

# Referentna brzina vjetra – utjecaj perioda osrednjavanja

Alica Bajić, Bernardin Peroš

## Ključne riječi

referentna brzina vjetra,  
dinamičko opterećenje  
vjetrom,  
intenzitet turbulencije,  
period osrednjavanja

## Key words

reference wind velocity,  
dynamic wind load,  
intensity of  
turbulence,  
averaging period

## Mots clés

vitesse du vent de  
référence,  
charge dynamique  
par le vent,  
intensité de la turbulence,  
période des moyennes

## Ключевые слова:

референтная скорость  
ветра, динамическая  
нагрузка ветром,  
интенсивность  
турбулентности, период  
среднего

## Schlüsselworte

referente  
Windgeschwindigkeit,  
dynamische  
Windbelastung,  
Turbulenzintensität,  
Ermittelmässigungsum-  
laufzeit

A. Bajić, B. Peroš

Prethodno priopćenje

## Referentna brzina vjetra – utjecaj perioda osrednjavanja

Prikazani su rezultati analize promjenjivosti brzine vjetra na meteorološkoj postaji Novalja u razdoblju 1995.-1999. Posebno je ispitana korelacija brzina vjetra osrednjenih u 10-minutnim i satnim intervalima, te je predložena metodologija objedinjavanja svih raspoloživih podataka mjerenja smjera i brzine vjetra neovisno o intervalu osrednjavanja. Analiza strujanja pokazala je da turbulentna komponenta brzine vjetra nije dobro reprezentirana 10-minutnim srednjacima brzine.

A. Bajić, B. Peroš

Preliminary note

## Reference wind velocity - influence of averaging period

Results obtained by analyzing variability of wind velocity at the Novalja weather station in the 1995 - 1999 period are presented. The correlation between wind velocity values averaged in 10-minute and hourly intervals is analyzed, and a methodology for unifying all available information for measuring direction and velocity of wind is proposed, regardless of the averaging interval. The analysis of currents has shown that turbulent component of the wind velocity is not well represented by 10-minute average velocity periods.

A. Bajić, B. Peroš

Note préliminaire

## Vitesse du vent de référence – influence de la période des moyennes

L'article présente les résultats de l'analyse de la variation de la vitesse du vent à la station météorologique de Novalja dans la période de 1995 à 1999. On a étudié en particulier la corrélation des vitesses moyennes du vent pour des intervalles de 10 minutes et d'une heure. On propose une méthodologie de regroupement de tous les résultats disponibles des mesures de la direction et de la vitesse du vent, indépendamment de l'intervalle de la moyenne. Une analyse des courants a révélé que la composante turbulente de la vitesse du vent n'était pas bien représentée par les moyennes de la vitesse de 10 minutes.

Алица Баич, Бернардин Перош

Предварительное сообщение

## Референтная скорость ветра - влияние периода среднего

В работе показаны результаты анализа изменения скорости ветра на метеорологической станции Новалья в периоде 1995-1999 г.г. Особенно испытана корреляция скоростей ветра средних в 10-минутных и часовых интервалах, а также предложена методология объединения всех данных, стоящих в распоряжении в отношении направления и скорости ветра, независимо о среднем интервале. Анализ течений показал, что турбулентный компонент скорости ветра не представлен достаточно хорошо 10-минутными средними скоростями.

A. Bajić, B. Peroš

Vorherige Mitteilung

## Referente Windgeschwindigkeit – Einfluss der Ermittelmässigungsumlaufzeit

Dargestellt sind Ergebnisse der Analyse der Windgeschwindigkeitsveränderlichkeit an der Wetterbeobachtungsstation Novalja in der Zeitspanne 1995.-1999. Besonders wurde die Korrelation der Windgeschwindigkeiten, ermittelständig in 10-minütlichen und stündlichen Intervallen untersucht. Vorgeschlagen wird eine Methodologie der Vereinigung aller verfügbaren Messungsangaben über die Windrichtung und -Geschwindigkeit, unabhängig vom Ermittelmässigungsintervall. Die Strömungsanalyse zeigte dass die turbulente Windgeschwindigkeitskomponente durch 10-minütliche Geschwindigkeitsmittelwerte nicht gut repräsentiert ist.

Autori: Mr. sc. **Alica Bajić**, dipl. ing. fiz., Državni hidrometeorološki zavod, Grič 3, Zagreb; prof. dr. sc. **Bernardin Peroš**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Matice hrvatske 15, Split

## 1 Uvod

Rješenje problema određivanja maksimalnih očekivanih brzina vjetra koje služe kao podloga u projektiranju, uz obveze Hrvatske da uskladi svoje standarde s konstrukcijskim euronormama postalo je jedan od prioritarnih zadataka meteorološke djelatnosti. Kao rezultat rada na tom zadatku proizišla je studija "Meteorološka podloga za hrvatske norme – opterećenje vjetrom". Pregled rezultata danih u spomenutoj studiji nalazi se u prethodnom članku [2]. Pritom se u naglašena ograničenja postignutih rezultata. Jedan od osnovnih problema pri izradi meteorološke podloge za hrvatske norme je nedovoljan broj lokacija s višegodišnjim kontinuiranim mjerenjima smjera i brzine vjetra osrednjenim u intervalu od 10 minuta. Prema preporukama ENV 1991-2-4 – *Djelovanje na konstrukcije, opterećenje vjetrom* osnovni vjetrovni parametar koji se koristi pri proračunu djelovanja vjetra na konstrukcije je referentna (poredbena) brzina vjetra definirana kao maksimalna 10-minutna srednja brzina na visini 10 m iznad ravnog tla kategorije hrapavosti II koja se može očekivati jednom u 50 godina (Eurokod 1). Dakle, 10-minutne brzine vjetra nužan su preduvjet za pravovaljanu procjenu očekivanog opterećenja vjetrom. Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) raspolaže na području Republike Hrvatske nizom takvih podataka dugim više od tri godine na svega 21 postaji. Upravo su ti podaci korišteni pri izradi postojeće meteorološke podloge za hrvatske norme. Međutim, na još 24 postaje raspoložemo duži niz godina podacima mjerenja smjera i brzine vjetra s intervalom osrednjavanja od 1 sat. Kako bi se i ovi podaci mogli iskoristiti za procjenu očekivanih maksimalnih brzina vjetra nužno je poznavati odnos brzina vjetra osrednjenih u različitim intervalima. Cilj je ovog rada da na primjeru podataka s meteorološke postaje Novalja istraži spomenuti odnos, tj. prikaže metodologiju kojom bi se omogućilo objedinjavanje svih raspoloživih podataka mjerenja smjera i brzine vjetra neovisno o intervalu osrednjavanja. Radom se ujedno želi upozoriti na specifičnost strujnog režima na području priobalja i otoka i praksa primjene propisa u kojima se vjetar definira kao statičko opterećenje.

