



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Alica Bajić

**PROSTORNA RASPODJELA
OČEKIVANIH MAKSIMALNIH BRZINA VJETRA
NA SLOŽENOM TERENU HRVATSKE KAO PODLOGA
ZA OCJENU OPTEREĆENJA VJETROM**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2011.



UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF SCIENCE
DEPARTMENT OF GEOPHYSICS

Alica Bajić

**SPATIAL DISTRIBUTION
OF EXPECTED WIND SPEED MAXIMA
IN THE COMPLEX TERRAIN OF CROATIA
AS A BASIS FOR WIND LOADS CALCULATION**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2011.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Alica Bajić

**PROSTORNA RASPODJELA
OČEKIVANIH MAKSIMALNIH BRZINA VJETRA
NA SLOŽENOM TERENU HRVATSKE KAO PODLOGA
ZA OCJENU OPTEREĆENJA VJETROM**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

dr. sc. Branka Ivančan-Picek, znan. sur.

prof. dr. sc. Bernardin Peroš

Zagreb, 2011.

Zahvaljujem mentorima dr. sc. Branki Ivančan-Picek i prof. dr. sc. Bernardinu Perošu na brizi, potpori i strpljenju.

Hvala prof. dr. sc. Branku Grisogonu, dr. sc. Marjani Gajić-Čapka i prof. dr. Zvezdani Bencetić Klaić na korisnim sugestijama tijekom izrade disertacije.

Zahvaljujem se mojim kolegama, osobito Stjepanu Ivatek-Šahdanu, Kristianu Horvathu, Zvonku Žibratu, Davoru Tomšiću i Martini Tudor, koji su uvijek bili spremni na pomoć i plodonosnu raspravu.

Mojoj prijateljici Sonji Vidič zahvaljujem na moralnoj podršci u kriznim trenucima.

Prije svega hvala mojim roditeljima koji su me uvijek podupirali i vjerovali u mene.

SAŽETAK

U ovom je radu izrađena za područje Republike Hrvatske prostorna raspodjela osnovne brzine vjetra. Osnovna brzina vjetra definirana je kao maksimalna 10-minutna brzina vjetra na 10 m iznad ravnog tla kategorije hrapavosti II za koju se može očekivati da bude premašena jednom u 50 godina. U svrhu izrade prostorne raspodjele istražena je mogućnost i opravdanost korištenja numeričkog modela atmosfere za ograničeno područje s ciljem proračuna brzine vjetra na točkama mreže velike horizontalne razlučivosti. Pri tom je korištena metoda dinamičke prilagodbe globalnih reanaliza ERA-40 na mrežu točaka veće horizontalne razlučivosti upotrebom spektralnog, prognostičkog modela ALADIN. Usporedba očekivanih ekstremnih brzina vjetra proračunatih na temelju mjerenih podataka s onima dobivenim korištenjem modeliranih vrijednosti pokazala je da model uspješno prepoznaje situacije s olujnim vjetrom, te da sistematski podcjenjuje ekstremnu brzinu vjetra za ~10% vrijednosti dobivene temeljem mjerenja. Bez obzira na brojnost uzroka koji dovode do opaženih razlika pokazalo se da je korištenje numeričkog modela atmosfere za ocjenu prostorne raspodjele očekivanih maksimalnih brzina vjetra na područja bez mjerenja opravdano, osobito na područjima kompleksnog terena gdje niti jedna statistička metoda interpolacije ne može dati realne rezultate.

Osnovna značajka dobivene prostorne raspodjele osnovne brzine vjetra su znatno veće vrijednosti na području priobalja i otoka u odnosu na kontinentalni dio Hrvatske. Kopneno područje najvećih vrijednosti je primorska strana Velebita što je posljedica česte olujne bure. Na tom području se može očekivati da 10-minutna brzina vjetra na 10 m iznad tla u prosjeku jednom u 50 godina premaši vrijednost od 40 m/s. Veći dio Hrvatske, međutim, karakterizira osnovna brzina vjetra do 30 m/s.

Analiza utjecaja turbulencije na opterećenje građevinskih konstrukcija olujnim vjetrom pokazala je da se pri projektiranju građevina na priobalju i otocima gdje brzina vjetra postiže ekstremne vrijednosti u situacijama s olujnom burom mora uzeti u obzir utjecaj turbulentne komponente vjetra na opterećenje građevinske konstrukcije ili tzv. dinamičko opterećenje. Primjer jedne od najjačih ikad izmjerenih bura na Jadranu pokazao je da je tlak vjetra proračunat uzimajući u obzir dinamičko opterećenje konstrukcije gotovo 4 puta veći od onog koji se dobije uzimajući u obzir samo maksimalnu očekivanu 10-minutnu brzinu vjetra, tj. samo statičko opterećenje vjetrom.

Ključne riječi:

osnovna brzina vjetra, teorija ekstrema, bura, intenzitet turbulencije, opterećenje vjetrom, atmosferski model

SUMMARY

The topic of this dissertation is the spatial distribution of basic wind speed defined as maximum wind speed averaged over 10 minutes at a 10-metre height in a flat, open terrain with a 50-year mean return period. The pronounced spatial and temporal variability of the wind regime in Croatia makes the basic wind spatial distribution complex to construct. The task is even more demanding due to the insufficient number of measurements and short time period with wind data. In order to solve the problem of scarce or inexistent high-quality measurements, a dynamical downscaling of ERA-40 reanalysis was performed to an 8-km horizontal grid resolution, using the ALADIN spectral prognostic model. Subsequently, the model data were dynamically adapted to a 2-km horizontal grid resolution. Wind climatology in the planetary boundary layer was assessed over a 10-year period (1992-2001) with a 1-h frequency of wind speed and direction.

Statistical verification performed with the use of standard verification parameters for a one-year period suggests that the downscaling was quite successful. It is shown that the model successfully recognizes the extreme wind situations but systematically underestimates the maximum wind speeds by ~10-15% of the measured value. Since the measurement conditions at the majority of meteorological stations are not ideal, the underestimation could not be taken entirely as the consequence of the model error. Therefore, basic wind speeds, resulting from the general extreme value analysis of modelled data at the 2 km x 2 km grid resolution, have been considered appropriate for the basic wind speed mapping of Croatia.

The main feature of spatial distribution is a considerably higher basic wind speed in the wider coastal area and the hinterlands than in the continental part of Croatia. The highest basic wind speed over land is simulated over the eastern slopes of the Velebit mountain. The high wind speed area is primarily a result of the climatologically high frequency of bora wind. The channelling of the north-easterly background flow during bora events through the Vratnik pass contributes to highest wind speed in this particular area. This lee-side maximum extends offshore, reaching the outermost islands, acquiring a spatial distribution that resembles hydraulic solutions for bora flows and reaching the absolute maximum of basic wind speed close to 47 m/s. On the other hand, spatial confinement of the lee-side maxima to the very vicinity of the western slopes of southern Velebit indicates the preference for another mechanism applicable to strong bora flows, which is related to upstream blocking and gravity wave-breaking. The inexistence of such a maximum over the western slopes of southern Dinaric Alps can be associated with the climatologically lower frequency of favourable synoptic settings for the onset of bora, but also with their lower predictability characterized with weaker model performance over the middle and southern Adriatic and related underestimation of strong bora flows. Finally, the

regions with the lowest basic wind speed are primarily some of the lowland areas of continental Croatia.

These results suggest that bora downslope windstorms are extremely important for wind load upon structures in the coastal part of Croatia. However, due to its gusty character and extreme turbulence, estimates of wind load in the region have to include the dynamical wind load caused by bora turbulence. This is confirmed by the values of the exposure coefficient of 4 during the example situation of strong bora wind conditions.

Due to the importance of severe mesoscale local winds, such as bora and jugo, for wind climate and wind load estimates in the coastal, complex terrain of Croatia, the reduction of remaining uncertainties in the numerical modelling of these phenomena is essential for the improvement of basic wind speed calculation. Finally, concerning the high bora wind load, the analysis and numerical simulations of bora gustiness and turbulence remain one of the major research challenges related to both meteorological and wind engineering applications in complex terrain.

Key words:

wind load, basic wind velocity, atmospheric model, extreme value theory, bora wind, turbulence intensity

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Olujni vjetar u Hrvatskoj	1
1.2. Interpolacija brzine vjetra na područja bez mjerenja	7
1.3. Djelovanje vjetra na građevinske konstrukcije	10
1.4. Cilj i sadržaj rada	12
 2. METODE PROCJENE OČEKIVANE MAKSIMALNE BRZINE VJETRA I ODABIRA EKSTREMA	 13
2.1. Opća Pareto razdioba	13
2.2. Metoda odabira ekstremnih brzina vjetra	18
 3. IZMJERENE I OČEKIVANE MAKSIMALNE BRZINE VJETRA NA METEOROLOŠKIM POSTAJAMA	 20
3.1. Podaci mjerenja smjera i brzine vjetra	20
3.2. Izmjerene maksimalne brzine vjetra	24
3.3. Analiza trenda maksimalne brzine vjetra	35
3.4. Maksimalne očekivane brzine vjetra proračunate iz podataka mjerenja	37
3.5. Metoda proračuna faktora korekcije izloženosti	40
3.6. Osnovna brzina vjetra proračunata iz podataka mjerenja	45
3.7. Osnovna brzina vjetra i smjer vjetra	47
 4. BRZINA VJETRA NA PODRUČJIMA BEZ MJERENJA	 49
4.1. Mezoskalni model atmosfere ALADIN i strategija gnježđenja	49
4.2. Prostorna raspodjela srednje godišnje brzine vjetra	52
4.3. Verifikacija rezultata modela	55
4.4. Reprezentativnost razdoblja s modeliranim podacima brzine vjetra	66
4.5. Osnovna brzina vjetra na temelju rezultata ALADIN modela	67
4.6. Prostorna raspodjela osnovne brzine vjetra	71

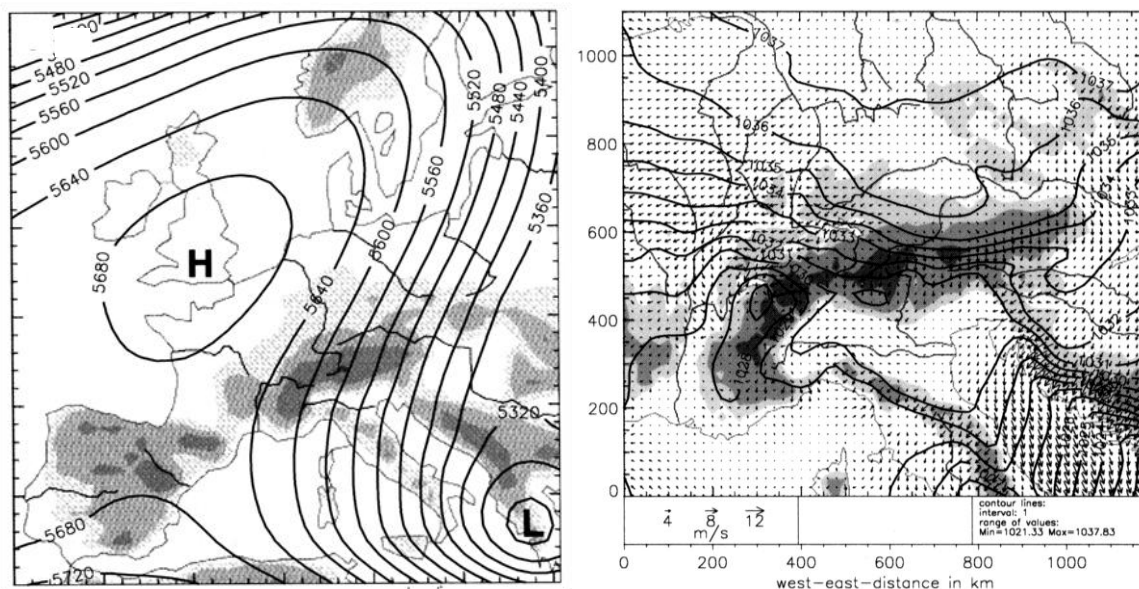
1. UVOD

1.1. Olujni vjetar u Hrvatskoj

Prirodne nepogode među koje ubrajamo i olujni vjetar svake godine diljem svijeta uzrokuju mnogobrojne materijalne štete i ugrožavaju ljudske živote. „Procjena ugroženosti Republike Hrvatske od prirodnih i tehničko tehnoloških katastrofa i velikih nesreća“ (DUZS, 2009) navodi da prirodne nepogode kao što su suše, olujni ili orkanski vjetar, pijavice, velike snježne oborine, tuča, poledica i jak mraz uzrokuju 67% (2.440.000 USD u razdoblju 1980-2002) ukupnih šteta od prirodnih i tehničko-tehnoloških katastrofa na području Hrvatske. Olujni vjetar i tuča, pak čine 20% svih šteta od prirodnih nepogoda. Kako je navedeno u spomenutom dokumentu, olujnom vjetru treba posvetiti posebnu pažnju zbog mogućih velikih razaranja u toku kratkog vremenskog razdoblja i neposredne opasnosti po ljudske živote veće nego kod bilo koje druge prirodne ugroze.

Olujni vjetar (jačina >8 bofora što odgovara brzinama vjetra većim od 17 m/s) je zabilježen u svim dijelovima Hrvatske. Pri tom se uočavaju bitne razlike u njegovoj jačini i učestalosti tijekom godine u unutrašnjosti u odnosu na priobalje i otoke. Tako u razdoblju 2005-2009. prosječni broj dana s barem jednim udarom vjetra većim od 17 m/s u unutrašnjosti Hrvatske ne prelazi 20, dok u podvelebitskom području priobalja bilježimo više od 100 takvih dana (Bajić, 2010). Najveće brzine vjetra zabilježene su u situacijama s burom na Jadranu (Bajić i sur.; 2001; Bajić, 2010). Tako je najveći udar vjetra od 69 m/s izmjeren 21. prosinca 1998. na postaji Maslenički most. Udari bure veći od 50 m/s izmjereni su i na mjernim postajama Most Krk (58.9 m/s), Most Pag (65.2 m/s) i Makarska (59.0 m/s). Zbog brzina koje postiže i velike mahovitosti, bura je najviše istraživana vjetar u Hrvatskoj, osobito na sjevernom Jadranu gdje je i najčešća (npr. Makjanić, 1970; Lukšić, 1975; Petkovšek, 1984; Jurčec, 1988, 1989; Bajić, 1988, 1989; Tutiš, 1988; Vučetić, 1988; Ivančan-Picek i Vučetić, 1990; Ivančan-Picek i Tutiš, 1996; Tudor i Ivatek-Šahdan, 2002; Bencetić Klaić i sur. 2003; Grubišić, 2004; Gohm i Mayr, 2005). Analize sinoptičke situacije u slučajevima s olujnom burom na sjevernom Jadranu pokazuju da bura nastaje pri prodoru hladnog zraka u dubokoj visinskoj dolini koju

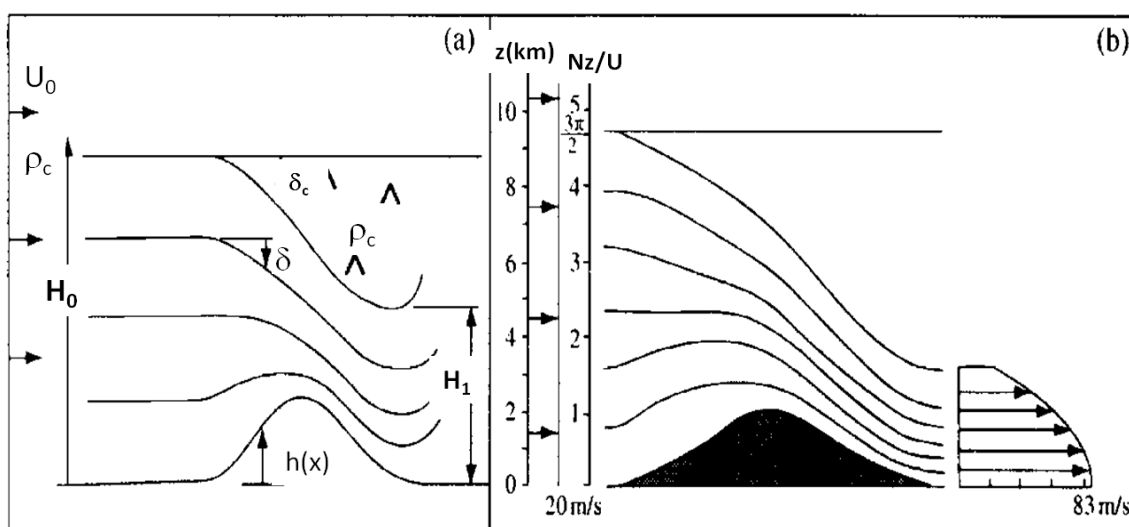
karakterizira velika amplituda i mala valna dužina (Sl. 1.1) (npr. Jurčec, 1981, 1989; Heimann, 2001). Ovakav val je dinamički nestabilan i dovodi do procesa odcjepljenja ciklone u Sredozemlju. Istovremeno se nad sjeverozapadnom Europom nalazi polje visokog tlaka zraka čime jača gradijent tlaka preko Dinarida koji potiče pojavu i jačanje bure na Jadranu.



Slika 1.1. Srednja geopotencijalna visina (m) izobarne plohe 500 hPa (lijevo) i srednji tlak zraka na razini mora (hPa) i vektori prizemnog vjetra (desno) u tipičnoj situaciji s burom 7-10. 12. 1991. (preuzeto iz Heimann, 2001).

Prijašnja su istraživanja (npr. Klemp i Durran 1987; Grubišić 2004; Gohm i sur., 2008) pokazala da je lom valova primarni mehanizam nastanka olujne bure na sjevernom Jadranu. Vertikalni atmosferski profil tipičan za buru najčešće sadrži sinoptički kritični nivo i/ili inverziju u navjetrini (Bajić, 1988; Glasnović i Jurčec 1990, Ivančan-Picek i Tutiš, 1996), koji pospješuju lom valova, ili valno-inducirani kritični nivo u zavjetrini. Dolazi do dinamičkog odvajanja sloja ubrzanog nadkritičnog strujanja pri tlu od strujanja iznad, što rezultira formiranjem hidrauličkog skoka u zavjetrini. Ovaj je proces dominantno hidrostatički (Durran 1986; Klemp i Durran 1987) pa nelinearna hidraulička teorija (Smith 1985, 1987) dobro opisuje osnovne karakteristike bure na sjevernom Jadranu (npr. Bajić 1991). Bitni elementi 2D hidrauličke teorije primijenjene na buru su planinska prepreka kritične visine (za danu navjetrinsku brzinu vjetra i stabilnost) koja uzrokuje pojavu unutarnjih težinskih valova velike amplitude i loma vala iznad zavjetrinske strmine. Područje loma vala, unutar kojeg je zrak dobro izmiješan, razdvaja strujanje u prizemnom sloju od onog na visini odbijajući valnu energiju koja ostaje ograničena u plitkom sloju

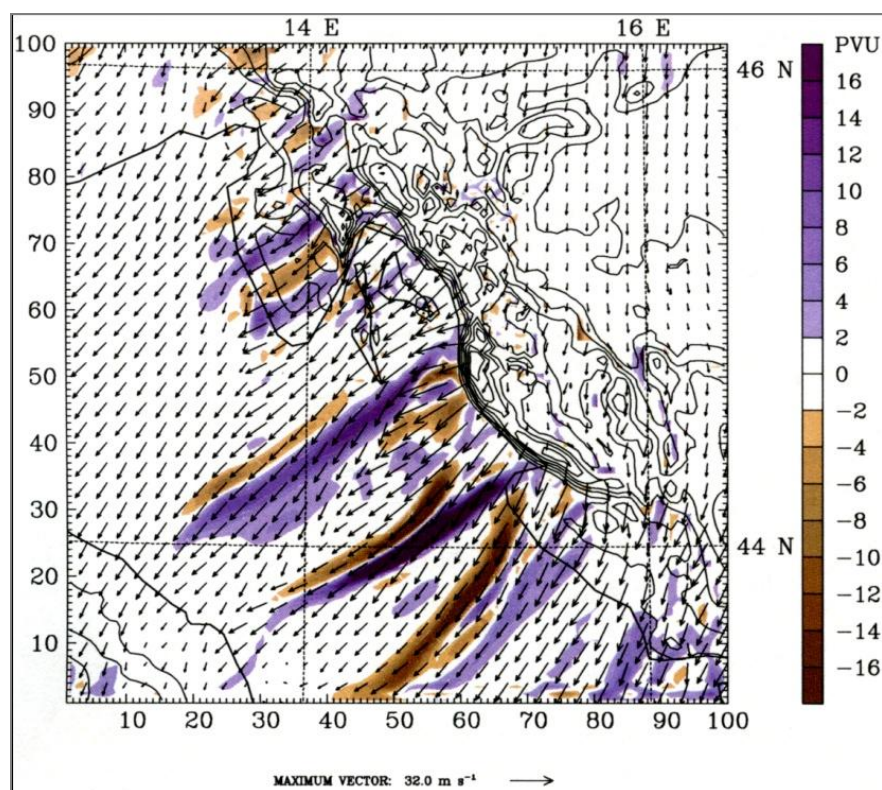
akceleriranog zraka u zavjetrini (Sl. 1.2). Visina atmosferskog sloja uključenog u prijelaz iz subkritičnog u superkritično stanje iznad prepreke određena je položajem inverzije u navjetrini, kritičnim nivoom u navjetrinskom profilu vjetra ili, ako je oboje od navedenog izostalo, visinom na kojoj se događa lom vala za dani profil vjetra i stabilnosti. Brzina strujanja nakon prijelaza u superkritično strujanje nad zavjetrinskim dijelom planine iz subkritičnog strujanja u navjetrini najveća je blizu površine i nekoliko je puta veća od brzine u navjetrini (Sl. 1.2.b). Orografski gradijent tlaka uzrokovan znatnom deformacijom izentropnih ploha za vrijeme strujanja preko prepreke podržava zavjetrinsku akceleraciju.



Slika 1.2. Zavjetrinski olujni vjetar prema hidrauličkoj teoriji. a) Shematski prikaz strukture idealiziranog olujnog zavjetrinskog strujanja. Kritička (razdvajajuća) strujnica dijeli područje uniformne gustoće zraka (ρ_c). H_0 i H_1 označavaju visinu razdvajajuće strujnice u navjetrini i donjeg kraka te strujnice u zavjetrini. δ_c je vertikalni pomak donjeg kraka razdvajajuće strujnice. $h(x)$ je visina planine, a U_0 brzina navjetrinskog strujanja. b) Primjer strujanja preko planine za slučaj u kojem je Froudeov broj $Fr=U/Nh=1$. Vrijednosti varijabli su: brzina vjetra $U=20$ m/s, Brunt-Väisälä frekvencija $N=0.01$ s⁻¹, visina navjetrinskog sloja $H_0=9.42$ km i visina planine $h=2$ km. (preuzeto iz Lin, 2007; izrađeno prema Smith, 1985).

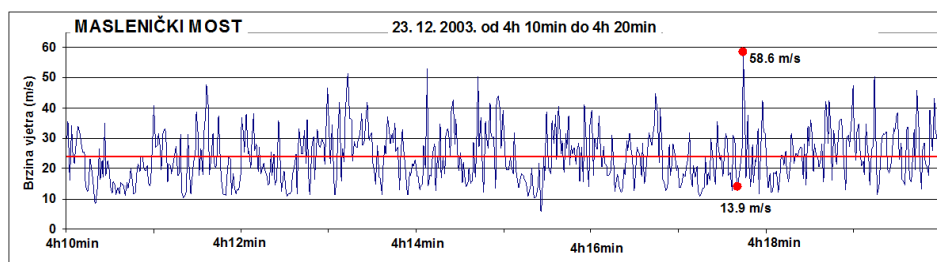
Kako Dinaridi nisu neograničeni greben jednake visine, nego ih karakteriziraju brojni prijevoji i vrhovi, njihova trodimenzionalnost doprinosi zamijećenoj prostornoj promjenjivosti brzine bure duž obale. Viši dijelovi terena izazivaju snažniji lom vala nego okolni teren, pa je hidraulički skok jači nizvodno od vrhova. To rezultira nastankom područja zavjetrinske turbulencije (*wakes*) zbog jake Bernoullijeve disipacije unutar skoka (Pan i Smith, 1999). Manja disipacija unutar slabijeg hidrauličkog skoka uzrokuje jače strujanje u zavjetrini nižeg terena, osobito prijevoja. Promjene brzine vjetra između pojačanog strujanja kroz prijevoje i područja slabijeg vjetra iza vrhova planina odražavaju se

u pojavi traka (*banners*) naizmjenične pozitivne i negativne potencijalne vrtložnosti (PV) okomitih na smjer pružanja planinske prepreke (Sl. 1.3).

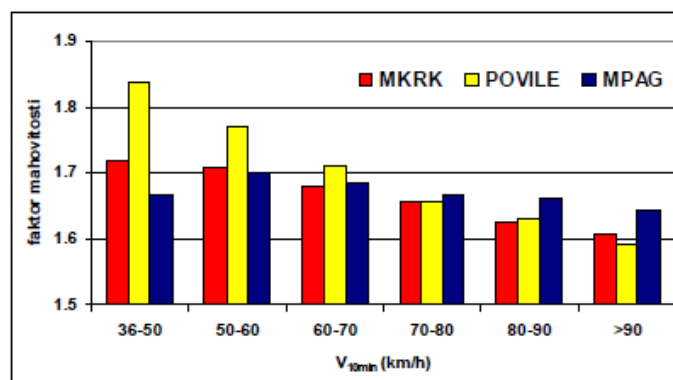


Slika 1.3. Modelirano polje potencijalne vrtložnosti na 700 m iznad razine mora i prizemni vektori vjetra 14. studenog 2004. u 00 UTC (prema Belušić i Bencetić Klaić, 2006). Domena je 100 x 100 točaka rezolucije 3 km.

Osim što postiže olujnu jačinu, bura je i izuzetno mahovit vjetar (Sl. 1.4). Maksimalni udari bure mogu biti 1.5-2 puta veći od prosječne brzine u intervalu osrednjavanja od 10 minuta (Sl. 1.5). Mahovitost kao jednu od osnovnih karakteristika bure uočili su i analizirali mnogi autori (Yoshino, 1976; Jurčec, 1981; Petkovšek, 1982; Smith, 1987, Belušić i sur., 2006). Na postojanje pulsacija bure s periodom ~3-11 minuta kao kvazi-periodičkog doprinosa mahovitosti bure ukazala je spektralna analiza visokofrekventnih podataka mjerenja na lokaciji Senja (Belušić i sur., 2004, 2006). Kao najvjerojatniji mehanizam pulsacija u analiziranoj situaciji s burom izdvojena je Kelvin-Helmholtzova nestabilnost koja se javlja iznad sloja bure i ispod područja loma vala (Belušić i sur., 2007).



Slika 1.4. Hod sekundnih (plava linija) brzina vjetra 23. prosinac 2003. godine u 10-min intervalu od 04:10 h do 04:20 h na lokaciji platoa kod Masleničkog mosta. Crvena linija označava 10-minutnu srednju brzinu vjetra, a crvene točke ilustriraju naglu promjenu brzine vjetra u svega nekoliko sekundi. (preuzeto iz Bajić, 2009).

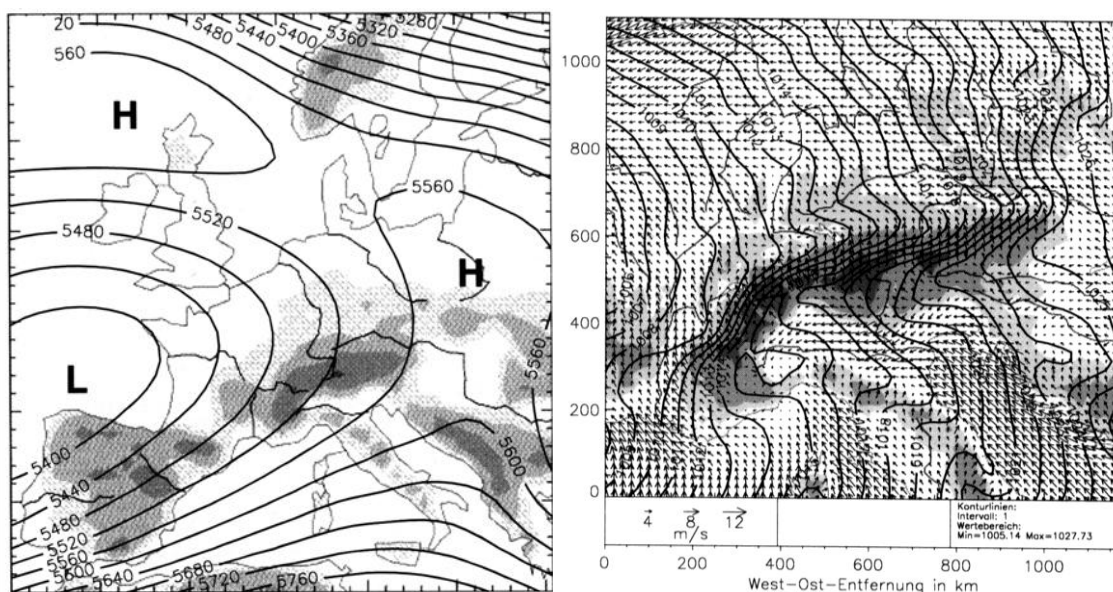


Slika 1.5. Prosječni faktor mahovitosti (omjer sekundne brzine vjetra u 10-minutnom intervalu i srednje 10-minutne brzine vjetra) u terminima mjerenja sa srednjom 10-minutnom brzinom vjetra (V_{10min}) različitog iznosa na lokacijama Most Krk za razdoblje siječanj 1996 – lipanj 2006., Povile za razdoblje studeni 2004 – lipanj 2006. i Most Pag za razdoblje srpanj 2000 – lipanj 2006. (Preuzeto iz Bajić, 2009).

Pojava olujne bure na južnom Jadranu manje je istražena (npr. Vučetić, 1993; Poje 1995). Ta je bura ovisna o postojanju znatno dubljeg navjetrinskog sloja koji može prevladati blokirajući učinak širokih južnih Dinarida (Horvath i sur., 2009). Sinoptičku situaciju u tom slučaju karakterizira razvoj ciklone nad južnim Jadranom ili nad jugom Balkanskog poluotoka. Strujanje povezano s visinskom ciklonom i ovdje uzrokuje pojavu kritičnog nivoa kao ključnog mehanizma za formiranje sloja bure u navjetrini koji prelazi planinsku prepreku što dovodi do loma vala i pojave jake bure.

Olujnu jačinu na priobalju i otocima, osim bure, postiže i jugo. Najveća trenutna brzina vjetra od 45.0 m/s izmjerena je za vrijeme juga na meteorološkoj postaji Split Marjan u kolovozu 1969. godine. Olujno jugo se javlja u situacijama s dubokim ciklonama koje se gibaju od Atlantika ka zapadnom Mediteranu gdje na njih utječu priobalni planinski lanci što dovodi do postupnog jačanja juga nad Jadranom (npr. Jurčec i sur., 1996). Nagli porast brzine vjetra,

međutim, uzrokuju procesi razmjera manjih od sinoptičkih, kao što su mezoskalne ciklone i prolasci fronti (Ivančan-Picek i sur., 2006). Dubina sloja jugoistočnog strujanja ne prelazi 2 km u visinu. Iznad tog sloja prevladava jugozapadno strujanje na prednjoj strani visinske doline. (Sl. 1.6)



Slika 1.6. Srednja geopotencijalna visina (m) izobarne plohe 500 hPa (lijevo) i srednji tlak zraka na razini mora (hPa) i vektori prizemnog vjetra (desno) u tipičnoj situaciji s jugom 3-6. 12. 1987. (preuzeto iz Heimann, 2001).

U unutrašnjosti Hrvatske maksimalne zabilježene brzine vjetra znatno su manje nego na obali i priobalju. Ipak, trenutne brzine vjetra i tu mogu biti veće od 39 m/s. Tako je u lipnju 2004. godine na postaji u Varaždinu izmjereno 39.5 m/s. Dva su osnovna tipa vremenskih situacija u kojima je zabilježen olujni vjetar u kontinentalnom dijelu zemlje. Prvi su situacije s pojavom ljetnih olujnih grmljavinskih nevremena karakterizirane oblacima jakog vertikalnog razvoja u uvjetima prefrontalne nestabilnosti (Strelec Mahović i sur., 2007). Drugi tip situacija praćenih olujnim vjetrom su prodori hladnog zraka iz sjevernih smjerova (NW-N-NE) (Bajić, 1984). Frontalni poremećaji koji dolaze sa zapada ili sjeverozapada dijelom budu blokirani Alpama u donjoj troposferi ispod sloja temperaturne inverzije. To uzrokuje da hladni zrak zaobilazi planinsku prepreku i na područje kontinentalne Hrvatske dolazi kao jaki prodor hladnog zraka sa sjevera ili sjeveroistoka (Bajić, 1987; Bajić, 1992) koji na priobalju i otocima uzrokuje olujnu buru (npr. Bajić, 1988).

1.2. Interpolacija brzine vjetra na područja bez mjerenja

Velika prostorna i vremenska promjenjivost brzine vjetra i različiti mehanizmi nastanka olujnog vjetra na pojedinim područjima Hrvatske uzrok su velike prostorne i vremenske promjenjivosti ekstremnih brzina vjetra koje možemo očekivati na nekoj lokaciji. U slučaju kada se radi o potrebi za poznavanjem očekivane maksimalne brzine vjetra na lokaciji s dugogodišnjim nizom podataka mjerenja smjera i brzine vjetra procjena očekivanog maksimuma svodi se na primjenu teorije ekstrema (Coles, 2001) na izmjerene podatke. Međutim, kada se ukaže potreba za poznavanjem očekivane ekstremne brzine vjetra na području bez mjerenja nužno je koristiti metode interpolacije. Interpoliranje brzine i smjera vjetra na područja bez mjerenja provodi se dvjema osnovnim metodama.

U zemljama s gustom mrežom mjernih postaja to su statističke metode. Tako se, na primjer, metoda korištena u Njemačkoj (Kasperski, 2002) zasniva na grupiranju postaja sa sličnom klimom vjetra kojima se dodjeljuje ista razdioba ekstrema i ista maksimalna očekivana brzina vjetra. Pri tome pojedinu klimu vjetra čine isti tipovi vremenskih situacija s ekstremnim brzinama vjetra i statistički slične razdiobe ekstremnih brzina vjetra. Veliki broj mjernih postaja omogućio je korištenje statističkih metoda interpolacije i u Francuskoj (Sacr   i sur., 2007) gdje su osnovne brzine vjetra dobivene za svaku lokaciju s mjerenjima interpolirane na područja bez mjerenja koristeći GIS (Geografski Informacijski sustav).

Statističke metode na područjima kompleksne orografije nešto su slo  ženije. Vrhovi planina, doline, prijevoji, granica kopno-more i ostale nepravilnosti terena zna  čajno utječu na strujanje. Posljedica su izraženi prostorni diskontinuiteti brzine vjetra koji čine interpolaciju vrlo slo  ženom. Ipak, razvijeno je nekoliko metoda za interpolaciju i regionalizaciju brzine vjetra nad slo  ženim terenom (Porch i Rodr  guez, 1987; Palomino i Martin, 1995; Nielsen, 1999; Schaffner i sur., 2006). Osnovu tih metoda čine mnogobrojni faktori korekcije koji se odnose na topografiju (nagib terena, nadmorska visina, vrsta krajolika) koji se dodaju brzini vjetra kako bi se omogućila interpolacija mjerenih podataka na područja bez mjerenja. Tako je, na primjer, u Švicarskoj (Etienne i sur., 2010) kori  šten regresijski model GAM (*generalized additive model*, Hastie i Tibahirani, 1990)   ija je osnovna pretpostavka da je lokalni odnos brzine vjetra i karakteristika

okolnog terena statistički značajniji od odnosa s mjerenjima na drugoj udaljenijoj meteorološkoj postaji. Ta je statistička metoda korištena u svrhu regionalizacije meteoroloških podataka koristeći GIS slojeve koji opisuju topografske i krajobrazne značajke pojedinog područja. Geostatističko interpoliranje podataka na područja bez mjerenja korištena je i u izradi Atlasa klime Hrvatske (Zaninović i sur., 2008). Korištena metoda kroz regresiju uključuje korelaciju s ekološkim prediktorima, a preko kriging metode interpolacije (Oliver i Webster, 1990) prostornu autokorelaciju samih ciljanih varijabli (Perčec Tadić, 2010).

Druga metoda korištena za interpolaciju očekivanih maksimalnih brzina vjetra na područje bez mjerenja zasniva se na podacima numeričkog modela atmosfere i koristi se kada područje od interesa nije dovoljno pokriveno mjerenim postajama. Svaki operativni model atmosfere temelji se na numeričkoj integraciji osnovnih jednadžbi dinamičke meteorologije (npr. Šinik i Grisogono, 2008) i to:

- a) jednadžba gibanja koja kaže da je ukupna akceleracija česti fluida jednaka zbroju sila koje djeluju na čest glasi

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -2\vec{\Omega} \times \vec{V} - g\vec{k} - \frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{1}{\rho}\vec{F} \quad (1.1)$$

gdje je $\vec{V}$ trodimenzionalni vektor brzine vjetra (m/s), $\vec{\Omega}$ je vektor kutne brzine Zemljine rotacije (1/s), $\vec{k}$ je jedinični vektor usmjeren prema gore i okomit na Zemljinu površinu, ρ je gustoća zraka (kg/m³), p je tlak zraka (Pa), g akceleracija sile teže (m/s²) i $\vec{F}$ je sila trenja po jedinici volumena (N/m³). Zanemarivanje vertikalne akceleracije dovodi do hidrostatičke aproksimacije pa se vertikalna komponenta jednadžbe gibanja svodi na:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (1.2);$$

- b) jednadžba kontinuiteta izražava načelo očuvanja mase u fluidu

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1.3)$$

a varijable imaju jednako značenje kao u (1.1);

c) prvi zakon termodinamike iskazuje očuvanje energije termodinamičkog sustava

$$\frac{dQ}{dt} = C_p \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} \quad (1.4)$$

Q je ukupna toplina sustava (J), C_p je specifična toplina plina pri konstantnom tlaku (J/kg K), T je temperatura zraka (K);

d) jednadžba stanja plina

$$p = \rho RT \quad (1.5)$$

$R=287$ J/kgK je plinska konstanta za suhi zrak, a ostale varijable su iste kao u (1.4).

Atmosfersko modeliranje zahtijeva odabir skale modeliranja, tj. prostornog koraka mreže i vremenskog koraka. Svi fenomeni manjih dimenzija od prostornog koraka mreže i brži od vremenskog koraka tretiraju se kao podmrežni (*subgrid*) i njihovi se učinci parametriziraju, tj. procjenjuju na osnovi informacija s veće skale.

Izračun numeričkog modela atmosfere kao rezultat daje vrijednosti meteoroloških varijabli u mreži točaka modela. Koristeći duge nizove modeliranih brzina i smjerova vjetra za svaku se točku mreže mogu proračunati očekivane ekstremne brzine vjetra koje se onda prostorno prikazuju kao i svaki drugi izlazni rezultat modela. Tako je za procjenu očekivanih maksimalnih brzina vjetra na području Europe korišten njemački regionalni klimatski model REMO (Kunz i sur., 2010). REMO je hidrostatički model temeljen na operativnom numeričkom modelu njemačke nacionalne meteorološke službe (Majewski, 1991). Rezultati primjene tog modela za proračun 10-godišnjeg niza brzine vjetra na mreži točaka 10 km horizontalne rezolucije pokazali su da model sustavno podcjenjuje očekivane maksimalne brzine vjetra za 10-30% u odnosu na očekivane brzine dobivene na temelju mjerenja. Slične rezultate dobili su i Schaffner i sur. (2006) izrađujući kartu vjetra za područje Alpa. Ovakvo značajno podcjenjivanje modela autori pripisuju prvenstveno slabosti parametrizacije turbulentnih procesa u modelu. Usprkos nedostacima, korištenje numeričkog modela atmosfere za potrebe procjene očekivane brzine vjetra na područjima bez mjerenja jedino daje realnu prostornu promjenjivost očekivane brzine vjetra na mreži točaka horizontalne razlučivosti 10 km ili manjoj.

