazile (2000).

Horizontalna rezolucija ALADIN-a iznosi 8 km. Domena integracije modela prikazana je na slici 3.4. Dinamičkom adaptacijom rezolucija se povećava na 2 km. Dinamička adaptacija je metoda koja se koristi za detaljno profinjene vjetra, odnosno za prognozu prizemnog vjetra, to jest vjetra koji najviše ovisi o orografiji unutar modela (Žagar i Rakovec, 1999). Pri korištenju metode koristi se hidrostatska verzija modela ALADIN, ne koristi se dio fizikalnih parametrizacija modela i smanjuje se broj hibridnih vertikalnih nivoa modela s 37 na 15. Nivoi donjih slojeva troposfere (8 nivoa ispod 1000 m) su zadržani.



Slika 3.4: Integracijska domena modela ALADIN horizontalne rezolucije 8 km te domena dinamičke adaptacije rezolucije 2 km uz orografiju modela.

Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) koristi ALADIN u svakodnevnoj prognozi vremena. Uz operativne prognoze koristi se i 24-satna prognoza testne nehidrostatske verzije modela ALADIN horizontalne rezolucije 2 km sa svim uobičajenim parametrizacijama (zračenje, vertikalno miješanje, mikrofizika, konvekcija i drugo). Ta prognoza pokreće se jednom na dan u 06 UTC i korištena je u ovom radu. Za početne uvjete koristi se 6-satna prognoza operativnog modela ALADIN rezolucije 8 km pokrenutog u 00 UTC (Tudor i dr., 2013).

Prva tri nivoa modela nalaze se na približno 17, 64 i 138 m iznad orografije u modelu. Vjetar se pomoću parametriziranog logaritamskog profila (Geleyn, 1988) interpolira s nivoa modela na 10 m. Brzine ostalih nivoa linearno se interpoliraju. Dostupne su interpolirane brzine na 10, 20, 30, 40, 45, 50 i 60 m.

U ovom radu koriste se satne vrijednosti horizontalnih komponenti brzine vjetra. Izračunat

je Pearsonov koeficijent korelacije (u daljnjem tekstu: korelacija) između satnih vrijednosti horizontalne brzine i smjera vjetra dobivenih s mjernih stupova te iz modela. Korelacija je izračunata za četiri najbliže točke modela oko pet promatranih mjernih stupova (mjerni stup nalazi se unutar kvadrata čiji su vrhovi točke modela). Nije uočena veza između iznosa korelacije i položaja mjernog stupa unutar kvadrata, no nije napravljena usporedba između realnog terena i terena unutar ALADIN-a. Razlika korelacija brzina istih visina između točke modela s najvećom korelacijom i najbliže točke unutar modela manja je od 0.03. Za usporedbu s podacima mjernih stupova korišteni su podaci točke modela najbliže mjernom stupu. Udaljenost točke modela i mjernog stupa manja je od $\sqrt{2}$ km. U tablici 3.2 nalaze se rasponi korelacija brzine vjetra.

	stup 1	stup 2	stup 4	stup 5	stup 8
visina (m)	476	557	939	69	314
r	0.71–0.73	0.77–0.81	0.71–0.72	0.61–0.65	0.71–0.74

Tablica 3.2: Popis relativnih nadmorskih visina točaka modela ALADIN uz Pearsonov koeficijent korelacije (r) horizontalne brzine vjetra između mjernog stupa i najbliže točke modela. Vrijednosti koeficijenta korelacije razlikuju se ovisno o visini mjerenja, a izračunati su za razdoblja zapisana u tablici 3.1.

Radi usporedbe modela s mjerenjima, iz prognoziranih vremenskih nizova brzine i smjera vjetra obrisani su podaci na mjestima nedostajućih podataka mjerenja.

3.3 Metodologija

Tijekom obrade i analize podataka korišteni su različiti statistički parametri. Osnovni su statistički parametri lokacije srednjak (\bar{x}), medijan ($q_{0.5}$) te prvi ($q_{0.25}$) i treći ($q_{0.75}$) kvartil. Promatrani su parametri rasapa standardna devijacija i amplituda, a oblika koeficijent simetrije, Yule-Kendallov indeks te eksces. Opis parametara može se pronaći u Wilks (1995).

Amplituda je razlika između najveće i najmanje vrijednosti podatka u nizu.

Koeficijent simetrije baziran je na statističkim momentima. Računa se prema sljedećoj formuli:

$$C_s = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{s^3} \quad (3.1)$$

gdje je s standardna devijacija. Pozitivna vrijednost koeficijenta simetrije odgovara raspodjeli s repom udesno, a negativna s repom ulijevo. Za raspodjelu s repom udesno kaže se da je pozitivno simetrična, dok se za raspodjelu s repom ulijevo kaže da je negativno simetrična.

Yule-Kendallov indeks alternativna je mjera simetričnosti. Računa se pomoću kvartila i

medijana:

$$YKi = \frac{(q_{0.75} - q_{0.5}) - (q_{0.5} - q_{0.25})}{q_{0.75} - q_{0.25}} \quad (3.2)$$

Pozitivna vrijednost Yule-Kendallova indeksa odgovara pozitivnoj simetriji, a negativna vrijednost odgovara negativnoj simetriji raspodjele.

Eksces je mjera oblika raspodjele bazirana na statističkim momentima. Računa se prema sljedećoj formuli:

$$E = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{s^4} - 3 \quad (3.3)$$

gdje je s standardna devijacija. Vrijednost ekscesa umanjuje se za 3 kako bi bila usporediva s normalnom razdiobom. Pozitivan eksces odgovara razdiobi koja je viša i uža nego normalna, a negativan odgovara razdiobi koja je niža i šira nego normalna.

Multiplikativna sustavna pogreška (engl. *multiplicative mean systematic error*, MBIAS) mjera je uspješnosti prognoze modela. MBIAS omjer je srednje modelirane i srednje mjerene brzine vjetra (Horvath i dr., 2011). Što je prognoza bolja, to je vrijednost MBIAS-a bliža jedinici.

Srednja kvadratna pogreška (engl. *root mean square error*, RMSE) također je mjera uspješnosti prognoze modela. Računa se na sljedeći način:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - o_i)^2} \quad (3.4)$$

gdje je y_i mjereni niz podataka, a o_i odgovarajuća prognoza. Što je prognoza bolja, to je vrijednost RMSE bliža nuli.

Kako bi se proučila svojstva različitih skala, promatrana je funkcija spektralne gustoće energije (engl. *spectral energy density*, SD). Njezino je korisno svojstvo što je u $(f \cdot SD(f), \log(f))$ prikazu površina ispod krivulje otežanog spektra između bilo koje dvije frekvencije proporcionalna dijelu varijance objašnjenom tim rasponom frekvencija (npr. Stull, 1988). Na taj način moguće je kvantitativno ocijeniti udio varijance objašnjene željenim rasponom frekvencija te kvantitativno evaluirati uspješnost modela u spektralnom prostoru (npr. Horvath i dr., 2012). Mjerna jedinica SD-a odgovara kvadratu mjerne jedinice promatrane varijable podijeljene jedinicom frekvencije. Kako bi se dobili najbolji mogući rezultati, u računu su korišteni svi dostupni podaci, to jest uključeni su mjeseci s više od 10% nedostajućih podataka. Nedostajući podaci linearno su interpolirani. Iskorištena je Matlabova funkcija *detrend* kojom je iz podataka uklonjena najbolja linearna aproksimacija. Time je umanjn crveni šum (Stull, 1988). Nakon toga izračunate su funkcije spektralne gustoće pomoću Matlabove funkcije *pwelch* koja koristi diskretnu formu brzog Fourierova transformacija (engl. *Fast Fourier Transform*). Korišten je oblik prozora *hanning* duljine 2^{11} .

4 Rezultati

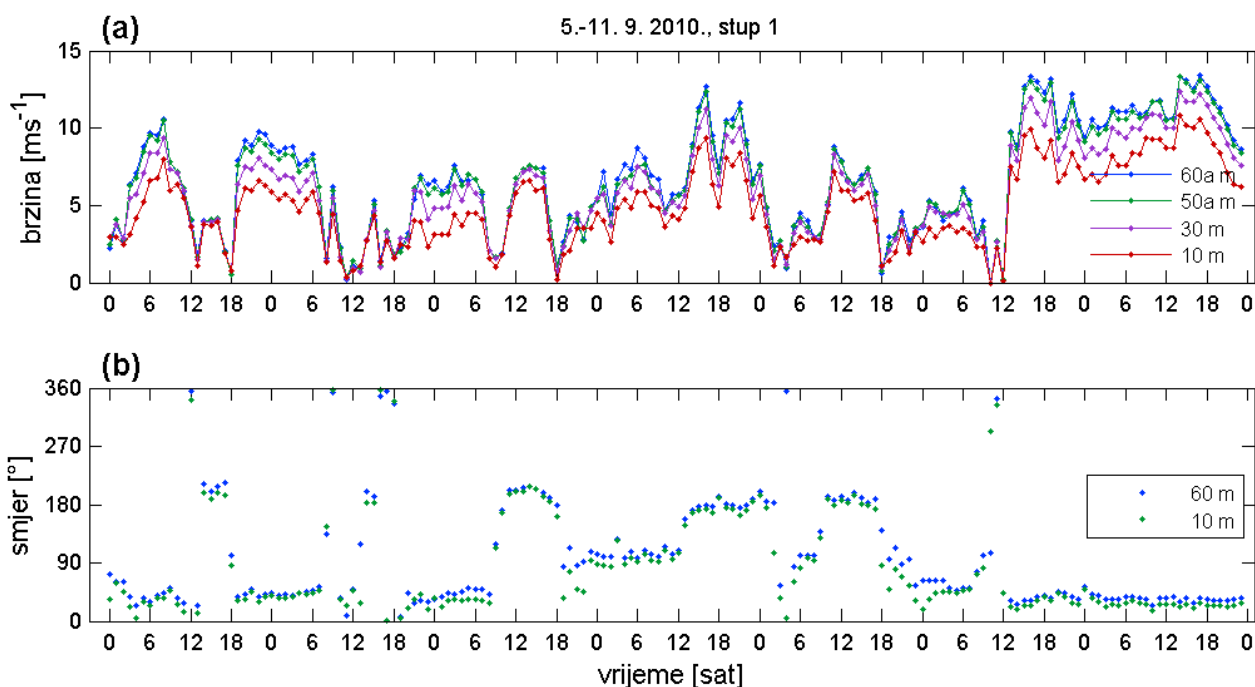
U ovom poglavlju prikazani su rezultati analize prethodno navedenih mjerenih podataka te je napravljena usporedba s modeliranim podacima testne nehidrostatske verzije modela.

Napomene:

Analiza mjerenih podataka te verifikacija modela napravljena je pomoću 10-minutnih srednjaka koji odgovaraju punom satu. Kod razina mjerenja s dva dostupna niza podataka korišteni su nizovi označeni slovom **a**. Sezone su podijeljene u tri tipična mjeseca: zima 1., 2., 12.; proljeće 3., 4., 5.; ljeto 6., 7., 8. te jesen 9., 10. i 11. mjesec.

4.1 Analiza smjera i brzine vjetra

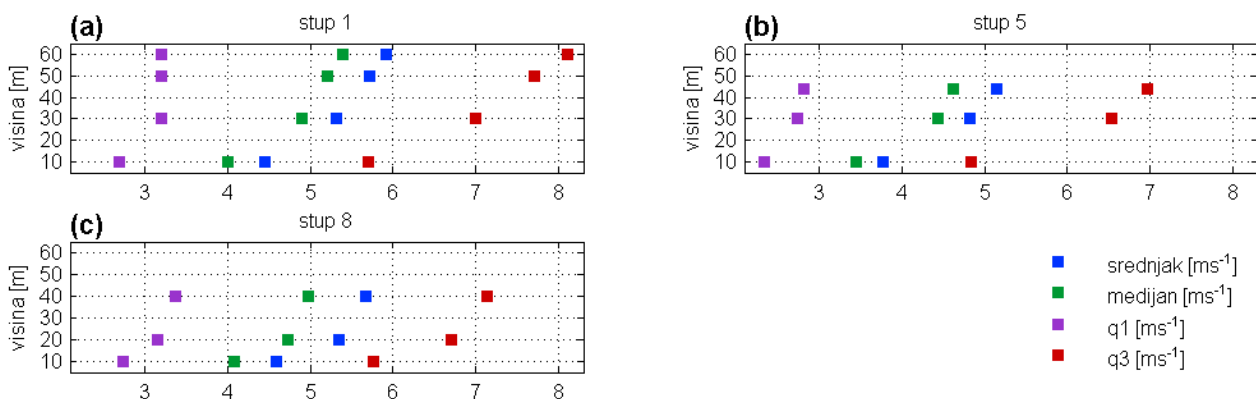
Na slici 4.1 prikazan je sedmodnevni vremenski niz izmjerenih podataka stupa 1.



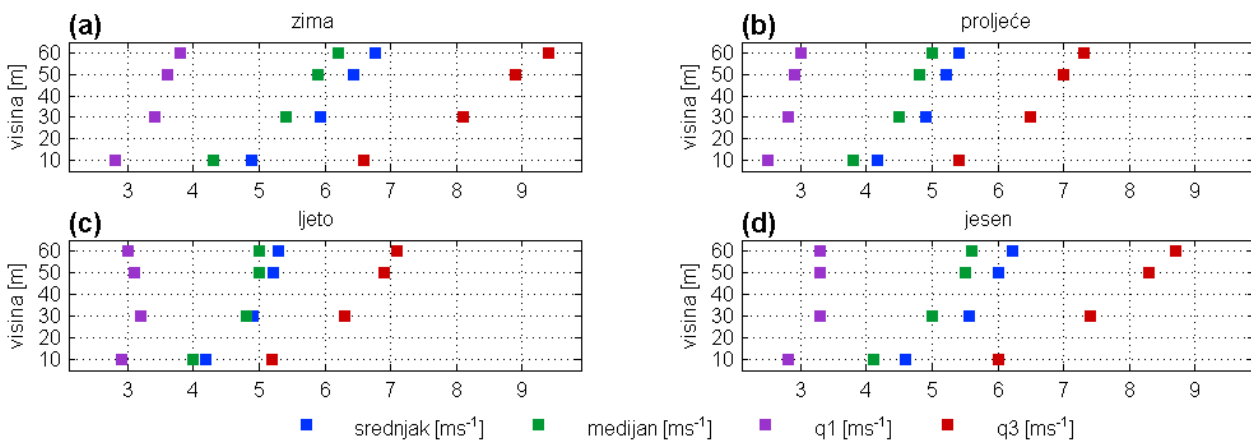
Slika 4.1: Prikaz vremenskih nizova mjerenih podataka stupa 1 za razdoblje 5.–11. rujna 2010. godine u terminima UTC+1: (a) brzina vjetra na 10, 30, 50 i 60 m; (b) smjer vjetra na 10 i 60 m.

Izračunane su godišnje (za razdoblja zapisana u tablici 3.1) i sezonske vrijednosti osnovnih statističkih parametara lokacije, rasapa te oblika empirijskih raspodjela svih nizova mjerenih brzina. Godišnje vrijednosti parametara lokacije stupova 1, 5 i 8 prikazane su na slici 4.2. Godišnje vrijednosti svih parametara lokacije na svim mjernim stupovima rastu visinom. To je

očekivano svojstvo jer brzina vjetra najčešće raste visinom. Srednjak svih nizova strogo je veći od pripadnog medijana, no razlika nije veća od 1 ms^{-1} . Ovo upućuje na pozitivnu asimetričnost, odnosno na pomak funkcija raspodjele brzina ulijevo, to jest na njihov rep udesno. Identične karakteristike mogu se uočiti na sezonskim vrijednostima parametara lokacije. Jedina iznimka prvi je ljetni kvartil stupa 1 (prikazano na slici 4.3). Najveće vrijednosti sezonskih parametara lokacije javljaju se zimi.

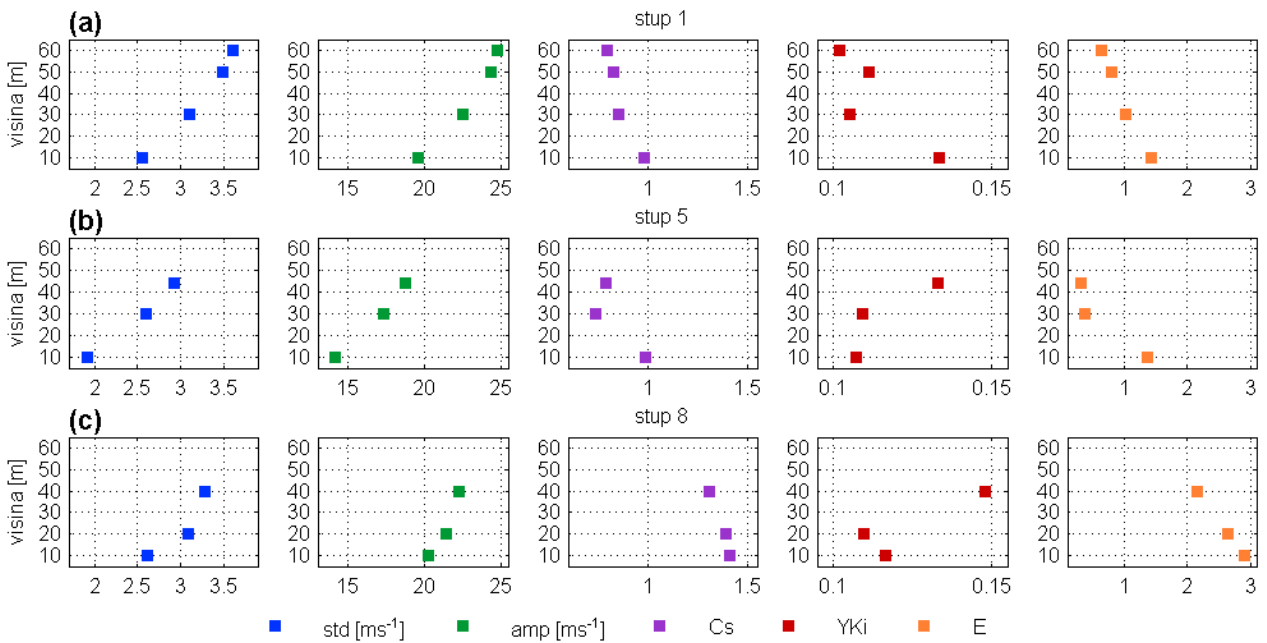


Slika 4.2: Statistički parametri mjerene brzine vjetra – srednjak, medijan te prvi (q1) i treći (q3) kvartil za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 5; (c) stup 8. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.

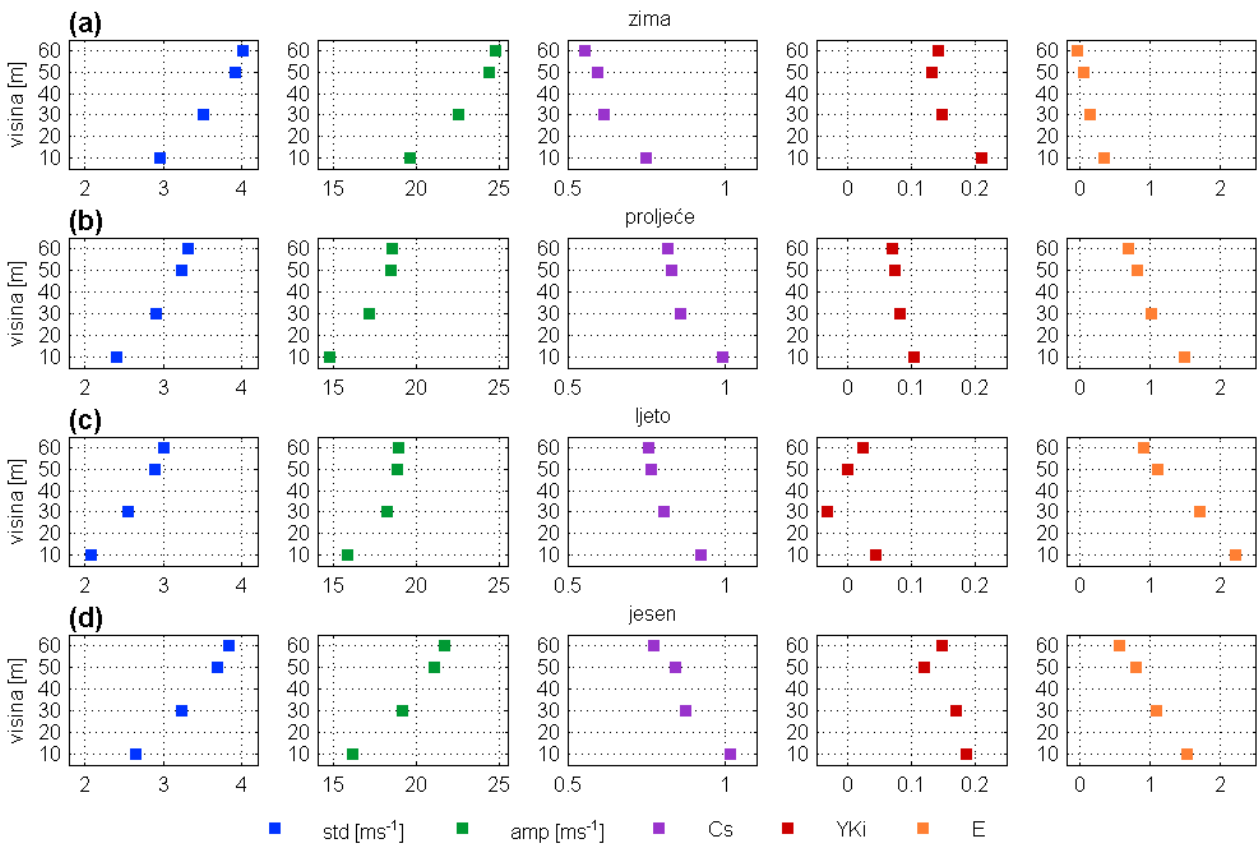


Slika 4.3: Statistički parametri mjerene brzine vjetra stupa 1 – srednjak, medijan te prvi (q1) i treći (q3) kvartil: (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.

Na slici 4.4 prikazane su vrijednosti parametara rasapa. Godišnje vrijednosti parametara rasapa rastu visinom na svim mjernim stupovima. Iznimka je parametar amplitude na stupu 2 (Prilog A, slika 2). Amplituda na 60 m manja je od amplitude na 40 m, no niz brzine vjetra stupa 2 na 60 m dug je samo dva mjeseca. Ovakvo ponašanje parametara rasapa upućuje na veću raspršenost vrijednosti brzina vjetra na većim visinama. Sezonske vrijednosti također rastu visinom, a najveće vrijednosti javljaju se zimi. Na slici 4.5 prikazane su sezonske vrijednosti stupa 1.



Slika 4.4: Statistički parametri mjerene brzine vjetra – standardna devijacija (std), amplituda (amp), koeficijent simetrije (Cs), Yule-Kendallov indeks (YKi) te eksces (E) za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 5; (c) stup 8. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.

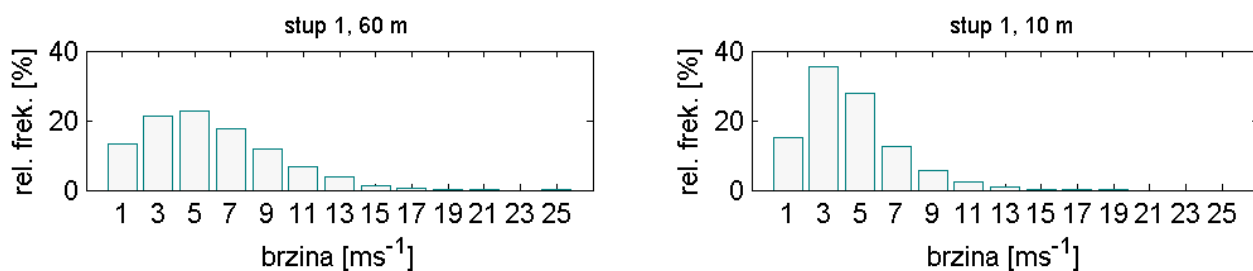


Slika 4.5: Statistički parametri mjerene brzine vjetra stupa 1 – standardna devijacija (std), amplituda (amp), koeficijent simetrije (Cs), Yule-Kendallov indeks (YKi) te eksces (E): (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.

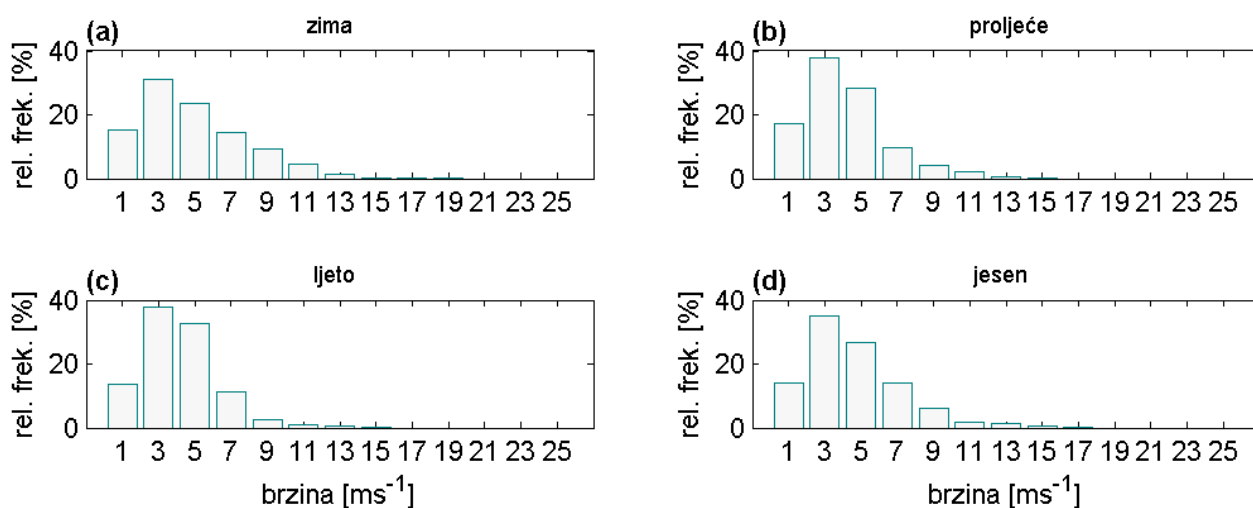
Koeficijent simetrije i Yule-Kendallov indeks mjera su asimetričnosti funkcije raspodjele. Godišnje su vrijednosti tih parametara svih nizova brzine vjetra pozitivne, što znači da su svi nizovi pozitivno asimetrični, odnosno imaju rep udesno. Iako parametri mjere ista svojstva, između njih postoji nedosljednost. Naprimjer na stupu 5 (slika 4.4) Yule-Kendallov indeks strogo raste visinom, dok koeficijent simetrije ima padajuć trend. Eskces poprma pozitivne godišnje vrijednosti, što znači da su funkcije raspodjele brzine više i uže nego normalna razdioba, to jest imaju tanke i dugačke repove. Sezonske vrijednosti Yule-Kendallova indeksa te eskcesa mogu poprimiti negativne vrijednosti, dok je koeficijent simetrije stalno pozitivan.

Histogrami najviše i najniže razine godišnjih nizova stupa 1 prikazani su na slici 4.6. Oba su histograma asimetrična s repovima udesno. Na većoj visini češće su veće brzine te je histogram niži i širi. Histogrami ostalih lokacija imaju slične karakteristike.

