

# Analiza vibracija kosih vješaljki na Mostu Franja Tuđmana u Dubrovniku

Gordana Hrelja, Jure Radić, Zlatko Šavor

## Ključne riječi

Most Franja Tuđmana, ovješeni most, kose vješaljke, vibracije, ispitivanja, zračni tunel

## Key words

Franjo Tuđman Bridge, cable stayed bridge, stay cables, vibrations, testing, wind tunnel

## Mots clés

Pont de Franjo Tuđman, pont haubané, étriers, vibrations, essai, tunnel aérodynamique

## Ключевые слова

Мост Франьо Туђмана, вантовый мост, затягивающие элементы, вибрации, исследования, аэродинамическая труба

## Schlüsselworte

Franjo Tuđman Brücke, Schrägseilbrücke, Schrägseile, Schwingungen, Untersuchungen, Windtunnel

G. Hrelja, J. Radić, Z. Šavor

Izvorni znanstveni rad

## Analiza vibracija kosih vješaljki na Mostu Franja Tuđmana u Dubrovniku

Na postojećim ovješanim mostovima najčešće su uočene vibracije kosih vješaljki uzrokovane istovremenim djelovanjem kiše i vjetra. Vibracije kosih vješaljki mogu se procijeniti usporedbom s ovješanim mostovima u sličnim uvjetima i analitičkim postupcima, a najtočnije procjene dobivaju se ispitivanjima u zračnom tunelu. Pojava tih vibracija može se spriječiti aerodinamičkim, konstrukcijskim i mehaničkim mjerama. U radu je prikazana teorijska podloga i analiza vibracija kosih vješaljki na Mostu Franja Tuđmana u Dubrovniku.

G. Hrelja, J. Radić, Z. Šavor

Original scientific paper

## Analysis of stay-cable vibrations at the Franjo Tuđman Bridge in Dubrovnik

Stay cable vibrations occurring on existing cable stayed bridges are most often due to simultaneous rain and wind action. Although stay cable vibrations can be estimated by comparison to cable stayed-bridges under similar conditions and by analytical procedures, most accurate estimates can be obtained by wind tunnel testing. Stay cable vibrations can be prevented by aerodynamic, structural and mechanical measures. The theoretical base and the analysis of stay cable vibrations on the Franjo Tuđman Bridge in Dubrovnik are presented in the paper.

G. Hrelja, J. Radić, Z. Šavor

Ouvrage scientifique original

## Analyse des vibrations des étriers sur le Pont de Franjo Tuđman à Dubrovnik

Les vibrations qui se produisent sur les ponts existants sont le plus souvent dues à l'action de la pluie et du vent. Bien que les vibrations des étriers peuvent être estimées en comparant les ponts haubanés présentant les conditions similaires, et où les procédés analytiques comparables sont utilisés, les estimations les plus fideles peuvent être faites par les essais dans les tunnels aérodynamiques. Les vibrations des étriers peuvent être diminuées par application des mesures aérodynamiques, structurelles et mécaniques. Les bases théoriques et l'analyse des vibrations sur le pont de Franjo Tuđman à Dubrovnik sont présentées dans l'ouvrage.

Г. Хреля, И. Радич, З. Шавор

Оригинальная научная работа

## Анализ вибрации затягивающих элементов на Мосту Франьо Туђмана в Дубровнике

На существующих мостах чаще всего возникают вибрации, вызванные одновременным воздействием дождя и ветра. Вибрации затягивающих элементов могут быть оценены при сравнении с вантовыми мостами при аналогичных условиях путем аналитических методов. Более точные оценки возможно получить при исследованиях в аэродинамической трубе. Явление вибрации затягивающих элементов можно предотвратить, применяя аэродинамические, конструкционные и механические методы. В работе показаны теоретические основы и анализ вибраций на Мосту Франьо Туђмана в Дубровнике.

G. Hrelja, J. Radić, Z. Šavor

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Analyse der der SchrägseilSchwingungen an der Franjo Tuđman Brücke in Dubrovnik

An bestehenden Schrägseilbrücken sind meistens Schwingungen beobachtet, verursacht durch gleichzeitigen Einfluss von Regen und Wind. Schwingungen der Schrägseile kann man abschätzen durch Vergleich mit Schrägseilbrücken in ähnlichen Umständen und durch analytische Verfahren, doch genaueste Schätzungen gewinnt man durch Untersuchungen im Windtunnel. Den Auftritt von SchrägseilSchwingungen kann man verhindern durch aerodynamische, konstruktive und mechanische Massnahmen. Im Artikel sind die theoretische Unterlage und die Analyse der Schwingungen der Franjo Tuđman Brücke in Dubrovnik dargestellt.

Autori: **Gordana Hrelja**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Jure Radić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Zlatko Šavor**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

## 1 Uvod

Vibracije kosih vješaljki česta su pojava na ovješanim mostovima. Prvi su put uočene na mostu Brotonne u Francuskoj 1977., ali nije definiran uzrok vibracija. Istodobno djelovanje kiše i vjetra kao uzrok vibracija kosih vješaljki prvi su put opisali Hikami i Shiraishi u radu [1] iz 1988. godine. Na većini mostova na kojima nisu poduzete neke od mjera za sprječavanje, uočene su vibracije kosih vješaljki. Među njima su mostovi Ben Ahin i Wandre u Belgiji, mostovi Farø i Øresund u Danskoj, most Glebe Island u Australiji, most Second Severn u Velikoj Britaniji, most Erasmus u Rotterdamu te još mnogi drugi mostovi diljem svijeta. Vibracije kosih vješaljki dogodile su se i na dubrovačkom mostu Franja Tuđmana. U nastavku je dana teorijska podloga za analizu vibracija kosih vješaljki, analizirani su uzroci vibracija te su uspoređene karakteristike kosih vješaljki prije i poslije ugradnje prigušivača.

## 2 Vibracije kosih vješaljki

### 2.1 Osnovni parametri vibracija kosih vješaljki

Ključni je parametar koji opisuje strujanje tekućine pod tlakom oko nekog tijela uronjenog u tu tekućinu Reynoldsov broj.

Za stacionarno strujanje nestišljive tekućine bez viskoznih učinaka vrijedi *Bernoullijeva jednadžba*:

$$p_0 + 0,5\rho V_0^2 = p + 0,5\rho V^2 = konst \quad (1)$$

gdje je:

- $\rho$  - specifična masa tekućine
- $V_0$  - brzina strujanja daleko u privjetrini
- $p_0$  - atmosferski tlak
- $0,5\rho V_0^2$  - dinamički tlak

Na mjestu gdje strujnica susreće uzvodni dio nepomičnog tijela brzina je  $V = 0$ , a tlak na tijelo tzv. tlak mirovanja iznosi  $p = p_0 + 0,5\rho V_0^2$ .