## 2 Podaci

Za potrebe ovoga rada uporabljeni su podaci kontinuiranih mjerenja smjera i brzine vjetra anemografom mikroM koji je u vlasništvu Hrvatske elektroprivrede, a čije podatke za potrebe vlasnika kontrolira, obrađuje i arhivira DHMZ. Anemograf je smješten na krovu zgrade TS Novalja na lokaciji  $\varphi = 44^{\circ} 32'$ ,  $\lambda = 14^{\circ} 54'$ ,  $h = 20$  m. Arhivirani podaci sastoje se od: srednje 10-minutne brzine vjetra i prevladavajućeg smjera u tih 10 minuta, maksimalne trenutne (sekundna vrijednost) brzine vjetra i njegova smjera u 10 minuta (maksimalni udari). Na

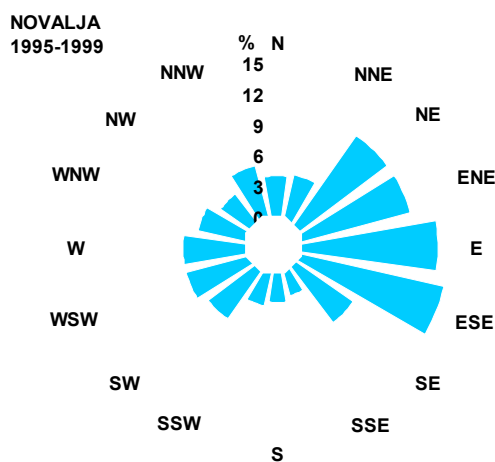
osnovi tih podataka izračunavaju se srednje satne vrijednosti brzine vjetra i prevladavajući smjer u određenom satu.

Na postaji Novalja mjerenja su započela 28. 2. 1995. pa je za potrebe ovog rada iskorišten petogodišnji niz podataka (1995.-1999.). Ako izuzmemo prva dva mjeseca 1995. godine (kada mjerenja nije bilo) u nizu podataka satnih vrijednosti nedostaje 3,8% podataka.

Analiza koja slijedi zasniva se na podacima srednjih satnih vrijednosti brzine vjetra ( $V_{sat}$ ) i prevladavajućeg smjera u određenom satu, maksimalnih srednjih 10-minutnih brzina ( $V_{10min}$ ) i maksimalnih udara ( $V_{max}$ ) u danom satu.

## 3 Osnovna statistička obilježja brzine vjetra u Novalji

Dosadašnja istraživanja strujnog režima na području priobalja i otoka pokazala su da tim područjem dominiraju bura i jugo [3, 4, 5]. Razdioba učestalosti pojedinog smjera vjetra na postaji u Novalji (slika 1.) također pokazuje dominantni utjecaj vjetra NNE-ESE smjerova (njihova je čestina ukupno 51%). Iako je najčešći vjetar na promatranoj lokaciji jugo (ESE), najveće brzine vjetra zabilježene su u slučajevima puhanja bure (tablica 1.). Bura koja u Novalji ima smjer NE-ENE ujedno je i vjetar najveće promjenjivosti brzine. Već se iz osnovnih statističkih obilježja brzine vjetra navedenih u tablici 1. mogu izdvojiti vrijednosti standardne devijacije (kao prvoga statističkog pokazatelja rasapa neke veličine) brzine vjetra iz smjera NE-ENE. Tako koeficijent varijacije (omjer standardne devijacije i prosječne vrijednosti) srednjih satnih brzina i maksimalnih udara vjetra NNE-E smjera prelazi 70%.



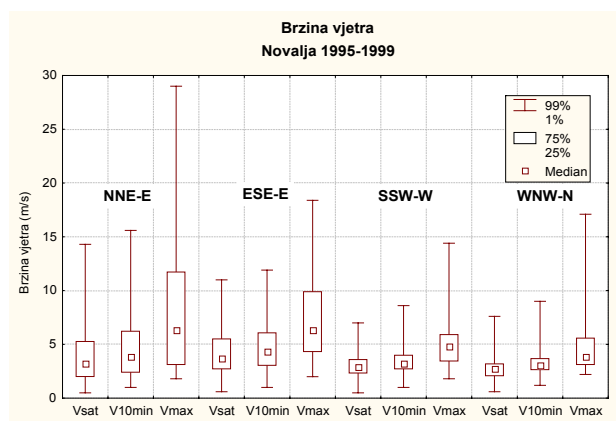
Slika 1. Razdioba učestalosti smjerova vjetra na postaji Novalja u razdoblju 1995.-1999.

Ovaj koeficijent istodobno za vjetar ESE-S smjerova neznatno prelazi 50%, dok je za ostale smjerove još manji. Rasap brzine vjetra još je uočljiviji na slici 2. gdje

Tablica 1. Osnovna statistička obilježja srednjih satnih ( $V_{\text{sat}}$ ), srednjih 10-minutnih ( $V_{10\text{min}}$ ) brzina vjetra i maksimalnih udara ( $V_{\text{max}}$ ) zabilježenih na postaji Novalja u razdoblju 1995.-1999. za svaki smjer vjetra pojedinačno i za četiri karakteristične grupe smjerova vjetra.  $N$  – broj podataka,  $\bar{x}$  srednja vrijednost brzine (m/s),  $\sigma$  standardna devijacija (m/s), Max. - maksimalna brzina (m/s) i Median - medijan (m/s).