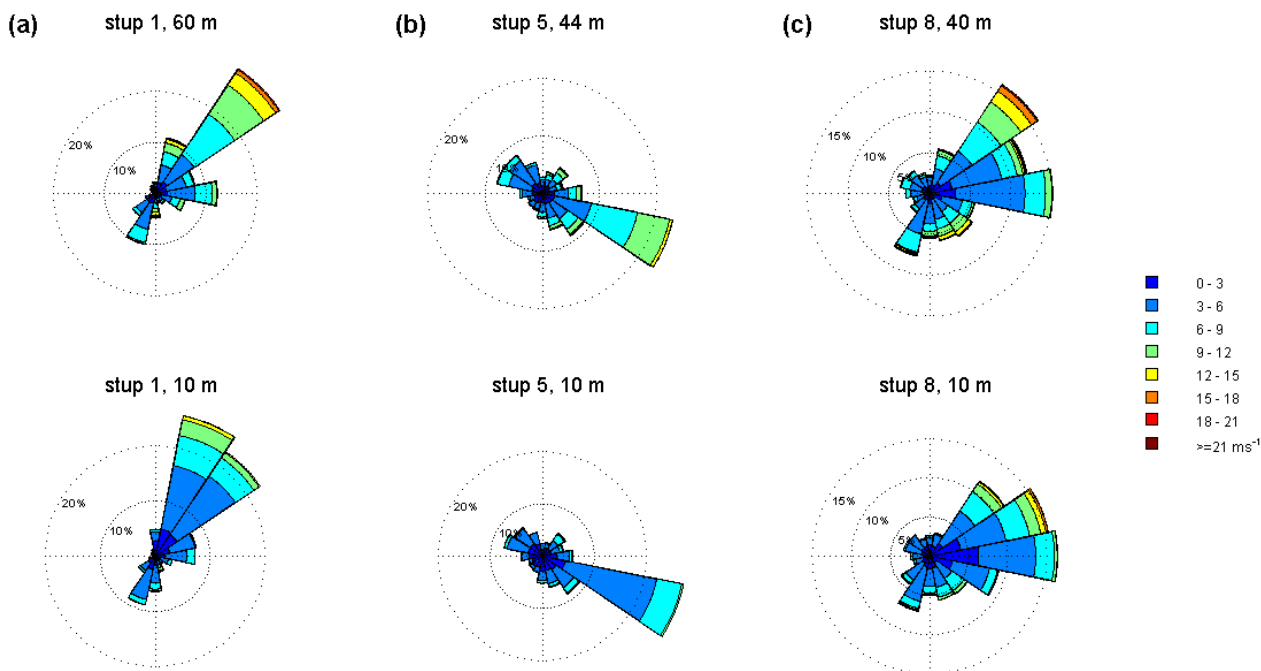
Sezonski histogrami brzine vjetra stupa 1 na 10 m prikazani su na slici 4.7. Histogrami su međusobno prilično slični. Zima se ističe po malo češćim većim brzinama.



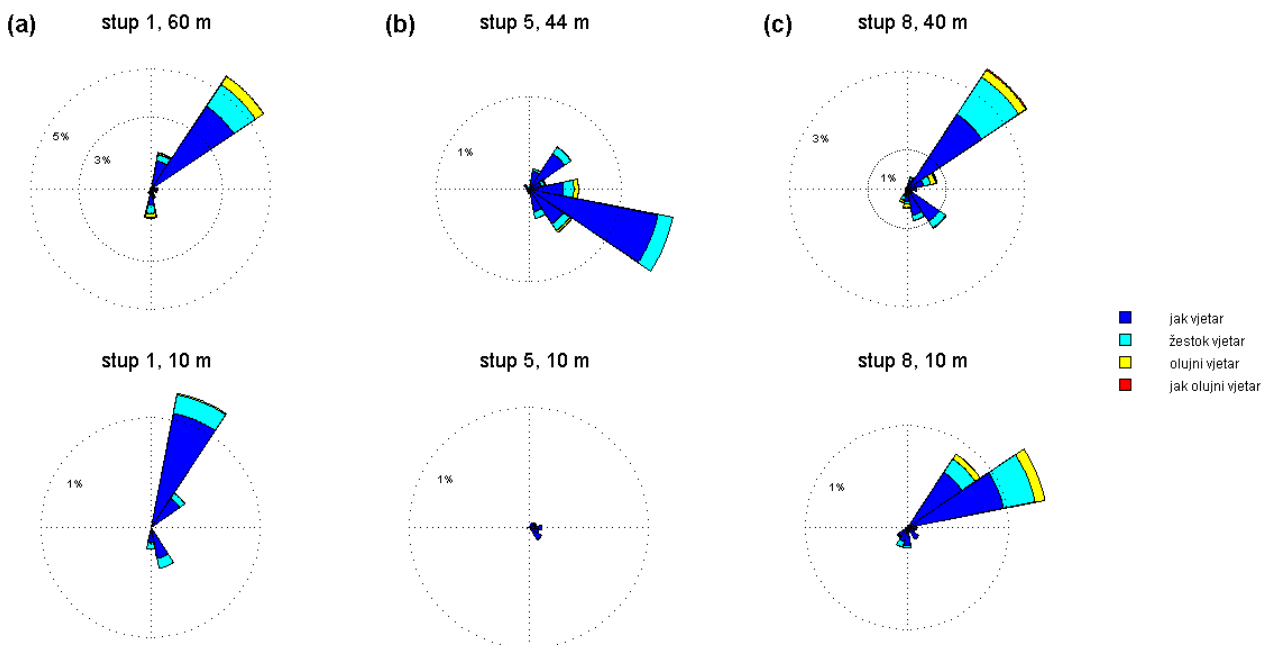
Slika 4.6: Histogrami mjerene brzine vjetra stupa 1 na najvišoj i najnižoj dostupnoj visini mjerenja za razdoblja zapisana u tablici 3.1. Širina jednog stupca iznosi 2 ms^{-1} .



Slika 4.7: Histogrami mjerene brzine vjetra stupa 1 na 10 m: (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Širina jednog stupca iznosi 2 ms^{-1} .

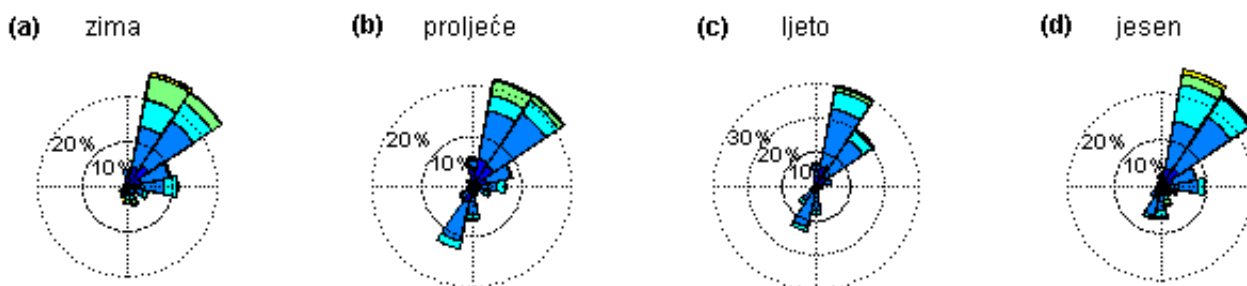


Slika 4.8: Ruže mjerene brzine vjetra na najvišoj i najnižoj dostupnoj visini za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 5; (c) stup 8. Postoci uz kružnice odgovaraju relativnoj frekvenciji.

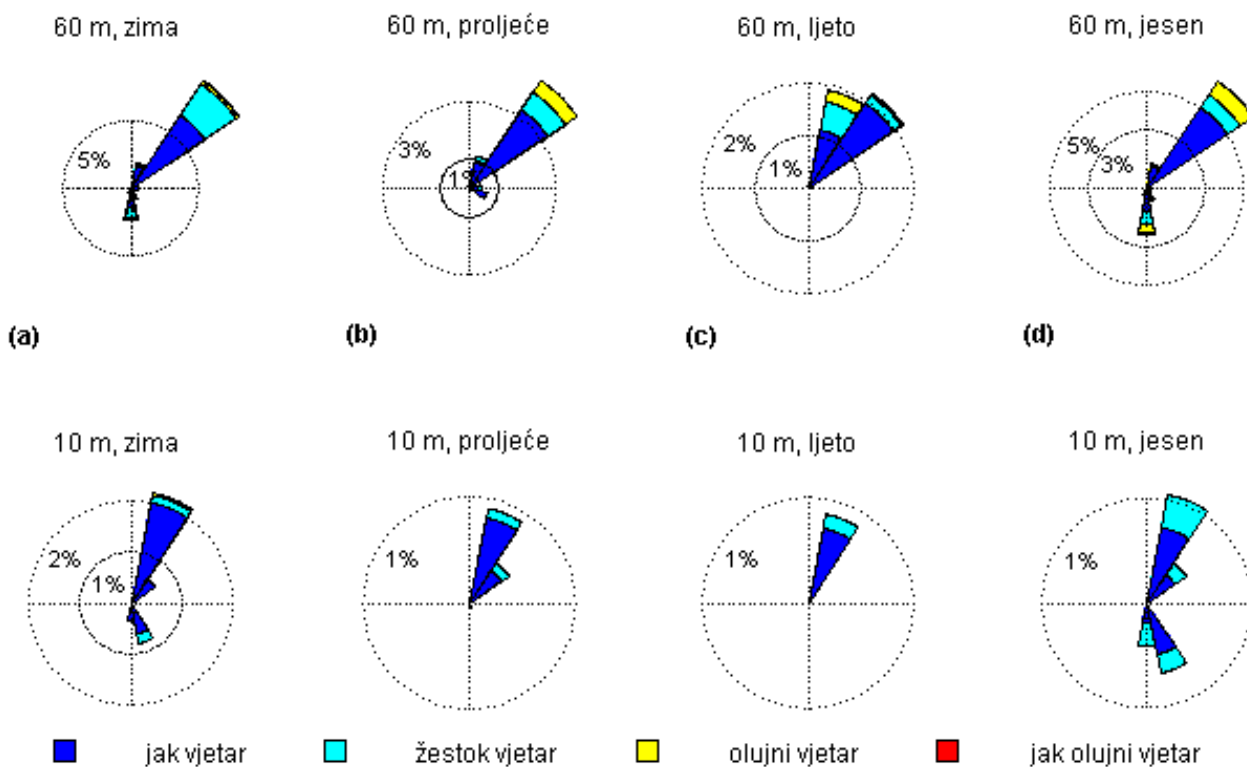


Slika 4.9: Ruže mjerene brzine jakog i olujnog vjetra (brzina iznad 10.8 ms^{-1}) na najvišoj i najnižoj dostupnoj visini za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 5; (c) stup 8. Postoci uz kružnice odgovaraju relativnoj frekvenciji.

Na slici 4.8 prikazane su godišnje ruže vjetra najviših i najnižih razina stupova 1, 5 i 8, dok su na slici 4.9 prikazane godišnje ruže jakog i olujnog vjetra. Na lokaciji stupa 1 bura je dominantno najčešći vjetar. Smjer puhanja blago joj se zakreće visinom po pravilu lijeve ruke, kao i u Ekmanovu sloju, to jest anticiklonalno visinom. Nakon bure, na lokaciji stupa 1 najučestaliji vjetar je smorac. Jugo puše vrlo rijetko. Ruže vjetra stupa 5 pokazuju očekivana svojstva za zadarsko područje: najčešći vjetar nije tipičnog smjera bure, a jaka vjetra na 10 m gotovo i nema. Najčešći je vjetar istočno-jugoistočnog smjera. Na stupu 8 ponovno je najčešća bura, a nakon nje jugo. Smorac je treći po učestalosti.



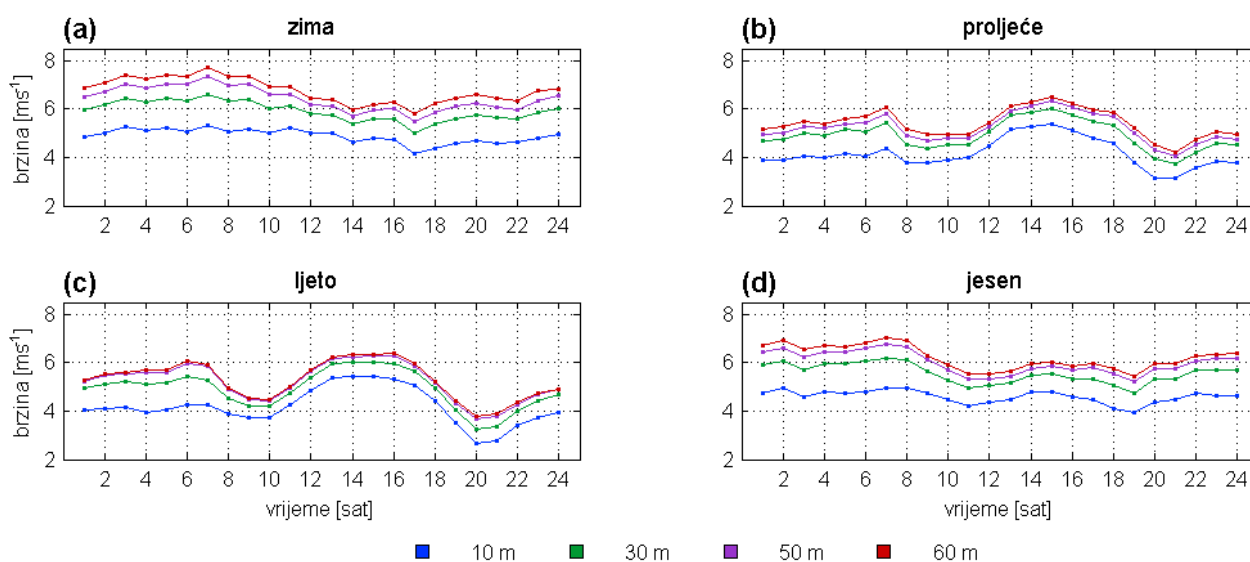
Slika 4.10: Ruže mjerene brzine vjetra stupa 1 na 10 m: (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Legenda ista kao na slici 4.8. Postoci uz kružnice odgovaraju relativnoj frekvenciji.



Slika 4.11: Ruže mjerene brzine jakog i olujnog vjetra (brzina iznad 10.8 ms^{-1}) stupa 1 na najvišoj i najnižoj dostupnoj visini: (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Postoci uz kružnice odgovaraju relativnoj frekvenciji.

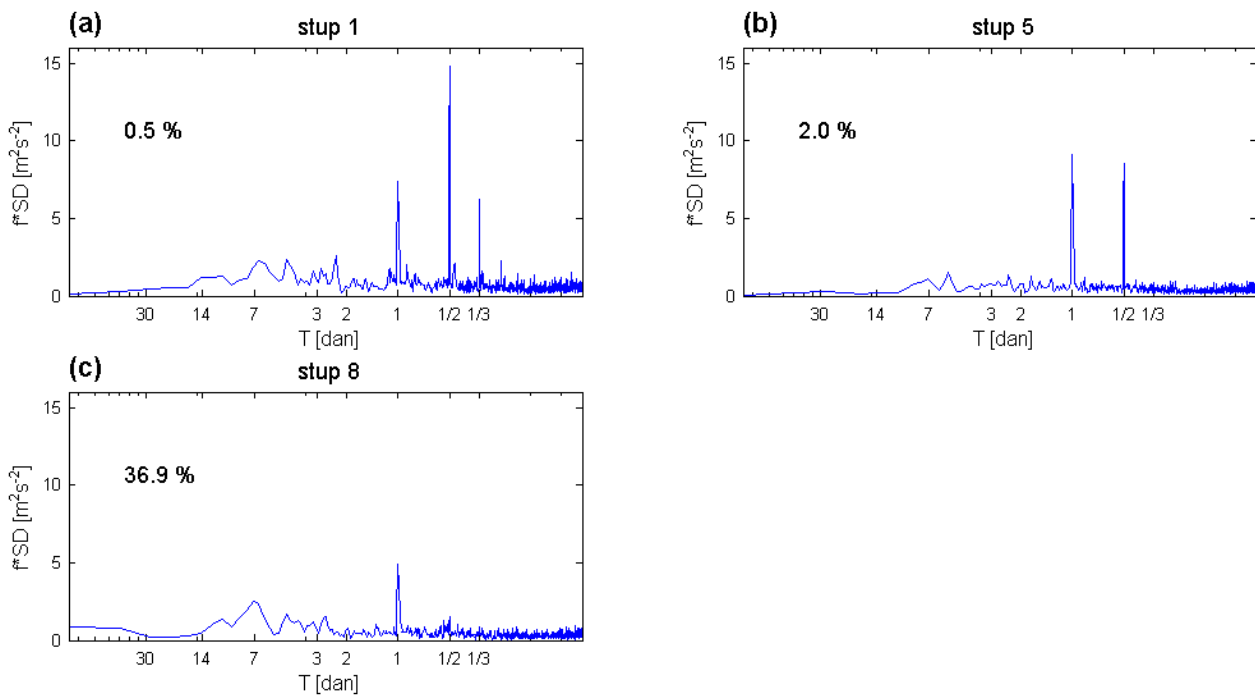
Sezonske ruže vjetrova stupa 1 na 10 m prikazane su na slici 4.10. Može se uočiti da su sezonske situacije međusobno uvelike slične. Zima se ističe jedino po izostanku smorca. Na sezonskom prikazu jakog i olujnog vjetra stupa 1 (slika 4.11) može se uočiti spomenuto anticiklonalno zakretanje smjera vjetra visinom.

Dnevni hod brzine vjetra po sezonama stupa 1 prikazan je na slici 4.12. U svim sezonama brzina očekivano raste visinom. Krivulje brzina različitih nivoa unutar iste sezone imaju gotovo identičan oblik. U proljeće i ljeto brzina ima dva izražena minimuma i maksimuma. Prvi su maksimumi u poslijepodnevnim satima, a drugi nakon izlaska sunca. Prvi minimumi javljaju se nakon zalaska sunca. Ljetne razlike između maksimuma i minimuma manje su od 3 ms^{-1} . Zimi i u jesen dnevne promjene brzine vrlo su male. Maksimalna brzina postiže se u vrijeme izlaska sunca, a minimalna u vrijeme zalaska. Dnevni hodovi brzine ostalih stupova imaju slično ponašanje.



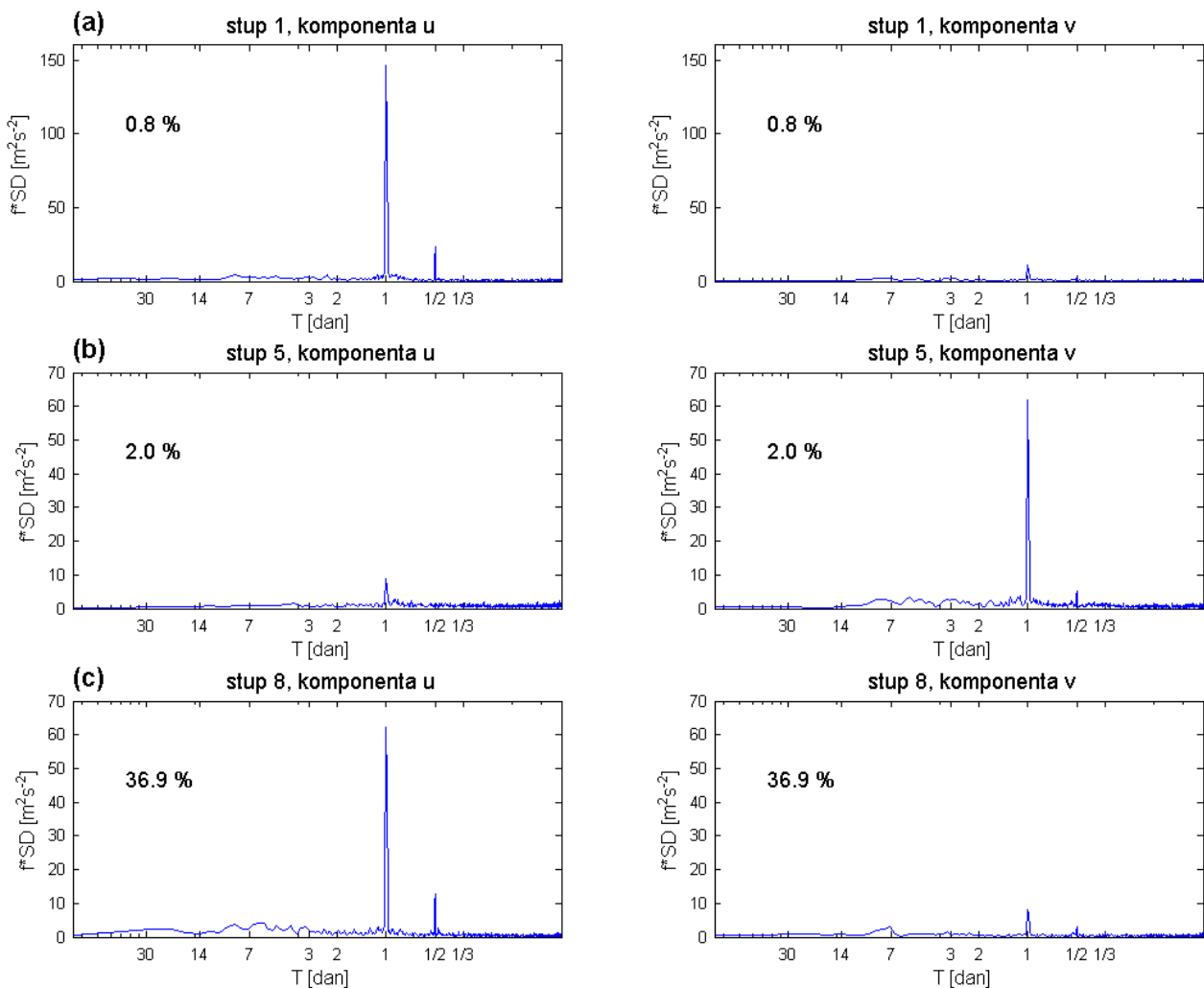
Slika 4.12: Dnevni hod mjerene brzine vjetra stupa 1: (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Vrijeme u terminima UTC+1.

Otežane funkcije spektralne gustoće mjerene brzine na 10 m prikazane su na slici 4.13. Na svim lokacijama postoje istaknuti lokalni maksimumi u dnevnom području koji sugeriraju dnevnu varijabilnost, odnosno dnevnu cirkulaciju s jednim maksimumom i minimumom. Kod stupova 1 i 5 istaknuti su i lokalni maksimumi u poludnevnom području koji ukazuju na postojanje dnevne cirkulacije s dva maksimuma. Može se raditi o obalnoj cirkulaciji ili cirkulaciji obronka, no zbog položaja mjernog stupa vjerojatnija je cirkulacija obronka. Slične karakteristike mogu se vidjeti na ostalim visinama.



Slika 4.13: Otežane funkcije spektralne gustoće mjerene brzine vjetra na 10 m: (a) stup 1; (b) stup 5; (c) stup 8. Postoci odgovaraju udjelu nedostajućih podataka u nizu.

Promotrene su i funkcije spektralne gustoće energije komponenti brzine vjetra. Brzina vjetra rastavljena je na komponente u smjeru pružanja Dinarida (komponenta v) te okomito na Dinaride (komponenta u). Smjer je pružanja Dinarida sjeverozapad-jugoistok. Otežane funkcije spektralne gustoće energije komponenti brzine vjetra prikazane su na slici 4.14. Primarni maksimumi na svim lokacijama nalaze se u dnevnom području, što potvrđuje postojanje dnevnih cirkulacija. Kod stupova 1 i 8 maksimum je prisutan kod komponente u i ukazuje na postojanje izražene planinske ili obalne cirkulacije. Na stupu 5 maksimum je prisutan kod komponente v .



Slika 4.14: Otežane funkcije spektralne gustoće komponenti mjerene brzine vjetra na 10 m: (a) stup 1; (b) stup 5; (c) stup 8. Postoci odgovaraju udjelu nedostajućih podataka u nizu.

Udjeli pojedinih perioda u ukupnoj varijanci mjenenog vjetra na 10 m prikazani su u tablici 4.1, a udjeli viših visina prikazani su u tablici 4.2. Udjeli kraće nego dnevnih i mezoskalnih perioda blago padaju visinom na svim lokacijama, osim kod stupa 8, gdje rastu visinom. Varijabilnost vjetra na dnevnim periodima ne mijenja se visinom na stupovima 1, 2 i 8, dok na stupovima 4 i 5 blago pada visinom. Udjeli dulje nego dnevnih te sinoptičkih perioda u ukupnoj varijanci brzine vjetra rastu visinom. Iznimku čini stup 2, čiji udio dulje nego dnevnih perioda blago pada. Udjeli pojedinih perioda u ukupnoj varijanci komponenti vjetra prikazani su u tablicama 4.3 i 4.4. Kod njih se slična visinska raspodjela, kao i za ukupnu brzinu, može uočiti kod svih perioda osim dnevnih. Promjena varijabilnosti dnevnih perioda visinom ovisi o lokaciji i komponenti, no najčešći je pad varijabilnosti visinom.

[%]	stup 1	stup 2	stup 4	stup 5	stup 8
kraće nego dnevni	30	22	26	35	20
dnevni	5	4	7	8	4
dulje nego dnevni	35	41	35	35	30
mezoskalni	43	35	41	54	31
sinoptički	36	43	35	33	38

Tablica 4.1: Udio pojedinih perioda u ukupnoj varijanci mjerene brzine vjetra na 10 m. Kraće nego dnevni periodi duljine su 2–22 h, dnevni 22–26 h, dulje nego dnevni 26 h–7 dana; mezoskalni su kraći od 2 dana, sinoptički su duljine 2–10 dana.

[%]	stup 1 60 m	stup 2 40 m	stup 4 44 m	stup 5 44 m	stup 8 40 m
kraće nego dnevni	28	20	26	32	25
dnevni	5	4	5	6	4
dulje nego dnevni	36	40	36	37	37
mezoskalni	41	33	38	49	37
sinoptički	38	44	37	37	43

Tablica 4.2: Udio pojedinih perioda u ukupnoj varijanci mjerene brzine vjetra. Kraće nego dnevni periodi duljine su 2–22 h, dnevni 22–26 h, dulje nego dnevni 26 h–7 dana; mezoskalni su kraći od 2 dana, sinoptički su duljine 2–10 dana.

[%]	stup 1		stup 2		stup 4		stup 5		stup 8	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
kraće nego dnevni	18	29	13	21	18	17	40	24	15	22
dnevni	25	10	16	3	5	2	7	16	15	7
dulje nego dnevni	26	32	31	40	30	39	31	37	31	25
mezoskalni	50	47	36	31	30	27	58	51	37	35
sinoptički	27	36	36	47	33	42	26	35	33	35

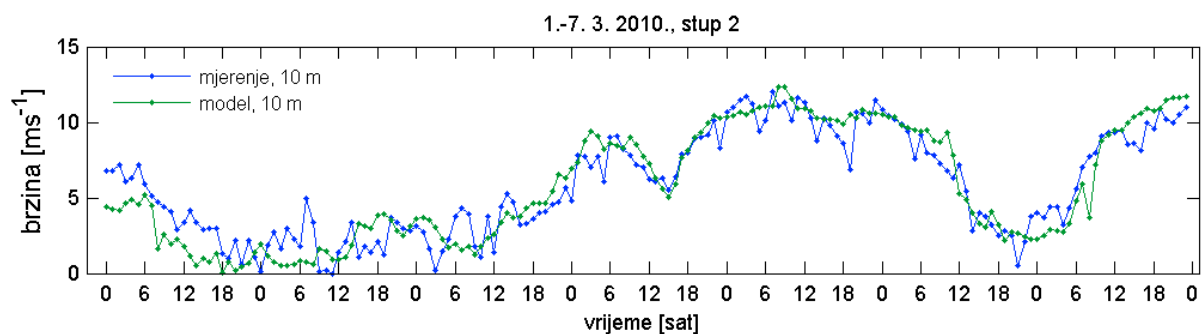
Tablica 4.3: Udio pojedinih perioda u ukupnoj varijanci mjerenih komponenti brzine vjetra na 10 m (osim stupa 2 – 30 m). Kraće nego dnevni periodi duljine su 2–22 h, dnevni 22–26 h, dulje nego dnevni 26 h–7 dana; mezoskalni su kraći od 2 dana, sinoptički su duljine 2–10 dana.

[%]	stup 1		stup 5		stup 8	
	60 m		44 m		40 m	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
kraće nego dnevni	15	27	37	21	16	25
dnevni	21	4	7	12	16	6
dulje nego dnevni	28	36	33	40	33	29
mezoskalni	44	39	56	44	40	39
sinoptički	31	43	28	41	36	39

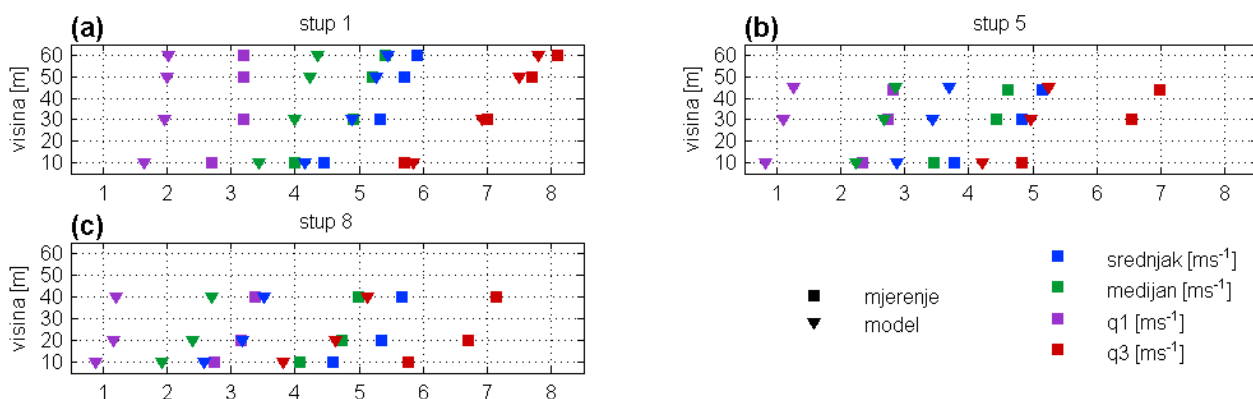
Tablica 4.4: Udio pojedinih perioda u ukupnoj varijanci mjerenih komponenti brzine vjetra. Kraće nego dnevni periodi duljine su 2–22 h, dnevni 22–26 h, dulje nego dnevni 26 h–7 dana; mezoskalni su kraći od 2 dana, sinoptički su duljine 2–10 dana.