1.3. Djelovanje vjetra na građevinske konstrukcije

Djelovanje vjetra, uz djelovanje potresa, čini dominantno horizontalno djelovanje kojem su izloženi građevinski objekti u svom vijeku trajanja. Posebni značaj ovog djelovanja je što je ono promjenjivo u vremenu, a po intenzitetu varira i ovisi o meteorološkim karakteristikama pojedinog područja, te se ne može unificirati. Velikom broju građevinara pri projektiranju jedini kontakt s informacijama o proračunu opterećenja građevinskih konstrukcija vjetrom su postojeći standardi, odnosno norme. Iako se ti standardi zasnivaju na opsežnim istraživanjima, oni nužno, zbog zahtjeva praktične primjene, pojednostavljaju modele proračuna opterećenja vjetrom. Proces globalizacije ima kao posljedicu i nastojanje da se broj postojećih standarda za proračun opterećenja vjetrom smanji, te da se postigne ujednačenost u njihovom sadržaju i formatu. Prihvatanje europskih normi za projektiranje konstrukcija Hrvatska je prihvatila i načelo da u pojedine norme ugradi nacionalne specifičnosti koje se prvenstveno odnose na prirodne pojave (vjetar, potres, snijeg, temperatura zraka i td.) tj. da izradi posebne nacionalne dodatke za pojedinu normu koji sadrže sve nacionalno određene parametre koji će se upotrebljavati pri projektiranju zgrada i inženjerskih građevina koje se grade u odgovarajućoj zemlji. Jedan od takvih parametara je i očekivana maksimalna brzina vjetra. Poznavanje najvećih brzina vjetra koje možemo očekivati u nekom povratnom periodu naročito je značajno kao projektni parametar u izgradnji nadzemnih građevina, prije svega zbog sve brojnijih i složenijih visokih objekata koji se grade (tornjeva, vjetroagregata, dalekovodnih stupova), a i značajnog ekonomskog efekta što ga podaci o projektnim brzinama vjetra imaju u ukupnoj cijeni objekta.

Problematika analize brzine i smjera vjetra za potrebe proračuna opterećenja vjetrom naglašena je u Hrvatskoj još 1985. godine (Poje, 1985). Rezultati tog i kasnijih istraživanja iste problematike (Peroš, 1998; Peroš i Boko, 2000a, 2000b; Peroš i sur., 2003) pokazali su da primjena postojećih standarda preuzetih iz bivše države (JUS U.C7.110; 1991) ne daje realno opterećenje vjetrom i da je nužno provesti dodatna istraživanja u svrhu ocjene opterećenja građevinskih konstrukcija vjetrom na području čitave Hrvatske. Prvi koraci u tom smjeru provedeni su u proteklih nekoliko godina i

zasnivali su se na analizi raspoloživih podataka mjerenja smjera i brzine vjetra do kraja 2002. godine (Bajić i sur., 2001, Bajić i Peroš, 2001; Bajić, 2004, Bajić i Peroš, 2005). Spomenuta istraživanja rezultirala su procjenom osnovne brzine vjetra na lokacijama s mjerenjima. Pri tome je osnovna brzina vjetra definirana je kao maksimalna 10-minutna brzina vjetra na visini 10 m iznad ravnog tla pokrivenog travom ili niskim raslinjem koja se može očekivati jednom u 50 godina. Jedan od značajnih problema na koji su dosadašnja istraživanja osnovne brzine vjetra ukazala je problem prostorne pokrivenosti Republike Hrvatske dugim nizovima mjerenja smjera i brzine vjetra koja se pokazala nedovoljnom za izradu pouzdane prostorne raspodjele ovog meteorološkog elementa. Stoga je istraživanje nastavljeno u smjeru pronalaženja adekvatnih metoda za izradu prostorne raspodjele osnovne brzine vjetra. Rezultat tih istraživanja je i ova disertacija.

Kako se osnovna brzina vjetra odnosi na maksimalnu očekivanu 10-minutnu brzinu vjetra, tlak kojim vjetar osnovne brzine djeluje na građevinsku konstrukciju ukazuje na opterećenje vjetrom u vremenskom intervalu od tih 10-minuta ili na tzv. statičko opterećenje. Međutim, brzina vjetra u 10-minutnom intervalu može značajno varirati. To je posebno izraženo u slučaju mahovitog, turbulentnog vjetra kao što je bura (opisano u prethodnom poglavlju). Vjetar velike mahovitosti i intenziteta turbulencije može uzrokovati rezonantni dinamički odgovor građevinske konstrukcije ili dijelova konstrukcije s prirodnom frekvencijom i manjom od 1 Hz (npr. Holmes, 2001) što kao posljedicu ima rušenje ili oštećenje konstrukcije ili njenih dijelova. Opterećenje konstrukcije zbog promjenjive, turbulentne komponente brzine vjetra predstavlja tzv. dinamičko opterećenje i ono je to veće što je intenzitet turbulencije veći. Stoga je pri procjeni djelovanja vjetra na konstrukcije nužno uzeti u obzir obje komponente opterećenja (statičko i dinamičko) kako bi parametri korišteni pri projektiranju osigurali izgradnju stabilne konstrukcije otporne na djelovanje vjetra.

1.4. Cilj i sadržaj rada

Cilj ovog rada je izrada prostorne raspodjele maksimalne očekivane brzine vjetra na složenom terenu Hrvatske. Ovisno o iznosu te brzine definirat će se zone opterećenja vjetrom koje predstavljaju osnovni kriterij za odabir projektnih parametara pri izgradnji građevinskih konstrukcija. U svrhu ostvarenja tog cilja bilo je potrebno odgovoriti na sljedeća pitanja:

- 1) Koju metodu procjene očekivanih maksimalnih brzina vjetra koristiti u slučaju kada raspoložemo kratkim nizovima podataka?
- 2) Da li je broj i položaj meteoroloških postaja s raspoloživim mjerenjima smjera i brzine vjetra u Hrvatskoj dovoljan za opravdano korištenje statističkih metoda interpolacije osnovne brzine vjetra na područja bez mjerenja?
- 3) Da li je opravdano koristiti rezultate izračuna brzine vjetra numeričkim modelom atmosfere u svrhu procjene očekivanih ekstremnih brzina vjetra na područjima bez mjerenja?
- 4) Koji je doprinos turbulentne komponente vjetra (dinamičkog opterećenja) ukupnom opterećenju građevinskih konstrukcija vjetrom?

Odgovor na ova pitanja bit će dan u poglavljima koje slijedi. U Poglavlju 2 opisane su metode proračuna očekivanih maksimalnih brzina vjetra. Poglavlje 3 sadrži prikaz raspoloživih podataka mjerenja smjera i brzine vjetra i klimatskih značajki ekstremnih brzina vjetra na lokacijama meteoroloških postaja. Problem nedovoljne prostorne pokrivenosti dugim nizovima mjerenih vrijednosti rješavat će se u Poglavlju 4 koristeći numerički model atmosfere za ograničenu domenu ALADIN. Kako je specifičnost klime hrvatskog priobalja i otoka česta olujna bura znatnog intenziteta turbulencije, u zadnjem će se poglavlju diskutirati doprinos varirajuće komponente brzine vjetra ukupnom opterećenju konstrukcije.

2. METODE PROCJENE OČEKIVANE MAKSIMALNE BRZINE VJETRA I ODABIRA EKSTREMA

2.1. Opća Pareto razdioba

Proračun očekivane maksimalne brzine vjetra temelji se na primjeni teorije ekstrema. Klasična teorija ekstrema zasniva se na tome da se nizu od n nezavisnih i ravnomjerno raspoređenih maksimalnih vrijednosti (za veliki N) može pridijeliti tzv. opća razdioba ekstrema (GEV – *Generalized Extreme Value*) (Jenkinson, 1955) kumulativne funkcije razdiobe $F(x)$:

$$F(x) = \exp \left[-(1 - ky)^{1/k} \right], \text{ za } k \neq 0, \quad (2.1.a)$$

$$F(x) = \exp[-\exp(y)], \text{ za } k=0 \quad (2.1.b)$$

gdje je k parametar oblika koji određuje tip razdiobe. Standardizirana varijata y dana je s:

$$y = \frac{x - \beta}{\alpha} \quad (2.2)$$

gdje je β parametar lokacije (mod razdiobe ekstremnih vrijednosti), α je parametar skale (raspršenje).

Za kvantil X_T s povratnim periodom T_y kumulativna vjerojatnost dana je s:

$$X_{T_y} = 1 - \frac{1}{T_y}. \quad (2.3)$$

Kombiniranjem (2.1) i (2.2) dobijemo izraz za očekivani maksimum varijable x za povratni period T_y :

$$X_T = \beta + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T_y} \right) \right]^k \right\}, \text{ za } k \neq 0, \quad (2.4.a)$$

$$X_T = \beta - \alpha \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T_y} \right) \right], \text{ za } k=0. \quad (2.4.b)$$

Uobičajeno je da se opća razdioba ekstrema primjenjuje na godišnjim maksimalnim vrijednostima u slučaju kada raspoložemo dugim nizovima podataka. Da bi rezultati takve procjene ekstrema bili pouzdani, Cook (1982) pokazuje da se metoda može primjenjivati na nizu podataka dugom najmanje 10 godina. To je potvrđeno i u radu Palutikof i sur. (1999) i vrijedi za primjenu teorije ekstrema na podatke maksimalnih brzina vjetra bez obzira na mehanizam nastanka ekstrema i klimu vjetra na koju se oni odnose. U praksi su, međutim, raspoloživi nizovi podataka brzine vjetra obično kraći. U tom je slučaju najčešće korištena metoda procjene očekivanih ekstrema metoda premašaja granične vrijednosti (POT – *Peak Over Threshold*). Pri tom se za opisivanje ponašanja događaja koji premašuju neku zadanu vrijednost koristi tzv. opća Pareto razdioba (GPD - *General Pareto Distribution*) (Palutikof i sur., 1999). Kao i opća razdioba ekstrema, Pareto razdioba definirana je parametrom oblika (k) i parametrom skale (α). Osnovni uvjet koji mora biti ispunjen da bi se opća Pareto razdioba mogla primijeniti je da je za dovoljno veliku graničnu vrijednost broj slučajeva koji ju premašuju mali i raspodijeljen po Poissonovoj razdiobi. Kumulativna funkcija opće Pareto razdiobe glasi:

$$F(x) = 1 - \left[1 - \frac{k}{\alpha}(x - \xi) \right]^{1/k}, \text{ za } k \neq 0 \quad (2.5.a)$$

$$F(x) = 1 - \exp \left[-\frac{(x-\xi)}{\alpha} \right], \text{ za } k=0 \quad (2.5.b)$$

gdje je ξ odabrana granična vrijednost, tj $x-\xi$ je premašaj granične vrijednosti, α je parametar skale i k parametar oblika. Tada je X_{T_y} jednako:

$$X_{T_y} = \xi + \frac{\alpha}{k} \left[1 - (\tau T_y)^{-k} \right] \text{ za } k \neq 0 \quad (2.6.a)$$

$$X_{T_y} = \xi + \alpha \ln(\tau T_y) \text{ za } k=0 \quad (2.6.b)$$

gdje je τ prosječni broj premašaja granične vrijednosti ξ po godini, odnosno omjer broja premašaja N i broja godina M s podacima $\tau = N/M$ uz N broj premašaja i M broj godina.

Tri su osnovne metode procjene parametara opće Pareto razdiobe: metoda otežanih momenata (PWM – *Probability Weighted Moments*), metoda maksimalne vjerojatnosti (ML - *Maximum Likelihood*) i metoda uvjetnog srednjeg premašaja (CME – *Conditional Mean Exceedance*).

Metoda otežanih momenata

Ako su $x_1, \dots, x_N$ N premašaja granične vrijednosti ξ , parametri α i k opće Pareto razdiobe mogu se procijeniti iz prva dva momenta razdiobe b_0 i b_1 :

$$k = \frac{b_0}{b_0 - 2b_1} - 2 \quad (2.7.a)$$

$$\alpha = \frac{2b_0b_1}{b_0 - 2b_1} \quad (2.7.b)$$

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.7.c)$$

$$b_1 = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{(N-1)x_i}{N(N-1)}. \quad (2.7.d)$$

Ova metoda vrijedi za $-0.5 < k < 0.5$.

Metoda maksimalne vjerojatnosti

U slučaju metode maksimalne vjerojatnosti logaritamska funkcija vjerojatnosti ima oblik:

$$L = -N \log \alpha - (1 + 1/k) \sum_{i=1}^N \log \left[1 + \frac{k(x_i - \xi)}{\alpha} \right], \text{ za } k \neq 0 \quad (2.8.a)$$

$$L = -N \log \alpha - \alpha^{-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \xi), \text{ za } k=0 \quad (2.8.b)$$

gdje simboli imaju isto značenje kao u (2.5).

Jednadžbe za procjenu parametara α i k opće Pareto razdiobe u ovom slučaju glase:

$$\frac{\partial L}{\partial k} = \frac{\sum_{i=1}^N \log \left[1 - \frac{k(x_i - \xi)}{\alpha} \right]}{k^2} + \frac{(1-k) \sum_{i=1}^N \frac{x_i - \xi}{\alpha \left[1 - \frac{k(x_i - \xi)}{\alpha} \right]}}{k} = 0 \quad (2.8.c)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha} = \frac{N}{\alpha} - \frac{(1-k) \sum_{i=1}^N \frac{k(x_i - \xi)}{\alpha^2 \left(1 - \frac{k(x_i - \xi)}{\alpha} \right)}}{k} = 0 \quad (2.8.d)$$

Kao procjena parametra ξ uzima se najmanja vrijednost x_i u nizu ulaznih N ekstrema.

Metoda uvjetnog srednjeg premašaja

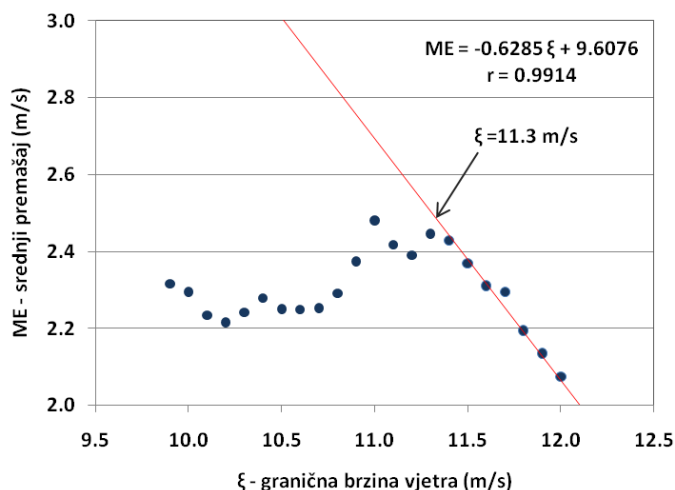
Ova se metoda sastoji od analize srednjeg premašaja granične vrijednosti (ME) u ovisnosti o samoj graničnoj vrijednosti (ξ). Ukoliko je taj odnos linearan, premašajima granične vrijednosti može se uspješno pridijeliti opća Pareto razdioba. Na primjeru danom na Slici 2.1 možemo uočiti da odnos srednjeg premašaja granične brzine vjetra i same granične brzine postaje linearan za $\xi > 11.3$ m/s. To znači da brzinama vjetra većim od 11.3 m/s možemo pridijeliti opću Pareto razdiobu čiji se parametri mogu procijeniti na osnovi jednadžbe dobivenog pravca regresije. Naime, ako je pravac regresije srednjeg premašaja (ME) i granične brzine vjetra (ξ) dan s

$$ME = A \xi + B \quad (2.9.a)$$

gdje su A i B koeficijenti u jednadžbi pravca, onda se parametri opće Pareto razdiobe α i k mogu izračunati iz

$$k = \frac{-A}{(1+A)} \quad (2.9.b)$$

$$\alpha = B \left(1 - \frac{A}{2}\right). \quad (2.9.c)$$



Slika 2.1. Odnos granične brzine vjetra (ξ) i srednjeg premašaja (ME) na meteorološkoj postaji u Novalji u razdoblju 2005-2009. godina. Granična vrijednost nakon koje je odnos ξ i ME linearan iznosi 11.3 m/s. Jednadžba pravca regresije (crvena linija) dana je desno gore, a r je koeficijent korelacije granične vrijednosti brzine vjetra i srednjeg premašaja za $\xi > 11.3$ m/s.

Točnost procjene parametara razdiobe izražava se standardnom pogreškom SE (Wilks, 2006; Abild i sur., 1992). Uspješnost pridjeljivanja opće Pareto razdiobe izmjerenim ekstremima pokazuje nam i koeficijent efikasnosti pridjeljivanja razdiobe CE (An i Pandey, 2005):

$$CE = \frac{\sum_{i=1}^N (V_{MJE_i} - \bar{V}_{MJE})^2 - \sum_{i=1}^N (V_{PRO_i} - V_{MJE_i})^2}{\sum_{i=1}^N (V_{MJE_i} - \bar{V}_{MJE})^2} \quad (2.10)$$

gdje je V_{MJE} izmjerena brzina vjetra, V_{PRO} brzina vjetra procijenjena koristeći opću Pareto razdiobu, a $\bar{V}_{MJE}$ srednja izmjerena brzina vjetra. Koeficijent efikasnosti CE ukazuje na pogrešku relativno u odnosu na varijabilnost izmjerenih vrijednosti. Ako je $CE=1$, nema pogreške u procjeni parametara opće Pareto razdiobe.

Tablica 2.1. Procjene parametara opće Pareto razdiobe (GPD) ekstremnih brzina vjetra metodama otežanih momenata (PWM), maksimalne vjerojatnosti (ML) i srednjeg uvjetnog premašaja (CME) za Gradište i Novalju.

		ξ	N	α	SE(α)	k	SE(k)	V_{50} (m/s)	SE (V_{50}) (m/s)	CE
Gradište	PWM	9.4	56	2.305	0.286	0.182	0.093	18.1	1.99	0.998
	ML	9.4	56	2.205	0.263	0.169	0.089	18.0	1.93	0.998
	CME	9.4	56	3.547	0.645	0.345	0.152	18.5	2.54	0.960
Novalja	PWM	11.4	57	3.616	0.644	0.174	0.129	25.3	3.07	0.946
	ML	11.4	57	2.852	0.409	0.168	0.104	24.5	2.91	0.944
	CME	11.4	57	5.900	1.637	0.386	0.237	25.4	5.01	0.932

Legenda:

ξ - granična vrijednost brzine vjetra,

N – broj podataka (ulaznih ekstremnih brzina vjetra koje premašuju graničnu vrijednost iznosa brzine),

α - je parametar skale GPD,

β - parametar lokacije GPD,

k - parametar oblika GPD,

SE – standardna pogreška,

CE – koeficijent efikasnosti pridjeljivanja razdiobe,

V_{50} – maksimalna očekivana brzina vjetra za povratni period od 50 godina.

Procjena očekivane maksimalne brzine vjetra na primjeru dviju lokacija u Hrvatskoj (kopnene i otočne) daje nešto manje vrijednosti očekivane maksimalne brzine vjetra dobivene metodom

maksimalne vjerojatnosti u odnosu na druge dvije metode (Tablica 2.1). Uz to koeficijent efikasnosti pridjeljivanja razdiobe metodom otežanih momenata i maksimalne vjerojatnosti vrlo malo se razlikuju. Budući da je metoda maksimalne vjerojatnosti znatno računalno zahtjevnija, procjena očekivanih maksimalnih 10-minutnih brzina vjetra u ovom radu zasnivat će se na korištenju metode otežanih momenata za procjenu parametara opće Pareto razdiobe. Opravdanost ovog izbora potvrđuju i rezultati istraživanja nekoliko autora (npr. Hoskins i Wallis, 1987; Brabson i Palutikof, 2000) koji pokazuju da, iako je metoda maksimalne vjerojatnosti asimptotski najuspješnija metoda, metoda otežanih momenata daje bolje rezultate za kratke nizove podataka.

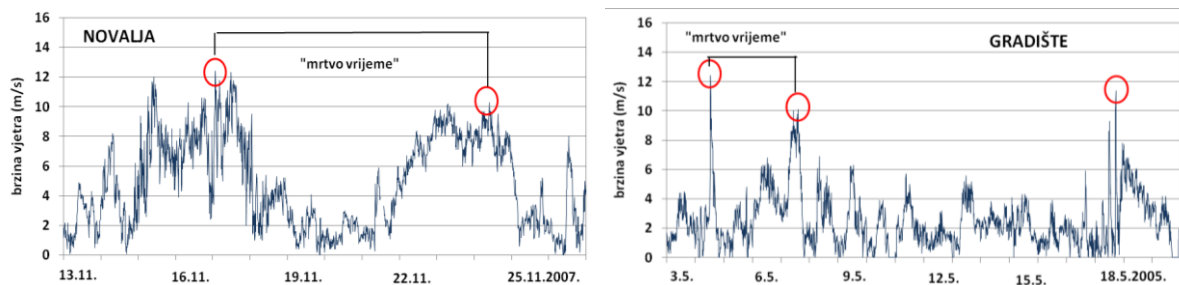
2.2. Metoda odabira ekstremnih brzina vjetra

Osnovni uvjet za analizu ekstremnih vrijednosti je da su odabrani ekstremi međusobno nezavisni (raspodijeljeni po Poissonovoj razdiobi). U slučaju dovoljno dugog niza mjerenih podataka uobičajeno je da se za procjenu očekivanih ekstrema odabire jedna najveća vrijednost godišnje. Tako odabrani ekstremi su sigurno nezavisni. Međutim, u jednoj se godini može pojaviti nekoliko situacija u kojima je brzina vjetra veća od godišnjeg ekstrema u drugim godinama. Kako bi rezultati analize ekstrema bili reprezentativni, nužno je i takve slučajeve uključiti u proračun. Ipak, kada se iz svake godine uzima nekoliko ekstremnih vrijednosti postoji opasnost da se odaberu ekstremi iz istog olujnom nevremena što ih čini statistički zavisnim. Da bi se izbjegao odabir zavisnih ekstremnih vrijednosti brzine vjetra, razvijeno je više metoda. Najčešće korištena metoda je metoda nezavisnih oluja (MIS – *Method of Independent Storms*) u kojoj se određuje minimalno vrijeme koje mora proći između odabranih ekstrema ili tzv. „mrtvo vrijeme“ (Harris, 1999). Za klimu Europe najčešće korišteno „mrtvo vrijeme“ je 48 sati (Brabson i Palutikof, 2000; Gusella, 1991). Stoga će se i ovdje koristiti minimalni 48-satni razmak između dva odabrana nezavisna ekstrema. Ispravnost te odluke potvrđuje i pregled raspoloživih vremenskih nizova mjerenih podataka (Sl. 2.2).

Druga veličina koja definira odabir ulaznih podataka za analizu ekstrema je granična vrijednost brzine vjetra (ξ) koju ekstrem mora premašiti. Veći broj ulaznih ekstremnih vrijednosti daje pouzdanije procjene očekivanih maksimalnih brzina vjetra. Gledano

statistički to je tako jer je standardna pogreška procjene obrnuto proporcionalna veličini uzorka. Meteorološki gledano, poželjno je da se procjenom obuhvati sva varijabilnost ekstrema. Pokazano je da ξ koja dovodi do odabira prosječno 10 ekstrema po godini daje pouzdanu procjenu očekivanih maksimuma za 50-godišnji povratni period (Cook, 1985). Jedna od metoda za odabir granične vrijednosti brzine vjetra je metoda uvjetovanog srednjeg premašaja opisana u prethodnom poglavlju. Koristeći metodu uvjetnog premašaja za određivanje granične brzine vjetra na nizu mjerenih 10-minutnih podataka u razdoblju 2005-2009. godina granična vrijednost brzine vjetra na meteorološkoj postaji Novalja je 11.3 m/s (Sl. 2.1). Odabir te granične brzine vjetra doveo je do ulaznog niza ekstrema od 67 podataka, odnosno u prosjeku 13-14 po godini što odgovara već spomenutim preporučenim vrijednostima.

Dakle, procjena očekivanih maksimalnih 10-minutnih brzina vjetra koja slijedi zasnivat će se na korištenju metode uvjetnog premašaja za određivanje granične brzine vjetra i metode otežanih momenata za procjenu parametara opće Pareto razdiobe.



Slika 2.2. Hod 10-minutne brzine vjetra na meteorološkim postajama Novalja za razdoblje 13-25. 11. 2007. i Gradište za razdoblje 1-18. 5. 2005. Crvene elipse označavaju nezavisne ekstreme brzine vjetra (nezavisne oluje), a razmak između njih označen je kao „mrtvo vrijeme“.

3. IZMJERENE I OČEKIVANE MAKSIMALNE BRZINE VJETRA NA METEOROLOŠKIM POSTAJAMA

3.1. Podaci mjerenja smjera i brzine vjetra

Mjerenja smjera i brzine vjetra na području Hrvatske provode se najvećim dijelom u okviru rada mreže postaja Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ). Na tim postajama su anemometri postavljeni poštujući u maksimalno mogućoj mjeri preporuke Svjetske meteorološke organizacije (WMO, 2008). Preporuka je WMO-a da se osjetnici za mjerenje brzine i smjera vjetra postavljaju na 10 m visine iznad otvorenog prostora. Pod otvorenim prostorom podrazumijeva se područje u kojem razmak između instrumenta za mjerenje smjera i brzine vjetra i okolnih prepreka iznosi najmanje deseterostruko više od visine tih prepreka. Jedan dio mjernih sustava za mjerenje brzine i smjera vjetra vlasništvo su ustanova izvan meteorološke službe koje su imale ili imaju hitne (povremene ili stalne) i posebne potrebe za mjerenim podacima brzine i smjera vjetra. Takve postaje čine investitorsku mrežu postaja, a njihovo opsluživanje, od uspostave mjerenja do verifikacije podataka, obavlja DHMZ. Značajke mjernih sustava koji rade u osnovnoj ili investitorskoj mreži meteoroloških postaja navedene su u Tablici 3.1. Podaci s kojima raspolazemo su 10-minutne srednje brzine vjetra i prevladavajući smjer vjetra u 10-minutnom intervalu, maksimalna sekundna brzina u 10 minuta i smjer vjetra te brzine. Sustavna uspostava mjerenja impulsnim anemometrima s frekvencijom uzorkovanja 1 Hz i 10-minutnim intervalom osrednjavanja (multiprocesorski mjerni sustav μM) započela je polovinom 90-tih godina i danas DHMZ provodi kontinuirana mjerenja smjera i brzine vjetra na 60 lokacija.

Da bismo dobili što pouzdaniju i reprezentativniju procjenu očekivanih maksimalnih brzina vjetra, postaje čiji su podaci odabrani za daljnju analizu morale su zadovoljiti sljedeće uvjete:

1) mikrometeorološka homogenost

- postaja nije preseljena na novu lokaciju niti je došlo do pojave značajnijih novih prepreka strujanju (nove građevine, drveće i sl.),
- nije došlo do promjene visine mjerenja niti intervala osrednjavanja,
- mjerni instrumenti su redovito održavani i umjeravani;

2) reprezentativnost

- niz podataka dug je najmanje 5 godina (obuhvaća 2005-2009. godinu) što je najkraće razdoblje s podacima koje se preporuča za analizu ekstrema (Coles i Walshaw, 1994),
- broj nedostajućih podataka u razdoblju analize manji je od 10% uz uvjet da je u svakoj godini niza broj nedostajućih podataka manji od 20%,
- smještaj mjernog instrumenta u što većoj mjeri zadovoljava preporuke WMO-a.

Uvažavajući navedene kriterije za daljnju su obradu odabrani podaci s 25 lokacija (Tablica 3.2 i Sl. 3.1). Izborom se nastojalo uključiti što veći broj postaja koje imaju zajedničko razdoblje dugo najmanje 5 godina. Odabrano razdoblje 2005-2009. koje je zajedničko svim postajama omogućuje usporedbu rezultata analize ekstrema.

Tablica 3.1. Osnovne značajke modularnog multiprocesorskog mjernog sustava μ M.

Vrsta instrumenta	impulsni		
Mjerni sustav	μM		
BRZINA VJETRA			
Tip osjetnika	rotirajuće polulopte μmSP/DR	ultrazvučni GILL- WindObserverII	ultrazvučni VAISALA WAS425AH
Uzorkovanje	1 s	1 s	1 s
Opseg mjerenja	0.2 do 70 m/s	0.1 do 65 m/s	0.1 do 65 m/s
Razlučivost	0.1 m/s	0.1 m/s	0.1 m/s
Preciznost	0.1 m/s	0.1 m/s	0.1 m/s
Izlazni signal	impulsi	impulsi	impulsi
Konst. udaljenosti	5 m		
Osrednjavanje	10-minutno	10-minutno	10-minutno
SMJER VJETRA			
Tip osjetnika	vjetrulja 6-bitna		
Opseg mjerenja	0°–360°	0°–360°	0°–360°
Razlučivost	6°	1°	1°
Preciznost	3°	2°	2°

Tablica 3.2. Zemljopisni položaj meteoroloških postaja čiji su podaci korišteni za proračun ekstrema i razdoblje s podacima mjerenja u kojem je broj nedostajućih podataka manji od 10%.

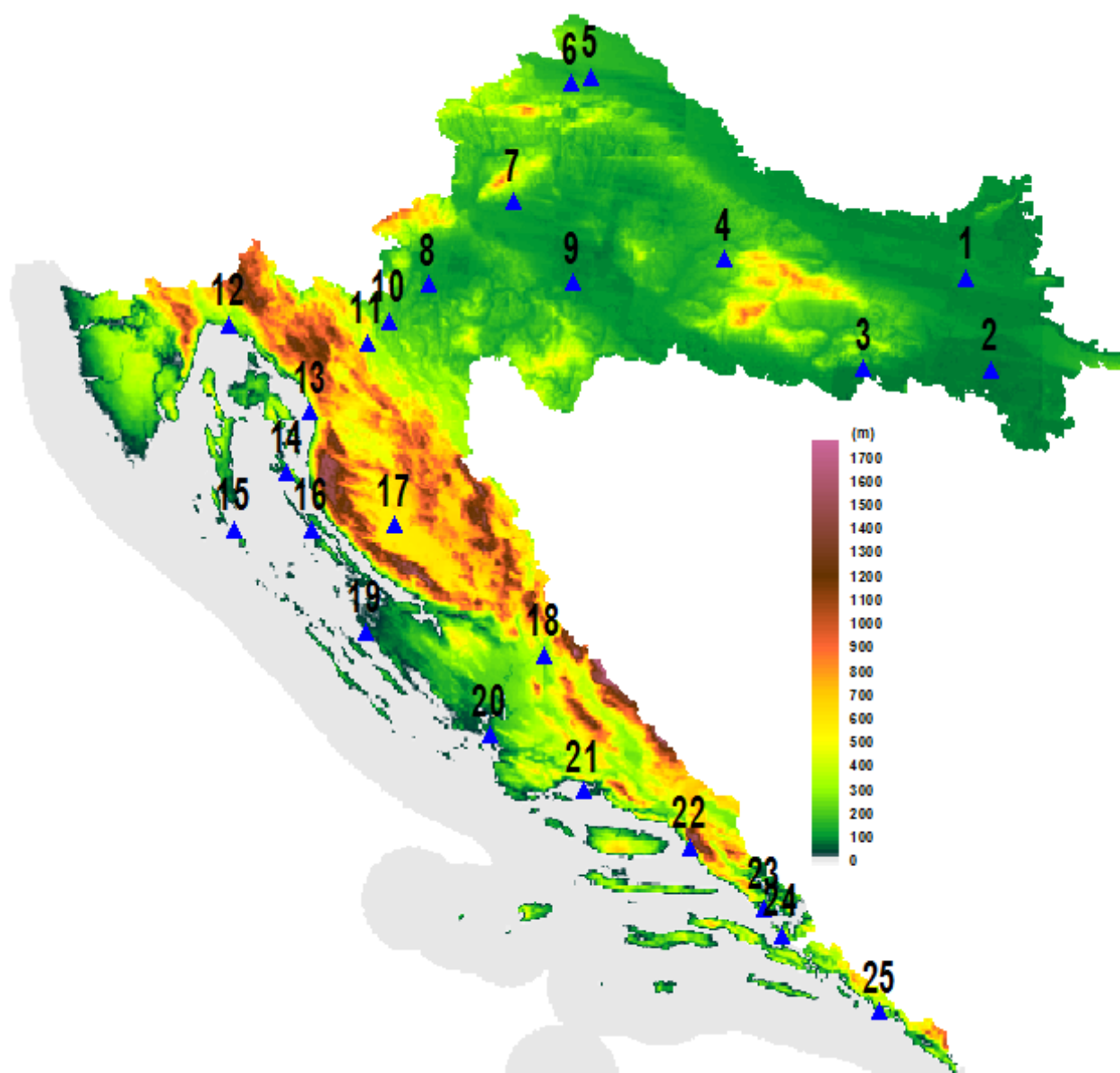
Br.	Postaja	φ	λ	h_{NM} (m)	z_a (m)	razdoblje	NP (%)	NP5 (%)
1	Osijek Čepin	45° 31' 4"	18° 34' 11"	89	10	2003-09	4.0	2.5
2	Gradište	45° 09' 33"	18° 42' 13"	97	10	2003-09	4.1	3.4
3	Sl. Brod	45° 09' 44"	17° 59' 44"	88	10	2001-09	2.0	1.8
4	Daruvar	45° 35' 29"	17° 12' 37"	161	12	2000-09	0.1	01
5	Čakovec	46° 18' 28"	16° 28' 15"	170	14	2002-09	2.5	3.6
6	Varaždin	46° 16' 55"	16° 21' 17"	167	10	2002-09	4.6	6.7
7	Zagreb-Mak.	45° 49' 20"	16° 02' 01"	123	10	2000-09	1.5	1.2
8	Karlovac	45 29' 37"	15° 33' 54"	110	10	2003-09	1.7	0.8
9	Sisak	45° 30' 00"	16° 22' 00"	98	15	2004-09	1.1	0.6
10	Gorinci	45° 21' 3"	15° 20' 33"	185	10	2005-09	2.3	2.3
11	Ogulin	45° 15' 47"	15° 13' 21"	328	10	2004-09	5.8	5.0
12	Rijeka	45° 20' 13"	14° 26' 34"	120	10	2000-09	5.5	5.8
13	Senj	44° 59' 37"	14° 54' 11"	26	10	1995-09	2.5	1.8
14	Rab	44° 45' 23"	14° 46' 18"	24	12	2004-09	3.5	8.7
15	Mali Lošinj	44° 31' 57"	14° 28' 19"	53	10	2003-09	3.7	5.0
16	Novalja	44° 32' 6"	14° 54' 22"	20	12	1996-09	6.2	6.2
17	Gospić	44° 33' 2"	15° 22' 23"	564	10	2000-09	4.6	4.2
18	Knin	44° 02' 27"	16° 12' 25"	255	10	2004-09	2.2	2.3
19	Zadar	44° 07' 48"	15° 12' 21"	5	10	2000-09	2.3	2.0
20	Šibenik	43° 43' 41"	15° 54' 23"	77	10	2004-09	1.1	0.6
21	Split-Marjan	43° 30' 30"	16° 25' 33"	122	12	2004-09	2.9	3.4
22	Makarska	43° 17' 16"	17° 01' 11"	52	15	2004-09	4.8	5.4
23	Ploče	43° 02' 52"	17° 26' 25"	2	10	2005-09	0.7	0.7
24	Komarna	42° 56' 41"	17° 32' 13"	99	10	2005-09	6.5	6.5
25	Dubrovnik	42° 38' 41"	18° 05' 06"	52	10	2001-09	6.8	6.9

Legenda:

z_a – visina anemometra (m),

NP – broj nedostajućih podataka u razdoblju s raspoloživim podacima izražen u %.

NP5 - broj nedostajućih podataka u razdoblju 2005-2009. izražen u %.



Slika 3.1. Zemljopisni položaj meteoroloških postaja čiji su podaci korišteni u ovom radu (vidi popis u Tablici 3.2). Boja označava visinu terena.

3.2. Izmjerene maksimalne brzine vjetra

Izmjerene maksimalne brzine vjetra (Tablica 3.3) potvrđuju poznatu činjenicu da jasno možemo razlikovati klimu vjetra u kontinentalnom dijelu Hrvatske od one na priobalju i otocima (Zaninović i sur., 2008). Kontinentalni dio Hrvatske karakteriziraju maksimalne 10-minutne brzine vjetra manje od 18 m/s i maksimalni udari do 40 m/s. Za razliku od toga na analiziranim lokacijama priobalja i otoka izmjerene 10-minutne brzine dosežu vrijednosti iznad 25 m/s, maksimalni udari i iznad 45 m/s. Međutim, specifični položaji mostova Pag, Krk i Maslenica u odnosu na okolnu orografiju uzrok su još većim 10-minutnim brzinama vjetra iznad 40 m/s i maksimalnim udarima iznad 60 m/s (Bajić, 2010). Usporedba maksimalne izmjerene brzine vjetra u razdoblju 2005-2009. i prije njega pokazuje da su u kontinentalnom dijelu Hrvatske veće maksimalne brzine vjetra zabilježene nakon 2005. godine, dok je u pravilu na priobalju i otocima obratno. Te razlike ne ukazuju na postojanje trenda maksimalne brzine vjetra jer se radi o jednom podatku najveće vrijednosti brzine vjetra za svako promatrano razdoblje.

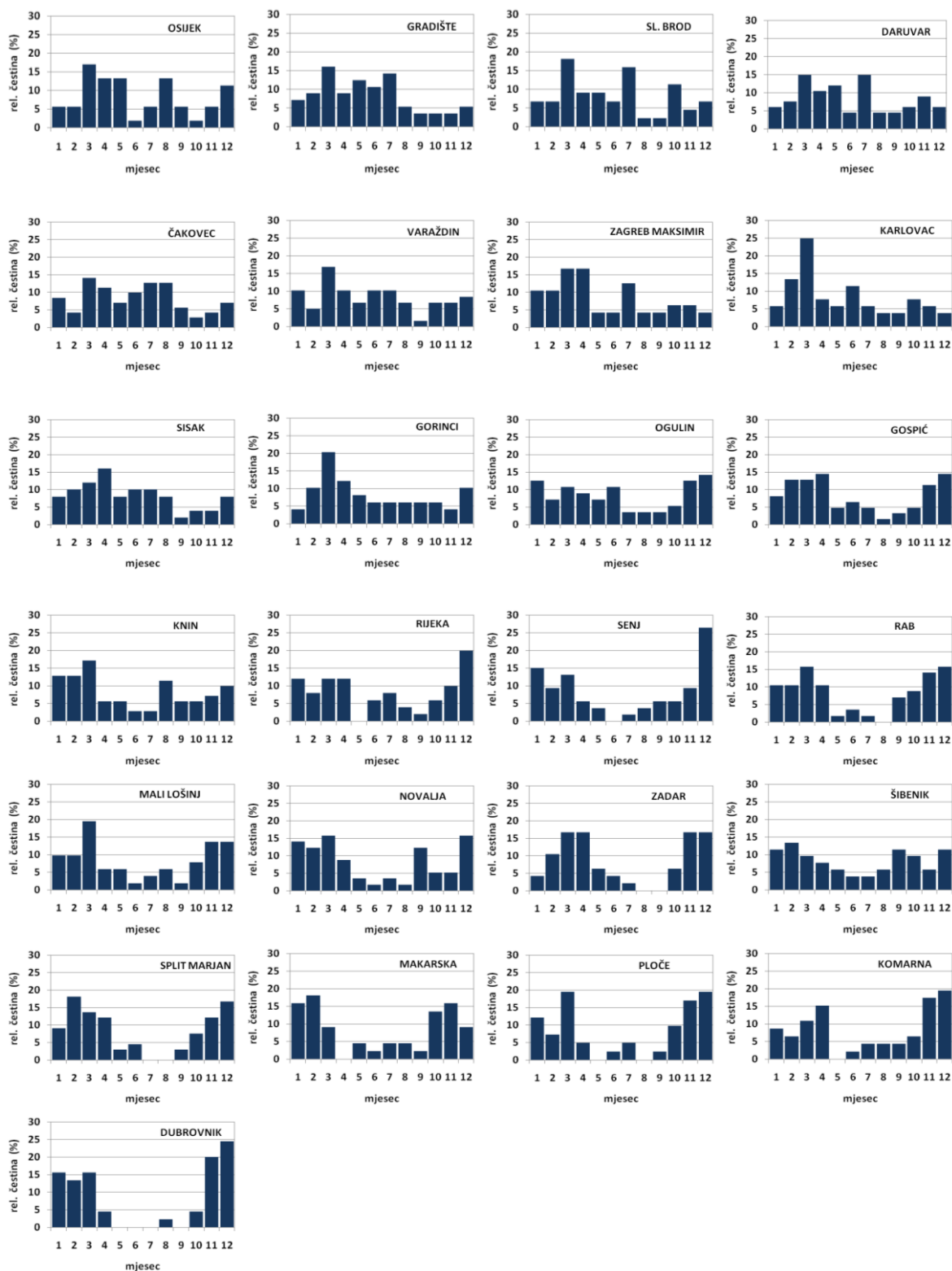
Za bolji uvid u značajke pojavljivanja vjetra velike brzine analizirani su smjer i brzina ekstremnog vjetra, tj. podaci odabrani za proračun očekivanih maksimalnih brzina vjetra. Pri tom ekstremnim vjetrom smatramo vjetar čija brzina prelazi graničnu vrijednost određenu metodom uvjetnog srednjeg premašaja opisanom u Poglavlju 2, a odabrani ekstremi su međusobno nezavisni (Tablica 3.3).

