

Opterećenje vjetrom na temelju izravnih mjerenja sila

Ante Mihanović, Željana Nikolić, Boris Trogrlić

Ključne riječi

vjetar, opterećenje, dinamička mjerenja, planina Mosor, statičko i dinamičko djelovanje, funkcija spektra

Key words

wind, load, dynamic measurements, Mosor Mountain, static and dynamic action, spectrum function

Mots clés

vent, charge, mesurage dynamique, montagne de Mosor, action statique et dynamique, fonction de spectre

Ключевые слова

ветер, нагрузка, динамические измерения, гора Мосор, статическое и динамическое воздействие, функция спектра

Schlüsselworte

Wind, Belastung, dynamische Messungen, Berg Mosor, statische und dynamische Wirkung, Spektrumsfunktion

A. Mihanović, Ž. Nikolić, B. Trogrlić

Izvorni znanstveni rad

Opterećenje vjetrom na temelju izravnih mjerenja sila

Prikazana je horizontalna sila vjetra dobivena izravnim dinamičkim mjerenjem pomoću dinamičkog oscilatora na obronku planine Mosor, a obrađeni su tipovi vjetra bura i jugo. Uz dinamičke podatke o sili vjetra, srednjoj i fluktuirajućoj komponenti, izlučeni su spektri odgovora. Prikazana je razlika statičkog i dinamičkog djelovanja. Predložen je i približan postupak preslikavanja funkcije spektra odgovora sile vjetra s jedne na drugu lokaciju s poznatom srednjom brzinom vjetra.

A. Mihanović, Ž. Nikolić, B. Trogrlić

Original scientific paper

Wind load based on direct force measurements

The horizontal wind force, measured directly on the Mosor Mountain foothills by dynamic oscillator, is presented. The wind types covered by the analysis are bura (bora) and jugo (sirocco). In addition to dynamic wind-force information, i.e. mean and fluctuating components, the response spectra are also derived. The difference between the static and dynamic action is presented. An approximate procedure for transferring wind force response-spectrum functions from one location to another, with the known mean wind speed, is proposed.

A. Mihanović, Ž. Nikolić, B. Trogrlić

Ouvrage scientifique original

Charge de vent basée sur le mesurage direct de force

La force horizontale de vent, mesurée directement sur la montagne de Mosor par l'oscillateur dynamique, est présentée. Les types de vent couverts par l'analyse sont bura (bora) et jugo (sirocco). En plus des données dynamiques sur la force de vent, à savoir les composants moyens et fluctuants, les spectres de réponse sont également dérivés. La différence entre l'action dynamique et l'action statique est présentée. La procédure approximative pour transmettre les fonctions des spectres de réponse de la force de vent d'un endroit à l'autre, avec la vitesse moyenne de vent connue, est proposée.

A. Миханович, Ж. Николитч, Б. Трогрлич

Оригинальная научная работа

Ветровая нагрузка на основе прямых измерений сил

Показана горизонтальная сила ветра, полученная при прямом динамическом измерении с помощью динамического осциллятора на крутом склоне горы Мосор. Производилась обработка северного и южного ветров типа бора и юго. Помимо динамических данных о силе ветра, средней и флуктуирующей компонентах выделены спектры ответа. Показано различие статического и динамического воздействия. Предложен приблизительный метод отображения функции спектра ответа силы ветра с одной локации на другую при известной средней скорости ветра.

A. Mihanović, Ž. Nikolić, B. Trogrlić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

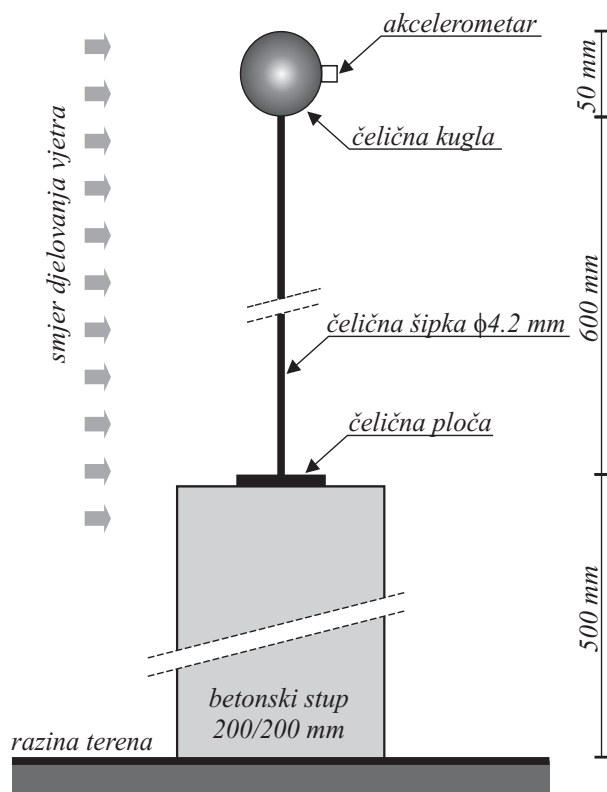
Windbelastung auf Grund direkter Kräftermessungen

Dargestellt ist die horizontale Windkraft erhalten durch direkte dynamische Messung mittels eines dynamischen Oszillators am Hang des Berges Mosor. Bearbeitet sind die Windtypen "bura" und "jugo". Neben dynamischen Angaben über die Windstärke, die mittlere und fluktuierende Komponente wurden auch die Spektre der Antwort abgesondert. Dargestellt ist der Unterschied der statischen und dynamischen Einwirkung. Vorgeschlagen ist auch ein annäherndes Verfahren der Nachbildung der Funktion des Antwortspektrums der Windkraft von einem zum anderen Standort mit bekannter mittlerer Windgeschwindigkeit.