4.2 Statistička i spektralna verifikacija smjera i brzine vjetra

Na slici 4.15 prikazani su sedmodnevni vremenski nizovi mjerenih i modeliranih podataka brzine vjetra. Model relativno dobro prati mjerenu brzinu vjetra, no nizovi modelirane brzine pokazuju nešto slabiju varijabilnost.



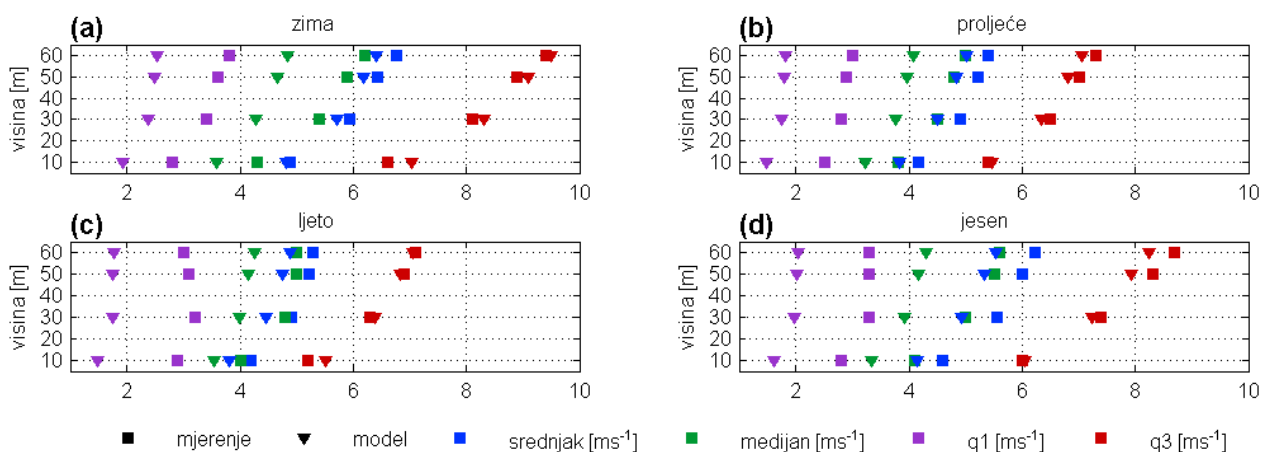
Slika 4.15: Prikaz vremenskih nizova mjerenih i modeliranih podataka stupa 2 za razdoblje 1.–7. ožujka 2010. godine u terminima UTC+1.



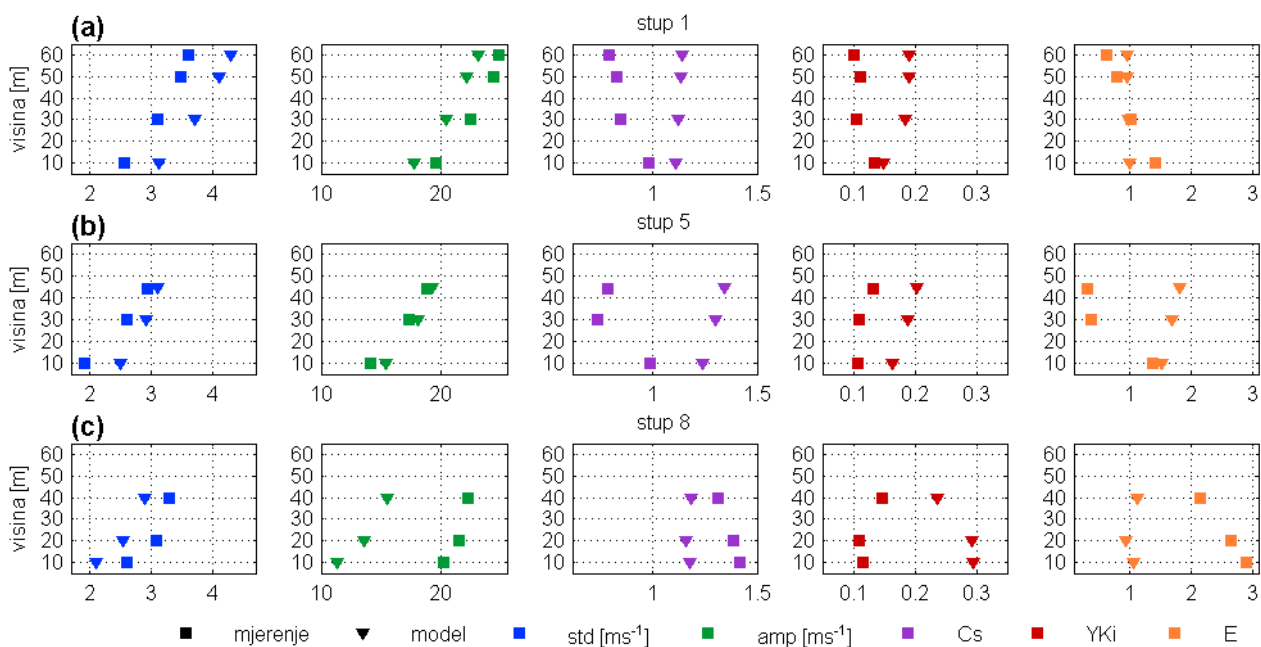
Slika 4.16: Statistički parametri mjerene i modelirane brzine vjetra – srednjak, medijan te prvi (q1) i treći (q3) kvartil za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 5; (c) stup 8. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.

Godišnje i sezonske vrijednosti osnovnih statističkih parametara lokacije, rasapa te oblika modeliranih nizova brzine vjetra uspoređene su s mjerenim vrijednostima. Na slici 4.16 prikazani su godišnji, a na slici 4.17 sezonski parametri lokacije mjerenih i modeliranih podataka. Model dobro prati visinski profil mjerenja, no promašuje iznose. Podcjenjuje sve parametre lokacije. Treći kvartil ponekad je precijenjen.

Na slici 4.18 uspoređene su godišnje, a na slici 4.19 sezonske vrijednosti statističkih parametara rasapa i oblika dobivene pomoću mjerenih i modeliranih brzina. Modelirane vrijednosti parametara rasapa uglavnom dobro prate oblik vertikalnog profila mjerenih vrijednosti. Odnosi veličina ovise o lokaciji mjernog stupa. Parametri asimetrije najčešće su precijenjeni.

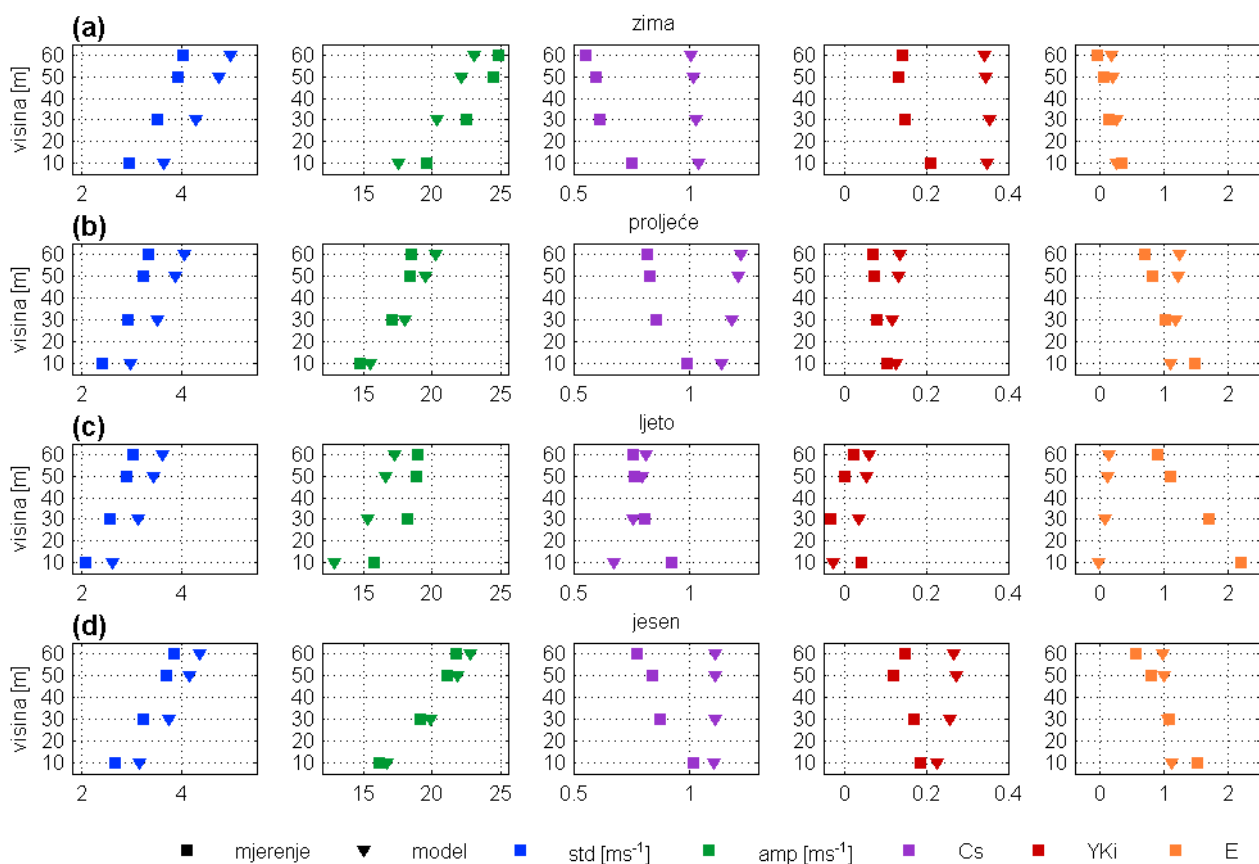


Slika 4.17: Statistički parametri mjerene i modelirane brzine vjetra stupa 1 – srednjak, medijan te prvi (q1) i treći (q3) kvartil: (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.



Slika 4.18: Statistički parametri mjerene i modelirane brzine vjetra – standardna devijacija (std), amplituda (amp), koeficijent simetrije (Cs), Yule-Kendallov indeks (YKi) te eksces (E) za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 5; (c) stup 8. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.

Kao što je prikazano u tablici 4.5, vrijednosti MBIAS-a svih nizova manje su od jedan. Model sustavno podcjenjuje brzinu vjetra. Prognoza brzine vjetra stupa 8 jest najslabija. Model je najuspješniji na stupu 1. Za operativnu verziju modela ALADIN rezolucije 2 km Horvath i dr. (2011) dobili su za mjerenja na 10 m u obalnom području prosječni MBIAS oko 0.9. MBIAS dobiven u ovom radu sugerira veće pogreške, no to je i očekivano zbog položaja mjernih stupova, na uzdignutim vrhovima brda, koji u modelu tipično nisu reprezentativni te nisu usporedivi s klasičnim mjerenjima na 10 m.



Slika 4.19: Statistički parametri mjerene i modelirane brzine vjetra stupa 1 – standardna devijacija (std), amplituda (amp), koeficijent simetrije (Cs), Yule-Kendallov indeks (YKi) te eksces (E): (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.

MBIAS

visina [m]	10	20	30	40	44	50	60
stup 1	0.93		0.92			0.92	0.92
stup 2	0.93		0.80	0.78			0.86
stup 4	0.76		0.91		0.98		
stup 5	0.76		0.71		0.72		
stup 8	0.56	0.59		0.62			

Tablica 4.5: Multiplikativna sustavna pogreška (MBIAS) između odgovarajućih nizova brzine vjetra modela i mjerenja (osim kod niza mjerenja na 44 m koji je uspoređen s nizom modela na 45 m).

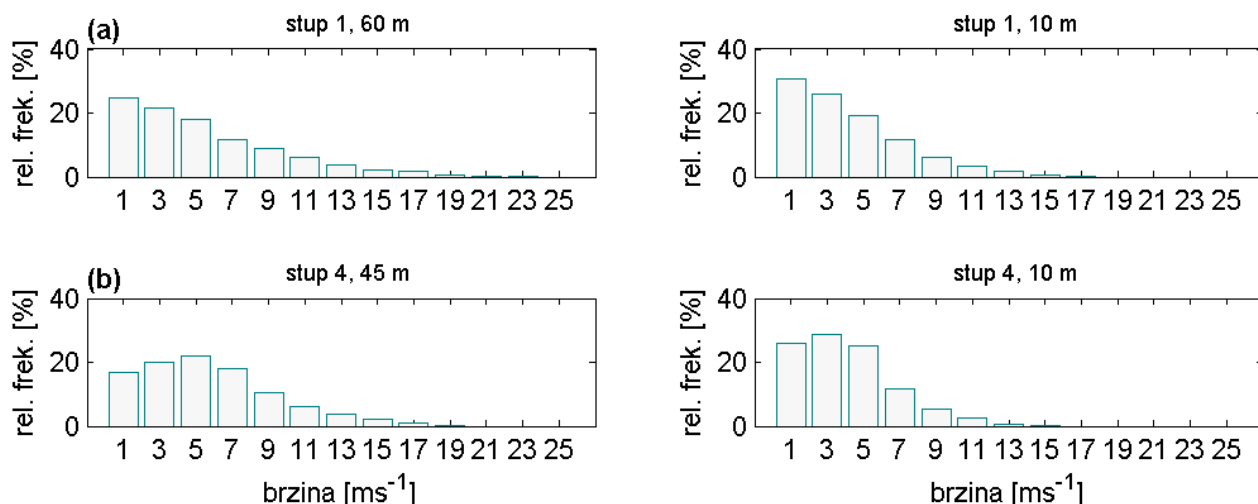
RMSE [ms⁻¹]

visina [m]	10	20	30	40	44	50	60
stup 1	2.26		2.67			2.92	3.03
stup 2	1.89		2.64	2.86			3.00
stup 4	2.59		2.55		2.67		
stup 5	2.17		2.82		2.92		
stup 8	2.74	3.03		3.14			

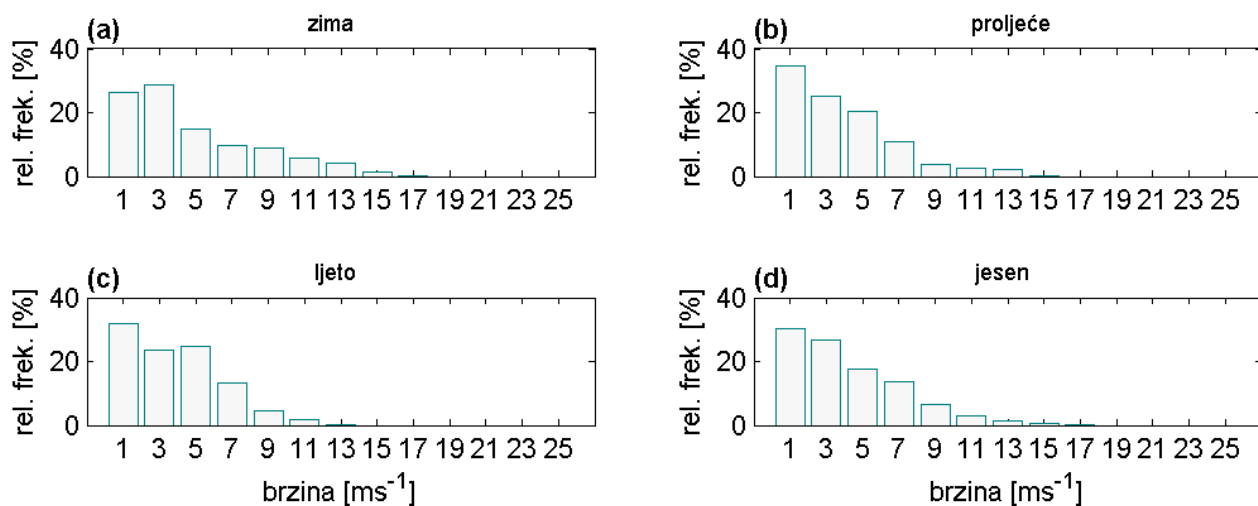
Tablica 4.6: Srednja kvadratna pogreška (RMSE) između odgovarajućih nizova brzine vjetra modela i mjerenja (osim kod niza mjerenja na 44 m koji je uspoređen s nizom modela na 45 m).

Vrijednosti RMSE-a zapisane su u tablici 4.6. Prema dobivenim vrijednostima model daje podjednako dobre prognoze na svim lokacijama. Vrijednosti RMSE-a uglavnom rastu visinom.

Godišnji histogrami dobiveni pomoću modeliranih podataka najviše i najniže dostupne visine mjerenja prikazani su na slici 4.20. Histogrami svih lokacija, osim stupa 4, podsjećaju na histograme stupa 1. Model precjenjuje učestalost najslabijih vjetrova. Histogrami su asimetrični bez repa s lijeve strane. Na stupu 4 model također precjenjuje učestalost najslabijeg vjetra, no histogram ima prihvatljiviji oblik. Sezonski histogrami stupa 1 na 10 m prikazani na slici 4.21 pokazuju iste karakteristike kao i godišnji histogram stupa 1.

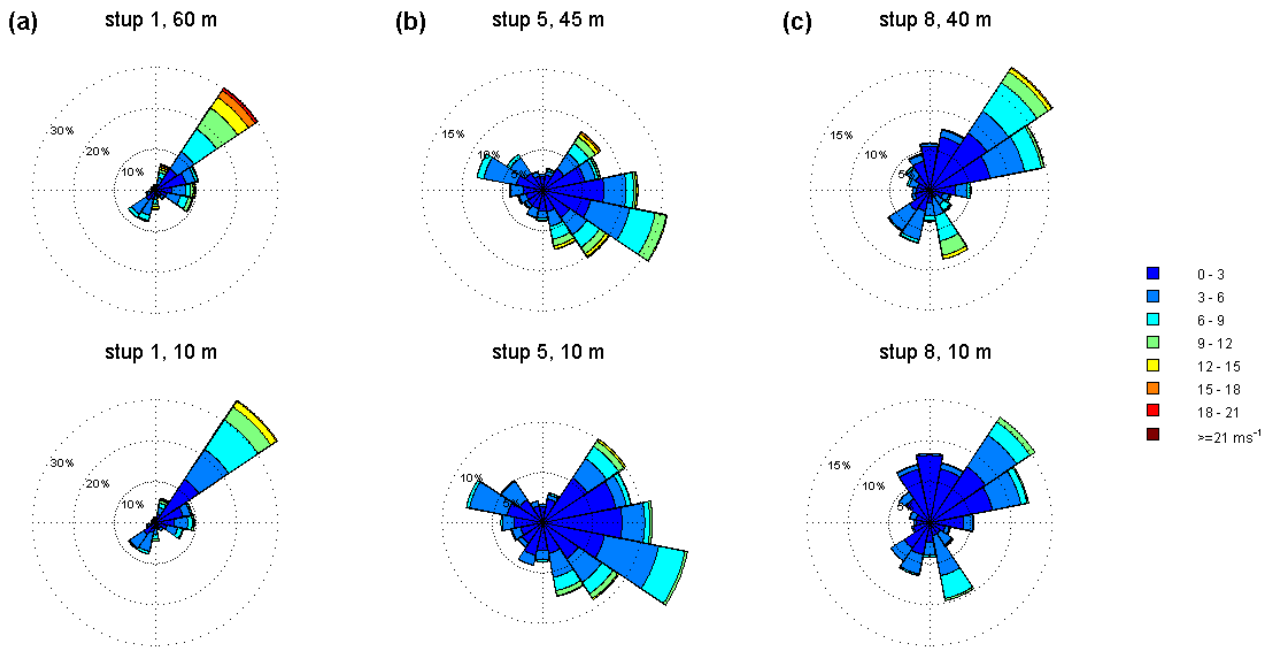


Slika 4.20: Histogrami modelirane brzine vjetra na najvišoj i najnižoj dostupnoj visini mjerenja za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 4. Širina jednog stupca iznosi 2 ms^{-1} .



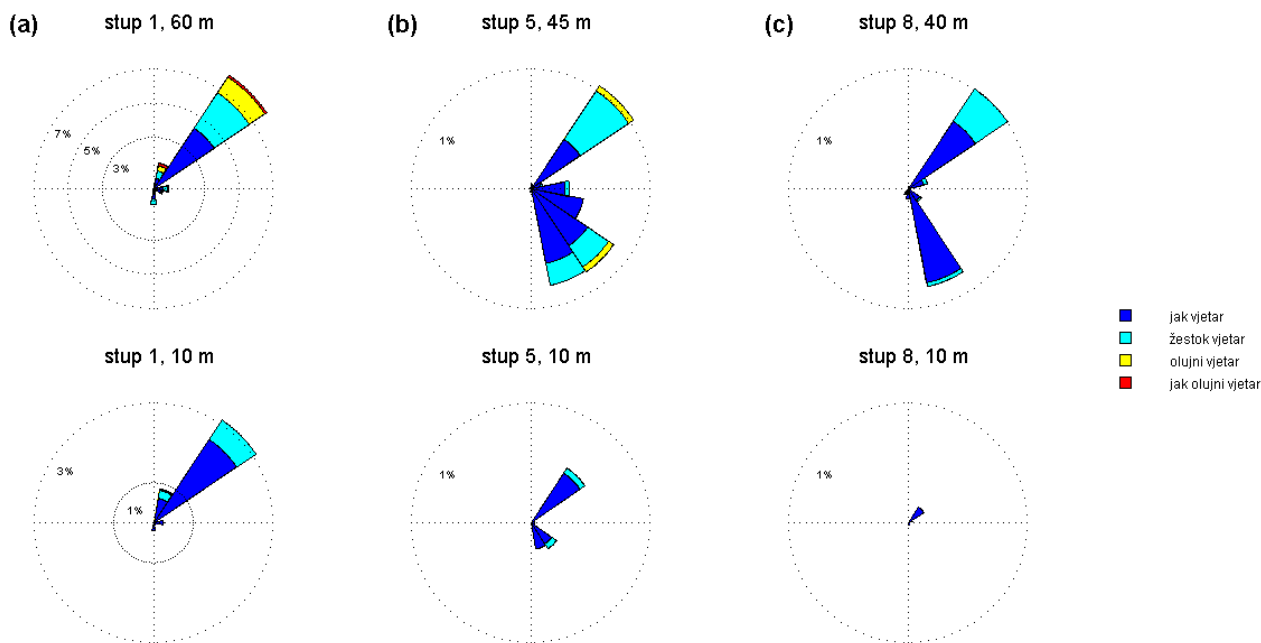
Slika 4.21: Histogrami modelirane brzine vjetra stupa 1 na 10 m: (a) zima; (b) proljeće; (c) ljet; (d) jesen. Širina jednog stupca iznosi 2 ms^{-1} .

Slika 4.22 prikazuje godišnje modelirane ruže vjetra najviših i najnižih razina stupova 1, 5 i 8. Usporedbom ovih ruža s odgovarajućim ružama dobivenim pomoću mjerenih podataka (slika 4.8) može se uočiti kako model precjenjuje učestalost pojave malih brzina. Ruže vjetra modeliranih podataka stupa 1 zadovoljavajućeg su oblika. Kod stupa 5 model prognozira preraspršenu ružu vjetra dok kod stupa 8 ima previše sjevernog vjetra, a premalo istočnog.

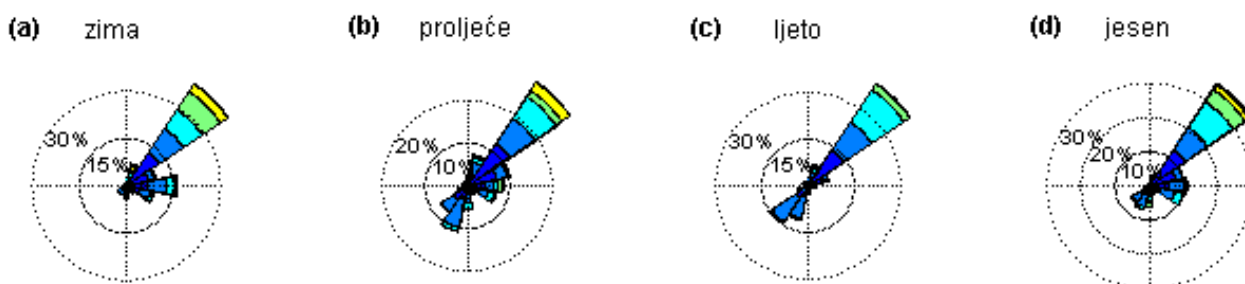


Slika 4.22: Ruže modelirane brzine vjetra na najvišoj i najnižoj dostupnoj visini mjerenja za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 5; (c) stup 8. Postoci uz kružnice odgovaraju relativnoj frekvenciji.

Na slici 4.23 prikazane su godišnje modelirane ruže jakog i olujnog vjetra. Model na stupu 1 precjenjuje učestalost jakog vjetra te prognozira jak olujni vjetar kojeg u mjerenjima nema. Na stupu 5 može se uočiti najveća razlika između modelirane i mjerene ruže jakog i olujnog vjetra. Model precjenjuje učestalost jakog vjetra, a izostavlja žestok vjetar istočno-jugoistočnog smjera. Na stupu 8 uočava se podcjenjivanje učestalosti jakog i olujnog vjetra.

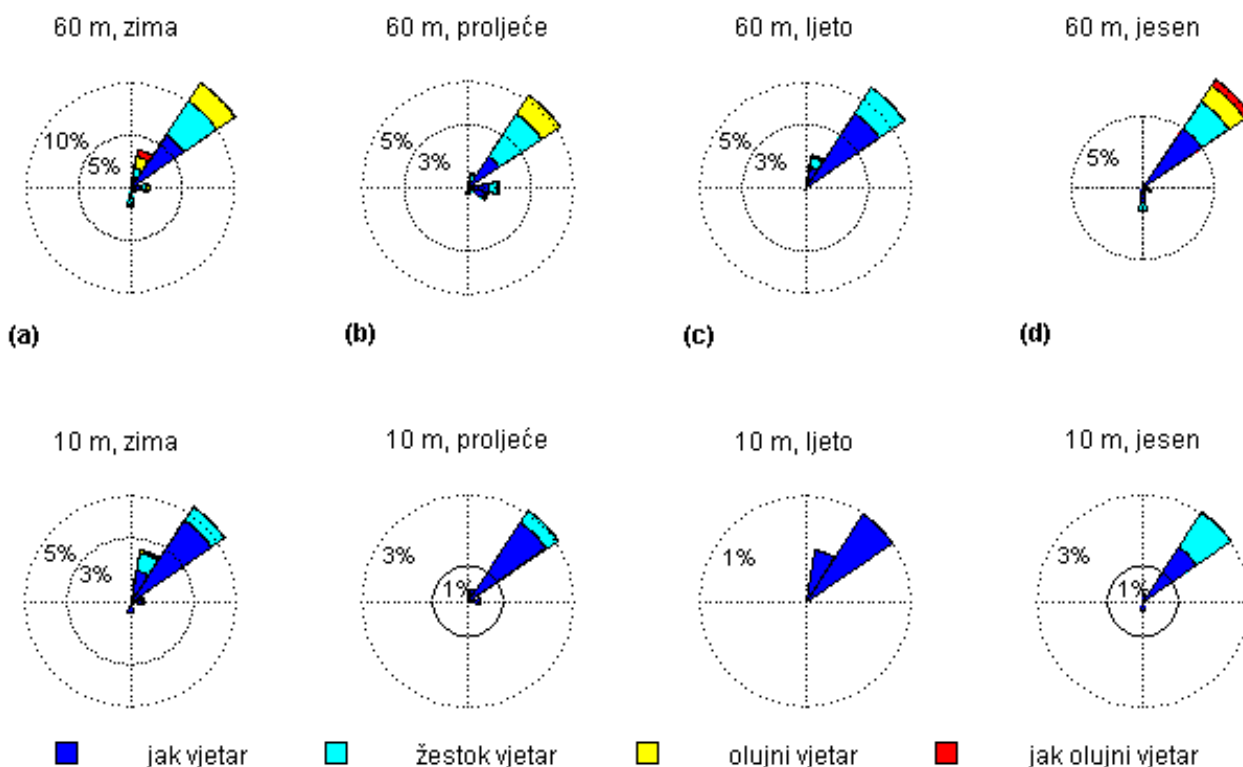


Slika 4.23: Ruže modelirane brzine jakog i olujnog vjetra (brzina iznad 10.8 ms^{-1}) na najvišoj i najnižoj dostupnoj visini mjerenja za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 5; (c) stup 8. Postoci uz kružnice odgovaraju relativnoj frekvenciji.



