

Izvorni znanstveni rad  
Original scientific paper

## OPTEREĆENJE GRAĐEVINSKIH KONSTRUKCIJA BUROM

### Bora wind load upon structures

ALICA BAJIĆ

Državni hidrometeorološki zavod, Grič 3, 10000 Zagreb, Hrvatska  
*alica.bajic@cirrus.dhz.hr*

*Primljeno 1. travnja 2014., u konačnom obliku 17. lipnja 2014.*

**Sažetak:** 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. U postojećim opće prihvaćenim europskim standardima za proračun opterećenja građevinskih konstrukcija vjetrom koristi se maksimalna očekivana 10-minutna brzina vjetra. Tlak kojim vjetar te brzine djeluje na građevinu ukazuje 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. Analiza utjecaja turbulencije na opterećenje građevinskih konstrukcija olujnim vjetrom pokazala je da se pri projektiranju građevina na priobalju i otocima gdje brzina bure postiže ekstremne vrijednosti 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, uzimajući u proračunu u obzir dinamičko opterećenje konstrukcije, gotovo 4 puta veći od onog koji se dobije uzimajući u obzir samo statičko opterećenje vjetrom.

**Gljučne riječi:** *bura, intenzitet turbulencije, dinamičko opterećenje*

**Abstract:** Wind action, together with the earthquake action, represents dominant horizontal action on structures in his lifetime. Special significance of this action is that it is changing over time and its intensity varies depending on the meteorological characteristics of each area, and cannot be unified. In existing Eurocodes wind load calculation is based on the reference wind speed defined as a maximum 10-minutes average wind speed to be expected in a 50 years period. Wind with the reference wind speed results with so called static wind load. However, in 10 minutes wind speed varies significantly. That is particularly case during the severe and turbulent bora wind. Due to its gusty character and extreme turbulence, estimates of wind load in the bora region have to include the dynamical wind load caused by bora turbulence. This is confirmed during the example situation of strong bora wind conditions by the values of the exposure coefficient of 4 times greater than the exposure coefficient obtained using only static wind load.

**Key words:** *bora, turbulence intensity, dynamical load*

### 1. UVOD

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. Problematika analize brzine i smjera vje-

tra za potrebe proračuna opterećenja vjetrom naglašena je u Hrvatskoj još 1985. godine (Poje, 1985). Rezultati tog i kasnijih istraživanja iste problematike (Peroš, B., 1998; Peroš, B. i I. Boko, 2000; Peroš, B. i I. Boko, 2000a; Peroš, B. et al., 2003; Bajić, A. et al., 2001; Bajić, A. i B. Peroš, 2001; Bajić, A., 2004; Bajić, A. i B. Peroš, 2005; Bajić, A., 2011) rezultirala su izradom karte osnovne brzine vjetra na području

Republike Hrvatske koja je sastavni dio nacionalnog dodatka norme ENV 1991-1-4:2005. Pri tome je osnovna brzina vjetra definirana 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. 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. Vjetar velike mahovitosti i intenziteta turbulencije može uzrokovati rezonantni dinamički odgovor građevinske konstrukcije ili dijelova konstrukcije s prirodnom frekvencijom i manjom od 1 Hz (Holmes, J.D., 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.

Izrazita turbulentnost i velike brzine glavna su obilježja bure na priobalju i otocima (npr. Večenaj i dr., 2012; Belušić i dr., 2006). Općenito gledajući najveće brzine vjetra u Hrvatskoj zabilježene su upravo u situacijama s burom na Jadranu (Bajić, A. et al., 2001; Bajić, A., 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 (Makjanić, B., 1970; Lukšić, I., 1975; Petkovšek, Z., 1984; Jurčec, V., 1988; Jurčec, V., 1989; Bajić, A., 1988; Bajić, A., 1989; Tutiš, V., 1988; Vučetić, V., 1988; Ivančan-Picek, B. i V. Vučetić, 1990; Ivančan-Picek, B. i V. Tutiš, 1996; Tudor,

M. i S. Ivatek-Šahdan, 2002; Grisogono, B. i D. Belušić, 2009; Grubišuić, V., 2004; Gohm, A. i G.J. Mayr, 2005).

Mahovitost kao jednu od osnovnih karakteristika bure uočili su i analizirali mnogi autori (Yoshino, M.M., 1976; Jurčec, V., 1981; Petkovšek, Z., 1982; Smith, R.B., 1987; Belušić, D. et al., 2006). Međutim, utjecaj bure kao turbulentnog vjetra na opterećenje građevinskih konstrukcija analiziran je u svega nekoliko radova (Peroš, B. i I. Boko, 2000; Peroš, B. i I. Boko, 2000a; Peroš, B. et al., 2003; Bajić, A. et al., 2001; Bajić, A. i B. Peroš, 2001; Bajić, A., 2004; Bajić, A. i B. Peroš, 2005; Bajić, A., 2011). Stoga je cilj ovog rada analizom svih raspoloživih podataka visokofrekventnih mjerenja smjera i brzine vjetra na području Hrvatske ukazati na veličinu i značaj dinamičkog opterećenja na konstrukcije, osobito u područjima s olujnom burom.

## 2. KORIŠTENI PODACI MJERENJA SMJERA I BRZINE VJETRA

Za potpuni uvid u vremensku promjenjivost brzine vjetra, nužno je raspolagati mjerenjima u što kraćem intervalu vremena. Postojeći mjerni instrumenti omogućuju mjerenja koja kao rezultat daju sekundne vrijednosti smjera i brzine vjetra. Sekundna brzina i smjer vjetra korišteni u ovom radu mjereni su na 3 lokacije:

1. Dubrovački most (u daljnjem tekstu DM) i to na 1.5 m iznad kolnika na zapadnoj strani mosta u razdoblju ožujak – svibanj 2001. godine
2. Na vrhu Senjske kule (u daljnjem tekstu SE) na visini 4 m od vrha u razdoblju od 29. studenog 2001. do 1. veljače 2002. godine
3. Kod Masleničkog mosta (u daljnjem tekstu MM) s lokacije poligona burobrana gdje su mjerenja provedena za potrebe Hrvatskih autocesta u razdoblju od 17. prosinca 2003. do 27. svibnja 2004.

**Tablica 1.** Odabrane situacije s jakom i/ili olujnom burom.

**Table 1.** Analysed strong/severe bora situations.

Lokacija	Početak bure	Kraj bure	Trajanje bure
MM	22. 12. 2003. 17h 10min	25. 12. 2003. 09h 00min	63h 00min
SE	7. 12. 2001. 20h 00min	9. 12. 2001. 22h 10min	50h 20min
DM	14. 4. 2001. 16h 30min	15. 4. 2001. 10h 10min	17h 40min

### 3. ODABRANE SITUACIJE S OLUJNOM BUROM

Pregledom podataka mjerenja smjera i brzine vjetra, navedenih u prethodnom poglavlju, odabrane su tri situacije s olujnom burom za daljnju analizu (Tablica 1).

Za početak situacije uzet je:

- prvi 10-minutni termin u kojem je zapuhala bura srednje 10-minutne brzine veće od 10.7 m/s nakon čega u najmanje 5 sati 10-minutna brzina vjetra nije pala ispod 10 m/s.

ili

- prvi 10 minutni termin u kojem je vjetar bio smjera bure, a trenutna brzina veća od 25 m/s.