smjer	N	$V_{\text{sat}}$				$V_{10\text{min}}$				$V_{\text{max}}$			
		$\bar{x}$	$\sigma$	Max.	Median	$\bar{x}$	$\sigma$	Max.	Median	$\bar{x}$	$\sigma$	Max.	Median
N	1643	2.7	1.41	10.7	2.4	3.3	3.21	22.8	3.4	4.8	3.21	22.8	3.4
NNE	1752	2.4	1.54	15.3	2.1	3.2	1.91	17.6	2.5	5.2	4.34	31.8	3.1
NE	4196	4.7	<b>3.68</b>	<b>19.3</b>	3.6	5.6	<b>4.01</b>	<b>24.0</b>	4.5	10.2	<b>8.04</b>	<b>39.9</b>	8.5
ENE	4196	<b>5.0</b>	3.09	18.9	<b>4.6</b>	<b>5.8</b>	3.32	19.8	<b>5.4</b>	<b>10.4</b>	6.42	31.8	<b>10.0</b>
E	5108	3.4	1.81	15.1	3.0	4.0	1.99	16.6	3.5	6.4	3.66	26.4	5.6
ESE	<b>5494</b>	4.1	2.23	14.6	3.4	4.7	2.36	16.1	4.0	7.2	3.84	26.5	6.0
SE	2439	4.7	2.42	14.1	4.3	5.3	2.56	14.7	5.0	8.2	4.13	27.7	7.7
SSE	721	4.4	2.26	10.7	4.2	5.0	2.39	11.4	4.9	7.6	3.86	23.0	7.2
S	896	3.7	1.88	11.4	3.5	4.2	1.96	13.2	4.0	6.2	3.11	26.5	5.8
SSW	1118	3.1	1.31	10.4	3.1	3.6	1.48	13.6	3.4	5.2	2.33	20.7	5.1
SW	2154	2.9	1.32	12.3	2.7	3.3	1.47	13.1	3.0	4.9	2.45	21.2	4.5
WSW	2478	2.8	1.01	9.6	2.8	3.3	1.11	13.5	3.1	4.8	1.90	19.3	4.6
W	2465	3.2	1.39	16.2	3.1	3.6	1.43	17.1	3.4	5.3	2.56	28.3	5.2
WNW	1946	3.0	1.56	17.7	2.8	3.5	1.67	19.1	3.1	5.1	3.33	37.2	4.5
NW	1482	2.8	1.27	17.7	2.7	3.3	1.39	18.6	3.0	4.6	2.78	32.9	3.8
NNW	2158	2.9	1.23	11.0	2.7	3.4	1.32	12.0	3.0	4.8	2.75	23.5	3.8
NNE-E	<b>15732</b>	4.1	<b>2.91</b>	<b>19.3</b>	3.2	<b>4.8</b>	<b>3.18</b>	<b>24.0</b>	3.8	<b>8.3</b>	<b>6.34</b>	<b>39.9</b>	<b>6.3</b>
ESE-S	9550	<b>4.3</b>	2.27	14.6	<b>3.7</b>	<b>4.8</b>	2.40	16.1	<b>4.3</b>	7.4	3.90	27.7	<b>6.3</b>
SSW-W	8215	3.0	1.26	16.2	2.9	3.4	1.37	17.1	3.2	5.0	2.33	28.3	4.8
WNW-N	7229	2.8	1.38	17.7	2.7	3.4	1.50	19.1	3.0	4.8	3.03	37.2	3.8

su za vjetar četiriju karakterističnih grupa smjerova dani Box-Whiskerovi prikazi razdiobe promatranih veličina.



Slika 2. Statistička obilježja srednjih satnih brzina vjetra ( $V_{\text{sat}}$ ), srednjih 10-minutnih brzina vjetra ( $V_{10\text{min}}$ ) i maksimalnih udara ( $V_{\text{max}}$ ) na postaji Novalja u razdoblju 1995.-1999. za četiri karakteristične grupe smjerova vjetra

#### 4 Odnos brzina vjetra osrednjenih u različitim vremenskim intervalima

Da bismo za procjenu očekivanog opterećenja vjetrom mogli uspoređivati podatke dobivene na osnovi mjerenih brzina vjetra osrednjenih u različitim vremenskim intervalima, nužno je najprije poznavati odnose tih brzina. Već se na slici 2. može uočiti da se srednje satne brzine vjetra i maksimalne srednje 10-minutne vrijednosti u satu svojom razdiobom znatnije ne razlikuju osim što je pomak u slučaju  $V_{10\text{min}}$  prema većim vrijednostima. Dakle, na osnovi već ovih prvih pokazatelja može se očekivati postojanje signifikantne statističke korelacije između  $V_{\text{sat}}$  i  $V_{10\text{min}}$ . Da bismo to i potvrdili ispitana je korelacijska veza između vrijednosti brzina vjetra za svaki raspoloživi interval osrednjavanja ( $V_{\text{sat}}$ ,  $V_{10\text{min}}$  i  $V_{\text{max}}$ ). Koeficijenti u jednadžbama korelacijskih pravaca, te kvadrati koeficijenata korelacije između  $V_{10\text{min}}$  i  $V_{\text{sat}}$ ,  $V_{10\text{min}}$  i  $V_{\text{max}}$ , te  $V_{\text{sat}}$  i  $V_{\text{max}}$  za svaki smjer posebno i za četiri karakteristične grupe smjerova navedeni su u tablici 2. Linearna korelacijska veza između analiziranih

Tablica 2. Koeficijenti u jednadžbama pravca korelacije ( $a$  i  $b$ ) i kvadrati koeficijenata korelacije ( $R^2$ ) između srednjih 10-minutnih i srednjih satnih brzina vjetra, srednjih satnih brzina vjetra i maksimalnih udara, te srednjih 10-minutnih brzina vjetra i maksimalnih udara za svaki smjer vjetra pojedinačno i za četiri karakteristične grupe smjerova vjetra na postaji Novalja u razdoblju 1995.-1999.

