

# Ocjenjivanje graničnih stanja postojećih mostova

---

**Mandić, Ana; Radić, Jure; Šavor, Zlatko**

*Source / Izvornik:* **Građevinar, 2009, 61, 533 - 545**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:233286>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



# Ocjenjivanje graničnih stanja postojećih mostova

Ana Mandić, Jure Radić, Zlatko Šavor

## Ključne riječi

postojeći mostovi,  
granična stanja,  
pouzdanost,  
prometno opterećenje,  
djelovanje vjetra,  
potres

## Key words

existing bridges,  
limit states,  
reliable traffic load,  
wind action,  
earthquake

## Mots clés

ponts existants,  
états limites,  
charge de circulation  
sûre,  
action du vent,  
tremblement de terre

## Ключевые слова

существующие мосты,  
граничные состояния,  
надежность,  
транспортная нагрузка,  
ветровое воздействие,  
землетрясение

## Schlüsselworte

bestehende Brücken,  
Grenzzustände,  
Zuverlässigkeit,  
Verkehrsbelastung,  
Windeinfluss,  
Erdbeben

A. Mandić, J. Radić, Z. Šavor

Izvorni znanstveni rad

## Ocjenjivanje graničnih stanja postojećih mostova

Upozorava se na to da su često postojeći mostovi proračunani prema zastarjelim postupcima i ne zadovoljavaju danas zahtijevane razine pouzdanosti. Stoga je važno ocijeniti granična stanja tih mostova, u cilju planiranja njihova održavanja. Opsuju se postupci ocjenjivanja graničnih stanja razvijeni kroz primjenu na velike jadranske lučne mostove. Posebno se obrađuju učinci prometnog opterećenja na gredne konstrukcije, a posebno djelovanje vjetra i potresno djelovanje na lukove.

A. Mandić, J. Radić, Z. Šavor

Original scientific paper

## Limit state analysis for existing bridges

Readers are cautioned that the existing bridges were in many cases designed in accordance with outdated procedures and that they do not meet the present day reliability criteria. It is therefore highly significant to analyse limit states of such bridges, so as to properly plan their maintenance. Limit state analysis procedures, developed through practical application on big arch bridges on the Adriatic, are described. The effects exerted by traffic load on girder structures are considered, and a special emphasis is placed on the effects of wind action and seismic action on arches.

A. Mandić, J. Radić, Z. Šavor

Ouvrage scientifique original

## Analyse des états limites des ponts existants

Les lecteurs sont avisés que les ponts existants ont fréquemment été conçus sur la base des procédés dépassés et qu'ils ne sont pas à même de satisfaire les nouveaux exigences de fiabilité et sûreté. Pour cette raison, il est très important d'analyser les états limites de ces ponts, afin de pouvoir planifier leur entretien. Les procédures d'analyse d'états limites, développées par application pratique sur les ponts en arc dans la zone adriatique, sont décrites. Les effets de la charge de circulation sur les structures des poutres sont considérés, et l'accent est mis sur les effets exercés sur les arcs par le vent et l'action sismique.

A. Мандић, Ј. Радић, З. Шавор

Оригинална научна работа

## Оценка граничных состояний существующих мостов

Обращается внимание на то, что часто существующие мосты рассчитаны по устаревшим нормам и не удовлетворяют степени надежности, требуемой в настоящее время. В связи с этим, очень важно произвести оценку граничного состояния этих мостов в целях планирования их обслуживания. Описываются процедуры оценки граничных состояний, разработанные в практике применения к крупным арочным мостам Адриатики. Отдельно рассматриваются влияние транспортной нагрузки на балочные конструкции, ветровое воздействие и воздействие землетрясений на арки мостов.

A. Mandić, J. Radić, Z. Šavor

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Bewertung der Grenzzustände bestehender Brücken

Es wird darauf aufmerksam gemacht dass die bestehenden Brücken oft nach veralterten Verfahren berechnet worden sind und dass sie die heute verlangten Zuverlässigkeitsnormen nicht erfüllen. Deswegen ist es wichtig die Grenzzustände dieser Brücken zu bewerten, im Ziel des Planierens deren Wartung. Beschrieben sind Verfahren der Bewertung der Grenzzustände, entwickelt durch deren Anwendung auf grosse Bogenbrücken an der Adriaküste. Abgesondert bearbeitet man die Effekte der Verkehrsbelastung auf Balkenbrücken und abgesondert die Wind- und Erdbeben- Einflüsse auf Bögen.

Autori: Dr. sc. Ana Mandić, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. Jure Radić, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. Zlatko Šavor  
dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Kačićeva 26 Zagreb

## 1 Uvod

Mostovi građeni u Hrvatskoj nakon 2. svjetskog rata projektirani su prema dvama bitno različitim shemama prometnog opterećenja. Prva je nazvana shema PTP-5, a nakon 1973. primjenjuje se shema DIN 1072 te primjenom metode dopuštenih naprezanja i metode graničnih stanja.

Novosti u pristupu konceptu nosivosti i uporabljivosti građevina te vremenske promjenjivosti opterećenja usvojene preuzimanjem novih europskih normi rezultiraju činjenicom da mostovi u sadašnjim uvjetima nemaju iste razine pouzdanosti. Važno pitanje u razvoju prikladne strategije održavanja mostova jest ocjenjivanje njihovih graničnih stanja odnosno utvrđivanje razina njihovih pouzdanosti u odnosu na povećana opterećenja, ali i promjene u zahtjevima novih propisa tijekom desetljeća njihove uporabe.

Različite su metode analiza pouzdanosti prisutne u literaturi i praksi. Često su to determinističke metode koje, međutim, u nekim okolnostima postaju prekonzervativne pa se u novije vrijeme sve više razvijaju probabilističke odnosno polu-probabilističke metode. Ocjenjivanje stanja postojećih mostova temelji se na istim osnovnim postavkama kao i projektiranje novog mosta. Međutim, postoji vrlo bitna razlika. Naime, kada se most projektira konzervativizam proračunskih modela opterećenja i otpornosti općenito je povoljan jer pokriva nesigurnosti i osigurava pojednostavnjenje procesa projektiranja za različite tipove konstrukcija. Osim toga, postizanje veće pouzdanosti u fazi projektiranja ne povećava bitno troškove cijele konstrukcije. Međutim kad se ocjenjuje postojeći most, troškovi zbog prekonzervativnih mjera mogu biti mnogo veći. Stoga je opravdano razmatranje stvarnih djelovanja i otpornosti konstrukcije.

U literaturi se mostovi najčešće ocjenjuju s obzirom na prometno opterećenje, što je osnovno opterećenje kojem prevođenju most i služi, a s druge strane vrlo je promjenjivog karaktera i prostorno i vremenski. Međutim, u našoj zemlji često seizmičko djelovanje može biti za neke dijelove mostova mjerodavno, a prije se pri projektiranju ili nije uzimalo u obzir ili se na potres projektiralo po zastarjelim propisima. S druge strane, prema novim hrvatskim normama [10] usporedne brzine vjetera, poglavito u priobalju, mogu rezultirati bitno većim opterećenjem od onog na koje su mostovi proračunani.

Posebno zanimljivo i važno jest ocjenjivanje naših velikih lučnih mostova u priobalju koji su izloženi djelovanju mora, bure, znatnim prometnim opterećenjem u ljetnim mjesecima, a i nalaze se u područjima visoke seizmičnosti.

## 2 Ocjenjivanje rasponskih sklopova na učinke prometnog opterećenja

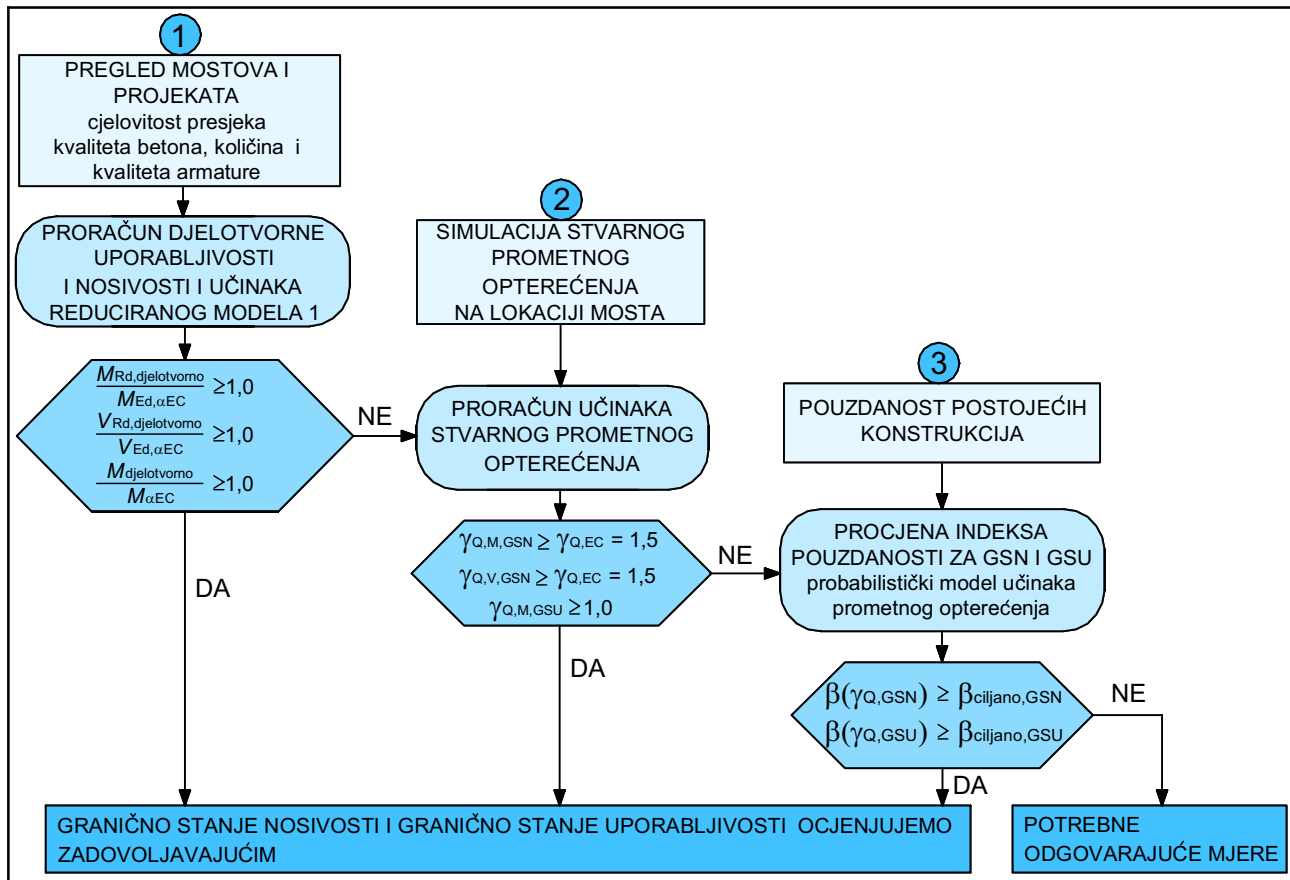
U radu [14] razvijen je postupak ocjenjivanja rasponskih sklopova na prometno opterećenje trima koracima (slika 1.).