U kontinentalnom dijelu, u kojem uglavnom prevladava slab do umjeren vjetar promjenljivog smjera, ekstremne brzine se javljaju najčešće uz prolazak frontalnih poremećaja iz W-NW smjerova u proljetnim mjesecima što potvrđuje razdioba čestina smjera ekstremnog vjetra (Sl. 3.2) i učestalost vjetra ekstremne brzine tijekom godine (Sl. 3.3). Vjetar olujne jačine na priobalju i otocima najčešće je bura ili jugo, a pojavljuje se uglavnom zimi i u proljeće. Specifični položaj mjerne postaje u odnosu na okolnu razvedenost terena može uzrokovati razlike u smjeru ekstremnog vjetra na relativno malo udaljenim postajama. Tako frontalni poremećaji koji dolaze sa sjeverozapada ponekad budu blokirani Alpama i zaobilazeći ih sa sjeverne strane dolaze na područje sjeverozapadne Hrvatske iz N-NE smjera, a u istočnoj Hrvatskoj, gdje se taj utjecaj gubi, bilježimo vjetar NW smjera. Na priobalju i otocima, pak,

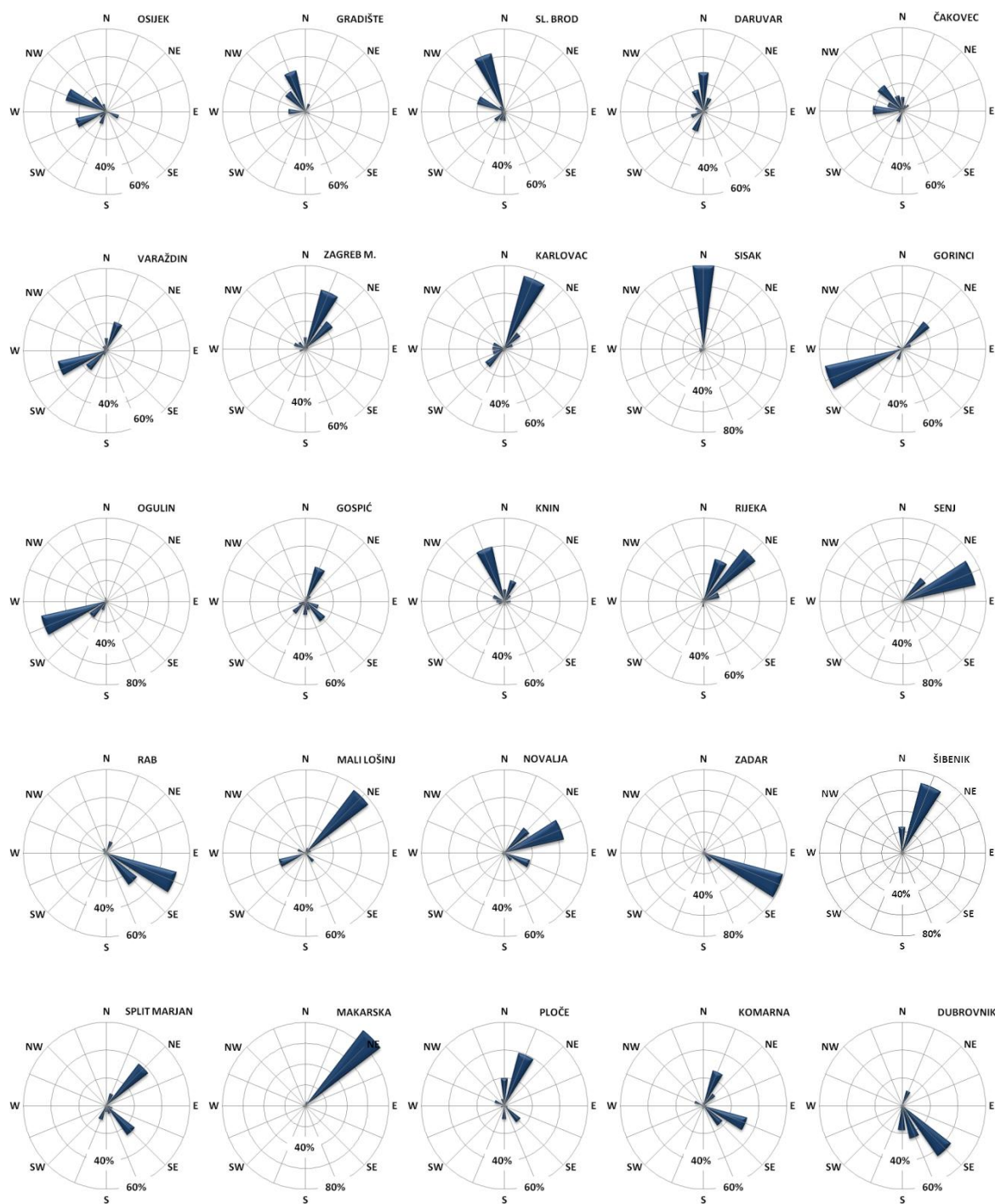
smjer bure varira ovisno o položaju mjerne postaje u odnosu na prijevoje priobalnih planina (najočitiji primjer su Senj i Makarska).

Tablica 3.3. Izmjerene vrijednosti srednje (V_{sr} u m/s), maksimalne 10-minutne (V_{10x} u m/s) i maksimalne sekundne (V_{xx} u m/s) brzine vjetra u razdoblju 2005-2009. godina i prije njega, te granična vrijednost brzine vjetra za određivanje ekstremne brzine (ζ u m/s) i broj ekstrema N odabranih za proračun maksimalne očekivane brzine vjetra.

	<i>prije 2005.</i>			2005-2009.				
postaja	V_{sr}	V_{10x}	V_{xx}	V_{sr}	V_{10x}	V_{xx}	ζ	N
Osijek Čepin	2.02	12.6	24.7	1.99	15.6	28.8	8.8	53
Gradište	2.05	15.1	25.2	1.96	16.6	25.9	9.4	56
Sl. Brod	1.58	11.0	26.0	1.19	14.4	27.1	6.8	44
Daruvar	1.45	12.1	31.7	1.24	10.5	23.0	5.3	68
Čakovec	2.49	16.4	30.9	2.39	17.1	27.1	9.8	71
Varaždin	2.08	14.6	24.7	2.04	16.1	39.6	10.7	59
Zagreb-Mak.	1.36	11.0	26.1	1.29	10.2	26.0	3.9	48
Karlovac	1.31	16.3	31.3	1.19	13.6	27.5	6.1	52
Sisak	1.48	12.4	22.3	1.41	13.8	27.7	8.2	50
Gorinci	-	-	-	1.28	13.9	27.3	7.2	49
Ogulin	1.31	12.9	32.3	1.33	15.4	29.8	8.6	56
Gospić	1.64	11.1	26.0	1.51	9.4	24.1	5.1	65
Knin	2.82	17.0	36.7	2.75	17.7	33.3	12.7	70
Rijeka	1.78	15.3	31.5	1.67	13.6	27.7	7.2	50
Senj	3.25	19.8	38.5	3.48	20.1	37.3	12.5	53
Rab	1.97	13.6	32.3	1.87	15.0	30.2	11.2	57
Mali Lošinj	3.01	14.5	27.7	2.83	16.2	29.1	12.5	51
Novalja	3.61	22.2	39.5	3.14	17.7	38.3	12.5	57
Zadar	2.86	19.7	27.3	2.61	19.6	26.7	10.4	48
Šibenik	3.13	18.4	32.3	2.94	17.6	31.3	12.3	52
Split Marjan	4.15	27.2	42.5	4.10	23.0	37.5	11.9	64
Makarska	2.49	26.3	45.2	2.32	28.4	44.4	13.4	44
Ploče	-	-	-	2.23	15.0	26.0	9.0	41
Komarna	-	-	-	4.03	22.4	33.2	14.8	46
Dubrovnik	3.34	21.2	33.6	3.68	23.7	34.4	10.1	45



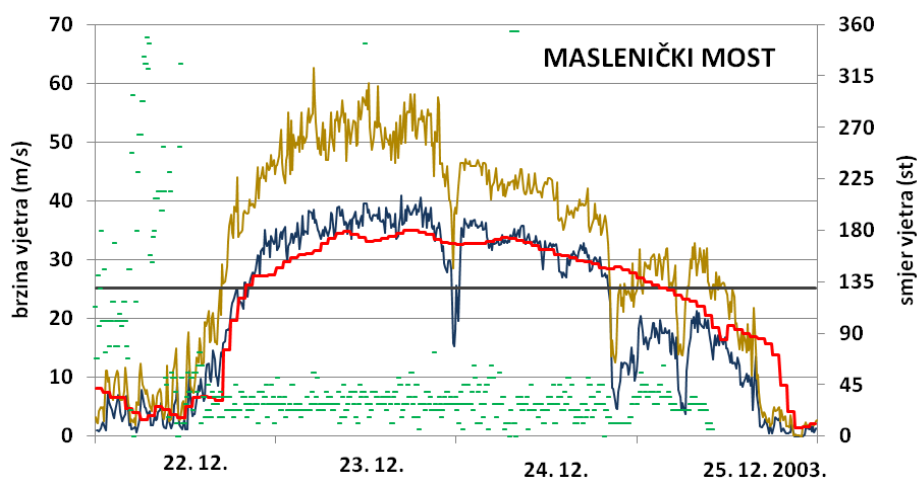
Slika 3.2. Godišnji hod relativnih čestina ekstremnih brzina vjetra odabranih za proračun osnovne brzine vjetra na 25 meteoroloških postaja na području Hrvatske u razdoblju 2005-2009. godina.



Slika 3.3. Relativna čestina pojedinog smjera vjetra ekstremne brzine odabranog za proračun osnovne brzine vjetra na 25 meteoroloških postaja na području Hrvatske u razdoblju 2005-2009. godina.

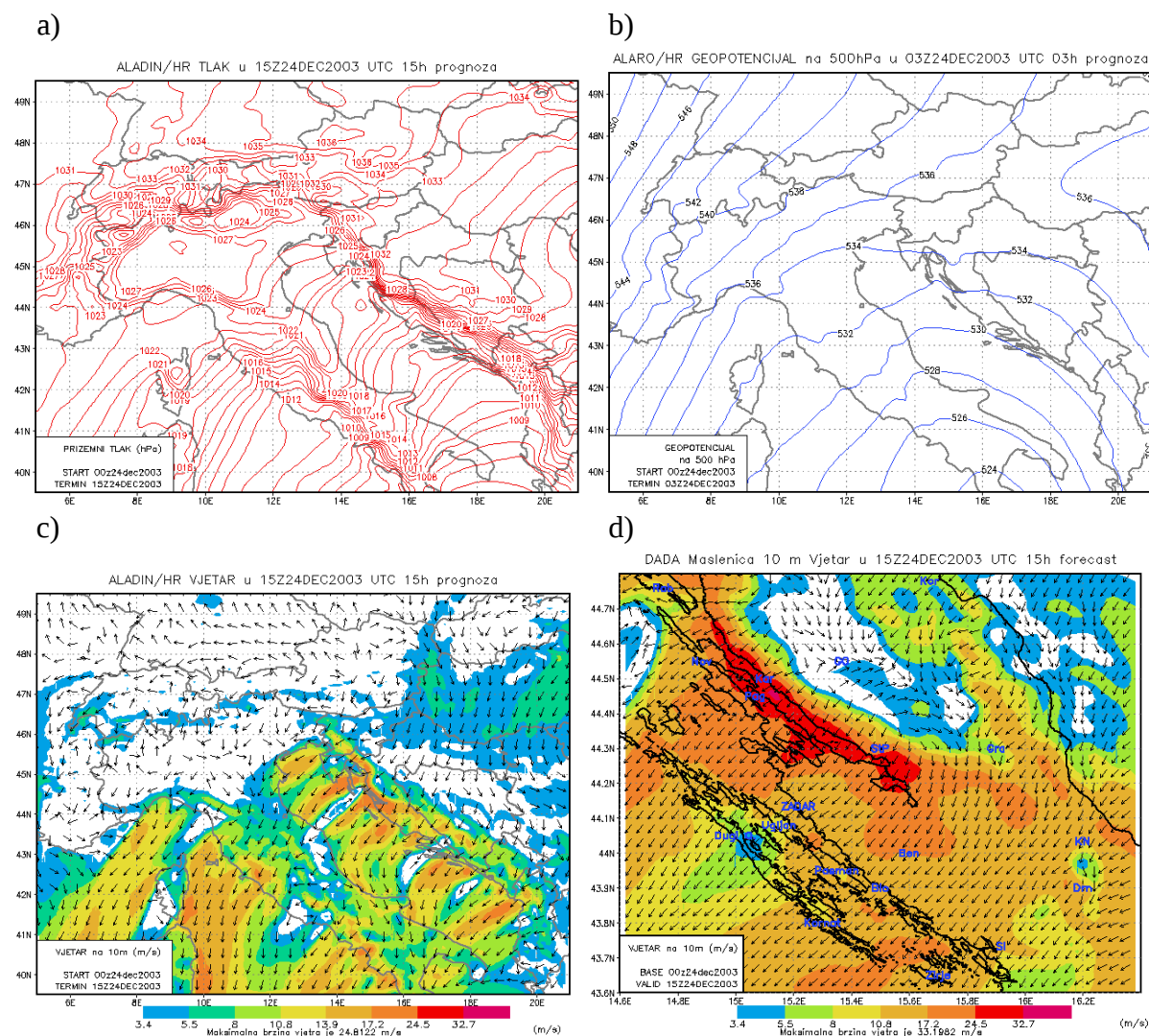
U nastavku ćemo ukratko opisati osnovne značajke nekoliko vremenskih situacija s olujnim vjetrom. Osnove dinamike nastanka olujnog vjetra, posebno bure, dan je u Poglavlju 1. Na području priobalja i otoka vjetar olujne brzine je najčešće bura ili jugo. Jedna od najvećih ikad izmjerenih brzina vjetra kod nas je ona zabilježena na Masleničkom mostu za vrijeme puhanja bure 23. 12. 2003. kada je 10-minutna brzina vjetra bila 40.9 m/s, a maksimalni udar 62.7 m/s (Sl. 3.4). Sinoptičku situaciju karakterizira ciklona nad Tirenskim morem i područje visokog tlaka zraka iznad NW Europe (Sl. 3.5) što uzrokuje NE strujanje nad Jadranom. Okomito na Velebit formira se jugozapadni gradijent tlaka koji pogoduje nastanku bure. Visinska ciklona sa centrom nad Sardinijom odgovorna je za istočno visinsko strujanje. Polje brzine vjetra na 10 m iznad tla nad Jadranom potvrđuje da su varijacije jačine bure duž obale snažno korelirane s orografskim karakteristikama kao što su prijevoji i vrhovi (Grubišić, 2004).

Hod brzine vjetra (Sl. 3.4) ukazuje na pojavu bure u podnevnim satima 22. prosinca 2003. i nagli porast 10- minutne brzine vjetra od 8.5 m/s na 25.1 m/s i porast maksimalnog udara od 15.7 m/s do 44.1 m/s u svega 2.5 sata. Numerički model atmosfere ALADIN (Bubnova i sur., 1995) je vrlo uspješno simulirao nastanak i jačinu ove bure. Razlike u izmjerenoj i modeliranoj brzini vjetra u terminima kada brzina vjetra prelazi graničnu vrijednost za određivanje ekstrema u prosjeku iznosi 2.9 m/s što je 8.3% prosječne 10-minutne brzine u istim terminima. Model podcjenjuje najveću izmjerenu brzinu vjetra za 15.8% njene vrijednosti što je u skladu s rezultatima usporedbe mjerenih i modeliranih ekstremnih brzina vjetra na području NW Europe regionalnim klimatskim modelom (Kunz i sur., 2010).



Slika 3.4. Hodovi 10-minutne (plava linija), maksimalne trenutne (žuta linija) brzine vjetra i smjera vjetra (zelene crtice) u situaciji s olujnom burom 22-25. 12. 2003. na Masleničkom

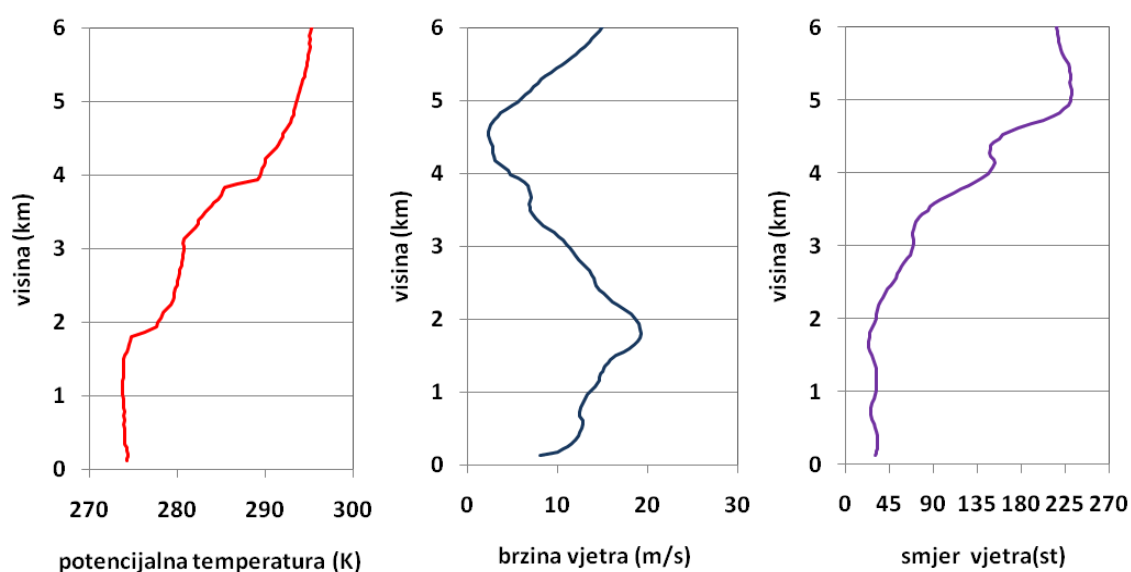
mostu. Crna linija označava graničnu vrijednost brzine vjetra za odabir ekstrema, a crvena hod brzine vjetra dobiven numeričkim modelom atmosfere ALADIN.



Slika 3.5. Situacija 24. 12. 2003. u 15 UTC: a) prizemno polje tlaka zraka (hPa), b) geopotencijalna visina na 500 hPa, c) brzina vjetra na 10 m iznad tla na širem području Hrvatske (m/s) dobivena ALADIN modelom rezolucije 8 km i d) polje brzine vjetra (m/s) na 10 m iznad tla kao rezultat dinamičke adaptacije (Žagar i Rakovec, 1999).

Informacije o vertikalnoj strukturi atmosfere u navjetrini daju nam radiosondažna mjerenja postaje Zagreb-Maksimir. Radiosondažna mjerenja u 23. 12. 2003. u 12 UTC (Sl. 3.6) odgovaraju navjetrinskom profilu razvijene bure. Konvektivni granični sloj formiran je nad Zagrebom te ga od slobodne atmosfere dijeli inverzija na 1800 m. Unutar graničnog sloja nalazi se niska mlazna struja s maksimumom na vrhu konvektivnog graničnog sloja. Dodatni stabilni sloj nalazi se na 3800 m i blizak je visini sinoptički induciranog kritičnog nivoa što je nešto veća visina od dubine sjeveroistočnog strujanja. Na većim visinama strujanje je

jugozapadno. Vertikalni presjek brzine vjetra i potencijalne temperature (Sl. 3.7) pokazuje da je strujanje okomito na prepreku i da ga karakterizira niska mlazna struja s izrazitim smicanjem vjetra iznad maksimuma. Nad južnim Velebitom strujanje je nelinearno tako da dolazi do loma vala i prelaska u natkritično strujanje, koje u zavjetrini Južnog Velebita rezultira hidrauličkim skokom. Izražena deformacija izentropa pri prelasku preko planine pojačava akceleraciju na obalnoj strani Velebita i jačanje bure.



Slika 3.6. Vertikalni profili potencijalne temperature (lijevo), brzine (sredina) i smjera (desno) vjetra nad Zagreb Maksimirom 23. 12. 2003. u 12 UTC.

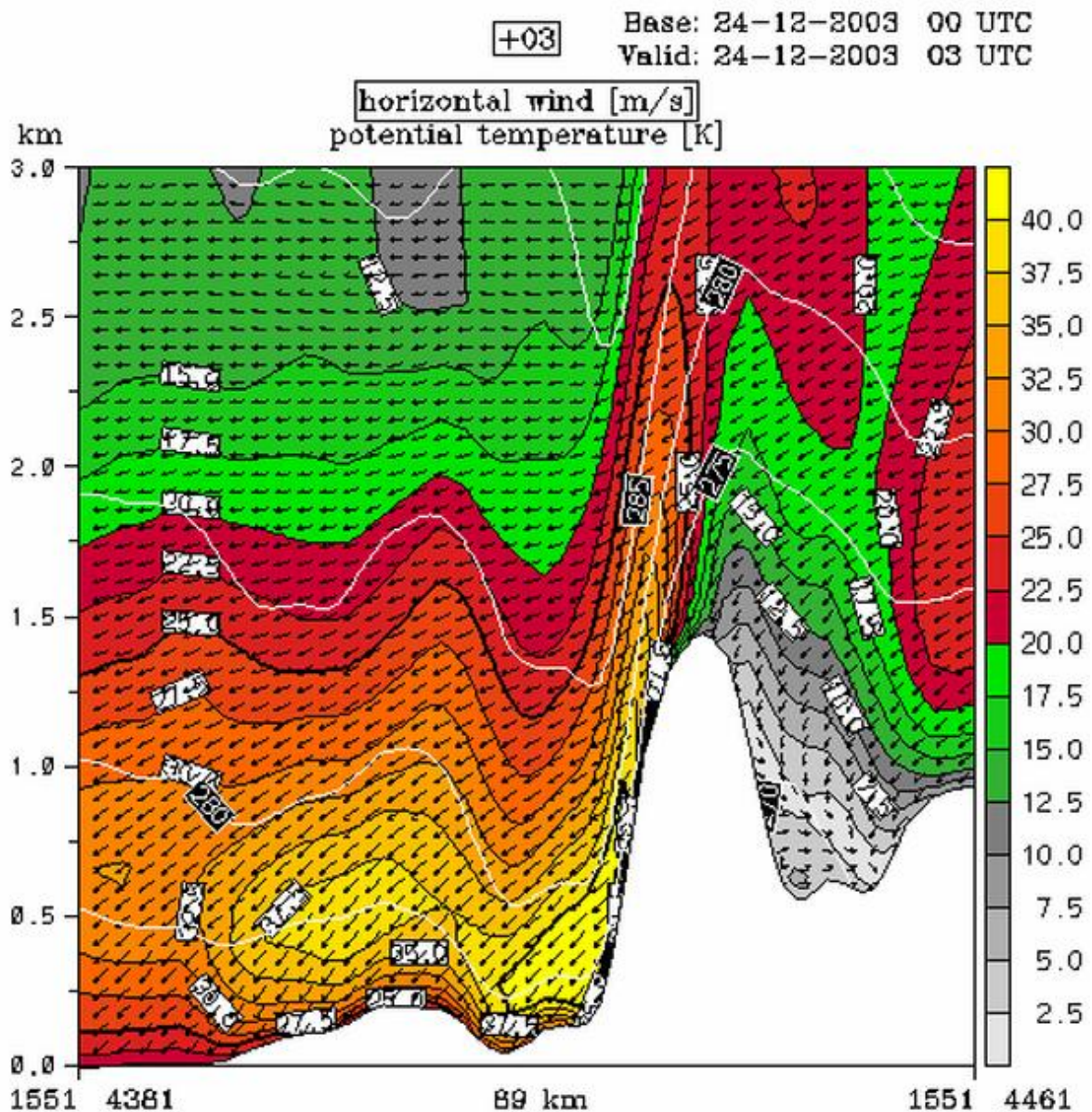
Hidrauličke karakteristike strujanja, koje nailazi na Južni Velebit, možemo odrediti izračunom lokalnog Froudovog broja iz zagrebačke sondaže. Lokalni Froudov broj definiran je s

$$Fr = \frac{V_B}{\sqrt{g^* H_B}} \quad (3.1)$$

gdje je g^* je reducirano ubrzanje sile teže definirano kao

$$g^* = \frac{g \Delta \theta}{\theta_B} \quad (3.2)$$

H_B je dubina sloja bure koji se proteže od površine do visine inverzije, V_B je srednja brzina vjetra okomitog na Južni Velebit unutar sloja bure, $\Delta \theta$ je skok potencijalne temperature preko inverzije, a θ_B je srednja potencijalna temperatura u sloju bure.



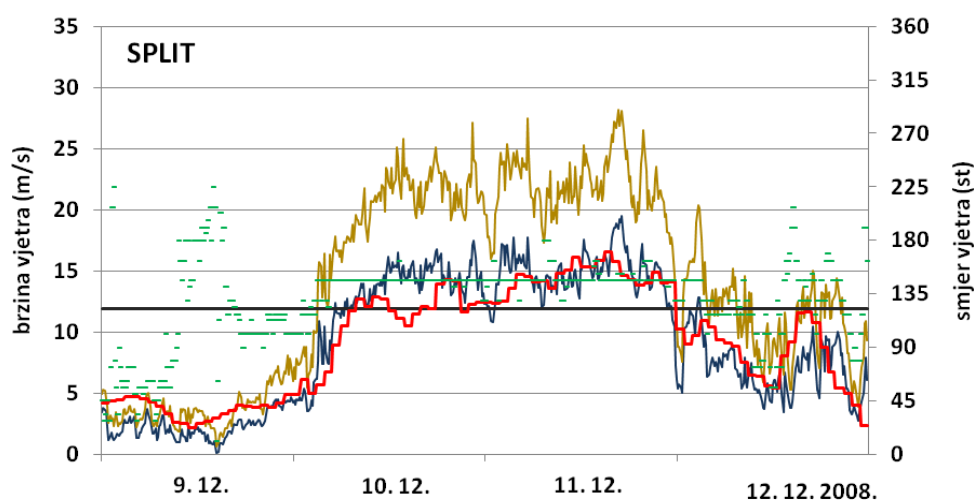
Slika 3.7. Vertikalni presjek smjera i brzine vjetra (m/s) (vektori smjera i osjenčana područja brzine vjetra), te potencijalne temperature (K) (bijeke linije) po meridijanu 15° 51' E, 24. 12. 2003. u 03 UTC.

Hidraulički parametri izračunati iz zagrebačke sondaže 23. 12. 2003. u 12 UTC (Tablica 3.4) pokazuju da je strujanje potkritično u navjetrini ($Fr < 1$). Prema hidrauličkom nelinearnom modelu za dvodimenzionalno strujanje s konstantnim profilom brzine vjetra u dvoslojnoj atmosferi (Long 1954) prelazak u natkritično strujanje očekuje se za planine više od 424 m u čijoj zavjetrini se očekuje formiranje hidrauličkog skoka. Usporedive vrijednosti dobivene su i u situacijama s burom 20. 12. 2004. opisanoj u radu Stiperski (2010) u kojem je detaljno opisana sva kompleksnog dinamike razvoja olujne bure na širem području južnog Velebita.

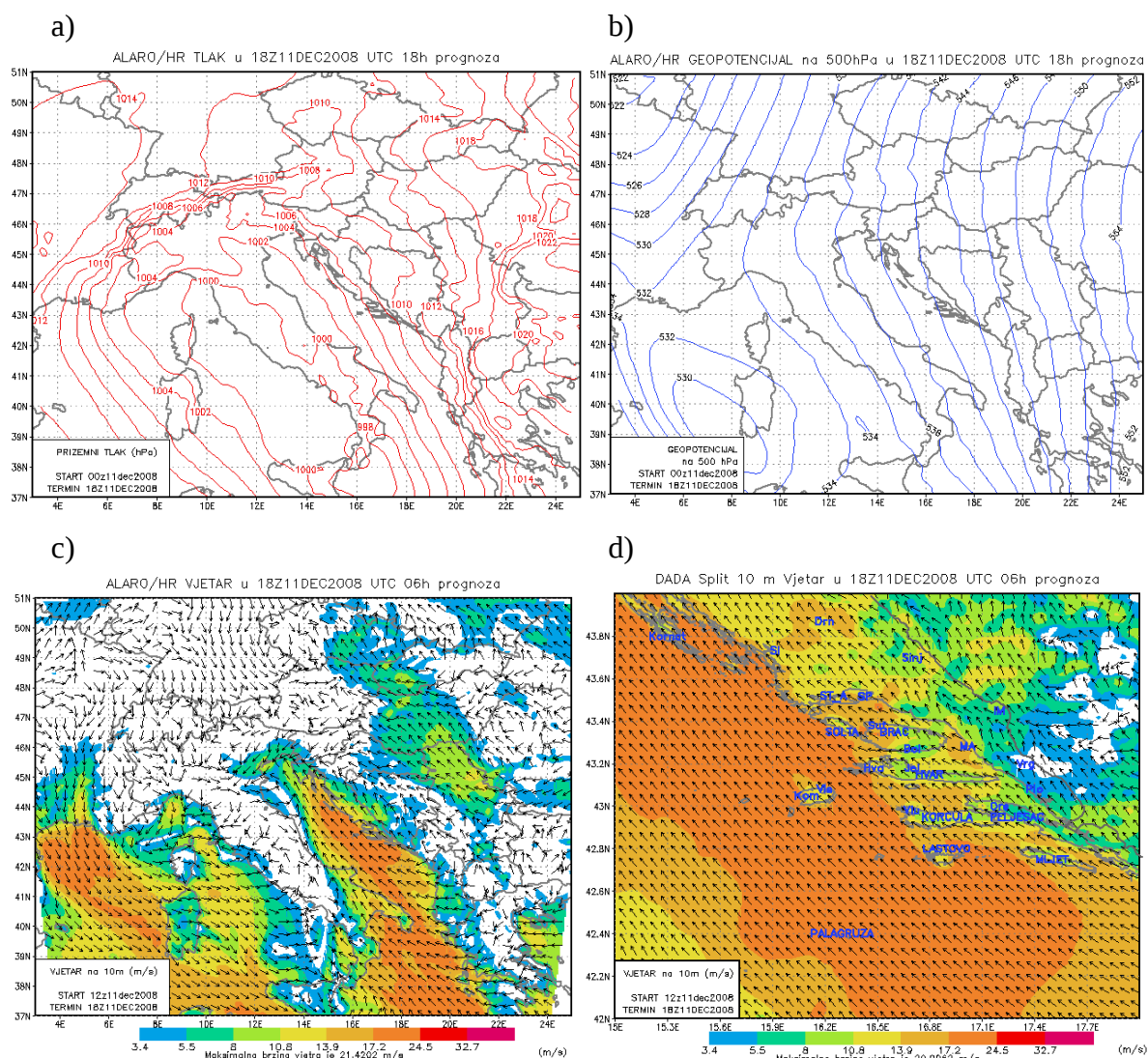
Tablica 3.4. Hidraulički parametri izračunati iz zagrebačke sondaže 23. 12. 2003. u 12 UTC. H_B je debljina sloja bure od površine do inverzije, U_B srednja brzina vjetra, θ_B srednja potencijalna temperatura, $\Delta\theta$ skok temperature preko inverzije, Fr navjetrinski Froudeov broj definiran s (3.1).

Zagreb Maksimir	H_B	U_B	$\Delta\theta$	θ_B	Fr
23. 12. 2003. 12 UTC	3538 m	13.3 m/s	4.0 K	283.5 K	0.61

Olujni jugo ilustrirat ćemo situacijom 11.-12. 12. 2008. (Sl. 3.8). Sinoptičku situaciju 12. 12. 2008. godine (Sl. 3.9) karakterizira prostrana i duboka ciklona uz zapadnu obalu Italije i anticiklona nad Karpatima, pa nastali jaki gradijent tlaka uzrokuje SE strujanje duž Jadrana koje se prostire u dubokom sloju atmosfere. Ova situacija podudara se sa situacijama opisanima u radu Ivančan-Picek i sur. (2006) gdje je pokazano da se jugo javlja na prednjoj strani ciklone sa središtem nad Mediteranom i prolaskom frontalne zone preko srednjeg Jadrana. I u ovoj situaciji numerički model ALADIN vrlo uspješno simulira hod brzine vjetra. Maksimalna modelirana brzina vjetra u toj je situaciji iznosila 15.8 m/s što je 3.7 m/s manje od najveće izmjerene brzine vjetra. Dakle, i ovdje model podcjenjuje ekstremnu brzinu vjetra i to u ovom slučaju za 18.9% vrijednosti najveće izmjerene brzine vjetra.

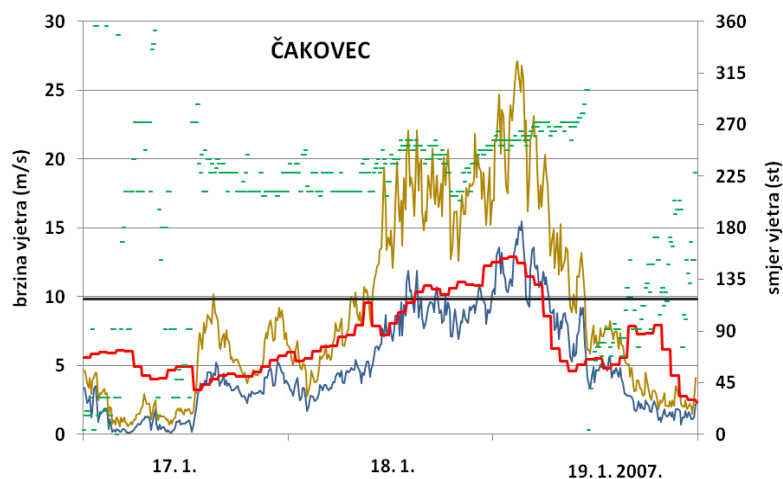


Slika 3.8. Hodovi 10-minutne (plava linija), maksimalne trenutne (žuta linija) brzine vjetra i smjera vjetra (zelene crtice) u situaciji s olujnim jugom 10–13. 12. 2008. na postaji Split Marjan. Crna linija označava graničnu vrijednost brzine vjetra za odabir ekstrema, a crvena hod brzine vjetra dobiven modelom ALADIN.

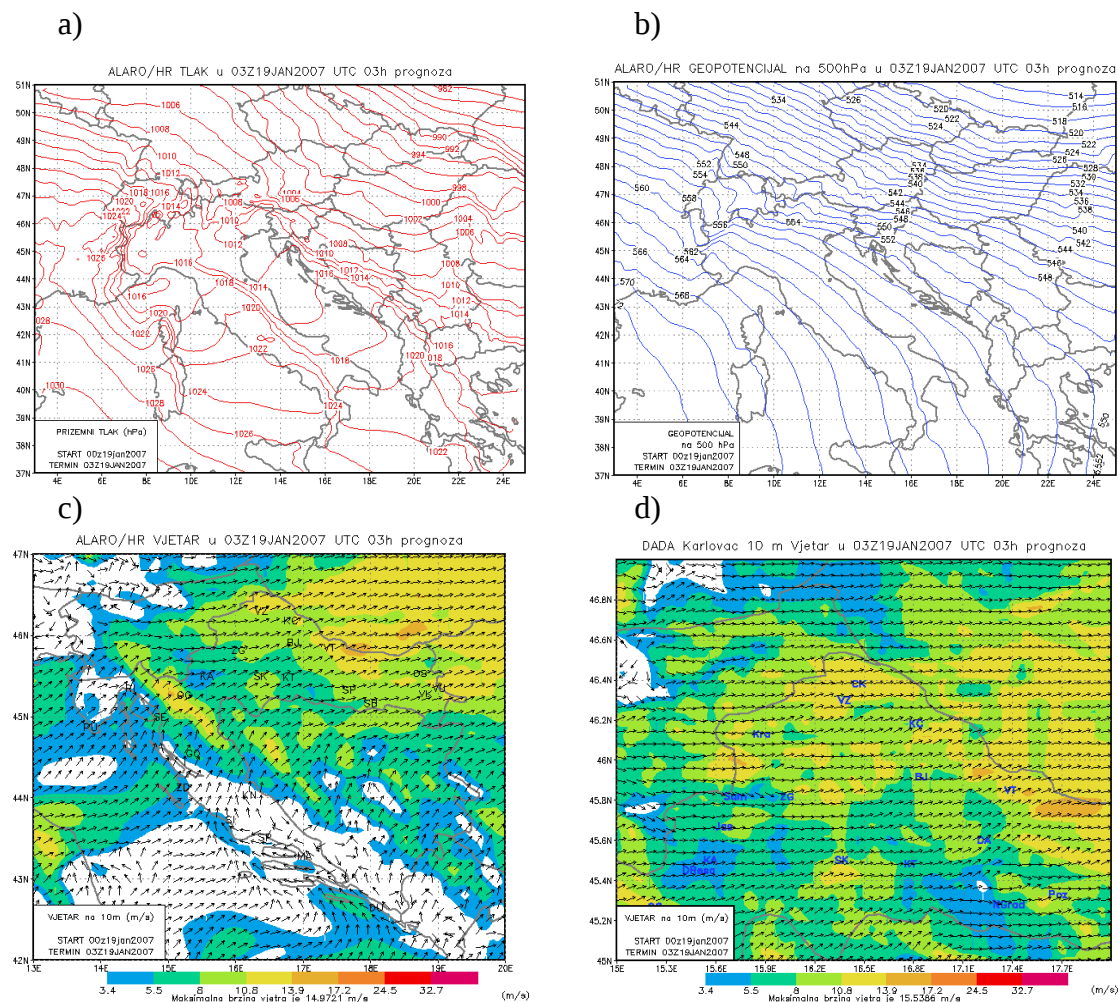


Slika 3.9. Situacija 11. 12. 2008. u 18 UTC: a) prizemno polje tlaka zraka (hPa), b) geopotencijalna visina na 500 hPa, c) brzina vjetra na 10 m iznad tla na širem području Hrvatske (m/s) dobivena ALADIN modelom rezolucije 8 km i d) polje brzine vjetra (m/s) na 10 m iznad tla kao rezultat dinamičke adaptacije (Žagar i Rakovec, 1999).

Primjer vremenske situacije s olujnim vjetrom u unutrašnjosti Hrvatske je 19. 1. 2007. godine kada je na svim postajama sjeverne Hrvatske zabilježen vjetar ekstremne brzine (Sl. 3.10) SW-W smjera. Osnovni uzrok jakog vjetra u ovoj situaciji je izraženi gradijent tlaka između duboke ciklone nad NW Europom i anticiklone nad zapadnim Sredozemljem. Frontalni poremećaj koji dolazi sa NW blokiran je Alpama u donjoj troposferi ispod sloja temperature inverzije, pa hladni zrak zaobilazi planinsku prepreku. Na južnoj strani uzrokuje ciklonalnu aktivnost u Genovskom zaljevu i posljedično strujanje SW smjera nad našim područjem koje se dodatno modificira lokalnim planinama. Operativni numerički model ALADIN je uspješno simulirao hod brzine vjetra s maksimumom 19. 1. 2007. u 1 sat (Sl. 3.9). Sam iznos maksimalne brzine model podcjenjuje za 10.6% izmjerene vrijednosti.