Autori Prof. dr. sc. **Ante Mihanović**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Željana Nikolić**, dipl. ing. građ.; doc. dr. sc. **Boris Trogrlić**, dipl. ing. građ. Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split

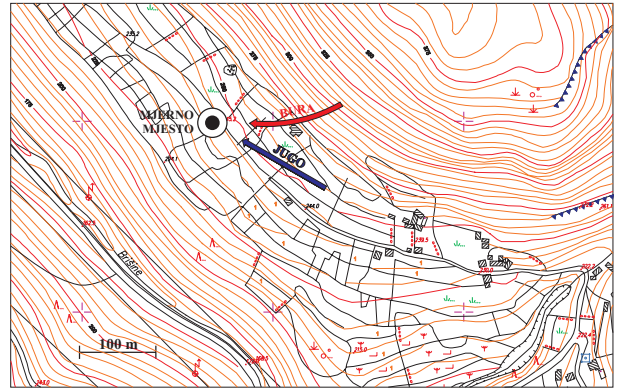
1 Uvod

Potaknuti tehnikom rada akceleroografa u zadaći registracije gibanja tla pri djelovanju potresa, autori su došli na ideju da sličan uređaj iskoriste za mjerenje sile vjetra na JS (JS - jednostupanjski sustav) oscilatoru opskrbljenom preciznim akceleroimetrom. U tu je svrhu konstruiran jednostavni oscilator sastavljen od glatke metalne kugle i glatke metalne šipke (slika 1.). U dinamičkom su smislu mase odabrane tako da dominira prvi vlastiti period $T_1 = 0,55$ s, dok su drugi i viši periodi zanemarivi. Ekvivalentna masa JS-a iznosila je 0,80 kg, a krutost oscilatora 44 N/m. Ekvivalentno viskozno prigušenje uređaja iznosilo je otprilike 0,55 %. U zavjetrini je postavljen visoko osjetljiv akceleroimetar osjetljivosti veće od jedne pet tisućinke sekunde. S pomoću poznatih zakona gibanja JS-a te veze ubrzanja, brzine i pomaka, podaci o ubrzanju JS-a pretočeni su u pripadnu dinamičku silu vjetra. Posebna je pogodnost što je velika gustoća vremenskih koraka sada oslikavala i silu vjetra. Vremenski je inkrement instrumenta prilagodljiv od jedne pet tisućinke sekunde do jedne stotinke sekunde te je moguće uspoređivati razlike u registraciji sile vjetra ovisne o gustoći mjerenja. Istodobno velika gustoća zapisa stvarala je vrlo veliki broj podataka koji nisu praktični za daljnju obradu. Duljina zapisa primjerena za daljnju obradu bila je od 10 sekundi do 10 minuta.



Slika 1. Pokusni jednostupanjski sustav

Promatrani oscilator postavljen je tako da je donja točka kugle bila na visini od 110 cm iznad tla. Mjerno mjesto je izravno izloženo djelovanju vjetra bez zapreka. Posebna je karakteristika lokacije da bura i jugo na tom mjestu pušu gotovo iz istog smjera. Šira lokacija su južne padine Mosora, nadmorske visine 240 m. Na udaljenosti od 300 m teren je brdovit i zakreće smjer bure, dok jugo puše bez zapreka na udaljenosti od nekoliko kilometara. Uže područje lokacije prikazano je na slici 2.



Slika 2. Karta užeg područja s mjestom mjerenja sile vjetra

Izmjereni podaci o sili vjetra obrađivani su tako da su konstruirani stvarni i normalizirani spektri odziva za vjetar tipa bura i vjetar tipa jugo primjereni danoj lokaciji.

