

# Pouzdanost saćastih nosača na bočno-torzijsko izvijanje

---

**Tkalčević, Višnja; Džeba, Ivica; Androić, Boris**

*Source / Izvornik:* **Građevinar, 2007, 59, 311 - 318**

**Journal article, Published version**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:764578>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-13**

*Repository / Repozitorij:*

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



# Pouzdanost sačastih nosača na bočno-torzijsko izvijanje

Višnja Tkalčević, Ivica Džeba, Boris Androić

## Ključne riječi

sačasti nosač,  
bočno-torzijsko izvijanje,  
pokus,  
Eurokod 3,  
pouzdanost,  
linija izvijanja

## Key words

castellated beam,  
lateral-torsional buckling,  
test,  
Eurocode 3,  
reliability,  
buckling curve

## Mots clés

poutre ajourées,  
flambement latéral par  
torsion, essai,  
Eurocode 3,  
fiabilité,  
ligne de flambement

## Ключевые слова

сотовая балка,  
боково-крутящий изгиб,  
эксперимент,  
Еврокод 3,  
надёжность,  
линия изгиба

## Schlüsselworte

Wabenträger,  
seitliche  
Torsionsknickung,  
Versuch,  
Eurocode 3,  
Zuverlässigkeit,  
Knickungslinie

V. Tkalčević, I. Džeba, B. Androić

Izvorni znanstveni rad

## Pouzdanost sačastih nosača na bočno-torzijsko izvijanje

Linija izvijanja za određivanje otpornosti sačastih nosača na bočno-torzijsko izvijanje u Eurokodu 3 nije jednoznačno određena. Prikazani su rezultati vlastitih laboratorijskih ispitivanja na temelju kojih je na probabilističkoj razini istražena veličina indeksa pouzdanosti  $\beta$  u odnosu na ciljanu vrijednost za klasu konstrukcija RC2 primjenom sve četiri linije izvijanja. Utvrđene su linije izvijanja (b i c) prikladne za određivanje bočno-torzijske otpornosti sačastih nosača.

V. Tkalčević, I. Džeba, B. Androić

Original scientific paper

## Reliability of castellated beams subjected to lateral-torsional buckling

The buckling curve that defines resistance of castellated beams to lateral-torsional buckling has not been unambiguously defined in Eurocode 3. The authors present laboratory results on the basis of which the reliability index  $\beta$  was defined on the probabilistic level in relation to target value for structural category RC2, using all four of buckling curves. The buckling curves (b and c) have been determined as appropriate for defining lateral-torsional resistance of castellated beams.

V. Tkalčević, I. Džeba, B. Androić

Ouvrage scientifique original

## Fiabilité des poutres ajourées soumises au flambement latéral par torsion

La ligne de flambement définissant la résistance des poutres ajourées au flambement latéral par torsion n'a pas été définie sans ambiguïté dans l'Eurocode 3. Les auteurs présentent les résultats de laboratoire sur la base desquels l'indice de fiabilité  $\beta$  a été défini au niveau probabiliste en relation avec la valeur cible pour la catégorie structurelle RC2, en utilisant toutes les quatre lignes de flambement. Les lignes de flambement (b et c) ont été établies comme appropriées pour la définition de résistance latérale par torsion des poutres ajourées.

В. Ткалчевич, И. Джебa, Б. Андроиц

Оригинальная научная работа

## Надёжность сотовых балок на боково-крутящий изгиб

Линия изгиба для определения сотовых балок на боково-крутящий изгиб в Еврокоде 3 не определена однозначно. Показаны результаты собственных лабораторных испытаний, на основании которых на вероятностическом уровне исследована величина индекса надёжности  $\beta$  по отношению к нацеливаемому значению для класса конструкций RC2 применением всех четырёх линий изгиба. Утверждены линии изгиба (b и c), подходящие для определения боково-крутящего сопротивления сотовых балок.