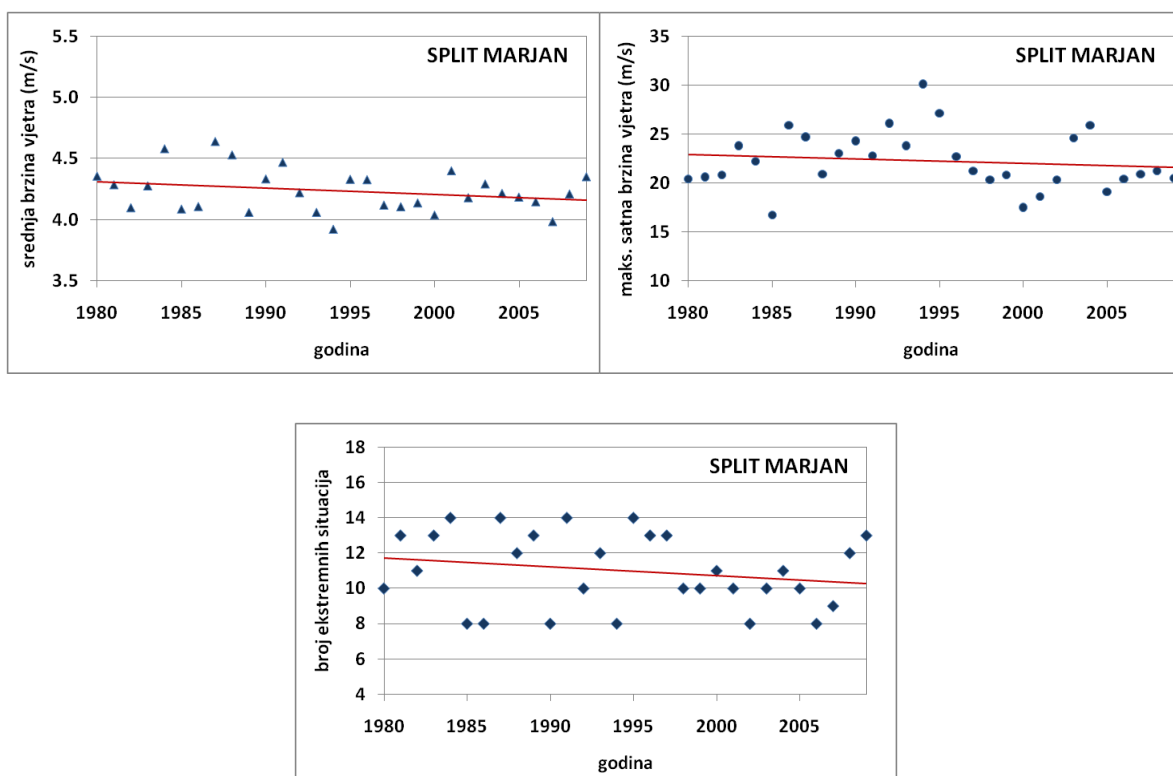
Slika 3.10. Hodovi 10-minutne (plava linija), maksimalne trenutne (žuta linija) brzine vjetra i smjera vjetra (zelene crtice), te brzine vjetra dobivene numeričkim modelom atmosfere ALADIN (crvena linija) u situaciji 17-19. 1. 2007. na meteorološkoj postaji Čakovec. Crna linija označava graničnu vrijednost brzine vjetra za odabir ekstrema.



Slika 3.11. Situacija 19. 1. 2007. u 03 UTC: a) prizemno polje tlaka zraka (hPa), b) geopotencijalna visina na 500 hPa, c) brzina vjetra na 10 m iznad tla na širem području Hrvatske (m/s) dobivena ALADIN modelom rezolucije 8 km i d) polje brzine vjetra (m/s) na 10 m iznad tla u unutrašnjosti Hrvatske kao rezultat dinamičke adaptacije.

3.3. Analiza trenda maksimalne brzine vjetra

Korištenje relativno kratkog niza podataka za procjenu očekivanih ekstrema dat će vjerodostojne rezultate samo u slučaju ako je razdoblje s podacima reprezentativno za dugogodišnju klimu dane lokacije. To znači da se klimatske značajke ekstremnih brzina vjetra u kratkom razdoblju ne razlikuju značajnije od onih za dugogodišnje klimatski reprezentativno razdoblje. Dakle, uvjet je da ne postoji trend pada niti porasta ekstremnih brzina vjetra, niti broja situacija s ekstremnim brzinama vjetra. Da je tome tako pokazat će se na primjeru podataka s meteorološke postaje Split Marjan u 30-godišnjem razdoblju 1980-2009. Ta je postaja odabrana jer nije bilo značajnijih promjena lokacije i okoliša postaje u tih 30 godina. Promjena instrumenta 2003. godine nije dovela do pojave nehomogenosti, što je pokazano usporedbom jednogodišnjih podataka istovremenih mjerenja starim Fues i novim mikroM anemometrom (Mihajlović, osobna komunikacija).



Slika 3.12. Hod srednjih godišnjih brzina vjetra (lijevo gore), maksimalnih godišnjih satnih brzina vjetra (desno gore) i broja situacija s ekstremnom brzinom vjetra (dolje) na postaji Split Marjan u razdoblju 1980-2009. Crvena linija je pridijeljeni linearni trend.

Analiza trenda rađena je metodom linearne regresije za srednje godišnje brzine vjetra i maksimalne satne brzine vjetra u svakoj godini raspoložive u čitavom 30-godišnjem razdoblju (npr. Wilks, 2006). Statistička signifikantnost koeficijenta regresije provjerena je primjenom neparametarskog Man Kendall testa. Utvrđen je godišnji padajući trend maksimalnih satnih brzina vjetra od 0.05 m/s na godinu, odnosno trend koji za 30 godina iznosi 1.5 m/s, što je 6% od prosječne ekstremne satne brzine vjetra. Trend pada prosječne godišnje brzine vjetra iznosi 0.05 m/s na 10 godina (Sl. 3.12). Oba ova trenda nisu statistički signifikantna na razini 0.05%. Izostanak trenda ekstremnih brzina vjetra pokazan je i za nekoliko lokacija na kontinentalnom dijelu NW Europe analizirajući razdoblje 1958-1998. (Yan i sur., 2006).

Da bismo potvrdili da ne postoje promjene u pojavi ekstremnih brzina vjetra, nije dovoljno ispitati postojanje trenda porasta ili pada samih vrijednosti brzina, već je važno analizirati i da li je došlo do porasta ili pada broja vremenskih situacija s vjetrom čija brzina prelazi zadanu graničnu vrijednost. U tu smo svrhu za čitav 30-godišnji niz odredili broj situacija s ekstremnom brzinom vjetra prethodno opisanom metodom (Sl. 3.12). Analiza je pokazala da postoji pad broja situacija od 1 situacije u 20 godina. Međutim, ni taj padajući linearni trend nije statistički signifikantan na razini 0.05%. Izostanak statistički signifikantnog trenda maksimalnih satnih brzina vjetra i broja situacija s ekstremnom brzinom vjetra ukazuje na to da niz brzina vjetra 2005-2009. možemo smatrati dovoljno reprezentativnim za dugogodišnju klimu.

3.4. Maksimalne očekivane brzine vjetra proračunate iz podataka mjerenja

Prvi korak u proračunu maksimalnih očekivanih brzina vjetra na 25 odabranih lokacija je odabir nizova ulaznih podataka. Nizovi ulaznih podataka za proračun ekstrema dobiveni su odabravši graničnu vrijednost brzine vjetra metodom uvjetnog srednjeg premašaja uz 48 satno „mrtvo vrijeme“ između ekstrema. Analizirano razdoblje bilo je 2005-2009. godina. Tako dobivenim uzorcima pridijeljena je opća Pareto razdioba koristeći metodu otežanih momenata procjene parametara razdiobe (visi Poglavlje 2). Proračun očekivanih maksimalnih brzina vjetra proveden je za povratni period od 50 godina (pretpostavljeni minimalni životni vijek konstrukcije). Povratni period od 50 godina propisan je kao standard u europskim normama koje definiraju opterećenje građevinskih konstrukcija vjetrom (Holmes, 2001) i znači da je vjerojatnost da brzina vjetra u svakoj godini bude veća od očekivanog ekstrema 0.02%.

Dobivene procijenjene očekivane maksimalne 10-minutne brzine vjetra dane su Tablici 3.5. Vrijednosti parametara razdiobe ekstrema pokazuju da područje priobalja i otoka karakterizira veće raspršenje (veći α) ekstrema i izduljeniji desni kraj razdiobe (manji k) nego u unutrašnjosti Hrvatske. Uspješnost pridjeljivanja opće Pareto razdiobe izmjerenim ekstremima pokazuju nam veličine koeficijenta efikasnosti CE i srednje relativne pogreške ARPE (*average relative percent error*) dane s:

$$CE = \frac{\sum_{i=1}^N (V_{MJE_i} - \bar{V}_{MJE})^2 - \sum_{i=1}^N (V_{PRO_i} - V_{MJE_i})^2}{\sum_{i=1}^N (V_{MJE_i} - \bar{V}_{MJE})^2} \quad (3.3)$$

$$ARPE = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^N (V_{PRO_i} - V_{MJE_i})}{\sum_{i=1}^N V_{MJE_i}} \quad (3.4)$$

gdje je V_{MJE} izmjerena brzina vjetra, V_{PRO} brzina vjetra procijenjena koristeći opću Pareto razdiobu, $\bar{V}_{MJE}$ srednja izmjerena brzina vjetra, a N broj podataka. Srednja relativna pogreška daje informaciju da li metoda precjenjuje ili podcjenjuje vrijednosti ekstrema, a koeficijent efikasnosti ukazuje na pogrešku relativno u odnosu na varijabilnost izmjerenih vrijednosti. Uspješnost pridjeljivanja razdiobe ekstremnim vrijednostima nešto je manja na lokacijama na obali i otocima ($CE < 0.9$) zbog veće varijabilnosti ekstremnih brzina vjetra. Na svim postajama uočavaju se negativne vrijednosti srednje relativne pogreške, odnosno metoda

podcjenjuje ekstremne brzine vjetra. Međutim, iznos te pogreške ne prelazi 1.6% izmjerene brzine vjetra, pa pridjeljivanje opće Pareto razdiobe ekstremnim brzinama vjetra na analiziranim meteorološkim postajama možemo smatrati uspješnim.

Tablica 3.5.a) Maksimalna očekivana brzina vjetra (V_{50} u m/s) za povratni period od 50 godina proračunata na osnovi podataka mjerenja u razdoblju 2005-2009. na lokacijama meteoroloških postaja u unutrašnjosti Hrvatske.

postaja	ζ (m/s)	N	α	$SE(\alpha)$	k	$SE(k)$	V_{50} (m/s)	$SE(V_{50})$ (m/s)	CE	$ARPE$ (%)	GEV V_{50} (m/s)
Osijek Č.	8.8	53	2.543	0.360	0.189	0.105	18,1	2.22	0.940	-0.98	
Gradište	9.4	56	2.305	0.286	0.182	0.093	18.1	1.99	0.927	-1.30	17.6
Sl. Brod	6.8	44	2.364	0.315	0.179	0.099	15.7	2.00	0.980	-0.58	16.1
Daruvar	5.3	68	1.911	0.170	0.193	0.068	12.4	1.24	0.999	-1.00	13.3
Čakovec	9.8	71	2.329	0.212	0.174	0.071	18.9	1.65	0.909	-1.08	
Varaždin	10.7	59	2.440	0.306	0.260	0.100	18.3	1.61	0.900	-1.17	18.2
Zagreb M.	3.9	48	2.393	0.357	0.188	0.112	12.3	2.29	0.958	-0.64	13.1
Karlovac	6.1	52	2.134	0.270	0.205	0.097	14.2	1.71	0.926	-1.02	
Sisak	8.2	50	2.138	0.285	0.248	0.106	15.0	1.57	0.840	-1.28	
Gorinci	7.2	49	2.289	0.326	0.228	0.111	14.8	1.86	0.891	-1.15	
Ogulin	8.6	56	2.476	0.325	0.190	0.098	17.7	2.18	0.930	-1.12	17.9
Gospić	5.1	65	2.629	0.310	0.171	0.087	15.4	2.32	0.993	-0.88	15.6
Knin	9.7	70	2.865	0.338	0.188	0.087	20.5	2.41	0.994	-1.05	

Legenda:

ζ – granična brzina vjetra,

N – broj podataka,

α i k – parametri pridijeljene opće Pareto razdiobe,

$GEV V_{50}$ - očekivana maksimalna 10-minutna brzina vjetra za povratni period od 50 godina određena primjenom opće razdiobe ekstrema na podatke mjerenja u razdoblju 10 i više godina

SE standardna pogreška procjene

CE – koeficijent efikasnosti

$ARPE$ – srednja relativna pogreška.

Tablica 3.5.b) Maksimalna očekivana brzina vjetra (V_{50} u m/s) za povratni period od 50 godina proračunata na osnovi podataka mjerenja u razdoblju 2005-2009. na lokacijama meteoroloških postaja u priobalju i na otocima.

Značenje veličina je kao i u Tablici 3.5.a).

postaja	ζ (m/s)	N	α	$SE(\alpha)$	k	$SE(k)$	V_{50} (m/s)	$SE(V_{50})$ (m/s)	CE	ARPE (%)	GEV V_{50} (m/s)
Rijeka	8.2	50	3.105	0.343	0.156	0.126	20.5	3.81	0.919	-1.16	18.2
Senj	14.5	53	2.946	0.470	0.198	0.119	25.1	2.95	0.811	-1.17	23.0
Rab	11.2	57	3.146	0.491	0.185	0.115	22.9	3.27	0.894	-1.10	21.5
M. Lošinj	12.5	51	2.920	0.480	0.188	0.121	23.2	3.07	0.738	-1.34	21.5
Novalja	11.5	57	3.616	0.644	0.174	0.129	26.4	3.07	0.864	-1.17	26.7
Zadar	10.4	48	3.614	0.752	0.187	0.152	23.6	4.61	0.878	-1.60	24.0
Šibenik	10.3	52	3.758	0.747	0.193	0.146	23.8	4.56	0.850	-1.35	
Split M.	12.9	64	3.056	0.415	0.190	0.100	24.1	5.87	0.851	-1.19	
Makarska	14.4	44	4.158	1.063	0.190	0.186	29.4	6.14	0.841	-1.24	30.8
Ploče	9.0	41	2.056	0.318	0.175	0.116	16.6	2.06	0.804	-1.40	
Komarna	14.8	46	3.054	0.579	0.204	0.141	26.7	3.37	0.753	-1.41	
Dubrovnik	12.1	45	3.183	0.635	0.188	0.147	25.7	3.85	0.768	-1.53	24.4

Procijenjene očekivane ekstremne brzine vjetra za povratni period od 50 godina u unutrašnjosti Hrvatske kreću se od 12.3 m/s na postaji Zagreb Maksimir do 18.9 m/s u Čakovcu i 20.5 m/s u Kninu. Na priobalju i otocima V_{50} iznosi od 16.6 m/s u Pločama do 29.4 m/s u Makarskoj.

Tablica 3.5. u suštini pokazuje da su očekivane maksimalne brzine vjetra u unutrašnjosti Hrvatske znatno manje od onih na obali i priobalju. Uz to se jasno uočava da najveće brzine vjetra možemo očekivati na priobalju na području s najstrmijim padinama priobalne planisne prepreke.

Za postaje na kojima raspolažemo s 10 i više godina mjerenih podataka očekivane maksimalne brzine vjetra procijenili smo primjenom opće razdiobe ekstrema (vidi Poglavlje 2) uzimajući kao ulazne podatke godišnje maksimalne vrijednosti brzine vjetra. Tako dobivene vrijednosti očekivane maksimalne brzine vjetra za povratni period od 50 godina (GEV V50 u Tablici 3.5) ne razlikuju se značajnije od onih dobivenih općom Pareto razdiobom. Ovaj rezultat opravdava korištenje kraćih razdoblja mjerenja i opće Pareto razdiobe ekstrema za procjenu očekivanih maksimalnih brzina vjetra u Hrvatskoj.

Procijenjene maksimalne brzine vjetra dobivene su na osnovi ekstremnih brzina izmjerenih u uvjetima različite hrapavosti terena, pa je razumljivo da su na postajama sa značajnijim preprekama strujanju (veća visina hrapavosti) dobivene brzine vjetra manje. Zbog svega navedenog izmjerene brzine vjetra potrebno je korigirati (korekcija izloženosti) kako bi proračunate maksimalne očekivane brzine vjetra bile usporedive i reprezentativne za područje bez prepreka strujanju i visinu mjerenja 10 m.

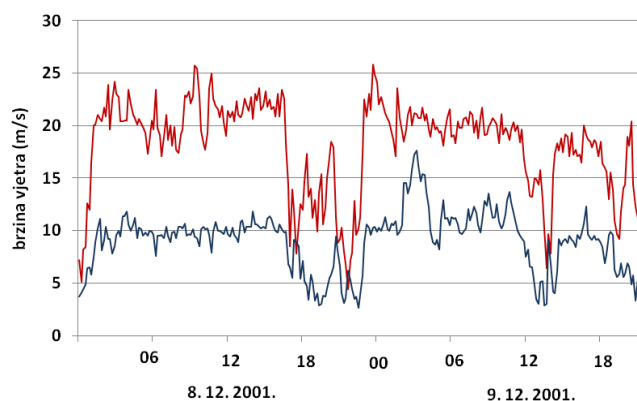
3.5. Metoda proračuna faktora korekcije izloženosti

Jedan od važnijih kriterija za reprezentativnost podataka je da u okolini mjernog instrumenta nema visokih bliskih prepreka. Međutim, područje bez prepreka vrlo je rijetko na raspolaganju za postavljanje anemometarskog stupa. Uz to na izbor lokacije postaje često utječu i administrativni uvjeti dostupnosti zemljišta. Većina analiziranih postaja (Tablica 3.2) smještena je u prigradskim naseljima s anemometrom na samostalnom stupu maksimalno moguće odmaknutom od susjednih zgrada i drugih objekata. Na manjem broju postaja anemometar je smješten na krovu zgrade (npr. Ogulin na Sl. 3.13). Na nekim postajama okolni su objekti toliko visoki i toliko blizu anemometru da podatke mjerenja možemo smatrati reprezentativnim samo za mikrolokaciju samog anemometra (npr. Senj na Sl. 3.13). Koliko lokacija anemometra može utjecati na brzinu vjetra pokazuje primjer situacije s olujnom burom 7-8. 12. 2001. U toj situaciji smo raspolagali s mjerenjima brzine vjetra na postaji u Senju i na vrhu Senjske kule (gradska obala). Brzine vjetra izmjerene na te dvije lokacije znatno se razlikuju (Sl. 3.14). Prosječni omjer srednjih 10-minutnih brzina vjetra izmjerenih na obali i na meteorološkoj postaji u ovoj situaciji iznosi 2.15. Stoga očekivane ekstremne brzine vjetra dobivene na osnovi podataka mjerenja s meteorološke postaje ne

možemo smatrati reprezentativnima za područje Senja što potvrđuje rezultate dane u radu Bencetić Klaić i sur. (2009).



Slika 3.13. Položaj anemometra na meteorološkim postajama u Senju (lijevo) i Ogulinu (desno).



Slika 3.14. Hod srednjih 10-minutnih brzina vjetra na meteorološkoj postaji u Senju (plava linija) i na krovu Senjske kule na obali (crvena linija) u situaciji 7-8. 12. 2001.

U meteorološkoj praksi se mjerenim podacima brzine vjetra na postajama s nezanemarivim preprekama strujanju pristupa na tri načina. Prvim se pristupom tako mjereni podaci smatraju nekvalitetnim i ne uključuju se u analizu. Drugim pristupom se podaci analiziraju takvi kakvi su izmjereni bez ikakvih korekcija, a pri tumačenju rezultata se upućuje na oprez. Treći pristup kvantificira interakciju vjetra i terena s preprekama oko anemometra. Taj pristup će biti korišten i u ovom radu. Jedan od najčešće korištenih parametara za određivanje utjecaja okolnog terena na vjetar je visina hrapavosti z_0 . Kako bi se izbjegla subjektivnost pri

određivanju visine hrapavosti, ovdje je ta veličina proračunata objektivnom metodom koristeći model mahovitosti. Dva su najpoznatija modela izračuna visine hrapavosti poznavajući mahovitost vjetra, onaj Wieringe (1973) i Beljaarsa (1987). Analizirajući primjenjivost oba modela verificirajući ih na podacima mjerenja na nekoliko lokacija u Nizozemskoj Verkaik (1999) pokazuje da oba omogućuju izračun faktora korekcije izloženosti s pogreškom od 5% pri čemu je Beljaarsov model računski bitno zahtjevniji. Analiza na području Španjolske pokazala je da su vrijednosti visine hrapavosti dobivene primjenom Wieringove metode i primjenom profilnih mjerenja na terenu nehomogene hrapavosti usporedive (Barthelmie i sur., 1993). Ista je metoda korištena u meteorološkoj službi Njemačke za korekciju brzine vjetra na područjima različite kategorije hrapavosti terena u svrhu homogenizacije nizova mjerenja brzine vjetra (Cristopher i Jurksch, 1985). Stoga je i ovdje korištena upravo ta metoda određivanja visine hrapavosti.

Model za 10-minutni period osrednjavanja sekundnih mjerenih vrijednosti daje odnos visine hrapavosti i medijana faktora mahovitosti FM_{md} :

$$z_0 = z_s \exp \left\{ \frac{-A_{Tp} f_{Tp} \left[1.42 + 0.30 \ln \left(-4 + \frac{1000}{V_{10} t} \right) \right]}{FM_{md} - 1 + A_{Tp} - f_{Tp} A_{Tp}} \right\} \quad (3.5)$$

gdje je f_{Tp} faktor koji ovisi o intervalu osrednjavanja brzine, T_p je interval osrednjavanja, t vrijeme uzorkovanja, a z_s visina anemometra. A_{Tp} je prigušenje koje ovisi o vremenu odgovora i konstanti udaljenosti mjernog instrumenta. Za moderne lake šalične anemometre ovaj je faktor mali, pa ćemo pri proračunu pretpostaviti da je $A_{Tp}=1$. U našem slučaju su $T_p=10$ min, $t=1$ sec, $f_{Tp}=1$.

Visine hrapavosti terena dobivene navedenom metodom dane su u Tablici 3.6. Kako bismo potvrdili valjanost metode, vrijednosti visine hrapavosti usporedili smo s onima dobivenim vizualnim pregledom terena. Naime, za vrijeme obilaska postaja određena je visina hrapavosti terena u svim smjerovima. Budući da se u europskoj normi koja se odnosi na metode proračuna opterećenja vjetrom (EN-1991-1-4, 2005) kao osnova za definiranje projektnih parametara koristi dopunjena Davenportova klasifikacija hrapavosti (Davenport i sur., 2000), postajama smo pridijelili visinu hrapavosti prema navedenoj klasifikaciji. Pri tom smo najveću težinu dali hrapavosti terena iz kojeg puše vjetar ekstremnih brzina (z_{0D} u Tablici 3.6). Kao treću raspoloživu opciju određivanja visine hrapavosti pregledom terena oko postaja

z_0 smo odredili koristeći CLC (*Corine Land Cover*) klasifikaciju (Silva i sur., 2007). Tako dobivene visine označili smo u Tablici 3.6. sa z_{0C} . Visine hrapavosti dobivene objektivnom metodom koristeći faktor mahovitosti i subjektivnom vizualnom ocjenom ne razlikuju se značajnije. Postojeće razlike su posljedica veće visine hrapavosti određene pregledom terena nego dobivenom proračunom. Zbog subjektivnosti uključene u određivanje z_0 vizualnim pregledom i grubosti Davenportove i CLC klasifikacije, za proračun faktora korekcije izloženosti u proračunima koji slijede korištena je visina hrapavosti dobivenu proračunom prema (3.5). Budući da se u ovom radu analiza odnosi na dugogodišnji niz podataka, za posve korektnu ocjenu hrapavosti terena bilo bi potrebno uvažavati i promjene oko mjernog instrumenta do kojih je došlo tijekom razdoblja iz kojeg se koriste podaci. Na žalost, u nacionalnoj mreži mjernih postaja ne raspolažemo u potpunosti podacima o promjenama prepreka, pa eventualne promjene nismo mogli uzeti u obzir.

Tablica 3.6. Faktor korekcije izloženosti anemometra (S) i visina hrapavosti na analiziranim meteorološkim postajama određena trima metodama:

z_0 – visina hrapavosti (m) dobivena iz faktora mahovitosti korištenjem modela mahovitosti (Wieringa, 1973),

z_{0D} - visina hrapavosti (m) prema Davenportovoj klasifikaciji (Davenport i sur., 2000),

z_{0C} - visina hrapavosti (m) prema CLC klasifikaciji (Silva i sur., 2007).

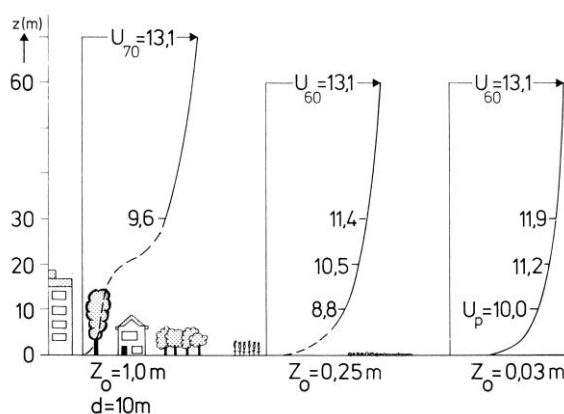
Postaja	z_0 (m)	z_{0D} (m)	z_{0C} (m)	S	Postaja	z_0 (m)	z_{0D} (m)	z_{0C} (m)	S
Osijek Čepin	0.167	0.1	0.05	1.171	Rijeka	0.313	0.25	0.3	1.271
Gradište	0.047	0.03	0.05	1.024	Senj	0.398	0.25	0.3	1.228
Sl. Brod	0.124	0.1	0.1	1.092	Rab	0.165	0.25	0.3	1.118
Daruvar	0.255	0.25	0.3	1.210	Mali Lošinj	0.177	0.25	0.3	1.125
Čakovec	0.074	0.03	0.03	1.123	Novalja	0.157	0.1	0.1	1.113
Varaždin	0.069	0.1	0.05	1.047	Zadar	0.016	0.03	0.05	0.972
Zagreb-Mak.	0.439	0.5	0.5	1.244	Šibenik	0.141	0.25	0.25	1.103
Karlovac	0.269	0.25	0.3	1.172	Split-Marjan	0.076	0.1	0.1	1.054
Sisak	0.121	0.1	0.1	1.090	Makarska	0.136	0.25	0.3	1.100
Gorinci	0.144	0.1	0.1	1.105	Ploče	0.107	0.1	0.05	1.079
Ogulin	0.374	0.25	0.3	1.218	Komarna	0.022	0.03	0.03	0.986
Gospić	0.317	0.1	0.1	1.194	Dubrovnik	0.020	0.1	0.1	0.981
Knin	0.266	0.25	0.3	1.171					

Posljedica hrapavosti terena je da izmjerena brzina vjetra nije reprezentativna za šire područje ukoliko ne otklonimo lokalne utjecaje na strujanje. Poznavajući lokalnu visinu hrapavosti moguće je odrediti faktor korekcije izloženosti anemometra S i to tako da se mjerena brzina vjetra V ekstrapolira na visinu stapanja z_b (*blending height*). Koncept visine stapanja zasniva se na ideji da se unutarnji granični slojevi objedinjuju na visini stapanja koja ovisi o horizontalnoj nehomogenosti terena (Claussen, 1990) i ispod koje različita područja (ovisno o hrapavosti) karakteriziraju različiti logaritamski profili brzine vjetra (Sl. 3.15 i 3.16).

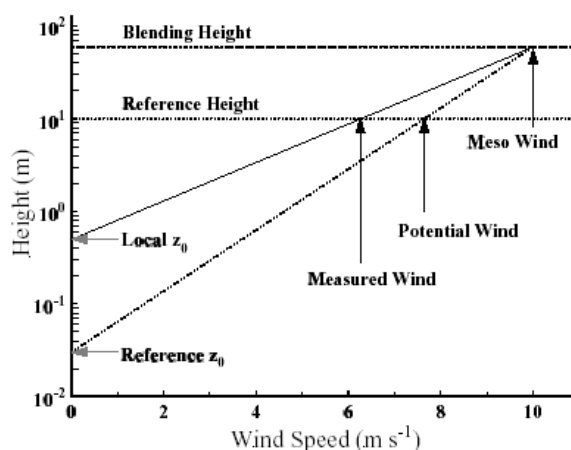
Faktor korekcije izloženosti anemometra izračunava se prema:

$$S = \frac{V_p}{V} = \frac{\ln\left(\frac{z_b}{z_0}\right) \ln\left(\frac{10}{0.03}\right)}{\ln\left(\frac{z_s}{z_0}\right) \ln\left(\frac{z_b}{0.03}\right)} \quad (3.6)$$

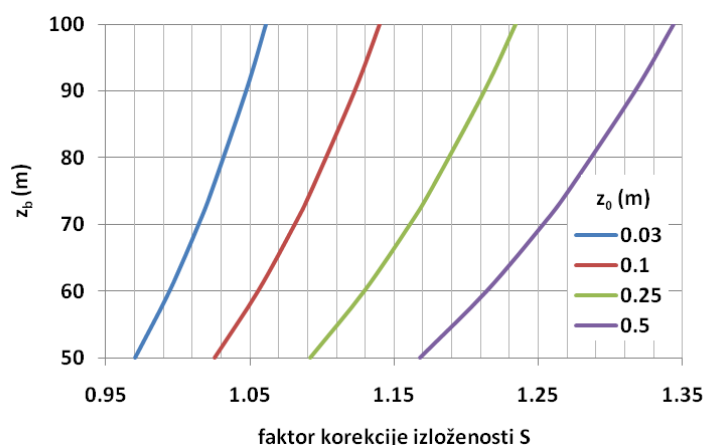
gdje je V_p potencijalna brzina vjetra, tj. brzina vjetra na visini 10 m iznad tla visine hrapavosti 0.03 m, a z_s je visina anemometra. Ovisnost faktora korekcije izloženosti o visini z_b za različite visine hrapavosti (Sl. 3.17) pokazuje da pretpostavka manje visine z_b može dovesti do podcjenjivanja potencijalne brzine vjetra i to više što je visina hrapavosti veća. Za relativno homogeno područje Nizozemske Wieringa (1986) je koristio $z_b=60$ m. U ovom će radu za visinu z_b biti uzeto 100 m čime se dobivaju nešto veći faktori korekcije izloženosti i posljedično veće potencijalne brzine vjetra, a time i veća sigurnost projektiranih građevina.



Slika 3.15. Primjer profila brzine vjetra (m/s) u prizemnom sloju atmosfere iznad terena različite visine hrapavosti z_0 u slučaju kad mjerena brzina vjetra odgovara potencijalnoj brzini $U_p=10$ m/s (brzina vjetra na visini z_b jednaka je 13.1 m/s). (preuzeto iz Wieringa, 1986).



Slika 3.16. Profil brzine vjetra za lokalnu visinu hrapavosti $z_0=0.5$ m i visinu mjerenja 10 m. (preuzeto iz Verkaik, 2000).



Slika 3.17. Ovisnost faktora korekcije izloženosti anemometra S o visini stapanja z_b za različite visine hrapavosti z_0 .

3.6. Osnovna brzina vjetra proračunata iz podataka mjerenja

Maksimalna brzina vjetra za koju se može očekivati da bude premašena u prosjeku jednom u 50 godina svedena na visinu 10 m iznad tla i teren visine hrapavosti 0.03 m u građevinskoj praksi se naziva osnovnom brzinom vjetra. Uz osnovnu brzinu vjetra uobičajeno je da konačna meteorološka podloga za proračun opterećenja vjetrom sadrži zone opterećenja vjetrom ovisne o iznosu te brzine. Kriterij zoniranja nekog područja korišten u većini europskih zemalja dan je u Tablici 3.6.

Na temelju zone opterećenja vjetrom procjenjuje se maksimalno očekivano opterećenje konstrukcije i određuju projektni parametri. Stoga je pouzdana procjena osnovne brzine vjetra nužan preduvjet za projektiranje i izgradnju sigurnih građevina otpornih na djelovanje vjetra. Osnovnu brzinu vjetra proračunamo tako da procijenjene očekivane ekstremne brzine vjetra za povratni period od 50 godina (Tablica 3.4) pomnožimo faktorom korekcije izloženosti anemometra (Tablica 3.5).

Tablica 3.7. Kriteriji zoniranja nekog područja u odnosu na osnovnu brzinu vjetra (V_b) (prema Holmes, 2001).

Zona	V_b (m/s)
I	<25
II	25-30
III	30-35
IV	35-40
V	>40

Tablica 3.8. Osnovna brzina vjetra (V_b m/s) i zona opterećenja vjetrom na analiziranim meteorološkim postajama.

Postaja	V_b (m/s)	zona opterećenja	Postaja	V_b (m/s)	zona opterećenja
Osijek Čepin	21.2	I	Rijeka	25.8	II
Gradište	18.5	I	Senj	30.4	III
Sl. Brod	17.1	I	Rab	25.6	II
Daruvar	15.0	I	Mali Lošinj	26.1	II
Čakovec	21.2	I	Novalja	29.5	II
Varaždin	19.2	I	Zadar	22.9	I
Zagreb-Mak.	15.3	I	Šibenik	26.3	II
Karlovac	16.6	I	Split-Marjan	25.4	II
Sisak	16.3	I	Makarska	32.3	III
Gorinci	16.4	I	Ploče	17.9	I
Ogulin	21.6	I	Komarna	26.3	II
Gospić	18.4	I	Dubrovnik	25.2	II
Knin	23.7	I			

Proračun daje vrijednosti osnovne brzine vjetra (Tablica 3.8) koje odgovaraju zoni I opterećenja vjetrom na postajama u kontinentalnom dijelu Hrvatske, dok one na priobalju i otocima pripadaju zoni II. Manja zona opterećenja u Zadru posljedica je tzv. „zadarske tišine“ (Makjanić, 1978; Kraljev i sur., 1995; Kraljev i sur. 2005; Stiperski i sur., 2011). Orografski utjecaj prijevoja u planinskom zaleđu uzrok je većim brzinama vjetra, a time i većoj zoni opterećenja, u Senju i Makarskoj. Naime, kompleksna trodimenzionalnost planinske prepreke Dinarida uzrok je varijaciji brzine bure ovisno o promjenjivosti terena (prijevoji, vrhovi i sl.), pa tako Vratnik iznad Senja i prijevoj iznad Makarske uzrokuju jačanje bure u zavjetrini Biokova (Grubišić, 2004).

Iako proračunate osnovne brzine na svakoj od analiziranih lokacija pokazuju opće značajke prostorne raznolikosti ove veličine, broj i položaj meteoroloških postaja s mjerenjima smjera i brzine vjetra nedovoljan je za opravdano korištenje statističkih metoda interpolacije osnovne brzine vjetra na područja bez mjerenja.

3.7. Osnovna brzina vjetra i smjer vjetra

Napredak u poznavanju aerodinamike zgrada i ostalih konstrukcija ukazao je na značaj promjenjivog odgovora konstrukcije u ovisnosti ne samo o brzini, već i o smjeru vjetra (Gomes i Vickery, 1978; Cook, 1983). U tom se slučaju procjena ekstrema provodi za svaki smjer vjetra koji značajno doprinosi opterećenju. Pri tom očekivani ekstrem brzine vjetra pojedinog smjera može premašiti onaj dobiven proračunom zanemarujući smjer. U ovakvim slučajevima tzv. „kombiniranih uzroka ekstremnih brzina vjetra“ europski standard ostavlja mogućnost da se definira korektivni faktor smjera vjetra C_{dir} kojim se množi osnovna brzina kako bi se dobila očekivana maksimalna brzina vjetra korigirana s obzirom na smjer. Iznos ovog koeficijenta dobije se dijeljenjem osnovne brzine danog smjera i osnovne brzine bez obzira na smjer vjetra.

Tablica 3.9. Osnovna brzina vjetra V_b (m/s) i osnovni tlak vjetra q_b (N/m²) neovisno o smjeru vjetra i za dva najčešća smjera vjetra na meteorološkim postajama Varaždin i Split Marjan. C_{xx} – korektivni faktor smjera vjetra xx.

	V_b (m/s)	q_b (N/m ²)	V_{bNE} (m/s)	q_{bNE} (N/m ²)	C_{NE}	V_{bSW} (m/s)	q_b (N/m ²)	C_{SW}
Varaždin	18.1	409.5	18.3	418.6	1.01	17.2	369.8	0.95
	V_b (m/s)	q_b (N/m ²)	V_{bbura} (m/s)	q_{bNE} (N/m ²)	C_{bura}	V_{bjugo} (m/s)	q_{bSE} (N/m ²)	C_{jugo}
Split Marjan	29.1	1058.5	29.4	1080.5	1.01	26.8	897.8	0.93

Tako, na primjer, razdiobe čestina smjera ekstremnih brzina vjetra za Varaždin i Split pokazuju podjednako čestu pojavu ekstremnih brzina iz dva smjera (Sl. 3.3). Primjer Varaždina (Tablica 3.9) pokazuje da je osnovna brzina vjetra SW smjera veća od one dobivene za NE-E smjer uz razliku u osnovnom tlaku od 48.8 N/m². Pri tom je osnovni tlak q_b definiran kao tlak kojim vjetar osnovne brzine V_b djeluje na građevinsku konstrukciju:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2 \quad (3.6)$$

gdje je ρ gustoća zraka. Primjer Splita, pak, pokazuje da je opterećenje burom na toj lokaciji nešto veće nego ono jugom, što dovodi do razlike u osnovnom tlaku od velikih 183.2 N/m².

Navedeni primjeri pokazuju da je na područjima s dva ili više podjednako čestih smjerova olujnog vjetra preporučljivo pri proračunu opterećenja uzeti u obzir različiti osnovni tlak za različite smjerove vjetra. Kako na velikoj većini ovdje analiziranih postaja prevladava ekstremni vjetar jednog ili dvaju susjednih smjerova, ovdje neće biti rađena analiza utjecaja smjera vjetra na iznos osnovne brzine.

4. BRZINA VJETRA NA PODRUČJIMA BEZ MJERENJA

4.1. Mezoskalni model atmosfere ALADIN i strategija gnježdenja

Prostorna reprezentativnost izmjerenih i na osnovi njih procijenjenih očekivanih maksimalnih brzina vjetra ovisi o mnogo čimbenika kao što su: položaj mjernog instrumenta u odnosu na okolne objekte, uniformnost terena na kojem se postaja nalazi (raslinje, zgrade i sl), razvijenost terena na širem području oko postaje itd. Osim u Hrvatskoj, u zemljama s kompleksnom orografijom prostorna promjenjivost brzine vjetra izuzetno je velika (npr. u Švicarskoj, Etienne i sur., 2010). Vrhovi planina, duboke doline i druge nepravilnosti terena i eventualna blizina mora u znatnoj mjeri utječu na strujanje zraka u graničnom sloju atmosfere (npr. Whitemann, 2000; Smith, 1987; Durran, 1986). Mnogi lokalni klimatski fenomeni kao i prirodni efekti kanaliziranja strujanja ili termički uzrokovane cirkulacije mogu dovesti do velikih razlika u brzini vjetra na prostorno malom području što čini prostornu interpolaciju brzine vjetra vrlo složenom. Postojeće metode mogu se svesti na dva osnovna tipa: statističke metode interpolacije i atmosferski modeli (vidi Poglavlje 1). Statistički se modeli uglavnom zasnivaju na metodi višestruke linearne regresije. Što je veći broj lokacija s mjerenjima smjera i brzine vjetra na područjima različitih topografskih karakteristika, to je dobivena prostorna razdioba brzine vjetra točnija. U slučaju s rijetkom mrežom mjernih postaja koja ne pokriva teren različitih topografskih karakteristika (različite nadmorske visine, oblike terena i sl.) češća i pouzdanija metoda je korištenje atmosferskih modela za ograničeno područje visoke razlučivosti.