U proizvoljnoj točki strujnice gdje je  $V > V_0$  ( $V < V_0$ ), tlak  $p - p_0$  je negativan (pozitivan), tako da je tlak manji (veći) od atmosferskog tlaka.

U realnim strujanjima osim tlakova postoje i *posmična naprezanja*.

Kada se brzina strujanja mijenja u smjeru  $z$  okomito na strujnicu, posmično naprezanje iznosi:

$$\tau = \mu \frac{dV}{dz} \quad (2)$$

$\mu$  - viskoznost tekućina

Viskoznost uzrokuje sljubljanje tekućine na granicama gdje brzina tekućine nestaje.

Prema Bernoullijevoj jednadžbi tlak  $p - p_0 = 0,5\rho V^2$  stvara u volumenu tekućine linearne dimenzije  $L$  inercijalne sile  $\rho V^2 L^2$ .

Viskozna naprezanja su  $\mu V/L$  i stvaraju viskozne sile (sile trenja)  $(\mu V/L)L^2 = \mu VL$ .

Odnos između inercijalnih sila i viskoznih sila za volumen tekućine je bezdimenzijski i naziva se *Reynoldsov broj* strujanja i iznosi:

$$R_e = \frac{\rho V^2 L^2}{\mu VL} = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (3)$$

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$  - kinematska viskoznost tekućina

Za kose vješaljke promjera  $D$  Reynoldsov broj ima oblik:

$$R_e = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (4)$$

gdje je:

- $\rho$  - gustoća zraka ( $\text{kg/m}^3$ )
- $V$  - brzina vjetra (m/s)
- $D$  - promjer kose vješaljke (m)
- $\mu$  - viskoznost zraka ( $\text{kg/(m)(s)}$ )

Sljedeći parametar koji je ovisan o Reynoldsovu broju i karakterizira vrtložno strujanje je Strouhalov broj  $S_t$ , određen izrazom:

$$S_t = \frac{N_s D}{V} \quad (5)$$

gdje je:

- $N_s$  - frekvencija uzbude vrtloženja

Za analiziranje vibracija kosih vješaljki još jedan važan parametar je Scrutonov broj  $S_c$ , definiran jednadžbom (6).

$$S_c = \frac{m\zeta}{\rho D^2} \quad (6)$$

gdje je:

- $m$  - masa kose vješaljke po jedinici duljine ( $\text{kg/m}$ )

$\zeta$  - koeficijent prigušenja  $\zeta = \frac{\delta}{2\pi}$ ,

$\delta$  - logaritamski dekrement prigušenja

Iz ovog izraza vidimo da proporcionalno s masom i prigušenjem raste i Scrutonov broj. Većina vrsti vibracija na kosim vješalkama može se smanjiti povećanjem Scrutonova broja.

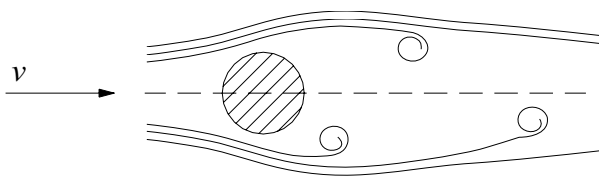
## 2.2 Vibracije kosih vješaljki

Postoji niz različitih uzroka koji mogu prouzrokovati vibracije kosih vješaljki, pa je stoga potrebna pažljiva i pomna analiza. S obzirom na uzrok nastajanja, vibracije kosih vješaljki prema [2] mogu se podijeliti na:

- vibracije izazvane vrtloženjem
- vibracije uzrokovane vrtlozima na zavjetrenoj strani drugog elementa mosta ili druge kose vješaljke
- mahovitost
- galopiranje kosih vješaljki
- vibracije nastale parametarskom uzbudom
- vibracije uzrokovane djelovanjem kiše i vjetra

### 2.2.1 Vibracije uzrokovane vrtloženjem

Vibracije uzrokovane vrtloženjem nastaju kao posljedica odvajanja vrtloga s gornje i donje strane kose vješaljke pri djelovanju vjetra okomito na smjer pružanja kose vješaljke (slika 1.).



Slika 1. Odvajanje vrtloga oko kružnog presjeka kose vješaljke

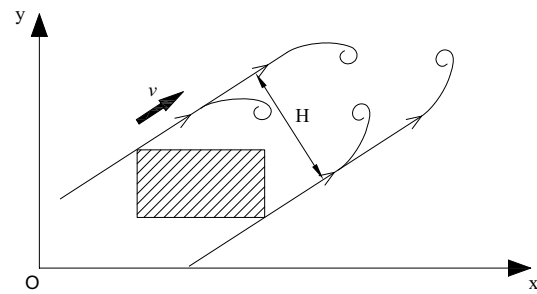
Brzina vjetra pri kojoj se frekvencija odvajanja vrtloga podudara sa frekvencijom kose vješaljke  $N_r$  prikazana je u izrazu (7) preko Strouhal-ovog broja.

$$V = \frac{N_r D}{S_t} \quad (7)$$

Amplituda oscilacija obrnuto je proporcionalna sa Scrutonovim brojem  $S_c$ . Slijedi da se povećanjem mase i/ili prigušenja kose vješaljke vibracije uzrokovane vrtloženjem smanjuju.

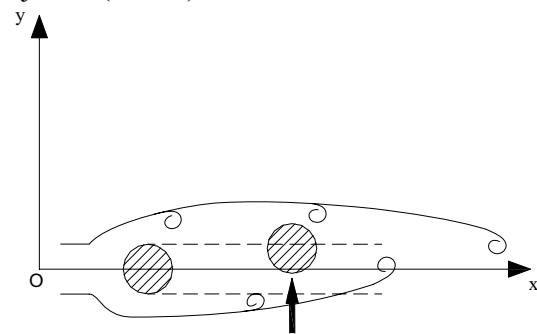
### 2.2.2 Vibracije uzrokovane vrtlozima na zavjetrenoj strani drugog elementa mosta

Kosa vješaljka ovješena na mostu može započeti titranje, ako se nalazi u zavjetrenoj strani elementa mosta na koji djeluje vjetar. Primjer su mostovi sa dvije ravnine kosih vješaljki izloženi djelovanju vjetra pod određenim kutom na pružanje mosta, najčešće su to mostovi s vertikalnim ili "H" pilonima. Djelovanje vjetra na pilon (uzvodno) uzrokuje vrtloženje na donjoj strani, što pak može uzrokovati vibracije kosih vješaljki u drugoj ravnini (nizvodno) (slika 2.).



Slika 2. Djelovanje vjetra na nogu pilona i stvaranje vrtloga

Na sličan način može doći do uzbude vješaljki koje su sidrene u paru ili kada su vješaljke paralelne i na maloj udaljenosti (slika 3.).