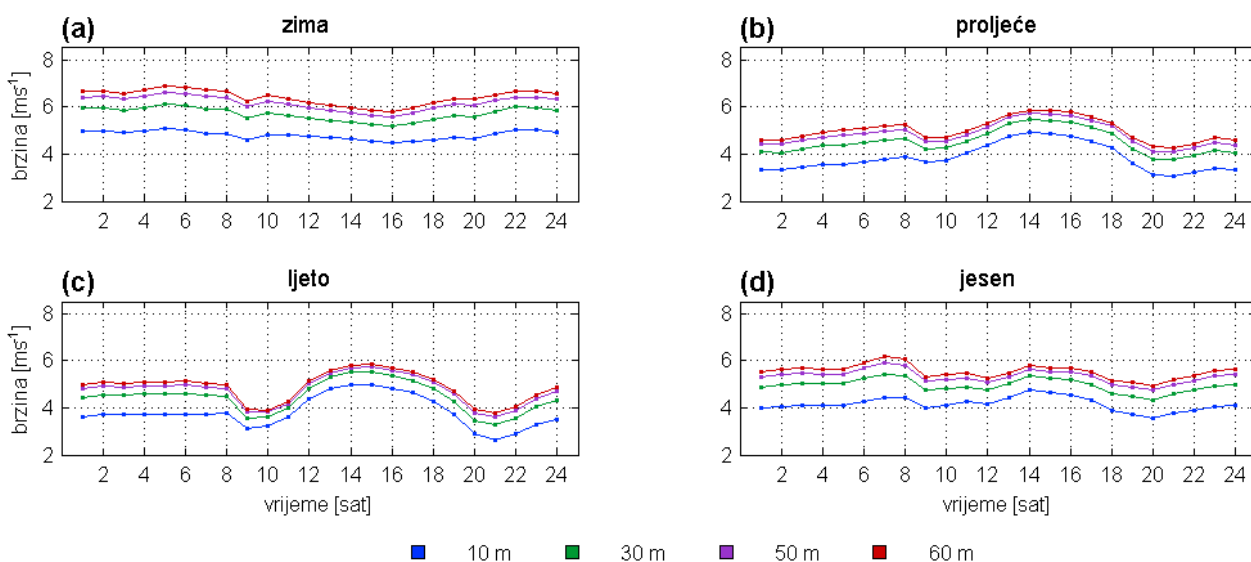
Slika 4.24: Ruže modelirane brzine vjetra stupa 1 na 10 m: (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Legenda ista kao na slici 4.22. Postoci uz kružnice odgovaraju relativnoj frekvenciji.

Sezonske ruže vjetra modeliranih podataka stupa 1 prikazane na slici 4.24 pokazuju znatno podudaranje s odgovarajućim ružama mjenjenih podataka. Učestalost jakog i olujnog vjetra kod modeliranih podataka znatno je precijenjena (slika 4.25).



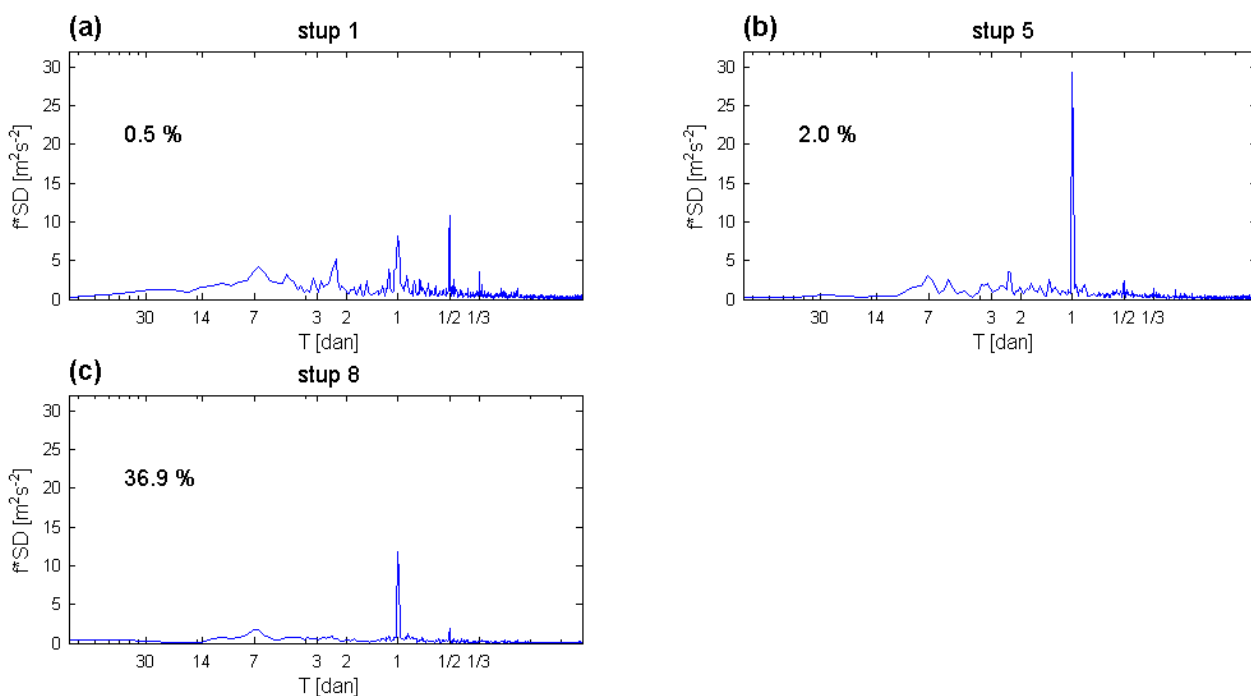
Slika 4.25: Ruže modelirane brzine jakog i olujnog vjetra (brzina iznad 10.8 ms^{-1}) stupa 1 na najvišoj i najnižoj dostupnoj visini mjerenja: (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Postoci uz kružnice odgovaraju relativnoj frekvenciji.

Na slici 4.26 prikazani su dnevni hodovi brzine vjetra dobiveni pomoću modeliranih podataka. Nakon usporedbe sa slikom 4.12 može se uočiti da model prilično dobro reproducira dnevni hod brzine vjetra.



Slika 4.26: Dnevni hod modelirane brzine vjetra stupa 1: (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Vrijeme u terminima UTC+1.

Otežane funkcije spektralne gustoće modelirane brzine na 10 m prikazane su na slici 4.27, a komponenti brzine na slici 4.28. Tijekom usporedbe s odgovarajućim slikama dobivenim pomoću mjerenih podataka može se vidjeti kako model prognozira maksimume spektralne gustoće na dobrim periodima, no ovisno o lokaciji promašuje visinu maksimuma.

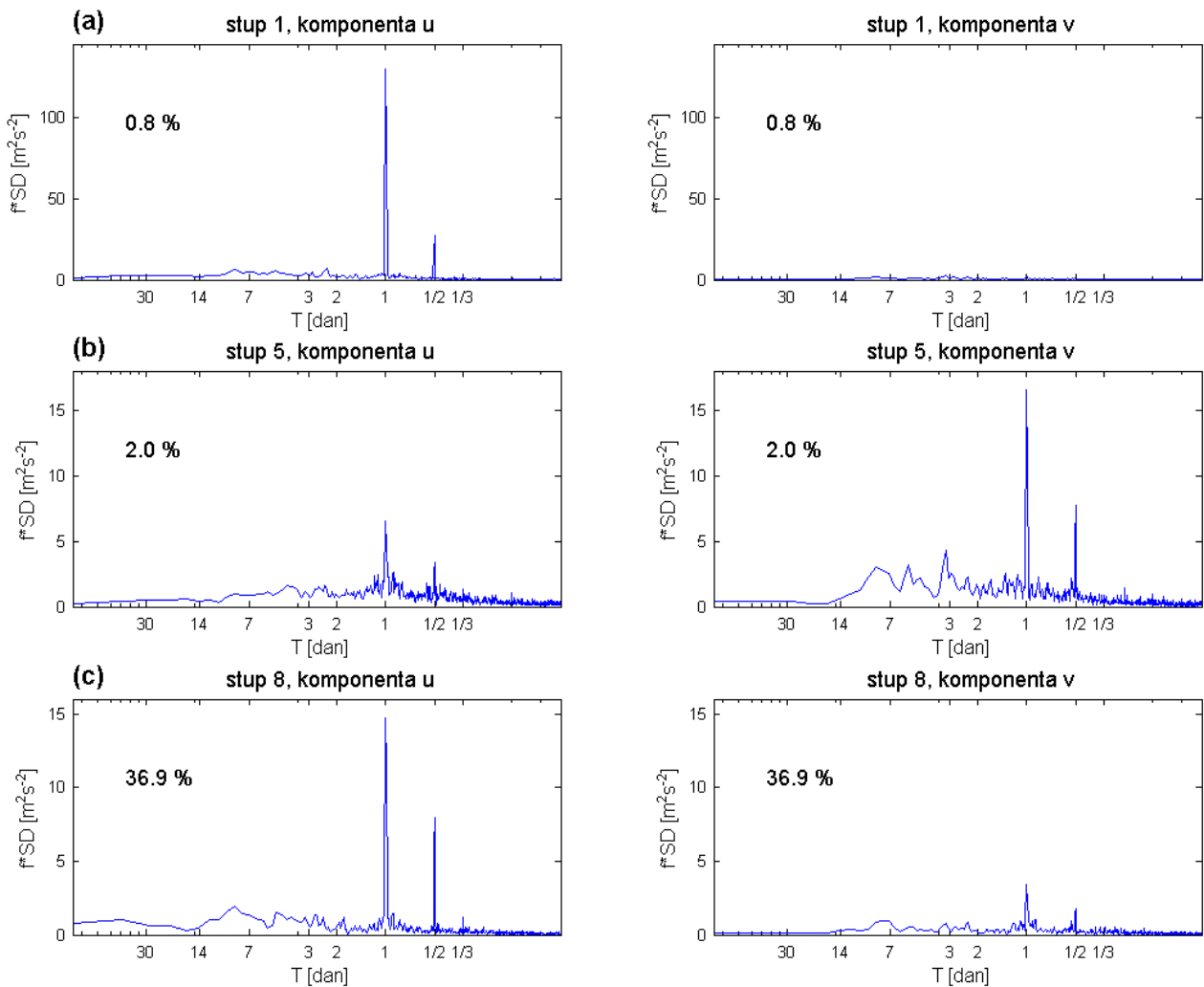


Slika 4.27: Otežane funkcije spektralne gustoće modelirane brzine vjetra na 10 m: (a) stup 1; (b) stup 5; (c) stup 8. Postoci odgovaraju udjelu nedostajućih podataka u nizu.

U tablicama 4.7 i 4.8 zapisani su udjeli pojedinih perioda u ukupnoj varijanci modeliranog vjetra. Model podcjenjuje varijabilnost smicanja brzine vjetra na kraćim nego dnevnim periodima. Varijabilnost vjetra na dnevnim periodima kod ukupne brzine precjenjuje, a kod komponenti ih podcjenjuje. Precjenjuje varijabilnost dulje nego dnevnih perioda. Varijabilnost mezoskalnih perioda je podcijenjena, dok je sinoptičkih precijenjena.

[%]	stup 1	stup 2	stup 4	stup 5	stup 8
kraće nego dnevni	18	16	10	19	17
dnevni	6	6	7	13	12
dulje nego dnevni	39	41	47	41	33
mezoskalni	33	31	26	45	37
sinoptički	42	44	50	41	39

Tablica 4.7: Udio pojedinih perioda u ukupnoj varijanci modelirane brzine vjetra na 10 m. Kraće nego dnevni periodi duljine su 2–22 h, dnevni 22–26 h, dulje nego dnevni 26 h–7 dana; mezoskalni su kraći od 2 dana, sinoptički su duljine 2–10 dana.



Slika 4.28: Otežane funkcije spektralne gustoće komponenti modelirane brzine vjetra na 10 m: (a) stup 1; (b) stup 5; (c) stup 8. Postoci odgovaraju udjelu nedostajućih podataka u nizu.

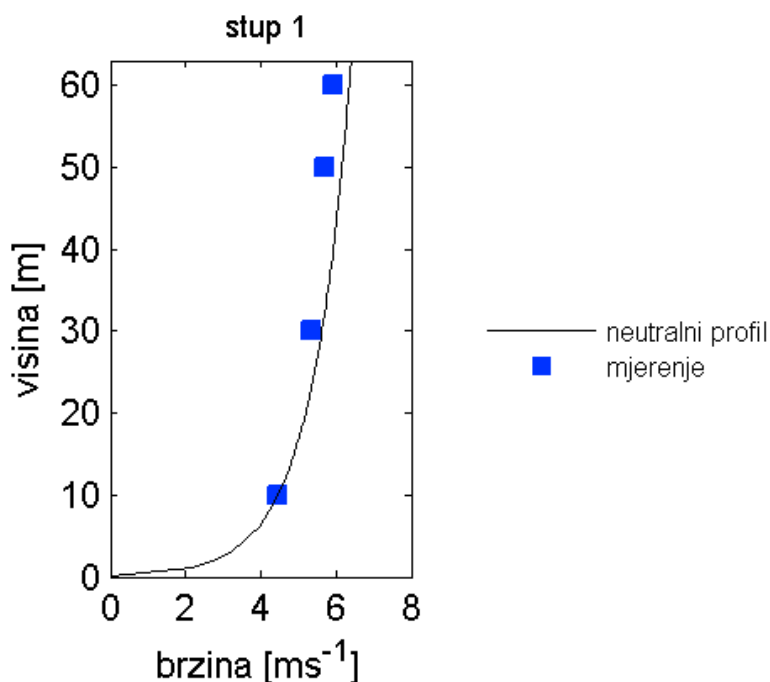
[%]	stup 1		stup 2		stup 4		stup 5		stup 8	
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
kraće nego dnevni	12	22	12	17	6	14	29	19	13	24
dnevni	17	4	14	3	3	2	7	7	10	8
dulje nego dnevni	32	42	33	44	33	40	39	43	28	33
mezoskalni	36	35	32	29	12	26	49	38	29	43
sinoptički	35	46	38	50	43	43	32	44	34	38

Tablica 4.8: Udio pojedinih perioda u ukupnoj varijanci modeliranih komponenti brzine vjetra na 10 m (osim stupa 2 – 30 m). Kraće nego dnevni periodi duljine su 2–22 h, dnevni 22–26 h, dulje nego dnevni 26 h–7 dana; mezoskalni su kraći od 2 dana, sinoptički su duljine 2–10 dana.

4.3 Analiza smicanja brzine vjetra

Vremenski nizovi smicanja brzine vjetra dobiveni su iz vremenskih nizova brzine vjetra na sljedeći način: od brzine višeg nivoa oduzeta je brzina nižeg te je ta vrijednost podijeljena udaljenošću između nivoa. Postupak je ponovljen za sve moguće parove nivoa istog stupa. Prema tome pozitivno smicanje označava rast brzine vjetra visinom, a negativno smanjenje.

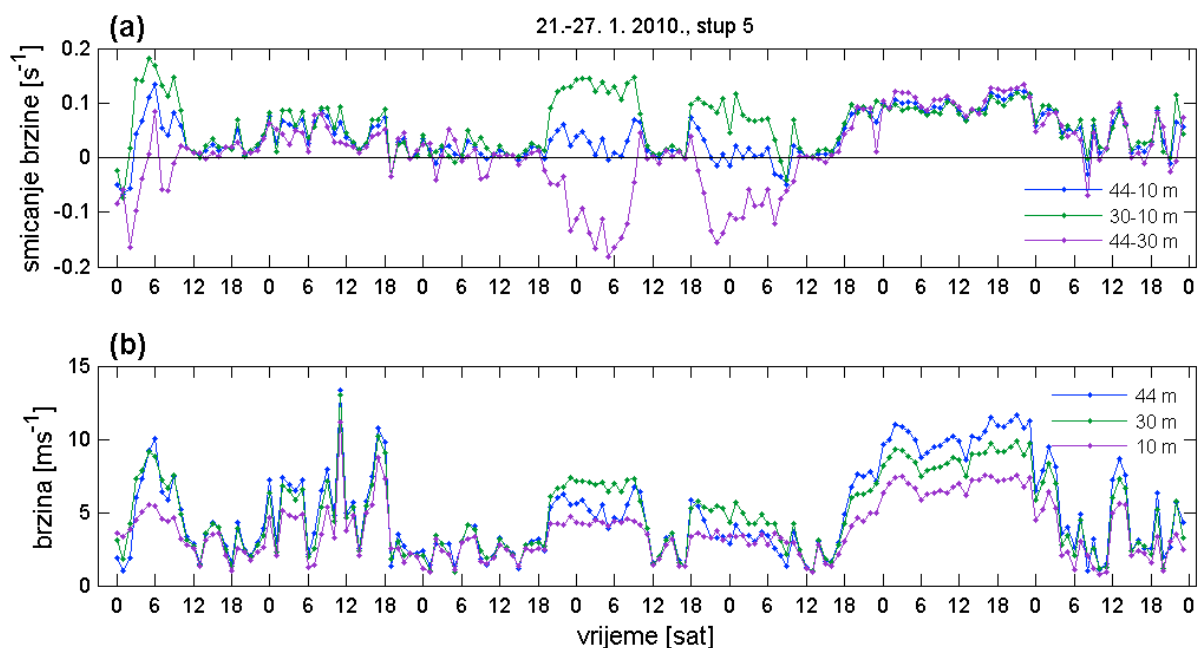
Vertikalni profil srednje godišnje mjerene brzine vjetra stupa 1 prikazan je na slici 4.29. Može se uočiti porast brzine visinom, što znači da je srednje godišnje smicanje brzine vjetra pozitivno. Profili ostalih stupova slična su oblika. Usporedbom mjenenog i proračunatog statički neutralnog profila može se zaključiti da je prizemni sloj planetarnog graničnog sloja na lokaciji stupa 1 blago statički nestabilan. Slična situacija može se uočiti i na ostalim lokacijama. Iznimku čini stup 2 gdje je mjereni profil vjetra statički stabilan. Vertikalni profil stupa 4 ima najveći nagib, a stupa 2 najblaži.



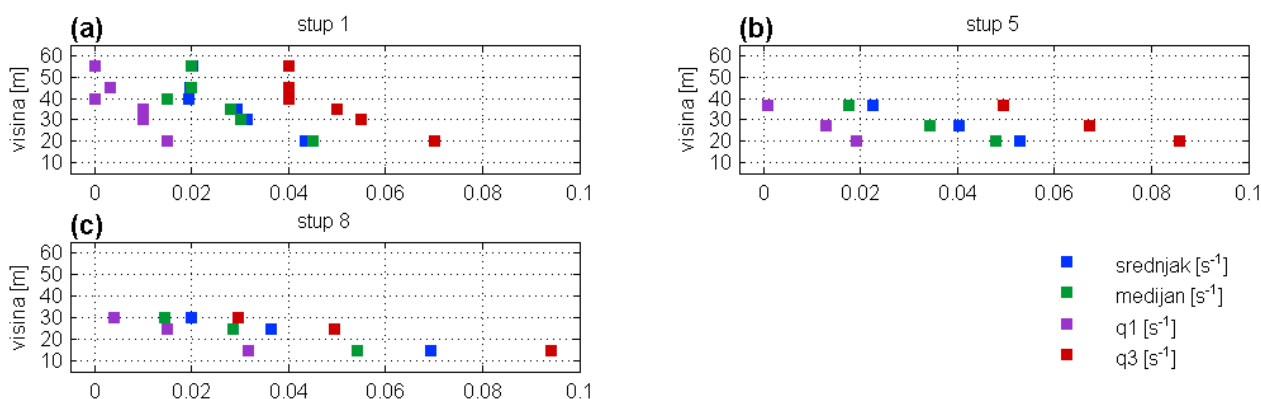
Slika 4.29: Vertikalni profil srednje godišnje mjerene brzine vjetra stupa 1 uz statički neutralni profil. Neutralni profil proračunat je pomoću relacije 2.2, mjerene brzine na 10 m te $z_0 = 0.15$ m.

Na slici 4.30 prikazan je sedmodnevni vremenski niz izmjerenih podataka stupa 5.

Ponovno su za razdoblja prikazana u tablici 3.1 izračunate godišnje i sezonske vrijednosti osnovnih statističkih parametara lokacije, rasapa i oblika empirijskih raspodjela svih nizova smicanja brzine vjetra. Na slici 4.31 prikazane su vrijednosti dobivenih parametara lokacije stupova 1, 5 i 8. Godišnje vrijednosti svih parametara lokacije pokazuju padajući trend visinom. Smicanje se visinom smanjuje. Srednjaci i medijani međusobno nemaju strogo određen odnos. Sezonske vrijednosti parametara lokacije stupa 1 prikazane su na slici 4.32. Ljeti je smicanje uglavnom najslabije.

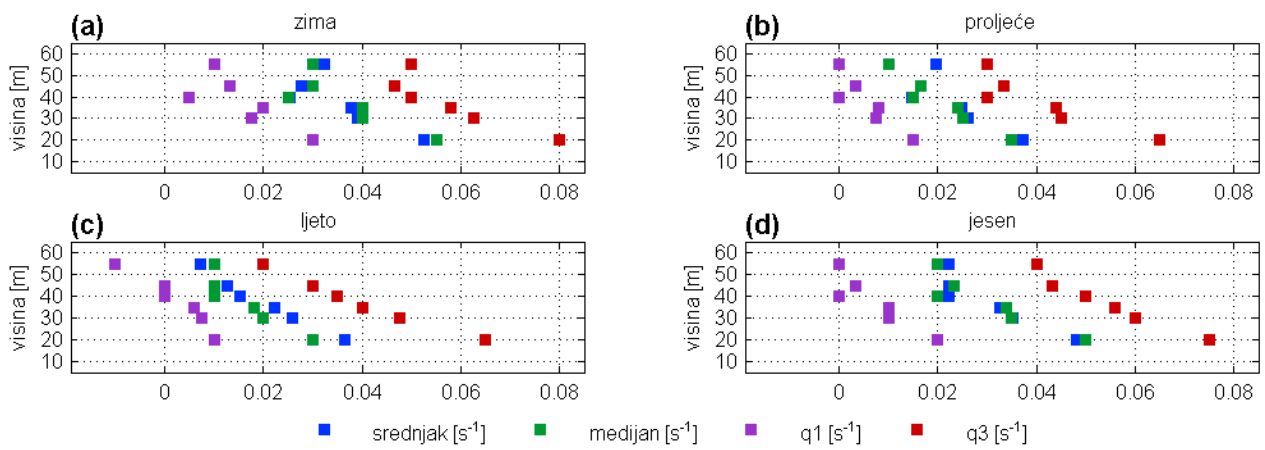


Slika 4.30: Prikaz vremenskih nizova mjerenih podataka stupa 5 za razdoblje 21.–27. siječnja 2010. godine u terminima UTC+1: (a) smicanje brzine vjetra; (b) brzina vjetra.

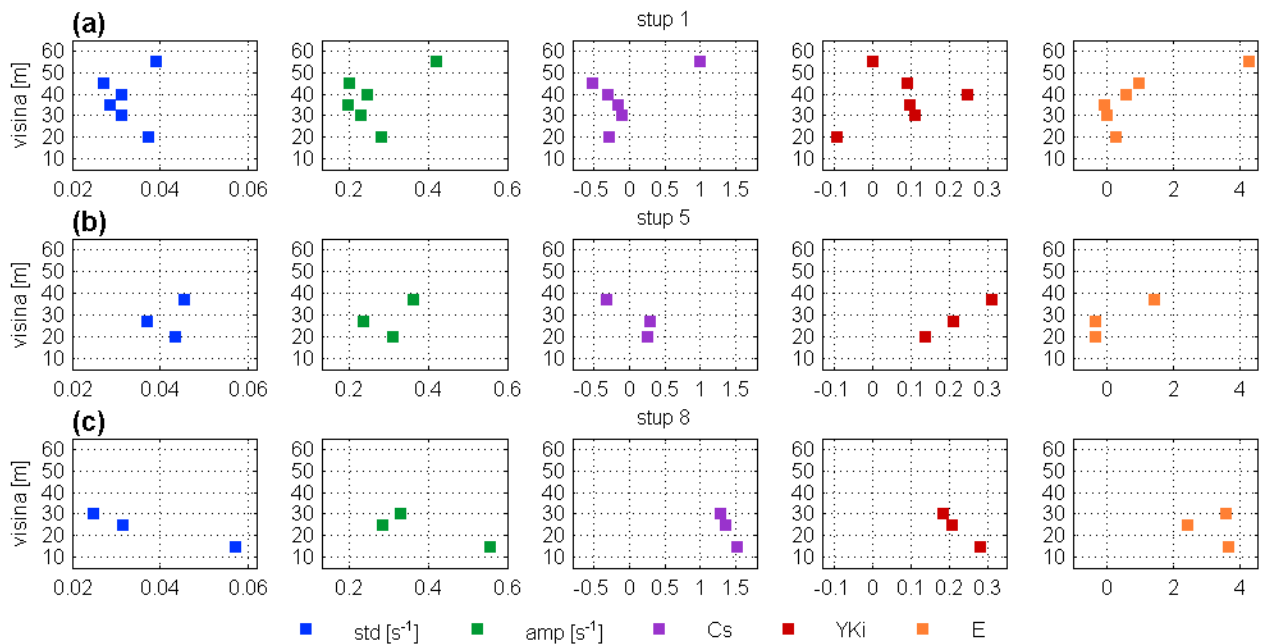


Slika 4.31: Statistički parametri smicanja mjerene brzine vjetra – srednjak, medijan te prvi (q_1) i treći (q_3) kvartil za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 5; (c) stup 8. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.

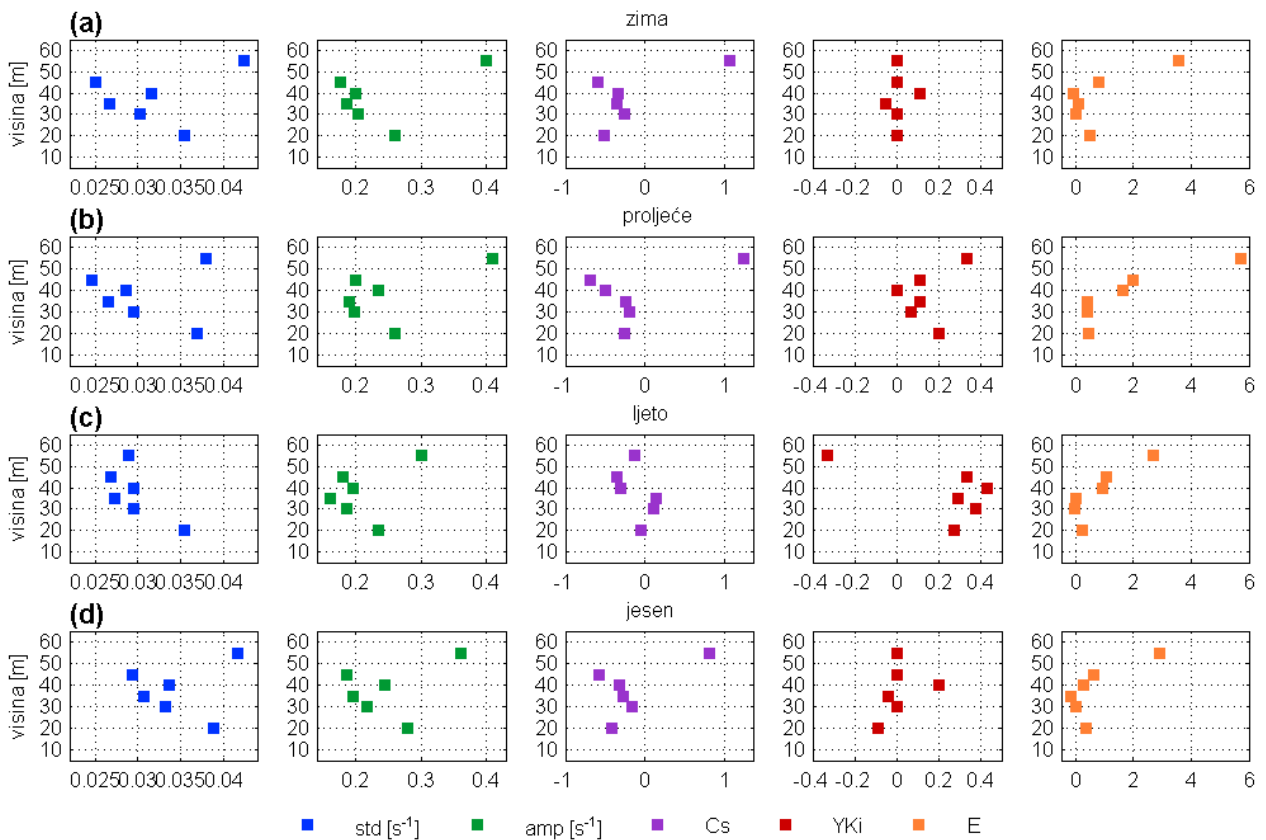
Parametri rasapa te oblika stupova 1, 5 i 8 prikazani su na slici 4.33. Standardna devijacija i amplituda smicanja brzine vjetra u prvih 30 m padaju visinom. Nakon otprilike 30 m vrijednosti im se povećavaju. Ponovno se može uočiti nedosljednost između koeficijenta simetrije i Yule-Kendallova indeksa. Oba parametra poprimaju i pozitivne i negativne vrijednosti. Eksces također poprima pozitivne i negativne vrijednosti, no češće je pozitivan. Sezonske vrijednosti statističkih parametara rasapa i oblika stupa 1 prikazane su na slici 4.34.