U prvom koraku uspoređujemo djelotvornu nosivost i uporabljivost konstrukcije (na temelju podataka iz projekta i pregleda rasponskog sklopa, izraženu momentom savijanja ili poprečnom silom) s učincima modela 1 prometnog opterećenja prema Eurokodu [6, 11] prilagođenog maksimalnom stvarnom prometu na hrvatskim cestama. Za maksimalni promet uporabljeni su podaci o brojenju prometa u Slavanskom Brodu-istok kao mjestu s najvećom zastupljenošću teških vozila [3]. Ako su svi odnosi najmanje jednaki 1,0, granična stanja ocjenjujemo zadovoljavajućima i zaključujemo da na konstrukciji još nisu potrebne nikakve intervencije (slika 1.).

Ako je bilo koji odnos (granično stanje nosivosti na savijanje ili posmik, ili granično stanje uporabljivosti) manji od jedinice, prva ocjena nije zadovoljavajuća i krećemo u točniji postupak – drugu ocjenu u sklopu koje valja odrediti učinke stvarnog prometa na danoj lokaciji. Za ovaj postupak potrebna su mjerenja i analize stvarnog prometa na temelju postojećih podataka o prometu i voznom parku. Kod statički određenih konstrukcija ovu je ocjenu dovoljno provesti na razini presjeka, dok je kod statički neodređenih konstrukcija, ako ocjene na razini presjeka ne zadovoljavaju, potrebno primijeniti složenije modele uzimanjem u obzir moguće preraspodjele.

Ovom se ocjenom dobivaju parcijalni koeficijenti za prometno opterećenje (točka 2.2). Ako su najmanje jednaki onima koje traži norma za proračune, onda možemo ustvrditi da su granična stanja nosivosti i uporabljivosti zadovoljena te nisu potrebne daljnje intervencije.

U protivnom moguće je trećom ocjenom na temelju dobivenih parcijalnih koeficijenata te probabilističkog modela prometnog opterećenja odrediti indekse pouzdanosti te ih usporediti s ciljanim vrijednostima. Proračuni su pokazali da se ciljanje vrijednosti indeksa pouzdanosti pri ocjeni stanja postojećih konstrukcija mogu uzeti s manjim vrijednostima od onih danih u normama za proračun konstrukcija. Moguće je primijeniti ciljane vrijednosti indeksa pouzdanosti u skladu s probabilističkim modelskim pravilima [13]. Ako su dobivene vrijednosti indeksa pouzdanosti najmanje jednake ciljanim vrijednostima, zaključujemo da konstrukcija stvarno opterećenje podnosi s dovoljnom pouzdanošću te nije potrebna intervencija. U protivnom potrebno je provesti odgovarajuće mjere – popravke, sanacije, ojačanja, rekonstrukcije ili možda cjelokupnu zamjenu konstrukcije.



Slika 1 Tri razine ocjenjivanja rasponskih sklopova na prometno opterećenje

### 2.1 Stvarno prometno opterećenje i prilagodba europskog modela 1

Za simulaciju najtežega stvarnoga prometnog opterećenja na hrvatskim cestama primijenjeni su podaci o prosječnom godišnjem dnevnom prometu na lokaciji s najvećom zastupljenošću teških vozila. Promet je sastavljen od automobila i sedam vrsta teških vozila. Zbog zanemarivog utjecaja automobili su isključeni iz razmatranja, a stvarna teška vozila predstavljena su sa šest modela reprezentativnih vozila. Svaki model opisan je s osovinskim opterećenjem  $P_i$  (postotak ukupne težine), razmakom osovina i zastupljenošću u prometu.

Osovinska opterećenja odgovaraju vozilima koja su opterećena do njihove potpune nosivosti. No u stvarnom se prometu pojavljuju i prazna, i djelomično opterećena, ali i preopterećena vozila. Stoga su osovinska opterećenja i ukupna težina vozila slučajne veličine s određenom vjerojatnosnom raspodjelom. Ukupna težina svakoga reprezentativnog vozila [15] uzima se kao slučajna varijabla koja se modelira odgovarajućom beta raspodjelom:

$$f(P_i) = \text{beta}(a_i; b_i; \alpha_i; \beta_i), \text{ (kN)} \quad (1)$$

Beta raspodjela na jediničnom intervalu [0,1] ima srednju vrijednost i standardnu devijaciju [9]:

$$\mu_x = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}; \quad \sigma_x = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)}, \quad (2)$$

gdje su  $\alpha$  i  $\beta$  parametri oblika beta raspodjele.

Rješavanjem jednadžbi parametri  $\alpha$  i  $\beta$  mogu se za jedinični interval izraziti srednjom vrijednosti i standardnom devijacijom:

$$\alpha = \frac{(\mu_x^2 - \mu_x^3 - \mu_x \sigma_x^2)}{\sigma_x^2}; \quad (3)$$

$$\beta = \frac{(\mu_x - 2\mu_x^2 + \mu_x^3 - \sigma_x^2 + \mu_x \sigma_x^2)}{\sigma_x^2}. \quad (4)$$

Za modeliranje ukupne težine vozila valja beta raspodjelu prilagoditi i proširiti na interval  $[a, b]$  u kojem se težina pojedinog vozila pojavljuje (slika 3. lijevo). Primjenom transformacije  $Y=(b-a)X+a$  srednja vrijednost i standardna devijacija dane su izrazima:

$$\mu_y = (b-a)\mu_x + a; \quad \sigma_y = \sqrt{(b-a)^2 \sigma_x}. \quad (5)$$

Gusti prometni tijek teških vozila bit će mjerodavan za najveće učinke, pa se za razmake između vozila pri-

mjenjuje beta raspodjela za zastoj uspostavljena za razmak dvaju kamiona prema [1], (slika 3. desno):

$$f(d) = \text{beta}(a = 0,1; b = 15; \alpha = 2,93; \beta = 10,8), (m). \quad (6)$$

Za mostove na državnim cestama pretpostavljene su dvije kolone teških vozila, a za mostove na autocestama tri kolone teških vozila te jedna kolona osobnih vozila. Kako bi se uzeo u obzir dinamički utjecaj, dodatno je opterećenje u jednom traku pomnoženo dinamičkim faktorom  $k_d$  ovisnim o rasponu. Primijenjeno je i jednoliko raspodijeljeno opterećenje pješacima ovisno o rasponu.

Tablica 1. Preporučene vrijednosti koeficijenata prilagođavanja  $\alpha$  modela 1 stvarnom prometu na hrvatskim cestama za ocjenu graničnih stanja postojećih mostova

Raspon L (m)		$\leq 10$	$10 < \leq 20$	$20 < \leq 30$	$30 < \leq 40$	$40 < \leq 50$
<b>DRŽAVNA CESTA</b>						
Slobodno oslonjena greda $\alpha_{q2} = 1,0;$ $\alpha_{qr} = 1,0$	$\alpha_{Q1}$	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
	$\alpha_{Q2}$ $\alpha_{q1}$	0,30	0,38	0,51	0,58	0,62
Kontinuirana greda $\alpha_{q2} = 1,0;$ $\alpha_{qr} = 1,0$	$\alpha_{Q1}$	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
	$\alpha_{Q2}$ $\alpha_{q1}$	0,48	0,72	0,78	0,81	0,82
<b>AUTOCESTA</b>						
Slobodno oslonjena greda $\alpha_{q2} = 1,0;$ $\alpha_{q3} = 1,0;$ $\alpha_{qr} = 1,0$	$\alpha_{Q1}$	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
	$\alpha_{Q2},$ $\alpha_{Q3}$ $\alpha_{q1}$	0,38	0,53	0,65	0,72	0,77
Kontinuirana greda $\alpha_{q2} = 1,0;$ $\alpha_{q3} = 1,0;$ $\alpha_{qr} = 1,0$	$\alpha_{Q1}$	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
	$\alpha_{Q2},$ $\alpha_{Q3}$ $\alpha_{q1}$	0,51	0,72	0,77	0,81	0,84

Kombinacijom dvaju računalnih programa Excel i Sofistik simulacija prolaska teških vozila ponavlja se trideset puta, svaki put s novim slučajnim odabirom ukupne težine pojedinog vozila, razmaka i rasporeda vozila u koloni. Učinci prometnog opterećenja (momenti savijanja i poprečne sile) proračunani su na slobodno oslonjenim gredama te kontinuiranim gredama preko dva ista

raspona od 10 do 50 m te su kao rezultat predloženi koeficijenti prilagođavanja europskog modela 1 stvarnom prometnom opterećenju na hrvatskim cestama (tablica 1.).