V. Tkalčević, I. Džeba, B. Androić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

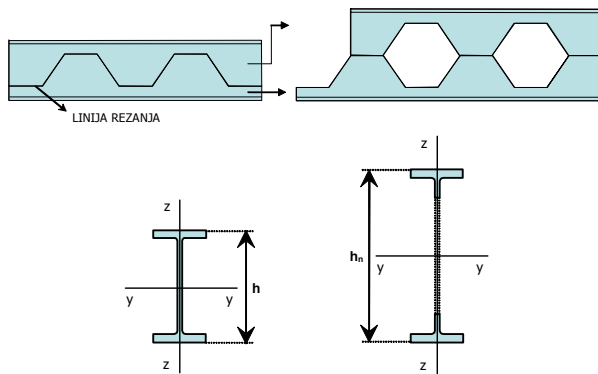
## Zuverlässigkeit von Wabenträgern gegen seitliche Torsionsknickung

Die Knickungslinie für die Festlegung der Beständigkeit von Wabenträgern gegen seitliche Torsionsknickung ist im Eurocode 3 nicht eindeutig festgelegt. Dargestellt sind Ergebnisse eigener Laboruntersuchungen auf Grund deren man auf probabilistischem Niveau die Größe der Zuverlässigkeitsbeiwerts  $\beta$  im Verhältnis zum gezielten Wert für die Konstruktionsklasse RC2 erforschte, unter Anwendung aller vier Knickungslinien. Festgelegt sind Knickungslinien (b und c) geeignet für die Bestimmung der Beständigkeit von Wabenträgern gegen seitliche Torsionsknickung.

Autori: Dr. sc. **Višnja Tkalčević**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Ivica Džeba**, dipl. ing. građ.;  
prof. dr. sc. **Boris Androić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

1 Uvod

Sačasti se nosači ugrađuju u konstrukcije gdje su izloženi pretežno naprezanjima savijanjem. Kako se izrađuju razrezivanjem hrpta punostijelih profila te ponovnim spajanjem zavarivanjem odrezanih polovica nosača u jednu cjelinu, dolazi do povećanja visine u odnosu na izvorne profile (slika 1.). Pritom je problem bočne stabilnosti sačastih nosača izraženiji nego kod punostijelih nosača od kojih se izrađuju. Naime, povećanje visine znatno povećava moment tromosti oko jače osi poprečnog presjeka  $I_y$ , dok moment tromosti oko njegove slabije osi  $I_z$  ostaje gotovo isti. To rezultira većom otpornošću na savijanje, pri čemu se smanjuje bočna stabilnost cijelog elementa.



Slika 1. Izrada sačastog nosača od punostijelog I profila

Osim toga, otvori u hrptu dodatno smanjuju torzijsku krutost poprečnog presjeka pa se smanjuje veličina torzijske konstante  $I_T$ , dok se konstanta krivljenja  $I_w$  povećava. Proračun otpornosti sačastih nosača na bočno-torzijsko izvijanje uobičajeno se provodi tako da se prilagođavaju izrazi koji vrijede za punostijene I nosače. Pritom se primjenjuju geometrijske i statičke karakteristike poprečnog presjeka na mjestu otvora sačastog nosača. Na takav je način ovaj problem otkazivanja obuhvaćen i u Eurokodu 3 [1] i [2]. Međutim, ostaje otvoreno pitanje mjerodavne linije izvijanja za sačaste nosače, koji se ne mogu ubrojiti niti u valjane profile, ali ni u uobičajene zavarene I presjeke.

2 Otpornost na bočno-torzijsko izvijanje prema Eurokodu 3 [2]

2.1 Općenito

Dokaz pouzdanosti s obzirom na bočno-torzijsko izvijanje prema EN 1993-1-1:2005 [2] provodi se prema izrazu:

$$M_{y,Ed} \leq M_{b,Rd} = \frac{M_{b,Rk}}{\gamma_{M1}} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (1)$$

gdje je:

$M_{y,Ed}$  - proračunski moment savijanja od vanjskog djelovanja

- $M_{b,Rd}$  - proračunski moment otpornosti elementa na bočno-torzijsko izvijanje
- $M_{b,Rk}$  - karakteristični moment otpornosti elementa na bočno-torzijsko izvijanje
- $\chi_{LT}$  - faktor redukcije za bočno-torzijsko izvijanje
- $W_y$  - elastični ili plastični moment otpora poprečnog presjeka na mjestu otvora sačastog nosača, ovisno o klasi poprečnog presjeka
- $f_y$  - granica popuštanja čelika
- $\gamma_{M1}$  - parcijalni faktor za otpornost elementa, prema [2]  $\gamma_{M1} = 1,0$

Faktor redukcije za sačaste nosače  $\chi_{LT}$  određuje se prema izrazu:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1$$

gdje je:

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$\alpha_{LT}$  - koeficijent imperfekcije koji ovisi o odabiru linije izvijanja,

$\bar{\lambda}_{LT}$  - svedena je vitkost dana izrazom:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

$M_{cr}$  - elastični kritični moment za bočno-torzijsko izvijanje.