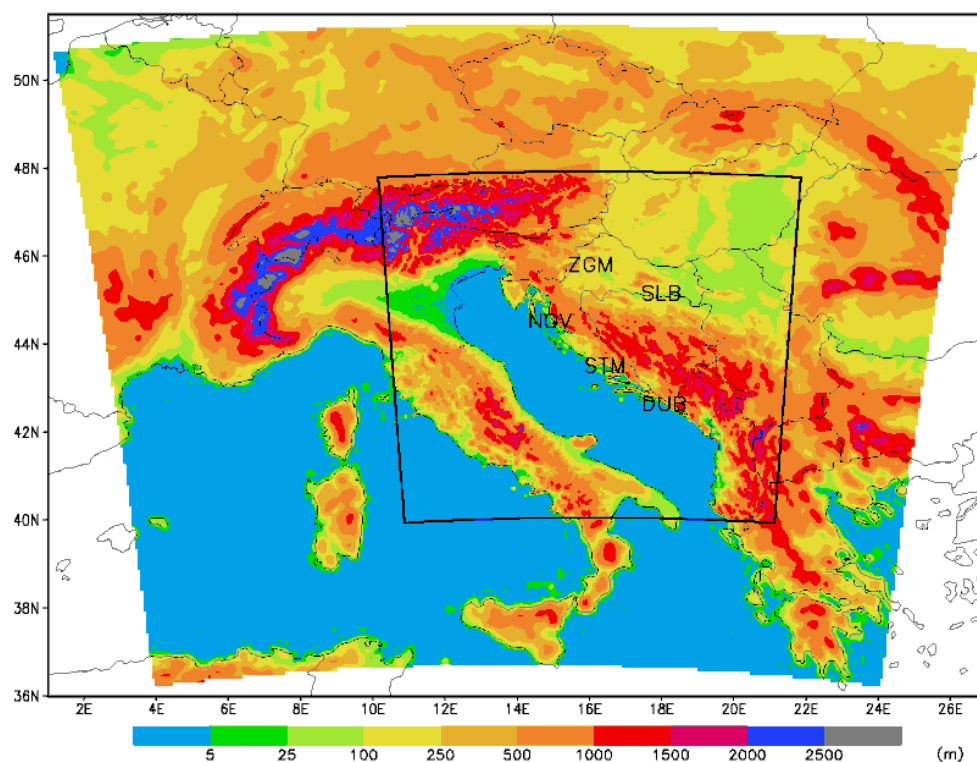
U praksi se najčešće koriste mezoskalni modeli atmosfere, kao oblik dinamičke prilagodbe na mrežu točaka veće horizontalne razlučivosti (*downscaling*) podataka reanalize globalnih modela atmosfere ili klimatskih modela (npr. Žagar i sur., 2006). Reanalize globalnih modela su uobičajeno dostupne na mrežama točaka male horizontalne razlučivosti (>100 km). Iako ti podaci mogu biti korisni za analizu brzine vjetra iznad planetarnog graničnog sloja, procjena brzine i smjera prizemnog vjetra globalnim modelima je ograničene točnosti. Razlog tome je da postavke modela i donji rubni uvjeti (teren,

prizemne nehomogenosti) nisu formulirani tako da simuliraju procese na skali manjoj od više stotina kilometara i nekoliko sati. Međutim, upravo te prostorne i vremenske skale značajno utječu na klimatologiju vjetra u složenom terenu Hrvatske, gdje su česte mezoskalne pojave kao što su bura i jugo, te lokalne obalne i planinske cirkulacije. Stoga, u našim krajevima reanalize globalnih modela nužno moraju biti prilagođene na veću horizontalnu razlučivost da bi pružile reprezentativniju i točniju informaciju o brzini i smjeru vjetra i njihovoj prostornoj promjenjivosti. Zbog svoje učestalosti i jačine, bura (npr. Smith, 1987; Bajić, 1989) i jugo (npr. Jurčec i sur., 1996) su osobito važni za procjenu očekivanih maksimalnih brzina vjetra u našem području. Kako se ova prostorno i vremenski vrlo promjenjiva atmosferska strujanja najčešće javljaju u sklopu mezoskalnih ciklonskih sustava u Sredozemlju (Horvath i sur., 2008), a i sama su određena mezoskalnom orografskom perturbacijom, sposobnost mezoskalnih meteoroloških modela za simuliranje nelinearne dinamike i termalnih karakteristika (npr. statičke stabilnosti) zračnih masa vezanih za ove pojave od izrazite je važnosti.

Kao što je pokazano u Poglavlju 2, pokrivenost Hrvatske mjernim postajama nedovoljna je da bismo dobivene osnovne brzine vjetra mogli pouzdano interpolirati na područja bez mjerenja. Za to nam je potreban dugi niz podataka brzine vjetra na što gušćoj mreži točaka. Da bismo dobili odgovarajući set ulaznih podataka potreban za procjenu očekivanih ekstrema, koristit ćemo operativni mezoskalni model atmosfere ALADIN. Uspješnost modela ALADIN i metode dinamičke adaptacije pokazane u Poglavlju 2 i drugim simulacijama mezoskalnog strujanja u regiji (npr. Ivatek-Šahdan i Tudor, 2004; Bajić i sur., 2008; Horvath i sur., 2011) važna je karakteristika koja opravdava korištenje ovog modela i za potrebe procjene očekivane maksimalne brzine vjetra na područjima bez mjerenja.

ALADIN (Bubnova i sur., 1995) je spektralni model s hibridnom η koordinatom (Simmons i Burridge, 1981), koji koristi semi-implicitnu semi-lagrangijansku shemu integracije s dva vremenska koraka (*two-time-level semi-implicit semi-lagrangian scheme*). Fizikalne parametrizacije uključuju parametrizaciju vertikalne difuzije (Louis i sur., 1982) i plitke konvekcije (Geleyn, 1987). Stratiformni i konvektivni procesi razmatraju se pojedinačno s Kesslerovom vrstom parametrizacije velike skale tzv. „razlučenom oborinom” (Kessler, 1969) i modificiranom Kuovom shemom duboke konvekcije (Geleyn i sur., 1982). Zračenje je opisano prema Geleyn i Hollingsworth (1979), te Ritter i Geleyn (1992). Vertikalni transport vlage i topline u tlu s dva sloja u modelu parametriziran je prema Giard i Bazile

(2000). Postavke hrvatske verzije modela ALADIN/HR uključuju hidrostatičku opciju s 37 vertikalnih nivoa, najniži nivo modela je na 17 m, i 8 km horizontalne razlučivosti. Domene integracije modela prikazane su na Slici 4.1.



Slika 4.1. Integracijska domena modela ALADIN/HR na 8 km horizontalne razlučivosti (vanjska domena) i domena dinamičke adaptacije na 2 km horizontalne razlučivosti (unutrašnja domena) s pripadajućim modelima terena.

Kao početni i rubni uvjeti koristile su se reanalize Europskog centra za srednjoročne prognoze vremena (ECMWF – *European Center for Medium Range Weather Forecasts*) ERA-40 (Uppala i sur., 2005), dostupne na prostornoj razlučivosti od ~125 km i vremenskom intervalu od 6 sati. ERA-40 je reanaliza podataka meteoroloških mjerenja u razdoblju 1957-2001. godina napravljena u ECMWF-u. Sustav asimilacije podataka korišten za ERA-40 temelji se na verziji koja je postala operativna u ECMWF-u sredinom 2001. godine i koja je omogućila da se iz raspoloživih podataka mjerenja ekstrahira znatno više informacija nego prethodnim verzijama asimilacijske podataka i time reanaliza učini pouzdanijom. Kako su rezultati dinamičke prilagodbe ERA-40 podataka modelom ALADIN na mrežu točaka od ~10 km horizontalne razlučivosti usporedivi bez obzira koristi li se međudomena (Beck i sur., 2004; Žagar i sur., 2006), napravljeno je direktno gniježđenje (*nesting*) modela na globalne podatke.

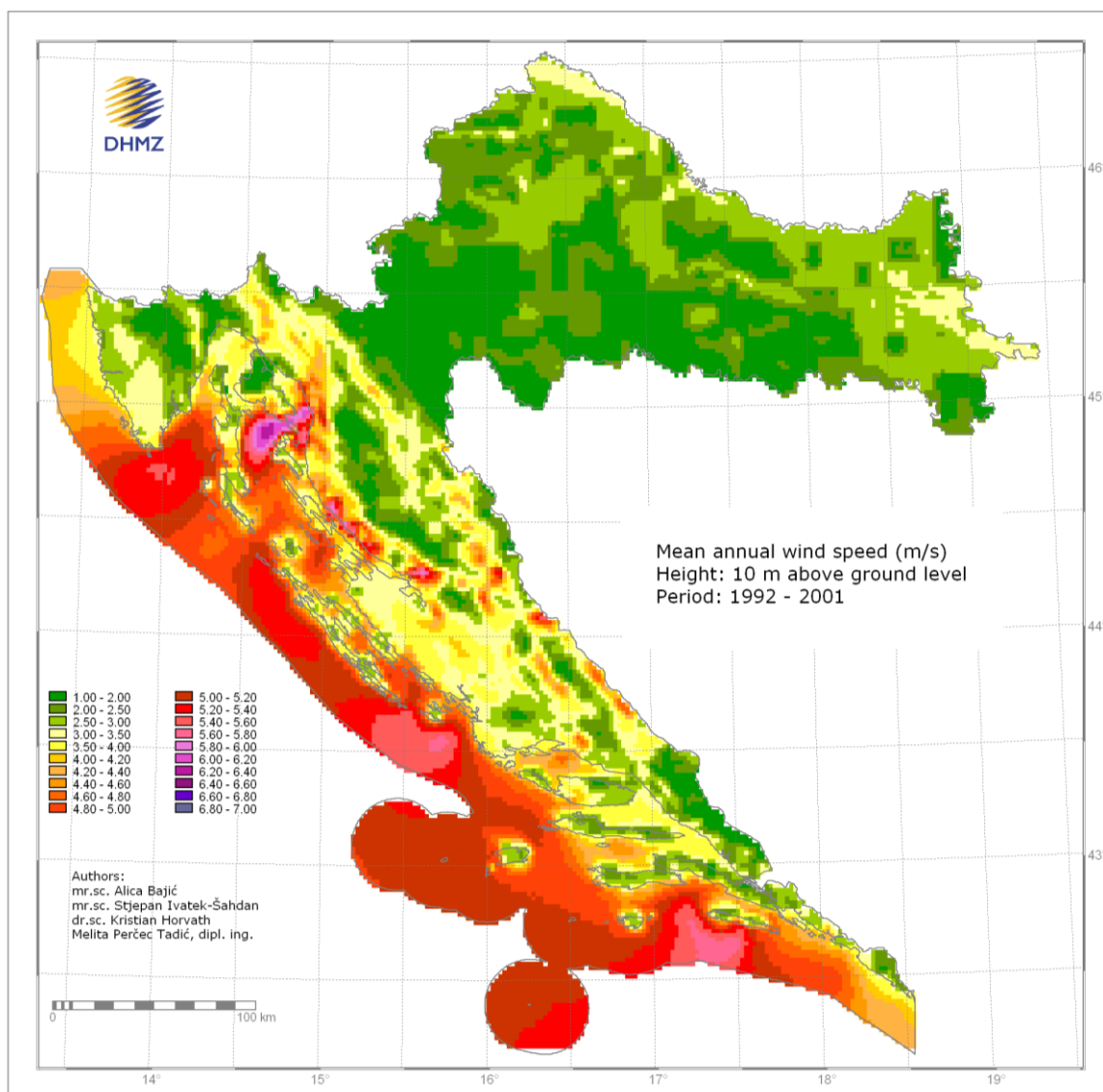
Priprema globalnih podataka za integraciju uključila je prostornu interpolaciju i korištenje filtra za digitalnu inicijalizaciju analize (Lynch i Huang, 1994). Model je inicijaliziran svakodnevno u 12 UTC i integriran kroz prognostičko razdoblje od 48 sati. Nakon starta ALADIN modela postupno dolaze do izražaja mezoskalni procesi, te do stabilizacije rezultata dolazi nakon prvih nekoliko sati prognoze (*spin-up*). Podaci su arhivirani s vremenskim intervalom od 60 minuta, pri čemu se kao vrijeme stabilizacije uzelo prvih 12 sati integracije. Ta je vrijednost konzistentna s nešto većim omjerom razlučivosti u ulaznim globalnim i izlaznim mezoskalnim podacima, te dovoljna da se razvije mezoskalna energija u ALADIN modelu (Žagar i sur., 2006). Nakon integracije podaci od 12-satnog do 35-satnog prognostičkog razdoblja s vremenskim razlučivanjem od 60 minuta svaki su dan tijekom 10 godina dinamički adaptirani (Žagar i Rakovec, 1999) na mrežu točaka horizontalne razlučivosti od 2 km na smanjenoj domeni (vidi unutrašnju domenu na Sl. 4.1). Dinamička adaptacija je napravljena upotrebom 30 vremenskih koraka, s reduciranim brojem nivoa iznad 1 km visine i uz isključene sve parametrizacije osim parametrizacije vertikalne difuzije koja emulira vertikalni turbulentni transport.

Kako bi dobiveni rezultati bili što je manje pod utjecajem promjena u postavkama modela (fizici, dinamici i numerici), do kojih dolazi tijekom razvoja i unapređenja svakog modela, kao osnova za svođenje na manju rezoluciju koriste se podaci reanalize koja sadrži rezultate istog modela s istim ulaznim podacima u dužem vremenskom razdoblju. U ovom radu su korišteni podaci ERA-40 reanalize u zadnjem raspoloživom 10-godišnjem razdoblju 1992-2001. To je razdoblje odabrano zbog toga što je za klimatsku sliku strujanja koja reprezentira razdiobu smjera i brzine vjetra na nekom prostoru potrebno raspolagati rezultatima modeliranja u razdoblju od najmanje 10 godina.

4.2. Prostorna raspodjela srednje godišnje brzine vjetra

Srednja 10-godišnja brzina vjetra na 10 m iznad tla izračunata na osnovi 10-godišnjeg niza podataka dobivena primjenom opisane metode prikazana je na Slici 4.2 (Bajić i sur., 2007; Horvath i sur., 2011). Osnovna značajka dobivene prostorne razdiobe ovog meteorološkog elementa je znatno veća srednja brzina vjetra u priobalju i na otocima, nego u kontinentalnim dijelima Hrvatske. Kopnena područja najvećih srednjih vrijednosti brzine vjetra su više planine i primorska strana Velebita. Prvo područje primarno je povezano s planinama Velebit, Lička Plješivica i Dinara. Drugo područje uključuje zapadne obronke Velebita i obalno područje u blizini, pri čemu je maksimum vidljiv kao strujanje zraka kroz prijevoj Vratnik. Velike vrijednosti srednje brzine vjetra na zapadnim obroncima Velebita prisutne su prvenstveno zbog bure, najjačeg vjetra u regiji. Izostanak takvog maksimuma na zapadnoj strani južnih Dinarida može se povezati s manjom učestalošću jake bure u tom području, ali isto tako i njezinom manjom prediktabilnošću, koju karakterizira podcjenjivanje snage bure na južnom Jadranu (Horvath i sur., 2009). Kanaliziranje strujanja kroz prolaz Vratnik (npr. Gohm i sur., 2008), dobro poznato područje učestale i jake bure, dodatno pogoduje povećanju brzine vjetra u tom području. Područje povećanih vrijednosti brzine vjetra proteže se gotovo do otoka Cresa poprimajući pritom prostornu razdiobu bure prema hidrauličkoj teoriji (Smith, 1985) i dostižući apsolutni maksimum srednje brzine vjetra između Cresa, Krka i Raba (~6.5 m/s). S druge strane, nepostojanje takvog područja povećanih srednjih vrijednosti brzine vjetra nad morem u blizini južnog dijela Velebita ukazuje na drugačiji mehanizam nastajanja bure, povezan s jakim navjetrinskim blokiranjem strujanja, izokretanjem izentropa i slamanjem težinskih valova odnosno stvaranjem lokalnih kritičnih nivoa u zavjetrini (npr. vidi reviziju novih saznanja o buri u Grisogono i Belušić, 2008). Ove vrijednosti su slične onima u radu Penzar i sur. (2001) gdje je pokazano da se srednja brzina vjetra na obalnom i otočnom području kreće od 3 m/s do 6 m/s. Područja s najmanjim srednjim 10-godišnjim brzinama vjetra su područje središnje Hrvatske, Ličkog polja, unutrašnjosti Istre i zaleđa Ploča. Na 10 m iznad tla srednja godišnja brzina vjetra tu je manja od 2 m/s.

Ovi rezultati nedvojbeno pokazuju da je bura vjetar koji postiže najveće brzine i koji posljedično u najvećoj mjeri opterećuje građevinske konstrukcije na priobalju i otocima.



Slika 4.2. Prostorna raspodjela srednje 10-godišnje (1992-2001) brzine vjetra (m/s) na 10 m iznad tla, kao direktan izlaz modela dinamičke adaptacije na mreži od 2 km horizontalne razlučivosti (preuzeto iz Bajić i sur, 2007).

4.3. Verifikacija rezultata modela

Za ocjenu uspješnosti ALADIN modela u simuliranju strujanja na području Hrvatske, proračunali smo nekoliko osnovnih statističkih mjera uspješnosti rada modela. Proračunate su sljedeće veličine: koeficijent korelacije (r), bias (BIAS), srednja apsolutna pogreška (MAE) i srednja kvadratična pogreška (RMSE) (prema npr. Willmott, 1982).

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N V_{MJE_i} V_{MOD_i} - \sum_{i=1}^N V_{MJE_i} \sum_{i=1}^N V_{MOD_i}}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N V_{MJE_i}^2 - \left(\sum_{i=1}^N V_{MJE_i}\right)^2} \sqrt{N \sum_{i=1}^N V_{MOD_i}^2 - \left(\sum_{i=1}^N V_{MOD_i}\right)^2}} \quad (4.1)$$

$$BIAS = \left(\frac{\bar{V}_{MOD} - \bar{V}_{MJE}}{\bar{V}_{MJE}} \right) \times 100\% \quad (4.2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_{MJE_i} - V_{MOD_i}| \quad (4.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{MOD_i} - V_{MJE_i})^2} \quad (4.4)$$

gdje je V_{MJE} izmjerena, a V_{MOD} modelirana brzina vjetra, $\bar{V}_{MJE}$ i $\bar{V}_{MOD}$ su njihove srednje vrijednosti, a N je broj podataka. Statistička signifikantnost korelacije između izmjerenih i modeliranih vrijednosti ocijenjena je standardnim Studentovim t-testom (Wilks, 2006).

Niti jedna od ovih veličina nije samostalno dovoljna za ocjenu uspješnosti rada modela, jer svaka od njih ima svoje prednosti i mane. Stoga smo ovdje za potrebe ocjene uspješnosti modela proračunali sve navedene veličine. Proračun je rađen za 2001. godinu kako bi se mogao provesti za maksimalni broj postaja i kako bi rezultati bili usporedivi za sve postaje. Razdoblje prije 2001. godine nije analizirano jer su tada kontinuirana mjerenja 10-minutnih brzina vjetra postojala na malom broju postaja (vidi Tablicu 3.1), a i broj nedostajućih podataka u početnim godinama mjerenja često je bio veći od 20%.

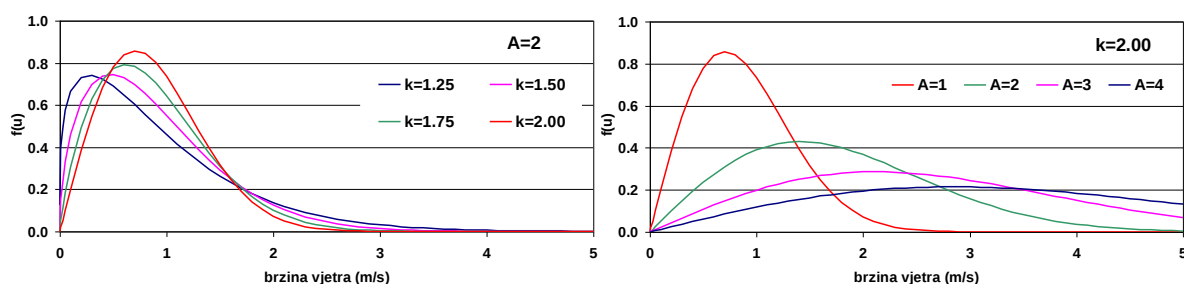
Verificirajući rezultate modela moramo imati u vidu ograničenja koja proizlaze i iz podataka i iz modela. Podatak u točki modela srednja je vrijednost koja se odnosi na kvadrat veličine 2 km x 2 km, a sama se točka modela najčešće ne podudara s točkom mjerenja. Stoga se podaci modela često uspoređuju s bilinearno interpoliranim podacima

susjednih točaka mreže. Međutim, u uvjetima naglih promjena visine terena i prelaska s kopna na more, opravdanije je uzeti podatak u najbližoj točki mreže modela koja se nalazi na nadmorskoj visini najbližoj visini mjerne postaje.

Prvi korak u usporedbi mjerenih i modeliranih podataka je usporedba razdioba brzina vjetra. U tu se svrhu podacima brzine vjetra prilagođava dvoparameterska Weibullova razdioba kao najčešće korištena za prikaz razdiobe vjerojatnosti ovog meteorološkog elementa. Primjenjivost Weibullove razdiobe za prilagodbu podacima brzine vjetra na našem području dokazana je u radovima Poje (1996) i Jeromel i sur. (2009). Weibullova dvoparameterska funkcija razdiobe ima oblik:

$$F(V) = \frac{k}{A} \left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{V}{A}\right)^k \right] \quad (4.5)$$

gdje je A parametar skale i ima dimenziju brzine vjetra, a k je bezdimenzionalan parametar oblika, a V brzina vjetra.

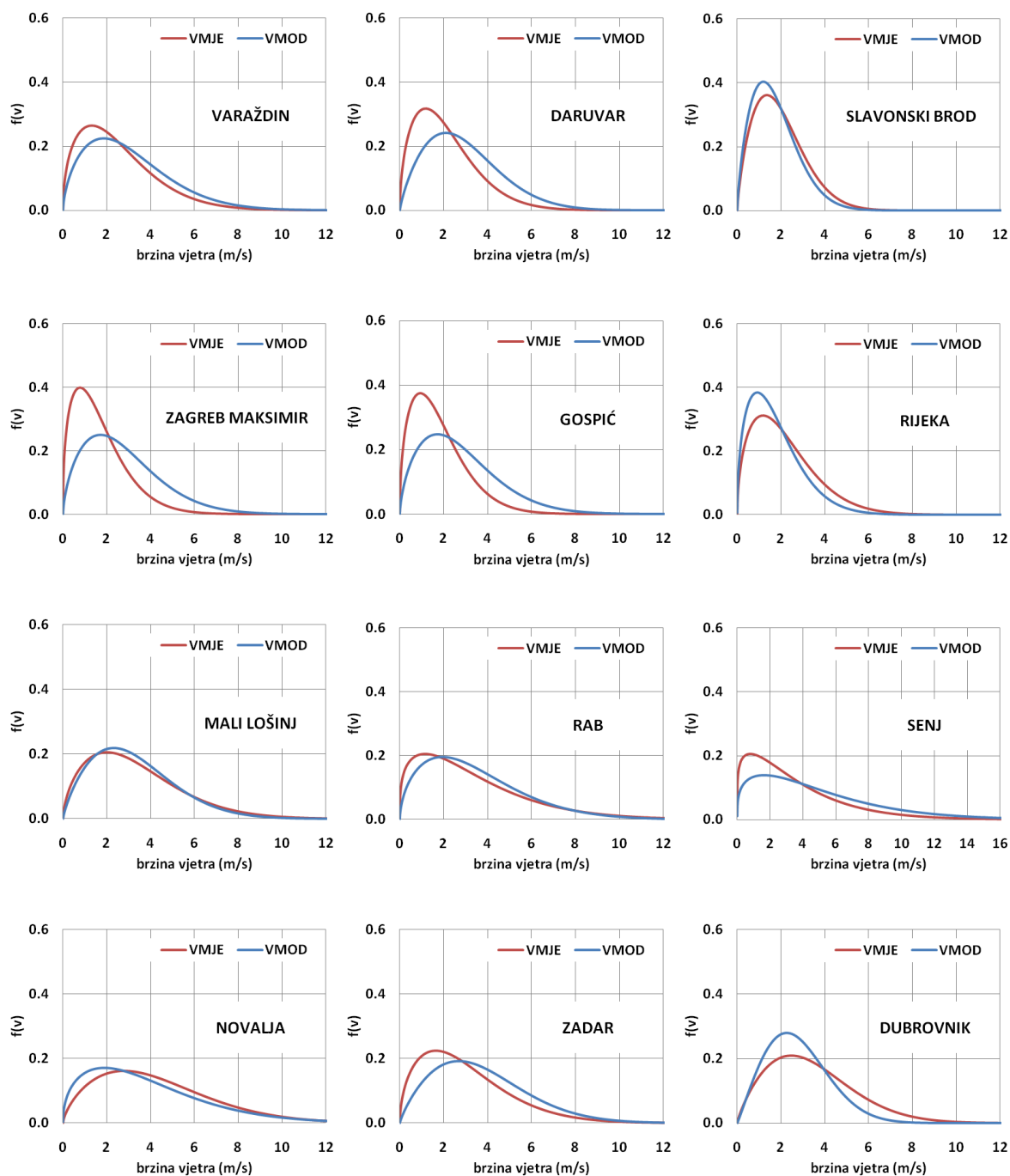


Slika 4.3. Oblik Weibullove razdiobe za različite vrijednosti parametra k (lijevo) i A (desno).

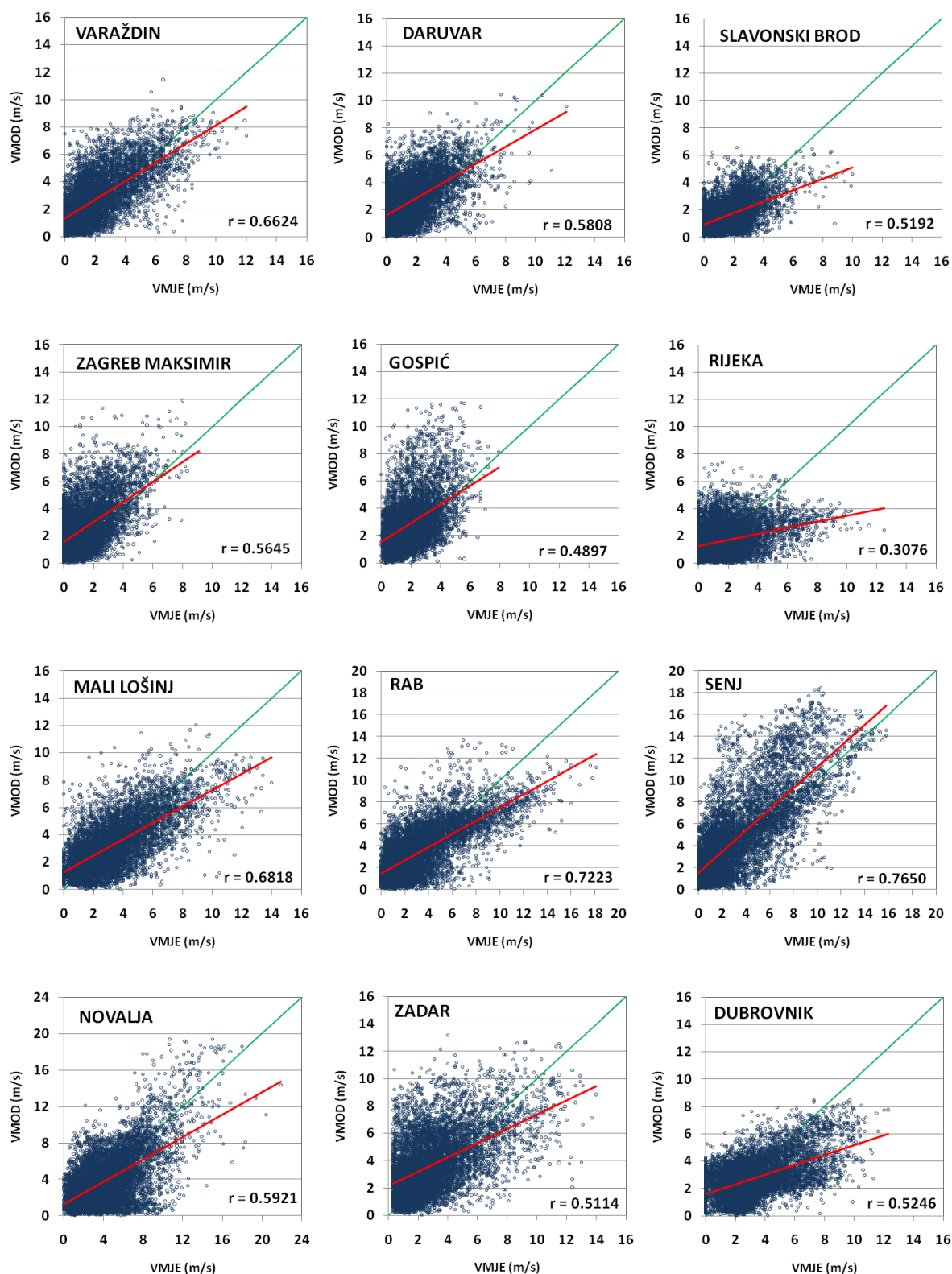
Utjecaj vrijednosti parametra k na oblik krivulje razdiobe brzine vjetra dan je na Slici 4.3 i pokazuje da se za manji k maksimum krivulje pomiče k manjim vrijednostima brzine vjetra, ali je njen desni kraj izduljen, tj. vjerojatnost za velike brzine je veća što je k manji. Promjena parametra A znatno više utječe na izgled krivulje vjerojatnosti (Sl. 4.3). Dvostruko povećanje iznosa parametra A uzrokuje razvučenost krivulje ka većim vrijednostima brzine vjetra i manju maksimalnu vrijednost vjerojatnosti.

Usporedba razdioba pridijeljenih mjerenim i modeliranim podacima brzine vjetra za 2001. godinu (Sl. 4.4) pokazuje dobru podudarnost za veći dio promatranih lokacija. Najveća se odstupanja primjećuju u području malih brzina vjetra za koje model najčešće daje manju vjerojatnost pojavljivanja od one dobivene iz mjerenih podataka. Budući da se ovdje

analiziraju ekstremne brzine vjetra, područje vrlo dobrog poklapanja krivulja pridijeljenih modeliranim i mjerenim podacima za velike brzine vjetra opravdava korištenje modeliranih vrijednosti u analizi ekstremnih brzina vjetra.



Slika 4.4. Weibullove razdiobe pridijeljene mjerenim (VMJE, crvena linija) i modeliranim (VMOD, plava linija) brzinama vjetra 2001. godine na odabranim meteorološkim postajama u Hrvatskoj.

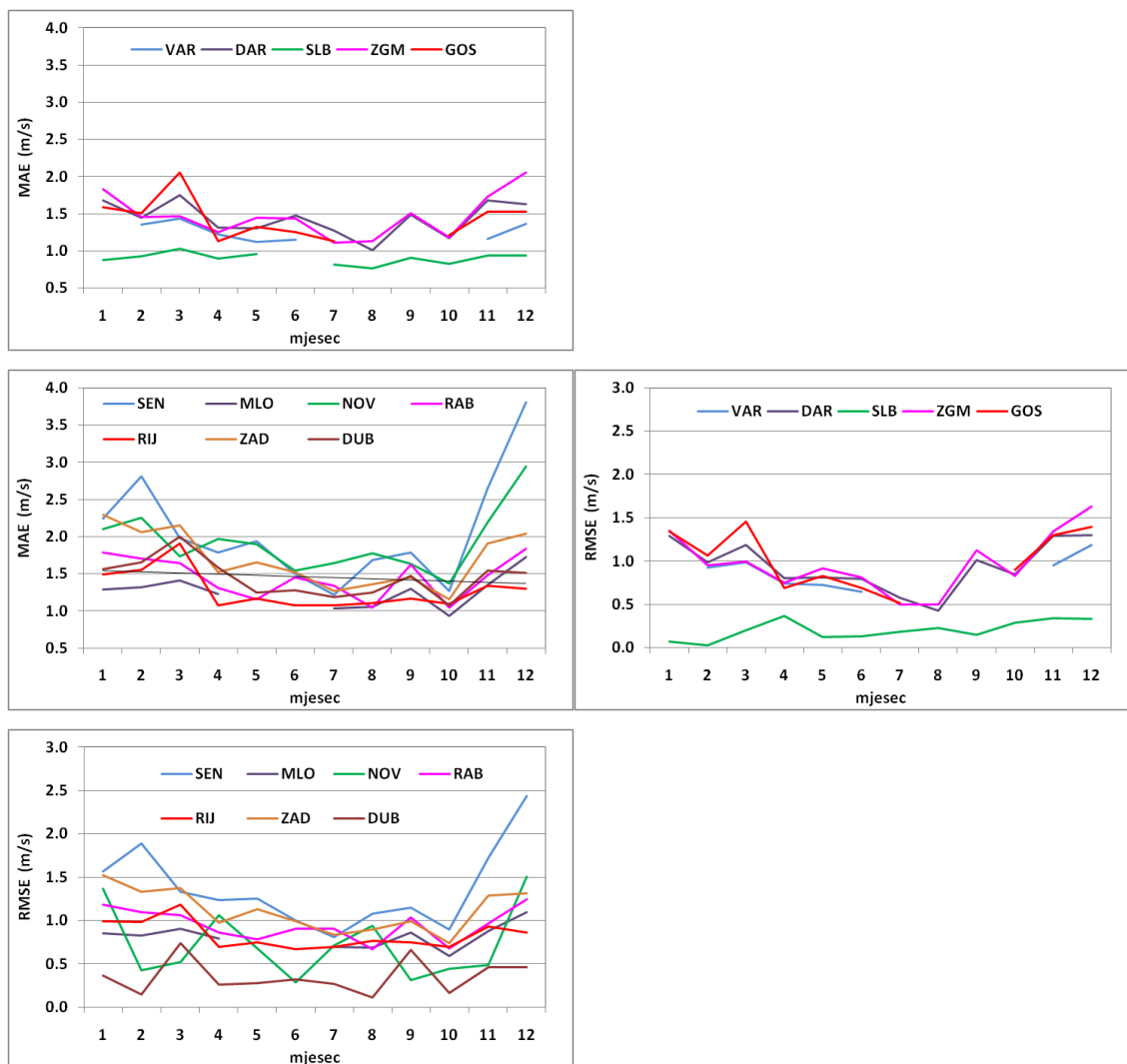


Slika 4.5. Odnos mjenjenih (VMJE) i modeliranih (VMOD) brzina vjetra tijekom 2001. godine. Crvena linija je regresijski pravac, a r koeficijent korelacije mjenjenih i modeliranih brzina vjetra. Dijagonalna zelena linija označava regresijski pravac koji bi se dobio u slučaju potpunog podudaranja mjenjenih i modeliranih brzina vjetra.

Analiza korelacije mjerenih i modeliranih brzina vjetra pokazuje da je na svim analiziranim lokacijama linearna korelacija statistički signifikantna na razini 5%. Međutim, jasno se uočava (Sl. 4.5) da model precjenjuje male brzine vjetra, a podcjenjuje velike. Odstupanja modeliranih i mjerenih brzina vjetra (Tablica 4.1) najveća su za Zagreb Maksimir (najveći BIAS) što je posljedica položaja mjerne postaje u sub-urbanoj sredini pojačanog prizemnog trenja i time manje izmjerene brzine vjetra. Slična je situacija i za Senj. Velike razlike na lokacijama Daruvara, Gospića i Zadra najvjerojatnije su posljedica interpretiranja orografije u modelu, tj. nedovoljnog razlučivanja postojećih specifičnosti terena na širem području spomenutih lokacija. Apsolutni iznos pogreške (MAE) kreće se od 0.90 m/s u Slavonskom Brodu do 2.02 m/s u Senju. Model na većini lokacija podcjenjuje prosječnu brzinu vjetra u odnosu na mjerenja, što ne mora značiti pogrešku modela, već može biti i posljedica nereprezentativnosti položaja mjernog instrumenta za kvadrat mreže 2 km x 2 km. Uz to precjenjivanje prosječne brzine vjetra koje se uočava na većini analiziranih lokacija dijelom je posljedica podcjenjivanja brzina vjetra u situacijama s jakim i olujnim vjetrom. Mogući razlozi za to su reprezentacija orografije u modelu, nedostaci fizikalnih parametrizacija korištenih u modelu, kvalitete donjih graničnih uvjeta, pogreške reanalize i propagacije informacije sinoptičke skale kroz zonu povezivanja (*coupling zone*).

Tablica 4.1. Statistički pokazatelji uspješnosti ALADIN modela u simuliranju brzine vjetra tijekom 2001. godine. NP - broj nedostajućih podataka (%), r – koeficijent korelacije, MAE – srednja apsolutna pogreška, BIAS – bias, RMSE – srednja kvadratična pogreška.

postaja	NP	r	MAE	BIAS	RMSE
Varaždin	25.2	0.662	1.27	25.30	0.86
Daruvar	0.0	0.581	1.43	72.63	0.94
Sl. Brod	3.0	0.519	0.90	-1.65	0.21
Zagreb M.	2.3	0.565	1.47	93.47	0.98
Gospić	6.9	0.490	1.40	57.51	0.98
Rijeka	1.0	0.308	1.26	-8.60	0.85
M. Lošinj	6.4	0.682	1.26	-1.19	0.83
Rab	0.0	0.722	1.45	5.92	0.96
Senj	2.5	0.765	2.02	45.17	1.41
Novalja	0.3	0.592	1.92	-8.85	0.71
Zadar	0.7	0.511	1.70	27.24	1.14
Dubrovnik	0.3	0.525	1.44	-16.58	0.35



Slika 4.6. Mjesečne vrijednosti srednje apsolutne pogreške (MAE u m/s) i srednje kvadratične pogreške RMSE (m/s) simulacije brzine vjetra ALADIN modelom za 12 postaja na području Hrvatske za 2001. godinu.

Analiza godišnjeg hoda srednje apsolutne i srednje kvadratične pogreške (Sl. 4.6) pokazuje da do najvećih odstupanja modeliranih i mjerenih brzina vjetra dolazi u unutrašnjosti u proljeće i krajem godine, dok se u priobalju izdvajaju studeni i prosinac 2001. godine i to posebno u Senju i Novalji. U tim je mjesecima čestina vjetra velikih brzina najveća, pa dolazi do izražaja već spomenuto podcjenjivanje modela u situacijama s ekstremnim brzinama vjetra.

Iako rezultati verifikacije uključuju i pogrešku mjerenja i pogrešku modela, pogreške točnosti mjerenja, kalibracije mjernog instrumenta i reprezentativnosti (pogreška zbog nepodudarnosti vremenske i prostorne skale na koje se odnose podaci mjerenja i modela) nisu uzete u obzir pri verifikaciji. Procjene posljednje, najveće među tim pogreškama, kreću se općenito oko 1

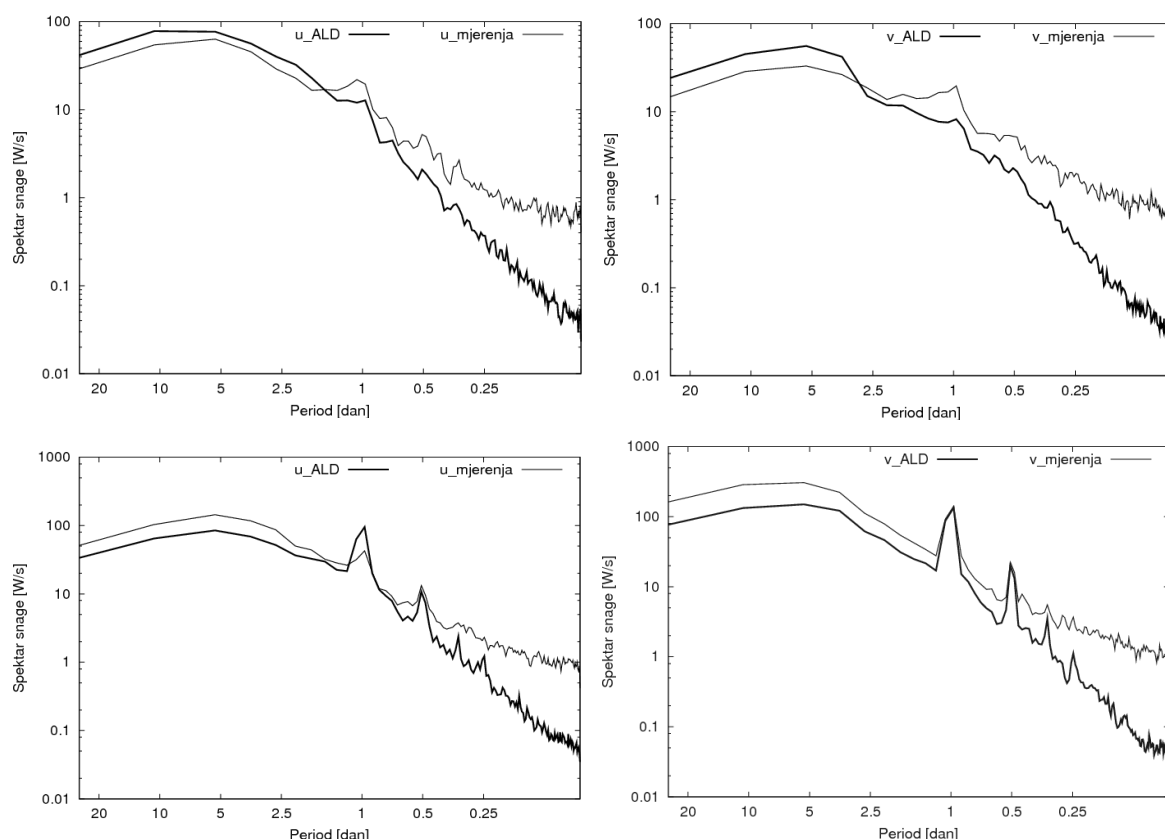
m/s (Rife i sur., 2004) za prizemni vjetar u dobro izmiješanom prizemnom graničnom sloju i u složenom terenu. Vrijednost od 1 m/s ujedno se slaže i s razlikom između objektivne analize velike razlučivosti i podataka mjerenja nad Alpama (Steinecker i sur., 2000). Apsolutna pogreška modela ALADIN nešto je veća, ali samo na dvije lokacije prelazi 2 m/s.