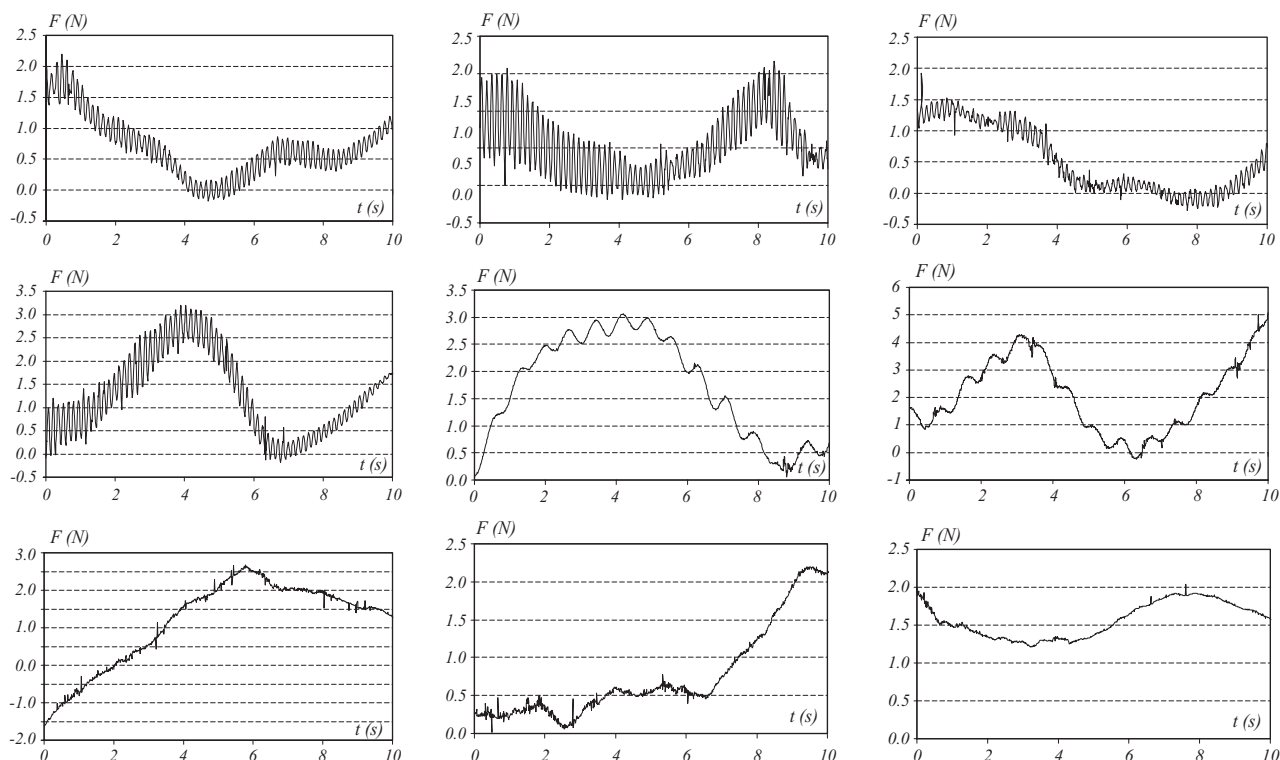
Valnim transformacijama iz izmjerenih je podataka konstruirana funkcija srednje komponente sile vjetra te funkcije nekoliko prvih oscilirajućih komponenta. Ovi podaci poslužili su za usporedbu statičkog i dinamičkog djelovanja sile vjetra.

Autori su bili svjesni činjenice da dobiveni podaci izravno vrijede za predmetnu lokaciju i visinu mjernog mjesta od 1,1 m iznad tla. Očekuje se da se u idućim istraživanjima obave mjerenja na referentnoj visini od 10 m, kao i mjerenja na drugim lokacijama. Smatramo da je bilo važno prikazati metodologiju i zakonitosti dinamičkih pojava koje je potrebno obuhvatiti u takvim mjerenjima.

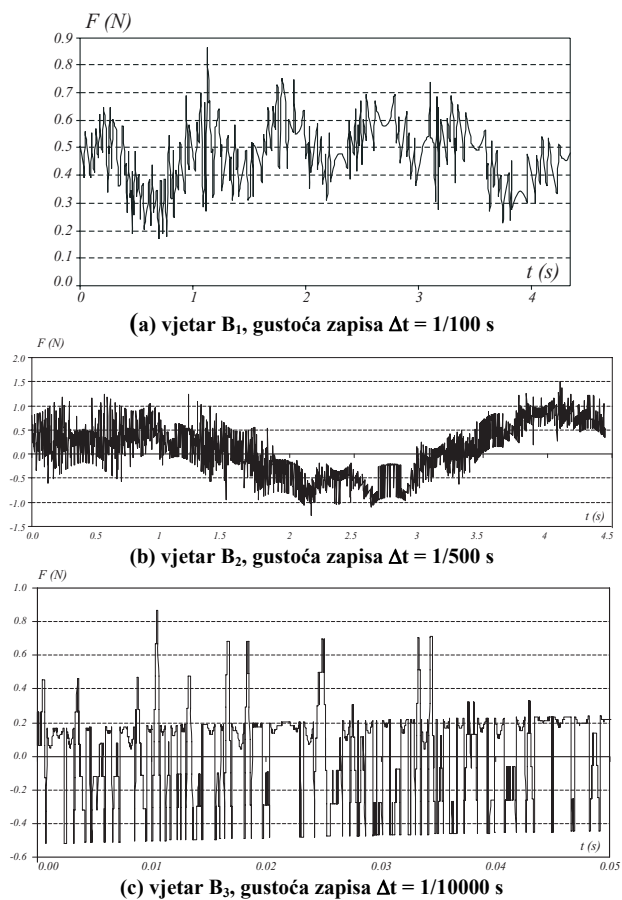
2 Izmjerene sile vjetra

Podaci na kojima se temelji ovaj rad odnose se na vjetrove jugo i buru izmjerene u više navrata tijekom protekle tri godine. Rezultati mjerenja ubrzanja JS-a standardnim su metodama preslikani u dinamičku silu vjetra [1] i [2]. Na slici 3. prikazano je devet zapisa sile vjetra tipa jugo; gustoća zapisa svih slučajeva iznosila je 1/100 sekunde.

Zapisi sile vjetra tipa bura prikazani su na slici 4. Kod njih je varirala vremenska gustoća zapisa.



