

Analiza djelovanja vjetra na Dubrovački most

Bernardin Peroš, Ivica Boko, Tihomir Šimunović

Ključne riječi

Dubrovački most, vjetar, djelovanje vjetra, simuliranje vjetra, ispitivanja, zračni tunel, terenska mjerenja

Key words

Dubrovnik bridge, wind, wind action, wind simulation, testing, wind tunnel, field measurements

Mots clés

pont de Dubrovnik, vent, action de vent, simulation de vent, essai, tunnel aérodynamique, mesures sur le terrain

Ключевые слова

Дубровнички мост, ветер, действие ветра, моделирование ветра, испытания, воздушный туннель, полевые измерения

Schlüsselworte

Dubrovnik-brücke, Wind, Windwirkung, Windsimulation, Untersuchungen, Lufttunnel, Geländemessungen

B. Peroš, I. Boko, T. Šimunović

Izvorni znanstveni rad

Analiza djelovanja vjetra na Dubrovački most

Analizirano je djelovanje vjetra na Dubrovački most na temelju podataka iz dva izvora: prvi su podaci iz izravnog mjerenja smjera i brzine vjetra na području mosta, a drugi iz rezultata ispitivanja u zračnom tunelu. Prikazan je provedeni proračun pouzdanosti mosta ovisno o raznim podacima o djelovanju vjetra. Naveden je važan zaključak da nisu dovoljna ispitivanja u zračnom tunelu, nego treba provesti i mjerenja na terenu koja su vrijedan podatak za razvitak hrvatskih norma.

B. Peroš, I. Boko, T. Šimunović

Original scientific paper

Analysis of wind action at the Dubrovnik bridge

The wind action at the Dubrovnik bridge is analyzed based on the data obtained from two sources: first source of data are those obtained by direct measurement of the direction and speed of wind at the bridge location, and the other data are the results obtained in wind tunnel. The bridge reliability analysis, highly dependant on a variety of data about wind action, is presented. In conclusion, it is emphasized that wind tunnel testing data are not sufficient, and that they must be complemented with on site measurements. The latter can additionally be used as an information significant for development of Croatian standards.

B. Peroš, I. Boko, T. Šimunović

Ouvrage scientifique original

L'analyse des effets du vent sur le pont de Dubrovnik

L'action du vent sur le pont de Dubrovnik est analysée sur la base des données provenant de deux sources: la première source sont les données obtenues par mesure directe de la direction et de la vitesse du vent à l'emplacement du pont, et la deuxième source sont les résultats obtenus dans le tunnel aérodynamique. L'analyse de la fiabilité du pont, tout à fait dépendante des données variées sur les effets du vent, est présentée. En conclusion, il est souligné que les données obtenues dans le tunnel aérodynamique ne sont pas suffisantes, et que elles doivent être complémentées par les mesures sur le terrain qui peuvent également être utilisés comme données importantes pour le développement des normes croates.

Б. Перош, И. Бокко, Т. Шимунович

Оригинальная научная работа

Анализ действия ветра на Дубровнички мост

В работе анализировано действие ветра на Дубровнички мост на основании данных из двух источников: первые данные из прямого источника измерения направления и скорости ветра около моста, а вторые из результатов испытаний в воздушном туннеле. Представлен проведённый расчёт надёжности моста в зависимости от различных данных и действия ветра. Приведено важное заключение, что недостаточны испытания в воздушном туннеле, а необходимо провести и измерения в поле, которые являются важными данными для развития хорватских норм.

B. Peroš, I. Boko, T. Šimunović

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Analyse der Windwirkung auf die Dubrovnik-Brücke

Beschrieben ist die Analyse der Windwirkung auf die Dubrovnik-Brücke auf Grund von Angaben aus zwei Quellen: das Erste sind Angaben aus unmittelbaren Messungen der Windrichtung und - Geschwindigkeit im Bereich der Brücke, und das Zweite sind Ergebnisse der Untersuchung im Lufttunnel. Dargestellt ist die durchgeführte Berechnung der Zuverlässigkeit der Brücke abhängig von den verschiedenen Angaben über die Windwirkung. Angeführt ist eine wichtige Schlussfolgerung dass Untersuchungen im Lufttunnel nicht genügen sondern dass man am Gelände Messungen durchführen muss, die wertvolle Angaben für die Entwicklung kroatischer Normen vorstellen.

Autori: Prof. dr. sc. **Bernardin Peroš**, dipl. ing. građ.; mr. sc. **Ivica Boko**, dipl. ing. građ.; **Tihomir Šimunović**, dipl. ing. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Matice hrvatske 15

1 Uvod

Posljednjih desetak godina intenzivno se provode istraživanja kompleksnoga vjetrovnog režima na području Hrvatske, radi izrade meteorološke podloge za izradu Hrvatskih norma (preporuka ENV 1991-2-4 - djelovanje vjetra na konstrukcije) gdje je referentna brzina vjetra definirana kao maksimalna 10-minutna srednja brzina s povratnim periodom od 50 godina.