Slika 3. Djelovanje vjetra na kosu vješaljku i stvaranje vrtloga koji uzbuđuju kosu vješaljku na zavjetrenoj strani

Kritična brzina može se definirati kao

$$U_{crit} = cfD\sqrt{S_c} \quad (8)$$

gdje je:

$c$  - konstanta ovisna o međusobnoj udaljenosti kosih vješaljki

$f$  - vlastita frekvencija kose vješaljke

Za kružne je presjeka srednja vrijednost za  $c$  40, a kod ovješanih mostova, ovisno o udaljenosti kosih vješaljki iznosi: 25 za vješaljke postavljene na manjoj udaljenosti ( $2D - 6D$ ) i 80 za vješaljke postavljene na međusobnoj udaljenosti većoj od  $10D$ .

Ova kritična brzina može biti dovoljno mala da se pojave takve vibracije, osobito kod manjih udaljenosti vješaljki.

Za smanjivanje ovih vibracija može se povećati Scrutonov broj ili frekvencija kose vješaljke. Povećanje Scrutonova broja manje je učinkovito jer je pod korijenom, tako da povećanje prigušenja ne daje bitno povećanje kritične brzine. Puno učinkovitije je povećanje vlastite frekvencije kose vješaljke koje se može postići povezivanjem vješaljki u snopove kod manjih razmaka ili ugradnjom poprečnih zatega kod većih razmaka.

### 2.2.3 Mahovitost

Mahovitost nastaje kod velikih brzina vjetra i povećava se s brzinom vjetra. Ove vibracije nisu tako opasne kao

vibracije s velikim amplitudama pri malim brzinama vjetra. Smanjenju ovih vibracija pridonosi veća sila prednapinjanja za stalno opterećenje.

Treba napomenuti da mahovitost može uzrokovati aerodinamičku nestabilnost na mostovima sa dvije paralelne ravnine kosih vješaljki [3]. Udar vjetra brzine  $V$  koji dolazi na jednu ravninu vješaljki doći će do druge ravnine vješaljki za  $B/V$ , gdje je  $B$  udaljenost dviju ravnina vješaljki. Nestabilnost se može dogoditi ako vremenski pomak odgovara polovini ciklusa torzijskih pomaka sa periodom  $T_t$ . Kritična brzina dana je izrazom:

$$V_c = \frac{2B}{T_t} \quad (9)$$

#### 2.2.4 Galopiranje kosih vješaljki

Galopiranje je aeroelastična oscilacija s velikim amplitudama u ravnini okomitoj na smjer brzine strujanja kod mnogo manjih frekvencija od frekvencija vrtloženja za jednaki poprečni presjek.

Brzine strujanja obično su zamjetno veće od brzina koje uzrokuju vrtloženje.

Osnova fenomena galopiranja jest činjenica da se napadni kut relativne brzine strujanja mijenja u odnosu na tijelo, zbog nastalog gibanja tijela od njegova položaja ravnoteže.

Ta promijenjena relativna brzina stvara u tijelima nekih oblika asimetrične raspodjele tlaka koja povećava nastala gibanja, a ne smanjuje ih, kao što bi to bio slučaj kod tijela aerodinamički stabilnih oblika.

Istraživanja u zračnom tunelu [4] pokazala su da se kod suhe kose vješaljke bez naslaga snijega ili leda galopiranje neće pojaviti ako je osigurano i vrlo malo prigušenje kose vješaljke od  $\zeta > 0,003$ , što daje vrijednost Scrutonova broja oko 3. Sukladno se može zaključiti da se galopiranje neće pojaviti ako je prigušenje dovoljno da zadovolji kriterije za Scruton-ov broj za izbjegavanje vibracija od djelovanja kiše i vjetra.

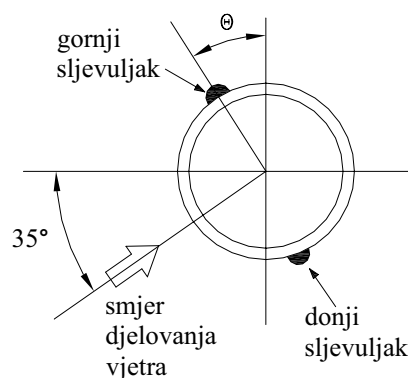
Jedan od čestih uzroka pojave galopiranja jest gubitak aerodinamičke stabilnosti uzrokovane promjenom poprečnog presjeka kose vješaljke formiranjem tzv. ledenih ili snježnih grebena na privjetrenoj strani vješaljke. Ovaj je fenomen poznat kod kabela dalekovoda, a može se pojaviti i na kosim vješaljka ovješnih mostova.

#### 2.2.5 Vibracije nastale parametarskom uzbudom

Vibracije kosih vješaljki mogu biti uzrokovane pomacima ili vibracijama sidara vješaljki na gredi ili pilonu [2]. Najopasnija situacija za parametarsku uzbudu u uzdužnom smjeru nastaje kada ja frekvencija uzbude (grede ili pilona) dva puta veća od vlastite frekvencije vješaljke [5].

#### 2.2.6 Vibracije kosih vješaljki uzrokovane istodobnim djelovanjem kiše i vjetra

Najčešće vibracije kosih vješaljki na ovješnim mostovima nastaju zbog istodobnog djelovanja kiše i vjetra. Ni jačina kiše ni brzina vjetra nisu presudni za pojavu vibracija koje se često pojavljuju kod slabe kiše i slabog do umjerenog vjetra. Uzrok je ovih vibracija pojava "sljevuljaka" na gornjem i donjem dijelu zaštitne cijevi koji promjenom položaja uzrokuje aerodinamičku nestabilnost kose vješaljke (slika 4.).



Slika 4. Sljevuljci na cijevi kose vješaljke

U svjetskoj literaturi navedeno je više kriterija odnosno preporuka za smanjenje ili uklanjanje mogućnosti pojave vibracija kosih vješaljki uzrokovanih djelovanjem kiše i vjetra.

Prema preporuci FIP-a [6] logaritamski dekrement prigušenja  $\delta$  trebao bi biti oko 3-4 % da bi se izbjegle vibracije kosih vješaljki uzrokovane djelovanjem kiše i vjetra.

Jedan je od opće prihvaćenih kriterija Scrutonov broj [4]. Za izbjegavanje pojave vibracija potrebno je da Scrutonov broj bude veći od 10.

Ovaj kriterij definiran je u preporukama PTI-a za kose vješaljke [7].

Kod ovog kriterija ne uzimaju se u obzir svi parametri koji utječu na pojavu vibracija, kao što su duljina kose vješaljke i sila u vješaljci, ali ni povećanje prigušenja obradom površine zaštitne cijevi kose vješaljke.