2.2 Mjerodavna linija izvijanja

Prema Eurokodu 3 [2] linija izvijanja ovisi o tipu profila (valjani, zavareni i drugi tipovi profila) te odnosu visine nosača i širine pojasnice  $h_w/b_f$  (tablica 1.). Vrijedi napomenuti da Eurokod 3 kao EN norma [2] propisuje strože linije izvijanja nego što je to bilo dano ENV verzijom [3]. Problem je što za sačaste nosače nije jednoznačno određena mjerodavna linija izvijanja.

Tablica 1. Mjerodavne linije izvijanja pri bočno-torzijskom izvijanju prema [2] i [3]

Eurokod 3	Tip profila	Ograničenja	Linija izvijanja
ENV 1993: 1-1:1992 [3]	valjani		<b>a</b>
	zavareni		<b>c</b>
EN 1993: 1-1:2005 [2]	valjani	$h_w/b_f \leq 2$	<b>a</b>
		$h_w/b_f > 2$	<b>b</b>
	zavareni	$h_w/b_f \leq 2$	<b>c</b>
		$h_w/b_f > 2$	<b>d</b>
drugi tipovi profila		<b>d</b>	

Neosporna je činjenica da se sačasti nosači izrađuju zavarivanjem pa bi se prema tom kriteriju mogli ubrojiti u grupu zavarenih nosača. Međutim, mjesto zavarivanja (područje nulte linije poprečnog presjeka) ima znatno drugačije učinke od zavarivanja klasičnih I nosača sastavljenih od limova. Poznato je da na problem bočno-torzijskog izvijanja, između ostalog, znatno utječu vlastita naprezanja, razina kojih je zacijelo niža nego kod uobičajenih zavarenih I profila, ali je i viša od valjanih profila. S druge strane, geometrijske imperfekcije su, zbog načina izrade sačastih nosača, veće nego kod valjanih profila i vjerojatno su puno bliže imperfekcijama koje odgovaraju zavarenim profilima.

U svrhu pouzdanog određivanja mjerodavne linije izvijanja za bočno-torzijisku otpornost sačastih nosača opterećenih na savijanje morala su se provesti istraživanja na probabilističkoj razini u odnosu na ciljane veličine indeksa pouzdanosti  $\beta$  za odgovarajući razred konstrukcija.

### 3. Opseg istraživanja na probabilističkoj razini za odabir mjerodavne linije izvijanja

Sačasti se nosači u visokogradnji uglavnom rabe u građevinama konstrukcije kojih se mogu svrstati u razred RC2 prema [5]. Ciljana veličina indeksa pouzdanosti  $\beta$  u tom je slučaju 3,8. Za provedbu postupka kalibracije odabrane su četiri namjene sačastih nosača u visokogradnji: za krovne nosače u dva različita područja opterećenja snijegom te za međukatnu konstrukciju za dvije različite namjene što se tiče uporabnog opterećenja [6].

Formirane su jednadžbe graničnog stanja s ukupno 15 baznih varijabli (8 na strani otpornosti i 7 na strani djelovanja) i 6 konstanti:

$$R(X_1; X_2; \dots; X_7; X_8; C_1; \dots; C_6) - E(X_{09}; X_{10}; \dots; X_{15}) = 0$$

gdje je:

$R$  - funkcija otpornosti

$E$  - funkcija učinaka djelovanja

$X_i$  - bazne varijable

$C_i$  - konstante.

Svaka jednadžba graničnog stanja jest vrlo kompleksan funkcijski izraz budući da je morala biti napisana u zatvorenom obliku te je u nju ugrađen složeni izraz za elastični kritični moment za bočno-torzijско izvijanje  $M_{cr}$ , dok su linije izvijanja opisane analitički.

Već su preliminarna istraživanja pokazala važnost faktora korekcije proračunskog modela otpornosti  $b$ , koji predstavlja omjer stvarne otpornosti nosača na bočno-torzijско izvijanje dobiven pokusom u odnosu na teorijsku karakterističnu otpornost za odabrani računski model otpornosti na temelju mjerenih geometrijskih i