smjer	N	$V_{10min} = a \cdot V_{sat} + b$			$V_{sat} = a \cdot V_{max} + b$			$V_{10min} = a \cdot V_{max} + b$		
		a	b	$R^2$	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$
N	1643	1,065	0,416	0,894	0,387	0,811	0,770	0,460	1,047	0,860
NNE	1752	1,179	0,297	0,900	0,325	0,755	0,837	0,414	1,027	0,880
NE	4196	1,076	0,513	0,973	0,440	0,167	0,934	0,486	0,574	0,955
ENE	4196	1,060	0,462	0,975	0,467	0,165	0,939	0,506	0,523	0,956
E	5108	1,063	0,368	0,942	0,458	0,490	0,856	0,515	0,706	0,905
ESE	5494	1,037	0,401	0,963	0,555	0,147	0,911	0,596	0,408	0,940
SE	2439	1,040	0,427	0,965	0,566	0,024	0,935	0,604	0,321	0,952
SSE	721	1,039	0,397	0,965	0,556	0,185	0,904	0,596	0,445	0,931
S	896	1,012	0,485	0,946	0,563	0,192	0,865	0,606	0,454	0,925
SSW	1118	1,054	0,362	0,863	0,474	0,636	0,713	0,582	0,607	0,835
SW	2154	1,049	0,342	0,883	0,473	0,526	0,775	0,561	0,577	0,874
WSW	2478	1,006	0,417	0,828	0,447	0,708	0,709	0,539	0,704	0,842
W	2465	0,985	0,498	0,916	0,494	0,558	0,831	0,527	0,833	0,893
WNW	1946	1,025	0,439	0,917	0,426	0,812	0,825	0,476	1,070	0,900
NW	1482	1,022	0,435	0,884	0,403	0,912	0,771	0,465	1,123	0,870
NNW	2158	1,006	0,501	0,875	0,387	0,998	0,748	0,446	1,234	0,859
NNE-E	15732	1,073	0,434	0,968	0,440	0,381	0,919	0,487	0,719	0,946
ESE-S	9550	1,037	0,409	0,963	0,557	0,132	0,915	0,598	0,401	0,943
SSW-W	8215	1,018	0,411	0,880	0,478	0,581	0,774	0,548	0,689	0,867
WNW-N	7229	1,028	0,449	0,895	0,402	0,881	0,781	0,463	1,119	0,874

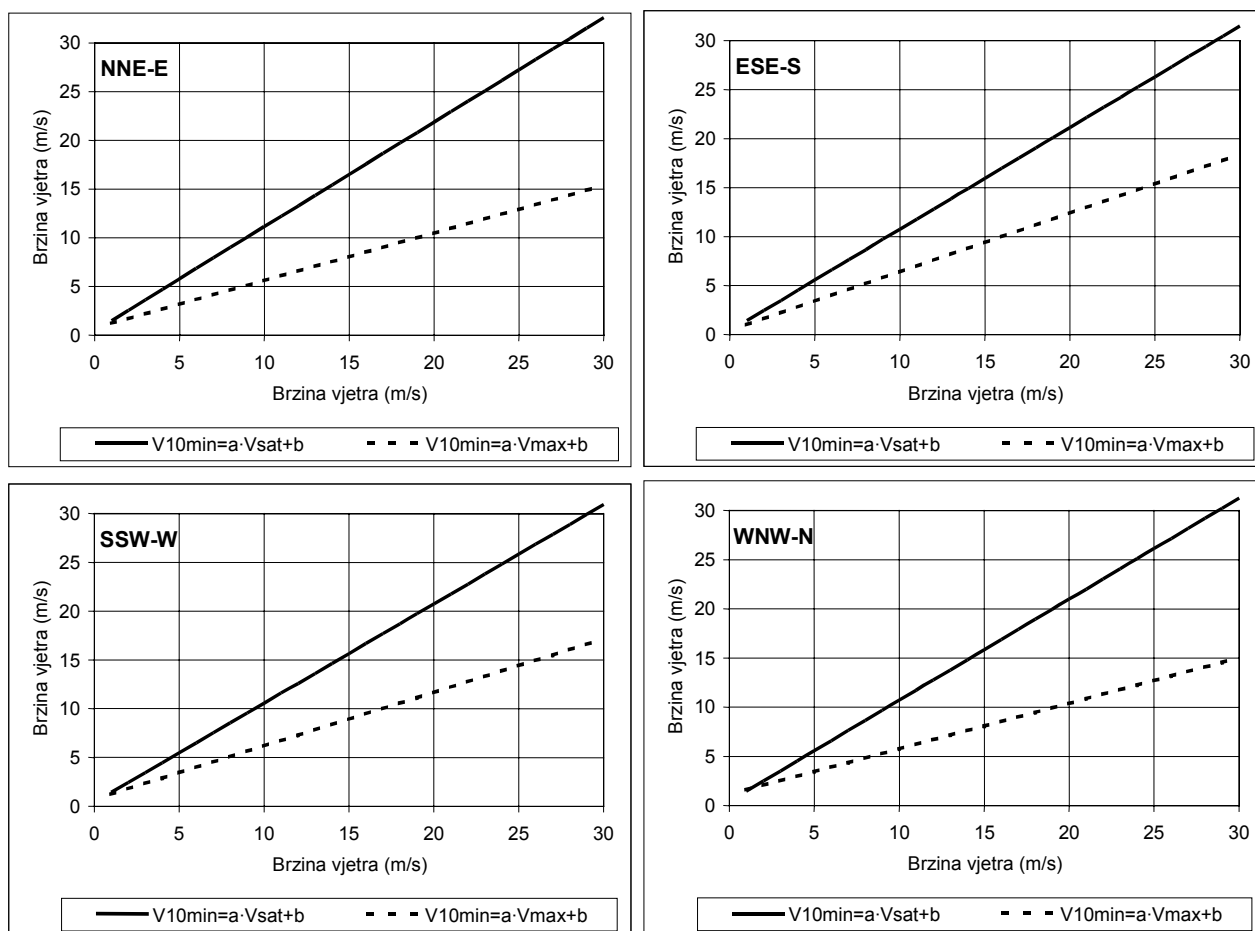
varijabli testirana je t-testom i za sve je smjerove pokazano da su promatrane veličine signifikantno linearno korelirane (razina signifikantnosti  $\alpha = 0,05$ ).