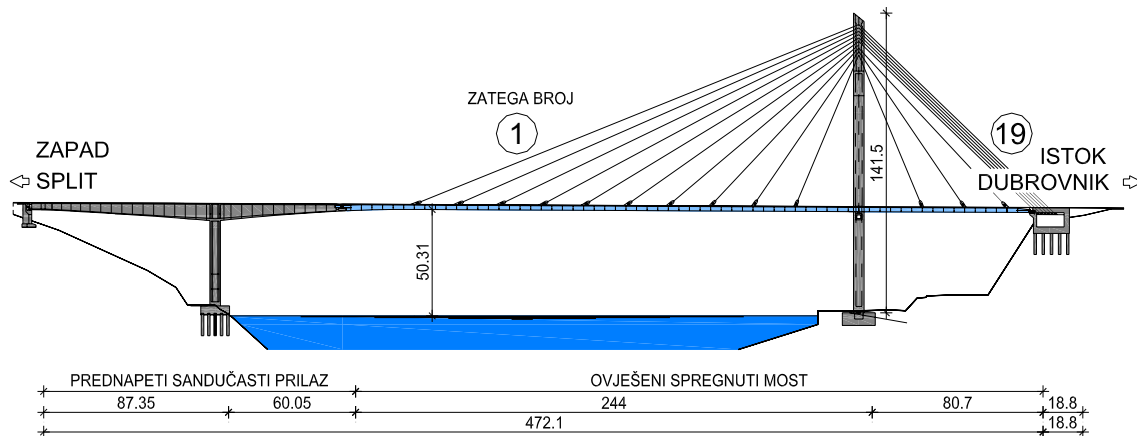
Modificirani pristup preko Scrutonova broja, koji uzima u obzir obradu površine zaštitne cijevi, daje preporuku da Scrutonov broj  $S_c$  treba biti veći od 5.

Ispitivanja u zračnom tunelu pokazala su znatan doprinos površinske obrade cijevi kosih vješaljki na otpornost prema vibracijama. Utjecaj površinske obrade cijevi, kao što je spirala ili udubljenja na cijevima, uzima se u obzir s povećanjem prigušenja.

### 3 Prethodne analize i ispitivanja u vjetrenom tunelu provedena za Most Franja Tuđmana

Uzdružni presjek s rasporedom kosih vješaľki prikazan je na slici 5., a osnovne karakteristike prvih šest vješaľki prikazane su u tablici 1. Na mostu su ugrađene kose vješaľke proizvođača Dywidag, sastoje se od različitog broja strukova (27 - 61, ovisno o položaju na mostu). Strukovi vješaľki zaštićeni su polietilenskim cijevima velike gustoće različitog promjera.

*flutter*) bila 61,0 m/s. Obje brzine dobivene su numeričkim proračunom cijelog mosta s usvojenim vrlo malim logaritamskim dekrementom prigušenja od  $\delta = 0,01$ . Tako proračunane kritične brzine veće su od maksimalnih mogućih 10-minutnih srednjih brzina vjetera na lokaciji mosta  $u_{\max,10\min} = 51,5$  m/s, tako da se spomenute vibracije nisu činile mogućima. Rezultati ispitivanja pokazali su vjerojatnost pojave vibracija grede uzrokovanih vrtloženjem, ali s malim amplitudama koje nisu opasne za most. U analizama su razmatrane i vibracije kosih vješaľki



Slika 5. Uzdužni presjek mosta s oznakama kosih vješaľki od 1 do 19

Tablica 1. Osnovni podaci za šest najduljih kosih vješaľki

Vješ. br.	L m	Kut °	D m	Masa kg/m	Sila pred. u vješaľki kN
1	226,7	22,11	0,225	87,81	7195
2	207,7	23,80	0,225	87,81	5501
3	188,9	25,83	0,225	70,91	4400
4	170,5	28,31	0,225	70,91	3983
5	152,4	31,38	0,225	70,91	3723
6	134,8	35,27	0,225	56,61	3407

Ispitivanja u vjetrenom tunelu provedena su u RWTH Aachen, prema podacima o karakteristikama vjetera na lokaciji mosta. Na osnovi rezultata ispitivanja, provedene su aerodinamička i aeroelastična analiza [8]. Analize provedene za gredu pokazale su da se savijajuće galopiranje (*bending galloping*) neće pojaviti jer je vrijednost za aerodinamičko prigušenje uvijek pozitivna.

Također je ustanovljeno da je torzijsko aerodinamičko prigušenje za male reducirane brzine pozitivno, ali s vrlo malim vrijednostima, i da s povećanjem reduciranih brzina to prigušenje postaje negativno s većim vrijednostima, pokazujući da se mogu pojaviti torzijske galopirajuće vibracije.

Proračunana kritična brzina za torzijsko galopiranje bila je 58,0 m/s, dok je kritična brzina za treperenje (engl.

koje može uzrokovati istodobno djelovanje kiše i vjetera, pa je na osnovi usporedbe s mostom Erasmus u Rotterdamu zaključeno da postoji velika vjerojatnost pojave takvih vibracija. Preporučeno je da se predvidi mogućnost naknadne ugradbe prigušivača ako se za to ukaže potreba nakon promatranja ponašanja kosih vješaľki na gotovom mostu.

Tablica 2. Vlastiti oblici mosta

Oblik br.	f	Oblik vibriranja
	Hz	
1	0,344	poprečni
2	0,360	vertikalni
3	0,451	vertikalni
4	0,588	poprečni, torzijski
5	0,646	vertikalni
6	0,811	poprečni
7	0,899	vertikalni
8	0,931	poprečni, torzijski

Iscrpane analize mosta provedene su u glavnom projektu [9], ali provedena je samo okvirna dinamička analiza mosta, pri čemu su kose vješaľke modelirane kao ravni elastični elementi s masom podijeljenom po pola na sidro na gredi i na pilonu. Na tom su modelu određeni vlastiti oblici vibriranja mosta (tablica 2.), dok su vlastiti tonovi vibriranja kosih vješaľki (tablica 3.) određeni posebnim proračunom, promatrajući kose vješaľke kao

zasebne elemente za zglobnim nepokretnim priključkom na gredu i na pilon.

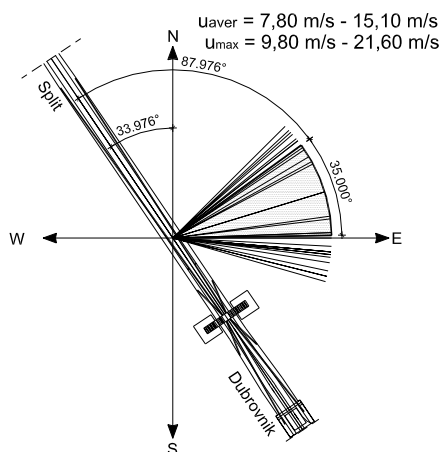
Tablica 3. Vlastiti oblici kosih vješaljki

Vješ. br.	Oblik 1	Oblik 2	Oblik 3
	f	f	f
	Hz	Hz	Hz
1	0,647	1,230	1,862
2	0,646	1,214	1,859
3	0,659	1,308	2,016
4	0,719	1,402	2,143
5	0,749	1,569	2,308
6	0,936	1,868	2,799

#### 4 Vibracije kosih vješaljki na Mostu Franja Tuđmana u Dubrovniku

Ubrzo nakon otvaranja mosta za promet zabilježene su znatne vibracije najduljih kosih vješaljki s relativno velikim amplitudama tijekom lagane kiše i vjetra. Nažalost na kosim vješaljicama nisu ugrađeni nikakvi senzori te nisu mogle biti izmjerene veličine amplituda ni frekvencije vješaljki. Vibracije kosih vješaljki bile su praćene i malim vibracijama grede, sličnim onima kad teški kamioni prelaze preko mosta.