U drugom koraku ocjenjivanja postojećeg mosta primjenjuje se isti postupak za proračun učinaka stvarnog prometa na točno određenoj lokaciji mosta.

### 2.2 Jednadžbe graničnog stanja i parcijalni koeficijenti za prometno opterećenje

Jednadžbe graničnog stanja formiraju se za poprečni presjek opterećen momentom savijanja (ili poprečnom silom). Valja ocijeniti i granično stanje nosivosti i granično stanje uporabljivosti što će rezultirati odgovarajućim parcijalnim koeficijentima na prometno opterećenje.

Kod roštiljnih prednapetih armiranobetonskih konstrukcija za određivanje proračunske nosivosti glavnog nosača na savijanje u polju primjenjujemo granicu elastičnosti čelika za prednapinjanje  $f_{pk,el}$  te karakterističnu granicu popuštanja nenapete armature  $f_{yk}$ . Parcijalni koeficijent čelika za prednapinjanje jest  $\gamma_p = 1,0$ , a parcijalni je koeficijent čelika za armiranje  $\gamma_s = 1,15$ . Krak unutrašnjih sila uzimamo s približno 90 % statičke visine nosača ( $d_p$  za natege i  $d_s$  za nenapetu armaturu). Ploština natege je  $A_p$ , a ploština nenapete armature  $A_s$ .

$$M_{Rd,djelotvorno} = A_p \cdot \frac{f_{pk,el}}{\gamma_p} \cdot 0,9 \cdot d_p + A_s \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \cdot 0,9 d_s \quad (7)$$

Nosivost glavnog nosača na savijanje na ležaju dobiva se sličnim izrazom uzimanjem u obzir, ako postoje, kontinuiranih natega u gornjem području ( $A_p$ ) i nenapete armature u gornjem području ( $A_s$ ).

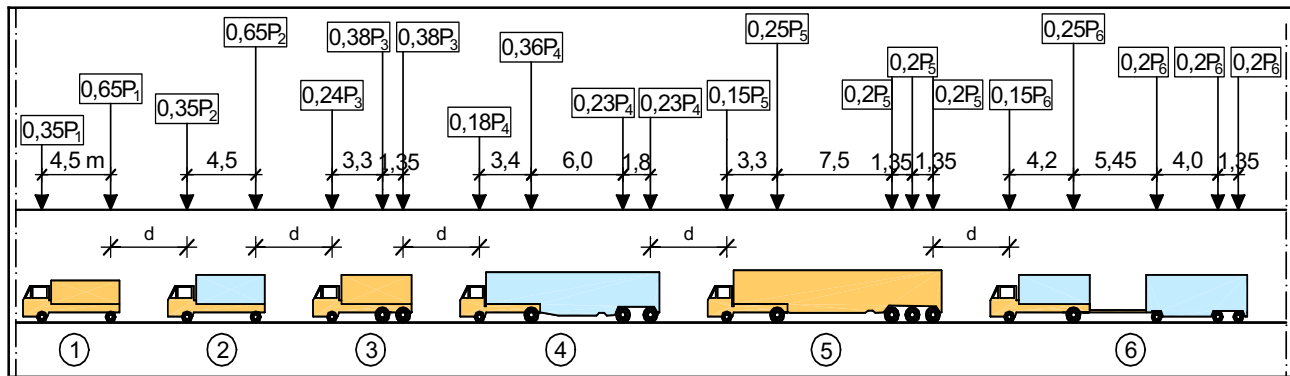
Proračunska nosivost na posmik spona ( $A_{sw}$  je ploština posmične armature,  $s_w$  je razmak spona,  $f_{yk}$  karakteristična granica popuštanja čelika spona,  $d$  je djelotvorna visina presjeka), betona ( $\tau_{Rd}$  je proračunska otpornost na posmik ovisna o razredu betona, koeficijent  $k = 1,6 - d \geq 1,0$  i  $b_w$  je širina hrpta) i komponente sile prednapinjanja ( $P = 0,65 \cdot 0,80 \cdot f_{pk,el} \cdot A_p$ ) ovisno o kutu nagiba  $\alpha$  prikazana je sljedećim izrazom:

$$V_{Rd,djelotvorno} = A_{sw} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \cdot \frac{0,9 \cdot d}{s_w} + \tau_{Rd} \cdot k \cdot 1,2 \cdot b_w \cdot d + P \sin \alpha \quad (8)$$

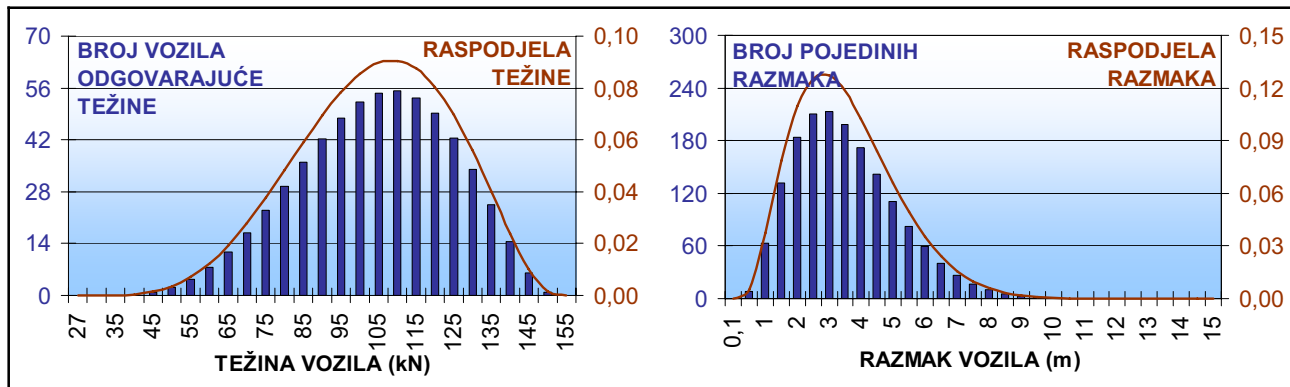
Uporabljivost vezanu uz ograničenje naprezanja u armaturi  $0,8 f_{yk}$  možemo izraziti momentom:

$$M_{djelotvorno} = A_p \cdot f_{pk,el} \cdot 0,9 \cdot d_p + A_s \cdot 0,8 \cdot f_{yk} \cdot 0,9 d_s \quad (9)$$

a uporabljivost vezanu uz ograničenje naprezanja u betonu  $0,6 f_{ck}$  izrazom:



Slika 2. Modeli reprezentativnih vozila



Slika 3. Beta raspodjela ukupne težine reprezentativnog vozila 1 (lijevo) i beta raspodjela razmaka između teških vozila (desno)

$$M_{\text{djelotvorno}} = P \cdot \frac{W_c}{A_c} - P \cdot e + 0,6 \cdot f_{ck} \cdot W_c \quad (10)$$

gdje je  $A_c$  ploština betona,  $W_c$  moment otpora betonskog presjeka,  $e$  ekscentričnost natege, a  $f_{ck}$  karakteristična tlačna čvrstoća betonskog valjka.