Kao završetak situacije uzet je:

- zadnji 10-minutni termin u kojem je srednja 10-minutna brzina vjetra iznosila više od 10.7 m/s i nakon kojeg 10-minutna brzina vjetra u najmanje 5 sati uzastopce nije porasla iznad 10 m/s

ili

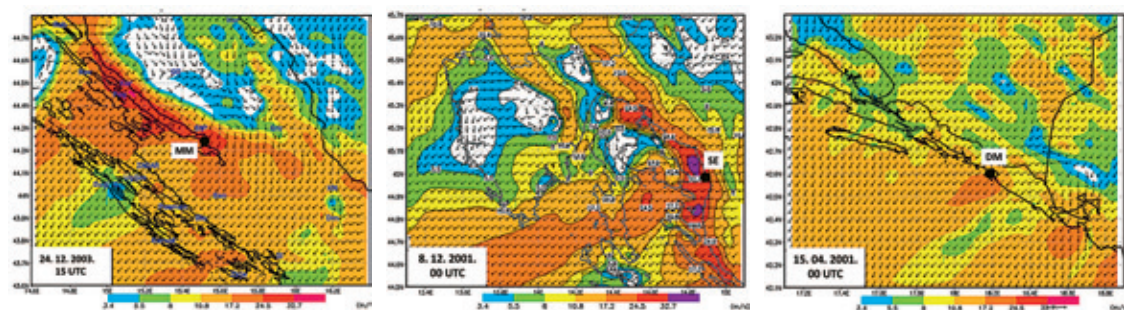
- zadnji 10-minutni termin u kojem je vjetar bio smjera bure, a trenutna brzina vjetra veća od 25 m/s.

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 (Jurčec, V., 1981, 1989; Belušić, D. et al., 2006). 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.

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 (Slika 2). Sinoptičku situaciju karakterizirala je ciklona nad Tirenskim morem i područje visokog tlaka zraka iznad NW Europe što je uzrokovalo NE strujanje nad Jadranom. Okomito na Velebit formirao se jugozapadni gradijent tlaka koji je pogodovao nastanku bure. Visinska ciklona sa centrom nad Sardinijom odgovorna je za istočno visinsko strujanje. Hod brzine vjetra (Slika 1) ukazuje na pojavu bure u podnevnim satima 22. 12. 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.

Senj je zbog svog položaja podno planinskog prijevoja Vratnik (koji svojim kanalizirajućim efektom pojačava vjetar sjeveroistočnog smjera) mjesto poznato po čestim olujnim burama koje na toj lokaciji pušu i kada na ostalom dijelu obale ne bilježimo tako jaku buru ili ona uopće ne puše (Bajić, 1989; 2010). Tako je i tijekom čitavog prosinca 2001. godine u Senju zabilježeno nekoliko razdoblja s olujnom burom. Ovdje ćemo analizirati situaciju s najvećom brzinom vjetra 7-9. 12. 2001., gdje prizemno polje tlaka karakterizira područje niskih vrijednosti nad južnim Jadranom te područje višeg tlaka zraka sjeverozapadno od Hrvatske. Što je gradijent tlaka preko planinske prepreke Velebita veći, to je bura u Senju izraženija (Ivančan-Picek i Tutiš,



**Slika 1.** Polje brzine vjetra (m/s) na 10 m iznad tla dobiveno dinamičkom adaptacijom (Žagar, M. i J. Rakovec, 1999) rezultata ALADIN modela (Ivatek-Šahdan, S. i M. Tudor, 2004) u situacijama s olujnom burom analiziranim u ovom radu.

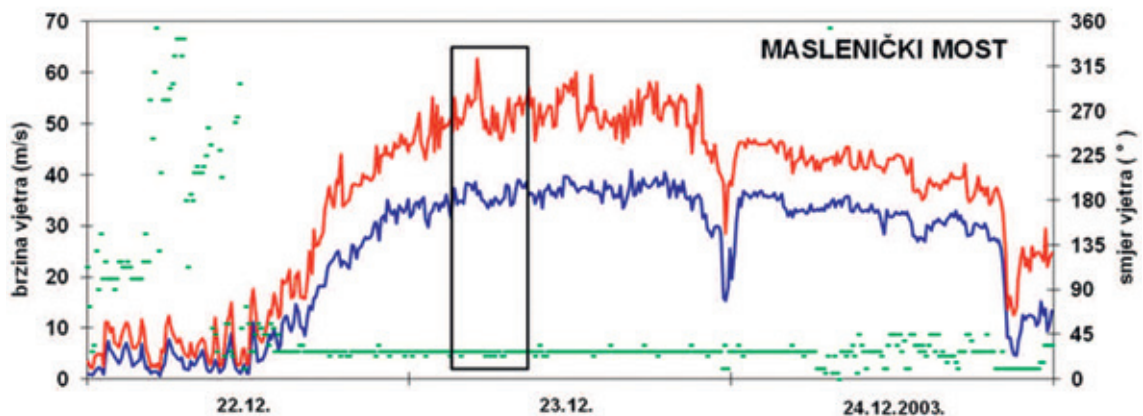
**Figure 1.** Wind field (m/s) at 10 m above ground obtained using dynamical adaptation (Žagar, M. and J. Rakovec, 1999) of the ALADIN model results (Ivatek-Šahdan, S. and M. Tudor, 2004) in situation with severe bora wind analysed in this paper.

1995). To je potvrđeno i u ovom slučaju (Slika 1). Maksimalna 10-minutna brzina vjetra od 25.7 m/s zabilježena je 8. 12. 2001. u 9:30 h, a maksimalni udar vjetra od 43.3 m/s izmjeren je istog dana u 14:40 h (Slika 3).

Kao primjer bure na području južnog Jadrana odabrana je situacija zabilježena od 13. do 15. travnja 2001. na Dubrovačkom mostu. Prizemno polje tlaka zraka obilježila je ciklona nad Otrantskim vratima i izraženi gradijent tlaka

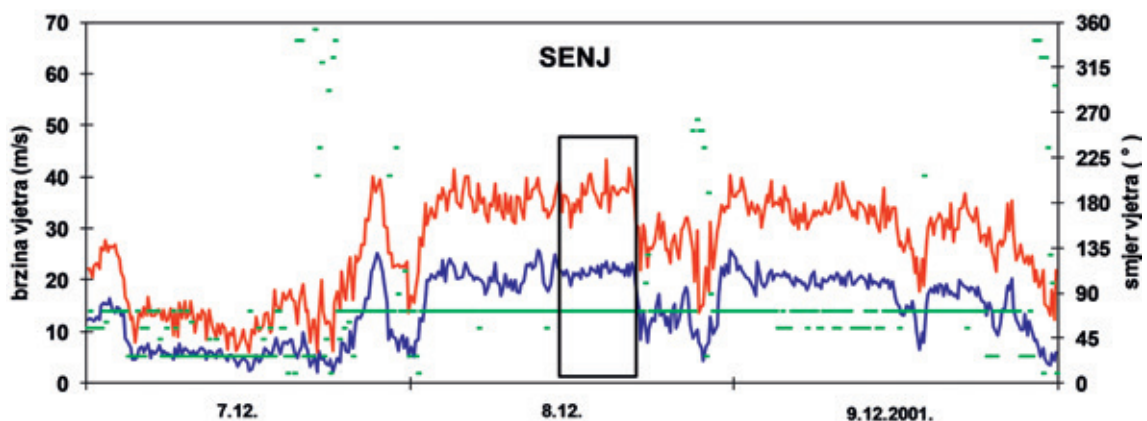
zraka između obale i kopnenog zaleđa na području srednjeg i južnog Jadrana koji je doprinio pojavi najjače bure upravo na području Dubrovnika (Slika 1). Maksimalna 10-minutna brzina vjetra od 19.4 m/s zabilježena je 15. 4. 2001. u 0:00 h, a maksimalni udar vjetra od 34.1 m/s izmjeren je istog dana u 01:50 h (Slika 4).