U kontinentalnom su dijelu Hrvatske smjerovi puhanja ekstremnog vjetra većinom W-NW-N i povezani su s frontalnim prolazima sa sjeverozapada.

Nasuprot tome, vjetrovi velikih brzina duž obale i otoka pretežno su iz NE-NNE smjera (bura) ili iz ESE-SE smjera (jugo) [1, 4].

Najekstremniji su vjetrovi izmjereni na lokacijama Masleničkoga mosta, Krčkog mosta te u Senju, Dubrovniku i Makarskoj.

To je posljedica lokacija anemometara koje su na mjestima gdje bura ima ubrzanje poradi 'efekta tunela' zbog konfiguracije lokalnog krajolika i obližnjih planinskih prolaza. Maksimalna izmjerena V_{10min} brzina vjetra u Hrvatskoj jest 43,5 m/s ($V_{max} = 69,0$ m/s) na Masleničkom mostu iz NNE smjera dana 21. 12. 1998.

Navedena istraživanja pokazala su da 10-minutni interval osrednjavanja nije dovoljan da bi pokazao pravu sliku o turbulentnim značajkama bure na obalnoj regiji i otocima u Hrvatskoj, te da je potrebno raspolagati sa što kraćim intervalima osrednjavanja brzine vjetra, uz nužno poznavanje i vertikalne promjene smjera i brzine vjetra. Upravo ove spoznaje potakle su ovdje prikazana istraživanja.

Naime, pri projektiranju Dubrovačkog mosta, strujni je režim vjetra na toj lokaciji određen na osnovi tunelskog simuliranja vjetra [prema 12] koristeći se meteorološkim podacima za srednje satne brzine vjetra na obližnjoj meteorološkoj postaji u gradu Dubrovniku, koja je udaljena 2,5 km od lokacije mosta.

Kasnije, za gradnje Dubrovačkog mosta, u okviru znanstvenog projekta (0083151 - *Sigurnost konstrukcija u slučaju djelovanja vjetra*) u ovome su radu provedena prikazana profilna mjerenja sekundnih vrijednosti brzine i smjera vjetra na lokaciji mosta s idejom da se na temelju dobivenih vrijednosti odredi realno opterećenje vjetra na most te primjenom stohastičke analize u probabilističkom postupku odredi stupanj pouzdanosti nosive konstrukcije mosta.

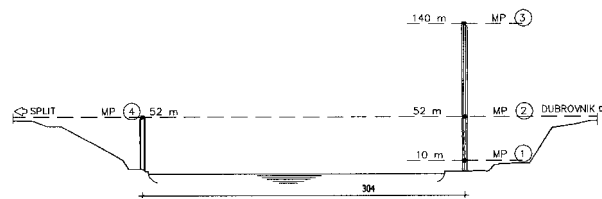
Različiti ulazni podaci o režimu djelovanja vjetra za predmetnu lokaciju analizirani su sa stajališta stupnja pouzdanosti nosive konstrukcije mosta i tema su istraživanja u ovome radu.

2 Profilna mjerenja brzine i smjera djelovanja vjetra na području Dubrovačkog mosta

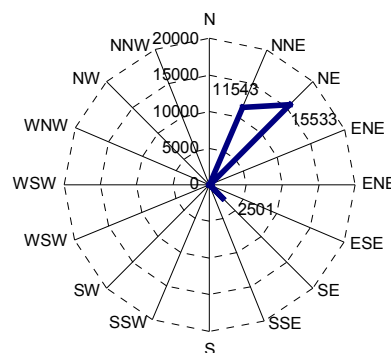
Specijalna profilna mjerenja sekundnih vrijednosti brzine i smjera vjetra izvršena su u razdoblju od 14. 3. 2001. do 15. 5. 2001. godine na lokaciji grada Dubrovnika. Mjerenja su izvršena na visinama 10,52 i 140 m na jednom profilu te na visini od 52 m na drugom kraju mosta (slika 1.).

Iako izmjerene vrijednosti brzina vjetra nemaju karakteristike ekstremnih vrijednosti na toj lokaciji (mjereno u razdoblju kada nije bilo jakog vjetra), dobiveni rezultati poslužili su za probna istraživanja o odnosu brzina vjetra u različitim vremenskim intervalima, o vertikalnim promjenama brzine i smjera vjetra, tj. dali su spoznaje i o turbulentnom režimu strujanja vjetra na lokaciji Dubrovnika.

Istraživanjima se ujedno došlo do nekih bitnih spoznaja o mahovitom djelovanju prirodnog fenomena bure. Analizirana su četiri različita intervala osrednjavanja: 1 sekunda, 10 sekundi, 60 sekundi (1 minuta) i 600 sekundi (10 minuta) na odabranom uzorku od 30000 uzastopno izmjerenih sekundnih brzina vjetra.