Potom se formiraju uvjeti nosivosti (jednadžbe graničnog stanja). Iz uvjeta nosivosti na savijanje  $M_{Ed} = M_{Rd,djelotvorno}$ , uz primjenu odgovarajućega parcijalnog koeficijenta za stalno djelovanje ( $\gamma_G = 1,35$ ), određuje se parcijalni koeficijent na prometno opterećenje:

$$\gamma_{Q,M,GSN} = \frac{M_{Rd,djelotvorno} - \gamma_G \cdot M_G}{M_Q} \quad (11)$$

Iz uvjeta nosivosti  $V_{Ed} = V_{Rd,djelotvorno}$ , uz primjenu odgovarajućega parcijalnog koeficijenta za stalno djelovanje, određuje se parcijalni koeficijent na prometno opterećenje:

$$\gamma_{Q,V,GSN} = \frac{V_{Rd,djelotvorno} - \gamma_G \cdot V_G}{V_Q} \quad (12)$$

Iz uvjeta uporabljivosti  $M_{Ed} = M_{djelotvorno}$ , uz primjenu parcijalnog koeficijenta za stalno djelovanje ( $\gamma_G = 1,0$ ), određuje se parcijalni koeficijent na prometno opterećenje:

$$\gamma_{Q,M,GSU} = \frac{M_{\text{djelotvorno}} - M_G}{M_Q} \quad (13)$$

### 2.3 Probabilističko modeliranje prometnog opterećenja i procjena pouzdanosti

Za prednapete armiranobetonske rasponske konstrukcije (uglavnom raspona 20 do 50 m, u okviru kojih se kreću rasponi nadlučnih konstrukcija velikih lučnih mostova) možemo primijeniti Gumbelovu raspodjelu učinaka prometnog opterećenja [17].

$$F(x; \mu; b) = \exp\left[-\exp\left[-\frac{(x-\mu)}{b}\right]\right], -\infty < x < \infty, \frac{1}{b} > 0 \quad (14)$$

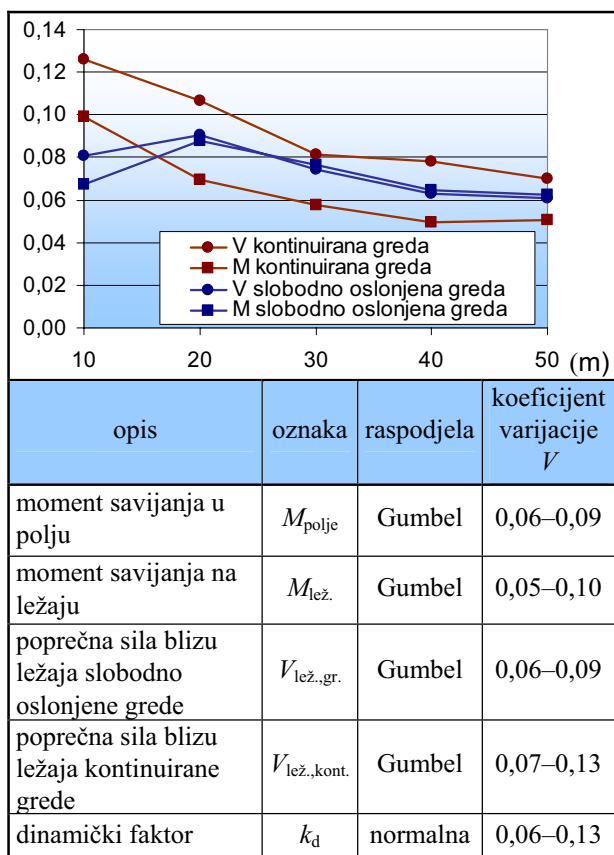
Proračunska vrijednost Gumbelove raspodjele je [4, 14]:

$$x_d = \mu_x \left[ 1 - \frac{V\sqrt{6}}{\pi} (0,5772 + \ln[-\ln \Phi(-\alpha\beta)]) \right] \quad (15)$$

gdje su  $\mu_x$  i  $V$  srednja vrijednost i koeficijent varijacije promatrane varijable,  $\alpha$  je vrijednost koeficijenta osjetljivosti,  $\beta$  je indeks pouzdanosti, a  $\Phi$  predstavlja standardiziranu normalnu funkciju raspodjele.

Na slici 4. prikazani su odgovarajući koeficijenti varijacije usvojeni na temelju prethodnih analiza stvarnoga prometnog opterećenja za različite raspone i različite učinke:

- moment savijanja u polju
- moment savijanja na ležaju
- poprečna sila slobodno oslonjene grede i
- poprečna sila kontinuirane grede.



Slika 1. Rezultati analize stvarnoga prometnog opterećenja i probabilistička svojstva učinaka prometnog opterećenja

Za približnu procjenu pouzdanosti nadlučnih sklopova u obliku indeksa pouzdanosti  $\beta$  predlažemo primijeniti metodu standardiziranih FORM koeficijenata ( $\alpha_E = -0,7$ , koeficijent osjetljivosti za djelovanja). Postupak se primjenjuje za odgovarajuću vjerojatnosnu razdiobu i koeficijent varijacije učinka prometnog opterećenja, na temelju parcijalnih koeficijenata proračunanih u drugom koraku ocjenjivanja graničnih stanja. Ciljana razina pouzdanosti odabire se u ovisnosti o relativnim troškovima za postizanje pouzdanosti i posljedicama otkazivanja [13]. Npr. europska norma [4] za granično stanje nosivosti i povratni period od 50 godina daje ciljanu vrijednost indeksa pouzdanosti  $\beta_{ciljano,GSN} = 3,8$  koja odgovara vrijednosti u probabilističkim modelskim pravilima [13] za velike posljedice otkazivanja i niske relativne troškove za postizanje pouzdanosti. Za velike posljedice otkazivanja i visoke troškove za postizanje pouzdanosti, ciljana je vrijednost indeksa pouzdanosti  $\beta_{ciljano,GSN} = 2,6$ .

Za granično stanje uporabljivosti i povratni period od 50 godina EN 1990 [4] daje ciljanu vrijednost indeksa pouzdanosti  $\beta_{ciljano,GSU} = 1,5$ , dok probabilistička modelska pravila daju sličnu vrijednost 1,3 za visoke relativne troškove za postizanje pouzdanosti i jednogodišnji povratni period. Transformirana na 50-godišnji povratni period, vrijednost ciljanog indeksa pouzdanosti bila bi manja od 0 pa je moguća primjena vrijednost  $\beta_{ciljano,GSU} = 0$  pri ocjenjivanju.

#### 2.4 Ocjenjivanje nadlučnog sklopa Šibenskog i Masleničkog mosta

Opisani postupak primijenit će se za ocjenjivanje nadlučnog sklopa Šibenskog i Masleničkog mosta. Prvi je proračunat prema zastarjelom PTP-5, a drugi prema Pravilniku.

U prvom koraku, ocjena nadlučnog sklopa Šibenskog mosta (slika 8.) provedena je za europski model 1 prometnog opterećenja prilagođen za slobodno oslonjenu gredu raspona 23,3 m i državnu cestu u skladu s tablicom 1.

Tablica 2. Rezultati ocjene graničnih stanja Šibenskog i Masleničkog nadlučnog sklopa trima koracima

Koraci ocjenjivanja	Šibenik	Maslenica
<b>1. ocjena</b>		
GSN savijanje $M_{Rd,djelotvorno}/M_{Ed,aEC} \geq 1,0$	0,89 < 1,0 NE	1,40 > 1,0 DA
GSN posmik $V_{Rd,djelotvorno}/V_{Ed,aEC} \geq 1,0$	0,56 < 1,0 NE	1,47 > 1,0 DA
GSU $M_{djelotvorno}/M_{aEC} \geq 1,0$	0,99 < 1,0 NE	1,06 > 1,0 DA
Ukupna ocjena	NE	DA
<b>2. ocjena</b>	potrebna	nepotrebna
GSN savijanje $\gamma_{Q,M,GSN} \geq \gamma_{Q,EC} = 1,5$	1,40 < 1,5 NE	3,16 > 1,5 DA
GSN posmik $\gamma_{Q,V,GSN} \geq \gamma_{Q,EC} = 1,5$	0,56 < 1,5 NE	3,36 > 1,5 DA
GSU $\gamma_{Q,M,GSU} \geq 1,0$	1,16 < 1,0 DA	1,18 > 1,0 DA
Ukupna ocjena	NE	DA
<b>3. ocjena</b>	potrebna	nepotrebna
GSN savijanje $\beta(\gamma_{Q,M,GSN}) \geq \beta_{ciljano,GSN}$	3,44 > 2,6 DA	9,45 > 2,6 DA
GSN posmik $\beta(\gamma_{Q,V,GSN}) \geq \beta_{ciljano,GSN}$	< 2,6 NE	9,76 > 2,6 DA
GSU $\beta(\gamma_{Q,M,GSU}) \geq \beta_{ciljano,GSU}$	1,80 > 1,5 DA	2,10 > 1,5 DA
Ukupna ocjena	NE	DA

Nisu zadovoljeni uvjeti graničnog stanja nosivosti ni graničnog stanja uporabljivosti te je valjalo provesti drugi korak ocjene. U drugom koraku analizirano je stvarno prometno opterećenje na lokaciji Šibenskog mosta te je zadovoljeno samo granično stanje uporabljivosti.

U trećem koraku, primjenom Gumbelove raspodjele učinaka prometnog opterećenja i odgovarajućih koeficijentata varijacije, uz uvećanje zbog dinamičkog učinka, procijenjena je vrijednost indeksa pouzdanosti. Zaključujemo da nadlučni sklop Šibenskog mosta zadovoljava što se tiče uporabljivosti i nosivosti na savijanje, ali nema dovoljnu nosivost na posmik (tablica 2.), što je problem svih mostova projektiranih prema starim propisima.

Maslenički kontinuirani nadlučni sklop (slika 8.) preko raspona 30 m za autocestu zadovoljava sve uvjete već u prvom koraku pa sljedeći koraci nisu ni potrebni. Ipak i sljedeći su koraci ocjenjivanja provedeni da bi se usporedile vrijednosti parcijalnih koeficijentata i pouzdanosti dvaju mostova.