Osnovna statistička obilježja brzine vjetra u odabranim vremenskim situacijama dana u Tablici 2 pokazuju da se prosječna brzina vjetra



**Slika 2.** Hod 10-minutne (plava linija) brzine vjetra, maksimalne trenutne (crvena linija) brzine vjetra i smjera vjetra (zeleno) na lokaciji MM u razdoblju 22.-24. 12. 2003. Okvirom je označen 6-satni interval za koji su detaljno analizirane sekundne brzine vjetra.

**Figure 2.** Course of 10-minutes wind speed (blue line), maximum wind gusts (red line) and wind direction (green) on MM location in situation 22-24 December 2003. Frame indicate 6-hourly interval for which the second wind speeds has been analysed in details.



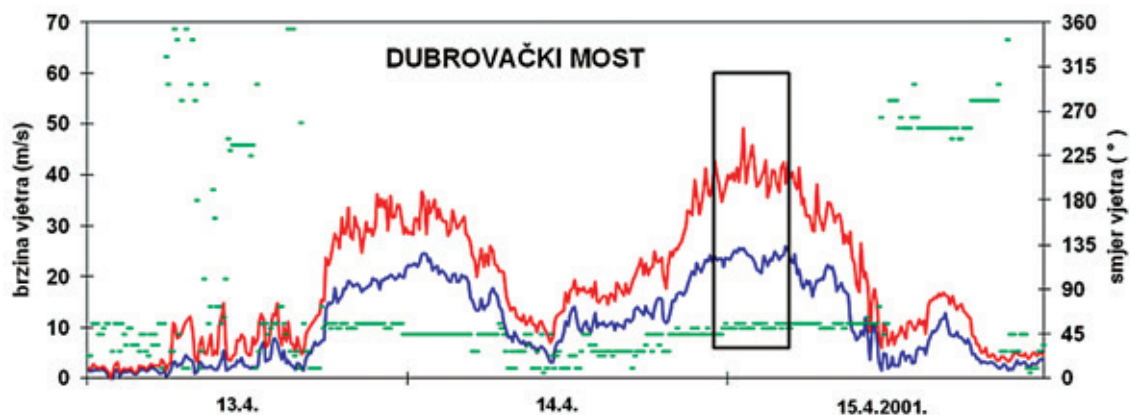
**Slika 3.** Hod 10-minutne (plava linija) brzine vjetra, maksimalne trenutne (crvena linija) brzine vjetra i smjera vjetra (zeleno) na lokaciji SE u razdoblju 7.-9. 12. 2001. Okvirom je označen 6-satni interval za koji su detaljno analizirane sekundne brzine vjetra.

**Figure 3.** Course of 10-minutes wind speed (blue line), maximum wind gusts (red line) and wind direction (green) on SE location in situation 7-9 December 2001. Frame indicate 6-hourly interval for which the second wind speeds has been analysed in details.

kretala od 14.8 m/s u prosincu 2003. na poligonu burobrana kod Masleničkog mosta do 19.1 m/s na Dubrovačkom mostu.

Najveća prosječna brzina vjetra u nekoj situaciji nije uvjet da je u istoj situaciji zabilježena i najveća sekundna brzina vjetra. Naime, promjenjivost sekundnih brzina vjetra može biti bitno različita na različitim lokacijama, ali i u različitim vre-

menkim situacijama na istoj lokaciji (Bajić, 2009; 2011). Na to ukazuje iznos standardne devijacije brzine vjetra (kao veličine koja je kvantitativni pokazatelj promjenjivosti brzine vjetra) dan u Tablici 2. U skladu sa standardnom devijacijom je i interval brzine u kojem se nalazi najveći broj podataka. Tako je na MM 80% sekundnih brzina vjetra zabilježeno u širokom intervalu brzina od 6.4 m/s do 24.1 m/s (Slika 5).



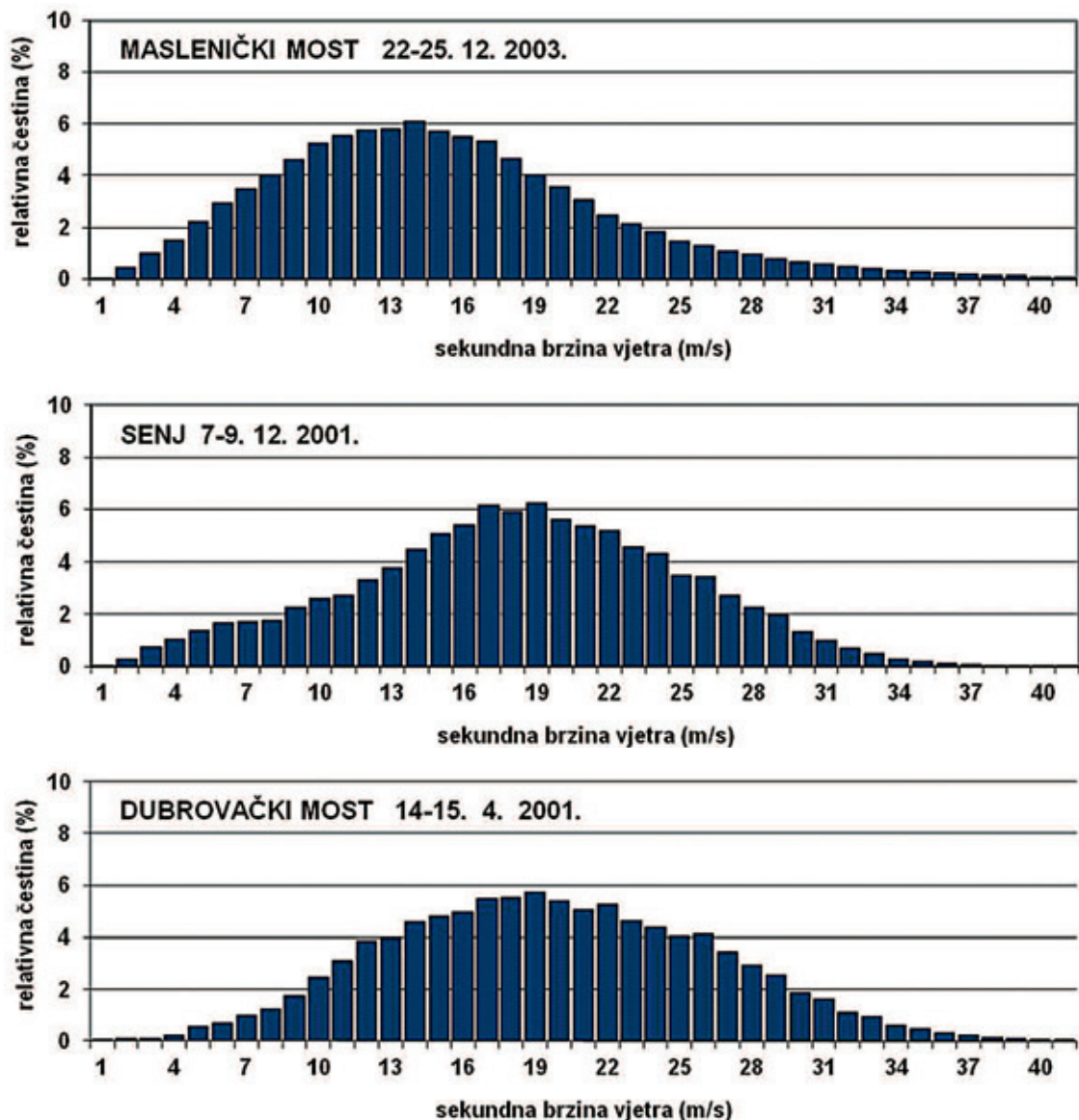
Slika 4. Hod 10-minutne (plava linija) brzine vjetra, maksimalne trenutne (crvena linija) brzine vjetra i smjera vjetra (zeleno) na lokaciji DM u razdoblju 13.-15. 04. 2001. Okvirom je označen 6-satni interval za koji su detaljno analizirane sekundne brzine vjetra.