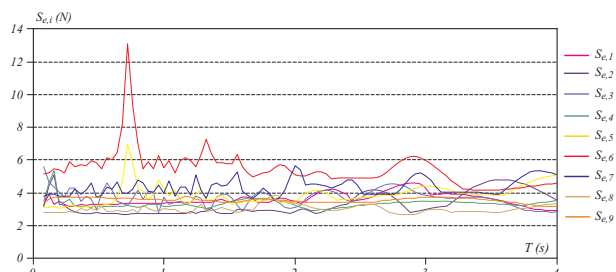
Slika 3. Grafički prikazi izmjerene sile za vjetar jugo, gustoća zapisa $\Delta t = 1/100$ s



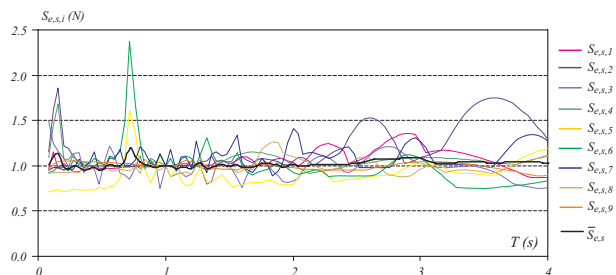
Slika 4. Grafički prikazi izmjerene sile za vjetar tipa bura

3 Elastični spektri odziva sile vjetra

Elastični spektri odziva $S_{e,i}$ za devet zapisa sile vjetra tipa jugo, proračunani uporabom standardnih dinamičkih metoda [3], prikazani su na slici 5.



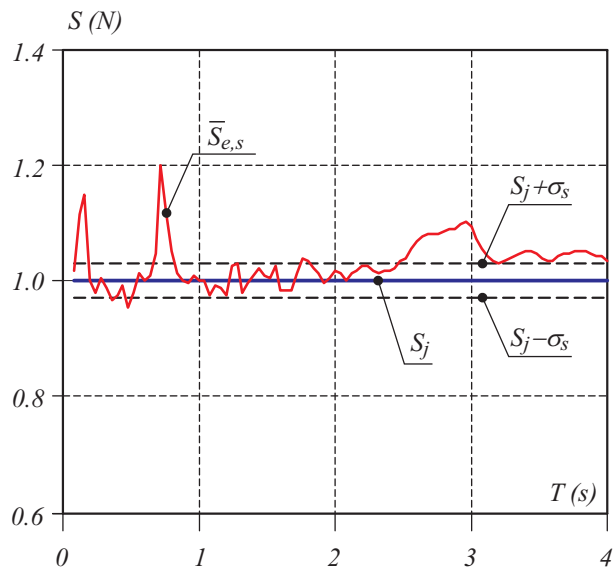
Slika 5. Elastični spektri odziva vjetra tipa jugo



Slika 6. Skalirani elastični spektri odziva vjetra tipa jugo

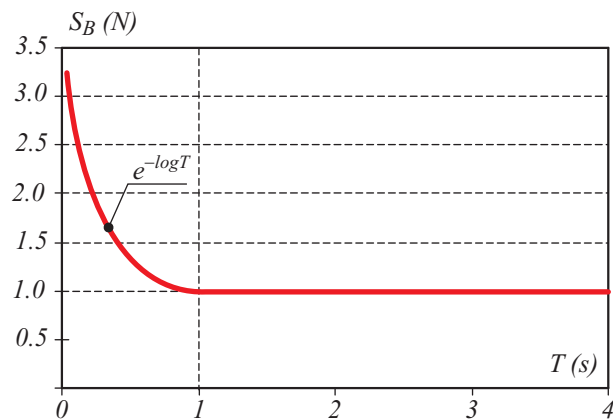
Svaki je pojedinačni spektar $S_{e,i}$ ($i=1, \dots, n$) odziva prikazan mjerilom tako da mu jedinična sila spektra pripada periodu $T = 1$ s, (slika 6). Period od jedne sekunde izabran je stoga što je nezavisni uređaj mjerio sekundnu

brzinu vjetra. Takvi su spektri na slici 6. označeni s $S_{e,s,i}$ ($i=1, \dots, n$). Potom je određena funkcija srednje vrijednosti $\bar{S}_{e,s}$. Na slici 7. vidi se da je vrlo dobra aproksimacija te funkcije konstantna funkcija jediničnog iznosa koja predstavlja normalizirani spektar odziva S_j za vjetar tipa jugo dobiven na osnovi 9 prikazanih zapisa sile vjetra. Točnost ove aproksimacije ocijenjena je veličinom funkcije standardne devijacije i prikazana je na slici 7.



Slika 7. Normalizirani spektar odziva za vjetar tipa jugo

Sličan je postupak proveden za vjetar tipa bura. Pojedinačni su rezultati prikazani u radu [4]. Rezultirajući normalizirani spektar odziva S_B , prikazan na slici 8., bitno se razlikuje od onog za vjetar tipa jugo. Premda je normalizirani spektar bure za sustave s periodom većim od jedne sekunde istovjetan, za sustave s periodom manjim od jedne sekunde, odnosno frekvencijom većom od 1 Hz, spektar ima eksponencijalnu promjenu. Ova činjenica izravno upućuje na dobro poznatu mahovitost vjetra tipa bura.