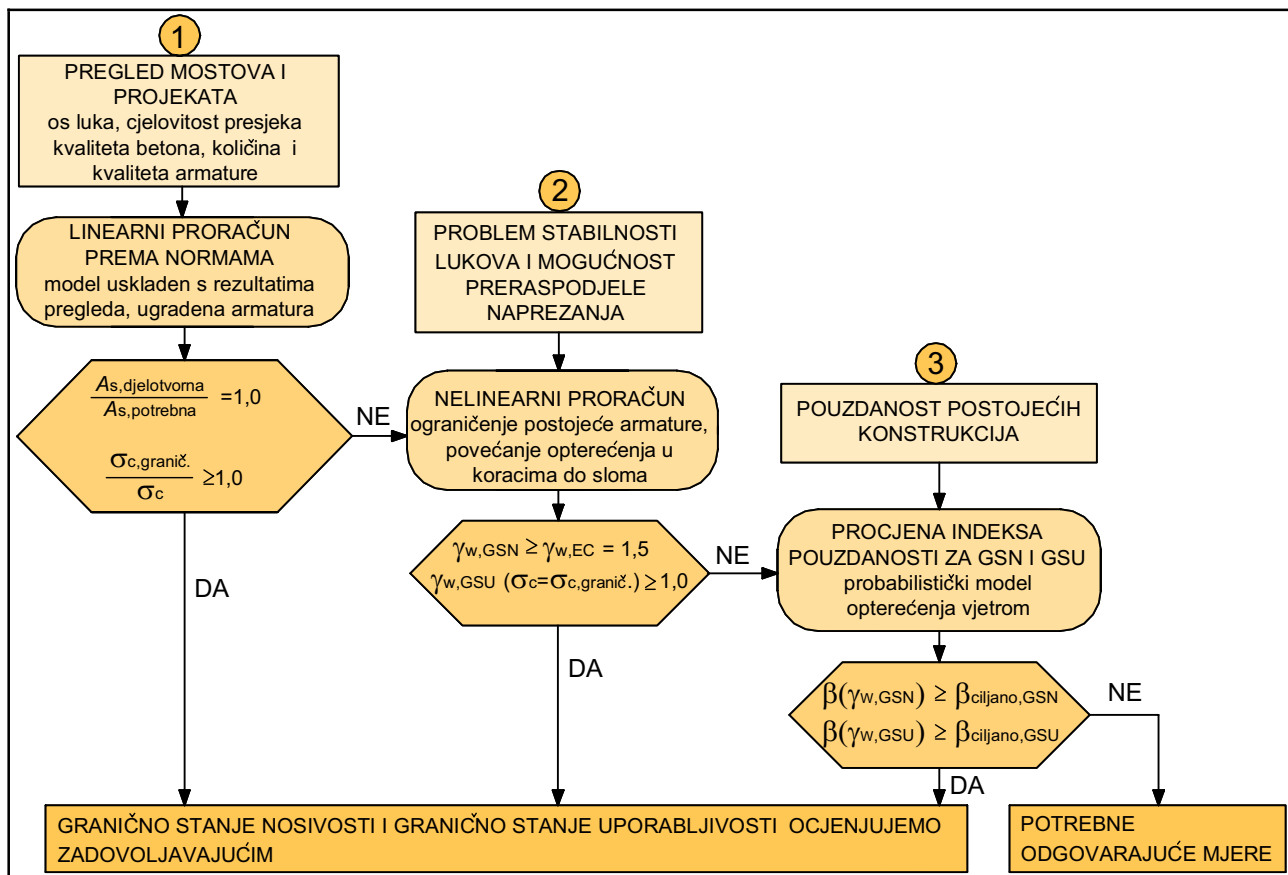
### 3 Ocjenjivanje lukova na djelovanje vjetra

Kod masivnih je lukova učinak prometnog opterećenja zanemariv, ali izvanredna potresna djelovanja ili djelo-

vanje vjetra mogu znatno utjecati. U radu [14] razvijen je postupak ocjene graničnih stanja lukova na djelovanje vjetra čiji je dijagram toka prikazan na slici 5.

U prvom koraku se na proračunskom modelu mosta s upisanom ugrađenom armaturom provodi linearni proračun kako bi se ocijenila nosivost i uporabljivost na razini presjeka. Lučni nosači su tlačno opterećeni elementi pa se kod njih javlja problem stabilnosti. Problem stabilnosti rješavamo uzimanjem u obzir geometrijske nelinearnosti čime se granična stanja provjeravaju na deformiranom sustavu. Dinamičkim proračunom određuju se oblici vibriranja konstrukcije te se duž osi luka normiraju na propisanu veličinu pomaka. Ako se proračunom ne utvrdi potreba za većom ploštinom armature u presjecima i naprezanja su u dopuštenim granicama, granična su stanja zadovoljena i nisu potrebne daljnje provjere.

Ako to nije slučaj mora se provesti nelinearni proračun kojim se osim geometrijske nelinearnosti uzima u obzir i materijalna nelinearnost, čime se omogućava preraspodjela krutosti i naprezanja između pojedinih presjeka u statički neodređenoj konstrukciji. Postojeća se ugrađena armatura u luku ograničava. Povećavajući opterećenje u



Slika 2. Tri razine ocjenjivanja lukova na djelovanje vjetra i probabilistički model vjetra i procjena pouzdanosti



koracima pratimo pri kojoj razini opterećenja, odnosno vrijednosti parcijalnog koeficijenta za promjenjivo djelovanje vjetra ( $\gamma_w$ ), dolazi do sloma odnosno iscrpljenja graničnog naprezanja. Ako su parcijalni koeficijenti najmanje jednaki onima koje traži norma za proračune, onda možemo utvrditi da su granična stanja nosivosti i uporabljivosti zadovoljena te nisu potrebne daljnje provjere.

Ako su parcijalni koeficijenti manji od normiranih valja krenuti i u treći korak procjene indeksa pouzdanosti na temelju dobivenih parcijalnih koeficijenata iz prethodnog koraka i probabilističkog modela vjetrenog opterećenja za normirane usporedne brzine vjetra. Ako su dobivene vrijednosti indeksa pouzdanosti najmanje jednake ciljanim vrijednostima, zaključujemo da konstrukcija stvarno opterećenje podnosi s dovoljnom pouzdanošću te nije potrebna intervencija. U protivnom potrebno je detaljnije analizirati djelovanje vjetra na danoj lokaciji mosta za što su potrebna prikladna mjerenja.

### 3.1 Probabilistički model vjetra i procjena pouzdanosti

Tlak vjetra na koji mostove proračunavamo određuje se prema izrazu:

$$w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{ref}^2 \cdot C = q_{ref} \cdot C \quad (16)$$

gdje je  $v_{ref}$  usporedna brzina vjetra koja se određuje prema osnovnoj vrijednosti usporedne brzine vjetra  $v_{ref,0}$  koja je prikazana u zemljovidu Hrvatske za područja opterećenja vjetrom u nacionalnom dodatku za primjenu norme HRN ENV 1991-2-4 [10], a  $q_{ref}$  usporedni tlak srednje brzine vjetra. Oznakom  $C$  prikazan je koeficijent opterećenja vjetrom koji se dobiva umnoškom koeficijenta izloženosti  $c_e$  i koeficijenta oblika  $c_a$ . Koeficijent izloženosti  $c_e$  definira se kao umnožak koeficijenta hrapavosti i faktora mahovitosti  $c_r \cdot c_g$ .

Dakle možemo pisati:

$$w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{ref}^2 \cdot c_g \cdot c_r \cdot c_a = q_{ref} \cdot c_g \cdot c_r \cdot c_a \quad (17)$$

Prema probabilističkim modelskim pravilima [13, 21] predlažu se sljedeći probabilistički modeli za pojedine koeficijente dani u tablici 3.

Gumbelova raspodjela primjenjuje se za jednogodišnju maksimalnu referentnu brzinu vjetra. Maksimalna usporedna brzina za povratni period  $N$  također ima Gumbelovu raspodjelu sa srednjom vrijednosti i standardnom devijacijom koje su funkcija srednje vrijednosti i standardne devijacije za godišnji maksimum:

$$\mu_N = \mu_1 + 0,78\sigma_1 \ln(N), \quad \sigma_N = \sigma_1 \quad (18)$$

Tablica 3. Probabilistička svojstva parametara vjetra

Opis	Oznaka	Raspodjela	Koeficijent varijacije $v$
koeficijent oblika	$c_a$	normalna	0,12
faktor mahovitosti	$c_g$	normalna	0,12
koeficijent hrapavosti	$c_r$	normalna	0,15
usporedna brzina vjetra za jednu godinu	$v_{ref,1}$	Gumbelova	0,10

Uz povratni period od 50 godina usporedne brzine vjetra prema EN 1990 te koeficijent varijacije iz tablice vrijedi:

$$\begin{aligned} \mu_{50} &= \mu_1 + 0,78\sigma_1 \ln(50) \\ \mu_{50} &= \mu_1 + 0,78V_1\mu_1 \ln(50) = 1,305\mu_1 \end{aligned} \quad (19)$$

Uz  $V_1=0,1$  koeficijent varijacije za 50 - godišnju usporednu brzinu vjetra iznosi:

$$V_{50} = \frac{\sigma_{50}}{\mu_{50}} = \frac{\sigma_1}{1,305\mu_1} = 0,766V_1 = 0,077 \quad (20)$$

Koeficijent varijacije za maksimalni godišnji usporedni tlak vjetra može se približno izraziti kao dvostruko veći od koeficijenta varijacije za maksimalnu godišnju brzinu:

$$V_{qref,1} \cong 2V_{vref,1} \quad (21)$$

pa taj odnos možemo primijeniti i na 50-godišnje vrijednosti:

$$V_{qref,50} \cong 2V_{vref,50} = 2 \cdot 0,077 = 0,154 \quad (22)$$

Utjecaj oblika, mahovitosti i hrapavosti približno uzimamo u obzir povećanjem varijance. Za međusobno nepovezane varijable prema izrazu za tlak vjetra njegov koeficijent varijacije jest:

$$\begin{aligned} V_w &= \sqrt{V_{qref}^2 + V_{ca}^2 + V_{cg}^2 + V_{cr}^2} = \\ V_w &= \sqrt{0,154^2 + 0,12^2 + 0,12^2 + 0,15^2} = 0,274 \end{aligned} \quad (23)$$

Za približnu procjenu pouzdanosti lučnih mostova u obliku indeksa pouzdanosti  $\beta$  predlažemo, kao i kod ocjenjivanja na prometno opterećenje, upotrijebiti metodu standardiziranih FORM koeficijenata (standardiziranih koeficijenata osjetljivosti  $\alpha$ ).