**Figure 4.** Course of 10-minutes wind speed (blue line), maximum wind gusts (red line) and wind direction (green) on DM location in situation 13-15 April 2001. Frame indicate 6-hourly interval for which the second wind speeds has been analysed in details.

**Tablica 2.** Osnovna statistička obilježja brzine vjetra u odabranim situacijama na lokacijama Maslenički most (MM), Senj (SE) i Dubrovački most (DM). T – trajanje situacije u sekundama, NP – nedostajući podaci u %, st. dev. – standardna devijacija, 10%, 25%, 75%, 90% - percentili.

**Table 2.** Main statistical wind speed characteristics in selected synoptic situations on location Maslenica Bridge (MM), Senj (SE) and Dubrovnik Bridge (DM). T – duration in seconds, NP – number of missing data in %, st.dev. – standard deviation, 10%, 25%, 75%, 90% - percentiles.

	MM	SE	DM
<b>Sekundna brzina</b>			
T (sec)	229800	180600	63660
NP (%)	2.70	0.04	0.19
Vsec srednja (m/s)	14.78	17.74	19.13
Vsec st. dev. (m/s)	7.19	6.69	6.73
Vsec maksimum (m/s)	61.4	43.3	49.1
Vsec 10% (m/s)	6.4	8.6	10.6
Vsec 25% (m/s)	9.7	13.3	14.2
Vsec 75% (m/s)	18.7	22.4	23.9
Vsec 90% (m/s)	24.1	26.4	28.0



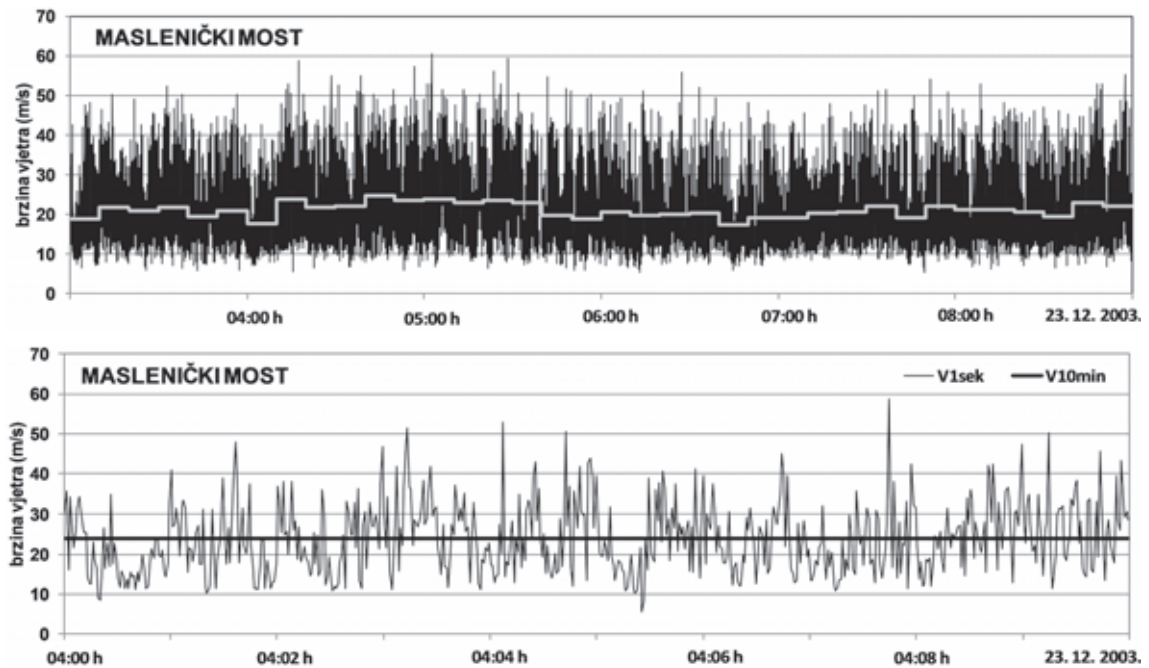
Slika 5. Razdioba čestina sekundnih brzina vjetra u odabranim situacijama s jakom burom: gore) Maslenički most, 22.-25. 12. 2003.; sredina) Senj, 7.-9. 12. 2001. i dolje) Dubrovački most, 14.-15. 4. 2001.

Figure 5. Second wind speeds frequency distribution in selected severe wind situations.

#### 4. TURBULENTNE KARAKTERISTIKE BURE

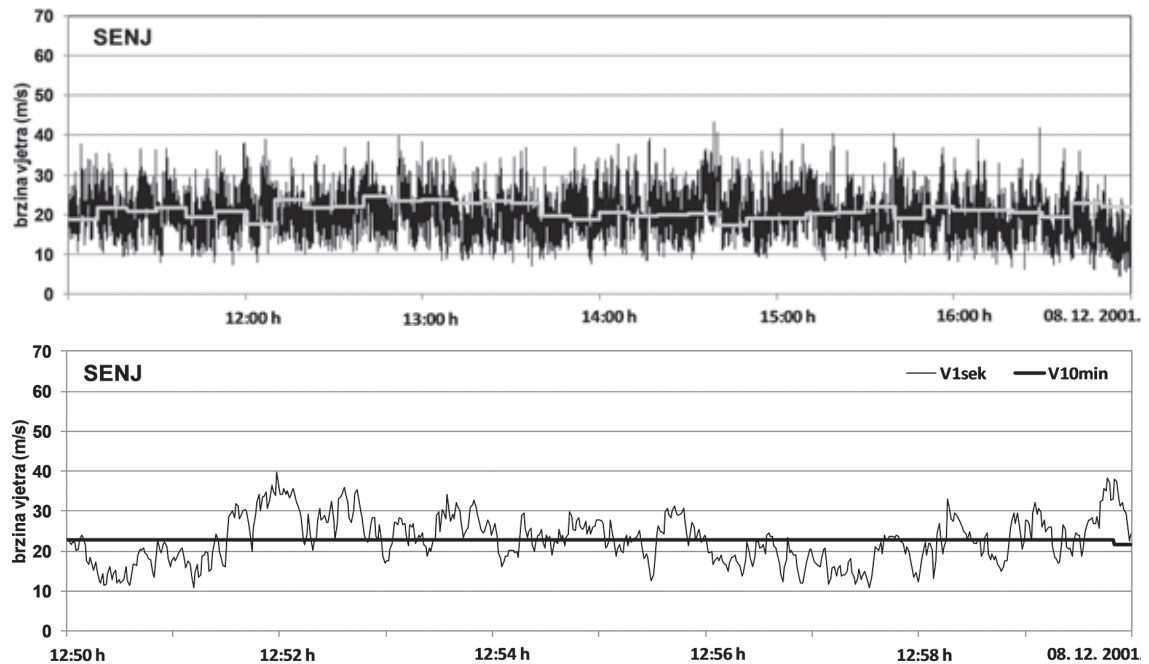
Zapisi brzine vjetra u situacijama s olujnom burom pokazuju da brzina vjetra u 10-minutnom intervalu znatno varira, tj. da je bura mahovit vjetar. U takvim je situacijama uobičajeno da maksimalni udar u 10-minutnom intervalu bude 2-3 puta veći od srednje 10-minutne brzine vjetra (Bajić, A. i B. Peroš, 2001; Bajić, A., 2009). Tako primjer olujne bure zabilježe-

ne 23. 12. 2003. na lokaciji MM pokazuje da se brzina vjetra u svega nekoliko sekundi promijenila 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 6). Nešto manja promjenjivost brzine vjetra u 10-minutnom intervalu opažena je na lokacijama SE i DM (Slike 7 i 8). U oscilacijama brzine vjetra u drugim slučajevima jake bure uobičajeno se uočavaju slične pulsacije (Belušić, D. et al., 2004).