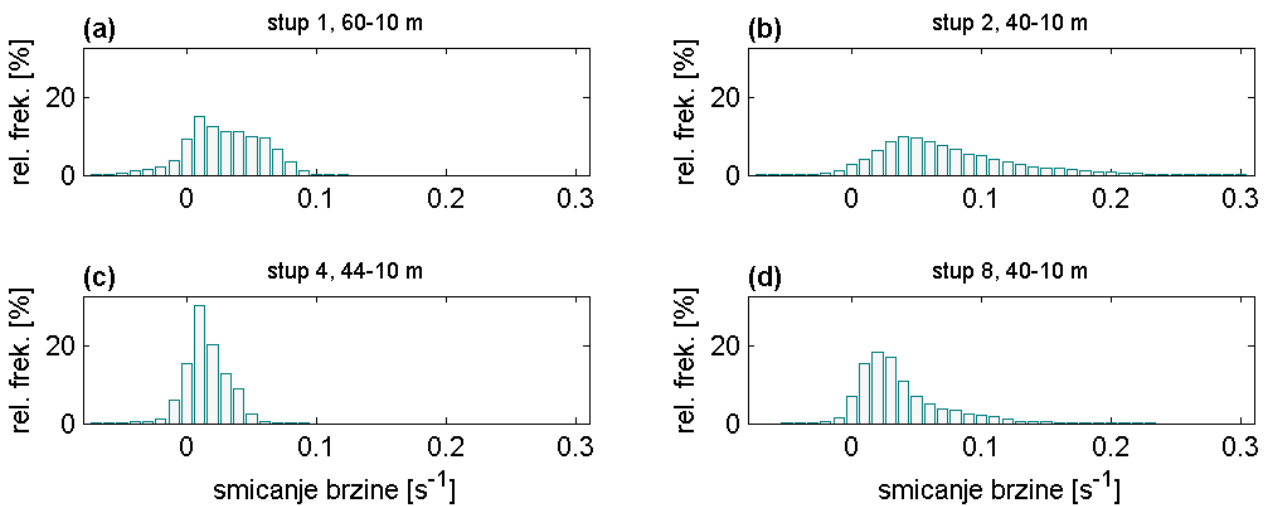
Slika 4.32: Statistički parametri smicanja mjerene brzine vjetra stupa 1 – srednjak, medijan te prvi (q1) i treći (q3) kvartil: (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.



Slika 4.33: Statistički parametri smicanja mjerene brzine vjetra – standardna devijacija (std), amplituda (amp), koeficijent simetrije (Cs), Yule-Kendallov indeks (YKi) te eksces (E) za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 5; (c) stup 8. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.

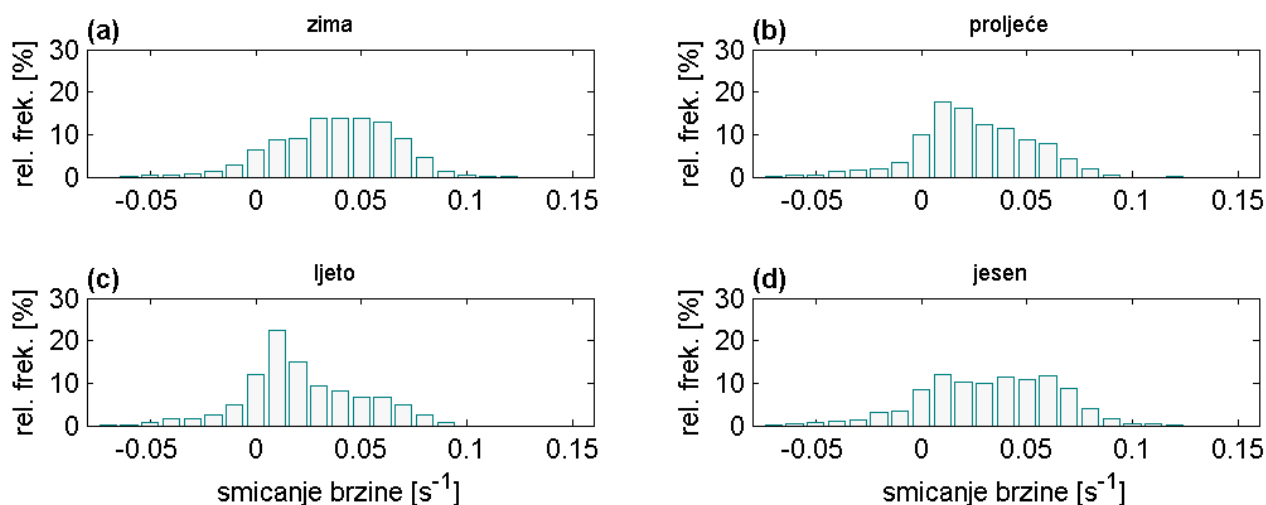


Slika 4.34: Statistički parametri smicanja mjerene brzine vjetra stupa 1 – standardna devijacija (std), amplituda (amp), koeficijent simetrije (Cs), Yule-Kendallov indeks (YKi) te eksces (E): (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.



Slika 4.35: Histogrami smicanja mjerene brzine vjetra za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 2; (c) stup 4; (d) stup 8. Širina jednog stupca iznosi 0.01 s^{-1} .

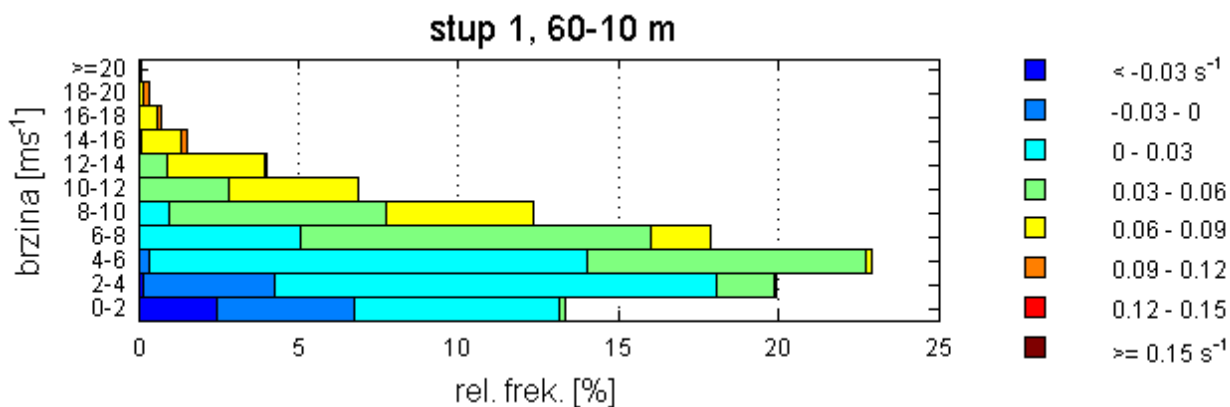
Izgled godišnjih histograma smicanja mjerene brzine vjetra, prikazanih na slici 4.35, ovisi o lokaciji. Svi histogrami pomaknuti su udesno, odnosno nisu centrirani u nuli. Smicanje je češće pozitivno. Najveću simetričnost pokazuje histogram stupa 4. Na ostalim su lokacijama desni repovi dulji od lijevih. Histogram stupa 2 posebno se ističe duljinom desnog repa.



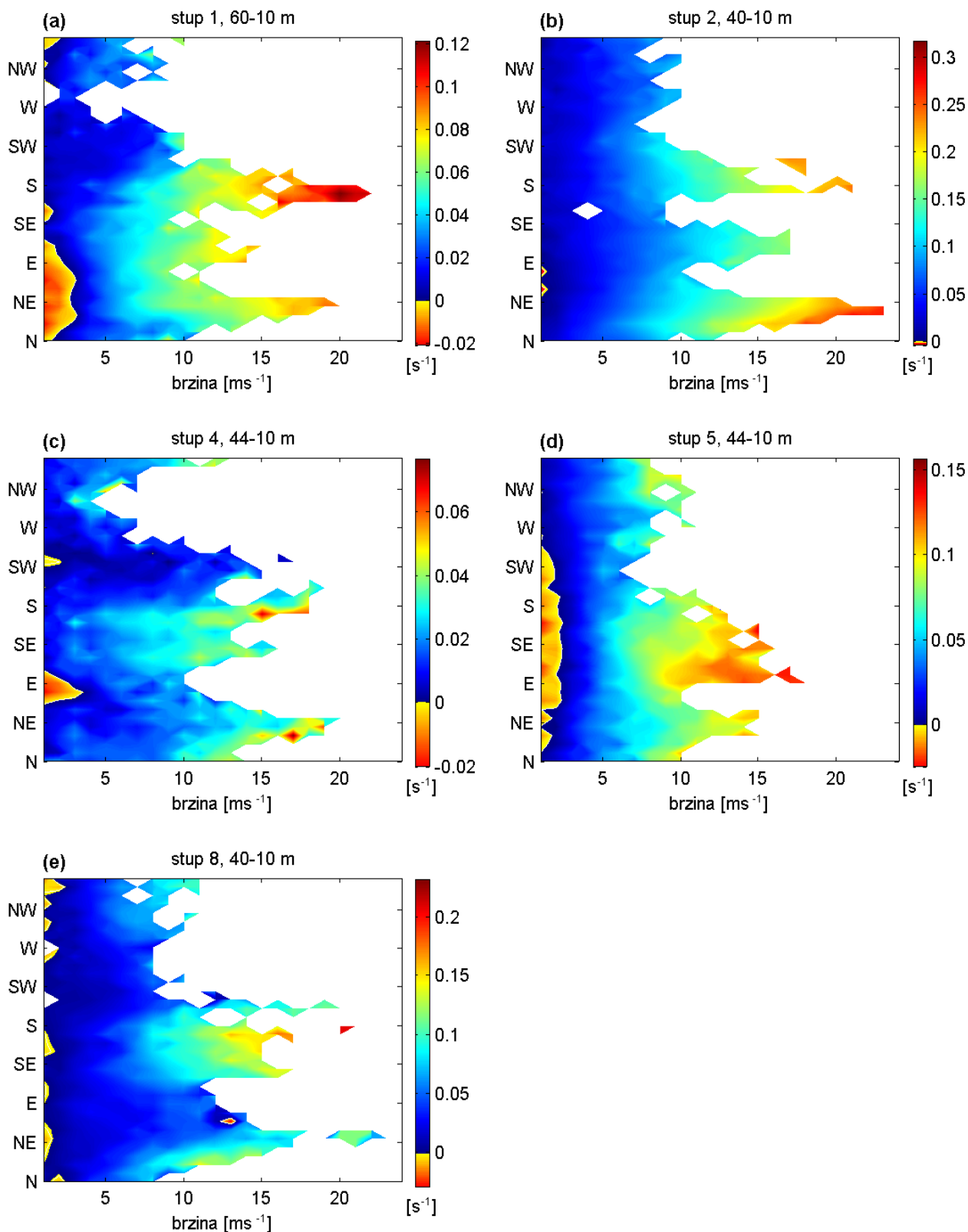
Slika 4.36: Histogrami smicanja mjerene brzine vjetra stupa 1 između 60 i 10 m: (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Širina jednog stupca iznosi $0.01 s^{-1}$.

Na slici 4.36 prikazani su sezonski histogrami smicanja mjerene brzine vjetra stupa 1 između 60 i 10 m. Histogrami su oblikom slični godišnjem histogramu istog stupa: pomaknuti su udesno i lijevi je rep uži. Zimi je smicanje jače. U ljeto i proljeće najčešće je slabo pozitivno smicanje.

Prema slici 4.37 negativno smicanje vjetra javlja se samo pri malim brzinama. Iznos smicanja raste brzinom. Te karakteristike mogu se uočiti na svim mjernim stupovima.



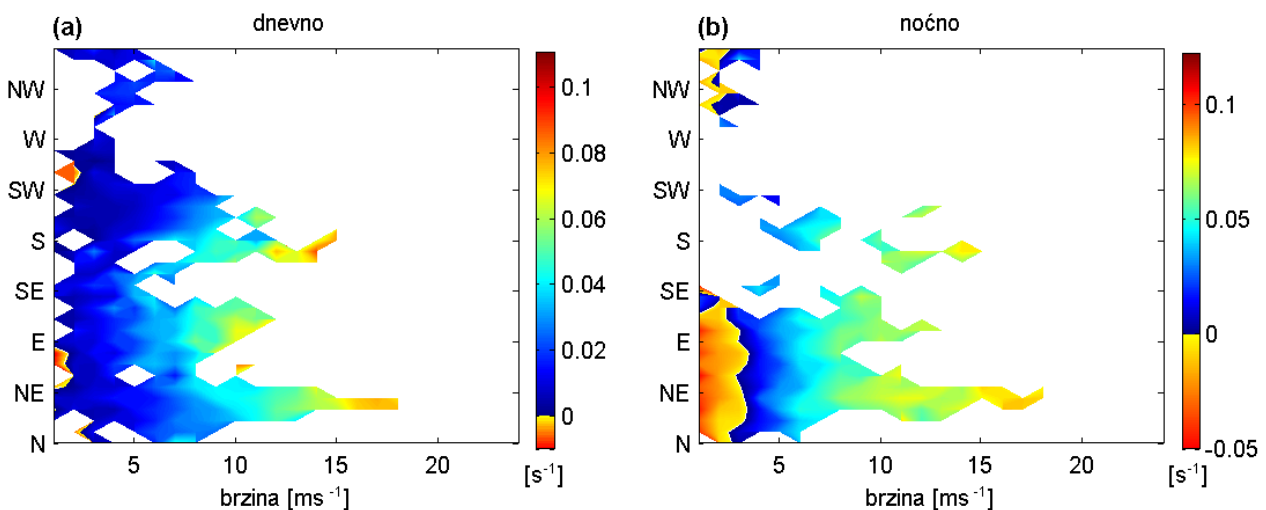
Slika 4.37: Odnos relativnih frekvencija i iznosa godišnjeg smicanja mjerene brzine vjetra stupa 1 prema brzini najviše razine.



Slika 4.38: Odnos smicanja brzine mjenenog vjeta prema smjeru i brzini najviše dostupne razine za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 2; (c) stup 4; (d) stup 5; (e) stup 8. Ukoliko smjer najviše razine nije dostupan, koristi se smjer sljedeće dostupne razine mjerenja. Izolinije crtane za brzine $\geq 1 \text{ ms}^{-1}$. Obratiti pažnju na legende – nisu identične.

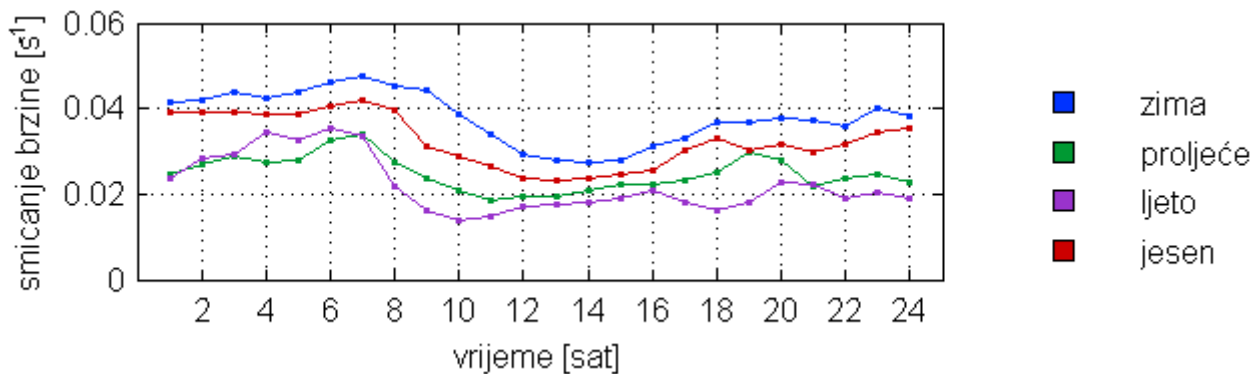
Slika 4.38 prikazuje odnose između iznosa smicanja vjetra te smjera i brzine vjetra. Na svim lokacijama može se uočiti kako smicanje raste povećanjem brzine, dok je negativno smicanje vezano uz male brzine vjetra. Najveće srednje pozitivno smicanje prisutno je na stupu 2, a negativno na stupu 5. Zanimljiva je pojava negativnog smicanja na lokaciji stupa 8 kod brzine od 13 ms^{-1} . Radi se o samo jednoj točki koja se ističe u usporedbi s ostalim mjernim stupovima, a vrijednost joj je manja od minimalnog smicanja stupa 5. Treba uzeti u obzir da je promatrani niz smicanja brzine vjetra stupa 8 dug sedam mjeseci, dok su ostali duljine 10–12 mjeseci. Također ne može se isključiti pogreška instrumenta koja možda nije uočena tijekom kontrole podataka te utjecaj testiranja vjetroagregata postavljenog istočno od mjernog stupa. Ova pojava je zanimljiva te bi ju trebalo pobliže istražiti. Na stupu 1 negativno smicanje primarno je vezano uz buru, no javlja se i za vrijeme juga. Srednje godišnje negativno smicanje prisutno je u samo dvije točke na stupu 2. Stup 4 ističe se po najvećem negativnom smicanju istočnog vjetra. Taj je stup specifičan po svojoj lokaciji. Između njega i obale Jadrana proteže se najjužniji dio Velebita. Očekivano, stupom 5 ne dominira bura. Negativno smicanje tog stupa ima najdulji kontinuirani raspon od zapadno-jugozapadnog do sjevernog vjetra. Kod stupa 8 može se uočiti kako je kod istih brzina pozitivno smicanje jače tijekom bure i juga, dok se kod stupova 1, 5 i 8 može uočiti jače smicanje tijekom juga nego tijekom bure. Do jačeg smicanja za vrijeme juga vjerojatno dolazi jer je jugo topliji vjetar koji se u hladno doba godine hladi od tla. Time dolazi do stratifikacije strujanja i većeg smicanja brzine. Nadalje, kod bure je zbog njezine turbulencije očekivano veće vertikalno miješanje što smanjuje vertikalno smicanje.

Sezonske situacije međusobno su vrlo slične te stoga nisu prikazane. Prikaz dnevnih i noćnih izolinja stupa 1 (slika 4.39) pokazuje kako je negativno smicanje izraženije tijekom noćnih sati.



Slika 4.39: Odnos godišnjeg smicanja brzine (60-10 m) mjenenog vjetra stupa 1 prema smjeru i brzini na 60 m: (a) dnevno smicanje (11–14 UTC+1); (b) noćno smicanje (23–02 UTC+1). Izolinije crtane za brzine $\geq 1 \text{ ms}^{-1}$. Obratiti pažnju na legende – nisu identične.

Dnevni hod smicanja mjerene brzine vjetra prikazan je na slici 4.40. Srednje smicanje pozitivno je u svim sezonama. Ljeti je najslabije, a zimi najjače. Maksimalne vrijednosti postižu se u ranojutarnjim satima nakon izlaska sunca. Nakon ranojutarnjeg maksimuma smicanje slabi te postiže minimalne vrijednosti oko podnevnih sati, ljeti u 10 te zimi u 14 sati. U dnevnom hodu mogu se uočiti karakteristike graničnog sloja. Smicanje je jače tijekom noći kada je granični sloj statički stabilan i strujanje stratificirano, a slabije tijekom dana kada je miješanje izraženije. Ljeti se sloj miješanja razvije brže nego zimi. Zanimljiv je porast smicanja brzine vjetra u poslijepodnevnim satima nakon prijepodnevnog minimuma. Miješanje turbulentnim vrtlozima trebalo bi biti najizraženije u poslijepodnevnim satima, a time bi smicanje trebalo biti najslabije. Uočena karakteristika izlazi iz trenutnih konceptualnih modela graničnog sloja.



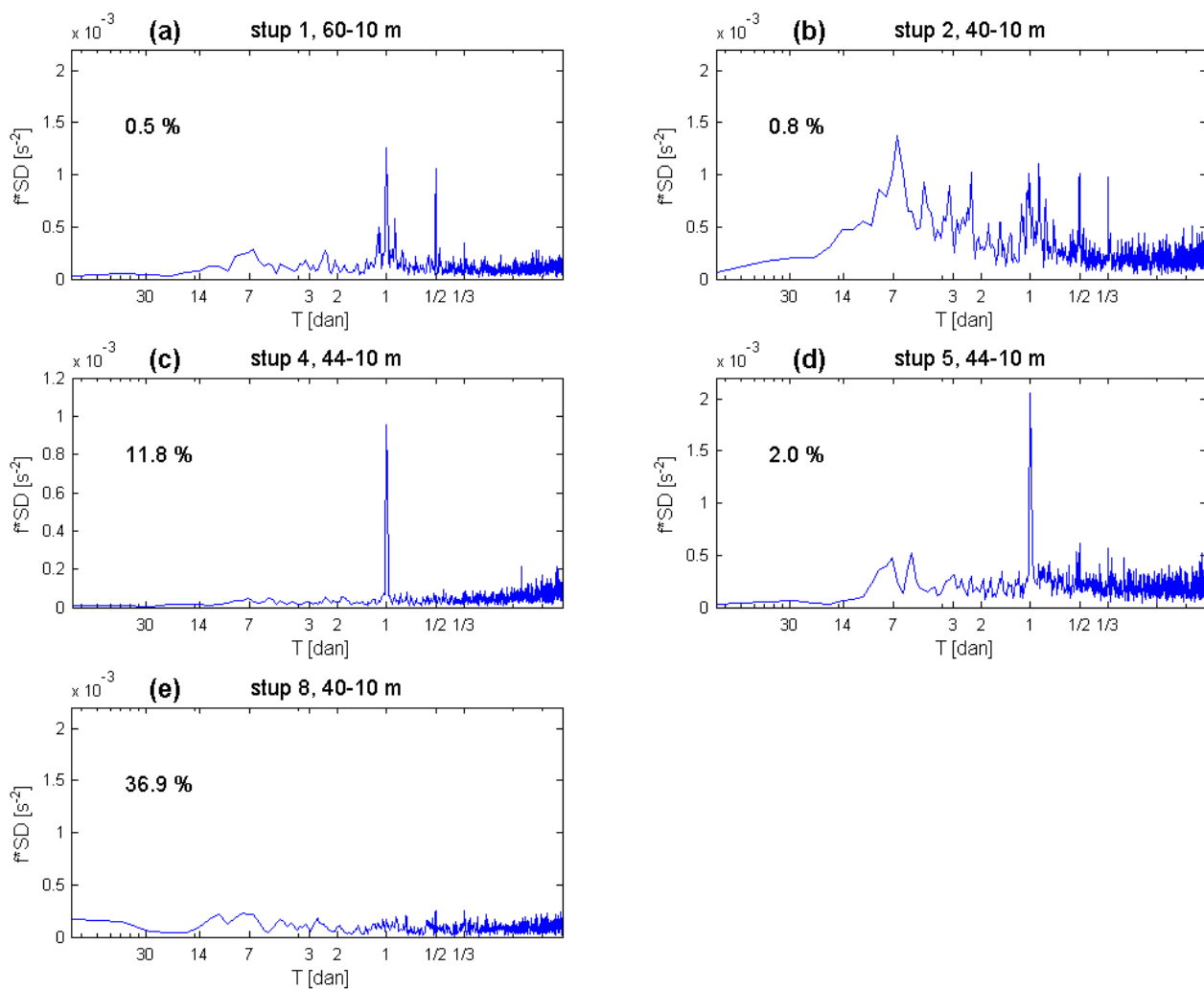
Slika 4.40: Dnevni hod smicanja mjerene brzine vjetra stupa 1. Vrijeme u terminima UTC+1.

Otežane funkcije spektralne gustoće smicanja mjerene brzine vjetra prikazane su na slici 4.41. Stupovi 1, 4 i 5 imaju izražene dnevne maksimume. Stup 2 najviše se ističe po širokom maksimumu u području perioda oko tjedan dana. Svi periodi podjednako su zastupljeni na lokaciji stupa 8. Poludnevni maksimumi stupova 1 i 5 izraženiji su kod brzine nego kod smicanja vjetra, a kod funkcije spektralne gustoće smicanja brzine vjetra stupa 8 nedostaje dnevni maksimum koji je vidljiv kod brzine vjetra.

U tablici 4.9 zapisani su udjeli pojedinih perioda u ukupnoj varijanci smicanja mjenog vjetra.

[%]	stup 1	stup 2	stup 4	stup 5	stup 8
kraće nego dnevni	35	23	49	41	28
dnevni	8	4	12	7	2
dulje nego dnevni	31	37	21	31	23
mezoskalni	53	35	69	57	37
sinoptički	31	42	20	32	27

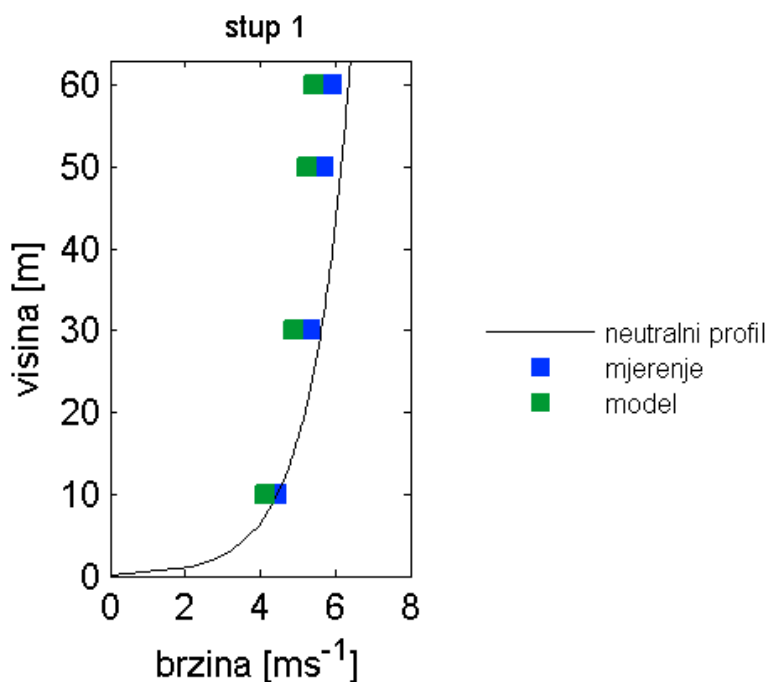
Tablica 4.9: Udio pojedinih perioda u ukupnoj varijanci smicanja mjerene brzine vjetra između najviše i najniže dostupne visine mjerenja. Kraće nego dnevni periodi duljine su 2–22 h, dnevni 22–26 h, dulje nego dnevni 26 h–7 dana; mezoskalni su kraći od 2 dana, sinoptički su duljine 2–10 dana.



Slika 4.41: Otežane funkcije spektralne gustoće smicanja mjerene brzine vjetra: (a) stup 1; (b) stup 2; (c) stup 4; (d) stup 5; (e) stup 8. Postoci odgovaraju udjelu nedostajućih podataka u nizu.