Slika 8. Normalizirani spektar odziva za vjetar tipa bura

4 Valna analiza sile vjetra

Valna svojstva vjetra na konstrukcije analizirana su na jednostupanjskom dinamičkom sustavu. Valni karakter djelovanja istražen je kratkotrajno-kratkovalnom analizom [5] i [6] na nekoliko različitih uzbuđa vjetra. Dinamičko djelovanje sile vjetra može se rastaviti na srednju i oscilirajuće komponente [6]. Kratkotrajnom transformacijom analizirana je srednja, a potom i oscilirajuća komponenta izlučena iz uzbudne sile. Srednja komponenta sile predstavljena je pravokutnim impulsom, a oscilirajuća harmonijskom funkcijom. Kada se u kratkotrajno-kratkovalnoj transformaciji odabere funkcija u obliku pravokutnog impulsa, iz ukupne uzbuđe izlučuje se komponenta koja ima značenje prosječne odnosno srednje komponente sile vjetra s prosječnim intervalom koji je jednak trajanju impulsa. Kada se odabere harmonijska funkcija, npr. sinusoidnog oblika, kratkotrajno-kratkovalna transformacija iz ukupne uzbuđe izlučuje oscilirajuću komponentu koja pokazuje mogući rezonantni efekt na jednostupanjski dinamički sustav s periodom koji je jednak periodu odabrane sinusne funkcije.

Kratkotrajno-kratkovalna transformacija dana je izrazom [6]:

$$a_\alpha(\alpha, T) \Big|_{\max} = \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau) I(\tau-t) d\tau, \quad \alpha > 0 \quad (1)$$

gdje je $F(\tau)$ izmjerena sila vjetra, a:

$$I(\tau-t) = N(\alpha T, \tau-t) \sin \frac{2\pi}{T}(\tau-t) \quad (2)$$

sinusni impuls trajanja $t = \alpha T$, pri čemu je α broj valova, a N funkcija dana izrazom:

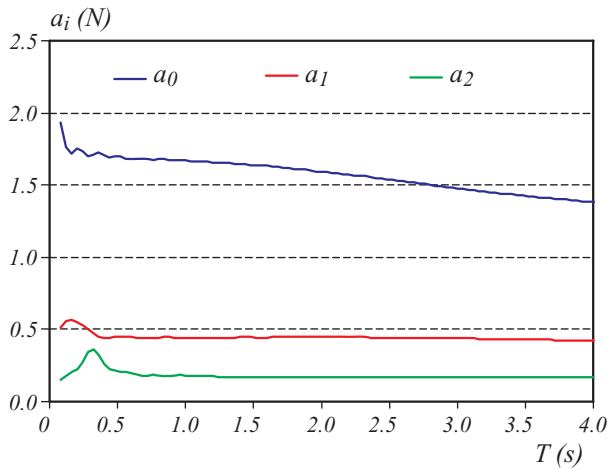
$$N(\alpha T, t) = \begin{cases} 1/\alpha T & 0 < t < \alpha T \\ 0 & \text{ostalo} \end{cases} \quad (3)$$

Primjena sinusne funkcije (2) u izrazu (1) daje oscilirajuću komponentu djelovanja vjetra. Ako se za valnu transformaciju izabere pravokutni impuls, valna transformacija sile vjetra izlučuje srednju komponentu djelovanja vjetra.

Valna analiza dinamičke uzbuđe vjetrom J_2 [7] prikazana je na slici 9. Komponenta a_0 prikazuje intenzitet srednje komponente sile vjetra kao funkcije vremena osrednjavanja. Samo vrijeme osrednjavanja uzeto je kao funkcija vlastitog perioda T danog JS-a. Komponenta a_1 prikazuje intenzitet prve oscilirajuće komponente sile jednoga punog sinusnoga vala u trajanju vlastitog perioda T , a komponenta a_2 intenzitet druge oscilirajuće komponente.

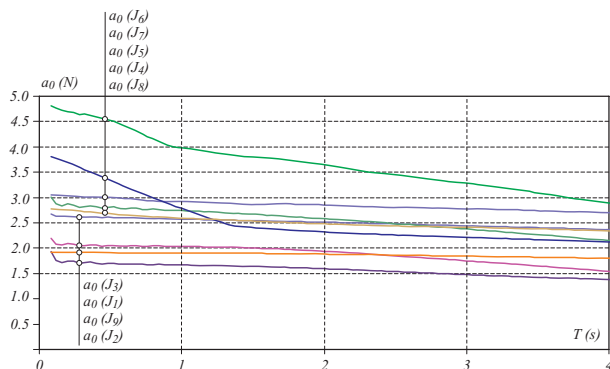
Valna analiza dinamičke uzbuđe vjetrom $J_1 - J_0$ pokazala je da najveći intenzitet ima srednja komponenta, prva oscilirajuća komponenta je približno 2,5 puta manja,

dok su druga i sve ostale oscilirajuće komponente zane-marivo male. Sličan zaključak [6] vrijedi za ostale ana-lizirane vjetrove.



Slika 9. Srednja i oscilirajuće komponente vjetra J2

Srednje komponente za svih devet zapisa sile vjetra \$a_{0,i}\$ (\$i = 1, \dots, n\$) prikazane su na slici 10. U ovome će se radu srednje komponente sile vjetra rabiti za određivanje mje-ri-la spektra odziva za konkretni JS.



Slika 10. Srednja komponenta vjetrova \$J_1 - J_6\$

5 Određivanje mjerila spektra za konkretni JS oscilatora

Za praktičnu uporabu potrebno je odrediti u kojem mje-rilu treba promatrati normalizirani spektar da on postane stvarni elastični spektar za zadani JS i vrijeme osrednja-vanja brzine vjetra.