Budući da je ova analiza rađena kako bi se definirala metoda kojom se omogućuje uporaba podataka mjerenja brzine vjetra na lokacijama gdje raspolažemo samo satnim vrijednostima i maksimalnim udarima za ocjenu očekivanih maksimalnih 10-minutnih brzina vjetra, posebno je razmatran odnos  $V_{10min}$  s  $V_{sat}$  i  $V_{max}$  (slika 3.). Nagib pravca koji definira odnos  $V_{10min}$  i  $V_{sat}$  najveći je u slučaju bure (NNE), a najmanji za zapadni vjetar. Međutim, odnos  $V_{10min}$  i  $V_{max}$  pokazuje da je s porastom  $V_{max}$  najveći porast  $V_{10min}$  u slučaju juga, a najmanji u slučaju bure.

Prikazani rezultati pokazuju da u slučaju podataka brzine vjetra u Novalji postoji značajna linearna korelacija između srednjih satnih brzina vjetra i maksimalnih srednjih 10 minutnih brzina u određenom satu te između maksimalnih udara i i maksimalnih srednjih 10- minutnih brzina u određenom satu. To znači da bi poznavajući  $V_{sat}$  i  $V_{max}$  mogli procijeniti vrijednosti  $V_{10min}$  za svaki sat i time bismo dobili podatke potrebne za procjenu očekivanih maksimalnih 10-minutnih brzina vjetra nužnih

za procjenu opterećenja vjetrom na način dan u ENV 1991-2-4. Dakle, metoda za ocjenu maksimalnih očekivanih 10 minutnih brzina vjetra koja bi nam omogućila uporabu podataka satnih vrijednosti brzine vjetra kojima raspolažemo na 24 meteorološke postaje u Republici Hrvatskoj sastojala bi se u sljedećem:

- analiza odnosa  $V_{10min}$  i  $V_{sat}$ , te  $V_{10min}$  i  $V_{max}$  za sve postaje na kojima raspolažemo 10-minutnim podacima brzine vjetra na način na koji je učinjena u ovom radu na primjeru podataka meteorološke postaje Novalja;
- podjela Republike Hrvatske na područja sličnih linearnih veza  $V_{10min}$  i  $V_{sat}$ , te  $V_{10min}$  i  $V_{max}$  za četiri karakteristične grupe smjerova vjetra;
- na osnovi poznatih koeficijenata u pravcima korelacije  $V_{sat}$  i  $V_{10min}$  (odnosno  $V_{max}$  i  $V_{10min}$ ) određivanje srednjih 10-minutnih brzina vjetra za svaki sat na postajama sa satnim vrijednostima brzine vjetra;
- procjena očekivanih referentnih brzina vjetra na način dan u euronormama na osnovi podataka dobivenih postupkom a) –c).

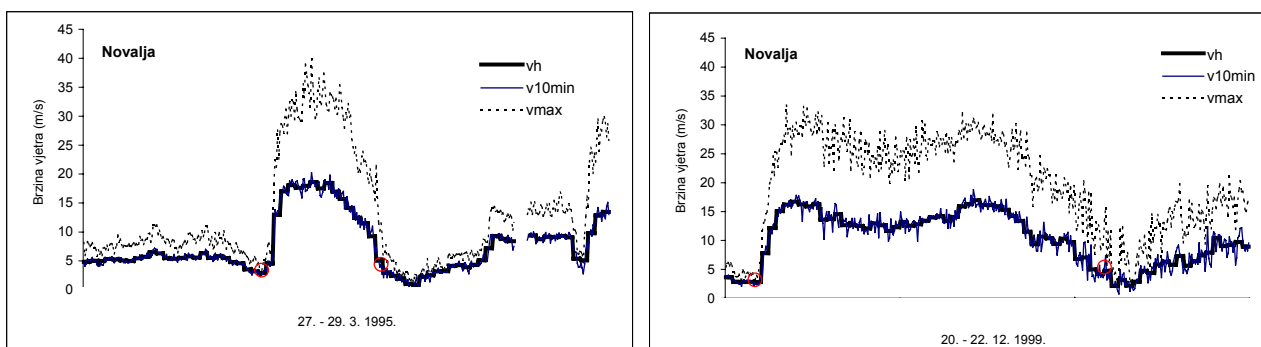


Slika 3. Pravci korelacije između srednjih 10-minutnih i srednjih satnih brzina vjetra (pune deblje linije) te srednjih 10-minutnih brzina vjetra i maksimalnih udara (isprekidane linije) na postaji Novalja za razdoblje 1995.-1999. za četiri karakteristične grupe smjerova vjetra

Na taj bi način raspolagali procijenjenim referentnim brzinama na znatno gušćoj mreži postaja nego što je mreža postaja s 10-minutnim brzinama vjetra. Pritom je nužno spomenute procjene napraviti za karakteristične smjerove vjetra budući da je pokazano da se pravci linearne veze između podataka brzine vjetra osrednjenih u različitim intervalima znatno razlikuju ovisno o smjeru vjetra.

### 5 Turbulentne značajke vjetra u Novalji

Odnos maksimalnih udara i brzine vjetra osrednjene u intervalima 10 minuta i jedan sat pokazuju da je brzina vjetra pojedinih smjerova na području Novalje izuzetno promjenjiva veličina. To je posebno istaknuto u slučaju bure koja nužno utječe na konstrukcije bitno različito od stalnijih vjetrova drugih smjerova [6, 7]. Promjenjivost brzine vjetra u slučajevima jake bure ilustrira i slika 4.