Slika 1. Položaj profilnih mjernih točaka na gradilištu Dubrovačkog mosta



Slika 2. Razdioba učestalosti smjera vjetra za odabrano razdoblje od 30000 s

Uzorak od 30000 sekundi odabran je kao prihvatljiv s aspekta lokalnih smjerova vjetra, jer razdioba učestalosti pojedinog smjera vjetra (slika 2.) u tom razdoblju pokazuje dominantan utjecaj bure NNE-NE smjerova (njihova je učestalost ukupno 90%). Iako je najčešći vjetar na promatranoj lokaciji jugo (ESE), najveće lokalne brzine vjetra zabilježene su u slučajevima puhanja bure, koja je u Dubrovniku ujedno i vjetar najveće promjenjivosti brzine, što se vidi iz osnovnih statističkih obilježja brzine

Tablica 1. Osnovna statistička obilježja brzina bure na pojedinim točkama za različite periode osrednjavanja

MJERNO MJESTO	VISINA IZNAD TLA (m)	per. osred. = 1 s N = 30000			per. osred. = 10 s N = 3000			per. osred. = 60 s N = 500			per. osred. = 600 s N = 50		
		\bar{x}	s	Max.	\bar{x}	s	Max.	\bar{x}	s	Max.	\bar{x}	s	Max.
MP1	10,0	15,33	4,37	34,10	15,33	4,00	29,18	15,33	3,17	21,06	15,33	2,68	19,41
MP2	52,0	17,12	4,51	35,90	17,12	4,19	29,70	17,12	3,42	24,34	17,12	2,84	21,50
MP3	140,0	18,19	4,65	37,50	18,19	4,32	30,41	18,19	3,60	25,69	18,19	3,09	23,26
MP4	52,0	21,27	5,95	49,10	21,27	5,44	38,30	21,27	4,12	30,23	21,27	3,10	25,91

N – broj podataka, \bar{x} – srednja vrijednost brzine vjetra (m/s), s – standardna devijacija (m/s), Max. – maksimalna brzina vjetra (m/s).

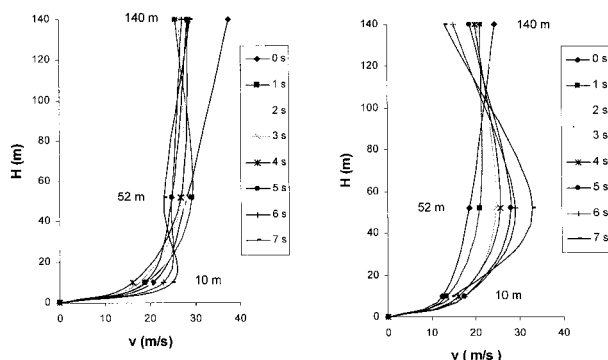
vjetra navedenih u tablici 1. Na to posebno ukazuju vrijednosti standardne devijacije (kao prvoga statističkog pokazatelja rasapa neke veličine) brzine vjetra na pojedinim mjernim mjestima za različite intervale osrednjavanja.

Da bi se za procjenu očekivanog opterećenja vjetrom mogli uspoređivati podaci dobiveni na osnovi izmjerenih brzina vjetra osrednjenih u različitim vremenskim intervalima, nužno je najprije analizirati odnose tih brzina na pojedinim mjernim mjestima (MP) prema slici 1. (tablica 1.).

Na osnovi već ovih prvih pokazatelja može se uočiti znatna različitost u brzinama vjetra po visini prvog profila (MP1, MP2 i MP3) i različitost u vrijednostima brzina vjetra u usporedbi s mjernim mjestom MP4, iako je ono na istoj visini kao MP2.

3 Turbulentne karakteristike bure

Iskazani odnosi najvećih udara i brzine vjetra osrednjeni na intervalima 1 sekunda, 10 sekundi, 60 sekundi i 600 sekundi pokazuju da je brzina bure na području Dubrovnika lokalno mahovit vjetar vrlo promjenljiva intenziteta. To je posebno značajno poradi dinamičkog djelovanja vjetra na konstrukcije i bitno je drukčije opterećenje u odnosu na stalnije vjetrove drugih smjerova (tipa jugo). Daljnja analiza profilnih mjerenja pokazuje turbulentne značajke bure gdje su analizirane promjene sekundnih vrijednosti brzine vjetra na mjernim točkama prvog profila u dva karakteristična intervala (slike 3. i 4.).



Slika 3. Profilne promjene brzine vjetra za interval od 7 sekundi - slučaj a)

Slika 4. Profilne promjene brzine vjetra za interval od 7 sekundi - slučaj b)

Može se primijetiti da se promjene brzine bure po visini - profil vjetra, bitno razlikuju od profila vjetra koji nalazimo u literaturi, a što se u našem slučaju posebno očituje stalnom promjenom brzine vjetra i u većini slučajeva vrijednosti opadaju s visinom profila.