Mjerilo spektra za aktualni JS i vrijeme osrednjavanja brzine vjetra \$t_v\$ od jedne sekunde uz prosječnu sekundnu brzinu vjetra od 26,4 m/s, određeno je iz uvjeta:

$$\beta = \frac{1}{i} \sum_i \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} S_{e,i} dt}{a_{0,i}(T_s) \Big|_{T_s=1}} \right] \quad (4)$$

gdje je \$S_{e,i}\$ elastični spektar odziva vjetra, a \$a_{0,i}(T_s) \Big|_{T_s=1}\$ (\$i=1, \dots, n\$) diskretna vrijednost srednje komponente sile vjetra za period \$T_s = 1\$ s i vrijeme osrednjavanja od 1 s. Za devet analiziranih zapisa sile vjetra koeficijent \$\beta\$ iz-nosi \$\beta = 1,59\$ uz standardnu devijaciju od 1,3 %. Uzima-jući u obzir mjerilo definirano izrazom (4) elastični spek-tar ima oblik:

$$S_{J,\beta} = S_J \beta \quad (5)$$

gdje je \$S_J\$ normalizirani spektar odgovora za vjetar jugo prikazan na slici 7. Ako se pojavi vjetar brzine \$v\$ različi-te od izmjerene brzine 26,4 m/s za isto vrijeme osred-njavanja od jedne sekunde, tada elastični spektar ima oblik:

$$S_{J,\beta,v} = S_{J,\beta} \left(\frac{v}{26,4} \right)^2 \quad (6)$$

Na primjer za \$T_s = 1\$ s i sekundnu brzinu od 26,4 m/s (95 km/h) ordinata spektra definirana izrazom (6) iznosi 1,59 N. Za \$T_s = 1\$ s i sekundnu brzinu od 41,67 m/s (150 km/h) ordinata spektra iznosi 3,96 N, dok za sekundnu brzinu od 55,55 m/s (200 km/h) iznosi 7,05 N.

Može se postaviti pitanje kako bi izgledao spektar elastičnih sila za slučaj da se osrednjavanje vrši na neko drugo vrijeme \$t_v\$. Tada se spektar koji pripada tom vremenu osrednjavanja može konstruirati prema izrazu:

$$S_{J,\beta,v,t_v} = S_{J,\beta,v} a_o(T_v) \Big|_{T_v=t_v} \quad (7)$$

gdje je \$a_o(T_v) \Big|_{T_v=t_v}\$ vrijednost srednje komponente sile vjetra koja prema [6] iznosi:

$$a_o(T_v) = \left[\frac{20}{413} (\ln T_v)^2 - \frac{10}{51} \ln T_v + 1 \right] e^{-0,20 \ln T_v} \quad (8)$$

za period \$T_v\$ jednak vremenu osrednjavanja brzine vjetra \$t_v\$. Izraz za srednju komponentu sile vjetra (8) konstru-iran je dijelom na osnovi provedenih mjerenja, a za pe-riod 6-600 s na osnovi rezultata prikazanih u radu [8]. Sličan je rezultat dobiven u radu [9].

6 Mjerilo spektra za neutralnu ravnu plohu veličine 1 m²

Približan način određivanja sile vjetra sastoji se u presli-kavanju rezultata s malog modela na veliki model. Pod velikim se modelom podrazumijeva model ploštine 1 m².

Isključujući utjecaj koeficijenata oblika velikog modela, tj. pretpostavljajući da je on jednak jedan te isključujući utjecaj Karmanovih sila, preslikavanje se može provesti s pomoću omjera reduciranih ploština. Za promatrani model JS-a reducirana ploština iznosi:

$$A_r = \rho \left(\frac{d_k^2 \pi}{4} + d_s \frac{l_s}{2} \right) \quad (9)$$

gdje je ρ koeficijent oblika koji za kuglu i valjak iznosi 0,4, d_k je promjer metalne kugle, d_s je promjer šipke i l_s je duljina šipke. Za $d_k = 0,08$ m, $d_s = 0,0042$ m i $l_s = 0,62$ m, reducirana površina za promatrani model iznosi $A_r = 0,00253$ m².

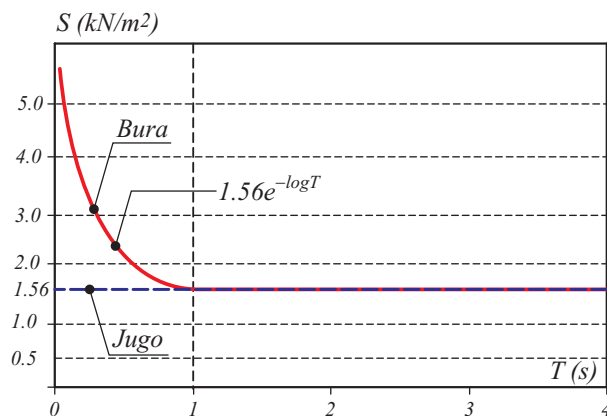
Preslikavanje spektra na ravnu plohu veličine 1 m² se može provesti množenjem spektra dobivenog za analizirani JS faktorom:

$$\gamma = \frac{1,0}{0,00253} = 395,0 \quad (10)$$

Vrijednost spektra za neutralnu ravnu plohu veličine 1 m² i prosječnu sekundnu brzinu 26,4 m/s jest:

$$\begin{aligned} S &= S_J \beta \gamma = S_{J,\beta,v,t_v} \cdot 1,59 \cdot 395,0 = \\ &= S_{J,\beta,v,t_v} \cdot 628 \left[N/m^2 \right] = 0,628 S_{J,\beta,v,t_v} \left[kN/m^2 \right] \end{aligned} \quad (11)$$

Primjerice, za $T_s = 1$ s i prosječnu sekundnu brzinu od 26,4 m/s (95 km/h) ordinata spektra iznosi 0,628 kN/m². Za prosječnu sekundnu brzinu od 41,67 m/s (150 km/h) i $T_s = 1$ s, ordinata spektra iznosi 1,564 kN/m², te za prosječnu sekundnu brzinu od 55,55 m/s (200 km/h) ordinata spektra iznosi 2,78 kN/m². Na slici 11. prikazani su spektri juga i bure za prosječnu sekundnu brzinu od 150 km/h.