Slika 4. Hodovi srednje satne brzine vjetra ( $V_{sat}$ ), srednje 10-minutne brzine vjetra ( $V_{10min}$ ) i maksimalnih udara ( $V_{max}$ ) u situacijama s burom na postaji Novalja. Kružićima su naznačena vremena početka i kraja puhanja bure

gdje su prikazani hodovi srednjih satnih, srednjih 10-minutnih brzina vjetra i maksimalnih udara u dva tipična slučaja bure. Prvi zabilježen u ožujku 1995. posljedica je brzog prolaza hladne fronte preko Jadrana praćenog naglim porastom brzine vjetra koja je dosegla maksimalne vrijednosti od 39,9 m/s, dok je istovremeno srednja satna brzina iznosila 18,7 m/s, a srednja 10-minutna 20,2 m/s. Bura je u ovom slučaju trajala 18 sati, a u trajanju od 11 sati srednje su satne brzine bile iznad 10 m/s. Za razliku od toga, situaciju u prosincu 1999. karakterizira bura u trajanju od 47 sati s maksimalnim udarom od 33,2 m/s, najvećom srednjom satnom brzinom od 17,0 m/s i pripadnom 10-minutnom brzinom od 18,8 m/s. Olujna je bura u ovoj situaciji puhala duž čitavog Jadrana kao posljedica duboke ciklone u Genovskom zaljevu. Srednje su satne brzine kontinuirano bile veće od 10 m/s u Novalji u trajanju od 37 sati. U takvim se situacijama obično bilježi manja razlika između trenutnih i srednjih satnih brzina vjetra, nego u situacijama s naglim prodorima hladnog zraka sa sjevera nakon prolaza fronte. Ova razlika između trenutnih i prosječnih brzina vjetra u nekom vremenskom intervalu pokazatelj je turbulentnosti vjetra koji bitno utječe na procjenu dinamičkog opterećenja konstrukcija vjetrom.

U postojećoj se praksi za intenzitet promjenjivosti brzine vjetra, tj. njegovih turbulentnih karakteristika najčešće rabe dvije veličine: intenzitet turbulencije  $I_V$  i faktor mahovitosti  $FM$ .

Naime, prosječna se brzina vjetra  $V_0$  (ili makrometeorološka komponenta brzine vjetra  $V$ ) definira prema [8]:

$$V_0(t) = \frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T/2}^{t+\Delta T/2} V(\xi) d\xi \quad (1)$$

gdje je  $t$  vrijeme, a  $\Delta T$  vremenski interval osrednjavanja (10 minuta ili sat vremena) u kojem je brzina  $V$  osrednjena.

Turbulentna komponenta brzine vjetra  $V$  (mikrometeorološka komponenta) koja značajno varira u vremenu izražena je relacijom:

$$V'(t) = V(t) - V_0(t). \quad (2)$$

Standardna devijacija turbulentne komponente vjetra može se odrediti izrazom:

$$\sigma_{V'}(t) = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T/2}^{t+\Delta T/2} V'^2(\xi) d\xi}. \quad (3)$$

Pretpostavlja se da je intenzitet turbulencije definiran omjerom standardne devijacije turbulentne komponente vjetra i srednje brzine  $V_0$ :

$$I_V = \frac{\sigma_{V'}(t)}{V_0(t)}, \quad (V_0 > 0). \quad (4)$$

U ovome je radu intenzitet turbulencije proračunan raspoloživim podacima na tri načina: a) kao omjer standardne devijacije srednje 10-minutne brzine vjetra i srednje satne brzine vjetra -  $I_{v1}$ , b) kao omjer maksimalnih udara i srednje 10-minutne brzine vjetra -  $I_{v2}$  i c) kao omjer maksimalnih udara i srednje satne brzine vjetra -  $I_{v3}$  (tablica 3.).

Turbulentne karakteristike vjetra pojedinog smjera najbolje pokazuje razlika između intenziteta turbulencije dobivenog uz pretpostavku da turbulentnu komponentu strujanja definira 10-minutni srednjak brzine i onog dobivenog uz pretpostavku da turbulentnu komponentu strujanja definira trenutna maksimalna vrijednost brzine vjetra. Što je ta razlika veća, turbulentna komponenta vjetra reprezentirana je bolje vjetrom manjeg perioda osrednjavanja. Tako se može uočiti da vjetrove od ESE preko S i SW smjera pa sve do W smjera karakterizira gotovo turbulentnost. Za razliku od toga, jasno se izdvajaju vjetrovi NNE-ENE smjerova (bura) gdje se vidi da je i interval osrednjavanja brzine od 10 minuta nedovoljno kratak da bi se dobio pravi uvid u turbulentne značajke bure. Za taj bi vjetar, dakle, bilo nužno raspolagati vrijednostima brzine vjetra osrednjenima u manjim vremenskim intervalima. Ovaj je zaključak u skladu s rezultatima istraživanja koje je provedeno na osnovi raspoloživih sekundnih podataka brzine vjetra koji pokazuju da je za

Tablica 3. Intenzitet turbulencije izražen kao:  $I_{v1}$  - omjer standardne devijacije srednje 10-minutne i srednje satne brzine vjetra,  $I_{v2}$  - omjer standardne devijacije maksimalnih trenutnih brzina vjetra i srednje 10-minutne brzine vjetra,  $I_{v3}$  - omjer standardne devijacije maksimalnih trenutnih brzina vjetra i srednjih satnih vrijednosti brzine vjetra.

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	NNE -E	ESE -S	SWS -W	WN W-N
$I_{v1}$	<b>1,19</b>	0,80	0,85	0,66	0,59	0,58	0,58	0,54	0,53	0,48	0,51	0,40	0,45	0,56	0,50	0,46	<b>0,78</b>	0,56	0,46	0,54
$I_{v2}$	0,97	1,36	<b>1,44</b>	1,11	0,92	0,82	0,78	0,77	0,74	0,64	0,74	0,58	0,71	0,95	0,84	0,81	<b>1,32</b>	0,82	0,69	0,89
$I_{v3}$	1,18	1,81	1,71	<b>1,89</b>	1,08	0,94	0,88	0,88	0,84	0,75	0,84	0,68	0,80	1,11	0,99	0,95	<b>1,55</b>	0,91	0,78	1,08
$I_{v3}-I_{v1}$	-0,01	1,01	0,86	<b>1,23</b>	0,49	0,36	0,30	0,34	0,31	0,27	0,33	0,28	0,35	0,55	0,49	0,49	<b>0,77</b>	0,35	0,32	0,54

ocjenu turbulentnih značajki bure, a time i pravilne procjene opterećenja konstrukcija tim vjetrom, nužno raspolagati mjerenjima brzine vjetra s intervalom osrednjava-nja 1-3 sekunde [9, 10].

Na osnovi podataka u tablici 3. jedino se za vjetar sjevernog smjera u Novalji može tvrditi da 10-minutna osrednjena brzina čini turbulentnu komponentu vjetra ovog smjera. Naime, za taj se smjer iznosi intenziteta turbulencije  $I_{v1}$  i  $I_{v3}$  neznatno razlikuju.