Analizirana je vrijednost eksponencijalnog koeficijenta α , koji dobro aproksimira profil vjetra po visini prema izrazu:

$$V_{(h)} = V_{(10m)} \cdot \left(\frac{h}{h_{(10m)}} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

gdje je:

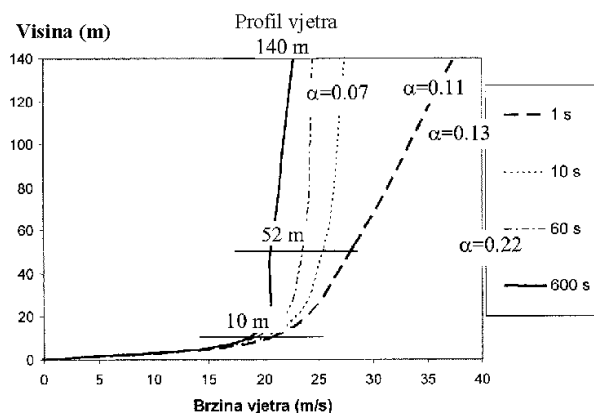
$V_{(h)}$ (m/s) - brzina vjetra na visini h ,

$V_{(10m)}$ (m/s) - brzina vjetra na visini 10 m iznad terena,

h (m) - visina iznad terena i $h_{(10m)}$ (m) - 10 m.

Slika 5. prikazuje pozicije mjernih točaka na pilonu mosta s pripadajućim brzinama vjetra i vrijednostima koeficijenta α .

Za različite intervale osrednjavanja dobivaju se različite vrijednosti koeficijenta α što ukazuje na turbulentnost bure.



Slika 5. Profili vjetra s odgovarajućim vrijednostima koeficijenta α

Turbulentne karakteristike bure najbolje opisuje razlika između intenziteta turbulencije (I_T) za pojedine brzine vjetra osrednjene u različitim vremenskim intervalima i

veličina faktora mahovitosti (F_M) koja je definirana omjerom najveće trenutne brzine vjetra i najveće osrednjene brzine vjetra na nekom intervalu (tablica 2.).

Naime, prosječna se brzina vjetra V_0 (ili makrometeorološka komponenta brzine vjetra V) definira prema [10]:

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

gdje je t vrijeme, a ΔT 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:

$$V'(t) = V(t) - V_0(t) \quad (3)$$

Standardna devijacija turbulentne komponente vjetra može se odrediti izrazom:

$$\sigma_{V'}(t) = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{1-\Delta T/2}^{t+\Delta T/2} V'^2(\xi) d\xi} \quad (4)$$

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

$$I_V = \frac{\sigma_{V'}(t)}{V_0(t)}, \quad (V_0 > 0) \quad (5)$$

U ovome je radu intenzitet turbulencije proračunan raspoloživim podacima na dva načina:

I_{V1} - kao omjer standardne devijacije osrednjenog intervala brzine vjetra i srednje intervalne brzine vjetra i

I_{V2} - kao omjer standardne devijacije jednosekundne odnosno jednodominutne i srednjominutne odnosno desetminutne brzine vjetra (tablica 2.).

Vidi se da turbulentne karakteristike vjetra pojedinog smjera najbolje karakterizira razlika između intenziteta turbulencije dobivenog uz pretpostavku da turbulentnu komponentu strujanja definira najveća vrijednost brzine vjetra. Što je ta razlika veća, turbulentna komponenta vjetra reprezentirana je bolje vjetrom manjeg intervala osrednjavanja (tablica 2.).

Tablica 2. Turbulentne karakteristike bure

Mjerna točka	MP1 – 10,0 m				MP2 – 52,0 m				MP3 – 140,0 m				MP4 – 52,0 m			
	1 s	10 s	60 s	600 s	1 s	10 s	60 s	600 s	1 s	10 s	60 s	600 s	1 s	10 s	60 s	600 s
I_{V1}	0,29	0,26	0,21	0,17	0,26	0,24	0,2	0,17	0,26	0,24	0,2	0,17	0,28	0,26	0,19	0,15
I_{V2}	0,29		0,21		0,26		0,20		0,26		0,20		0,28		0,19	
F_{M1}	2,22				2,10				2,06				2,31			
F_{M2}	-	1,17	1,43	1,75	-	1,14	1,36	1,61	-	1,14	1,34	1,59	-	1,16	1,42	1,72

I_V - intenzitet turbulencije, F_M - faktor mahovitosti

Jedna od metoda, kojom se u građevinskoj praksi defini- ra djelovanje vjetra na konstrukcije, povezuje najveće opterećenje s najvećom brzinom vjetra kao umnoškom srednje brzine i faktora mahovitosti. Dakle, ova druga veličina, koja pokazuje intenzitet turbulencije i koja se do sada u većoj mjeri rabila u praksi, jest faktor mahovi- tosti F_M definiran omjerom maksimalne trenutne brzine vjetra i maksimalne srednje brzine vjetra u izabranom vremenskom intervalu:

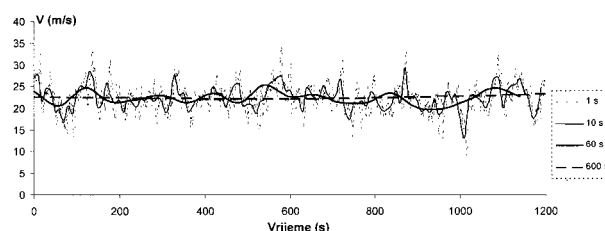
$$F_M = V_M/V_{0M} \quad (6)$$

Na osnovi podataka s kojima raspoložemo, u Dubrovniku je moguće proračunati faktor mahovitosti (tablica 2.) kao:

F_{M1} - omjer najvećih udara i srednje vrijednosti brzine vjetra

F_{M2} - omjer najvećeg udara i najvećih udara u osred- njenim intervalima.