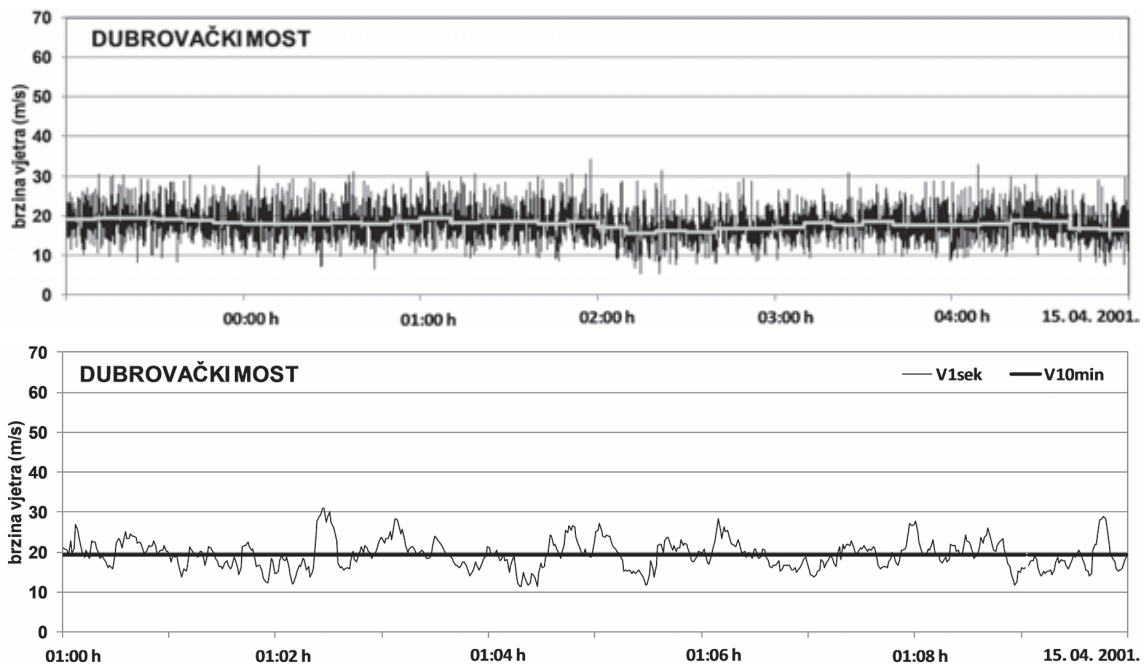
Slika 6. Hod sekundne (crna linija) i 10-minutne (siva linija) brzine vjetra na lokaciji MM u razdoblju 03-09 sati 23. 12. 2003. godine (gore) i u 10-minutnom intervalu s najvećom sekundnom brzinom vjetra (dolje).

Figure 6. Course of second (black line) and 10-minutes (gray line) wind speed at MM location in period 03-06 hours on 23 December 2003. (top) and in 10-minutes interval with highest wind speeds (bottom).



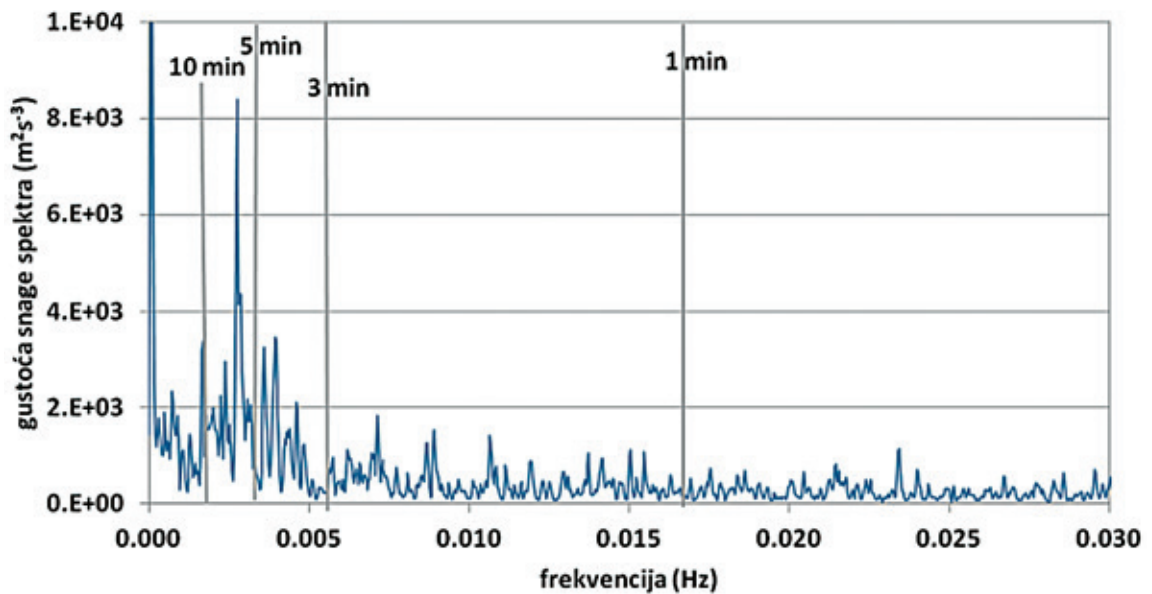
Slika 7. Hod sekundne (crna linija) i 10-minutne (siva linija) brzine vjetra na lokaciji SE u razdoblju 11-17 sati 8. 12. 2001. godine (gore) i u 10-minutnom intervalu s najvećom sekundnom brzinom vjetra (dolje).

Figure 7. Course of second (black line) and 10-minutes (gray line) wind speed at SE location in period 11-17 hours on 8 December 2001. (top) and in 10-minutes interval with highest wind speeds (bottom).



Slika 8. Hod sekundne (crna linija) i 10-minutne (siva linija) brzine vjetra na lokaciji DM u razdoblju od 23 sata 14. 4. 2001. do 05 sati 15. 4. 2001. godine (gore) i u 10-minutnom intervalu s najvećom sekundnom brzinom vjetra (dolje).

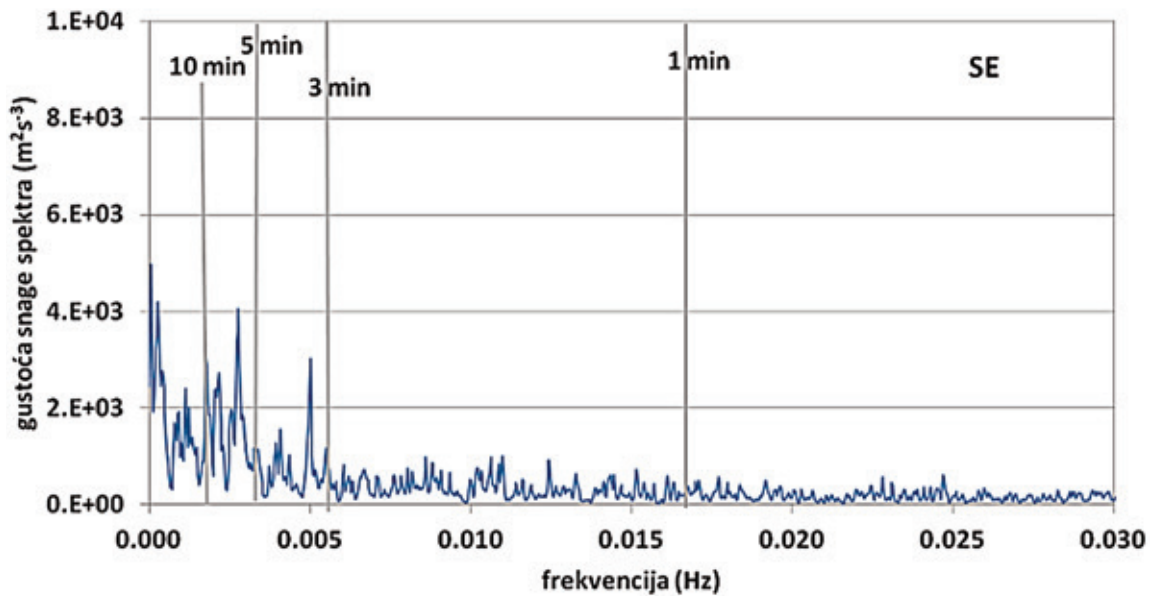
Figure 8. Course of second (black line) and 10-minutes (gray line) wind speed at DM location in period 23 hours on 14 April 2001 to 05 hours on 15 April 2001 (top) and in 10-minutes interval with highest wind speeds (bottom).