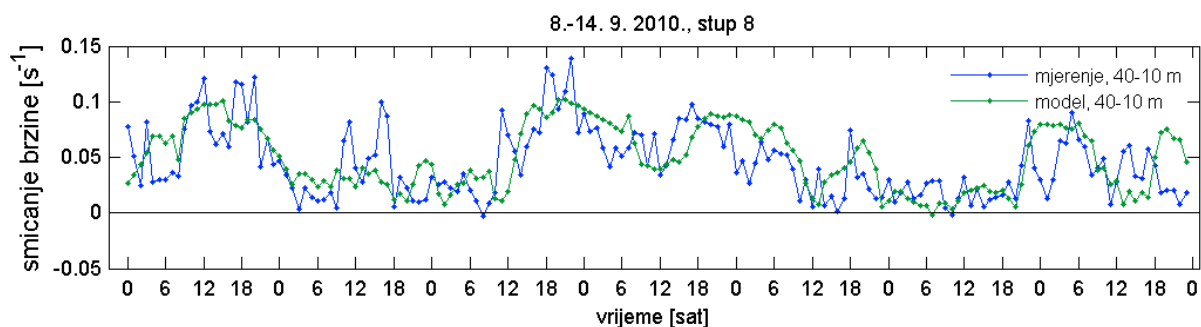
4.4 Statistička i spektralna verifikacija smicanja brzine vjetra

Vertikalni profili srednje godišnje mjerene i modelirane brzine vjetra stupa 1 prikazani su na slici 4.42. Model vrlo dobro prati oblik profila, no podcjenjuje vrijednosti brzina. Podcjenjivanje je prisutno i na ostalim lokacijama, a uspješnost praćenja oblika profila ovisi o lokaciji.



Slika 4.42: Vertikalni profili srednje godišnje mjerene i modelirane brzine vjetra stupa 1 uz statički neutralni profil. Neutralni profil proračunat je pomoću relacije 2.2, mjerene brzine na 10 m te $z_0 = 0.15$ m.

Na slici 4.43 prikazani su sedmodnevni vremenski nizovi mjenjenih i modeliranih podataka smicanja brzine vjetra. Model relativno dobro prati smicanje brzine dobiveno pomoću mjenjenih podataka, no smicanje u modelu pokazuje slabu varijabilnost.



Slika 4.43: Prikaz vremenskih nizova mjenjenih i modeliranih podataka stupa 8 za razdoblje 8.-14. rujna 2010. godine u terminima UTC+1.

Modelirane brzine iznad 17 m dobivene su linearnom interpolacijom s nivoa modela od 17 i 64 m te se stoga modelirani nizovi brzina istog stupa u vremenu jednako ponašaju. Nizovi smicanja brzine istog stupa imaju visok koeficijent korelacije (0.99 ili 1) i gotovo identična sva promatrana svojstva. Nizovi smicanja dobiveni iz mjerenja na istom stupa mogu imati

koeficijent korelacije čak manji od 0.5. Zbog navedenih razloga, za validaciju smicanja koristi se samo jedan niz po stupu, niz dobiven pomoću brzina na najvišem i najnižem nivou.

U tablici 4.10 zapisane su godišnje vrijednosti modeliranih i mjerenih statističkih parametara lokacije, rasapa i oblika. Model na svim lokacijama podcjenjuje godišnje vrijednosti parametara rasapa, dok su parametri lokacije podcijenjeni na svim lokacijama osim kod stupa 4. Sezonske vrijednosti statističkih parametara stupa 1 zapisane su u tablici 4.11. Model kod sezonskih vrijednosti češće pogriješi u predznaku parametara oblika.

	stup 1, 60-10 m		stup 5, 44-10 m		stup 8, 40-10 m	
	mjerenje	model	mjerenje	model	mjerenje	model
srednjak [s^{-1}]	0.029	0.026	0.040	0.024	0.036	0.031
medijan [s^{-1}]	0.028	0.019	0.034	0.018	0.029	0.022
q1 [s^{-1}]	0.010	0.007	0.013	0.008	0.015	0.009
q3 [s^{-1}]	0.050	0.041	0.067	0.034	0.049	0.045
std [s^{-1}]	0.029	0.025	0.037	0.020	0.032	0.029
amp [s^{-1}]	0.198	0.138	0.236	0.134	0.285	0.167
Cs	-0.159	0.999	0.295	1.172	1.353	1.213
YKi	0.100	0.297	0.213	0.201	0.210	0.251
E	0.058	0.393	-0.318	1.176	2.427	1.045

Tablica 4.10: Statistički parametri smicanja mjerene i modelirane brzine vjetra: srednjak, medijan, prvi (q1) i treći (q3) kvartil, standardna devijacija (std), amplituda (amp), koeficijent simetrije (Cs), Yule-Kendallov indeks (YKi) te eksces (E) za razdoblja zapisana u tablici 3.1 (niz mjerenja 44-10 m uspoređivan je s nizom modela 45-10 m).

stup 1 60-10 m	zima		proljeće		ljet		jesen	
	mjerenje	model	mjerenje	model	mjerenje	model	mjerenje	model
srednjak [s^{-1}]	0.038	0.033	0.025	0.023	0.022	0.021	0.033	0.027
medijan [s^{-1}]	0.040	0.027	0.024	0.016	0.018	0.014	0.034	0.020
q1 [s^{-1}]	0.020	0.011	0.008	0.006	0.006	0.005	0.010	0.007
q3 [s^{-1}]	0.058	0.051	0.044	0.035	0.040	0.035	0.056	0.044
std [s^{-1}]	0.027	0.028	0.026	0.023	0.027	0.022	0.031	0.026
amp [s^{-1}]	0.186	0.127	0.190	0.121	0.160	0.108	0.196	0.138
Cs	-0.359	0.751	-0.248	1.198	0.135	0.994	-0.283	0.928
YKi	-0.053	0.218	0.111	0.297	0.294	0.425	-0.043	0.297
E	0.077	-0.147	0.401	0.913	-0.009	0.124	-0.151	0.275

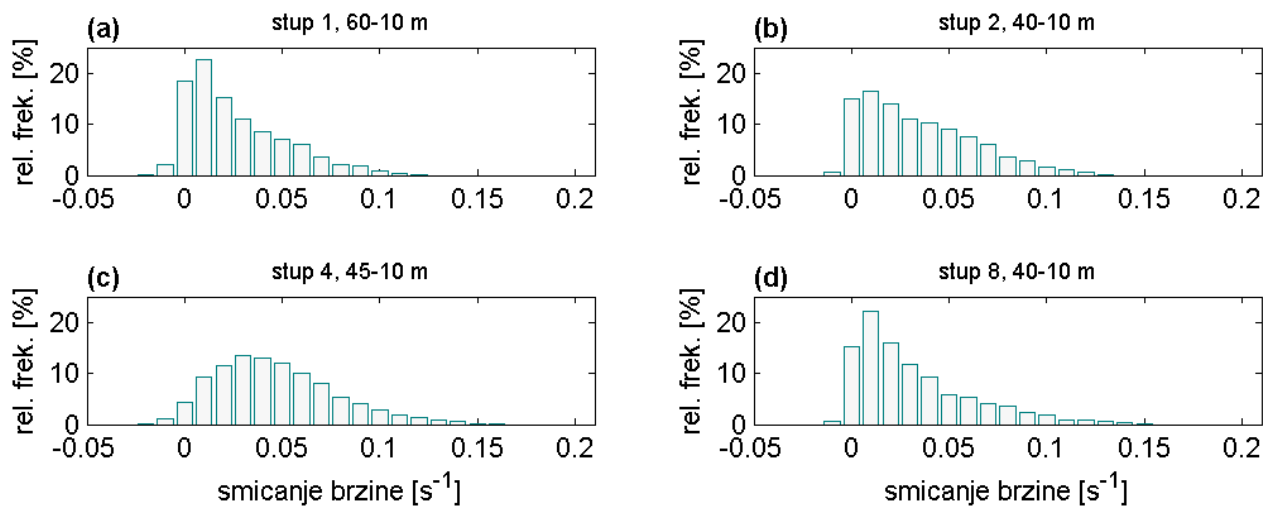
Tablica 4.11: Statistički parametri smicanja mjerene i modelirane brzine vjetra stupa 1: srednjak, medijan, prvi (q1) i treći (q3) kvartil, standardna devijacija (std), amplituda (amp), koeficijent simetrije (Cs), Yule-Kendallov indeks (YKi) te eksces (E).

MBIAS i RMSE smicanja brzine vjetra zapisani su u tablici 4.12. Model podcjenjuje smicanje na svim stupovima, osim na stupu 4, gdje ga precjenjuje. Model je najuspješniji u prognozi smicanja vjetra stupa 1.

	MBIAS	RMSE [s^{-1}]
stup 1, 60-10 m	0.90	0.023
stup 2, 40-10 m	0.48	0.051
stup 4, 44-10 m	3.08	0.043
stup 5, 44-10 m	0.58	0.035
stup 8, 40-10 m	0.86	0.027

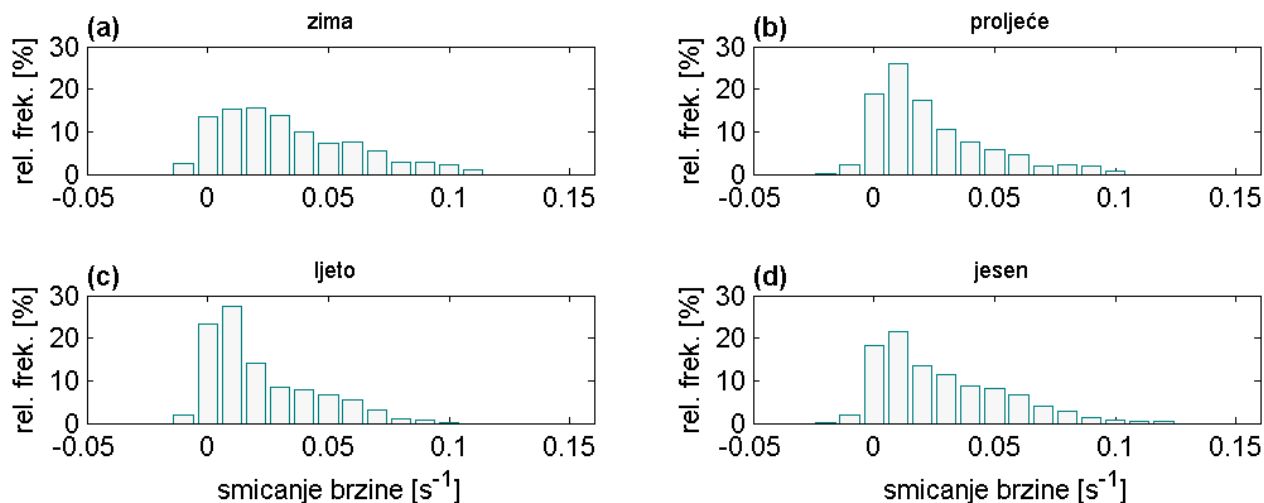
Tablica 4.12: Multiplikativna sustavna pogreška (MBIAS) i srednja kvadratna pogreška (RMSE) između odgovarajućih nizova smicanja brzine vjetra modela i mjerenja (osim kod nizova mjerenja 44-10 m koji su uspoređeni s nizovima modela 45-10 m).

Za razliku od histograma smicanja brzine vjetra dobivenih pomoću mjerenih podataka, histogrami modeliranih podataka međusobno su vrlo slični (slika 4.44). Svi su asimetrični s dugačkim repom udesno te strmim i kratkim repom ulijevo. Stupac najveće učestalosti nalazi se blizu nule. Iznimka je histogram stupa 4, koji je niži te mu lijevi rep ima blaži pad. Kod njega je češće jače pozitivno smicanje. Model na svim stupovima podcjenjuje učestalost i intenzitet negativnog smicanja brzine vjetra. Histogram stupa 8 dobiven pomoću modeliranih podataka oblikom je najbliži histogramu dobivenom pomoću mjerenih podataka.



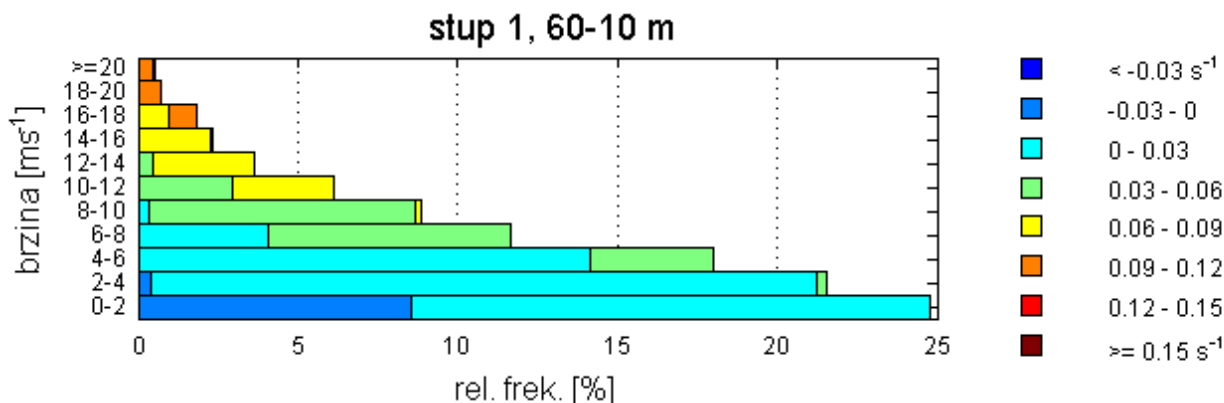
Slika 4.44: Histogrami smicanja modelirane brzine vjetra za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 2; (c) stup 4; (d) stup 8. Širina jednog stupca iznosi $0.01 s^{-1}$.

Slika 4.45 prikazuje sezonske histograme smicanja modelirane brzine vjetra stupa 1 između 60 i 10 m. U svim sezonama podcijenjena je učestalost negativnog smicanja. Jesenski histogram najslabije se podudara s odgovarajućim histogramom mjerenih podataka.

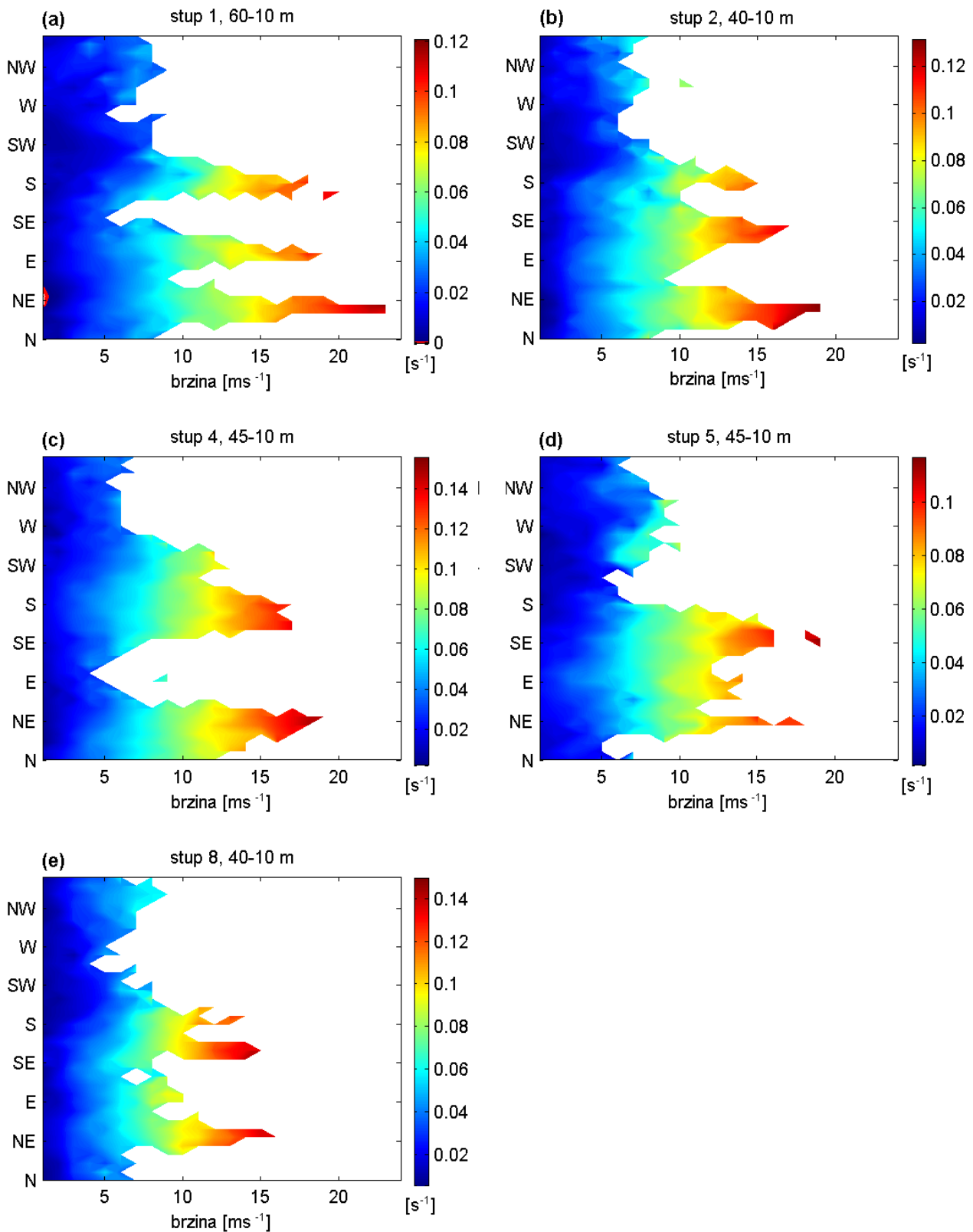


Slika 4.45: Histogrami smicanja modelirane brzine vjetra stupa 1 između 60 i 10 m: (a) zima; (b) proljeće; (c) ljeto; (d) jesen. Širina jednog stupca iznosi 0.01 s⁻¹.

Model zadovoljavajuće prognozira odnos smicanja brzine vjetra i vjetra najviše razine (slika 4.46). Odstupa u frekvenciji pojave smicanja kod najmanjih brzina. To je posljedica precjenjivanja učestalosti malih brzina.

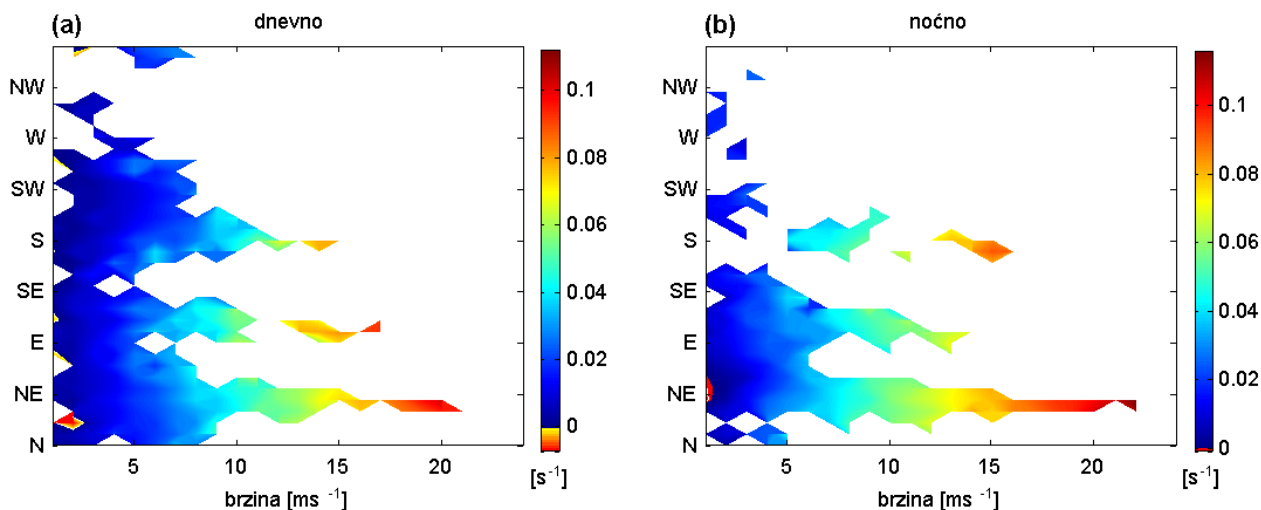


Slika 4.46: Odnos relativnih frekvencija i iznosa godišnjeg smicanja modelirane brzine vjetra stupa 1 prema brzini najviše razine.



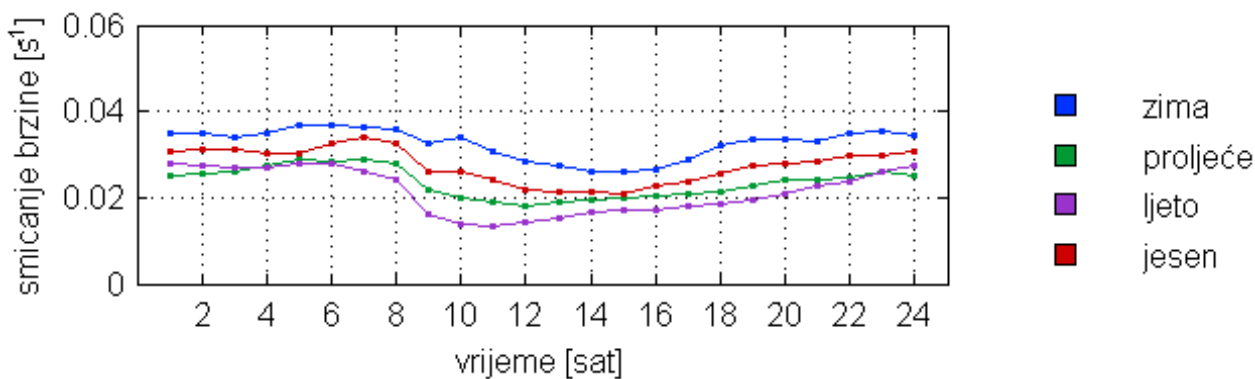
Slika 4.47: Odnos smicanja brzine modeliranog vjetra prema smjeru i brzini najviše dostupne razine mjerenja za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 1; (b) stup 2; (c) stup 4; (d) stup 5; (e) stup 8. Ukoliko smjer mjerenja najviše razine nije dostupan, koristi se smjer sljedeće dostupne razine mjerenja. Izolinije crtane za brzine $\geq 1 \text{ ms}^{-1}$. Obratiti pažnju na legende – nisu identične.

Nakon usporedbe slike 4.47 sa slikom 4.38 može se zaključiti kako model ne čini razliku po lokacijama u odnosu iznosa smicanja brzine vjetra te smjera i brzine vjetra. Izolinije smicanja svih lokacija dobivene pomoću modeliranih podataka međusobno su gotovo identične. Isto vrijedi za sezonske te dnevno-noćne situacije (slika 4.48).



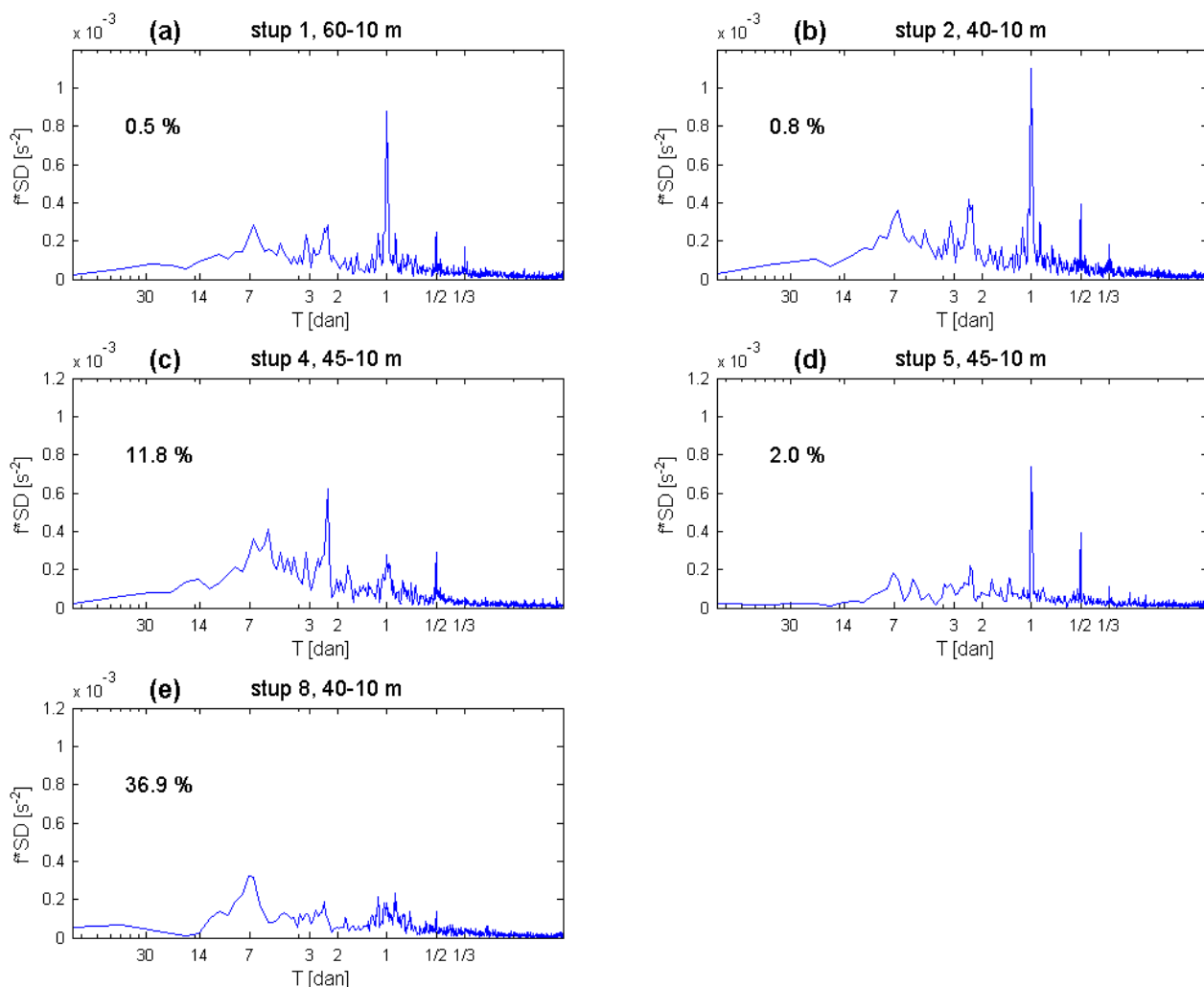
Slika 4.48: Odnos godišnjeg smicanja brzine (60-10 m) mjenog vjetra stupa 1 prema smjeru i brzini na 60 m: (a) dnevno smicanje (11–14 UTC+1); (b) noćno smicanje (23–02 UTC+1). Izolinije crtane za brzine $\geq 1 \text{ ms}^{-1}$. Obratiti pažnju na legende – nisu identične.

Na slici 4.49 prikazani su dnevni hodovi smicanja modelirane brzine vjetra. Model prognozira glađi dnevni hod nego što je dobiven mjerenjima. Razlike između maksimuma i minimuma premale su, no položaji su maksimuma i minimuma korektni.



Slika 4.49: Dnevni hod smicanja brzine vjetra stupa 1 dobiven pomoću podataka modela. Vrijeme u terminima UTC+1.

Otežane funkcije spektralne gustoće smicanja modeliranog vjetra (slika 4.50) međusobno su sličnije nego iste funkcije dobivene pomoću mjerenih podataka (slika 4.41). Model redovito podcjenjuje visine glavnih maksimuma. Najveće su razlike kod stupova 2 i 4. Kod stupa 2 podcijenjeni su periodi oko tjedan dana, dok su ti isti periodi precijenjeni kod stupa 4.



Slika 4.50: Otežane funkcije spektralne gustoće smicanja modelirane brzine vjetra: (a) stup 1; (b) stup 2; (c) stup 4; (d) stup 5; (e) stup 8. Postoci odgovaraju udjelu nedostajućih podataka u nizu.

Usporedbom tablica 4.13 i 4.9 može se zaključiti kako model podcjenjuje varijabilnost smicanja vjetra na kraćim nego dnevnim periodima. Varijabilnost smicanja dulje nego dnevnih perioda precjenjuje. U cjelini podcjenjuje varijabilnost smicanja vjetra na mezoskalnim periodima, dok precjenjuje varijabilnost sinoptičkih perioda. Ocjena dnevnih perioda ovisi o lokaciji. Najveća razlika uočena je kod stupa 4, čija je varijabilnost dnevnog perioda podcijenjena za 12%.