Dobivene vrijednosti faktora mahovitosti ($F_{M1} > 2$) na svim mjernim točkama i razlike u vrijednostima faktora mahovitosti ovisno o intervalu osrednjavanja (F_{M2}) potvrđuju da je za ocjenu reprezentativnosti najadekvatnijeg podatka za turbulentnu komponentu strujanja potrebno raspolagati mjerenjima brzina vjetra sa što kraćim intervalima osrednjavanja - sekundnim vrijednostima. Ova tvrdnja slikovito je prikazana u usporedbi osrednjenih sek- undnih, desetosekundnih, šezdesetosekundnih i šesto- sekundnih (10 minutnih) brzina vjetra na MP3 (slika 6.).



Slika 6. Usporedba osrednjenih brzina vjetra za različite intervale osrednjavanja (mjerno mjesto MP3)

4 Ispitivanja u zračnom tunelu i projektno opterećenje vjetrom

Kako investitor izgradnje Dubrovačkog mosta nije poznao režim djelovanja vjetra kako je to opisano u prethodnom poglavlju, za potrebe projektne dokumenta-

cije naručio je *Aerodynamics and Aeroelastic Analysis of the new Cabel Stayed Bridge Dubrovnik* [Sedlacek G. i drugi, 1998.] od 'Institute of Steel Construction' – RWTH Aachen, Njemačka.

Pri izradi analize iskorišteni su dostupni podaci o brzini vjetra s obližnje meteorološke postaje u Dubrovniku (otprilike 2,5 km udaljena od lokacije mosta), uz određene pretpostavke o režimu strujanja vjetra na lokaciji mosta, i to:

1. za referentnu brzinu vjetra uzeta je najveća srednja satna brzina vjetra od 23,4 m/s.
2. za proračun je iskorištena korespondentna srednja desetominutna brzina vjetra prema preporukama Eurokode 1.
3. promjena vjetra po visini određena je prema izrazu (1) s parametrom $\alpha = 0,3$ (pretpostavka za desetominutne brzine).

Za najveći udar vjetra uzeta je brzina $V = 49,6$ m/s koja je dobivena iz referentne brzine za povratni period od 100 godina uz dinamički tlak udara $g = 3,52$ i intenzitetom turbulencije $I_v(z) = 29,5\%$.

Za određivanje profila vjetra na lokaciji mosta u Aechenu je izrađen zračni tunel u kojem je oblikovan reljef u okolici mosta (2,5 x 6,0 km) u mjerilu 1:1000 te je mjereno djelovanje vjetra okomito na most ovisno o topografiji terena. Pri simuliranju djelovanja vjetra duž doline (6,0 km) nije mjereno ubrzanje vjetra.

5 Usporedba podataka o režimu vjetra iskorištenih za tunelsko ispitivanje i izmjerenih podataka na mostu

Provedena profilna mjerenja na Dubrovačkom mostu pokazala su neke nove spoznaje o režimu strujanja na promatranoj lokaciji, te isto tako i na određene različitosti u odnosu na pojedine parametre koji definiraju dinamičko djelovanje vjetra na konstrukciju. To se ponajprije odnosi na vrijednosti intenziteta turbulencije I_V i faktora mahovitosti F_M (tablica 2.) te na eksponencijalni koeficijent α koji definira profil vjetra po visini (slika 5.) i na vrijednosti zapisa brzina vjetra na pojedinim točkama (slike 3. do 6.).

Sve ove veličine nedvojbeno pokazuju da je turbulentna komponenta vjetra bolje iskazana s vjetrom koji ima manji interval osrednjavanja, tj. sekundnim vrijednostima brzine vjetra.

Ovo je posebno razvidno kod vrijednosti intenziteta turbulencije I_V i eksponencijalnog koeficijenta α čije usvojene vrijednosti pri tunelskom simuliranju djelovanja vjetra upravo odgovaraju izmjerenim vrijednostima u području sekundnih vrijednosti brzina vjetra, dok su nji-

hove izmjerene vrijednosti za desetnutne brzine vjetra znatno manje (tablica 2. i slika 5.).

Također treba kazati da za visoke i vitke objekte referentne desetminutne brzine vjetra koje preporučuje Eurokod nisu mjerodavne za opisivanje turbulentnih karakteristika bure.