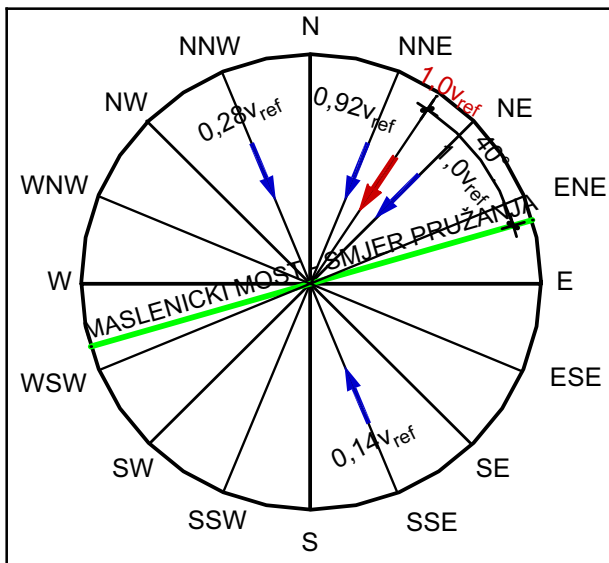
Norma EN 1990 [4] preporučuje parcijalni koeficijent 1,5 za djelovanje vjetra kao dominantno djelovanje pri provjeri graničnog stanja nosivosti. Ovaj koeficijent i primjenjujemo u linearnim proračunima. S druge strane, nelinearnim proračunom dobit ćemo vrijednosti parcijalnih koeficijenata do kojih lučni mostovi mogu podnijeti djelovanje vjetra.

Za poznati parcijalni koeficijent dobiven iz druge ocjene lukova na djelovanje vjetra, uz određenu varijancu opterećenja od vjetra izrazom za proračunsku vrijednost Gumbelove raspodjele (15), određujemo odgovarajući indeks pouzdanosti i uspoređujemo ga s ciljanom vrijednošću.

### 3.2 Utjecaj smjera vjetra

Prema europskim normama [5,10] usporedne brzine vjetra valja dodatno korigirati s obzirom na smjer vjetra koeficijentom  $c_{DIR}$ . Dakle, ako želimo dobiti maksimalnu brzinu vjetra za neki određeni smjer, potrebno je poznatu osnovnu usporednu brzinu  $v_{ref,0}$  pomnožiti s koeficijentom smjera  $c_{DIR}$ . U nacionalnom dokumentu za primjenu hrvatske norme [10] ovaj se koeficijent uzima jednak 1,0. Korekcije, dakle, uopće nema, odnosno valja primijeniti maksimalno djelovanje vjetra bez obzira na njegov smjer.

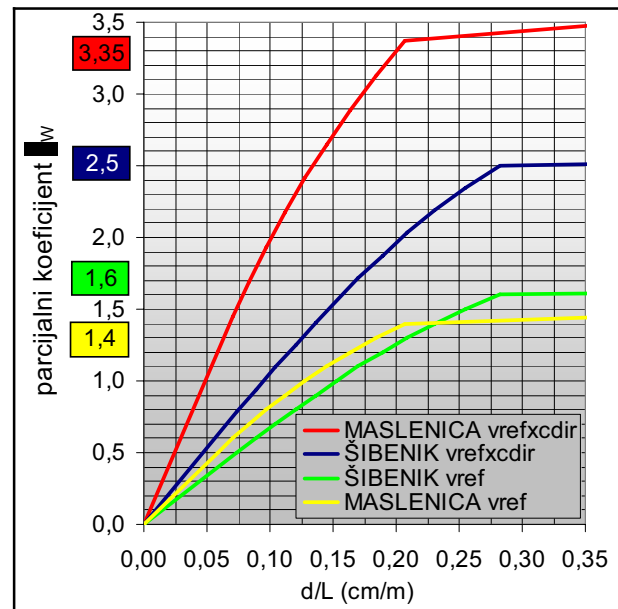
Valja istaknuti da je proračunska usporedna brzina  $v_{ref}$  dobivena na temelju uzorka maksimalnih 10-minutnih brzina vjetra kojima odgovara prevladavajući smjer djelovanja vjetra [2]. Tako su npr. za Maslenički most najveće 10-minutne brzine tijekom godine smjera N, NE ili NNE, pri čemu je upravo najveća godišnja 43,5 m/s smjera NNE.



Slika 3. Usporedne brzine za približno poprečne vjetrove te smjerovi dominantnih vjetrova u odnosu na smjer pružanja osi Masleničkog mosta

S druge strane, u sklopu studije koja je rezultirala izradom karte usporednih brzina vjetra [2] određeni su koeficijenti korekcije  $c_{DIR}$  za različite smjerove vjetra iako ti koeficijenti nisu uvršteni u nacionalni dodatak za primjenu hrvatske norme [10]. Za Maslenički most koeficijent  $c_{DIR}$  iznosi 1,0 za smjer vjetra NE, 0,92 za smjer vjetra NNE, 0,55 za smjer vjetra N, a za sve ostale

smjerove je manji od vrijednosti 0,5. Za područje P9 južnojadranskog priobalja u okviru kojeg promatramo Šibenski most koeficijent smjera je 1,0 za smjer vjetra NNE, 0,85 za smjer vjetra NE, zatim 0,81 za smjer ESE i 0,89 za smjer SE.



Slika 4. Utjecaj smjera vjetra na rezultate drugog koraka ocjene graničnih stanja nosivosti Šibenskog i Masleničkog mosta

Ovi nam podaci daju prevladavajuće smjerove djelovanja vjetra maksimalne usporedne brzine. Na slici 6. ski ciran je osnovni smjer pružanja osi Masleničkog mosta i smjerovi dominantnih vjetrova. Za Maslenički most usporedna brzina koju primjenjujemo u proračunu odgovara pretežno smjeru vjetra između NE i NNE koji djeluje pod kutom približno  $40^\circ$  u odnosu na os mosta.

Za Šibenski most u području djelovanja vjetra P9 promotri smo i vjetar dominantnog smjera između NNE i NE te vjetar dominantnog smjera između SE i ESE. Dominantno će biti djelovanje vjetra smjera između NNE i NE koji djeluje pod kutom  $53^\circ$  u odnosu na os Šibenskog mosta.

U radu [14] ispitan je i utjecaj smjera djelovanja vjetra na mostove, kako bi se dobili realni učinci vjetra na naše postojeće mostove. Usporedne brzine vjetra  $v_{ref}$  iz nacionalnog dokumenta za primjenu umanjene su koeficijentom  $c_{DIR}$  koji odgovara sinusu kuta djelovanja vjetra na os pojedinog mosta.

Na slici 7. prikazani su rezultati nelinearnog proračuna Šibenskog i Masleničkog mosta zbog povećanja vjetrovog opterećenja za punu brzinu vjetra ( $v_{ref}$ ) i reduciranu brzinu vjetra s obzirom na smjer djelovanja ( $v_{ref} \times c_{dir}$ ). Dijagram opterećenje-pomak prikazan je slikovitijim odnosom parcijalnog koeficijenta na vjetar  $\gamma_w$  i odnosom pomaka luka u tjemenu izraženog u centimetrima te raspona luka izraženog u metrima  $d/L$ .

### 3.3 Ocjena graničnih stanja postojećih lukova na djelovanje vjetra

Izdvajamo ovdje rezultate ocjenjivanja graničnih stanja Šibenskog i Masleničkog mosta. Šibenski most proračunat je prema PTP-5 na pritisak vjetra od 2,5 kN/m<sup>2</sup> bez prometnog opterećenja, a Maslenički prema DIN 1072 na pritisak vjetra ovisan o visini nad terenom (do 20 m: 1,75 kN/m<sup>2</sup>; od 20 do 50 m: 2,1 kN/m<sup>2</sup>; preko 50 m: 2,5 kN/m<sup>2</sup>). U prvom koraku ocjenjivanja, uz primjenu novije europske norme [5], Šibenik ne zadovoljava uvjet graničnog stanja nosivosti u području uz petu 22 % *L* obostrano, a Maslenica u području 16 % *L* od pete obostrano (*L* je raspon luka). Uvjet graničnog stanja uporabljivosti Šibenski most ne zadovoljava u području 6 % *L* uz petu obostrano, a Maslenica ga zadovoljava po cijelom rasponu luka. Kada se usporedna brzina korigira s obzirom na smjer vjetra, granična stanja Masleničkog mosta ocjenjujemo zadovoljavajućim, dok Šibenski most i dalje ne zadovoljava ni što se tiče nosivosti ni što se tiče uporabljivosti.