Kako se dio postaja nalazi u složenom terenu i u blizini mora, očekuje se da je značajan dio energije strujanja na tim postajama zastupljen u mezoskalnim dnevnim i kraće nego dnevnim vremenskim skalama i procesima, čije je simuliranje jedna od dodatnih vrijednosti mezoskalnih u usporedbi s globalnim modelima. Stoga je dodatno napravljena i spektralna verifikacija vremenskih nizova brzine vjetra (Bajić i sur., 2007; Horvath i sur., 2011). Spektralnom dekompozicijom ulaznog signala (npr. niz vrijednosti brzine vjetra) možemo dobiti informaciju koliko je snage vezano za određene frekvencije tj. periode gibanja. Tako dobivamo informaciju o relativnoj snazi procesa na raznim vremenskim skalama. U usporedbi s konvencionalnom verifikacijom koja identificira samo postojanje i iznos pogreške (BIAS, RMSE), spektralna metoda omogućuje detaljniji uvid i lakšu identifikaciju uzroka pogrešaka u rezultatu, odnosno bolji fizikalni uvid u točnost rezultata modela. Spektralna verifikacija vremenskih nizova brzine vjetra dobivenih modelom ALADIN napravljena je za postaje Slavonski Brod i Dubrovnik, usporedbom izmjerenog i modeliranog (modelom ALADIN na 8 km horizontalne razlučivosti) spektra snage za u i v komponentu vjetra. Slično kao u Rife i sur. (2004) vremenska domena spektra snage podijeljena je na 3 područja: kraće od dnevnog s periodom 2-22 sata, dnevno s periodom 22-26 sati i duže od dnevnog s periodom većim od 26 sati.

Spektri snage za horizontalne komponente vjetra za postaju Slavonski Brod (Sl. 4.7) pokazuju da se najveći dio spektra nalazi u području perioda oko tjedan dana. To su vremenske skale sinoptičkih gibanja (ciklone, anticiklone) i snaga tih skala je dobro reprezentirana u modelu, uz malu precijenjenost u obje komponente vjetra. Sekundarni maksimum u spektru snage nalazi se u dnevnom području, i taj je maksimum u modelu prisutan, iako je donekle podcijenjen. Vjerojatan razlog za prisutnost dnevnog maksimuma je blaga planinska cirkulacija zbog postojanja niskog gorja (Dilj) sjeverno od postaje. Osnovno obilježje analiziranih spektara je nedostatak snage kraće od dnevnih cirkulacija u modelu, posebno za periode manje od 12 sati.

Ukupno gledajući, spektralna snaga za postaju Dubrovnik veća je nego na postaji Slavonski Brod za strujanja svih vremenskih perioda (Sl. 4.7). I na ovoj postaji dio spektra na skalama dužim od dnevne dobro je prikazan modelom, koji za razliku od postaje Slavonski Brod donekle podcjenjuje spektralnu snagu na tim vremenskim skalama. Sekundarni maksimum spektralne snage postoji za dnevne skale gibanja, gdje model vrlo točno procjenjuje spektralnu snagu, uz manje precjenjivanje snage u u komponenti vjetra. U tom dnevnom maksimumu energije je, pored planinske, vjerojatno prisutna i obalna cirkulacija. Za razliku od rezultata dobivenih za Slavonski Brod ovdje uočavamo postojanje i tercijarnog maksimuma na vremenskim skalama od 12 sati, koji je modelom izvrsno reprezentiran. Međutim, kao i na postaji Slavonski Brod, dio spektralnog područja s periodima manjima od 12 sati je modeliranim vrijednostima podcijenjen.

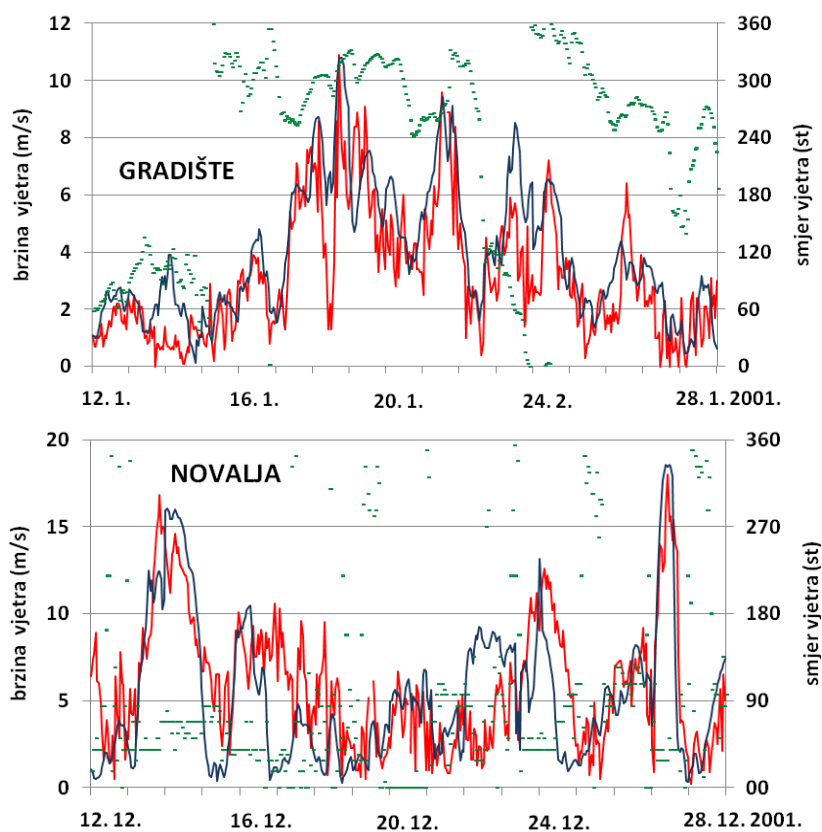
Sličan rezultat dobiven je i dinamičkom prilagodbom vjetra za područje Slovenije neovisno o veličini domene i strategiji gniježđenja (Žagar i sur., 2006). To ukazuje da model ALADIN ima teškoća s formiranjem dijela mezoskalne energije na malim vremenskim skalama. Mogući uzrok tome je slaba prediktabilnost gibanja na vremenskoj skali kraćoj od dana, kako prostorna, tako i vremenska, problemi u njihovu prikazu tijekom asimilacije podataka i/ili prejaka numerička difuzija u modelu.



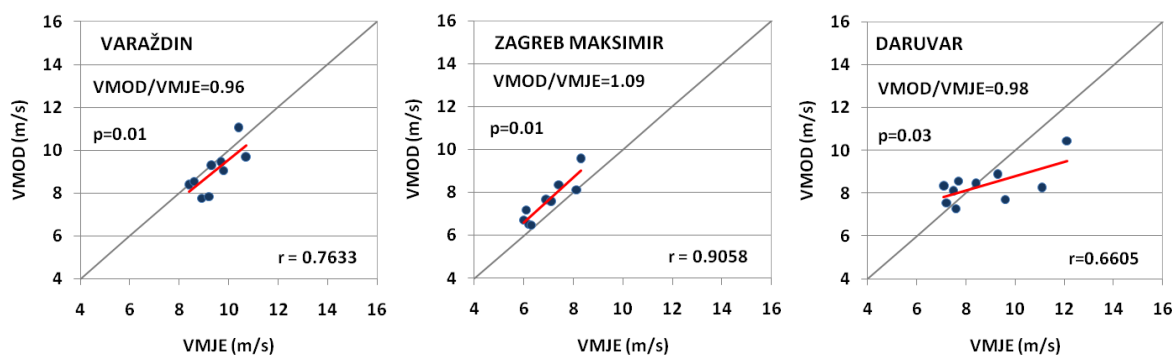
Slika 4.7. Spektar snage zonalnih u (lijevo) i meridionalnih v (desno) komponenata vjetra za postaje Slavonski Brod (gore) i Dubrovnik (dolje) izračunat iz mjerenja (tanka linija) i podataka modela ALADIN (debela linija) za 2001. godinu. (Preuzeto iz Bajić i sur. 2007.)

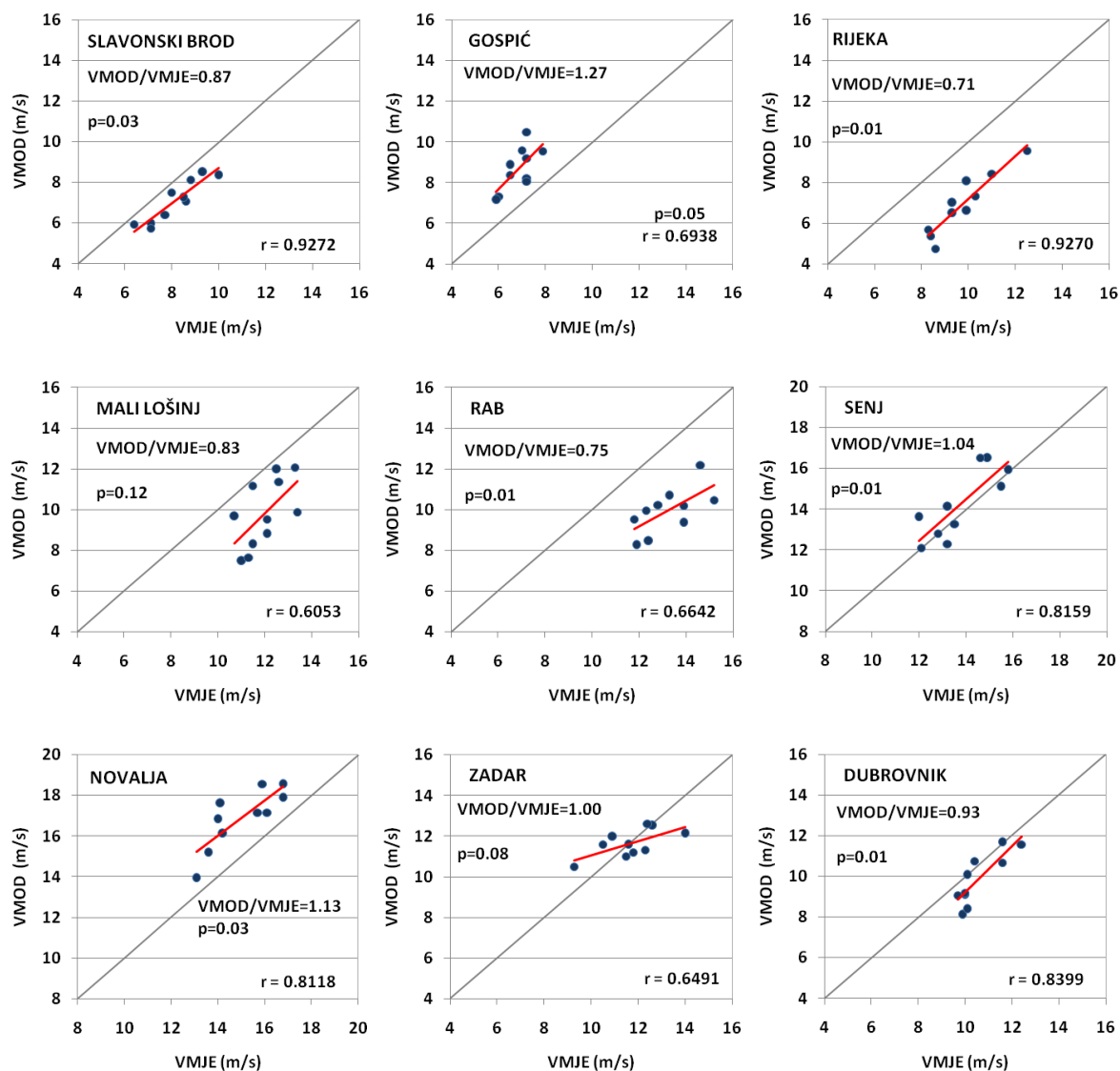
Kako je područje interesa ovog rada ekstremna brzina vjetra, detaljnije je analizirana uspješnost modela da simulira velike brzine vjetra. Dosadašnja istraživanja su pokazala da model vrlo dobro prepoznaje situacije s olujnim vjetrom (Bajić i sur., 2008; Ivatek-Šahdan i Tudor, 2004). To potvrđuju i primjeri situacija s olujnim vjetrom opisani u Poglavlju 2. Višednevni hodovi modelirane i mjerenje brzine vjetra na jednoj postaji u unutrašnjosti i jednoj na otoku (Sl. 4.8) pokazuju da, ne samo što je prepoznata ekstremna situacija, nego se i iznosi modeliranih i mjerenih maksimalnih brzina vjetra neznatno razlikuju. Da bismo utvrdili da li je to tako na području čitave Hrvatske, ispitali smo odnos maksimalnih brzina vjetra u 10 nezavisnih situacija s najvećim brzinama tijekom 2001. godine na 12 lokacija (Sl. 4.9 i Tablica 4.2). Rezultati pokazuju da na svim analiziranim postajama osim Malog Lošinja i Zadra postoji statistički signifikantna korelacija na razini 0.05% između izmjerenih i modeliranih brzina vjetra. Pokazuje se da model podcjenjuje maksimalne brzine

vjetra na većini postajama s čijim podacima je rađena usporedba što pokazuju i dijagrami raspršenja na Sl. 4.9. To je u skladu s prethodno opisanim rezultatima verifikacije svih brzina vjetra.



Slika 4.8. Primjeri usporednih hodova mjerenih (crvena linija) i modeliranih (plava linija) brzina vjetra u situacijama s ekstremnom brzinom vjetra na meteorološkim postajama Gradište za razdoblje 12-28. 1. 2001. i Novalja za razdoblje 12-28. 12. 2001. Smjer vjetra (zelene crtice) je mjereni.





Slika 4.9. Odnos mjenjenih (V_{MJE}) i modeliranih (V_{MOD}) brzina vjetra u 10 situacija s ekstremnim brzinama tijekom 2001. godine na odabranim meteorološkim postajama u Hrvatskoj. V_{MOD}/V_{MJE} – srednji omjer modeliranih i mjenjenih ekstremnih brzina vjetra, r – koeficijent korelacije, p – prag vjerojatnosti za koji je koeficijent korelacije statistički signifikantan. Dijagonalna linija označava regresijski pravac koji bi se dobio u slučaju potpunog podudaranja mjenjenih i modeliranih brzina vjetra.

Tablica 4.2. Srednji omjer ekstremnih modeliranih (V_{MOD}) i mjenjenih (V_{MJE}) brzina vjetra bez korekcije zbog razlike u visini hrapavosti mjerne lokacije (z_{0MJE}) i najbliže točke modela (z_{0MOD}) i korigiranih na teren visine hrapavosti $z_0=0.03$ m ($(V_{MOD}/V_{MJE})_{COR}$) za odabrane postaje na području Hrvatske u 10 situacija s ekstremnom brzinom vjetra. NP-broj nedostajućih podataka (%), r – koeficijent korelacije modeliranih i mjenjenih brzina vjetra, p – prag vjerojatnosti za koji je koeficijent korelacije statistički signifikantan.

postaja	NP	r	p	z_{0MJE}	z_{0MOD}	V_{MOD}/V_{MJE}	$(V_{MOD}/V_{MJE})_{cor}$
Varaždin	25.2	0.7633	0.01	0.069	0.114	0.959	0.987
Daruvar	0.0	0.6605	0.05	0.255	0.107	0.975	0.914

Sl. Brod	3.0	0.9272	0.01	0.124	0.102	0.870	0.860
Zagreb M.	2.3	0.8733	0.01	0.439	0.435	1.087	1.074
Gospić	6.9	0.6938	0.05	0.317	0.106	1.265	1.161
Rijeka	1.0	0.9270	0.01	0.513	1.474	0.706	0.853
M. Lošinj	6.4	0.6053	0.12	0.177	0.332	0.831	0.878
Rab	0.0	0.6642	0.01	0.165	0.753	0.753	0.888
Senj	2.5	0.8159	0.01	0.298	0.773	1.035	1.165
Novalja	0.3	0.8118	0.03	0.157	0.041	1.127	1.044
Zadar	0.7	0.6491	0.08	0.016	0.083	1.004	1.079
Dubrovnik	0.3	0.8399	0.01	0.053	0.140	0.931	0.985

Utjecaj različite visine hrapavosti na razlike u mjerenim i modeliranim brzinama vjetra možemo svesti na minimum korigirajući brzine vjetra na uvjete koje zahtjeva proračun osnovne brzine vjetra (visina 10 m iznad tla i teren visine hrapavosti 0.03 m) koristeći metodu opisanu u Poglavlju 3. Visina hrapavosti u modelu dobivena je interpolacijom visine hrapavosti dane na mreži točaka $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ na temelju vegetacijske karte Europe proračunate iz AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) podataka i ESA (*European Space Agency*) podataka o šumskom pokrovu (vidi dokumentaciju ALADIN modela na <http://www.cnrm.meteo.fr/gmapdoc/>). Kako se u ulaznim ALADIN klimatskim datotekama visine hrapavosti mijenjaju iz mjeseca u mjesec (ovisno o stanju vegetacije), visine hrapavosti koje smo pridijelili točki modela najbližoj mjernoj postaji su prosječne godišnje vrijednosti ove veličine (z_{MOD} u Tablici 4.2).

Omjer brzina vjetra dobivenih modelom i mjerenjima korigiranih na visinu hrapavosti 0.03 m i visinu iznad tla 10 m (Tablica 4.2) pokazuje da se modelirane vrijednosti razlikuju od mjerenih za $\pm 17\%$. Ovaj je rezultat u skladu s rezultatima drugih autora. Naime, simulacije provedene regionalnim klimatskim modelima koji su razvijeni na osnovi operativnih prognostičkih modela (Walter i sur., 2006, Kunz i sur., 2010) i opće raspoloživim modelima kao što je MM5 (*Penn State/NCAR nonhydrostatic mesoscale model*) (npr. Dailey i Keller, 2002 ili Walter i sur., 2006) pokazale su da modeli vrlo dobro opisuju prostornu klimatologiju ekstremnih brzina vjetra. Pokazano je da modeli uglavnom podcjenjuju maksimalne brzine vjetra u iznosu od 10-30% ovisno o lokaciji i visini terena i horizontalnoj razlučivosti modela. Bez obzira na navedene razlike, spomenuti

autori smatraju primjenu modeliranih vrijednosti za ocjenu očekivanih maksimalnih brzina vjetra na mreži točaka velike razlučivosti opravdanom. Uzimajući u obzir prethodno navedene uzroke koje dovode do razlika između mjerenih i modeliranih vrijednosti i ovdje ćemo dobivenu razliku između mjerenih i modeliranih ekstremnih brzina vjetra smatrati prihvatljivom za potrebe procjene očekivanih maksimalnih brzina vjetra. Prihvatljivost modeliranih brzina vjetra za proračun osnovne brzine pokazat će i usporedba samih osnovnih brzina vjetra dobivenih iz mjerenih i modeliranih podataka koja slijedi. Međutim, da bismo mogli provesti spomenutu usporedbu potrebno je najprije dokazati reprezentativnost za dugogodišnju klimu brzine vjetra u razdoblju s podacima mjerenja 2005-2009. i onih u razdoblju s podacima modela 1992-2001. godine.

4.4. Reprezentativnost razdoblja s modeliranim podacima brzine vjetra

Kao što je prethodno već rečeno, korištenje kratkog niza podataka za procjenu očekivanih ekstrema dat će vjerodostojne rezultate samo u slučaju ako je razdoblje s podacima reprezentativno za dugogodišnju klimu dane lokacije. Pokazani izostanak značajnijeg trenda maksimalnih brzina vjetra i broja ekstremnih situacija u 30-godišnjem razdoblju 1980-2009. osnovni je pokazatelj da se i razdoblje s mjerenjima (2005-2009) i razdoblje s modeliranim brzinama vjetra (1992-2001) mogu smatrati klimatski reprezentativnima za analizirane veličine. Međutim, da bismo dodatno pokazali reprezentativnost brzine vjetra u tim razdobljima i opravdali usporedbu procijenjenih maksimalnih očekivanih brzina vjetra dobivenih na osnovi podataka mjerenja i modela, provjerit ćemo da li se razdiobe brzine vjetra u ta dva razdoblja statistički signifikantno razlikuju međusobno i od razdiobe brzine za cjelokupno 30-godišnje razdoblje.

Provjera se zasniva na testiranju nul-hipoteze da podatke čitavog razdoblja prezentira ista funkcija vjerojatnosti. Pri tom se koristi test omjera maksimalne vjerojatnosti (npr. Wilks, 1995):

$$\Lambda^* = 2 \ln \left[\frac{\Lambda(H_A)}{\Lambda(H_0)} \right] = 2[L(H_A) - L(H_0)] \quad (4.6)$$

$\Lambda(H_A)$ i $\Lambda(H_0)$ su funkcije vjerojatnosti za alternativnu i nul-hipotezu. $L(H_A) = \ln[\Lambda(H_A)]$ i $L(H_0) = \ln[\Lambda(H_0)]$. Ukoliko vrijedi hipoteza H_0 i uzorak je velik, razdioba L -ova iz prethodne jednadžbe je χ^2 razdioba s $k_A - k_0$ stupnjeva slobode.

U našem slučaju se, na primjer, za testiranje razdoblja 2005-2009. provjerava da li vrijedi relacija:

$$\Lambda^* = 2\{[\sum_{i=1980}^{2004} L(\alpha_1, \beta_1; x_i)] + [\sum_{i=2005}^{2009} L(\alpha_2, \beta_2; x_i)] - [\sum_{i=1980}^{2009} L(\alpha_0, \beta_0; x_i)]\} \quad (4.7)$$

gdje su α i β parametri pridijeljivane razdiobe varijalbi x . To znači da provjeravamo da li podaci iz razdoblja 2005-2009. godina pripadaju „roditeljskoj“ razdiobi podataka iz razdoblja 1980-2009. godina. Istu procjeru napravili smo i za razdoblje s modeliranim podacima 1992-2001. godina. Dobivene vrijednosti Λ^* su za razdoblje 1992-2001. $\Lambda_{MOD}^*=3.149$, a za razdoblje 2005-2009. $\Lambda_{MOD}^*=3.328$. Obje ove vrijednosti manje su od granične vrijednosti $\chi^2=3.357$ za prihvatanje nul-hipoteze.

Budući da je pokazano da brzine vjetra u razdobljima s mjerenim i modeliranim podacima pripadaju istoj „roditeljskoj“ razdiobi, reprezentativnost nizova brzina vjetra ne predstavlja prepeku za usporedbu procijenjenih očekivanih maksimalnih brzina vjetra iz mjerenih i modeliranih podataka.

4.5. Osnovna brzina vjetra na temelju rezultata ALADIN modela

Niz brzina vjetra dobivenih numeričkim modelom atmosfere ALADIN u 10-godišnjem razdoblju 1992-2001. godine dovoljno je dug da zadovoljava uvjete za korištenje opće razdiobe ekstrema za procjenu očekivanih maksimalnih brzina vjetra. Stoga je niz godišnjih maksimalnih brzina vjetra poslužio kao ulazni set podataka za procjenu očekivanih maksimuma koristeći opću razdiobu ekstrema (2.1). Male razlike u očekivanim maksimalnim brzinama vjetra za povratni period od 50 godina dobivenih općom Pareto razdiobom i općom razdiobom ekstrema potvrđuju opravdanost usporedbe očekivanih maksimuma dobivenih tim dvjema metodama.

Vrijednosti parametara dobivenih razdioba i samih očekivanih brzina vjetra za povratni period od 50 godina navedeni su u Tablici 4.3. Usporedba osnovnih brzina vjetra dobivenih iz mjerenih i modeliranih podataka pokazuje da i u slučaju očekivanih brzina vjetra razlike modeliranih i mjerenih vrijednosti iznose 10-15%.

Tablica 4.3.a). Osnovna brzina vjetra V_b (m/s) proračunata na osnovi rezultata modela ALADIN u razdoblju 1992-2001. za točku modela najbližu meteorološkim postajama u

unutrašnjosti Hrvatske. β , α i k su parametri pridijeljene opće razdiobe ekstrema, SE je standardna pogreška, V_{50} je očekivana maksimalna brzina vjetra za povratni period od 50 godina nekorrigirana u odnosu na visinu hrapavosti, V_{bMOD}/V_{bMJE} je omjer osnovne brine vjetra dobivene iz modeliranih i mjerenih podataka.

postaja	ξ (m/s)	$SE(\beta)$ (m/s)	α	$SE(\alpha)$	k	$SE(k)$	V_{50} (m/s)	$SE(V_{50})$ (m/s)	V_{bMOD} (m/s)	V_{bMOD}/V_{bMJE}
Osijek	14.74	0.22	1.25	0.18	0.18	0.28	18.24	0.72	20.1	0.95
Gradište	14.51	0.33	1.00	0.25	0.20	0.21	17.22	1.11	18.2	0.98
Sl. Brod	12.12	0.24	0.72	0.24	0.18	0.24	14.14	0.80	15.2	0.89
Daruvar	11.18	0.20	0.63	0.17	0.19	0.30	12.92	0.80	13.9	0.93
Čakovec	15.24	0.19	0.83	0.41	0.17	0.21	17.61	0.68	19.2	0.91
Varaždin	15.53	0.19	0.64	0.18	0.22	0.28	17.21	0.52	18.7	0.97
Zagreb M.	10.89	0.47	0.84	0.24	0.19	0.36	13.20	1.23	16.4	1.07
Karlovac	9.91	0.15	0.69	0.12	0.19	0.25	11.81	0.49	15.8	0.95
Sisak	12.53	0.31	0.81	0.22	0.15	0.24	14.92	0.62	16.4	1.01
Gorinci	8.46	0.47	0.79	0.41	0.31	0.47	10.25	1.19	16.1	0.98
Ogulin	11.13	0.50	1.01	0.40	0.20	0.22	13.87	1.29	21.7	1.00
Gospić	14.73	0.48	1.54	0.35	0.29	0.21	18.33	1.60	19.8	1.07
Knin	17.64	0.63	1.61	0.49	0.17	0.29	22.23	1.67	25.4	1.07

Tablica 4.3.b). Osnovna brzina vjetra V_b (m/s) proračunata na osnovi rezultata ALADIN modela u razdoblju 1992-2001. za točku modela najbližu meteorološkim postajama na priobalju i otocima. Simboli imaju isto značenje kao i u Tablici 4.3.a.

postaja	ζ (m/s)	SE(β) (m/s)	α	SE (α)	k	SE (k)	V_{50} (m/s)	SE (V50) (m/s)	V_{bMOD} (m/s)	V_{bMOD}/V_{bMJE}
Rijeka	10.55	0.53	1.28	0.42	0.15	0.28	14.33	1.54	22.6	0.88
Senj	16.21	0.56	1.75	0.39	0.08	0.20	22.08	1.75	30.9	1.02
Rab	14.81	0.41	1.09	0.31	0.17	0.32	17.92	1.12	24.4	0.95
M. Lošinj	13.56	0.79	1.11	0.50	0.19	0.58	16.62	1.56	24.0	0.92
Novalja	25.25	0.75	2.13	0.54	0.09	0.23	32.26	2.29	32.8	1.11
Zadar	18.12	0.58	1.65	0.40	0.08	0.20	23.65	1.82	25.1	1.10
Šibenik	16.71	0.38	1.15	0.28	0.15	0.27	20.11	1.28	25.5	0.97
Split-M.	16.90	0.51	1.16	0.39	0.21	0.34	19.99	1.40	22.2	0.87
Makarska	19.52	0.66	2.64	0.49	0.11	0.21	27.90	2.22	29.0	0.90
Ploče	11.02	0.19	0.55	0.14	0.35	0.20	12.19	0.65	16.9	0.95
Komarna	14.56	0.43	0.98	0.47	0.21	0.44	17.17	1.02	23.8	0.90
Dubrovnik	13.16	0.43	1.10	0.49	0.22	0.55	16.04	1.05	22.2	0.88

Mogući uzroci koji dovode do opaženih razlika osnovnih brzina vjetra proračunatih iz mjerenih i modeliranih podataka su:

- a) različita razdoblja s ulaznim podacima brzine vjetra;

- b) metoda odabira najbliže točke modela za usporedbu s mjerenjima može dovesti do pogreške u slučaju kompleksnog terena budući da se brzina vjetra mijenja na udaljenostima manjim od horizontalne razlučivosti modela;
- c) reprezentativnost položaja mjerne postaje u odnosu na područje koje pokriva kvadrat mreže modela;
- d) utjecaj hrapavosti terena (prepreka strujanju) na izmjerenu brzinu vjetra i s tim u vezi različita lokalna visina hrapavosti oko mjernog instrumenta i visine hrapavosti u odgovarajućem kvadratu mreže modela;
- e) reprezentacija terena u modelu koji ne prepoznaje detalje složene orografije (kao što je ona na sjevernom Jadranu i podno Velebita), a samim tim i nemogućnost ALADIN modela da simulira procese male prostorne i vremenske skale koje takav teren inducira,
- f) slaba prediktabilnost gibanja na vremenskoj skali kraćoj od dana, kako prostorna, tako i vremenska, teškoće u njihovu prikazu tijekom asimilacije podataka i/ili prejaka numerička difuzija u modelu,
- g) slabost parametrizacije turbulentnih procesa u modelu,
- h) zanemarivanje nehidrostatičkih procesa u modelu.

S obzirom na gore navedene moguće uzroke neslaganja modela i mjerenja, razlike u osnovnim brzinama vjetra proračunatim na temelju mjerenih i modeliranih podataka su na većini lokacija manje od 10% iznosa brzine dobivene iz mjerenih podataka. Samo na jednoj postaji u unutrašnjosti (Zagreb Maksimir) i na četiri postaje na obali (Rijeka, Novalja, Split Marjan i Dubrovnik) te razlike prelaze 10%.

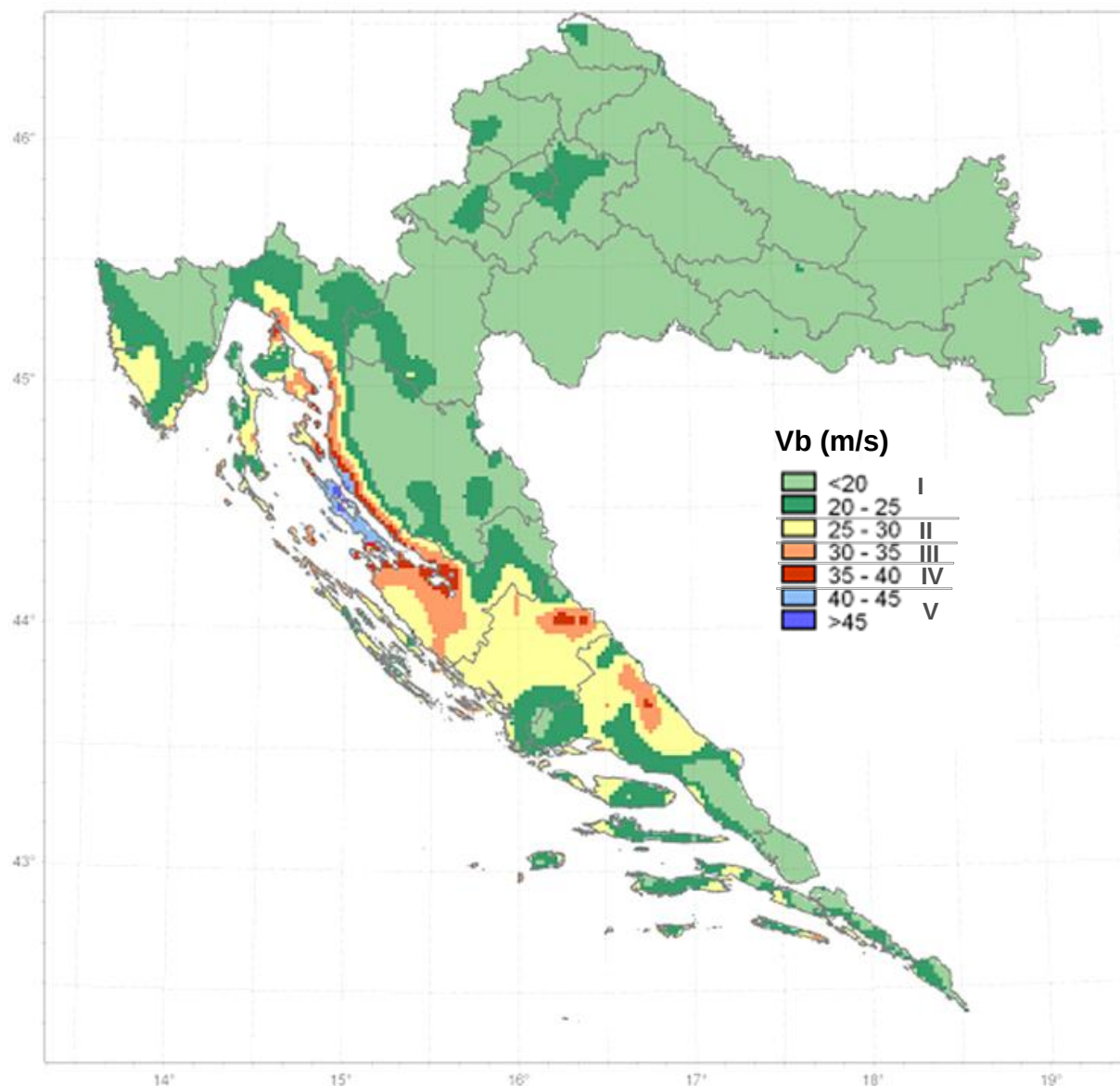
Svi do sada prikazani rezultati usporedbe mjerenih i modeliranih brzina vjetra i iz njih dobivenih očekivanih ekstrema pokazuju da je korištenje numeričkog modela atmosfere za ocjenu prostorne raspodjele očekivanih maksimalnih brzina vjetra na područja bez mjerenja opravdano. To je osobito opravdano na područjima kompleksnog terena gdje niti jedna statistička metoda interpolacije ne može dati realne rezultate.

4.6. Prostorna raspodjela osnovne brzine vjetra

Da bismo dobili prostornu raspodjelu očekivanih maksimalnih brzina vjetra, za svaku smo točku modela horizontalne razlučivosti 2 km x 2 km proračunali očekivani ekstrem koristeći opću razdiobu ekstrema i maksimalne godišnje brzine vjetra kao ulazne podatke. Tako dobivene očekivane ekstremne brzine vjetra korigirali smo na teren visine hrapavosti 0.03 m da bismo dobili osnovnu brzinu vjetra koju smo prikazali prostorno (Sl. 4.10) koristeći za kartografski prikaz programski paket Ilwis (*Integrated Land and Water Information System*) (Ilwis 3.0 Academic User Guide, 2001).

Konačna meteorološka podloga za proračun opterećenja vjetrom za potrebe izrade građevinskih normi sadrži zone očekivane osnovne 10-minutne brzine vjetra. Promatrajući kartu na Sl. 4.10. možemo uočiti da I zona opterećenja vjetrom obuhvaća najveći dio Hrvatske. Zona II obuhvaća dijelom priobalje Istre, obalnu liniju od Kvarnera do Splita i gotovo cijelu Splitsko-dalmatinsku i Šibensko-kninsku županiju. Zone III i IV u kojoj očekivane referentne brzine vjetra prelaze 30 m/s, odnosno 35 m/s, protežu se na priobalju podno Velebita, te u zaleđu Šibenika i Splita na granici s Bosnom i Hercegovinom. Najveće opterećenje vjetrom možemo očekivati na području gdje se obronci Velebita najstrmije spuštaju k moru, tj. na dijelu obale od Senja do Karlobaga i na otoku Pagu gdje se ekstremne brzine vjetra mjere u situacijama s olujnom burom.

Vrijednosti osnovne brzine vjetra na graničnim područjima sa susjednim zemljama podudaraju se s iznosima osnovne brzine vjetra u tim državama (Holmes, 2001), što potvrđuje uspješnost primijenjene metode izrade karte osnovne brzine vjetra. Valja naglasiti da i u Sloveniji najveće opterećenje vjetrom uzrokuje bura. Tako obalno područje Slovenije najviše izloženo buri (Ajdovščina) pripada zoni III opterećenja vjetrom kao i veći dio hrvatske obale Jadrana od Novog Vinodolskog do Jablanca.

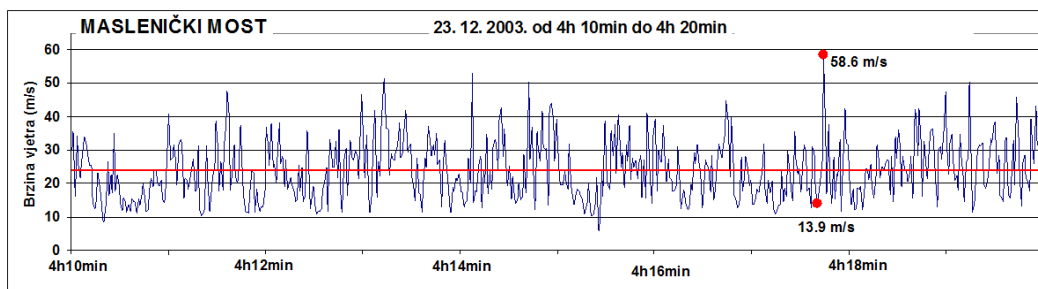


Slika 4.10. Prostorna raspodjela osnovne brzine vjetra (V_b) na području Republike Hrvatske. Oznake I-V definiraju zone opterećenja vjetrom.

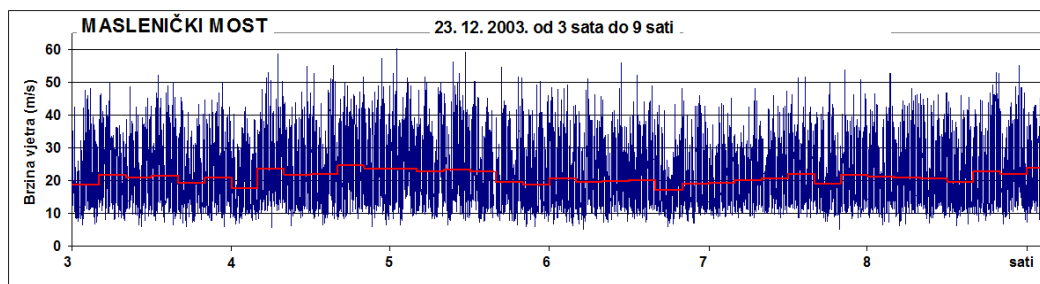
Dobivena karta osnovne brzine vjetra je najvažniji rezultat dan u ovoj disertaciji i znatno doprinosi realnoj procjeni opterećenja vjetrom, osobito na područjima bez mjerenja, a time i poboljšanju postojećeg nacionalnog dodatka europskoj normi „EN 1991-1-4: Djelovanje na konstrukcije – Djelovanje vjetra“.

5. TURBULENCIJA I DINAMIČKO OPTEREĆENJE VJETROM

Prostorna raspodjela osnovne brzine vjetra opisana u prethodnom poglavlju ukazuje na najveće očekivane 10-minutne brzine u priobalnom području podno Velebita u situacijama s olujnom burom. Tipični zapis brzine vjetra u situaciji s olujnom burom (Sl. 5.1) pokazuje da brzina vjetra u 10-minutnom intervalu znatno varira, tj. da je bura mahovit vjetar. Mahovitost je jedna od osnovnih karakteristika bure koju su uočili i analizirali mnogi autori (npr. Yoshino, 1976; Jurčec, 1981; Petkovšek, 1982; Smith, 1987, Bajić i Peroš, 2001; Belušić i Klaić, 2004, 2006; Belušić i sur., 2004, 2006; Večenaj i sur., 2010). U situacijama s olujnom burom uobičajeno je da maksimalni udar u 10-minutnom intervalu bude 2-3 puta veći od srednje 10-minutne brzine vjetra (Bajić, 2001, 2009). Tako primjer olujne bure na Slici 5.1. pokazuje da se brzina vjetra u svega nekoliko sekundi promijeni od 13.8 m/s na 58.6 m/s i da je maksimalni udar vjetra 2.5 puta veći od srednje 10-minutne brzine.