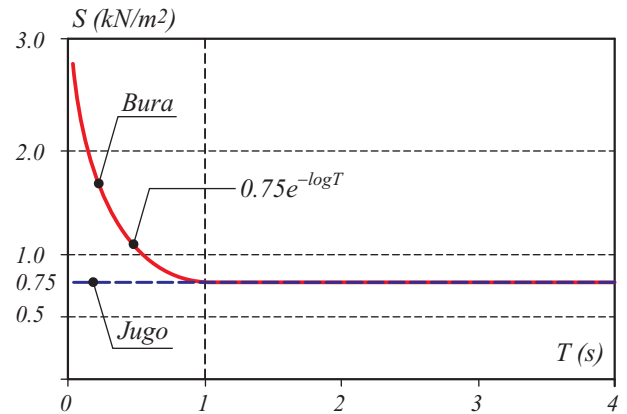


Slika 11. Spektri juga i bure za prosječnu sekundnu brzinu 150 km/h

Spektar vjetra za vrijeme osrednjavanja $t_v = 600$ s (10 min) može se prema izrazu (7) odrediti množeći ordinate spektra S za vrijeme osrednjavanja $t_v = 1$ s, s vrijednošću srednje komponente sile vjetra $a_o(T_v)_{T_v=t_v}$ za vrijeme osrednjavanja $t_v = 600$ s koja iznosi 0,48, pa je spektar S_{600} za vrijeme osrednjavanja $t_v = 600$ s dan izrazom:

$$S_{600} = 0,48 \cdot S \left[kN/m^2 \right] \quad (12)$$

Za prosječnu brzinu od 95 (km/h) i $T_s = 1$ s ordinata spektra iznosi 0,301 kN/m². Za prosječnu brzinu od 150 (km/h) i $T_s = 1$ s, ordinata spektra iznosi 0,75 kN/m². Za prosječnu brzinu od 55,55 m/s (200 km/h) ordinata spektra iznosi 1,33 kN/m². Spektri za prosječnu brzinu od 150 km/h i $T_s = 1$ s grafički su prikazani na slici 12.



Slika 12. Spektri juga i bure za srednju desetominutnu brzinu 150 km/h

Iz prethodnih podataka uočljiva je razumljivo velika razlika u prikazu statičkog i dinamičkog djelovanja sila vjetra u ovisnosti o brzini osrednjavanja. Autori u ovome radu nisu imali namjeru komentirati iznesene podatke o opterećenju silama vjetra u svjetlu aktualnih tehničkih normi. Evidentno je da podaci o desetminutnoj prosječnoj brzini vjetra podcjenjuju stvarno stanje opterećenja.

7 Usporedba statičkog i dinamičkog djelovanja na neutralnu ravnu plohu površine 1 m²

Pod statičkim učinkom podrazumijevamo rezultat djelovanja sila vjetra na apsolutno krutu plohu. Njega dominantno uvjetuju srednja i oscilirajuća komponenta. Dinamički učinak sila vjetra iskazuje elastični spektar odziva. Dinamički učinak vjetra tipa jugo isti je na cijelom području perioda osciliranja, a isti je učinak i kod bure za periode osciliranja veće od 1 sekunde. On iznosi 1,59 pripadne srednje komponente. Za sustave perioda manjih od jedne sekunde, odnosno frekvencija većih od 1 Hz, kod bure taj iznos raste sukladno prikazanom spektru odziva za buru.

Statičkim se utjecajem može smatrati superpozicija srednje i oscilirajuće komponente koja prema [6] daje 1,40 iznosa pripadne srednje komponente.

Dinamički je učinak uvijek veći od statičkog. Najmanji omjer dinamičkog u odnosu na statički učinak iznosi $1,59/1,40 = 1,136$. Pri djelovanju sila vjetra tipa bura na sustave s frekvencijom većom od 1 Hz, dinamički učinak naglo raste u odnosu prema statičkomu.

8 Približna preslika spektara na drugu lokaciju

Točan oblik i iznose sila vjetra i spektara odziva na novoj lokaciji moguće je odrediti isključivo mjerenjima. Preslika na drugu lokaciju moguća je ako za nju postoji barem neki izmjereni podatak o brzini vjetra za konkretno vrijeme osrednjavanja.

Kada smo konstruirali spektre odziva sila vjetra za polaznu lokaciju, tada spektre za novu lokaciju možemo dobiti tako da se ordinate onih s izvorne lokacije pomnože s omjerom:

$$k = \left(\frac{v_n}{v_{izv}} \right)^2 \quad (12)$$

gdje je v_n izmjerena srednja brzina vjetra na novoj lokaciji, a v_{izv} srednja poznata brzina vjetra za isto osrednjavanje na izvornoj lokaciji.