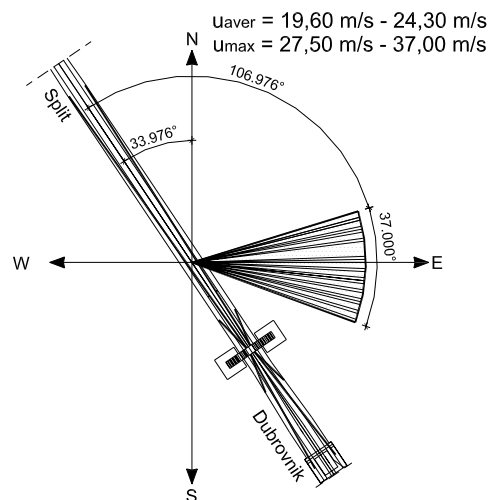
Brzine vjetra pri kojima je došlo do vibracija iznosile su 12,9 - 14,7 m/s, a smjer vjetra bio je sjeveroistočni, praćen laganom kišom. Vibracije su trajale oko 20 minuta, a tijekom jedne godine dana primjećeno je 12-ak takvih događaja. 10-minutna prosječna i maksimalna brzina vjetra, kao i smjer vjetra pri pojavi vibracija kosih vješaljki zbog djelovanja kiše i vjetra, prikazani su na slici 6.



Slika 6. Prikaz smjera i brzine vjetra tijekom vibracija zbog djelovanja kiše i vjetra

Svaki put nakon pojave vibracija kosih vješaljki na mostu vizualno su pregledana sidra vješaljki, pa kako nisu uočena nikakva oštećenja nisu poduzimane nikakve mjere za sprečavanje vibracija, sve dok se u ožujku 2005. go-

dine nisu dogodili neuobičajeni vremenski uvjeti za dubrovačko područje. Noću između 6. i 7. ožujka došlo je do snježne oluje praćene jakim sjeveroistočnim vjetrom (slika 7.). Sve kose vješaljke počele su jako vibrirati praćeno neugodnom bukom uzrokovanom vibracijama strukova unutar zaštitne cijevi vješaljki, a vibracije su primijećene i na gredi.



Slika 7. Prikaz smjera i brzine vjetra za vibracija zbog snježne oluje

Vibracije grede sklopa bile su kombinirane torzijske i savijajuće.

Vibracije su trajale više od 2 sata. Iz videozapisa ustanovljeno je da su najdulje kose vješaljke vibrirale u 2. obliku s frekvencijom oko 1,27 Hz. Vibracije su uglavnom bile u vertikalnoj ravnini, što se može objasniti time što je unutarnje prigušenje u vertikalnoj ravnini dvostruko manje od onog u poprečnom smjeru [2]. Vibracije kosih vješaljki bile su tako velike da su dvije vješaljke udarale u rasvjetne stupove ispod njih i srušile ih uz znatna oštećenja na zaštitnim cijevima vješaljki (slika 8.).



Slika 8. Oštećenje zaštitne cijevi

Minimalna udaljenost između kosih vješaljki i rasvjetnih stupova bila je 85 cm, tako da se iz geometrijskih odnosa može pretpostaviti da je maksimalna amplituda

pri vibriranju vješaljki bila barem 2,5 m. Prilikom vibracija oštećena je i zaštitna cijev jedne kose vješaljke na mjestu njene dilatacije u blizini sidra na pilonu (slika 9.).



Slika 9. Oštećenje zaštitne cijevi

Prilikom vibracija popucali su i visokovrijedni prednapeti vijci M-24 na spoju čelične zaštitne cijevi i pilona (slika 10.) dok su na spoju čeličnog dijela zaštitne cijevi i grede olabavili neki vijci.



Slika 10. Popucani visokovrijedni vijci na spoju zaštitne cijevi na pilon



Slika 11. Naslage snijega - snježni grebeni

Točno godinu dana nakon opisanog događaja, u ožujku 2006. dogodila se još jedna snježna oluja. Ponovno su vibrirale gotovo sve kose vješaljke s velikim amplituda-

ma, slično kao i godinu dana prije. I ovaj su put zamijećene vibracije grede u kombiniranim savijajućim i torzijskim vibracijama. Na kosim vješaljkaama su primijećene naslage snijega na privjetrenoj strani (slika 11.).

## 5 Pregled mosta i dodatni dinamički proračun

Snježna oluja 2005. godine alarmirala je sve uključene u projekt i održavanje mosta - investitora, izvođača, projektanta i nadzornu službu, da odmah provjere stanje mosta. Prvi je pregled pokazao da su oštećenja, koja su nastala kao posljedica vibracija, lokalnog karaktera. Odlučeno je da je potrebno što prije pomno pregledati most, sukladno Priručniku za održavanje mosta za slučaj izvanrednog događaja [10]. Pregled i ispitivanje mosta pokazali su da je statički i dinamički odziv mosta [11] jednak kao i u vrijeme pokusnog opterećenja pa je most odmah otvoren za promet.

Prof. dr. sc. Damir Lazarević izradio je dodatni dinamički proračun za analizu ponašanja mosta [12]. Interakcija kosih vješaljki, grede i pilona procijenjena je s pomoću kompleksnoga numeričkog modela u kojem je težina kosih vješaljki jednoliko raspoređena po njihovoj duljini. Modalna analiza napravljena je na modelu kojemu pripada matrica krutosti za ukupno stalno opterećenje i silu prednapinjanja u kosim vješaljkaama, čime je uzet u obzir utjecaj geometrijske krutosti na ponašanje konstrukcije. Ukupno je analizirano 200 vlastitih oblika vibriranja u rasponu frekvencija od 0,63 Hz do 2,63 Hz. Vlastite frekvencije dobivene ovim proračunom uspoređene su s onima dobivenima u glavnom projektu i s onima izmjerenim na mostu. Za neke oblike usporedba je prikazana u tablici 4.