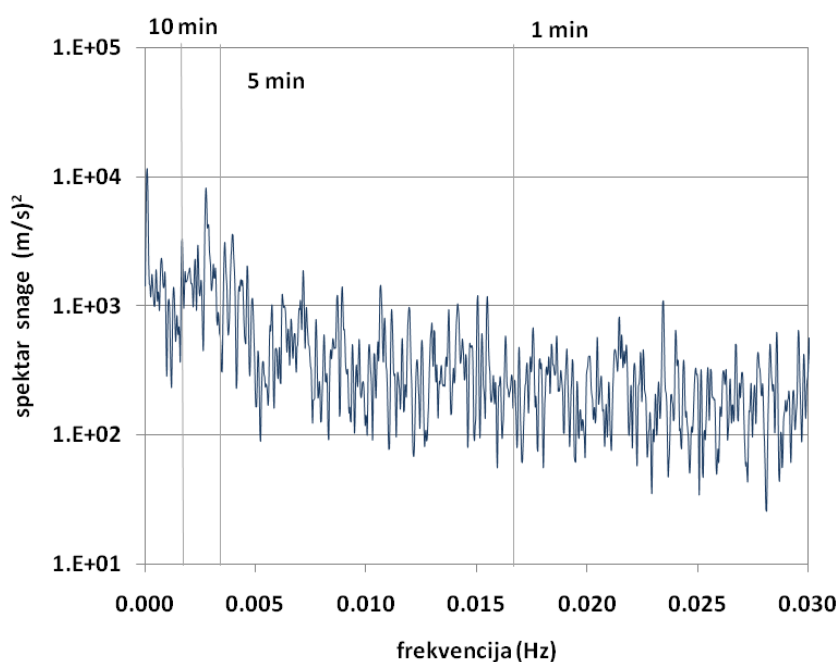


Slika 5.1. Hod sekundnih (plava linija) brzina vjetra 23. 12. 2003. godine u 10-minutnom intervalu od 04:10 h do 04:20 h na lokaciji platoa kod Masleničkog mosta mjereni na visini 3 m iznad tla. Crvena linija označava 10-minutnu srednju brzinu vjetra, a crvene točke ilustriraju naglu promjenu brzine vjetra u svega nekoliko sekundi.



Slika 5.2. Hod sekundnih (plava linija) i 10-minutnih (crvena linija) brzina vjetra 23. 12. 2003. godine u razdoblju od 3 do 9 sati na lokaciji platoa kod Masleničkog mosta.

U oscilacijama brzine vjetra u slučajevima jake bure uobičajeno se uočavaju pulsacije kao što su one prikazane na Sl. 5.2 (Belušić i sur., 2006). Spektralna analiza podataka visokofrekventnih mjerenja brzine vjetra (Belušić i sur. 2004, 2006) u Senju pokazala je da uočene oscilacije brzine vjetra predstavljaju kvaziperiodički doprinos ukupnoj mahovitosti vjetra. Ova pulsacija brzine vjetra pojavljuje se s periodima od ~3-11 minuta, a njena pojava pri tlu nije generirana lokalnim mehanizmom (Belušić i sur., 2004). Najvjerojatniji mehanizam koji dovodi do pulsacija je Kelvin-Helmholtzova nestabilnost koja se javlja iznad niske mlazne struje ispod područja loma vala (Belušić i sur., 2007). Pulsacije bure jasno su vidljive i u situaciji s olujnom burom 22–25. 12. 2003. (Sl. 5.2) opisanoj u Poglavlju 3 u kojoj smo raspolagali visokofrekventnim (1 Hz) mjerenjima brzine i smjera vjetra na lokaciji poligona za testiranje burobrana u neposrednoj blizini Masleničkog mosta. Spektralna analiza brzine vjetra izmjerene u 6-satnom razdoblju 23. 12. 2003. od 3 do 9 sati (najjača bura) pokazuje da postoji porast gustoće energije za frekvenciju 0.00274 Hz tj. za period od 6.1 min (Sl. 5.3). To je u skladu s rezultatima dobivenim za kvaziperiodičke bure zabilježene u Senju (Belušić i sur., 2004). Na Slici 5.3 uočava se i nekoliko manjih maksimuma koji se nalaze na frekvencijama iznad 0.006 Hz ($T < 3$ min) koji su svi podjednakovog iznosa i primarno su lokalnog porijekla (Belušić i sur., 2007).



Slika 5.3. Spektralna analiza brzine vjetra u situaciji 23. 12. 2003. u vremenu od 3 h do 9 h na lokaciji platoa kod Masleničkog mosta.

Mahovitost superponirana na srednji vjetar ukazuje na postojanje turbulencije. Uobičajen pristup analizi turbulencije je da se brzina vjetra razdvoji na dva dijela: srednju brzinu ($\bar{V}$) i fluktuirajući dio ili turbulentnu komponentu vjetra (V):

$$V = \bar{V} + V \quad (5.1)$$

Statistička mjera raspršenja brzine vjetra (V) oko srednje vrijednosti ($\bar{V}$) je varijanca

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{i=N-1} (V_i - \bar{V})^2 \quad (5.2)$$

gdje je N broj podataka. Izraz u zagradi je upravo turbulentna komponenta brzine vjetra i ako vrijedi (5.1), onda varijancu možemo definirati i kao:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{i=N-1} V'^2 = \overline{V'^2} \quad , \quad (5.3)$$

a standardnu devijaciju kao:

$$\sigma = \sqrt{\overline{V'^2}} \quad . \quad (5.4)$$

Omjer standardne devijacije (5.4) i srednje brzine vjetra je bezdimenzionalna mjera intenziteta turbulencije i u slučaju 10-minutnog osrednjavanja brzine vjetra intenzitet turbulencije I_V iznosi

$$I_V = \frac{\sigma}{V_{10}} \quad (5.5)$$

gdje je V_{10} srednja 10-minutna brzina vjetra, a σ je standardna devijacija sekundnih brzina vjetra u 10-minutnom intervalu.

Intenzitet turbulencije uključuje se u proračun dinamičkog opterećenja građevinskih konstrukcija preko tzv. vršnog tlaka. Vršni tlak vjetra je tlak kojim na konstrukciju djeluje turbulentna komponenta vjetra. Vršni tlak je uz uvjet da je vertikalna razvedenost terena obuhvaćena osnovnom brzinom vjetra i da nema promjene hrapavosti terena u smjeru vjetra prije i nakon mjesta proračuna opterećenja dan izrazom (EN 1991-1-4, 2005):

$$q_p = \left[1 + 2 f_p I_v \right] \frac{1}{2} \rho V_b^2 \quad (5.6)$$

gdje je V_b osnovna brzina vjetra, tj. maksimalna očekivana 10-minutna brzina vjetra na 10 m iznad tla visine hrapavosti 0.03 m za povratni period od 50 godina, ρ je gustoća zraka, I_v intenzitet turbulencije dan s (5.5), a f_p vršni faktor. Omjer vršnog q_p i osnovnog q_0 tlaka vjetra C_e naziva se koeficijent izloženosti i ukazuje na to koliko je puta opterećenje turbulentnom komponentom brzine vjetra veće u odnosu na opterećenje osnovnom brzinom vjetra (statičko opterećenje):

$$C_e = \frac{q_p}{q_0} \quad (5.7)$$

$$\text{gdje je } C_e = [1 + 2 f_p I_v] . \quad (5.8)$$

Druga veličina koja ukazuje na mahovitost vjetra je faktor mahovitosti definiran kao omjer maksimalne sekundne brzine vjetra izmjerene u 10-minutnom intervalu i srednje 10-minutne brzine vjetra:

$$FM = \frac{V_x}{V_{10}} \quad (5.9)$$

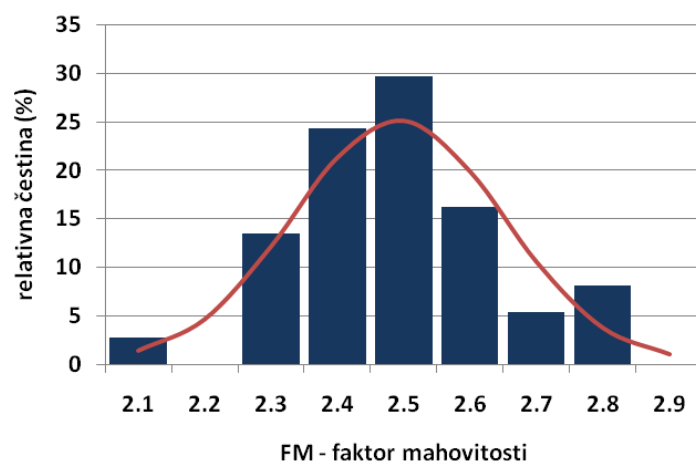
Uz pretpostavku da su vrijednosti faktora mahovitosti normalno raspodijeljene i da postoji linearna ovisnost standardne devijacije sekundnih brzina vjetra i odstupanja sekundnih od srednje 10-minutne brzine vjetra možemo definirati vršni faktor kao:

$$f_p = \frac{V_x - V_{10}}{\sigma} . \quad (5.10)$$

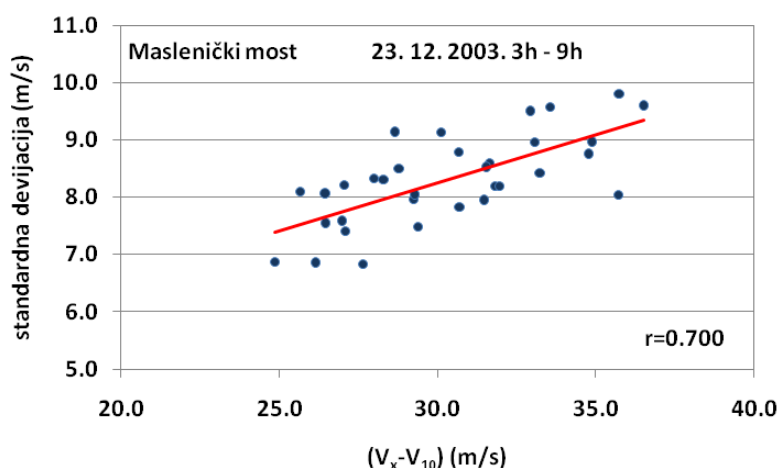
Kombinirajući (5.5) i (5.9) odnos vršnog faktora, faktora mahovitosti i intenziteta turbulencije

$$f_p = \frac{FM - 1}{I_v} \quad (5.11)$$

U situaciji s olujnom burom 23. 12. 2003. ispunjena su oba uvjeta za koje vrijedi (5.10): normalno raspodijeljen faktor mahovitosti (Sl. 5. 4) i linearni odnos standardne devijacije sekundnih brzina vjetra i razlike maksimalne sekundne i srednje brzine vjetra u 10-minutnom intervalu osrednjavanja (Sl. 5.5). To znači da vrijedi odnos faktora mahovitosti i intenziteta turbulencije dan u (5.11).



Slika 5.4. Razdioba relativne čestine (%) faktora mahovitosti u situaciji 23. 12. 2003. u vremenu od 3 h do 9 h na lokaciji kod Masleničkog mosta i njoj pridijeljena normalna razdioba (crvena linija).



Slika 5.5. Odnos standardne devijacije sekundnih brzina vjetra u 10-minutnom intervalu i razlike $V_x - V_{10}$ u situaciji 23. 12. 2003. u vremenu od 3 h do 9 h na lokaciji kod Masleničkog mosta. V_x je maksimalna sekundna brzina vjetra, a V_{10} je srednja brzina vjetra u 10-minutnom intervalu osrednjavanja. Crvena linija označava pravac linearne regresije, a r je koeficijent korelacije.

Vjetar velike mahovitosti i intenziteta turbulencije kao u našem primjeru bure može uzrokovati rezonantni dinamički odgovor građevinske konstrukcije ili dijelova konstrukcije s prirodnom frekvencijom i manjom od 1 Hz (npr. Holmes, 2001). Rezonantni odgovor konstrukcije postaje sve značajniji što je konstrukcija viša ili dulja u odnosu na njenu širinu. Opterećenje konstrukcije zbog promjenjive, turbulentne komponente brzine vjetra predstavlja tzv. dinamičko opterećenje i ono je to veće što je intenzitet turbulencije veći. Primjer analize pouzdanosti čeličnog Masleničkog mosta pod utjecajem jake bure (Peroš i sur., 2000) ukazuje da neuvažavanje dinamičkog opterećenja

daje neprihvatljive vrijednosti „indeksa pouzdanosti“ u odnosu na pomak konstrukcije za neke komponente mosta.

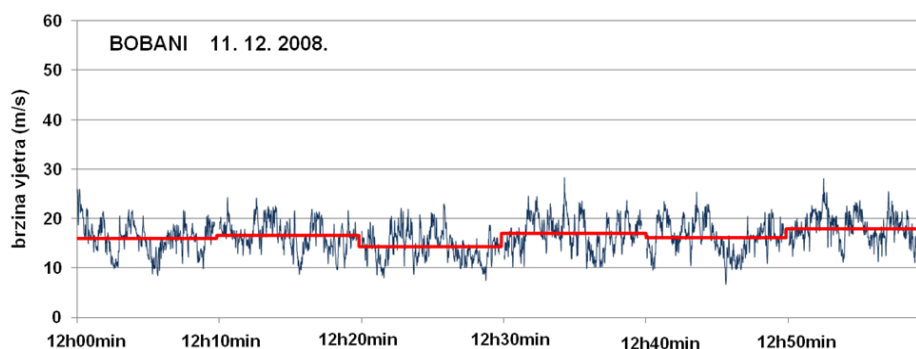
Tablica 5.1. Iznosi srednje 10-minutne brzine vjetra (V_{10} m/s), standardne devijacije sekundne brzine vjetra (σ m/s), faktora mahovitosti (FM), intenziteta turbulencije (I_v), vršnog faktora (f_p), osnovnog (q_0 N/m²) i vršnog (q_p N/m²) tlaka vjetra, osnovne brzine vjetra (V_b m/s), te faktora izloženosti (C_e) u situaciji s olujnom burom na poligonu za testiranje burobrana u blizini Masleničkog mosta 23. 12. 2003. u šest sati s najjačom burom od 3 h do 9 h.

Maslenički most	V_{10} (m/s)	σ (m/s)	FM	I_v	V_b (m/s)	f_p	q_0 (N/m ²)	q_b (N/m ²)	C_e
23. 12. 2003.	21.0	8.337	2.44	0.397	47.8	3.637	1428	5712	4.01

Iznosi veličina koje ukazuju na znatnu mahovitost i intenzitet turbulencije u našem primjeru olujne bure (Tablica 5.1) pokazuju da je prosječni intenzitet turbulencije u 6 sati najjače bure iznosio $I_v=0.397$, a faktor mahovitosti $FM=2.44$. U toj situaciji je faktor izloženosti $C_e=4.01$, što znači da je opterećenje vjetrom uz uvažavanje dinamičkog opterećenja (opterećenja turbulentnom komponentom brzine vjetra) 4.01 puta veće od opterećenja vjetrom osnovne brzine V_0 (opterećenje maksimalnom očekivanom 10-minutnom brzinom vjetra). Ovdje dobivena vrijednost faktora izloženosti znatno je veća od one preporučene europskom normom koja za visinu hrapavosti 0.05 m i visinu 10 m iznad tla daje $C_e=2.35$. Dani rezultati proračuna potvrđuju u nekoliko navrata naglašenu tezu (npr. Peroš 1995; Peroš, 1984, 1994, 1995; Peroš i sur., 2000,) da se pri projektiranju građevinskih konstrukcija na područjima s olujnom burom mora uzeti u obzir dinamička komponenta opterećenja koja je na područjima s olujnom burom bitno veća od one preporučene europskom normom. To znači da za projektiranje građevine otporne na opterećenje burom nije dovoljno tlak vjetra proračunati uzimajući u obzir samo 10-minutnu očekivanu maksimalnu brzinu vjetra. Neuvažavanje ove činjenice u praksi dovodi svake godine do rušenja ili oštećenja konstrukcija, posebno dalekovodnih stupova.

Dinamičko opterećenje olujnim jugom znatno je manje, što potvrđuje analiza sekundnih brzina vjetra izmjerenih na 10 m iznad tla na lokaciji Bobani na Kozjaku iznad Splita (43°35'40" N, 16°26'43" E, 520 m nm) u situaciji s olujnim jugom 9-12. 12. 2008. (Poglavlje

3). Znatno manja mahovitost vjetra (Sl. 5.6) i intenzitet turbulencije (Tablica 5.2) ukazuju na manju izloženost konstrukcije dinamičkom opterećenju. Proračun pokazuje da je tu vršni faktor $f_p=2.91$ što daje iznos faktora izloženosti $C_e=2.04$, a to je nešto manje od vrijednosti preporučene europskom normom.



Slika 5.6. Hodovi sekundnih (plava linija) i srednjih 10-minutnih (crvena linija) brzina vjetra u situaciji s jakim jugom na lokaciji Bobani zabilježenim 21. 12. 2008. u terminima maksimalne brzine vjetra od 12:00 do 13:00 h.

Tablica 5.2. Iznosi srednje 10-minutne brzine vjetra (V_{10} m/s), standardne devijacije sekundne brzine vjetra (σ m/s), faktora mahovitosti (FM), intenziteta turbulencije (I_v), vršnog faktora (f_p), osnovnog (q_0 N/m²) i vršnog (q_p N/m²) tlaka vjetra, osnovne brzine vjetra (V_b m/s), te faktora izloženosti (C_e) u situaciji s olujnim jugom na lokaciji Bobani u situaciji 11. 12. 2008.

Bobani	V_{10} (m/s)	σ (m/s)	FM	I_v	V_b (m/s)	f_p	q_0 (N/m ²)	q_b (N/m ²)	C_e
11. 12. 2008.	13.9	2.471	1.52	0.179	22.2	2.91	308	629	2.04

Iako je jugo znatno manjeg intenziteta turbulencije od bure, faktor izloženosti ovdje je veći od faktora izloženosti vjetrom na nekoliko lokacija na kompleksnom terenu Norveške gdje se on kreće od 0.64 do 1.60 (Harstveit, 1996). Analiza dinamičkog opterećenja jugom ukazuje da tlak vjetra pri uvažavanju dinamičke komponente opterećenja najmanje 2 puta veći nego uzimajući u obzir samo 10-minutni očekivani ekstrem brzine vjetra. Dakle, i u situacijama s olujnim jugom nužno je pri projektiranju građevinskih konstrukcija uzeti u obzir dinamičko opterećenje vjetrom.

6. ZAKLJUČAK

U ovom je radu izrađena za područje Republike Hrvatske prostorna raspodjela osnovne brzine vjetra. Pri tom je osnovna brzina vjetra definirana kao maksimalna 10-minutna brzina vjetra na 10 m iznad ravnog tla kategorije hrapavosti II za koju se može očekivati da bude premašena jednom u 50 godina. Osnovna brzina vjetra proračunata je na 25 lokacija s mjerenjima smjera i brzine vjetra koristeći opću Pareto razdiobu. Iako su proračunate maksimalne očekivane brzine vjetra na meteorološkim postajama dale uvid u opće značajke prostorne raznolikosti ove veličine, broj i položaj postaja pokazao se neadekvatnim za opravdano korištenje statističkih metoda interpolacije maksimalne očekivane brzine vjetra na područja bez mjerenja. Problem nedovoljne prostorne pokrivenosti podacima prevladan je korištenjem numeričkog modela atmosfere za ograničeno područje. Pri tome je primijenjena metoda dinamičke prilagodbe globalnih reanaliza ERA-40 na mrežu točaka veće horizontalne razlučivosti upotrebom spektralnog, prognostičkog modela ALADIN. Klimatologija vjetra u prizemnom graničnom sloju proračunata je za razdoblje od 10 godina (1992-2001) s podacima vremenske razlučivosti 60 minuta za parametre brzine i smjera vjetra. Verifikacija modeliranih vrijednosti brzine vjetra za 2001. godinu potvrdila je postojanje statistički signifikantne linearne korelacije mjerenih i modeliranih brzina vjetra gotovo na svim analiziranim postajama. Pokazano je da model uspješno prepoznaje situacije s olujnim vjetrom, te da sustavno podcjenjuje ekstremnu brzinu vjetra za ~10-15%. Imajući u vidu mnogobrojne moguće razloge za postojanje razlike između mjerenih i modeliranih osnovnih brzina vjetra, pokazalo se da je korištenje numeričkog modela atmosfere za ocjenu prostorne raspodjele očekivanih maksimalnih brzina vjetra na područja bez mjerenja opravdano, osobito za područja kompleksnog terena gdje niti jedna statistička metoda interpolacije ne može dati realne rezultate.

Osnovna značajka dobivene prostorne raspodjele osnovne brzine vjetra su znatno veće vrijednosti na području priobalja i otoka u odnosu na kontinentalni dio Hrvatske. Kopneno područje najvećih vrijednosti je primorska strana Velebita što je posljedica česte olujne bure. Na tom području se može očekivati da 10-minutna brzina vjetra na 10 m iznad tla u prosjeku jednom u 50 godina premaši vrijednost od 40 m/s. Veći dio Hrvatske, međutim, karakterizira osnovna brzina vjetra do 30 m/s.

Analiza utjecaja turbulencije na opterećenje građevinskih konstrukcija olujnim vjetrom pokazala je da se pri projektiranju građevina na priobalju i otocima gdje brzina vjetra postiže ekstremne vrijednosti u situacijama s olujnom burom mora uzeti u obzir utjecaj turbulentne komponente vjetra na opterećenje građevinske konstrukcije ili tzv. dinamičko opterećenje. Primjer jedne od najjačih ikad izmjerenih bura na Jadranu pokazao je da je tlak vjetra proračunat uzimajući u obzir dinamičko opterećenje konstrukcije gotovo 4 puta veći od onog koji se dobije uzimajući u obzir samo maksimalnu očekivanu 10-minutnu brzinu vjetra, tj. samo statičko opterećenje vjetrom.

Prikazani rezultati nameću tri osnovna zaključka:

- 1) Prostorna raspodjela osnovne brzine vjetra velike horizontalne razlučivosti koja je osnovni rezultat ovog rada znatno doprinosi realnoj procjeni opterećenja vjetrom, osobito na područjima bez mjerenja, a time i poboljšanju postojećeg nacionalnog dodatka europskoj normi „EN 1991-1-4: Djelovanje na konstrukcije – Djelovanje vjetra“.
- 2) Zbog važnosti učestalog jakog vjetra na priobalju i otocima (osobito bure) za poboljšanje procjene osnovne brzine vjetra, a time i opterećenja građevinskih konstrukcija, nužno je smanjiti preostale pogreške korištenog numeričkog modela atmosfere. Poseban napor valja uložiti u razvoj modela velike razlučivosti koji bi uspješno simulirao složene procese koje dovode do pojave prostorno i vremenski vrlo promjenjivog turbulentnog vjetra u situacijama s olujnom burom.
- 3) Važnost utjecaja dinamičke komponente opterećenja vjetrom na projektne parametre, a time i na sigurnost građevinskih konstrukcija ukazuje na potrebu za dodatnim istraživanjima turbulentnih značajki vjetra (posebno bure). Iako promjena opterećenja vjetrom s visinom nije bila tema ovo disertacije, važno je naglasiti potrebu za istraživanjima vertikalne promjenjivosti brzine i njenih turbulentnih karakteristika, budući da se u sve većoj mjeri projektiraju i grade visoki objekti kao što su, na primjer, vjetroagregati. U slučaju vitkih visokih čeličnih konstrukcija odgovor na vjetar kao dominantno opterećenje kreće se u intervalu 3-5 sekundi. Stoga bi na područjima izloženima buri bilo neophodno procijeniti i očekivane maksimalne 3-sekundne i 5-sekundne brzine vjetra kako bi projektni parametri osigurali izgradnju visokih građevinskih konstrukcija otpornih na djelovanje vjetra. Tome bi u velikoj mjeri doprinijela dodatna visokofrekventna profilna mjerenja smjera i brzine vjetra.

7. LITERATURA:

- Abild, J., Andersen, E. Y. i Rosbjerg, D. 1992. The climate of extreme winds at the Great Belt, Denmark. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* **41-44**, 521-532.
- An, Y. i Pandey, M. D. 2005. A comparison of methods of extreme wind speed estimation. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* **93**, 535-545.
- Bajić, A. 1984. Zimski prodori hladnog zraka preko zagreba. *Magistarski rad*, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 125 pp.
- Bajić, A. 1987. Cold air outbreak and the Adriatic bora, *Geofizika* **4**, 27-34.
- Bajić, A. 1988. The strongest bora event during ALPEX SOP. *Rasprave* **23**, 1-12.
- Bajić, A. 1989. Severe Bora on the northern Adriatic – statistical analysis. *Rasprave* **24**, 1-9.
- Bajić, A. 1991. Application of the two-layer hydraulic theory on the severe northern Adriatic bora. *Meteor. Rundsch.* **44**, 129–133.
- Bajić, A. 1992. Aerial analysis of the strongest north Adriatic ALPEX bora case. *Hrvatski meteorološki časopis* **27**, 12-29.
- Bajić, A., Vučetić, V., Peroš, B. i Žibrat, Z. 2001. Meteorološka podloga za hrvatske norme – opterećenje vjetrom, *Građevinar* **53**, 495–505.
- Bajić, A. i Peroš, B. 2001. Referentna brzina vjetra - utjecaj perioda osrednjavanja. *Građevinar* **53**, 555-562.
- Bajić, A. 2004. Referentna brzina vjetra kao meteorološka podloga za procjenu opterećenja vjetrom. *Zbornik radova Sabor Hrvatskih graditelja 2004. Graditelji-nositelji razvojnih projekata Republike Hrvatske*, Zagreb, Hrvatski savez građevinskih inženjera, 741-747.
- Bajić, A. i Peroš, B. 2005. Meteorological basis for wind loads calculation in Croatia. *Wind and Structures* **8**, 389-405.
- Bajić, A., Ivatek-Šahdan, S. i Horvath, K. 2007. Prostorna razdioba brzine vjetra na području Hrvatske dobivena numeričkim modelom atmosfere ALADIN. *Hrvatski meteorološki časopis*. **42**, 66-77.

Bajić, A., Ivatek-Šahdan, S. i Žibrat, Z. 2008. ANEMO-ALARM – iskustva operativne primjene prognoze smjera i brzine vjetera. *Zbornik radova s trećeg hrvatskog savjetovanja o održavanju cesta – Održavanje cesta 2008*, Hrvatski cestar, Zagreb, 109-114.

Bajić, A. 2009. Bura i cestovni promet. *Zbornik radova Četrvto savjetovanje o održavanju cesta*, Zagreb, Hrvatski cestar, 299-304.

Bajić A. 2010. Olujni vjetar u Hrvatskoj. *Zbornik radova s 2. konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa*, Zagreb, DUZS, 141-147.

Barthelmie, R. J., Palutikof, J. P., Davies, T. D. 1993. Estimazion of sector roughness lengths and the effect on prediction of the vertical wind speed profile. *Boundary-Layer Meteor.* 66, 19-47.

Beck A., Ahrens, B. i Stadlbacker, K. 2004. Impact of nesting strategies in dynamical downscaling of reanalysis data. *Geophys. Res. Let.*, 31, L19101, doi:10.1029/2004GL020115.

Belušić. D. i Bencetić Klaić, Z. 2004. Estimation of bora wind gusts using a limited area model. *Tellus* **56A**, 295-307.

Belušić. D., Pasarić, M. i Orlić, M. 2004. Quasi-periodic bora gusts related to the structure of the troposphere. *Quar. J. Roy. Meteor. Soc.* **130**, 1103-1121.

Belušić. D. i Bencetić Klaić, Z. 2006. Mesoscale dynamics, structure and predictability of a severe Adriatic bora case. *Meteorol. Z.* **15**, 157-168.

Belušić, D., Pasarić, M., Pasarić, Z., Orlić, M. i Grisogono, B. 2006. On local and non-local properties of turbulence in the bora flow. *Meteorol. Z.* 15, 301-306.

Belušić, D., Žagar, M. i Grisogono, B. 2007. Numerical simulation of pulsations in the bora wind. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **133**, 1371-1388.

Beljaars, A. C. M. 1987. The measurement of gusts at routine wind stations – a review. *WMO/SIMO Instr. Obs. Meth. Rep.* **31**, 58 pp.

Bencetić Klaić, Z., Prodanov, A. i Belušić, D. 2009. Wind measurements in Senj – underestimation of true bora flows. *Geofizika* **26**, 245-252.

- Brabson, B. B. i Palutikof, J. P. 2000. Test of the Generalized Pareto Distribution for predicting extreme wind speeds. *J. Appl. Met.* **39**, 1627-1640.
- Bubnova, R., Hello, G., Benard, P. i Geyeln, J. F. 1995. Integration of fully elastic equations cast in the hydrostatic pressure terrain-following coordinate in the framework of ARPEGE/ALADIN NWP system. *Mon. Wea. Rev.* **123**, 515-535.
- Christopher, J. i Jurksch, G. 1985. Untersuchung von Anemometerstandorten mittels sektor-abhängiger Böenfaktoren. *Meteor. Rund.* **38**, 43-48.
- Claussen, M. 1990. Area-averaging of surface fluxes in a neutrally stratified, horizontally inhomogeneous atmospheric boundary layer. *Atmos. Environ.* **24A**, 1349-1360.
- Coles, S.G. i Walshaw, D. 1994. Directional modelling of extreme wind speeds. *Appl. Stat.* **43**, 139-157.
- Coles, S. 2001. An Introduction to statistical modelling of extreme values. *Springer*, London, 208 pp.
- Cook, N. J. 1982. Towards better estimation of extreme winds. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* **9**, 295-323.
- Cook, N. J. 1983. Note on directional and seasonal assessment of extreme winds for design. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **12**, 365-372.
- Cook, N. J. 1985. The designers guide to wind loading of building structures. *Butterworths*, 371 pp.
- Dailey, P. S. i Keller, J. L. 2002. Modeling of extreme wind events using MM5: approach and verification. *Mesoscale Model Users Workshop*, NCAR, 4 pp.
- Davenport, A. G., Grimmond, C. S. B., Oke T. R. i Wieringa, J. 2000. Estimating the roughness of cities and sheltered country. *Proceedings 15th conference on probability and statistics in the atmospheric sciences/12th conference on applied climatology*, Ashville, NC, American Meteorological Society, 96–99.

Durran, D. R. 1986. Another look at downslope windstorms. Part I: The development of analogs to supercritical flow in an infinitely deep continuously stratified fluid. *J. Atmos. Sci.* **43**, 2527-2543.

DUZS, 2009. Procjena ugroženosti Republike Hrvatske od prirodnih i tehničko tehnoloških katastrofa i velikih nesreća. *Vlada Republike Hrvatske*, 76 str.

EN 1991-1-4, 2005. Eurocode 1: Action on structures - Part 1-4: General actions -Wind actions. *European Committee for Standardization*, Bruxelles, 146 pp.

Etienne. C., Leihmann, A. i Goyette, S. 2010. Spatial predictions of extreme wind speeds over Switzerland using generalized additive models. *J. Appl. Meteor. Clim.* **49**, 1956-1968.

Geleyn, J. F. i Hollingsworth, A. 1979. An economical analytical method for computation of the interaction between scattering and line absorption of radiation. *Contr. Atmos. Phys.* **52**, 1-16.

Geleyn, J. F., Girard, C. i Louis, J. F. 1982. A simple parametrization of moist convection for large-scale atmospheric models. *Beitr. Phys. Atmos.* **55**, 325-334.

Geleyn, J. F. 1987. Use of a modified Richardson number for parametrizing the effect of shallow convection. In: Matsuno Z. (ed)., Short and medium range weather prediction, *Speciall volume of J. Meteor. Soc. Japan*, 141-149.

Giard, D. i Bazile, E. 2000. Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model. *Mon. Wea. Rev.* **128**, 997-1015.

Glasnović, D. i Jurčec, V. 1990. Determination of upstream bora layer depth. *Meteorol. Atmos. Phys.* **43**, 137-144.

Gohm, A. i Mayr, G. J. 2005. Numerical and observational case study of a deep Adriatic bora. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **131**, 1363-1392.

Gohm, A., Mayr, G. J., Fix, A. i Giez, A. 2008. On the onset of Bora and the formation of rotors and jumps near a mountain gap. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **134**, 21-46.

Gomes, L., i Vickery, B. J. 1978. Extreme wind speeds in mixed climate. *J. Ind. Aerodyn.* **2**, 331-344.

- Grisogono, B. i Belušić, D. 2009. A review of recent advances in understanding the meso- and micro-scale properties of the severe Bora wind. *Tellus A* **61**, 1-16.
- Grubišić, V. 2004. Bora-driven potential vorticity banners over the Adriatic. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **130**, 2571–2603.
- Gusella, V. 1991. Estimation of extreme winds from short term records. *J. Struct. Eng.* **117**, 375-390.
- Harris, R.I. 1999. Improvements to the „Method of Independent Storms“. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **80**, 1-30.
- Harstveit, K. 1996. Full scale measurements of gust factors and turbulence intensity and their relations in hilly terrain. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **61**, 195-205.
- Hastie, T. J. i Tibahirani, R. J. 1990. Generalized Additive Models. *Chapman and Hall*, 335 pp.
- Heimann, D. 2001. A model-based wind climatology of the eastern Adriatic coast. *Meteorol. Z.* **10**, 5-16.
- Holmes, J. D. 2001. Wind loading on structures. *Spon. Press*, 336 pp.
- Horvath, K., Ivatek-Šahdan, S., Ivančan-Picek, B. i Grubišić, V. 2009. Evolution and structure of two severe cyclonic Bora events: Contrast between the northern and southern Adriatic. *Weather and Forecast* **24**, 946-964.
- Horvath, K., Bajić, A. i Ivatek-Šahdan, S. 2011. Dynamical downscaling of wind speed in complex terrain prone to bora-type flows. *J. App. Met. and Clim.* (u tisku).
- Hoskins, J. R. M. i Wallis, J. R. 1987. Parameter and quantile estimation for the generalized Pareto distribution. *Technometrics* **29**, 339-349.
- Ilwis 3.0 Academic, 2001: The Integrated Land and Water Information System – User guide. *International Institute for Aerospace Survey and earth Sciences*, Enschede, 350 pp.
- Ivančan-Picek, B. i Vučetić, V. 1990. Bora on the northern Adriatic coast during the ALPEX-SOP 20-25 March 1982. *Rasprave* **25**, 1-12.

Ivančan-Picek, B. i Tutiš, V. 1996. A case study of a severe Adriatic bora on 28 December 1992. *Tellus* **48A**, 357-367.

Ivančan-Picek B., Jurčec, V. i Drvar, D. 2006. On the causes of Adriatic jugo wind variations. *Hrvatski meteorološki časopis* **41**, 21-32.

Ivatek-Šahdan S. i Tudor M. 2004. Use of high-resolution dynamical adaptation in operational suite and research impact studies. *Meteorol. Z.* **13**, 99-108.

Jenkinson, A. F. 1955. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **81**, 158-171.

Jeromel, M., Malačić, V. i Rakovec, J. 2009. Weibull distribution of bora and scirocco winds in the northern Adriatic Sea. *Geofizika* **26**, 85-100.

Jurčec, V. 1981. On mesoscale characteristics of bora conditions in Yugoslavia. *Pure and Applied Geophysics* **119/3**, 640-657.

Jurčec, V. 1988. The Adriatic frontal bora type. *Rasprave* **23**, 13-25.

Jurčec, V. 1989. Severe Adriatic Bora storms in relation to synoptic developments. *Rasprave* **24**, 11-20.

Jurčec, V., Ivančan-Picek, B., Turiš, V. i Vukičević, V. 1996. Severe Adriatic Jugo wind. *Meteorol. Z.* **5**, 67-75.

JUS U.C7.110, 1991. Osnove proračuna građevinskih konstrukcija – opterećenje vjetrom. Pravilnik br. 15/01-149/116 od 1991-08-07, *Službeni list SFRJ*, br. 70/91.

Kasperski, M. 2002. A new wind zone map of Germany. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **90**, 1271-1287.

Kessler, E. 1969. On distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. *Met. Mon. Am. Met. Soc.* **10**, 84 pp.

Klemp, J. i Durran, D. R. 1987. Numerical modelling of Bora winds. *Meteorol. Atmos. Phys.* **36**, 215–227.

Kraljev, D., Gajić-Čapka, M. i Zaninović, K. 1995. U okrilju sunca i mora, Klimatska monografija Zadra. *Zadiz*, Zadar, 67 pp.

Kraljev, D., Gajić-Čapka, M. i Zaninović, K. 2005. U okrilju Sunca i mora: klimatska monografija Zadra - Embraced by the Sun and the Sea: The Climatic Monograph of Zadar. 2. dopunjeno izdanje, second edition, *Zadiz - Zadar, Hrvatsko meteorološko društvo - Zagreb*, 144 pp.

Kunz, M., Mohr, S., Rauthe, M., Lux, R. i Kottmeier, C. 2010. Assessment of extreme wind speeds from Regional Climate Models – Part I: Estimation of return values and their evaluation. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **10**, 907-922.

Lin, Y-L. 2007. Mesoscale dynamics. *Cambridge University Press*, 630.

Long, R. R. 1954. Some aspects of the flow of stratified fluids, II: experiments with a two-fluid system. *Tellus* **6**, 97-115.

Louis J. F., Tiedtke, M. i Geleyn, J. F. 1982. A short history of PBL parametrisation at ECMWF. *Proceedings from the ECMWF Workshop on Planetary Boundary Layer Parametrisation*, 59-79.

Lukšić, I. 1975. Bura u Senju. *Senjski zbornik* **6**, 467-494.

Lynch, P. i Huang, X. Y. 1994. Diabatic initialization using recursive filters. *Tellus* **46A**, 583-597.

Majewski, D. 1991. The Europa-Model of the Deutscher Wetterdienst. *Seminar Proceedings ECMWF* **2**, 147-191.

Makjanić, B. 1970. On the diurnal variation of the bora wind speed. *Rad JAZU* **349**, 33-92.

Makjanić, B. 1978. Bura, jugo, etezija. *Prilozi poznavanju vremena i klime SFRJ* **5**, SHMZ, 74 pp.

Nielsen, M. 1999. A method for spatial interpolation of wind climatologies. *Wind Energy* **2**, 151-166.

Oliver M. A. i Webster R. 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information system. *Int. J. Geographical Information Systems* **4**, 313-332.

Palomino, I. i Martin, F. 1995. A simple method for spatial interpolation of the wind in complex terrain. *J. Appl. Meteor.* **34**, 1678-1693.

Palutikof, J., Brabson, B. B., Lister, D. H. i Adcock, S. T. 1999. A review of methods to calculate extreme wind speeds. *Meteor. Appl.* **6**, 119-132.

Pan, F. i Smith, R. B. 1999. Gap winds and wakes: SAR observations and numerical simulations. *J. Atmos. Sci.* **56**, 905-923.

Perčec Tadić, M. 2010. Gridded Croatian climatology for 1961-1990. *Theor. Appl. Climatol.* **102**, 87-103.

Penzar, B., Penzar, I. i Orlić, M. 2001. Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana. *Biblioteka Geographiy Croatica* 16, 251 pp.

Peroš, B. 1984. Određivanje faktora sigurnosti za konstrukcije pod dominantnim djelovanjem vjetra na obalnom području Jadrana. *Magistarski rad*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. 105 pp.

Peroš, B. 1994. Modelling of the bora effects upon the lower layer. *Engineering Modelling* **7**, 81-95.

Peroš, B. 1995. Pouzdanost konstrukcija s dominantnim djelovanjem vjetra. *Doktorska disertacija*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. 135 pp.

Peroš, B. 1998. Constructional steel design for structures with a dominant wind Bora load. *J. Constructional Steel Research* **46**, 321-322.

Peroš, B. i Boko, I. 2000a. Reliability of steel bridges exposed to the Bora wind action. *International Conference on Steel Structures*, Istanbul, 51-56.