mehaničkih karakteristika. Upravo faktor korekcije proračunskog modela otpornosti  $b$  ima izuzetno visok koeficijent osjetljivosti  $\alpha$  na veličinu indeksa pouzdanosti  $\beta$ , što je bilo razlogom da se rezultatima laboratorijskih ispitivanja daje poseban naglasak pri određivanju statističkih parametara za ovu baznu varijablu. Nažalost, u dostupnim literaturnim izvorima ima vrlo malo podataka o laboratorijskim ispitivanjima sačastih nosača na bočno-torzijско izvijanje [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Kad se eliminiraju podaci o ispitivanjima gdje se nije moglo pouzdano ustanoviti da je otkazivanje nastupilo isključivo bočno-torzijским izvijanjem te gdje geometrija otvora sačastih nosača nije u skladu sa zahtjevima navedenim u [1], tada je preostalo samo još pet takvih ispitivanja [7, 8]. Stoga je zbog navedenih razloga, za potrebe ovog istraživanja, provedeno vlastito laboratorijsko ispitivanje bočno-torzijskog izvijanja na pet sačastih nosača.

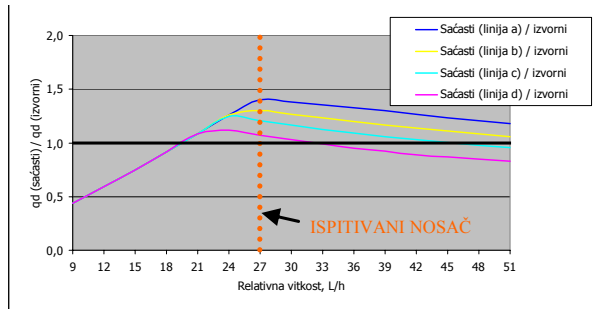
Nakon modeliranja baznih varijabli proveden je postupak kalibracije sačastih nosača za gore navedene četiri namjene u visokogradnji u Hrvatskoj metodama FORM (*First Order Reliability Method*), SORM (*Second Order Reliability Method*) i IS (*Importance Sampling*) [14] uporabom kompjutorskog programa COMREL-TI (*Component Reliability - Time Invariant*), koji je sastavni dio programskog paketa STRUREL [15].

### 4 Laboratorijska ispitivanja sačastih nosača opterećenih na savijanje

#### 4.1 Odabir dimenzija uzoraka za ispitivanje

Dimenzije nosača i razmak točaka bočnih pridržanja odabrani su unutar područja ekonomične primjene sačastih nosača u kojem se očekivalo da će nosači otkazati bočno-torzijским izvijanjem, a ne na neki drugi način. Isto tako, uzete su u obzir i mogućnosti ispitivanja u laboratoriju. Za ispitivanje je odabran sačasti nosač statičkog sustava grede na dva ležaja, koji je bočno viličasto pridržan na osloncima i u polovici raspona. Analizirani sačasti nosač bio je izrađen od izvornoga punostijenog profila IPE 120, a imao je pravilne šesterokutne otvore i visinu 50% veću nego izvorni I profil. Odabrani nosač zadovoljava uvjete za svrstavanje u grupu sačastih nosača s odnosom  $h_n/b_f > 2$ .

Parametarskim analizama svih mogućih načina otkazivanja sačastih nosača prema graničnom stanju nosivosti i graničnom stanju uporabivosti, s viličastim bočnim pridržanjima na osloncima i u sredini raspona, pokazano je da je područje ekonomične primjene takvih nosača u odnosu na izvorne punostijene za relativne vitkosti nosača  $L/h = 21$  do 30 [6], gdje je  $L$  ukupna duljina nosača, a  $h$  visina izvornog profila (slika 2.).

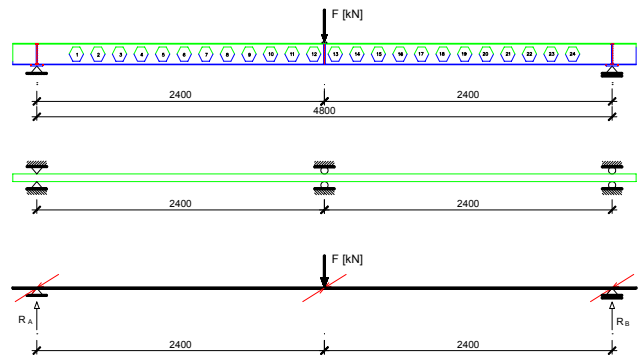


Slika 2. Odnos nosivosti sačastih i izvornih nosača IPE 120 prema uvjetima graničnog stanja nosivosti