Jedna od metoda, kojom se u građevinskoj praksi definira djelovanje vjetra na konstrukcije, povezuje maksimalno opterećenje s maksimalnom brzinom vjetra kao umnoškom srednje brzine i faktora mahovitosti danog relacijom u [11]. Dakle, ova druga veličina, koja pokazuje na intenzitet turbulencije i koja se do sada u većoj mjeri rabila u praksi, jest faktor mahovitosti  $FM$  definiran omjerom maksimalne trenutne brzine vjetra i maksimalne srednje brzine vjetra u odabranom vremenskom intervalu:

$$FM = V_M / V_{0M}. \quad (5)$$

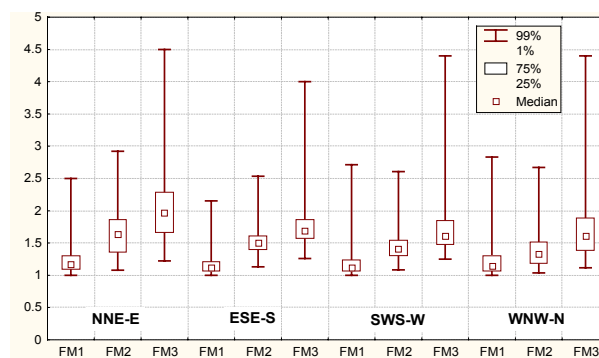
Na osnovi podataka kojima raspoložemo u Novalji moguće je proračunati faktor mahovitosti kao:

$FM1$  - omjer srednje 10-minutne i srednje satne brzine vjetra,

$FM2$  - omjer maksimalnih udara i srednje 10-minutne brzine vjetra,

$FM3$  - omjer maksimalnih udara i srednje satne brzine vjetra.

I ova veličina pokazuje da su najveće vrijednosti zabilježene za vjetar NNE-ENE smjera (tablica 4.). Za ove je smjerove vjetra i varijabilnost faktora mahovitosti najveća (slika 5.).



Slika 5. Box-Whiskers prikaz omjera srednje 10-minutne brzine i srednje satne brzine vjetra ( $FM1$ ), maksimalnih udara i srednje 10-minutne brzine vjetra ( $FM2$ ) i srednje 10-minutne brzine vjetra i maksimalnih udara i srednje satne brzine vjetra ( $FM3$ ) za četiri karakteristične grupe smjerova vjetra u Novalji za razdoblje 1995.-1999.

Tablica 4. Osnovna statistička obilježja faktora mahovitosti brzine vjetra na postaji Novalja u razdoblju 1995-1999. za svaki smjer vjetra pojedinačno i za četiri karakteristične grupe smjerova.

smjer	N	$FM1 = V_{10min}/V_{sat}$				$FM2 = V_{max}/V_{10min}$				$FM3 = V_{max}/V_{sat}$			
		$\bar{x}$	$\sigma$	Mod	Median	$\bar{x}$	$\sigma$	Mod	Median	$\bar{x}$	$\sigma$	Mod	Median
N	1643	1,30	0,37	1,00	1,18	1,43	0,38	1,25	1,32	1,85	0,75	2,00	1,67
NNE	1752	<b>1,39</b>	0,48	1,00	1,28	1,55	0,84	1,13	1,35	2,14	1,19	2,00	1,92
NE	4196	1,27	0,35	1,25	1,18	<b>1,75</b>	<b>1,00</b>	2,00	1,76	<b>2,19</b>	0,78	2,00	2,09
ENE	4196	1,21	0,29	1,00	1,14	1,74	0,41	2,00	1,76	2,11	0,86	2,00	2,03
E	5108	1,21	0,26	1,00	1,15	1,57	0,46	1,50	1,52	1,90	0,58	2,00	1,77
ESE	<b>5494</b>	<i>1,17</i>	<i>0,20</i>	1,00	1,11	1,52	<i>0,31</i>	1,50	1,50	1,78	<i>0,51</i>	2,00	1,69
SE	2439	1,19	0,31	1,00	1,11	1,57	0,63	1,50	1,54	1,86	0,86	2,00	1,73
SSE	721	1,21	0,45	1,00	1,11	1,57	0,87	1,50	1,50	1,92	<b>1,49</b>	1,50	1,68
S	896	1,22	0,38	1,07	1,11	1,49	0,45	1,50	1,44	1,86	1,29	1,50	1,63
SSW	1118	1,25	0,37	1,00	1,13	1,45	0,34	1,33	1,39	1,81	0,76	1,50	1,59
SW	2154	1,24	0,47	1,00	1,12	1,49	0,71	1,50	1,43	1,84	0,87	1,50	1,63
WSW	2478	1,21	0,41	1,00	1,10	1,46	<i>0,31</i>	1,33	1,42	1,76	0,64	1,50	1,60
W	2465	1,21	0,45	1,00	1,11	1,46	0,40	1,50	1,42	1,76	0,83	1,50	1,59
WNW	1946	1,25	<b>0,63</b>	1,00	1,13	1,43	0,38	1,50	1,38	1,78	0,97	2,00	1,61
NW	1482	1,25	0,58	1,00	1,13	<i>1,38</i>	<i>0,31</i>	1,15	1,31	<i>1,72</i>	0,84	2,00	1,57
NNW	2158	1,25	0,43	1,00	1,13	1,39	0,61	1,15	1,30	1,73	0,84	2,00	1,58
NNE-E	<b>15732</b>	1,26	0,34	1,00	1,17	1,67	0,69	2,00	1,64	2,07	0,82	2,00	1,96
ESE-S	9550	1,18	0,28	1,00	1,11	1,54	0,48	1,50	1,50	1,82	0,82	2,00	1,69
SSW-W	8215	1,22	0,43	1,00	1,11	1,47	0,47	1,50	1,42	1,79	0,78	1,50	1,61
WNW-N	7229	1,26	0,51	1,00	1,14	1,41	0,45	1,25	1,33	1,77	0,86	2,00	1,61

Razdioba veličina  $FM1$ ,  $FM2$  i  $FM3$  pokazuje da u više od 50% sati omjer mahovitosti  $FM3$  prelazi vrijednosti veće od 2 za vjetar NNE-E smjerova. Istodobno  $FM2$  također pokazuje da je u 50% slučajeva omjer trenutnih i srednjih 10-minutnih brzina vjetra veći od 2. To ponovno pokazuje da ni 10-minutni period osrednjavanja nije dovoljan da bi pokazao pravu sliku o turbulentnim značajkama bure na promatranoj lokaciji.