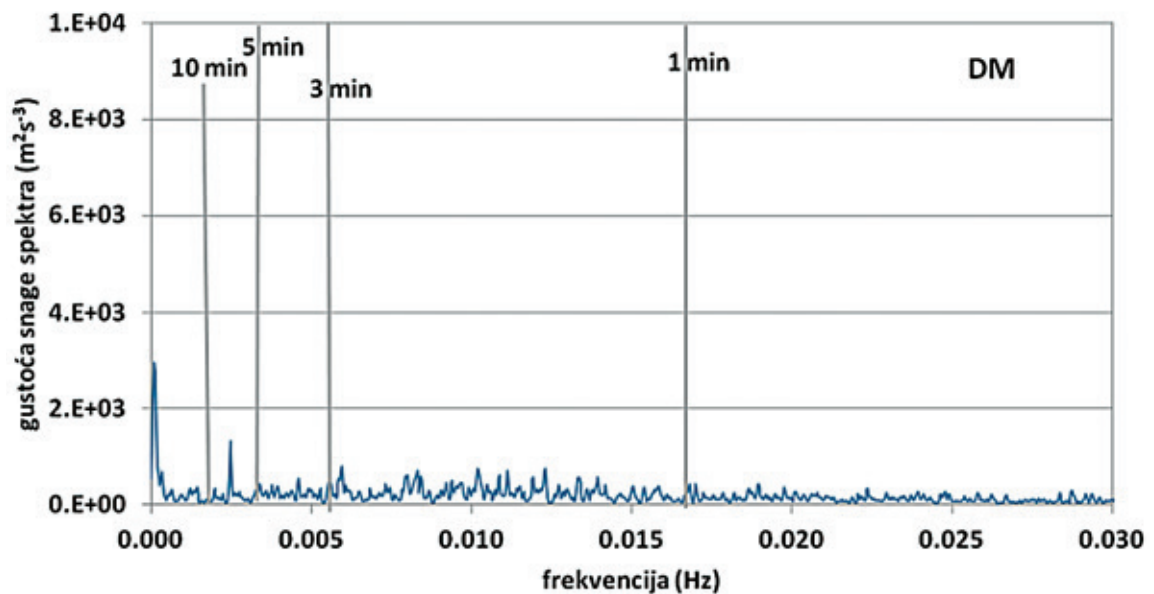
Slika 9. Spektar snage sekundnih vrijednosti brzine vjetra u razdoblju 03-09 sati 23. 12. 2003. na lokaciji MM.

Figure 9. Power spectra of second wind speeds in period 03-09 hours on 23 December 2003 at MM location.





Slika 10. Spektar snage sekundnih vrijednosti brzine vjetra u razdoblju 11-17 sati 8. 12. 2001. godine na lokaciji SE.  
 Figure 10. Power spectra of second wind speeds in period 11-17 hours on 8 December 2001 at SE location.



Slika 11. Spektar snage sekundnih vrijednosti brzine vjetra u razdoblju od 23 sata 14. 4. 2001. do 05 sati 15. 4. 2001. godine na lokaciji DM.

Figure 11. Power spectra of second wind speeds in period 23 hours on 14 April 2001 to 05 hours on 15 April 2001 at DM location.

Spektralna analiza brzine vjetra izmjerene u 6-satnim razdobljima označenim na slikama 6-8 pokazuje da na sve tri lokacije postoji porast gustoće snage za frekvenciju 0.0024-0.0028 Hz, tj. za period od 6-7 min (Slike 9-11). To je u skladu s rezultatima dobivenim za kvaziperio-

dičke bure zabilježene u Senju u siječnju 2006. godine. Spektralna analiza podataka visokofrekventnih mjerenja brzine vjetra u toj situaciji (Belušić, D. et al., 2004; Belušić, D. et al., 2006) u Senju je pokazala da uočene oscilacije brzine vjetra predstavljaju kvaziperiodički do-

prinos ukupnoj mahovitosti vjetra. Ova pulsacija brzine vjetra pojavljuje se s periodima od ~3-7 minuta, a njena pojava pri tlu nije generirana lokalnim mehanizmom. Najvjerojatniji mehanizam koji dovodi do pulsacija je Kelvin-Helmholtzova nestabilnost koja se javlja iznad niske mlazne struje ispod područja loma vala. Nekoliko manjih maksimuma koje uočavamo na slikama 9-11 koji se nalaze na frekvencijama iznad 0.006 Hz ( $T < 3$  min) su svi podjednako iznosa i primarno su lokalnog porijekla.

Osrednjavanjem brzine vjetra u 10-minutnom intervalu gubi se informacija o spomenutim pulsacijama brzine vjetra s periodima 3-7 minuta, a time i informacija o mogućem dinamičkom opterećenju na konstrukcije.

Uočena 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 ( $V'$ ):

$$V = \bar{V} + V' \quad (1)$$

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

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

gdje je  $N$  broj podataka. Izraz u zagradi je upravo turbulentna komponenta brzine vjetra i ako vrijedi (Jed. 1), onda varijancu možemo definirati i kao:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V'^2 = \overline{V'^2} \quad (3)$$

a standardnu devijaciju kao:

$$\sigma = \sqrt{\overline{V'^2}} \quad (4)$$

Omjer standardne devijacije (4) i srednje brzine vjetra je bezdimenzionalna mjera intenziteta turbulencije i u slučaju 10-minutnog osrednjavanja brzine vjetra intenzitet turbulencije  $I_V$  iznosi:

$$I_V = \frac{\sigma}{V_{10}} \quad (5)$$

gdje je  $V_{10}$  srednja 10-minutna brzina vjetra, a  $\sigma$  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:

$$q_p = [1 + 2 f_p I_v] \frac{1}{2} \rho V_b^2 \quad (6)$$

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,  $\rho$  je gustoća zraka,  $I_v$  intenzitet turbulencije dan s jednadžbom (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):

$$C_e = \frac{q_p}{q_0} \quad (7)$$

gdje je

$$C_e = [1 + 2 f_p I_v] \quad (8)$$

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:

$$FM = \frac{V_x}{V_{10}} \quad (9)$$

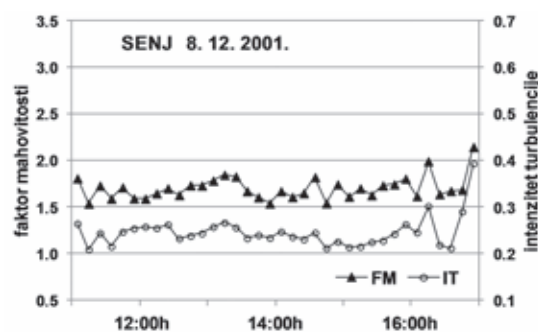
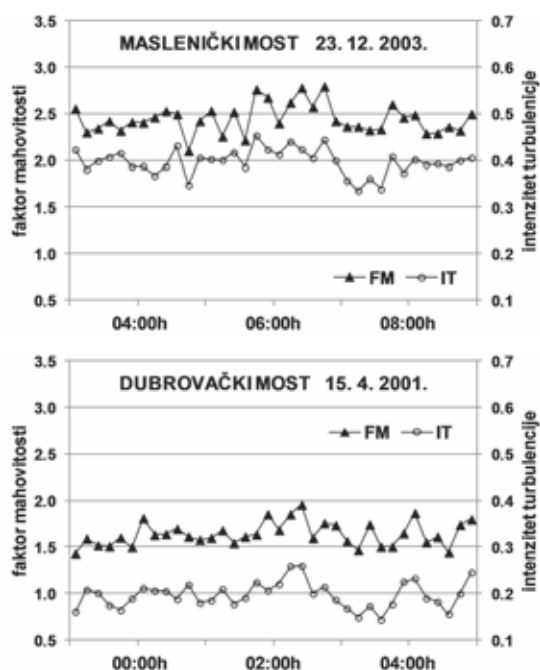
Iznosi veličina koje ukazuju na znatnu mahovitost i intenzitet turbulencije u našem primjeru olujne bure na Masleničkom mostu pokazuju da je prosječni intenzitet turbulencije u 6 sati najjače bure iznosio  $I_v=0.397$ , a faktor mahovitosti  $FM=2.44$  (Tablica 3. i Slika 12). Na ostale dvije lokacije ti su iznosi nešto manji, ali maksimalni faktor mahovitosti i tu prelazi 1.95, a maksimalni intenzitet turbulencije nadmašuje 0.25.

Usporedbe radi u situaciji s olujnim jugom zabilježenim 9.-12. 12. 2008. na lokaciji Bobani na Kozjaku iznad Splita prosječni faktor mahovitosti iznosio je 1.52, a intenzitet turbulencije 0.179 (Bajić, A., 2011).

**Tablica 3.** Srednje (sr) maksimalne (max) i minimalne (min) vrijednosti faktora mahovitosti ( $FM$ ) i intenziteta turbulencije ( $I_v$ ) u tri analizirane situacije s olujnom burom.

**Table 3.** Average (sr), maximum (max) and minimum (min) values of gust factor ( $FM$ ) and turbulence intensity ( $I_v$ ) in three severe bora situations analysed in this paper.

	MM 23.12.2003.	SE 8.12.2001.	DM 15.4.2001.
$FM_{sr}$	2.441	1.705	1.638
$FM_{max}$	2.792	2.140	1.952
$FM_{min}$	2.098	1.540	1.429
$I_{vsr}$	0.397	0.246	0.196
$I_{vmax}$	0.453	0.392	0.259
$I_{vmin}$	0.336	0.209	0.143



**Slika 12.** Hod faktora mahovitosti i intenziteta turbulencije u analiziranim situacijama s olujnom burom: gore lijevo) Maslenički most u razdoblju 03-09 sati 23. 12. 2003., gore desno) Senj u razdoblju 11-17 sati 8. 12. 2001. godine i dolje lijevo) Dubrovački most u razdoblju od 23 sata 14. 4. 2001. do 05 sati 15. 4. 2001. godine.

**Figure 12.** Course of gust factor and turbulence intensity in analysed severe bora situations.

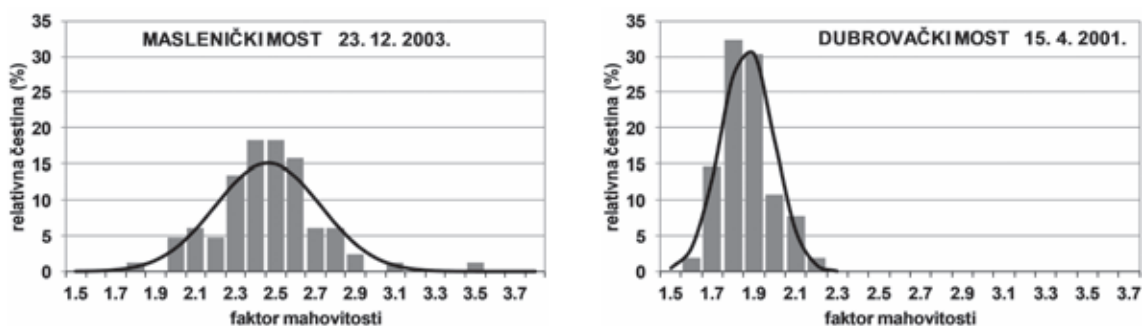
Uz pretpostavku da su vrijednosti faktora mahovitosti normalno raspodijeljene i da postoji linearna ovisnost standardne devijacije sekundnih brzina vjeta i odstupanja sekundnih od srednje 10-minutne brzine vjeta (Holmes, J.D., 2001; Stull, R., 1988) možemo definirati vršni faktor kao:

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

Kombinirajući jednadžbe (5) i (9) dobije se odnos vršnog faktora, faktora mahovitosti i intenziteta turbulencije:

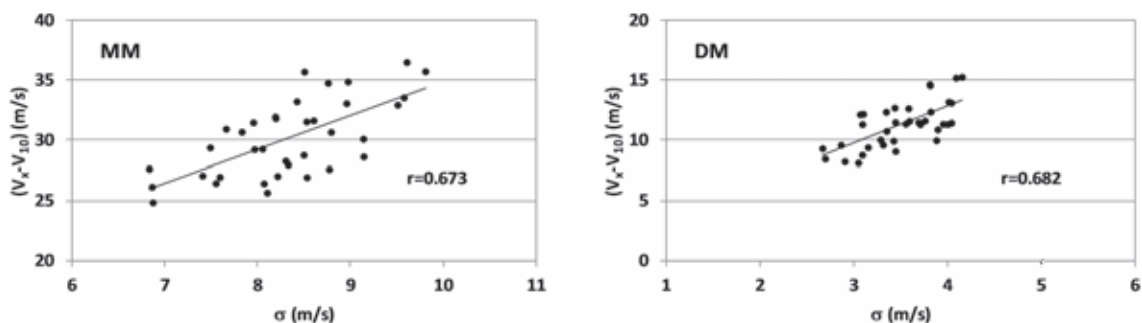
$$f_p = \frac{FM - 1}{I_v} \quad (11)$$

U situaciji s olujnom burom 23.12.2003. na Masleničkom mostu i 15.4.2001. na Dubrovačkom mostu ispunjena su oba uvjeta za koje vrijedi jednadžba (10): normalno raspodijeljen faktor mahovitosti (Slika 14) i linearni odnos standardne devijacije sekundnih brzina vjeta i razlike maksimalne sekundne i srednje brzine vjeta u 10-minutnom intervalu osrednjavanja (Slika 14). To znači da vrijedi odnos faktora mahovitosti i intenziteta turbulencije dan u jednadžbi (11).



Slika 13. Razdiobe relativne čestine (histogrami) faktora mahovitosti u situaciji 23. 12. 2003. na lokaciji MM i 15. 4. 2001. na lokaciji DM i njima pridijeljena normalna razdioba (linija).

Figure 13. Relative frequency distribution of gust factor in situations on 23 December 2003 at MM location and on 15 April 2001 on DM location and fitted normal distributions (lines).