[%]	stup 1	stup 2	stup 4	stup 5	stup 8
kraće nego dnevni	16	15	11	21	16
dnevni	7	7	4	7	4
dulje nego dnevni	40	41	48	44	37
mezoskalni	32	31	23	43	29
sinoptički	42	44	51	42	45

Tablica 4.13: Udio pojedinih perioda u ukupnoj varijanci smicanja modelirane brzine vjetra između najviše i najniže dostupne visine mjerenja. Kraće nego dnevni periodi duljine su 2–22 h, dnevni 22–26 h, dulje nego dnevni 26 h–7 dana; mezoskalni su kraći od 2 dana, sinoptički su duljine 2–10 dana.

5 Zaključak

U ovome radu analizirane su statističke i spektralne karakteristike izmjerenih brzina vjetra na pet 60-metarskih mjernih stupova u Hrvatskoj, prikupljene kroz projekt Weather Intelligence for Wind Energy – WILL4WIND (www.will4wind.hr). Pomoću tih podataka ocijenjena je uspješnost prognoze brzine i smicanja vjetra u testnoj nehidrostatskoj verziji modela ALADIN. Mjerni stupovi nalaze se na području kompleksnog terena zaleđa istočne jadranske obale, koja je zbog svoje velike nehomogenosti izvrsno područje za ocjenu uspješnosti mezoskalnih modela. Podaci modela ALADIN izrađeni su na horizontalnoj mreži točaka rezolucije 2 km, a razdoblje verifikacije obuhvatilo je 2010. godinu.

Analiza mjerenih podataka pokazuje da prosječne vrijednosti brzine vjetra očekivano rastu visinom. Srednja godišnja brzina vjetra na 10 m kreće se između 3.8 i 5.3 ms⁻¹. Najveće prosječne sezonske vrijednosti brzine vjetra javljaju se zimi. Raspodjela vjetra pozitivno je asimetrična, a raspršenost raste visinom. Zimi i u jesen dnevne su promjene brzine vjetra veoma male, dok su u ljeto i proljeće dnevni hodovi izraženiji. Najčešći jaki i olujni vjetrovi jesu bura i jugo, s tim da je bura učestalija. Uočeno je zakretanje smjera jakog i olujnog vjetra visinom. Funkcije spektralne gustoće ukazuju na postojanje dnevne cirkulacije na svim promatranim lokacijama. Udio varijabilnosti brzine vjetra na kraće nego dnevnih periodima gibanja u ukupnoj varijanci mjerene brzine na 10 m kreće se između 20 i 35%, udio na dnevnim 4–8% te udio na dulje nego dnevnim 30–41%. Udjeli varijabilnosti vjetra kraće nego dnevnih i mezoskalnih perioda uglavnom blago padaju visinom, dok udjeli dulje nego dnevnih te sinoptičkih perioda uglavnom rastu visinom. Rastav brzine vjetra na komponente u smjeru pružanja Dinarida te okomito na Dinaride pokazuje na svim lokacijama, osim kod stupa 5, postojanje izražene dnevne cirkulacije okomite na Dinaride. Na stupu 5 izraženija je komponenta u smjeru pružanja Dinarida. Udio varijabilnosti vjetra na dnevnim periodima gibanja blago pada visinom.

Usporedba izmjerenog i proračunatog statički neutralnog profila pokazala je da je srednji godišnji prizemni sloj planetarnog graničnog sloja statički blago nestabilan na svim lokacijama, osim kod stupa 2, gdje je statički stabilan. Srednje je godišnje smicanje brzine vjetra pozitivno i smanjuje se visinom. Smicanje je slabije ljeti, a jače zimi te tijekom noći. Raspodjela smicanja brzine vjetra pozitivno je asimetrična. Pozitivno smicanje bitno je učestalije nego negativno. Negativno smicanje povezano je s malim brzinama vjetra i izraženije je noću. Iznos pozitivnog smicanja raste brzinom vjetra. Najjače pozitivno smicanje povezano je s jugom, a nakon toga s burom. Udio varijabilnosti smicanja brzine vjetra kraće nego dnevnih perioda gibanja u ukupnoj varijanci smicanja mjerene brzine kreće se između 23 i 49%, udio dnevnih 2–12%, dok

je udio varijabilnosti dulje nego dnevnih perioda 21–37%. Udio dulje nego dnevnih perioda manji je kod smicanja nego kod brzine vjetra, a udio kraće nego dnevnih jest veći.

Nehidrostatska verzija modela ALADIN/HR na mreži točaka rezolucije 2 km zadovoljavajuće reprezentira osnovnu evoluciju brzine vjetra. Pritom, model uspješno reproducira dnevni hod brzine vjetra i vertikalne profile promatranih statističkih parametara. Međutim na nekim lokacijama model sustavno podcjenjuje iznose brzine vjetra. Zbog položaja mjernih stupova, na uzdignutim vrhovima brda, ova je pogreška očekivana zbog mikroskalnih efekata na strujanje, no sugerira i mogućnost da prosječna duljina trenja u kvadratu mreže modela ne odgovara samoj lokaciji mjernih stupova. Prema dobivenim vrijednostima RMSE-a model podjednako dobro prognozira vjetar na svim lokacijama, a vrijednosti uglavnom rastu visinom. Model podcjenjuje učestalost najslabijih vjetrova. Spektralna verifikacija sugerira da model dobro reprezentira varijabilnosti brzine vjetra na dnevnim periodima gibanja, no donekle podcjenjuje varijabilnost brzine vjetra na kraće nego dnevnim skalama za oko 10% (razlika između udjela mjerene i modelirane varijabilnosti) zbog slabijeg reprezentiranja mikroskalnih slabije prediktabilnih strujanja kratkih vremenskih perioda. Modelirana varijabilnost vjetra na dnevnim periodima malo je precijenjena, dok je varijabilnost kod promatranih komponenti brzine podcijenjena. Varijabilnost dulje nego dnevnih perioda u modelu je donekle precijenjena za oko 5%.

Model reprezentira osnovne karakteristike smicanja brzine vjetra. Na svim lokacijama podcjenjuje godišnje vrijednosti statističkih parametara rasapa. Parametri su lokacije podcijenjeni na svim lokacijama, osim kod stupa 4, gdje su precijenjeni. Model zadovoljavajuće prognozira odnos smicanja brzine i brzine vjetra, no negativno je smicanje, prvenstveno kod slabih vjetrova, preslabo i nedovoljno često. Promatrane karakteristike smicanja prognozirane brzine vjetra različitih lokacija međusobno su vrlo slične, što se ne uočava u mjerenim podacima. Model korektno prognozira položaje minimuma i maksimuma u dnevnom hodu smicanja brzine vjetra. Spektralna verifikacija sugerira da model u prosjeku dobro reprezentira varijabilnost smicanja na dnevnim periodima, ali je varijabilnost dulje nego dnevnih perioda precijenjena za oko 13%. Najveće odstupanje modela, oko 19%, postoji zbog podcjenjivanja varijabilnosti smicanja brzine vjetra na kraće nego dnevnim periodima.

Za bolje razumijevanje vertikalnih profila smjera i brzine vjetra te pripadnog smicanja ključno je sadašnja mjerenja na mjernim stupovima dopuniti mjerenjima stabilnosnih i turbulentnih karakteristika prizemnog graničnog sloja. Kako bi se poboljšala numerička prognoza lokalnih karakteristika brzine i smicanja vjetra u kompleksnom terenu Hrvatske, nužan je daljnji razvoj mezoskalnih modela veće horizontalne rezolucije, poboljšanje prikaza prizemnog graničnog sloja u modelu i parametrizacija povezanih s njime te uvažavanje što je moguće realističnijih donjih rubnih uvjeta, poput hrapavosti i tipa tla. Poboljšanje numeričke prognoze uvelike ovisi o asimilaciji što više prizemnih i daljinskih mjernih podataka u domeni mezoskalnog modela. Konačno, prognoze brzine i smicanja vjetra mogu se poboljšati i razvojem statističkih modela

koji bi na statistički način uključili lokalne specifičnosti u rezultate dinamičkih mezoskalnih modela.

Literatura

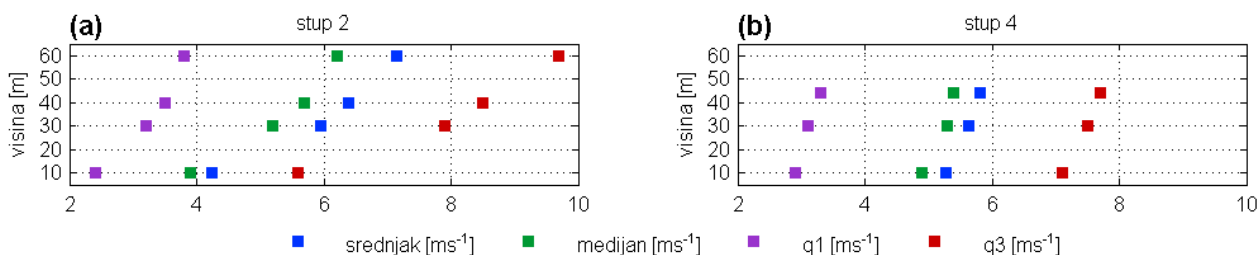
- American Meteorological Society. Glossary of meteorology, 2014. URL http://glossary.ametsoc.org/wiki/Wind_shear.
- Babić, N. Proučavanje turbulentnih tokova bure u navjetrini Splita. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, PMF, Geofizički odsjek, 48 str., 2013.
- Bajić, A. Olujna bura na sjevernom Jadranu dio I: Statistička analiza. *Rasprave*, 24:1–9, 1989.
- Bajić, A., Peroš, B., Vučetić, V. i Žibrat, Z. Opterećenje vjetrom – meteorološka podloga za hrvatske norme. *Građevinar*, 53:495–505, 2001.
- Bajić, A., Ivatek-Šahdan, S. i Horvath, K. Prostorna razdioba brzine vjetra na području Hrvatske dobivena numeričkim modelom ALADIN. *Hrvatski meteorološki časopis*, 42:67–77, 2010.
- Baklanov, A. A., Grisogono, B., Bornstein, R., Mahrt, K., Zilitinkevich, S. S., Taylor, P., Larsen, S. E., Rotach, M. W. i Fernando, H. J. S. The nature, theory, and modeling of atmospheric planetary boundary layers. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92:123–128, 2011.
- Balling Jr, R. C. i Cervený, R. S. Winds and wind systems. U: Oliver, J. E. (ur.), *Encyclopedia of World Climatology*, str. 813–819. Springer, 2005.
- Bretherton, C. S. Boundary layer meteorology. Predavanja, 2013. URL <http://www.atmos.washington.edu/academics/classes/2013Q2/547>.
- Catry, B., Geleyn, J.-F., Tudor, M., Bénard, P. i Trojáková, A. Flux-conservative thermodynamic equations in a mass-weighted framework. *Tellus A*, 59:71–79, 2007.
- Geleyn, J.-F. Interpolation of wind, temperature and humidity values from model levels to the height of measurement. *Tellus A*, 40:347–351, 1988.
- Geleyn, J.-F., Vana, F., Cedilnik, J., Tudor, M. i Catry, B. An intermediate solution between diagnostic exchange coefficients and prognostic TKE methods for vertical turbulent transport. 2006. URL http://www.wcrp-climate.org/WGNE/BlueBook/2006/individual-articles/04_GeLeyn_Jean-Francois_paper.pdf.
- Gerard, L., Jean-Marcel Piriou, R. B., Geleyn, J.-F. i Banciu, D. Cloud and precipitation parameterization in a meso-gamma-scale operational weather prediction model. *Monthly Weather Review*, 137:3960–3977, 2009.

- Giard, D. i Bazile, E. Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model. *Monthly Weather Review*, 128:997–1015, 2000.
- Grisogono, B. i Belušić, D. A review of recent advances in understanding the meso- and microscale properties of the severe bora wind. *Tellus A*, 61:1–16, 2009.
- Grisogono, B., Belušić, D. i bivši studenti 4. godine predbolonjskog studija. Uvod u mezoskalnu meteorologiju i atmosfersku turbulenciju. Interna skripta, 2014. URL http://www.gfz.hr/osobne_stranice/grisogono/DM2i3_SKRIPTA.pdf.
- Horvath, K., Ivatek-Šahdan, S., Ivančan-Picek, B. i Grubišić, V. Evolution and structure of two severe cyclonic bora events: Contrast between the northern and southern Adriatic. *Weather and Forecasting*, 24:946–964, 2009.
- Horvath, K., Bajić, A. i Ivatek-Šahdan, S. Dynamical downscaling of wind speed in complex terrain prone to bora-type flows. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50:1676–1691, 2011.
- Horvath, K., Koracin, D., Vellore, R., Jiang, J. i Belu, R. Sub-kilometer dynamical downscaling of near-surface winds in complex terrain using WRF and MM5 mesoscale models. *Journal of Geophysical Research*, 117:D11111, 1–19, 2012.
- Horvath, K., Željko Večenaj i Grisogono, B. Downslope windstorms over the very complex orography: formation and development of pulsations, 2013. International Conference on Alpine Meteorology, Kranjska Gora, Slovenia.
- Ivančan-Picek, B. i Tutiš, V. A case study of a severe Adriatic bora on 28 December 1992. *Tellus A*, 48:357–367, 1996.
- Ivatek-Šahdan, S. Dinamička adaptacija mezoskalnim meteorološkim numeričkim modelom ALADIN. Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, PMF, Poslijediplomski studij prirodnih znanosti, 51 str., 2007.
- Louis, J.-F., Tiedtke, M. i Geleyn, J.-F. A short history of PBL parameterization at ECMWF. U: *Proceedings from ECMWF workshop on planetary boundary layer parameterization, 25–27 November 1981*, str. 59–79. European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 1982.
- Makjanić, B. *Bura, jugo, etezija, Prilozi poznavanju vremena i klime SFRJ*. Savezni hidrometeorološki zavod, 43 str., 1978.
- Markowski, P. i Richardson, Y. On the classification of vertical wind shear as directional shear versus speed shear. *Weather and Forecasting*, 21:242–247, 2006.
- Pandžić, K. *Analiza meteoroloških polja i sustava*. Hinus, 314 str., 2002.

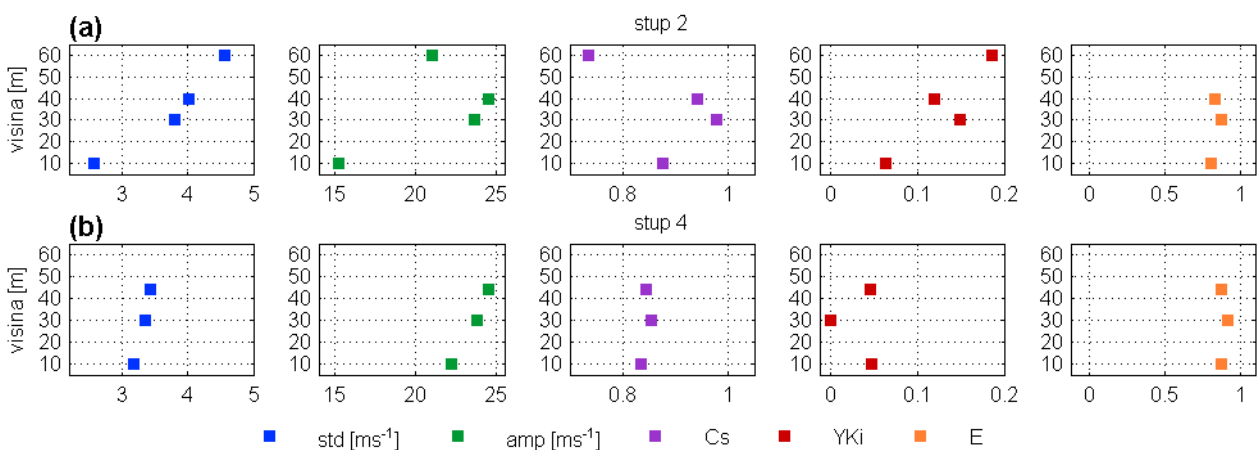
- Pandžić, K. i Likso, T. Eastern Adriatic typical wind field patterns and large-scale atmospheric conditions. *International Journal of Climatology*, 25:81–98, 2005.
- Poje, D. Wind persistence in Croatia. *International Journal of Climatology*, 12:569–586, 1992.
- Ritter, B. i Geleyn, J.-F. A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations. *Monthly Weather Review*, 120: 303–325, 1992.
- Stiperski, I., Ivančak-Picek, B. i Grubišić, V. The complex bora flow in the lee of southern Velebit. Poster, 2009. International Conference on Alpine Meteorology, Rastatt, Germany.
- Stull, R. B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, 670 str., 1988.
- Tudor, M., Ivatek-Šahdan, S., Stanešić, A., Horvath, K. i Bajić, A. Forecasting weather in Croatia using ALADIN numerical weather prediction model. *InTech*, str. 59–88, 2013.
- Wilks, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Science*. Academic Press, 467 str., 1995.
- Žagar, M. i Rakovec, J. Small-scale surface wind prediction using dynamic adaptation. *Tellus A*, 51:489–504, 1999.

Prilozi

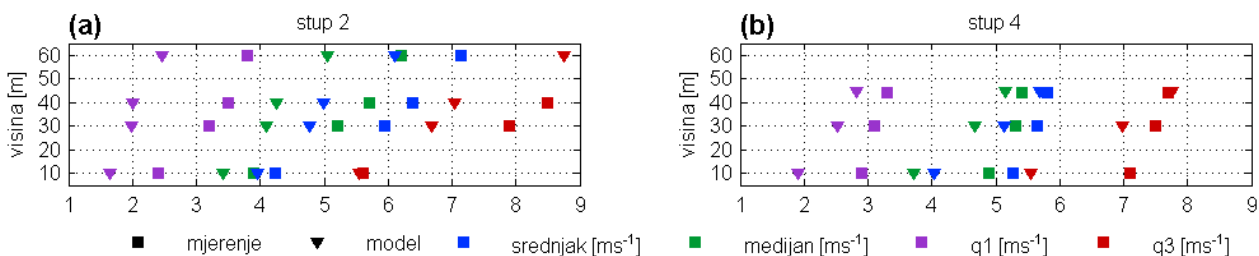
A Statistički parametri



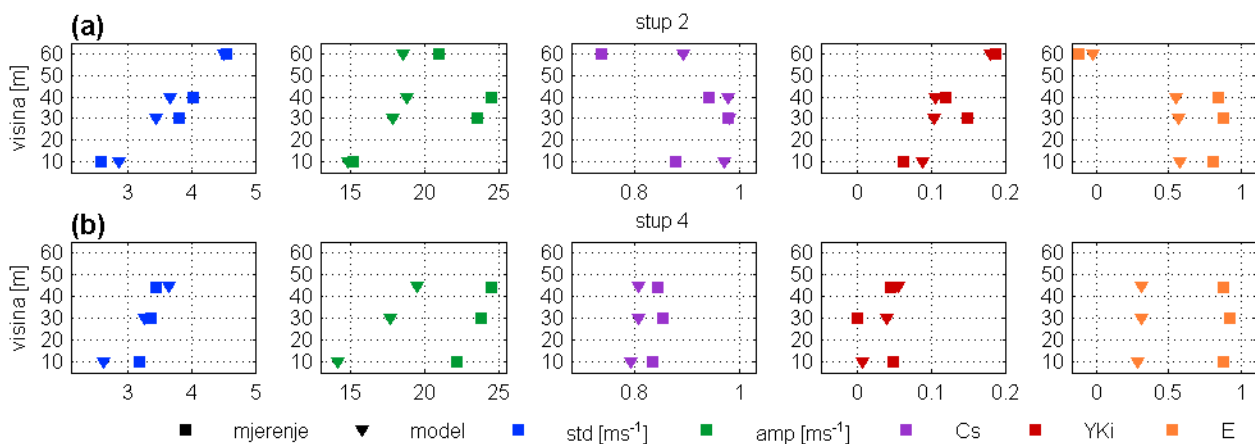
Slika 1: Statistički parametri mjerene brzine vjetra – srednjak, medijan te prvi i treći kvartil za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 2; (b) stup 4. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.



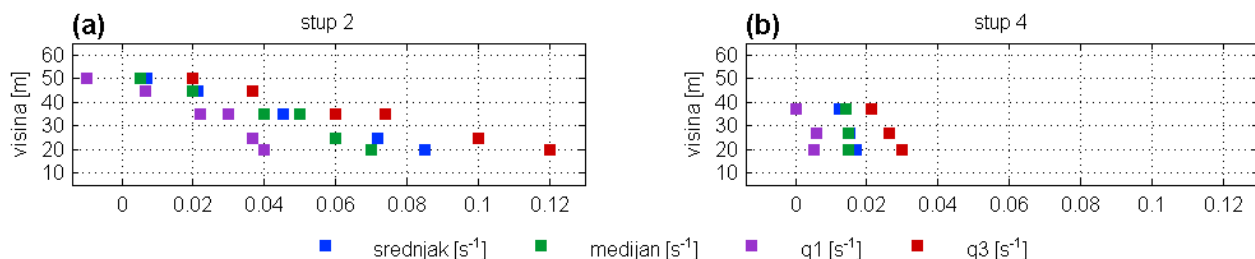
Slika 2: Statistički parametri mjerene brzine vjetra – standardna devijacija (std), amplituda (amp), koeficijent simetrije (Cs), Yule-Kendallov indeks (YKi) te eksces (E) za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 2; (b) stup 4. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.



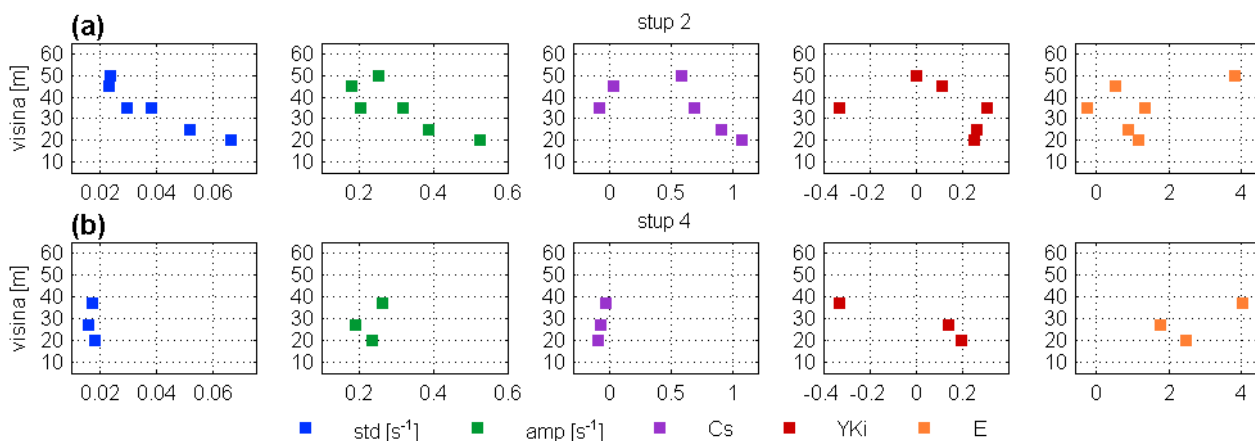
Slika 3: Statistički parametri mjerene i modelirane brzine vjetra – srednjak, medijan te prvi i treći kvartil za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 2; (b) stup 4. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.



Slika 4: Statistički parametri mjerene i modelirane brzine vjetra – standardna devijacija (std), amplituda (amp), koeficijent simetrije (Cs), Yule-Kendallov indeks (YKi) te eksces (E) za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 2; (b) stup 4. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.



Slika 5: Statistički parametri smicanja mjerene brzine vjetra – srednjak, medijan te prvi i treći kvartil za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 2; (b) stup 4. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.

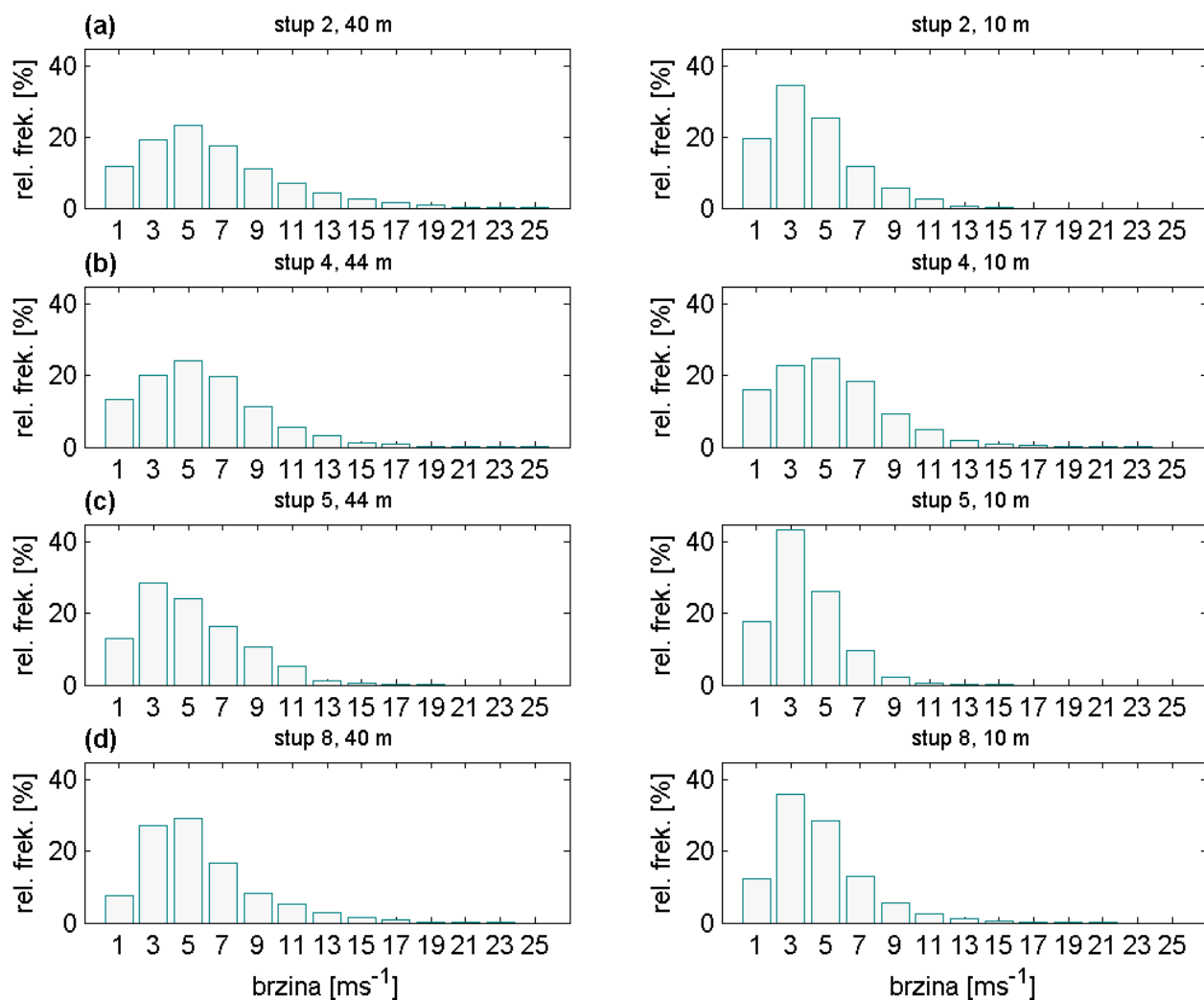


Slika 6: Statistički parametri smicanja mjerene brzine vjetra – standardna devijacija (std), amplituda (amp), koeficijent simetrije (Cs), Yule-Kendallov indeks (YKi) te eksces (E) za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 2; (b) stup 4. Mjerne jedinice zapisane su u legendi.