Pomnom analizom utvrđeni su sljedeći oblici:

- vlastiti oblici grede
- vlastiti oblici kosih vješaljki
- kombinirani oblici koji uključuju vibracije grede i kosih vješaljki

Tablica 4. Usporedba frekvencija

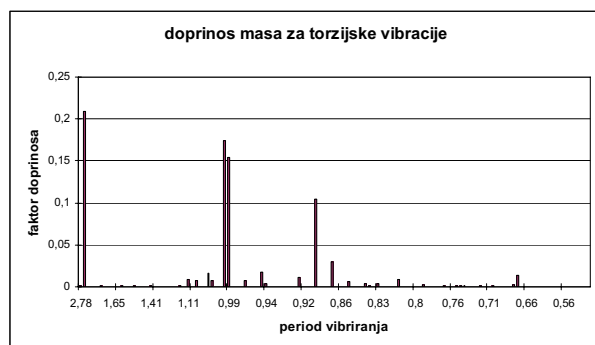
Oblik br.	Dodatni dinamički proračun	Glavni projekt	Izmjereno
	f	f	f
	Hz	Hz	Hz
2	0,401	0,366	0,465
36	0,968	0,955	0,838
37	1,014	1,147	1,024

Samo su prvi i drugi vlastiti oblici vibriranja grede s frekvencijama 0,36 Hz i 0,40 Hz izvan raspona frekvencija kosih vješaljki. Vlastiti oblici kosih vješaljki imaju male aktivirane mase, velike pomake vješaljki i nikakve ili vrlo male pomake grede i pilona.

S druge pak strane, ispitivanje mosta s 32-tonskim kamionom koji vozi „cik-cak“ po mostu pokazao je poprečno vibriranje mosta s frekvencijom približno 0,47 Hz i amplitudama od  $\pm 1,0$  cm. Najdulje vješaljke imaju masu oko 20 t, tako da pola mase iznosi 10 t, pa se čini mogućim da vibriranje para kosih vješaljki u fazi može potaknuti vibracije grede, osobito zato što postoje oblici koji sadrže vibracije više parova kosih vješaljki u isto vrijeme.

Kombinirani oblici sadrže torzijske i translacijske vibracije grede i vibracije kosih vješaljki u ravnini i izvan nje.

Torzijski doprinosi masa vibracija grede koncentrirani su u malom vremenskom rasponu od 0,25 s od  $T = 0,86$  s do  $T = 1,11$  s (slika 12.).



Slika 12. Doprinosi masa za torzijske vibracije

U tom je rasponu sadržano ukupno 12 vlastitih vektora s aktiviranim 50-postotnom masom od ukupne mase mosta.

Takav nepovoljan torzijski histogram možemo pripisati relativno maloj širini mosta (14,2 m) koja se još i smanjuje na spoju s prilaznim vijaduktom.

Tri dominantna vlastita vektora aktiviraju 43 % ukupne mase u torzijskim i 19 % ukupne mase u poprečnim oblicima, pa se može zaključiti da bi konstrukcija mogla vibrirati u linearnoj kombinaciji ovih oblika.

Naravno, ove teorijske analize bile su samo informativnog karaktera i mogle su biti potvrđene samo ispitivanjima na mostu.

Izmjerene frekvencije, koeficijenti prigušenja i Scrutonovi brojevi proračunani prema izrazu (1) za prvih šest kosih vješaljki prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Frekvencije, prigušenje i Scrutonovi brojevi za prvih 6 kosih vješaljki prije ugradnje prigušivača

Vješ. br.	Oblik 1			Oblik 2			Oblik 3		
	f Hz	$\zeta$	$S_c$	f Hz	$\zeta$	$S_c$	f Hz	$\zeta$	$S_c$
1	0,647	0,0017	2,359	1,271	0,001	1,388	1,908	0,0006	0,833
2	0,626	0,0017	2,359	1,212	0,0009	1,249	1,863	0,0005	0,694
3	0,65	0,0018	2,017	1,306	0,0009	1,008	2,038	0,0005	0,560
4	0,746	0,0015	1,681	1,438	0,001	1,121	2,143	0,0007	0,784
5	0,791	0,0019	2,129	1,584	0,0009	1,008	2,329	0,0005	0,560
6	0,934	0,0013	1,163	1,863	0,0006	0,537	2,795	0,0004	0,358

Iz tablice možemo vidjeti da su i prigušenja i Scrutonovi brojevi vrlo mali, ispod svih preporučenih vrijednosti, pa se pojava vibracija mogla očekivati.

## 6 Analiza uzroka vibracija kosih vješaljki na Mostu Franja Tuđmana

Promatranja vibracija, ispitivanja mosta, podaci iz literature i dodatne dinamičke analize naveli su nas na zaključak da je na mostu Franja Tuđmana došlo do pojave dviju vrsta vibracija.

Prva vrsta su vibracije uzrokovane istodobnim djelovanjem kiše i vjetra. Ove su vibracije predviđene i u prethodnim analizama mosta, a i uspoređujući vrijednosti za prigušenje i Scrutonov broj dobivene za prvih šest kosih vješaljki s onima u poglavlju 2.2, vidimo da nije zadovoljen niti jedan kriterij.

Frekvencije i amplitude vibriranja kosih vješaljki na Mostu Franja Tuđmana, nažalost, nisu mogle biti izmjerene, ali tehničko osoblje na mostu procjenjuje amplitude nešto manjim od 1 m.

Druga, za most puno opasnija vrsta vibracija s mnogo većim amplitudama vjerojatno se može pripisati pojavi galopiranja koje nastaje zbog gubitka aerodinamičke stabilnosti uslijed stvaranja naslaga snijega (snježnih grebena) na privjetrenoj strani kose vješaljke. Ta je pojava također opisana u literaturi [3].

Pojava snježnih grebena uzrokuje dinamičku nestabilnost zbog promjene oblika kose vješaljke, stvarajući mehanizam koji generira uzgon uzrokujući stvaranje negativnoga dinamičkog prigušenja. Galopirajuće vibracije mogu rasti bez ograničenja sa povećavanjem brzine vjetra i mogu uzrokovati oštećenja mosta, a o psihološkom efektu na promatrače ne moramo ni govoriti [13].

Drugi mogući uzrok ovih eksczesnih vibracija mogao bi biti dinamički odziv cijelog mosta. Kako smo već prije spomenuli, detaljna dinamička analiza pokazala je da su neki vlastiti oblici grede po frekvencijama bliski vlastitim oblicima kosih vješaljki, pa smo mogli pretpostaviti da bi i parametarska uzbuda mogla biti jedan od uzroka ovih vibracija.



## 7 Mjere poduzete za smirivanje vibracija

Istodobno s izvedbom popravaka na mostu, počelo se s razmatranjem odgovarajućih mjera za smanjenje vibracija kosih vješaljki na mostu.