U drugom koraku ocjenjivanja, na temelju nelinearnog proračuna, granična stanja Šibenskog mosta, uzimajući u obzir korekciju s obzirom na smjer vjetra, zadovoljavaju.

Za Maslenički most sljedeći koraci ocjenjivanja nisu ni potrebni, ali smo ih proveli za usporedbu pouzdanosti dvaju mostova.

Tablica 4. Rezultati ocjene graničnih stanja Šibenskog i Masleničkog luka na djelovanje vjetra trima koracima

Koraci ocjenjivanja	Šibenik	Maslenica
<b>1. ocjena</b>		
GSN $A_{s,djelotvorno}/A_{s,potrebna} = 1,0$	NE	DA
GSU $\sigma_{c,granič}/\sigma_c \geq 1,0$	NE	DA
Ukupna ocjena	NE	DA
<b>2. ocjena</b>	<b>potrebna</b>	<b>nepotrebna</b>
GSN $\gamma_{w,GSN} \geq \gamma_{w,EC} = 1,5$	2,5 > 1,5 DA	3,35 > 1,5 DA
GSU $\gamma_{w,GSU} \geq 1,0$	1,22 > 1,0 DA	2,05 > 1,0 DA
Ukupna ocjena	DA	DA
<b>3. ocjena</b>	<b>nepotrebna</b>	<b>nepotrebna</b>
GSN $\beta(\gamma_{w,GSN}) \geq \beta_{ciljano,GSN}$	4,70 > 2,6 DA	6,12 > 2,6 DA (6,12)
GSU ( $\beta$ ) $\beta(\gamma_{w,GSU}) \geq \beta_{ciljano,GSU}$	1,28 > 0 DA	3,78 > 0 DA
Ukupna ocjena	DA	DA

### 4 Ocjenjivanje lukova na potresno djelovanje

Razvijen je i postupak ocjene graničnog stanja nosivosti luka u seizmičkoj proračunskoj situaciji [14]. Dijagram toka sličan je onome prikazanom na slici 5. za ocjenjivanje na djelovanje vjetra, a razlike u proračunima navodimo u nastavku teksta.

U prvom koraku na modelu mosta s upisanom djelotvornom ugrađenom armaturom provodi se linearni višemodalni proračun odziva [7, 8]. Ako se proračunom ne utvrdi potreba za većom ploštinom armature u presjecima (uvjet:  $A_{s,djelotvorno}/A_{s,potrebna} = 1,0$ ), granično stanje nosivosti luka u seizmičkoj proračunskoj situaciji je zadovoljeno i nisu potrebne daljnje provjere.

U protivnom kreće se u nelinearni proračun kojim se uzima u obzir i mogućnost preraspodjele naprezanja. Proračunom postupnog guranja analizom ili statičkim nelinearnim proračunom utvrđuje se do koje razine lukovi mogu podnijeti seizmičko djelovanje – utvrđuju se parcijalni koeficijenti na seizmičko opterećenje posebno za uzdužni  $\gamma_{Ex}$  i posebno za poprečni smjer  $\gamma_{Ey}$ . Ako su najmanje jednaki onima koje traži norma za proračune, onda možemo utvrditi da su granična stanja zadovoljena te nisu potrebne daljnje provjere. Uvjeti su dani izrazima:

$$\gamma_{Ex}(d_{E,x}=d_{T,x}) \geq 1,0; \gamma_{Ey}(d_{E,y}=d_{T,y}) \geq 1,0 \quad (24)$$

a detaljniji opis metode i parametara u točki 4.1.

Ako su parcijalni koeficijenti manji od 1,0 valja krenuti i u treći korak procjene indeksa pouzdanosti na temelju dobivenih parcijalnih koeficijenata iz prethodnog koraka i probabilističkog modela seizmičkog opterećenja (ovaj se korak u radu [14] nije razmatrao, nego se predlaže kao nastavak ovog istraživanja). Ako su dobivene vrijednosti indeksa pouzdanosti najmanje jednake ciljanim vrijednostima, zaključili bismo da konstrukcija seizmičko opterećenje podnosi s dovoljnom pouzdanošću te nije potrebna intervencija. U protivnom potrebne su mjere za osiguranje dovoljne seizmičke pouzdanosti.

#### 4.1 Nelinearni proračun postupnog guranja

Proračun postupnog guranja (engl. *pushover*) predstavlja suvremenu verziju klasičnog proračuna do sloma [18]. Provodi se iterativni postupak rješavanja statičkih jednadžbi ravnoteže, kako bi se dobio odzivkonstrukcije s konstantnim vertikalnim opterećenjem izložene monotono rastućem bočnom opterećenju. Proračunava se otpornost konstrukcije i matrica krutosti se obnavlja u svakom koraku funkcije opterećenja do konvergencije.

Za konstrukcije mostova [8] nelinearna statička analiza provodi se u dva horizontalna smjera:

- uzdužnom smjeru *x* definiranom težištima dvaju krajnjih presjeka rasponskoga sklopa i
- poprečnom *y* koji je okomit na uzdužni smjer.

Proračun se provodi u oba horizontalna smjera neovisno dok se ne dosegne ciljani pomak u referentnoj točki. Referentnom točkom smatra se središte masa deformiranoga rasponskog sklopa.

Ciljani pomaci za proračun u uzdužnome smjeru  $x$  odnosno u poprečnom smjeru  $y$  iznose:

$$d_{T,x} = d_{E,x}; d_{T,y} = d_{E,y} \quad (25)$$

pri čemu je  $d_{E,x}$  pomak u  $x$  smjeru, u središtu masa deformiranoga rasponskog sklopa dobiven jednakovrijednim linearnim višemodalnim proračunom odziva uz faktor ponašanja  $q = 1,0$  zbog kombinacije djelovanja  $E_x + 0,3E_y$ , a  $d_{E,y}$  pomak u  $y$  smjeru u mjerodavnoj točki proračunat za kombinaciju  $E_y + 0,3E_x$ .

Kada se primjenjuje jednakovrijedni linearni proračun, krutost svakog elementa uzima se jednaka sekantnoj krutosti pod najvećim proračunatim naprezanjima. Za elemente s plastičnim zglobovima ovo je sekantna krutost u teorijskoj točki popuštanja.

Za armiranobetonske elemente mostova projektiranih za duktilno ponašanje, djelotvorna krutost na savijanje u linearnom seizmičkom proračunu (bilo statičkom bilo dinamičkom) procjenjuje se:

- za armiranobetonske stupove kao vrijednost proračunata na osnovi sekantne krutosti u teorijskoj točki popuštanja
- za prednapete ili armiranobetonske raspone kao krutost neraspucanoga betonskog presjeka.

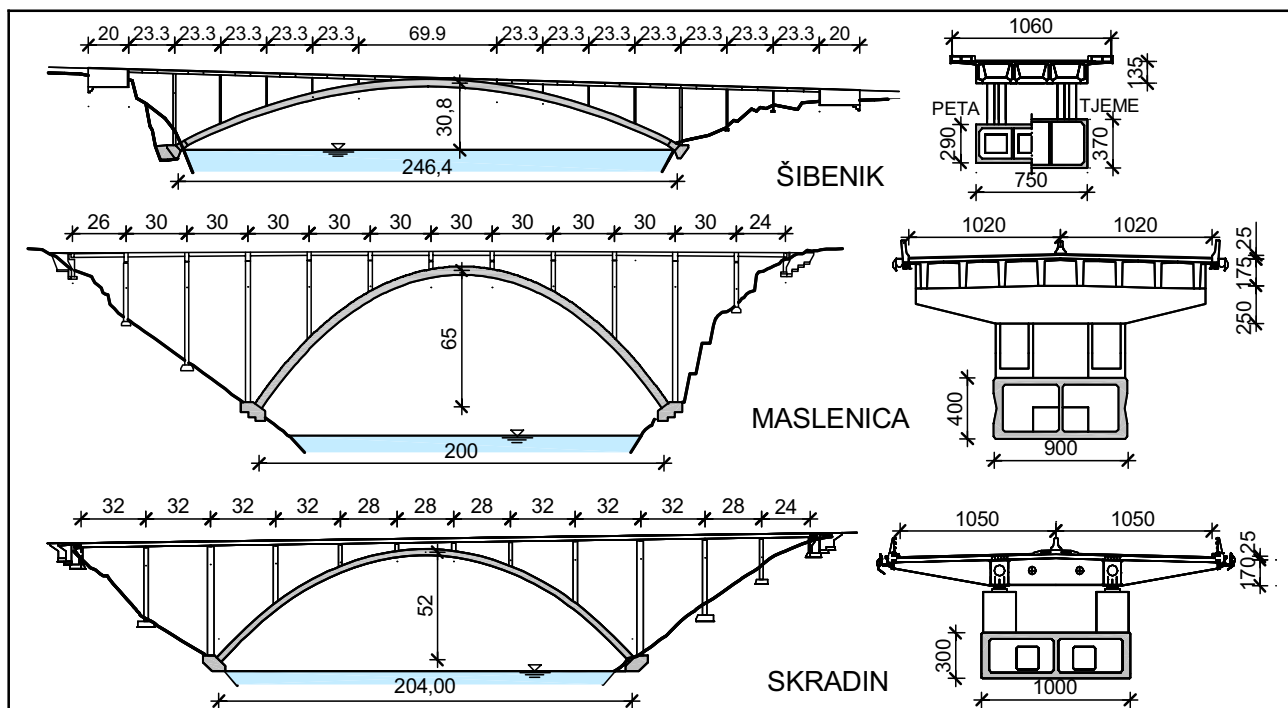
Za mostove koji se projektiraju (ili ocjenjuju) na ograničeno duktilno ponašanje mogu se primjenjivati gore navedena pravila, ali dopušta se i primjena krutosti na savijanje neraspucanog betonskog presjeka za cijelu konstrukciju. Za mostove i s duktilnim i ograničenim duktilnim ponašanjem, bez obzira koje se navedeno pravilo primjenjuje, dobivene pomake valja pomnožiti s odnosom krutosti na savijanje elementa koja je primijenjena u proračunu i krutosti na savijanje koja odgovara razini napreznja koja se proračunom dobije.