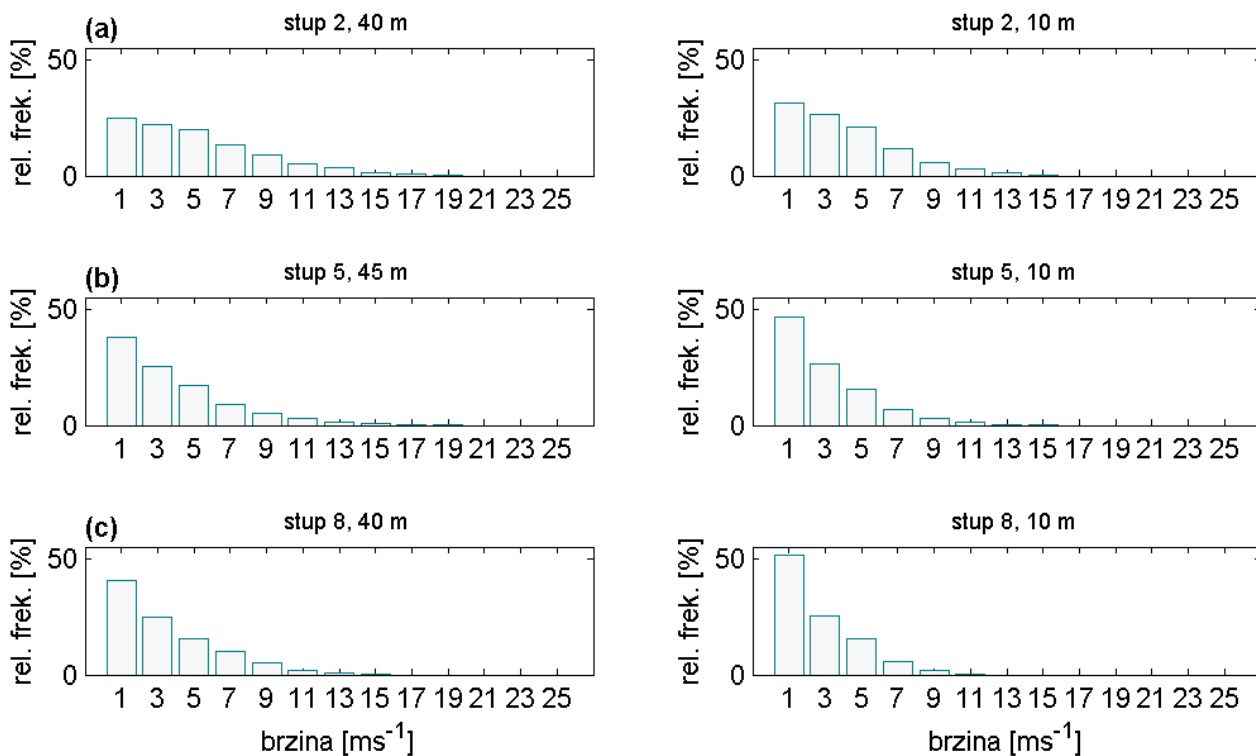
	stup 2, 40-10 m		stup 4, 44-10 m	
	mjerenje	model	mjerenje	model
srednjak [s ⁻¹]	0.072	0.034	0.040	0.047
medijan [s ⁻¹]	0.060	0.029	0.034	0.043
q1 [s ⁻¹]	0.037	0.011	0.013	0.024
q3 [s ⁻¹]	0.100	0.053	0.067	0.065
std [s ⁻¹]	0.052	0.029	0.037	0.031
amp [s ⁻¹]	0.387	0.143	0.236	0.173
Cs	0.899	0.764	0.295	0.660
YKi	0.263	0.158	0.213	0.085
E	0.871	-0.074	-0.318	0.133

Tablica 1: Statistički parametri smicanja mjerene i modelirane brzine vjetra stupova 2 i 4: srednjak, medijan, prvi (q1) i treći (q3) kvartil, standardna devijacija (std), amplituda (amp), koeficijent simetrije (Cs), Yule-Kendallov indeks (YKi) te eksces (E) za razdoblja zapisana u tablici 3.1 (niz mjerenja 44-10 m uspoređivan je s nizom modela 45-10 m).

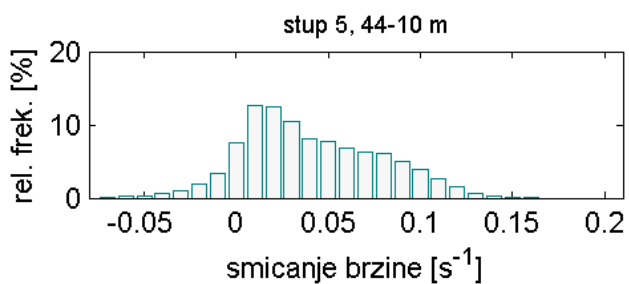
B Histogrami



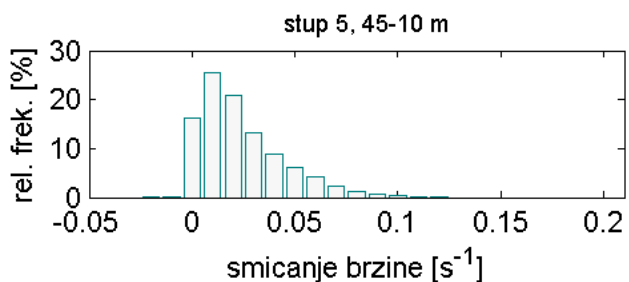
Slika 7: Histogrami mjerene brzine vjetra najviše i najniže dostupne visine mjerenja za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 2; (b) stup 4; (c) stup 5; (d) stup 8. Širina jednog stupca iznosi 2 ms^{-1} .



Slika 8: Histogrami modelirane brzine vjetra na najvišoj i najnižoj dostupnoj visini mjerenja za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 2; (b) stup 5; (c) stup 8. Širina jednog stupca iznosi 2 ms^{-1} .



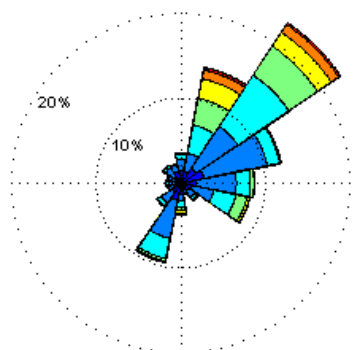
Slika 9: Histogram smicanja mjerene brzine vjetra stupa 5 za razdoblje zapisano u tablici 3.1. Širina jednog stupca iznosi 0.01 s^{-1} .



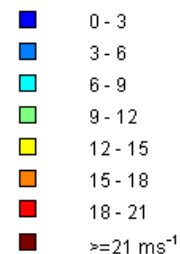
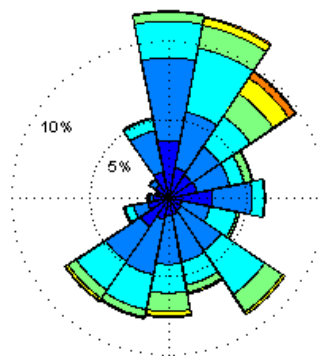
Slika 10: Histogram smicanja modelirane brzine vjetra stupa 5 za razdoblje zapisano u tablici 3.1. Širina jednog stupca iznosi 0.01 s^{-1} .

C Ruže vjetra

(a) stup 2, 30 m

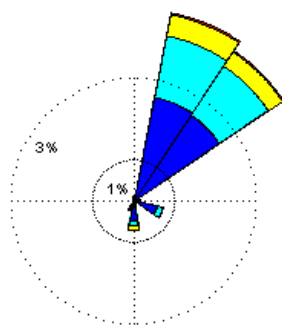


(b) stup 4, 10 m

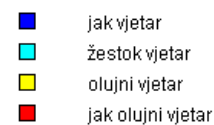
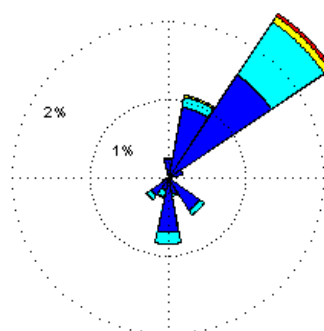


Slika 11: Ruže mjerene brzine vjetra za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 2; (b) stup 4. Postoci uz kružnice odgovaraju relativnoj frekvenciji.

(a) stup 2, 30 m

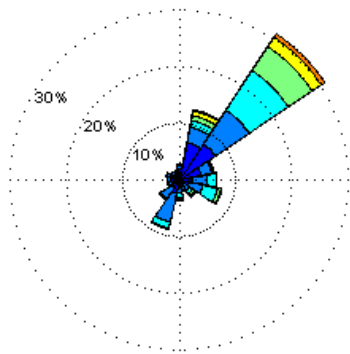


(b) stup 4, 10 m

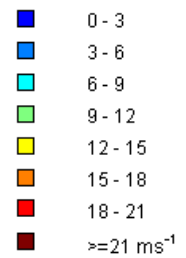
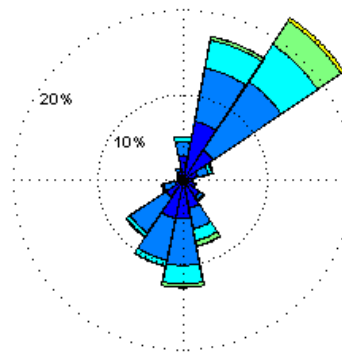


Slika 12: Ruže mjerene brzine jakog i olujnog vjetra (brzina iznad 10.8 ms^{-1}) za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 2; (b) stup 4. Postoci uz kružnice odgovaraju relativnoj frekvenciji.

(a) stup 2, 30 m

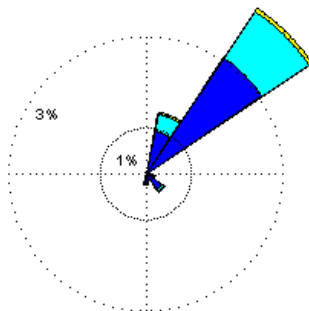


(b) stup 4, 10 m

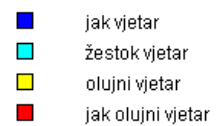
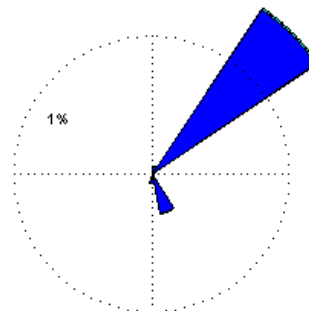


Slika 13: Ruže modelirane brzine vjetra za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 2; (b) stup 4. Postoci uz kružnice odgovaraju relativnoj frekvenciji.

(a) stup 2, 30 m

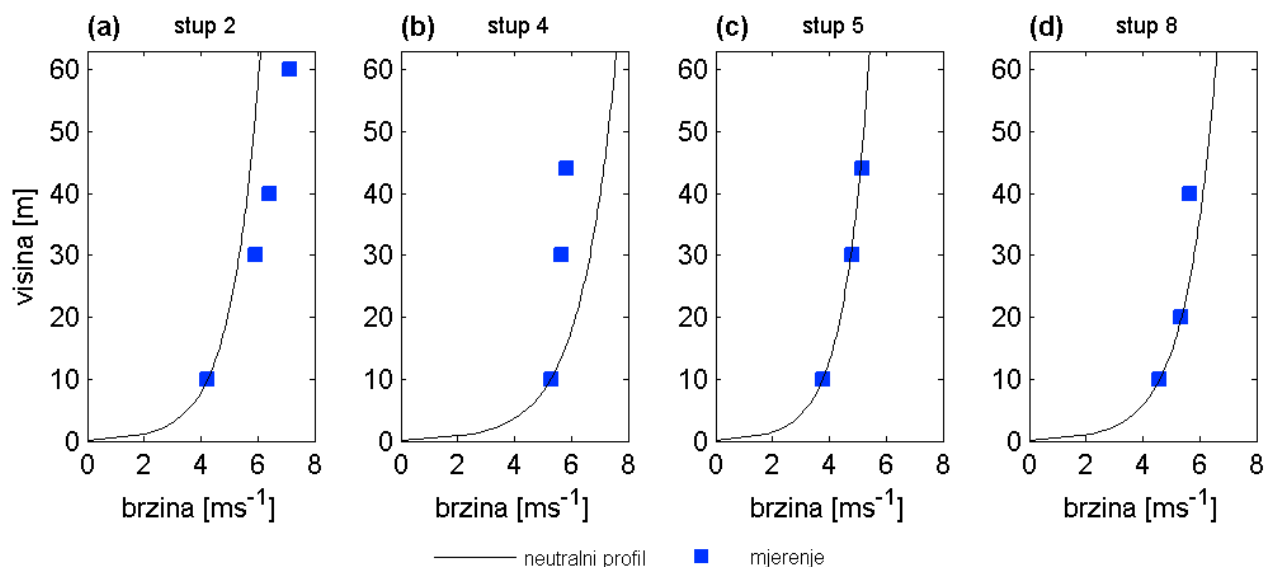


(b) stup 4, 10 m

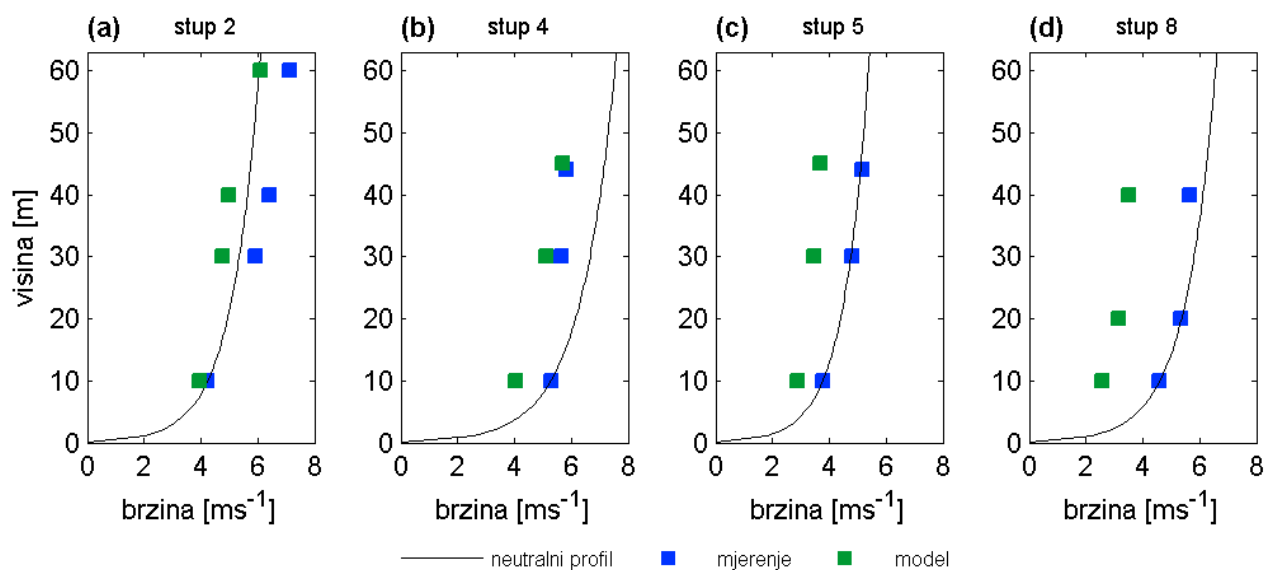


Slika 14: Ruže modelirane brzine jakog i olujnog vjetra za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 2; (b) stup 4. Postoci uz kružnice odgovaraju relativnoj frekvenciji.

D Vertikalni profili

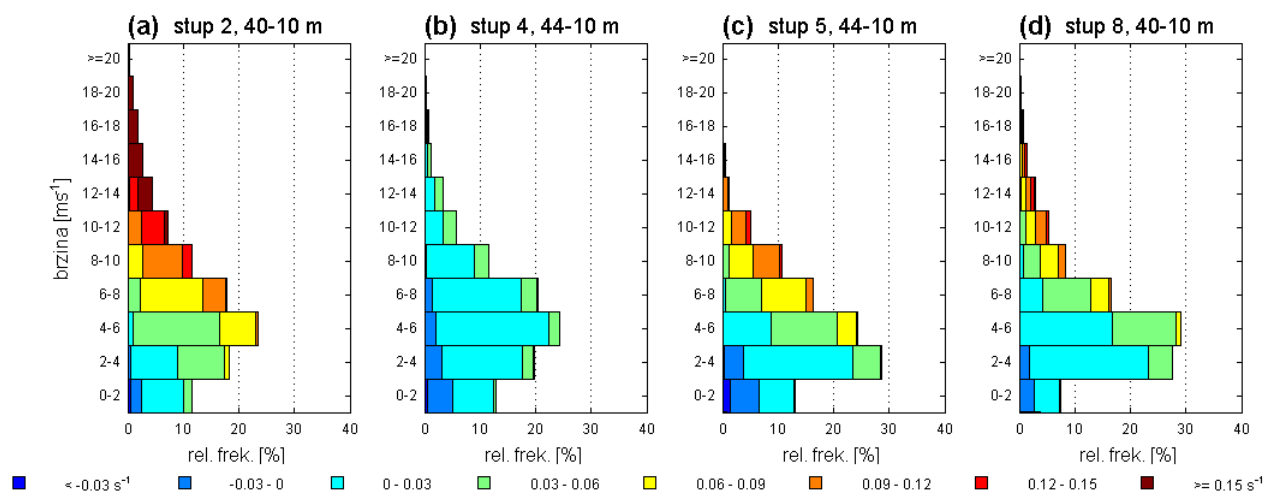


Slika 15: Vertikalni profili mjerene brzine vjetra za razdoblja zapisana u tablici 3.1 uz statički neutralni profil: (a) stup 2; (b) stup 4; (c) stup 5; (d) stup 8. Neutralni profil proračunat je pomoću relacije 2.2, mjerene brzine na 10 m te $z_0 = 0.15$ m.

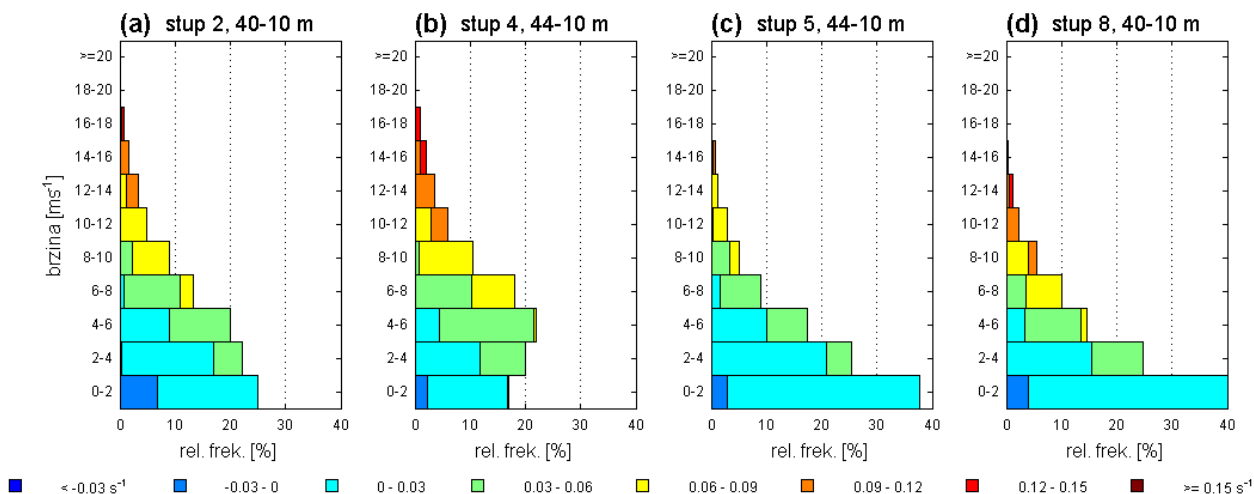


Slika 16: Vertikalni profili mjerene i modelirane brzine vjetra za razdoblja zapisana u tablici 3.1 uz statički neutralni profil: (a) stup 2; (b) stup 4; (c) stup 5; (d) stup 8. Neutralni profil proračunat je pomoću relacije 2.2, mjerene brzine na 10 m te $z_0 = 0.15$ m.

E Relativne frekvencije i smicanje brzine vjetra po brzina

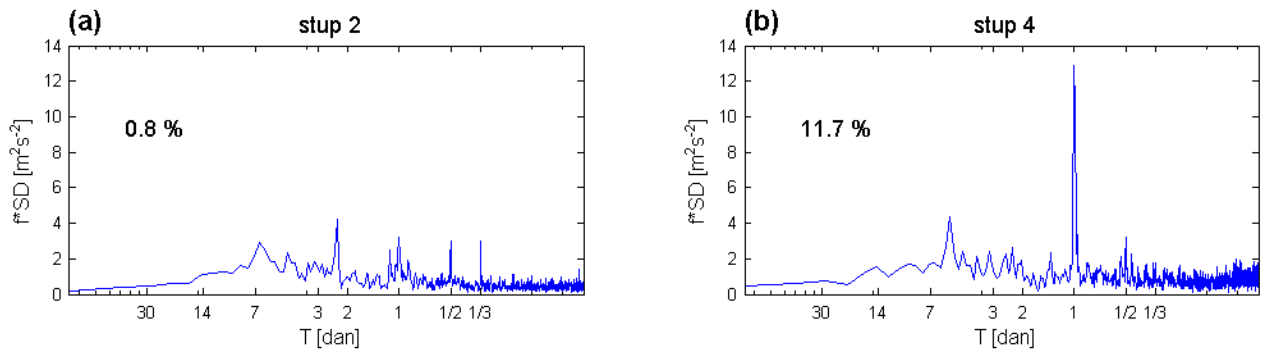


Slika 17: Odnos relativnih frekvencija i iznosa smicanja mjerene brzine vjetra prema brzini najviše razine za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 2; (b) stup 4; (c) stup 5; (d) stup 8.

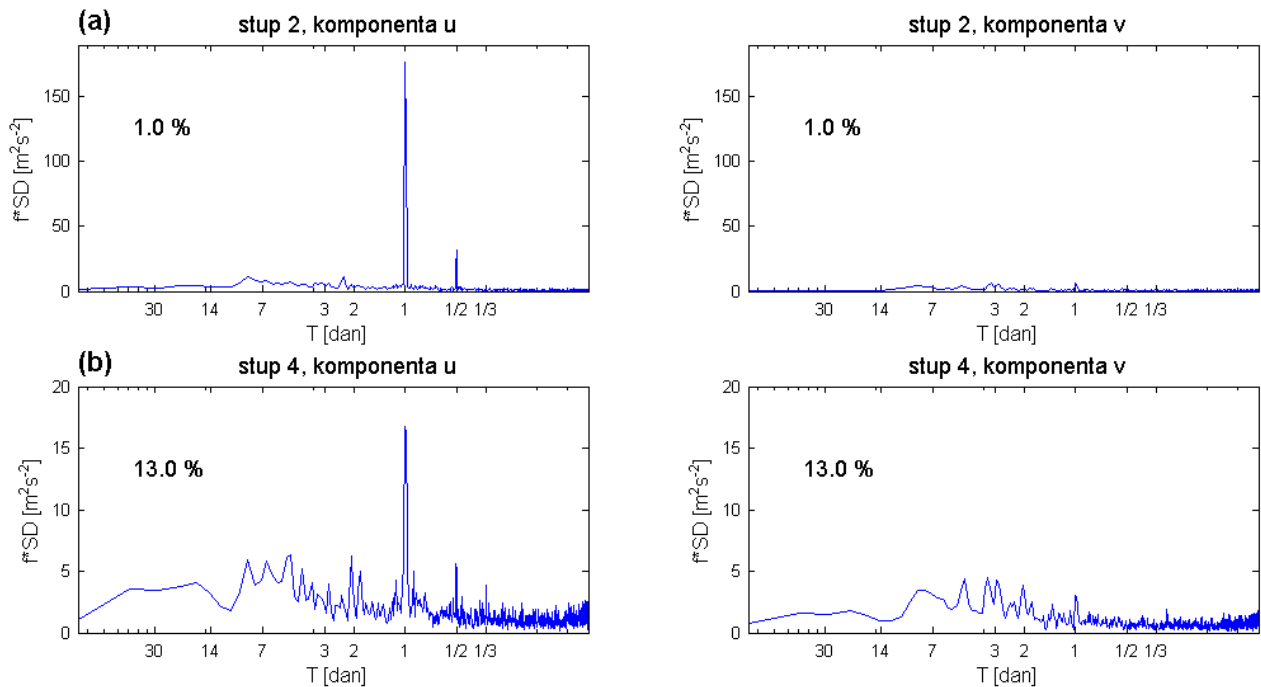


Slika 18: Odnos relativnih frekvencija i iznosa smicanja modelirane brzine vjetra prema brzini najviše razine za razdoblja zapisana u tablici 3.1: (a) stup 2; (b) stup 4; (c) stup 5; (d) stup 8.

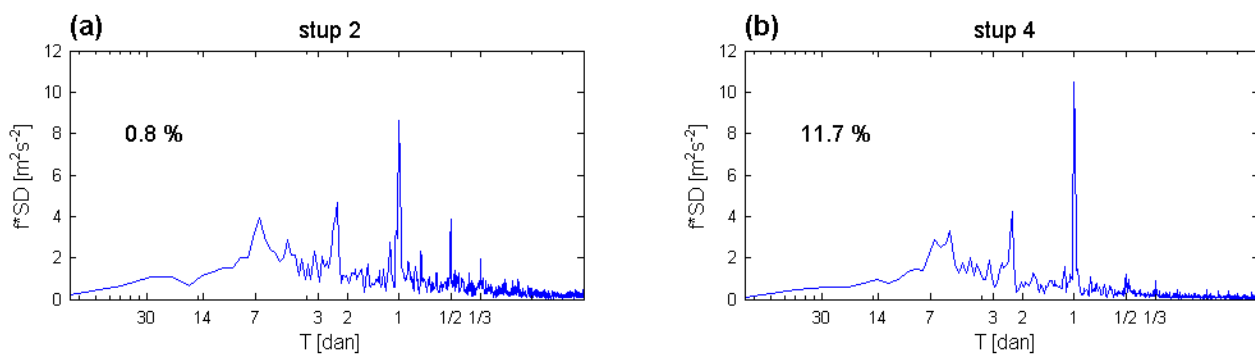
F Spektralna gustoća energije



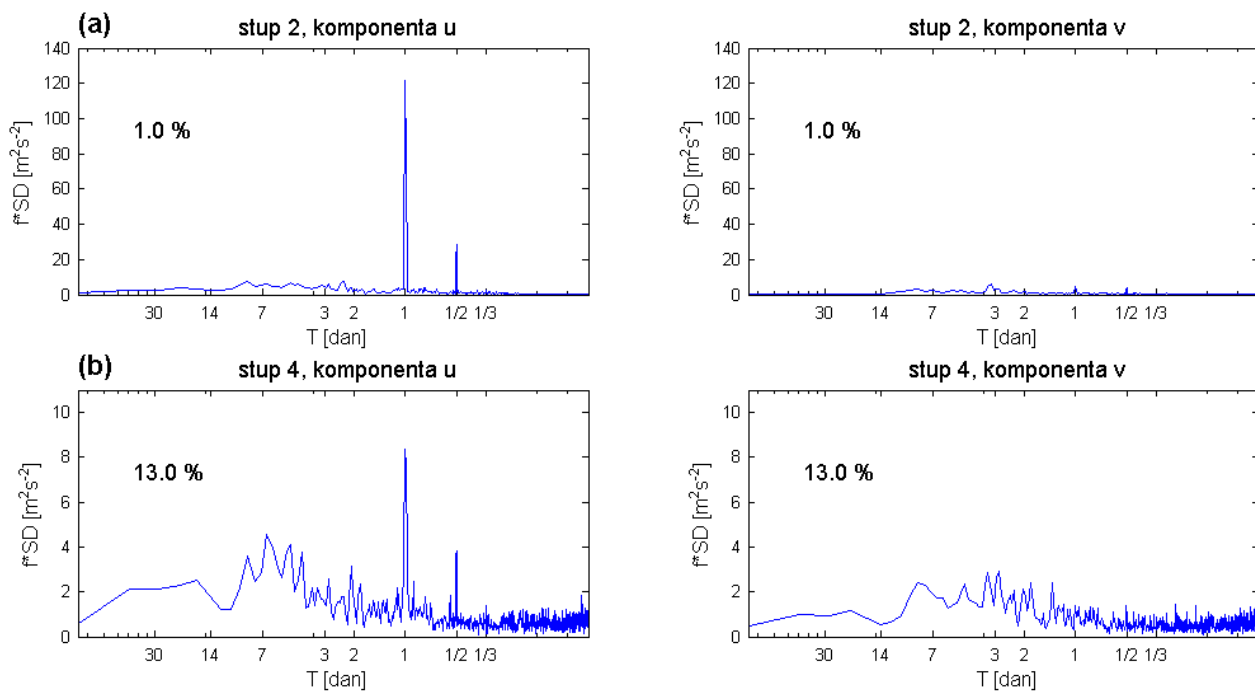
Slika 19: Otežane funkcije spektralne gustoće mjerene brzine vjetra na 10 m: (a) stup 2; (b) stup 4. Postoci odgovaraju udjelu nedostajućih podataka u nizu.



Slika 20: Otežane funkcije spektralne gustoće komponenti mjerene brzine vjetra: (a) stup 2, 30 m; (b) stup 4, 10 m. Postoci odgovaraju udjelu nedostajućih podataka u nizu.



Slika 21: Otežane funkcije spektralne gustoće modelirane brzine vjetra na 10 m: (a) stup 2; (b) stup 4. Postoci odgovaraju udjelu nedostajućih podataka u nizu.



Slika 22: Otežane funkcije spektralne gustoće komponenti modelirane brzine vjetra: (a) stup 2, 30 m; (b) stup 4, 10 m. Postoci odgovaraju udjelu nedostajućih podataka u nizu.