Slika 14. Odnos standardne devijacije sekundnih brzina vjetra u 10-minutnom intervalu i razlike  $V_x - V_{10}$  u situaciji 23. 12. 2003. na lokaciji MM i u situaciji 15. 4. 2001. na lokaciji SM. Linija označava pravac linearne regresije, a  $r$  je koeficijent korelacije.

Figure 14. Relationship between second wind speed standard deviation and  $V_x - V_{10}$  difference in situations on 23 December 2003 at MM location and on 15 April 2001 on DM location. Line indicate linear regression line and  $r$  is correlation coefficient.

Tablica 4. Iznosi srednje 10-minutne brzine vjetra ( $V_{10}$  m/s), standardne devijacije sekundne brzine vjetra ( $\sigma$  m/s), faktora mahovitosti ( $FM$ ), intenziteta turbulencije ( $I_v$ ), vršnog faktora ( $f_p$ ), osnovnog ( $q_0$  N/m<sup>2</sup>) i vršnog ( $q_p$  N/m<sup>2</sup>) tlaka vjetra, osnovne brzine vjetra ( $V_b$  m/s), te faktora izloženosti ( $C_e$ ) u situacijama s olujnom burom na lokacijama Masleničkog i Dubrovačkog mosta.

Table 4. Values of mean 10-minutes wind speed ( $V_{10}$  in m/s), second wind speed standard deviation ( $\sigma$  in m/s), gust factor ( $FM$ ), turbulence intensity ( $I_v$ ), peak factor ( $f_p$ ), basic ( $q_0$  in N/m<sup>2</sup>) and peak ( $q_p$  in N/m<sup>2</sup>) wind pressure, basic wind speed ( $V_b$  in m/s), exposure coefficient ( $C_e$ ) in severe bora situations at Maslenica bridge and Dubrovnik bridge.

	$V_{10}$ (m/s)	$\sigma$ (m/s)	$FM$	$I_v$	$V_b$ (m/s)	$f_p$	$q_0$ (N/m <sup>2</sup> )	$q_p$ (N/m <sup>2</sup> )	$C_e$
MM 23.12.2003.	21.0	8.337	2.441	0.397	47.8	3.637	1428	5712	4.01
DM 15.4.2001.	17.9	3.503	1.638	0.196	28.7	3.255	559	1330	2.38

Proračun tlaka vjetra i faktora izloženosti u te dvije situacije s olujnom burom daje vrijednosti navedne u Tablici 4. Pokazuje se da je za vrijeme olujne bure na Masleničkom mostu 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). Ta 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  $C_e=2.35$ . Proračunata vrijednost koeficijenta izloženosti u slučaju olujne bure na Dubrovačkom mostu daje samo nešto veće vrijednosti ( $C_e=2.38$ ). Faktor izloženosti u svim ovdje analiziranim situacijama je veći od faktora izloženosti vjetrom na nekoliko lokacija na kompleksnom terenu Norveške gdje se on kreće od 0.64 do 1.60 (Harstveit, K., 1996). To ukazuje na specifičnost vjetrokline hrvatskog priobalja.

Dani rezultati proračuna potvrđuju u nekoliko navrata naglašenu tezu (Peroš, B., 1998, Peroš, B. i I. Boko, 2000; Peroš, B. i I. Boko, 2000a; Peroš, B. et al., 2003; Bajić, A. et al., 2001; Bajić, A. i B. Peroš, 2001; Bajić, A., 2004; Bajić, A. i B. Peroš, 2005; Bajić, A., 2011) da se pri projektiranju građevinskih konstrukcija na područjima s olujnom burom mora uzeti u obzir dinamička komponenta opterećenja koja je na priobalju (osobito podno Velebita) bitno veća od one preporučene europskom normom.

## 5. ZAKLJUČAK

Analiza utjecaja turbulencije na opterećenje građevinskih konstrukcija olujnim vjetrom pokazala je da se pri projektiranju građevina na priobalju, 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. Dakle, pri procjeni djelovanja vjetra na konstrukcije nužno

je uzeti u obzir obje komponente opterećenja (statičko i dinamičko) kako bi parametri korišteni pri projektiranju osigurali izgradnju stabilne konstrukcije otporne na djelovanje vjetra. Neuvažavanje ove činjenice u praksi dovodi svake godine do rušenja ili oštećenja konstrukcija, posebno brojnijih i složenijih visokih objekata koji se grade (tornjeva, vjetroagregata, dalekovodnih stupova).

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). Da bi takvo istraživanje bilo što sveobuhvatnije nužno bi bilo raspolagati dugotrajnijim visokofrekventnim mjerjenjima brzine vjetra na nekoliko lokacija karakterističnih po čestoj pojavi olujne bure.

## Zahvala

Ovaj rad izrađen je u okviru znanstveno-istraživačkog projekta Pouzdanost konstrukcija i procjena rizika uslijed ekstremnih djelovanja (083-0821466-1465) sufinanciranog od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske.

## LITERATURA

- 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., 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., 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.
- Bajić, A., 2011: Prostorna raspodjela očekivanih maksimalnih brzina vjetra na složenom terenu Hrvatske kao podloga za ocjenu opterećenja vjetrom. Doktorska disertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 110 pp.
- Belušić, D., Pasarić, M. i Orlić, M., 2004: Quasi-periodic bora gusts related to the structure of the troposphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 130, 1103-1121.
- 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.
- EN 1991-1-4, 2005. Eurocode 1: Action on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions. *European Committee for Standardization*, Bruxelles, 146 pp.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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., 1995: Mesoscale bora flow and mountain pressure drag. *Meteorologische Z.* 4 119-128.
- Ivančan-Picek, B. i Tutiš, V., 1996: A case study of a severe Adriatic bora on 28 December 1992. *Tellus* 48A, 357-367.
- Ivatek-Šahdan S. i Tudor M., 2004: Use of high-resolution dynamical adaptation in operational suite and research impact studies. *Meteorol. Z.* 13, 99-108.
- Jurčec, V., 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., 1981: On mesoscale characteristics of bora conditions in Yugoslavia. *Pure and Applied Geophysics* 119/3, 640-657.
- Lukšić, I., 1975: Bura u Senju. *Senjski zbornik* 6, 467-494.
- Makjanić, B., 1970: On the diurnal variation of the bora wind speed. *Rad JAZU* 349, 33-92.
- 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., 2000: Reliability of steel bridges exposed to the Bora wind action. *International Conference on Steel Structures*, Istanbul, 51-56.
- Peroš, B. i Boko, I., 2000a: 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., 1984: Some characteristics of bora gusts. *Zbornik meteoroloških i hidroloških radova* 10, 119-122.
- Petkovšek, Z., 1982: Gravity waves and bora gusts. *Ann. Meteorol.* 19, 108-110.
- Poje, D., 1985: Neki rezultati istraživanja o brzinama vjetra u SRH. *Građevinar* 37, 7-14.
- Smith, R. B., 1987: Aerial observations of the Yugoslavian bora. *J. Atmos. Sci.* 44, 269-297.
- Stull, R., 1988: An introduction to boundary layer meteorology- Atmospheric science library, Kluwer academic press, 666 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.
- Večenaj, Ž., Belušić, D., Grubišić, V. i Grisogono, B., 2012: Along-coast features of the bora related turbulence. *Boundary - layer meteorology* 143, 527-545.
- Vučetić, V., 1988: Bora on the northern Adriatic, 12-18 April 1982. *Rasprave* 23, 27-44.
- Yoshino, M. M. (ed.), 1976: Local Wind Bora. *University of Tokyo Press*, Tokyo, 289 pp.
- Žagar, M. i Rakovec, J., 1999: Small-scale surface wind prediction using dynamic adaptation. *Tellus* 51, 489-504.