Kao vrlo gruba aproksimacija o veličinama sila vjetra i ordinatama spektra odziva može poslužiti kvadratni omjer srednjih desetminutnih brzina.

9 Zaključci

Zaključci koji slijede primarno se odnose na lokaciju na kojoj su bazni podaci mjereni uključujući uvjete izloženosti i visinski položaj JS-a.

Uz pomoć valne analize sila vjetra dobivene iz izmjerenih podataka predložen je jedan mogući oblik zakonitosti promjene srednje i oscilirajuće komponente horizontalne sile vjetra. Uočljiv je konstantan relativni odnos iznosa komponentata s omjerom 2,5 u korist iznosa srednje komponente.

Na temelju izmjerenih podataka konstruirani su spektri odziva za vjetrove tipa jugo i bura za izloženi JS te preslika na plohu jedinične ploštine od 1 m². Uz pomoć mjerenja osrednjenih brzina spektri su prenosivi na bilo koju lokaciju.

Prikazani spektri pokazuju bitnu razliku načina djelovanja vjetrova tipa bura i jugo. Razlika se pokazuje za di-

namičke sustave s periodima manjim od 1 sekunde. Razlika je sve veća kako se smanjuje period sustava. Ova činjenica pokazuje mahovitost u karakteru djelovanja bure.

Dinamički učinak iskazan omjerom maksimalne dinamičke sile vjetra i srednje komponente izjednačen je za čitavo područje vjetra tipa jugo, kao i za vjetar tipa bura kada je $T > 1,0$ sekunde. Dinamički učinak jako raste pri djelovanju bure na dinamički krute sustave. Sve dinamičke analize isključile su utjecaj prigušenja.

O statičkom djelovanju govorimo kada isključujemo dinamičke efekte. Jednostavno se može zamisliti da promatramo djelovanje sile vjetra na apsolutnu krutu plohu. Tada će najveći učinak dati običan zbroj iznosa srednje i oscilatorne komponente, odakle slijedi da se iznos statičke sile može dobiti množeći iznos srednje komponente s 1,40. Onog trenutka kad se u sustav unesu dinamička svojstva, djelovanje vjetra možemo prikazati s pomoću spektra. Tada je za slučaj juga pri svim frekvencijama i bure za $T > 1$ s dinamički učinak 1,59 puta veći od srednje komponente. Kako je prethodno zaključeno, pri djelovanju bure za sustave s $T < 1$ s bitno se povećava dinamički učinak.

Za slučaj neke druge lokacije, zaključci o djelovanju sile vjetra meritorno se mogu donijeti samo na temelju mjerenja i obrade rezultata. Očekuje se da bi i prethodno izloženi dijagrami spektara i funkcija osrednjavanja srednje i oscilatorne komponente mogli biti korigirani. Ipak, za slobodnu inženjersku procjenu o redu veličina spektara na novoj lokaciji može poslužiti omjer kvadrata referentnih brzina bazne i nove lokacije, pri čemu se ovdje polazi od pretpostavke da su podaci o referentnim brzinama vjerodostojni.

Sve prethodno izloženo upućuje na potrebu opsežnijih istraživanja djelovanja sila vjetra na različitim karakterističnim lokacijama i pri različitim srednjim brzinama. Nameće se i zamisao standardizacije JS oscilatora, osobito površine plohe izložene djelovanju sila vjetra. U zadatak standardizacije JS oscilatora pripada i visinski položaj u odnosu na okolno tlo izložene plohe.

LITERATURA

- [1] Humar, J. L.: *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, New Jersey, 1990.
- [2] Mihanović, A.: *Dinamika konstrukcija*, Sveučilište u Splitu, Split, 1996.
- [3] Newmark, N. M.; Rosenblueth, E.: *Fundamentals of Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1971.
- [4] Mihanović, A.; Nikolić, Ž.; Smoljanović, H.: *Elastični spektar odgovora za pobudu vjetrom tipa bura*, Zbornik radova Drugog susreta Hrvatskog društva za mehaniku, Split, 2008, Hrvatsko društvo za mehaniku, ur. Marović, P.; Galić, M.; Krstulović-Opara, L., 55-60
- [5] Gurley, K.; Kareem, A.: *Applications of Wavelet Transforms in Earthquake, Wind and Ocean Engineering*, Engineering Structures, No. 21 (1999), 149-167

- [6] Mihanović, A.; Nikolić, Ž.; Marović, P.: *Waves properties of wind actions on structure*, Int. J. Engineering Modelling, Vol. 19 (2006) 1-4, 23-31
- [7] Mihanović, A.; Nikolić, Ž.; Smoljanović, H.: *Response spectrum of the Jugo wind force*, Int. J. Engineering Modelling, Vol. 21 (2008) 1-4, 15-26
- [8] Peroš, B.; Boko I.; Šimunović, T.: *Analiza djelovanja vjetra na dubrovački most*, Građevinar 57 (2005) 2, 87-94
- [9] Solari, G.: *Wind response spectrum*, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 116 (1989) 9, 2057-2073

Zahvala

Prikazani rezultati proizašli su iz znanstvenih projekata *Nelinearna dinamička analiza trodimenzionalnih armiranobetonskih konstrukcija* i *Modeliranje granične nosivosti i stabilnosti konstrukcija pri velikim pomacima* provedenih uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.