Mjere koje se mogu poduzeti za smanjivanje vibracija su dvojake:

- aerodinamičke
- mehaničke

Aerodinamičke su mjere zapravo različiti načini površinske obrade zaštitnih cijevi kosih vješaljki:

- spiralna ovojnica
- eliptični prsteni
- kružni prsteni
- udubljenja na cijevima.

Ove mjere djeluju tako da povećavaju aerodinamičko prigušenje kosih vješaljki i sprječavaju pojavu “sljevuljaka”.

Primjena ovih mjera na Mostu Franja Tuđmana iziskivala bi komplicirane zahvate i velike troškove.

Mehaničke mjere podrazumijevaju ugradnju prigušivača ili tzv. poprečnih ili trajektorijskih zatega. Ugradnja poprečnih zatega bila bi komplicirana i vjerojatno manje učinkovita od prigušivača. Na kraju je odlučeno da se prigušenje kosih vješaljki poveća mehanički ugradnjom prigušivača na prvih šest parova kosih vješaljki u glavnom otvoru (vješaljke 1 do 6) i na sve kose vješaljke u postranom otvoru prema Dubrovniku, pri čemu je posljednjih 6 sidrenih vješaljki povezano i spojeno na jedan prigušivač.

Prigušivači su postavljeni u vertikalnu ravninu kose vješaljke i osiguravaju dodatno prigušenje samo u toj ravnini.

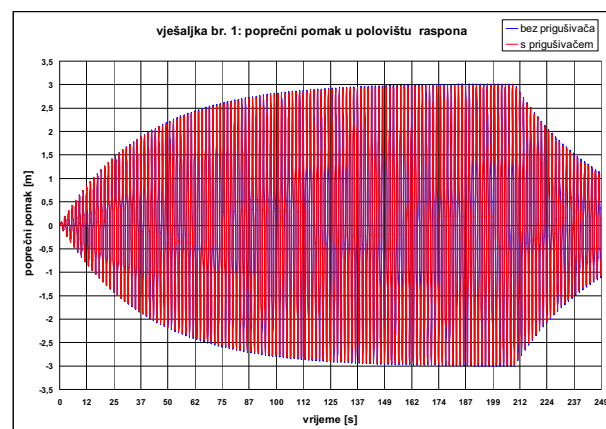
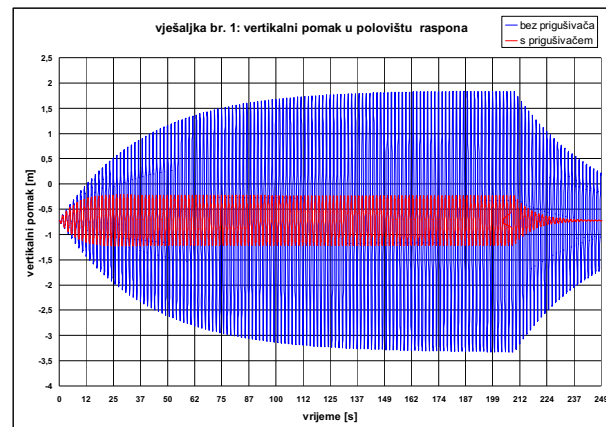
Ugrađeni su magnetoreološki prigušivači nove generacije (ACD-MR), razvijeni i proizvedeni u tvrtki Maurer & Söhne, koji omogućuju kontinuirano prigušenje prilagođavajući se različitim frekvencijama i pomacima (slika 13).

Ovi su prigušivači aktivni i u pasivnom načinu rada (bez priključka na struju), pri čemu daju 30 % prigušenja u aktivnom načinu rada, prema ispitivanjima što ih je proveo dobavljač. Učinkovitost prigušivača raste s porastom struje, a najučinkovitiji su za rezonantne frekvencije.

Projekt prigušivača izradio je dobavljač Maurer&Söhne u suradnji s EMPA-om iz Züricha [14]. Efikasnost predloženih prigušivača provjerena je i na Građevinskom fakultetu [12]. Dobiveni rezultati prikazani na slici 14. jasno pokazuju učinkovitost prigušivača u vertikalnoj ravnini, ali jednako tako pokazuju neučinkovitost u poprečnom smjeru okomito na smjer pružanja kose vješaljke.



Slika 13. Ugrađeni prigušivači



Slika 14. Usporedba pomaka kose vješaljke s prigušivačem i bez njega u vertikalnom (gore) i poprečnom (dolje) smjeru

Prema studiji koju je sponzorirala FHWA [4] moguće je proračunati prigušenje i Scrutonove brojeve kosih vješaljki nakon ugradnje prigušivača.

Proračun je proveden prema sljedećim formulama primjenom koeficijenta prigušenja  $c$  prema dobavljaču prigušivača [14], a rezultati su prikazni u tablici 6.

$$\kappa = \frac{c}{mL\omega_{ol}} i \frac{l}{L}, \quad (10)$$

$$\frac{\zeta_i}{l/L} = \frac{\pi^2 \kappa}{(\pi^2 \kappa)^2 + 1} \quad (11)$$

Tablica 6. Frekvencije, prigušenje i Scrutonovi brojevi za prvih 6 kosih vješaljki (1. oblik) nakon ugradnje prigušivača (s proračunatim prigušenjima)

Vješ. br.	l/L	c kNs/m	Oblik 1			
			$\kappa$	$\zeta/(l/L)$	$\zeta$	$S_c$
1	0,041	174,5	0,088	0,495	0,020	28,2
2	0,042	153,6	0,089	0,496	0,021	28,8
3	0,043	136,5	0,106	0,499	0,021	23,8
4	0,043	125,1	0,096	0,499	0,022	24,2
5	0,044	116,0	0,095	0,499	0,022	24,4
6	0,045	112,8	0,113	0,497	0,022	20,0

$$S_c = \frac{m\zeta}{\rho D^2}$$

gdje je:

$\kappa$  - bezdimenzijski parametar prigušenja

$c$  - koeficijent prigušenja prigušivača prema dobavljaču prigušivača

$i$  - vlastiti oblik vibriranja

$m$  - masa vješaljke po jedinici duljine

$L$  - ukupna duljina vješaljke

$\omega_{ol}$  - kružna frekvencija

$l$  - položaj prigušivača na vješaljki

$l/L$  - normalizirani položaj prigušivača

$\zeta$  - koeficijent prigušenja vješaljke

$\rho$  - gustoća zraka (1,25 kg/m<sup>3</sup>)