#### 4.2 Ocjena graničnog stanja nosivosti postojećih lukova na potresno djelovanje

U radu [14] provedena su ocjenjivanja naših jadranskih lučnih mostova. Izdvajamo ovdje rezultate ocjenjivanja graničnih stanja Šibenskog, Masleničkog i Skradinskog mosta. U prvom koraku, uz primjenu spektara odziva iz vrijedeće hrvatske norme [12], jedino kod luka Skradinskog mosta stvarno ugrađena armatura zadovoljava potrebnu.

I kod Šibenskog i kod Masleničkog mosta proračunom se u određenim područjima luka dobiva veća armatura od postojeće ugrađene armature. Međutim, za proračun u skladu sa spektrima odziva prema novijoj i poboljšanoj europskoj normi [7, 20], jedino u malom području uz petu luka Šibenski most ne zadovoljava.

Drugi je korak ocjene tako nužan za Šibenski most, a za ostala dva provodimo ga zbog usporedbe lukova. Na



Slika 5. Skice uzdužnih i poprečnih presjeka Šibenskog mosta (1966.), Masleničkog mosta (1997.) i Skradinskog mosta (2005.)

temelju rezultata u obliku parcijalnog koeficijenta na potresno djelovanje do kojeg lukovi mogu izdržati u seizmičkoj proračunskoj situaciji vidi se da je Šibenski most, koji nikad nije računat na potres, točno na granici, Maslenički most može izdržati i potresno djelovanje 25 % veće od danas normiranog, dok Skradinski most pokazuje bitno veću pouzdanost na seizmičko djelovanje. Naime, luk Skradinskog mosta je širega poprečnog presjeka, manje visine (manje strelice) te ima povoljniji, lakši spregnuti nadlučni sklop.

Tablica 5. Rezultati ocjene graničnog stanja nosivosti Šibenskog, Masleničkog i Skradinskog luka na djelovanje potresa dvama koracima

Koraci ocjenjivanja	Šibenik	Maslenica	Skradin
1. ocjena			
GSN $A_{s,djelotvorno}/A_{s,potrebna} = 1,0$	NE	DA	DA
2. ocjena	potrebna	nepotrebna	nepotrebna
GSN $\gamma_{Ex} \geq 1,0; \gamma_{Ey} \geq 1,0$	1,0 = 1,0 DA	1,25 > 1,0 DA	1,55 > 1,0 DA

## 5 Moguće primjene i razvoj postupaka

Postupak ocjene graničnih stanja razvijen za nadlučne sklopove može se primjenjivati općenito pri ocjeni raskopskih sklopova grednih mostova na prometno djelovanje. Postupak je moguće dopuniti uključivanjem vrijednosti dinamičkih faktora određenih za točno promatranu konstrukciju. Naime, dinamički faktor može bitno ovisiti o stanju kolnika, a može znatno utjecati pri ocjenjivanju mostova manjih raspona. Uključivanjem tehnika za mjerenje prometa u hrvatsku praksu (Weight-In-Motion, [16]) može se još uže lokalizirati stvarno prometno opterećenje na promatranom mostu koji nije prošao prethodne ocjene.

## LITERATURA

- [1] Bailey, S.F.: *Basic Principles and Load Models for the Structural Safety Evaluation of Existing Road Bridges*, Thèse No 1467, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1996.
- [2] Bajić, A., Vučetić, V.: *Studija: Karta referentne brzine vjetra na području Republike Hrvatske*, Državni hidrometeorološki zavod Republike Hrvatske, Zagreb, svibanj 2004.
- [3] *Brojenje prometa na cestama Republike Hrvatske*, Hrvatske ceste d.o.o., Zagreb, 1999-2007.
- [4] EN 1990: *Basis of structural design*, European Committee for Standardization, Bruxelles, April, 2002
- [5] EN 1991-1-4: *Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions*, European Committee for Standardization, Bruxelles, April 2005.
- [6] EN 1991-2: *Actions on structures: Traffic loads on bridges*, European Committee for Standardization, Bruxelles, September 2003.
- [7] EN 1998-1: *Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, European Committee for Standardization, Bruxelles, December 2004
- [8] EN 1998-2: *Design of structures for earthquake resistance Part 2: Bridges*, European Committee for Standardization, Bruxelles, November 2005
- [9] Evans, M., Hastings, N.; Peacock, B.: *Statistical Distributions*, 3<sup>rd</sup> ed. J. Wiley and Sons, Inc., New York, 2000.
- [10] HRN ENV 1991-2-4 Eurokod 1: *Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije – 2-4. dio: Djelovanja na konstrukcije – Opterećenje vjetrom (ENV 1991-2-4: 1995)*
- [11] HRN ENV 1991-3 Eurokod 1: *Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije – 3. dio: Prometna opterećenja mostova (ENV 1991-3: 1995)*

Postupak ocjene graničnih stanja razvijen proračunima jadranskih lukova može se primijeniti i pri ocjeni lukova općenito, a moguće ga je primjenjivati i za stupove lučnih i grednih mostova izložene djelovanju vjetra odnosno potresu. Za mostove koji ne prolaze korake opisane u ovom radu potrebno je detaljnije analizirati djelovanje vjetra na danju lokaciji mosta te primijeniti točnije metode proračuna vjerojatnosti otkazivanja konstrukcija i prikladne računalne programe. Moguće je analizom stvarnog djelovanja vjetra na lokaciji svakog pojedinog mosta utvrditi drukčiju raspodjelu, manju varijancu, a time i veći indeks pouzdanosti. Za mostove koji ne prolaze korake seizmičkog proračuna valja napraviti detaljnija ispitivanja seizmičkih karakteristika na danju lokaciji mosta, a moguće je i proširivanje na treći korak ocjene pouzdanosti slično kao pri ocjenjivanju na djelovanje vjetra, za što su potrebna daljnja istraživanja [19].

Kada se ocjenjuje stanje postojećeg mosta, konzervativizam proračunskih modela opterećenja i otpornosti iz normi za projektiranje novih mostova može prouzročiti nepotrebno velike troškove održavanja. U ovom radu prikazan postupak ocjene postojećih mostova u više koraka kojima se složenost, a time i točnost, povećava, prikladan je za ocjenjivanje stanja mostova općenito. Naime ako most zadovoljava već prvi korak, daljnji složeniji postupci nisu potrebni. U suprotnom treba primijeniti u složeniji postupak ocjene – sljedeći korak proračuna u kojem se više približavamo stvarnim vrijednostima djelovanja i otpornosti konstrukcije.

Važno je naglasiti da se u sklopu gospodarenja mostovima može utvrditi ciljana vrijednost indeksa pouzdanosti za sve mostove na nekoj prometnici u cilju ostvarenja jednake razine pouzdanosti svih građevina. Predloženim postupkom ocjene pouzdanosti mogu se odrediti – most s najmanjom razinom pouzdanosti trebao bi biti prvi na redu u planiranju održavanja.

- [12] HRN ENV 1998-1-1 Eurokod 8: *Projektiranje konstrukcija otpornih na potres* – 1-1. dio: Opća pravila – Potresna djelovanja i opći zahtjevi za konstrukcije (ENV 1998-1-1: 1994)
- [13] Joint Committee of Structural Safety. Probabilistic Model Code, 2001., <http://www.jcss.ethz.ch/>
- [14] Mandić, A.: *Granična stanja postojećih mostova*, disertacija, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2008.
- [15] Markulak, D.: *Probabilistička ocjena razine sigurnosti cestovnih spregnutih mostova*, disertacija, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2001.
- [16] O'Connor, A., Eichinger, E. M.: *Site-specific Traffic Load Modelling for Bridge Assessment*, Bridge Engineering 160 Issue BE4, 2007., 185 – 194
- [17] O'Connor, A., O'Brien, E.J.: *Traffic Load Modelling and Factors Influencing the Accuracy of Predicted Extremes*, Canadian Journal of Civil Engineers, (32), 2005., 270-278.
- [18] Pecker, A. (editor): *Advanced earthquake engineering analysis, International Centre for Mechanical Sciences, CISM Courses and Lectures No. 494.*, 2007.
- [19] Pinto, P.E., Giannini, R., Franchin, P.: *Seismic Reliability Analysis of Structures*, IUSS Press, Pavia – Italy, 2004.
- [20] Šavor, Z., Radić, J., Mandić, A.: *Neke usporedbe hrvatskih i europskih norma za djelovanja*, Građevinar 58 (2006) 8, str. 641 – 648
- [21] Vrouwenvelder, T.: *Reliability Based Code Calibration – The use of the JCSS Probabilistic Model Code*, Joint Committee on Structural Safety, Paper for the Workshop on Code Calibration, 2002.