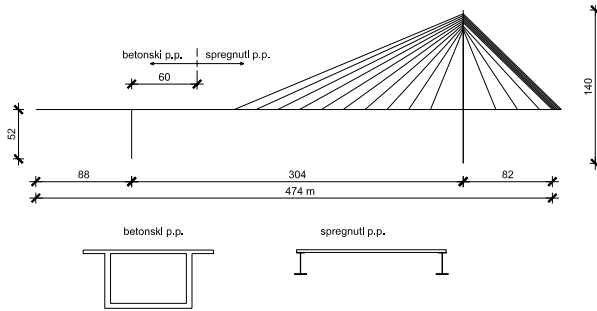
6 Analiza stupnja pouzdanosti Dubrovačkog mosta ovisno o različitim podacima za djelovanje vjetra

Slijedom navedenih različitosti u usporedbi ulaznih podataka prema tunelskom ispitivanju djelovanja vjetra i istraživanjima koja su provedena na samom mostu, ovdje ćemo analizirati odgovarajuće stupnjeve pouzdanosti, kako bi se upozorilo na potrebu što adekvatnijeg definiranja strujnog režima bure na pojedinim lokacijama, posebno kada je u pitanju izgradnja mostova. Simulirat će se interaktivno djelovanje konstrukcije mosta na pobudu turbulentnog djelovanja vjetra za pojedine slučajeve opterećenja vjetra, i to za različite podatke o brzinama vjetra, kako slijedi:

1. $\bar{V}_{1ref} = 23.4 \text{ m/s}$ - najveća srednja satna brzina vjetra koja je izmjerena na meteorološkoj stanici u Dubrovniku na visini od 10.0 m (2,5 km od lokacije mosta)
2. $\bar{V}_{2ref} = 57.6 \text{ m/s}$ - najveća srednja desetominutna brzina vjetra koja je iskorištena za kvazistatičko opterećenje rasponske konstrukcije mosta pri simuliranju djelovanja vjetra na most u tunelu
3. $\bar{V}_{3ref} = 8.3 \text{ m/s}$ najveća srednja satna brzina vjetra koja je izmjerena na meteorološkoj stanici u Dubrovniku u vremenu kada je izmjerena najveća sekundna brzina vjetra na lokaciji mosta na visini od 10,0 m.
4. $\bar{V}_{4ref} = 21.3 \text{ m/s}$ (C.O.V. = 0,28) - srednja sekundna brzina vjetra (najveći udar $V = 49,1$ m/s) izmjerena na rasponskoj konstrukciji mosta
5. $\bar{V}_{5ref} = 52.1 \text{ m/s}$ (C.O.V. = 0,28) - aproksimirana srednja sekundna brzina vjetra kao očekivana vrijednost na mostu za slučaj jake bure koja korespondira vrijednosti $\bar{V}_{1ref} = 23.4 \text{ m/s}$ povećanoj za odnos srednje satne brzine vjetra na stanici u Dubrovniku ($\bar{V}_{3ref} = 8.3 \text{ m/s}$) i istodobno izmjerene srednje satne brzine vjetra na mostu ($\bar{V}_{ref} = 18.2 \text{ m/s}$).

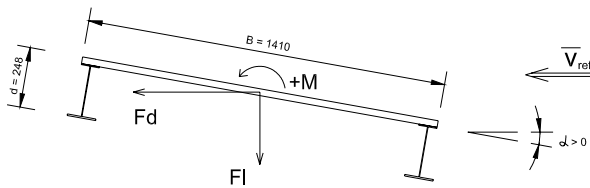
6.1. Geometrijske karakteristike mosta

Na slici 7. prikazani su osnovni geometrijski podaci o mostu te poprečni presjeci.



Slika 7. Geometrijski podaci i shematski prikaz presjeka mosta

Proračun rasponske konstrukcije mosta izvršen je za aerodinamičke sile i koeficijente prema slici 8., kako je računano i kod tunelskog ispitivanja.



Slika 8. Definicija globalnoga koordinatnog sustava i kuta toka

$$F_d = C_d \cdot \frac{\rho}{2} \bar{V}_{ref}^2 \cdot d \quad (7)$$

$$F_l = C_l \cdot \frac{\rho}{2} \bar{V}_{ref}^2 \cdot d \quad (8)$$

$$M = C_m \cdot \frac{\rho}{2} \bar{V}_{ref}^2 \cdot d \cdot B \quad (9)$$

gdje je:

- F_d - vučna sila (N/m)
- F_l - odižuća sila (N/m)
- M - moment (Nm/m)
- C_d - koeficijent vučne sile
- C_l - koeficijent odižuće sile
- C_m - koeficijent momenta,
- ρ - gustoća zraka (kg/m^3)
- d - visina nosača
- \bar{V}_{ref} - brzina vjetra na visini vozne površine (brzina udara)

Za proračun interakcijskog djelovanja vjetra i konstrukcije mosta te za određivanje indeksa pouzdanosti β za pojedine slučajeve djelovanja vjetra, upotrijebljen je programski paket STRUREL [9].