Ovaj se rezultat podudara s rezultatom analize faktora mahovitosti bure na aerodromu Rijeka (otok Krk) [12]. Analiza faktora mahovitosti dobivenog kao omjer trenutnih brzina i jednodominantnih srednjaka brzine vjetra na toj lokaciji pokazuje da je njegova prosječna vrijednost 1,41 sa standardnom varijacijom od 0,18. To znači da je na lokaciji aerodroma Rijeka na otoku Krku jednodominantni srednjak brzine vjetra pouzdaniji pokazatelj turbulentnih značajki bure od 10-minutnog srednjaka. Metodom spektralne analize istražena periodičnost uzoraka različitih srednjaka brzine bure dobivenih na osnovi 5-sekundnih podataka pokazala je da postoje dva značajna razdoblja oscilacije bure manja od 1 minute [13].

Svi navedeni rezultati potvrđuju da je za ocjenu reprezentativnosti najadekvatnijeg podatka za turbulentnu komponentu strujanja potrebno raspolagati mjerenjima brzine vjetra sa što kraćim periodom osrednjavanja. Stoga podaci sekundnih mjerenja koji su dobiveni na tri lokacije na području Tugare i mosta preko rijeke Omble kod Dubrovnika u okviru rada na znanstvenoistraživačkom projektu Dinamičko djelovanje vjetra na konstrukcije otvaraju mogućnost detaljnije analize turbulentnosti vjetra na Jadranu, a time i bolje meteorološke podloge za procjenu opterećenja konstrukcija vjetrom.

## LITERATURA

- [1] ENV 1991-2-4, *Basic of design and action on structure – Actions on structures – Wind loads*, 1995.
- [2] Bajić, A. i dr.: *Meteorološka podloga za hrvatske norme – opterećenje vjetrom*, Građevinar 53 (2001) 7, 431.-441.
- [3] Makjanić, B.: *Bura, jugo, etezija*. Savezni hidrometeorološki zavod, Beograd, 1978.
- [4] Penzar, B.: *Tlak zraka, vjetar*. Savezni hidrometeorološki zavod, Beograd, 1977.
- [5] Bajić, A.: *Severe bora on the Northern Adriatic*, Part I: Statistical analysis, Rasprave (Papers) 24, 1989. 1.-9.
- [6] Bajić, A.; Glasnović, D.: *Impact of severe Adriatic Bora on traffic*, 4<sup>th</sup> European Conference on Applied Meteorology, Norrköping, Sweden, 1999.
- [7] Cividini, B. i dr.: *Važnost postojanja mjerenja smjera i brzine vjetra na lokaciji građevinskog objekta – primjer Masleničkog mosta*. Četvrti opći sabor hrvatskih građevinskih konstruktora, Brijunski otoci, 1998.
- [8] Shettini, E.; Solari, G.: *Probability distribution and statistical moments of the maximum wind velocity*, Wind and structures 1 (1998) 4, 287.-302
- [9] Peroš, B.: *Modelling of the Bora effects upon the lower layer*, Engineering modelling 7 (1994) 3-4 81.-95.
- [10] Peroš, B.; Boko, I.: *Reliability of steel bridges exposed to the bora wind action*, International Conference on Steel Structures of the 2000s, Istanbul, 2000., 51.-56.
- [11] Solari, G. Gustbuffeting. I: *Peak wind velocity and equivalent pressure*, J. Struct. Engrg. 1993., 119. 365.-382.
- [12] Poje, D.: *Neki rezultati istraživanja o brzinama vjetra u SRH*, Građevinar 37 (1985) 1, 7.-14.
- [13] Koračin, D.: *Spektralna analiza faktora mahovitosti bure na aerodromu Rijeka-Krk*, Zbornik meteoroloških i hidroloških radova (1982) 8, 55.-62.

## 6 Zaključak

Provedena pilot-istraživanja o odnosu brzina vjetra osrednjenih u različitim vremenskim intervalima na lokaciji meteorološke postaje Novalja u razdoblju 1995.-1999. godine upozorila su na dvije bitne spoznaje, i to:

- Postoji statistički signifikantna linearna korelacija između podataka srednjih 10-minutnih i srednjih satnih brzina vjetra. Iznosi koeficijentna korelacija između spomenutih brzina pokazali su mogućnost uporabe podataka srednjih satnih brzina vjetra ( $V_{sat}$ ) za ocjenu maksimalnih srednjih 10-minutnih brzina ( $V_{10\ min}$ ) u određenom satu. Predložena metodologija ocjene  $V_{10\ min}$  iz  $V_{sat}$  u radu daje mogućnost uporabe svih raspoloživih podataka mjerenja smjera i brzine vjetra na području Hrvatske za izradu meteorološke podloge za ocjenu opterećenja vjetrom.
- Turbulentne karakteristike vjetra ovisne su o smjeru i intervalu osrednjavanja. Naime, po intenzitetu turbulencije i proračunanim faktorima mahovitosti na promatranoj se lokaciji izdvaja bura kao vjetar čije turbulentne značajke ne reprezentira na adekvatan način referentna brzina vjetra osrednjena u intervalu od 10 minuta, kako to nalažu preporuke ENV 1991-2-4 [1]. Naime, da bi se dobila prava slika o mahovitosti bure, a time i ocjena koji je interval osrednjavanja brzine vjetra dovoljno kratak za ocjenu turbulentne komponente brzine vjetra (dinamičkog opterećenja vjetrom) nužno bi bilo raspolagati mjerenjima smjera i brzine vjetra u intervalima kraćim od 10 minuta. Nove spoznaje valja očekivati iz rezultata daljeg rada na znanstvenoistraživačkom projektu *Dinamičko opterećenje konstrukcija vjetrom*, koji sufinancira Ministarstvo znanosti i tehnologije RH i Telekomunikacijski centar u Splitu.