$D$  - vanjski promjer vješaljke

$S_c$  - Scrutonov broj

## 8 Ponašanje kosih vješaljki nakon ugradnje prigušivača

Nakon ugradnje prigušivača primijećena je pojava malih vibracija na kosim vješaljka na koje nisu ugrađeni prigušivači zbog djelovanja kiše i vjetra. Prava prilika za provjeru djelovanja prigušivača, ali i odabira načina prigušenja, bila je snježna oluja početkom ove godine. Za te snježne oluje primijećene su nešto veće vibracije kosih vješaljki bez prigušivača, i to naročito vješaljke br. 8. Kose vješaljke koje imaju ugrađene prigušivače vibrirale su gotovo neprimjetno. Ovo izravno potvrđuje djelotvornost prigušivača. Nakon ugradnje prigušivača

dobavljač je ispitao kose vješaljke s ugrađenim prigušivačima, a slična ispitivanja provedena su i proljetos u sklopu pregleda mosta [15]. Rezultati obaju ispitivanja dobro se podudaraju i pokazuju značajan porast prigušenja kosih vješaljki i Scrutonovih brojeva (manji nego prema tablici 11., što se može pripisati drugačijim uvjetima na konstrukciji - točke sidrenja vješaljki su pomične). Rezultati ispitivanja i proračunani Scrutonovi brojevi prema (6) prikazani su u tablici 7. Ono što još možemo zaključiti iz ponašanja kosih vješaljki nakon ugradnje prigušivača jest da su velike vibracije za prethodnih snježnih oluja zasigurno bile galopirajuće vibracije uzrokovane aerodinamičkom nestabilnošću zbog promjene oblika kosih vješaljki, jer se nisu ponovile nakon ugradnje prigušivača. Naime, da su vibracije bile uzrokovane parametarskom uzbudom vjerojatno bi se ponovno pojavile, jer povećanje prigušenja vješaljki ne smanjuje vibracije uzrokovane parametarskom uzbudom [2].

Tablica 7. Frekvencije, prigušenja i Scrutonovi brojevi za prvih 6 kosih vješaljki nakon ugradnje prigušivača (s izmjerenim prigušenjima)

Vješ. br.	Oblik 1		
	f Hz	$\zeta$	$S_c$
1	0,647	0,0121	16,8
2	0,626	0,0173	24,1
3	0,65	0,0157	17,6
4	0,746	0,0159	17,9
5	0,791	0,016	18,0
6	0,934	0,0124	11,1

## 9 Zaključak

Most Franja Tuđmana u Dubrovniku doživio je vibracije kosih vješaljki pod određenim okolnostima jednako kao i mnogi slični mostovi u svijetu. Vibracije kosih vješaljki i ograničene vibracije grede bile su predviđene teorijskim analizama. Snažne vibracije kosih vješaljki uzrokovane snježnom olujom praćenom brzinom vjetra od oko 22-24 m/s nisu mogle biti predviđene. Ono što sada možemo reći jest da bi te vibracije bile izbjegnute da su nakon primijećenih vibracija zbog djelovanja kiše i vjetra odmah primijenjene odgovarajuće mjere za njihovo smirivanje. Tek nakon snježnih oluja, koje su uzrokovale vibracije kosih vješaljki sa zamjetnim amplitudama, ugrađeni su prigušivači na šest parova najduljih vješaljki u glavnom otvoru i na sve vješaljke u postranom otvoru, pri čemu je šest parova vješaljki usidrenih u dubrovački upornjak spojeno na jedan prigušivač. Odluka za primjenu ovih mehaničkih mjera bila je praktično jedina moguća, jer se aerodinamičke mjere nisu mogle izvesti, a alternativa sa međusobnim povezivanjem ko-

sih vješaljki poprečnim zategama, činila se obzirom na neka američka iskustva manje učinkovita i teže ugradiva. Na četiri para kosih vješaljki u glavnom otvoru (vje-

šaljke 7 do 10) nisu ugrađeni prigušivači jer kod njih zasada nisu primijećene znatnije vibracije, što ne znači da se neće ugraditi kasnije, ako se za to ukaže potreba.

## LITERATURA

- [1] Hikami, Y.; Shiraishi, N.: *Rain-induced vibrations of cables in cable-stayed bridges*. J. Wind Engng Indust. Aerodyn. 29: 409-418, 1988.
- [2] Virlogeux, M.: *State-of-the art in cable vibrations of cable-stayed bridges*. Bridge Structures Special Issue: Proceedings of the Third New York City Bridge Conference 12-13 Vol. 1, No. 3: 133-168, 2005.
- [3] Davenport, A.: *A simple representation of the dynamics of a massive cable stay in wind*. In Proceedings of the International Conference on Cable-stayed and Suspension Bridges (AFPC), Deauville, Vol. 2: 427-438, 1994.
- [4] FHWA, FWHA-HRT 05-083. Wind Induced Vibration of Stay Cables, 2007.
- [5] Pinto da Costa, A.; Martins, J.; Lilien, J.L.: *Parametric excitation of cables of cable-stayed bridges*. In Proceedings of the International Conference on Cable-stayed and Suspension Bridges (AFPC), Deauville, Vol. 2: 475-482, 1994.
- [6] FIB, Acceptance of stay cable systems using prestressing steel, Recommendation, 2005.
- [7] PTI Guide Specification, Recommendations for Stay Cable Design, testing and installation, Fourth Edition, 2001.
- [8] Sedlacek, G.; Zahlten, W.; Hortmanns, M.; Schwarzkopf, D.; Kraus, O.; Feill, R.: *Aerodynamic and aeroelastic analysis of the new cable stayed bridge Dubrovnik*, Part 1 – Wind tunnel tests and design wind loads, Part 2 – Numerical simulations. Report W 722/1198, RWTH Aachen, 1998.
- [9] Šavor, Z.: *Glavni projekt mosta preko Rijeke Dubrovačke*, Dio 1-3, Građevinski fakultet Zagreb, Zavod za konstrukcije, 2000.
- [10] Šavor, Z.: *Priručnik za održavanje mosta preko Rijeke Dubrovačke*, Građevinski fakultet Zagreb, Zavod za konstrukcije, 2002.
- [11] Rak, M.; Damjanović, D.: *Izješće o redovnom i specijalističkom pregledu Mosta Dubrovnik*, Građevinski fakultet Zagreb, Zavod za tehničku mehaniku, 2005.
- [12] Dvornik, J.; Lazarević, D.: *Dodatni dinamički proračun i prognoza učinkovitosti prigušivača*, Građevinski fakultet Zagreb, Zavod za tehničku mehaniku, 2005.
- [13] Ostefeld, K.H.; Larsen, A.: *Bridge engineering and aerodynamics*. In A. Larsen (ed), Aerodynamics of Large Bridges. Rotterdam: Balkema: 3-22, 1992.
- [14] MAURER SÖHNE & EMPA, *Design of ACD Dampers for the Dubrovnik bridge*. MAURER SÖHNE, Munich, 2005.
- [15] Rak, M.; Damjanović, D.; Krolo, J.: *Izješće o dinamičkim ispitivanjima u okviru redovnog i specijalističkog pregleda Mosta Dubrovnik*, Građevinski fakultet Zagreb, Zavod za tehničku mehaniku, 2008.