6.2 Odgovor konstrukcije na stohastičko opterećenje vjetrom

Optimalni proračun konstrukcija opterećenih djelovanjem turbulentnog vjetra uključuje teoriju stohastičkih vibracija.

Za provedbu ovih analiza potrebno je utvrditi statističke karakteristike odgovora konstrukcije (pomaci, rezne sile, naprezanje,...) te statističke karakteristike djelovanja vjetra.

U inženjerskoj se analizi smatra da su statističke karakteristike potpuno određene i za odgovor konstrukcije i za pobudu ako su srednje vrijednosti, standardne devijacije i gustoća spektra poznati.

Za proračun konstrukcija u programu NASCOM uporaobljena je modalna analiza.

Vlastite vrijednosti određene su iz izraza:

$$[K - \omega^2 M] \{\phi\} = 0 \quad (10)$$

gdje je $[K]$ matrica krutosti, a $[M]$ matrica masa.

Vrijednosti ω^2 su vlastite vrijednosti, a vrijednosti ω su vlastite frekvencije u rad/s. Vlastite su vrijednosti određene iteracijom po potprostorima [9].

Vlastiti vektori $\{\phi\}$ su obično normalizirani tako da je:

$$[\Phi]^T [M] [\Phi] = [I] \quad (11)$$

gdje je $[I]$ jedinična matrica. Korisnik može odabrati normalizaciju takvu da je maksimalna vrijednost svakog vlastitog vektora jednaka jedinici.

Za utvrđivanje indeksa pouzdanosti β upotrijebljena je metoda FORM (*First-Order Reliability*) u postupku kalibracije. Ovom metodom aproksimira se granično stanje nosivosti sustava $G(X) = 0$, gdje je $X = (X_1, \dots, X_n)$ vektor osnovnih varijabli, uz odgovarajuću funkciju razdiobe $F(X)$.

Prvobitni slučajni vektor X transformira se u nezavisni standardni vektor U , tj. slijedi $X = T(U)$. Najvjerojatnija točka otkazivanja locira se u standardnom U prostoru (nulta prosječna, jedinična standardna devijacija) koristeći se odgovarajućim algoritmom pretraživanja. Linearizacija funkcije graničnog stanja u najvjerojatnijoj točki loma tada daje procjenu vjerojatnosti:

$$p = P[G(X) \leq 0] = P[G(T(U)) \leq 0] = P[H(U) \leq 0] \cong \Phi(-\beta) \quad (12)$$

gdje je $\Phi(\cdot)$ standardna normalna razdioba, a β indeks pouzdanosti.

6.3 Rezultati proračuna

Proračun stupnja pouzdanosti dubrovačkoga ovješeno g čeličnog mosta proveden je prema upravo prikazanoj probabilističkoj metodi FORM, gdje su u jednadžbi graničnog stanja vrijednosti otpornosti konstrukcije i djelovanje vjetra na konstrukciju izraženi kao slučajne varijable (tablica 3.).

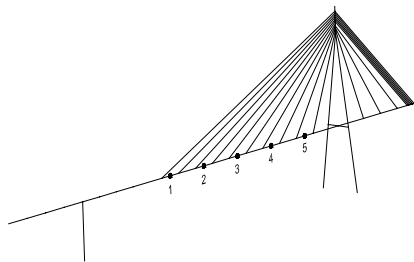
Tablica 3. Bazne varijable i determinirani parametri

BAZNE VARIJABLE [X]				
Varijable	Srednja vrijednost	C.O.V.	Razdioba	Značenje bazne varijable
X ₁	240 N/mm ²	0,1	Weibullova	Granica popuštanja
X ₂	0,82 m ²	0,05	Normalna	Površina popr. presjeka
X ₃	0,28 m ³	0,05	Normalna	Moment otpora
X _{4,1}	342 N/m ²	0,145	Gumbelova	Opt. vjetrom $\bar{V}_{1,ref}$
X _{4,2}	2074 N/m ²	0,0	Gumbelova	Opt. vjetrom $\bar{V}_{2,ref}$
X _{4,3}	48,4 N/m ²	0,145	Gumbelova	Opt. vjetrom $\bar{V}_{3,ref}$
X _{4,4}	284 N/m ²	0,28	Gumbelova	Opt. vjetrom $\bar{V}_{4,ref}$
X _{4,5}	1697 N/m ²	0,28	Gumbelova	Opt. vjetrom $\bar{V}_{5,ref}$
DETERMINIRANI PARAMETRI [K]				
K ₁ = L K ₂ = E	Raspon elemenata Modul elastičnosti		K ₃ = r K ₄ = a _t	Gustoća Koef. temp. ekspanzije
Modalna analiza				
Broj moda		Frekvencija (Hz)		Period (s)
1		0,3		3,3
2		0,5		2,1
3		0,7		1,5
4		0,8		1,2
5		1,0		1,0

Za pojednostavljeni štapni model u tablici 4. (slika 9.) dane su vrijednosti indeksa pouzdanosti β za 5 karakterističnih presjeka rasponske konstrukcije mosta ovisno o pojedinim slučajevima djelovanja vjetra na prazan most (bez djelovanja opterećenja vozila).