Peroš, B. i Boko, I. 2000b. Investigations of the effects of the Bora wind load upon transmission line pylons. 3. *International Congress of the Croatian Society for Mechanics*, Proceedings, 587-594.

Peroš, B., Boko, I. i Šimunović, T. 2003. Modelling of the action of the bora wind upon high slender structures. *Proceedings Response of Structures to Extreme Loading*, Toronto, 85-89.

Petkovšek, Z. 1982. Gravity waves and bora gusts. *Ann. Meteorol.* **19**, 108-110.

Petkovšek, Z. 1984. Some characteristics of bora gusts. *Zbornik meteoroloških i hidroloških radova* **10**, 119-122.

Poje, D. 1985. Neki rezultati istraživanja o brzinama vjetra u SRH. *Građevinar* **37**, 7-14.

Poje, D. 1995. Bura (bora) and burin at Split. *Hrvatski meteorološki časopis* **30**, 1-19.

Poje, D., 1996. Distribution functions and the estimation of wind power. *Hrvatski meteorološki časopis* **31**, 1-14.

Porch, W. i Rodriguez, D. 1987. Spatial interpolation of meteorological data in complex terrain using temporal statistics. *J. Climate. Appl. Meteor.* **26**, 1696-1708.

Rife, D. L., Davies, C. A., Liu, Y. i Warner, T. 2004. Predictability of low-level winds by mesoscale meteorological models. *Mon. Wea. Rev.* **132**, 2553-2569.

Ritter, B. i Geleyn, J. F. 1992. A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations. *Mon. Wea. Rev.* **120**, 303-325.

Sacré, C., Moisselin, J. M., Sabre, M., Flori, J. P. i Dubuisson, B. 2007. A new statistical approach to extreme wind speeds in France. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **95**, 1415-1423.

Schaffner B., Remund, J., Cattin, R. i Kunz, S. 2006. The Alpine space wind map. *Proc. European Wind Energy Conf.* Madrid, Spain, EWEA, 11 pp.

Silva, J., Ribeiro, C. i Guedes, R. 2007. Roughness length classification of Corine land cover classes. *Proceedings European Wind Energy Conference 2007*, Milano, Italy, 520-529.

Simmons, A. J. i Burridge, D. M. 1981. An energy and angular momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinate. *Mon. Wea. Rev.* **109**, 758-766.

Smith R. B. 1985. On severe downslope winds. *J. Atmos. Sci.* **42**, 2597-2603.

- Smith, R. B. 1987. Aerial observations of the Yugoslavian bora. *J. Atmos. Sci.* **44**, 269-297.
- Steinacker, R., Häberli, C. i Pötschacher, W. 2000. A transparent method for the analysis and quality evaluation of irregularly distributed and noisy observational data. *Mon. Wea. Rev.* **128**, 2303–2316.
- Stiperski, I. 2010. Valna rezonancija i prizemno strujanje u zavjetrini kompleksne orografije. *Doktorska disertacija*, Zagreb, Prirodoslovno-matematički fakultet, 134 str.
- Stiperski, I., Ivančan-Picek, B., Grubišić, V. i Bajić, A. 2011. The complex bora flow in the lee of Southern Velebit. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* (prihvaćen za objavljivanje).
- Strelec Mahović, N., Horvath, A. i Csirmaz, K. 2007. Numerical simulation of severe convective phenomena over Croatian and Hungarian territory. *Atmospheric Research* **83**, 121–131.
- Šinik, N. i Grisogono, B. 2008. Dinamička meteorologija, Uvod u opću cirkulaciju atmosfere. *Školska knjiga*, Zagreb, 213 pp.
- Tudor, M. i Ivatek-Šahdan, S. 2002. MAP IOP 15 case study. *Hrvatski meteorološki časopis* **37**, 1-14.
- Tutiš, V. 1988. Bora on the Adriatic coast during ALPEX-SOP on 27 to 30 April 1982. *Rasprave* **23**, 45-56.
- Uppala, S. M. i sur., 2005. The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **131**, 2961–3012.
- Verkaik, J. W. 2000. Evaluation of two gustiness models for exposure correction calculations. *J. Appl. Meteor.* **39**, 1613-1626.
- Večenaj, Ž., Belušić, D. i Grisogono, B. 2010. Characteristics of the near-surface turbulence during a bora event. *Annales Geophysicae* **28**, 155-163.
- Vučetić, V. 1988. Bora on the northern Adriatic, 12-18 April 1982. *Rasprave* **23**, 27-44.
- Vučetić, V. 1993. Severe Bora on the mid-Adriatic, *Hrvatski meteorološki časopis* **28**, 19-36.

- Yan, Z., Bate, S., Chandler, R. E., Isham, V. i Wheater, H. 2006. Changes in extreme wind speeds in NW Europe simulated by generalized linear models. *Theor. Appl. Climatol.* **83**, 121-137.
- Yoshino, M. M. (ed.) 1976. Local Wind Bora. *University of Tokyo Press*, Tokyo, 289 pp.
- Walter. A., Keuler, K., Jacob, D. i sur. 2006. A high resolution reference data set of German wind velocity 1951-2001 and comparison with regional climate model results. *Meteorol. Z.* **15**, 585-596.
- Whitemann, C. D. 2000. Mountain Meteorology: Fundamentals and applications. *Oxford University Press*, New York, 355 pp.
- Wieringa, J. 1973. Gust factor over open water and built-up country. *Boundary-Layer Meteor.* **3**, 424-441.
- Wieringa, J. 1986. Roughness dependent geographical interpolation of surface wind speed average. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **112**, 867-889.
- Wieringa, J. 1993. Representative roughness parameters for homogenous terrain. *Boundary Layer Meteor.* **63**, 323-363.
- Wilks, D. S. 1995. Statistical Methods in Atmospheric Sciences. *Academic Press*, London, 467 pp.
- Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **63**, 1309-1313,
- WMO, 2008. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No. **8**, 681 pp.
- Zaninović, K. i sur. 2008. Klimatski atlas Hrvatske Climate atlas of Croatia 1961–1990. *Državni hidrometeorološki zavod*, Zagreb, 200 pp.
- Žagar, M. i Rakovec, J. 1999. Small-scale surface wind prediction using dynamic adaptation. *Tellus* **51**, 489-504.

Žagar N., Žagar, M., Cedilnik, J., Gregorič, G. i Rakovec, J. 2006. Validation of mesoscale low-level winds obtained by dynamical downscaling of ERA-40 over complex terrain. *Tellus* **58**, 445-455.

DODATAK:

POPIS SIMBOLA

A	koeficijent u jednadžbi pravca $ME = A \xi + B$
A_{Tp}	prigušenje anemometra
α	parametar skale u funkciji razdiobe
ARPE	srednja relativna pogreška
B	koeficijent u jednadžbi pravca $ME = A \xi + B$
b_0	prvi moment opće Pareto razdiobe
b_1	drugi moment opće Pareto razdiobe
β	parametar lokacije u funkciji razdiobe
BIAS	bias – pogreška modela
C_{dir}	korektivni faktor smjera vjetra
C_e	koeficijent izloženosti konstrukcije
CE	koeficijenta efikasnosti pridjeljivanja razdiobe
C_p	specifična toplina plina pri konstantnom tlaku
ζ	granična vrijednost brzine vjetra za odabir ekstrema
$\vec{F}$	sila trenja
$F(x)$	kumulativna funkcija razdiobe
FM	faktor mahovitosti
FM_{md}	medijan faktora mahovitosti
f_p	vršni faktor
Fr	Froudeov broj
f_{Tp}	faktor prigušenja anemometra
φ	geografska širina
g	ubrzanje sile teže
g^*	reducirano ubrzanje sile teže
H_B	dubina sloja bure
h_{NM}	nadmorska visina
I_v	intenzitet turbulencije
k	parametar oblika funkcije razdiobe
$\vec{k}$	jedinični vektor usmjeren prema gore i okomit na Zemljinu površinu

L	logaritamska funkcija u metodi maksimalne vjerojatnosti
λ	geografska dužina
Λ	maksimalna vjerojatnost
M	broj godina u nizu podataka
MAE	srednja apsolutna pogreška
ME	srednji premašaj granične vrijednosti brzine vjetra
N	broj podataka
NP	broj nedostajućih podataka
NP5	broj nedostajućih podataka u razdoblju 2005-2009.
$\vec{n}$	vektor kutne brzine Zemljine rotacije
p	tlak zraka
q_b	osnovni tlak vjetra
q_p	vršni tlak vjetra
Q	ukupna toplota sustava
r	koeficijent korelacije
R	plinska konstanta za suhi zrak
RMSE	srednja kvadratična pogreška
ρ	gustoća zraka
S	faktor korekcije izloženosti anemometra
SE	standardna pogreška
σ	standardna devijacija turbulentne komponente brzine vjetra
T	temperatura zraka
t	vrijeme uzorkovanja anemometra
T_p	interval osrednjavanja brzine vjetra
T_y	povratni period od y godina
τ	prosječni broj premašaja granične vrijednosti ζ po godini
θ_B	srednja potencijalna temperatura u sloju bure
X_T	kvantil varijalbe x s povratnim periodom T_y
$\vec{V}$	trodimenzijski vektor brzine vjetra
V	brzina vjetra općenito
$\bar{V}$	srednja ili nefluktuirajuća komponenta brzine vjetra
V'	turbulentna komponenta brzine vjetra
V_b	osnovna brzina vjetra (<i>basic wind speed</i>)

V_{bMJE}	osnovna brzina vjetra dobivena iz podataka mjerenja
V_{bMOD}	osnovna brzina vjetra dobivena iz modeliranih podataka
V_B	srednja brzina vjetra okomitog na Južni Velebit unutar sloja bure
V_{MJE}	izmjerena brzina vjetra
V_{MOD}	modelirana brzina vjetra
V_p	potencijalna brzina vjetra
V_{PRO}	procijenjena brzina vjetra koristeći opću Pareto razdiobu
V_{sr}	srednja brzina vjetra
V_x	udar vjetra (sekundna brzina vjetra)
V_{xx}	maksimalni udar vjetra (maksimalna sekundna brzina vjetra)
V_{10}	srednja 10-minutna brzina vjetra
V_{10x}	maksimalna 10-minutna brzina vjetra
V_{50}	maksimalna očekivana brzina vjetra za povratni period od 50 godina
y	standardizirana varijata
z_a	visina anemometra
z_b	visina stapanja (<i>blending height</i>).
z_0	visina hrapavosti
z_{0C}	visina hrapavosti prema CLC klasifikaciji
z_{0D}	visina hrapavosti prema Davenportovoj klasifikaciji

POPIS KRATICA

ALADIN	Aire Limit'ee Adaptation Dynamique INitialisation
ARPE	Average Relative Percent Error - srednja relativna pogreška
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CE	koeficijenta efikasnosti prideljivanja razdiobe
CLC	Corine Land Cover
CME	Conditional Mean Exceedance – metoda uvjetnog premašaja
DHMZ	Državni hidrometeorološki zavod
DUZS	Državna uprava za zaštitu i spašavanje
ECMWF	European Center for Medium Range Weather Forecasts – Europski centar za srednjoročne prognoze vremena
ERA-40	projekt reanalize u Europskom centru za srednjoročne prognoze vremena
ESA	European Space Agency
GAM	Generalized Additive Model – opći aditivni model
GEV	Generalized Extreme Value – opća razdioba ekstrema
GIS	Geografski Informacijski Sustav
GPD	General Pareto Distribution – opća Pareto razdioba
MAE	Mean Absolute Error - srednja apsolutna pogreška
ME	Mean Exceedance – srednji premašaj granične vrijednosti
ML	Maximum Likelihood – metoda maksimalne vjerojatnosti
POT	Peak Over Threshold – metoda premašaja granične vrijednosti
PWM	Probability Weighted Moments – metoda otežanih momenata
RMSE	Root Mean Standard Error - srednja kvadratična pogreška
SE	Standard Error - standardna pogrepka
WMO	World Meteorological Organisation – Svjetska meteorološka organizacija

ŽIVOTOPIS

	Ime i prezime	Alica Bajić
	Osobni podaci	
	Datum rođenja	2. kolovoz 1956, Bjelovar
	Narodnost	Hrvatica
	Ime oca:	Alojz Bajić, Hrvat
	Ime majke:	Jožica Bajić, rođena Marohnić, Hrvatica
	Adresa:	1. Ferenščica 53, Zagreb
	Tel:	4565 682, 098 4564 682
	Fax	4565 630
	e-mail:	alica.bajic@cirus.dhz.hr
	Podaci o naobrazbi	
1970	Završena osnovna škola "Dr. Franko Winter" u Bjelovaru	
1971-1975	Završena opća gimnazija u Bjelovaru	
1976-1980	Dodiplomski studij na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu, Odjel Fizika, Struka: Geofizika s meteorologijom	
1980	Stečeno zvanje: diplomirani inženjer fizike	
1981-1984	Poslijediplomski studij na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu, područje Fizika atmosfere	
1984	Stečeno zvanje: magistar prirodnih znanosti	
	Studijski boravci u inozemstvu dulji od mjesec dana	
jesen 1988	Yale University, Department of Geology and Geophysics, New Haven, USA u okviru rada na projektu Croatia-Slovenia-USA/NSF Project 735 "The Adriatic Bora"	
proljeće 1997	Air Resource Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Agency, Silver Spring, U.S:A – Tema: Djelovanje u slučaju nuklearnih nesreća	
	Strani jezici	
	engleski:	aktivno znanje
	njemački:	pasivno znanje

	Podaci o poslodavcu: 1980-2001 Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, Grič 3. Tel. +385-01-4565 682 Fax.+385-01-4565 630 E-mail alica.bajic@cirus.dhz.hr,
	Položaji i profesionalne funkcije
1982-1992	- stručni suradnik – meteorolog u Odjelu za istraživanje atmosferskih procesa lokalnih i mezo razmjera
1993-1999	- načelnica Odjela za istraživanje atmosferskih procesa lokalnih i mezo razmjera
1999-2000	- načelnica Odjela za meteorološka istraživanja
2000-	- načelnica Odjela za istraživanja i modeliranja atmosferskih procesa pri Službi za meteorološka istraživanja i razvoj DHMZ-a
1999-	- koordinator meteorološkog dijela suradnje Državnog hidrometeorološkog zavoda i Hrvatske elektroprivrede d.d.
1999-	- koordinator hrvatskog dijela međunarodnog projekta Razvoj i primjena mezoskalnog numeričkog modela ALADIN
1993-2000	- akreditirani delegat Republike Hrvatske u Komisiji za atmosferske znanosti Svjetske meteorološke organizacije
1998-2009	- član Tehničkog potpornog centra za djelovanje u slučaju nuklearne nesreće u NE Krško i NE Paks Ministarstva gospodarstva Republike Hrvatske
2004-	- član velikoj broja Komisija za ocjenu SUO vjetroelektrana
	Osnovno područje rada: Primijenjena meteorologija – strujanje u orografski razvijenim područjima - klimatologije vjetra i numeričko modeliranje atmosferskih procesa lokalnih i mezo razmjera: - analize režima strujanja za potrebe planiranja, izgradnje i eksploatacije gospodarskih objekata, - ocjene opterećenja građevinskih konstrukcija vjetrom - procjene prirodnog energetskog potencijala vjetra - djelovanja u slučaju izvanrednih situacija (nuklearne i tehnološke nesreće, požari otvorenog prostora)
	Radno iskustvo i primjena znanja Radno iskustvo i primjena znanja stečeno je kroz: 1. Pojedinačne i multidisciplinarne projekte, studije i elaborate iz područja primijenjene meteorologije 2. Znanstveno-istraživačke projekte MZOS 3. Projekte međunarodne suradnje

Projekti, studije i elaborati za različite korisnike

- Analiza strujanja u orografski složenim uvjetima,
- Meteorološke podloge za potrebe građevinarstva – opterećenje vjetrom
- Meteorološke podloge za potrebe prostornog planiranja i izgradnje gospodarskih objekata
- Ocjena prirodnog energetskeg potencijala vjetra
- Klimatske osnove pojedinih područja Hrvatske
- Meteorološki aspekti nuklearnih i tehnoloških akcidenata

Znanstveno-istraživački projekti pri Ministarstvu znanosti, obrazovanja i sporta

1981-1986	Atmosferski procesi i onečišćenje zraka kontinentalnog dijela Hrvatske
1986-1993	Istraživanje i zaštita atmosfere – istraživač
1987-1989	Hrvatsko-Slovensko-USA/NSF Projekt 735 "The Adriatic Bora"
1991-1993	Hrvatsko-USA/NSF Projekt 990-0 "Nature and Theory of Severe Bora Storms"
1994-1997	Istraživanje i zaštita atmosfere – glavni istraživač
1991-1995	Dugoročna prognoza vremena i klime na profilu Jadran-Panonija
1996-1998	Suradnički ekspertni sustav CRO-EOL2 (energija vjetra)
1996-2002	Dinamičko djelovanje vjetra na građevine (083134)
2002-	Pouzdanost konstrukcija i procjena rizika uslijed ekstremnih djelovanja (083-0821466-1465)
2002-	Oluje i prirodne katastrofe u Hrvatskoj (004-1193086-3036)

Ostali znanstveno-istraživački projekti

1991-1992	Međunarodni ALPEX (Alpine Experiment) Projekt – sudionici zemlje alpskog područja
1996-1997	Projekt u okviru suradnje zemalja članica Srdnjoeuropske inicijative "Wind Energy Potential" – voditelj hrvatskog dijela projekta
1997-	Nacionalni energetske program – projekt korištenja energije vjetra (ENWIND) – voditelj meteorološkog dijela programa
1999-	Projekt razvoja i korištenja numeričkog modela atmosfere za prognozu vremena na ograničenom području "ALADIN" – koordinator hrvatskog dijela projekta
2008-2010	WINDEX – Wind resources and forecasting in complex terrain of Croatia, međuisntitucionalna međunardona suradnja
2009-	VirLab – projekt praćenje promjenjivosti fizikalnih parametara u atmosferi, graničnom sloju atmosfera-more i u moru –suradnja IZOR-DHMZ
2010-	COST-WIRE- Weather Intelligence for Renewable Energies –međunarodna suradnja 20 zemalja Europe

Članstva u udrugama

Hrvatsko meteorološko društvo
Europsko meteorološko društvo
Hrvatsko ekološko društvo
Hrvatsko društvo za zaštitu od zračenja
EUROCOAST

Konferencije /Kongresi /Radionice 1995-2010

- | | |
|------|---|
| 1996 | LITTORAL 96: Third International Conference of the European Coastal Association for Science and Technology, Porthsmouth, England, 9-13.September 1996 |
| 1997 | 3rd European Conference on Applications of Meteorology, 23-26. September 1997. Lindau, Njemačka |
| 1997 | Fisrt Croatian Scientific Conference “Air Quality Protection”, Crikvenica, 16-18.1997. |
| 1998 | Scientific Conference “Andrija Mohorovičić – 140. birth aniversary”, 10-12. 3. 1998., Zagreb |
| 1998 | 16. International Congress “Energy and Environment”, 28-30. 10. 1998, Opatija |
| 1998 | ECMWF Meteorological Training Course, Met 5 – Use and interpretation of ECMWF products, Reading, Velika Britanija, 2-12. 6. 1998. |
| 1998 | WMO-EMEP Workshop on advance statistical methods and their application to air quality data sets, 14-18. 19. 1998. Helsinki, Finska |
| 1999 | European Wind Energy Conference and Exhibition 1-5. 3.1999. Nice, France |
| 1999 | 4 European Conference on Application of Meteorology, Norrköping, Švedska, 13-17. 9. 1999. |
| 1999 | WMO-EMEP Workshop on advance statistical methods and their application to air quality data sets, II Part Dubrovnik, 4-9. 10. 1999. |
| 1999 | 2. hrvatske konferencije o vodama, Dubrovnik od 19.-22. svibnja 1999 |
| 1999 | WMO Workshop on Marketing of Meteorological Services, Budapest, 8-15.11.1999. |
| 2000 | 50 th Anniversary of Numerical Weather Prediction, Potsdam, 7-12. 3. 2000. |
| 2000 | Euromediterranean conference on forest fires, Hyeres Les Palmiers, Francuska, listopad 2000. |
| 2000 | EWGLAM (European working group on limited area modelling), Toulouse, Francuska, listopad 2000. |

2001	EWGLAM (European working group on limited area modelling), Krakow, Poljska, listopad 2001.
2001	5 European Conference on Application of Meteorology, Budampest, Mađarska, rujan 2001.
2002	12 th ALADIN Workshop, Medulin, Hrvatska, svibanj 2002.
2003	Hrvatska konferencija o normizaciji, Cavtat, travanj 2003
2003	Treći hrvatski kongres o cestama, Trogir, listopad 2003
2004	Sabor hrvatskih graditelja, Cavtat, travanj 2004.
2004	9 th International Meeting on Statistical Climatology, Cape Town, Južnoafrička Republika, svibanj 2004.
2005	28 th International Conference on Alpine Meteorology and Annual Scientific Meeting of Mesoscale Alpine Programme, Zadar, Hrvatska, 23-27. svibanj 2005.
2005	7 th European Conference on Application of Meteorology and 5 th Annual Meeting of the European Meteorological Society, Utrecht, Nizozemska, 12-16. rujan 2005.
2005	27 th EWGLAM and 12 th SRNWP meeting, Ljubljana, Slovenija, 3-5. 10. 2005.
2006	II znanstveni skup "Istraživanje prirodoslovnih značajki riječkog područja, Rijeka, 14-17. 6. 2006.
2006	European Conference on Applied Climatology, Ljubljana, 3-8.9.2006.
2006	Prvo hrvatsko savjetovanje o održavanju cesta "Održavanje cesta 2006 – Zimska služba", Šibenik, 24-26.10.2006.
2007	17 ALADIN/HIRLAM workshop, Oslo, Norveška, 23-28. 4. 2007.
2007	29 International Conference on Alpine Meteorology, Chambéry, France, 4-8 6. 2007.
2007	European Wind Energy Conference, Milan, Italy, 7-9. 5. 2007.
2007	28 th EWGLAM and 13 th SRNWP meeting, Dubrovnik, Hrvatska, 8-12. 10. 2007.
2007	Gospodarenje područjem Vranskog jezera, Pakoštane, 15. 12. 2007.
2008	18 th ALADIN Workshop and HIRLAM All Staff Meeting, Bruxelles, Belgija, 7-11. 4. 2008.
2008	29 th EWGLAM (European Working Group fro Limited Area Modelling/SRNWP (Short-Range Weather Prediction Programme), Madrid, Španjolska, 6-10. 10. 2008.

2009	European Wind Energy Conference, Marseilles, Francuska, 16-19.3.2009.
2009	30 th EWGLAM (European Working Group fro Limited Area Modelling/SRNWP (Short-Range Weather Prediction Programme), Atena, Grčka, 28.9.-2.10. 2009.
2010	Konferencija Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa, Zagreb, 14-15. 10. 2010.
2010	20 th ALADIN Workshop and HIRLAM All Staff Meeting, Krakow, Poljska, 12-16. 4. 2010.
2010	31 th EWGLAM (European Working Group fro Limited Area Modelling/SRNWP (Short-Range Weather Prediction Programme), Exeter, UK, 4-7. 10. 2010.

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

Znanstveni radovi u CC časopisima

1. Horvath, K., Bajić, A., Ivatek-Šahdan, S. 2011. Dynamical downscaling of wind speed in complex terrain prone to bora-type flows. *J. App. Meteor. Clim.* (prihvaćen za objavljivanje).
2. Stiperski, I., Ivančan-Picek, B., Grubišić, V. i Bajić, A. 2011. The complex bora flow in the lee of Southern Velebit. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* (prihvaćen za objavljivanje).
3. Bešlić, I., Šega, K., Čačković, M., Bencetić Klaić, Z. i Bajić, A. 2008. Relationship Between 4-Day Air Mass Back Trajectories and Metallic Components in PM₁₀ and PM_{2.5} Particle Fractions in Zagreb Air, Croatia. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **80**, 270-273.
4. Grbec, B., Vilibić, I., Bajić, A., Morović, M., Beg Paklar, G., Matić, F. i Dadić, V. 2007. Response of the Adriatic Sea to the atmospheric anomaly in 2003. *Annales Geophysicae – Atmospheres Hydrospheres & Space Sciences* **25**, 835-846.
5. Beg Paklar, G., Bajić, A., Dadić, V., Grbec, B. i Orlić, M. 2005. Bora-induced currents corresponding to different synoptic conditions above the Adriatic. *Annales Geophysicae* **23**, 1083-1091.
6. Bajić, A. i Peroš, B. 2005. Meteorological basis for wind loads calculation in Croatia. *Wind and structures* **8**, 389-406.
7. Bajić, A., i Đuričić, V. 1995. Precipitation chemistry and atmospheric processes in the forested part of Croatia. *Water, Air an Soil Pollution* **85**, 1955-1960.
8. Bajić, A. 1991. Application of a " generalized hydraulic theory" to the severe northern Adriatic bora. *Meteorol. Rdsch.* **44**, 129-133.
9. Bajić, A. 1991. Small valley wind characteristics - an observational study. *Meteorol. Z.* **40**, 377-382.

Znanstveni radovi u časopisima s međunarodnom recenzijom:

1. Bajić, A., Ivatek-Šahdan, S. i Horvath, K. 2009. Prostorna razdioba brzine vjetra na području Hrvatske dobivena numeričkim modelom atmosfere ALADIN. *Hrvatski meteorološki časopis* **42**, 66-77.

2. Dobesch, H. i sur. 1997. Wind Atlas for the Central European Countries, *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik* **16**, 105 p.p.
3. Bajić, A. i Vidič, S. 1997. Air Trajectories Analysis for Environmental Applications. *Annalen der Meteorologie* **35**, 148-151.
4. Vučetić, V., i Bajić, A. 1996. Generalized hydraulic model sensitivity for the input data. *Annalen der Meteorologie* **30**, 113-116.
5. Lončar, E. i Bajić, A. 1994. Tipovi vremena u Hrvatskoj. *Hrvatski meteorološki časopis* **29**, 31-42.
6. Vidič, S., Đuričić, V. i Bajić, A. 1994. Acid rain events at the Lošinj island. *Hrvatski meteorološki časopis* **29**, 75–77.
7. Bajić, A., Vidič, S. i Đuričić, V. 1994. Sulphur dioxide concentration at the Northern Adriatic Health Resort Area. *Hrvatski meteorološki časopis* **29**, 11-20.
8. Bajić, A. 1993. Wind field simulation in meteorological applications in Croatia. *Hrvatski meteorološki časopis* **28**, 7-17.
9. Bajić, A. 1992. Aerial analysis of the strongest north Adriatic ALPEX bora case. *Hrvatski meteorološki časopis* **27**, 12-29.
10. Bajić, A. 1987. Cold air outbreak and the Adriatic bora. *Geofizika* **4**, 27-34.

Znanstveni radovi u ostalim časopisima:

1. Bajić, A. 2006. Meteorologija u provedbi programa korištenja energije vjetra. *Gospodarstvo i okoliš* **81**, 404-410.
2. Bajić, A. 2003. Očekivani režim strujanja na autocesti Sv. Rok – Maslenica. *Građevinar* **55**, 149-158.
3. Bajić, A., Vučetić, V., Peroš, B. i Žibrat, Z. 2001. Meteorološka podloga za hrvatske norme – opterećenje vjetrom. *Građevinar* **53**, 495–505.
4. Bajić, A., i. Peroš, B. 2001. Odnos brzina vjetra osrednjenih u različitim vremenskim intervalima. *Građevinar* **53**, 555-562.
5. Bajić, A. 2000. Meteorološka istraživanja energetskeg potencijala vjetra na području Hrvatske. *Bura*, Časopis energetske sekcije Zelene akcije, **7**, 44-45.
6. Bajić, A. 1990. Spatial bora variations in relation to cold air outbreak and surface pressure gradient. *Rasprave* **25**, 13-24.

7. Bajić, A.. 1989. Severe bora on the northern Adriatic. Part I: Statistical analysis. *Rasprave* **24**, 1-9.
8. Bajić, A. 1989. Olujna bura na Srednjem Jadranu: 2-3 ožujka 1982. *Vijesti PMC* **1**, 13-20.
9. Bajić, A. 1988. The strongest bora event during ALPEX SOP. *Rasprave* **23**, 1-12.
10. Jurčec, V., Bajić, A. i Pandžić, K. 1986. Simulacija bure i juga na Srednjem Jadranu. *Hidrografski godišnjak 1984-1985*, 59-71.
11. Bajić, A. 1986. Prilog poznavanju temperaturnih maksimuma na području Jadrana. *Pomorski zbornik* **24**, 407-427.
12. Bajić, A. 1986. Numerička simulacija vjetra na trasi dalekovoda. *Energija* **35**, 455-459.
13. Bajić, A. 1985. Karakteristike suhe fronte nad Zagrebom i njeni uzroci. *Rasprave* **21**, 3-10.
14. Bajić, A. 1984. Strujanje u gornjem dijelu tijeka rijeke Save prema Wippermannovom modelu. *Razprave* **28**, 21-36.
15. Bajić, A.. 1983. Zonalna harmonička analiza atmosferskih valova na području Alpa. *Zbornik meteoroloških i hidroloških radova* **9**, 3-8.
16. Bajić, A. 1982. Jesenske anticiklone na području Hrvatske. *Hidrometeorologija* **4**, 68-73.

Knjige, monografije ili poglavlja u knjizi:

1. Zaninović, K., Gajić-Čapka, M. Perčec Tadić, M. i sur. 2008. Klimatski atlas Hrvatske, Climate atlas of Croatia: 1961-1990., 1971-2000. Zagreb, Državni hidrometeorološki zavod, 255 pp.
2. Horvath, L., Bajić, A., Vujičić, R., Jelavić, B., Koren, Ž. i Meštrović, O. 2001. ENWIND - program korištenja energije vjetra - Nove spoznaje i provedba. Zagreb, Energetski institut "Hrvoje Požar", 70 pp.
3. Horvath L., Pilić Rabadan, Lj., Milas, Z. i sur. 1998. ENWIND – program korištenja energije vjetra – prethodni rezultati i buduće aktivnosti, Energetski institut "Hrvoje Požar", 190 pp.
4. Vidić, S., Bajić, A., Đuričić, V. i Vučetić, V. 1994. Implications of expected climatic changes on Cres/Lošinj islands: Part 2.4: Atmosphere, UNEP (OCA)/MED WG.55/5 (Revised), 36-55.

Magistarski rad

Bajić, A. 1984. Zimski prodori hladnog zraka perko Zagreba. Prirodoslovno matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, , 195 pp

Radovi u zbornicima radova s međunardonih konferencija i savjetovanja

1. Peroš, B., Bajić, A. i Divić, V. 2010. Wind energy potential in the Adriatic coastal area, Croatia - field study. *Proceedings CWE2010*, North Carolina, USA, 105-110.
2. Horvath, K., Bajić, A. i Ivatek-Šahdan, S. 2009. Dynamical downscaling of wind resources in complex terrain of Croatia. *Proceedings of the European Wind Energy Conference & exhibition, EWEC2009*, 658-663.
3. Horvath, L., Horvath, K., Karadža, N. i Bajić, A. 2009. A preliminary testing of integrated wind modelling system in complex terrain. *Proceedings of the European Wind Energy Conference & Exhibition, EWEC2009*, 664-670.
4. Ivančan-Picek, B., Grubišić, V., Stiperski, I., Xiao, M. i Bajić, A. 2007. "Zadar calm" during severe Bora, *29th International Conference on Alpine Meteorology*, Extended abstracts, 4– 8 June 2007, Chambéry, France, Vol. 1 / Meteo-France.Toulouse, 2007. 11-14.
5. Bajić A. i Glasnović, D. 1999. Impact of severe Adriatic Bora on traffic. *4th European Conference on Application of Meteorology* na CD, Norrköping, Švedska, 13-17. 9. 1999.
6. Bajić, A. 1999. Preliminary results of WASP application in Croatia. *European Wind Energy Conference and Exhibition* 1-5. 3.1999. Nice, France 1117-1120.
7. Bajić, A., Vučetić, V. i Cividini, B. 1998. Preliminary results of wind energy potential research in Croatia. *Proceedings on 16th International Congress "Energy and the Environment"*, Opatija-Croatia, 28-30. 10. 1998, 195-202.
8. Cividini, B., Žibrat, Z., Bajić, A. i Vučetić, V. 1998. Meteorološki monitoring za potrebe energetskog potencijala vjetra. *Proceedings on 16th International Congress "Energy and the Environment"*, Opatija, 28-30. 10. 1998, 211-218.
9. Vučetić, V., Bajić, A. i Cividini, B. 1998. Importance of wind measurement period for the wind energy potential estimation, *Proceedings on 16th International Congress "Energy and the Environment"*, Opatija, 28-30. 10. 1998, 195-202.

10. Vučetić, V., Bajić, A. i Viher, M. 1996. Local wind in the mountain area of Croatia. *24th International Conference on Alpine Meteorology*, Bled-Slovenia, 217-224.
11. Bajić A. i Vidič, S. 1995. Temporal changes of precipitation chemistry in the forested part of Croatia. *WMO-IGAC Conference on the Measurement and Assessment of atmospheric Composition Change*, Beijing, China, 9-14 October 1995, Extended Abstracts of Papers, pp. 36-40.
12. Vučetić, V. i Bajić, A. 1994. Generalized hydraulic model sensitivity for the input data. *Annalen der Meteorologie* **30**, 113-116.
13. Bajić, A. 1990. Application of two-layer hydraulic theory on the severe northern Adriatic bora. *21. International Conference on Alpine Meteorology*, Engelberg, September 17-21 1990, 148-152.
14. Bajić, A. 1987. Airflow in a broad valley according to Wippermann's model modified by the resistance law. *XIII International Conference on Carpatian Meteorology*, Busteni, September 14-19, 1987, 293-298.
15. Bajić, A. i Jurčec, V. 1985. A case study of cold air outbreak in Zagreb during ALPEX SOP. *XII International Conference on Charpatian Meteorology*, Beograd, May 1985, 37-40.
16. Jurčec, V. i Bajić, A. 1985. Effects of topography on velocity distribution in the atmospheric boundary layer. *XII International Conference on Charpatian Meteorology*, Beograd, May 1985, 50-53.
17. Bajić, A. 1984. A case study of cold air outbreak in Zagreb during ALPEX SOP. *XVIII International Conference for Alpine Meteorology*, Opatija, September 25-29, 1984, 35-38.

Sažeci u zbornicima radova s međunarodnih konferencija i savjetovanja

1. Beg Paklar, G., Bajić, A., Belušić, D., Kraljević, L., Dadić, V., Grbec, B., Orlić, M., Vilibić, I. 2008. Numerical simulation of the bora-driven currents during different synoptic conditions above the Adriatic. *Geophysical Research Abstract*, Beč, Austrija, EGU, 2008. 7647-7647.
2. Ivančan-Picek, B., Stiperski, I., Bajić, A., Grubišić, V. i Xiao, M. 2008. Sodar measurements during severe bora. *First International Conference on Remote Sensing Techniques in Disaster Management and Emergency Response in the Mediterranean Region - Abstract Book* 95-95.
3. Bajić, A. 2006. Extreme bura wind on the Adriatic. *Sixth Annual Meeting of the European Meteorological Society and Sixth European Conference on Applied Climatology*, EMS2006. 37.

4. Bajić, A. i Drakulić, M. 2005. Natural ventilation of the Sv. Rok Tunnel. *17th European Conference on Application of Meteorology - Proceedings*. Utrecht, Nizozemska.
5. Bajić, A. 2004. Extreme wind speeds in Croatia. *9th International Meeting on Statistical Climatology*, Abstracts, Cape Town, Južnoafrička Republika, South African Society for Atmospheric Sciences.

Radovi u zbornicima radova s domaćih konferencija i savjetovanja

1. Bajić, A. 2011. Olujni vjetar u Hrvatskoj. *Zbornik radova s 2. konferencije Hrvatske platforme za smanjenje rizika od katastrofa*, Trut, D. (ur.), Zagreb. DUZS, 141-147.
2. Bajić, A. 2009. Bura i cestovni promet. *Zbornik radova, Četvrto savjetovanje o održavanju cesta*, Hrvatski cestar, 299-304.
3. Bajić, A., Ivatek-Šahdan, S. i Žibrat, Z. 2008. ANEMO-ALARM – iskustva operativne primjene prognoze smjera i brzine vjetra. *Zbornik radova s trećeg hrvatskog savjetovanja o održavanju cesta – Održavanje cesta 2008*, Šibenik, 20-22. listopada 2008. 109-114.
4. Bajić, A. i Žibrat, Z. 2006. Meteorološka podloga za izradu Pravilnika o određivanju graničnih nivoa negativnog utjecaja brzine i smjera vjetra na sigurnost cestovnog prometa. *Prvo hrvatsko savjetovanje o održavanju cesta "Održavanje cesta 2006 – Zimska služba"*, Šibenik, 24-26.10.2006., 16-21.
5. Bajić, A. 2006. Bura na riječkom području. *II znanstveni skup "Istraživanje prirodoslovnih značajki riječkog područja*, Rijeka, 14-17.6.2006.
6. Bajić, A. 2004. Referentna brzina vjetra kao meteorološka podloga za procjenu opterećenja vjetrom. *Sabor hrvatskih graditelja 2004*, Hrvatski savez građevinskih inženjera, 741-747.
7. Bajić, A. 2003. Procjena smjera i brzine vjetra na trasi autoceste tunel Sv. Rok – Maslenica. *Hrvatska normizacija i srodne djelatnosti*, HDGK, 437-446.
8. Bajić, A. i Peroš, B. 2003. Meteorološka podloga za procjenu opterećenja vjetrom. *Hrvatska normizacija i srodne djelatnosti*, HDGK, 369-374.
9. Bajić, A. 2003. Meteorološka podloga za potrebe izgradnje autoceste Sv. Rok – Maslenica. *Treći hrvatski kongres o cestama*, Trogir, listopad, 2003
10. Bajić, A. 2003. Očekivani režim strujanja na trasi autoceste Tunel Sv. Rok – Maslenica. *Hrvatski kongres o normizaciji*, Cavtat, travanj 2003.

11. Bajić, A. 2003. Meteorološka podloga za hrvatske norme – opterećenje vjetrom. *Hrvatski kongres o normizaciji*, Cavtat, travanj 2003
12. Bajić A. 1999. Prijenos onečišćenja atmosferom na području Dubrovnika. *Zbornik radova 2. hrvatske konferencije o vodama*, Dubrovnik, 19-22. svibnja 1999, 137-143.
13. Bajić, A. i Vidič, S. 1998. Meteorološki aspekti djelovanja u izvanrednim situacijama. *Zbornik radova sa znanstvenog skupa "Andrija Mohorovičić – 140. obljetnica rođenja"*, 10-12. 3. 1998., 377-384.
14. Bajić, A. i Vučetić, V. 1998. Istraživanje energetskeg potencijala vjetra u Hrvatskoj. *Zbornik radova sa znanstvenog skupa "Andrija Mohorovičić – 140. obljetnica rođenja"*, 10-12. 3. 1998., 437-448.
15. Cividini, B., Peroš, B., Žibrat, Z. i Bajić, A. 1998. Važnost postojanja mjerenja smjera i brzine vjetra na lokaciji građevinskog objekta – primjer Masleničkog mosta. *Četvrti opći sabor hrvatskih građevinskih konstruktora*, Brijuni, 11-13. 6. 1998., 369-374.
16. Bajić, A. i Vidič, S. 1997. Primjena metode analize trajektorija za potrebe praćenja stanja okoliša. *Zaštita zraka '97. priopćenja*, Hrvatsko udruženje za zaštitu zraka, 1997. 181-195.
17. Bajić, A. 1994. Numeričko simuliranje polja vjetra na području NE Krško. *Zbornik radova s Drugog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja*, 23-25. studenog 1994, Zagreb.
18. Bajić, A. i Jurčec, V. 1985. Proračun trajektorija zračnih čestica. *VII International symposium "Computer aided design and computer aided manufacturing"*, Zagreb, October 16-17. 1985., 341-345
19. Bajić, A. i Jurčec, V. 1982. Usporedba metoda konačnih razlika i konačnih elemenata u proračunu advektivnih veličina u meteorologiji. *IV International Symposium "Computer aided design and computer aided manufacturing"*, Stubičke Toplice, 22-23. studeni 1982, 539-544.
20. Jurčec, V. i Bajić, A. 1982. Simulacija bure i juga mezoskalnim modelom. *IV International Symposium "Computer aided design and computer aided manufacturing"*, Stubičke Toplice, 22-23. studeni 1982, 533-538.