Tablica 4. Prikaz indeksa pouzdanosti β za karakteristične točke na rasponskoj konstrukciji mosta za analizirane slučajeve opterećenja

Točka na konstrukciji	$\bar{V}_{1,ref}$	$\bar{V}_{2,ref}$	$\bar{V}_{3,ref}$	$\bar{V}_{4,ref}$	$\bar{V}_{5,ref}$
R.b.	β	β	β	β	β
1	7,32	6,47	7,51	7,12	5,38
2	7,62	4,75	9,32	7,50	4,21
3	7,21	4,36	8,55	7,14	3,84
4	6,97	4,68	7,76	7,01	4,30
5	6,80	4,81	7,37	6,86	4,52



Slika 9. 3D model mosta s karakterističnim točkama

7 Zaključak

Analizirani su rezultati jednosjekundnih profilnih mjerenja bure poznate po svojim dinamičkim karakteristikama i lokalnoj mahovitosti.

Rezultati su uspoređeni s ulaznim podacima koji su iskoristeni pri simuliranju djelovanja vjetra u tunelu za istu lokaciju.

Analiza je pokazala da djelovanje vjetra tipa bure nije moguće adekvatno simulirati u tunnelskim ispitivanjima, već da su potrebna profilna mjerenja na stvarnim lokacijama objekata i to posebno kod mostova.

Ove konstatacije potvrdio je i proračun indeksa pouzdanosti β (stohastička analiza interaktivnog djelovanja vjetra i konstrukcije) koji se razlikuje za pojedine referentne brzine vjetra - usporedive su vrijednosti za $\bar{V}_{2,ref}$ i $\bar{V}_{5,ref}$.

Također se može zaključiti da za visoke i vitke objekte (mostovi, dimnjaci, dalekovodni stupovi, itd.) referentne desetominutne brzine vjetra koje preporučuje Eurokod nisu relevantne za opisivanje turbulentnih karakteristika bure, već su potrebna sekundna profilna mjerenja na lokaciji objekta.

Ova istraživanja čine meteorološke podloge za izradu Hrvatskih propisa za dinamičko djelovanje vjetra na konstrukcije.

LITERATURA

- Zagrebu, Zagreb, 1994.
- [1] Ivančan – Picek, B.; Vučetić, V.: *Bora on the Northern Adriatic Coast During ALPEX SOP 20-25*, Croatian Meteorological Journal, Vol. 25 (1982.), 1-12
 - [2] Smith, B.: *Aerial Observations of the Croatian Bora*, Collection Meteorological and Hydrologic Works, Vol. 10 (1984.), 127-129
 - [3] Shinozuka, M.; Spanos, P.: *Applied Probabilistic Structural Dynamics*, Lecture Notes - ZACE Services Ltd - I. C. E. Division, Lausanne, 1987.
 - [4] Bajić, A.: *Severe Bora on the Northern Adriatic*", Statistical analysis (Papers) 24, vol I (1989.)
 - [5] Petkovšek, Z.: *Upper Boundary of the Bora as Stationary Frontal Surface*, - Meteorological and Atmospheric Physics, vol. 43 (1990.), 197-202
 - [6] Li, Y.; Kareem, A.: *ARMA Systems in Wind Engineering*", Probabilistic Engineering Mechanics, vol. 5 (1990.), br. 2, 50-59
 - [7] Peroš, B.: *Modelling of the Bora effects upon the lower layer*, International Journal for Engineering Modelling, vol.7 (1994.), br. 3-4, 81-95
 - [8] Peroš, B.: *Sigurnost konstrukcija dominantno opterećenih vjetrom*, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1994.
 - [9] STRUREL manual: *A structural Reliability Analysis Program - system*, 1995.
 - [10] Shettini, E.; Solari, G.: *Probability distribution and statistical moments of the maximum ind velocity*, Wind and structures, vol. 1 (1998.)
 - [11] Peroš, B.: *Constructional steel Design for Structures with a Dominant Wind Bora load*, Journal of Constructional steel Resarch (Special Issue Second World Conference on steel in Construction), vol.46 (1998.), br. 1-3 (paper Number 146)
 - [12] Sedlacek, G. i drugi: *Aerodynamic and Aeroelastic analysis of the new Cable stayed Bridge Dubrovnik*, vol 1-2 (1998.), RWTH Aachen
 - [13] Bajić, A.; Glasnović, D.: *Impact of severe Adriatic Bora on traffic*, 4th European Conference on Applied Meteorology Norrkoping - Sweden, 1999.
 - [14] Milčić, V.; Peroš, B.: *Uvod u teoriju sigurnosti nosivih konstrukcija*, Građevinsko- arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2002.

Napomena:

Ova istraživanja se provode u okviru znanstvenog projekta "Sigurnost konstrukcija u slučaju djelovanja vjetra" (0083151) kojeg financira Ministarstvo znanosti obrazovanja i športa.