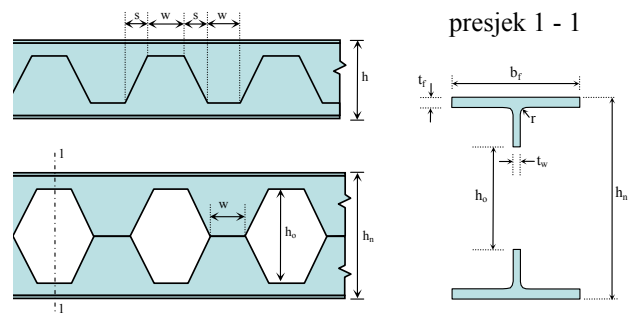
Na temelju rezultata provedenih parametarskih analiza, za laboratorijsko ispitivanje odabran je sačasti nosač raspona 4,8 m ( $L/h \approx 27$ ). Osim toga, provedene analize [4] pokazale su isplativost primjene sačastih nosača samo s najvećom veličinom otvora u hrptu s obzirom na ograničenja definirana prema [1].

Ispitivanjem u laboratoriju bila je obuhvaćena serija od pet sačastih nosača izrađenih od iste grupe profila IPE 120, istih nazivnih dimenzija (slika 3.) i nazivne kvalitete čelika S275. Geometrija sačastih nosača određena je u skladu sa zahtjevima navedenim u [1]. Nosači su bili statičkog sustava grede na dva ležaja opterećeni na savijanje koncentriranom silom u sredini raspona, a bočna su se pridrzanja nalazila na osloncima i na mjestu unosa koncentrirane sile. Hrptovi su bili ukrućeni čeličnim limom debljine 10 mm na mjestu oslonaca te u polovici raspona na mjestu unosa opterećenja, kako bi se spriječilo otkazivanje izbočavanjem hrpta. Prije ispitivanja

izmjerene su sve relevantne geometrijske i mehaničke karakteristike uzoraka koje su prikazane u tablicama 2. i 3. Oznake su prikazane na slici 4.



Slika 3. Uzorak sačastog nosača s uvjetima oslanjanja i unosom opterećenja



Slika 4. Oznake vezane uz geometriju sačastih nosača

Tablica 2. Geometrijske karakteristike uzoraka

Oznaka sačastog nosača			CB-1	CB-2	CB-3	CB-4	CB-5	Nazivne vrijednosti
Izvorni punostijeni nosač			IPE 120	IPE 120	IPE 120	IPE 120	IPE 120	
Raspon sačastog nosača	$L_{uk}$	cm	479,6	479,9	479,7	479,7	479,8	480
Razmak točaka bočnih pridrzanja	L	cm	240	240,2	240,1	240,1	240,2	240
Visina sačastog nosača	$h_n$	cm	18,313	17,9967	18,08	18,153	18,19	18
Visina izvornog nosača	h	cm	12,173	11,942	12,015	12,093	12,125	12
Širina pojasnice	$b_f$	cm	6,385	6,45	6,47	6,497	6,397	6,4
Debljina hrpta	$t_w$	cm	0,446	0,447	0,446	0,442	0,448	4,4
Debljina pojasnice	$t_f$	cm	0,644	0,644	0,655	0,653	0,646	6,3
Polumjer zaobljenja	r	cm	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Duljina horizontalnog proreza	w	cm	6,088	6,243	6,11	6,11	6,155	6
Duljina kosine po horizontali	s	cm	2,931	2,829	2,95	2,94	2,923	3
Visina otvora	$h_0$	cm	12,28	12,11	12,13	12,12	12,13	12

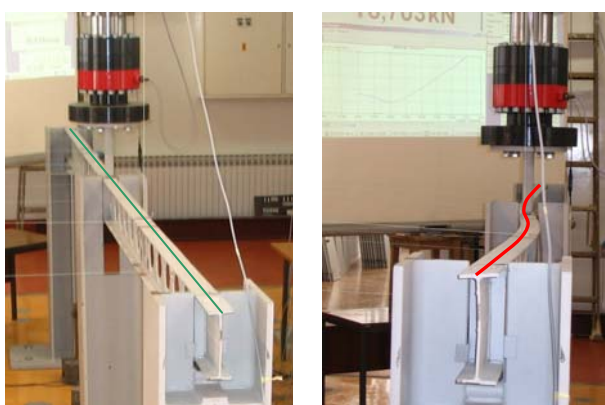
Tablica 3. Granica popuštanja  $f_y$  i čvrstoća  $f_u$  čelika

Nosač	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]
CB-1	359	460
CB-2	373	469
CB-3	308	429
CB-4	305	423
CB-5	302	424

Također, mjerena su odstupanja uzdužne osi gornje pojasnice sačastih nosača od pravca i ustanovljeno je da se nalaze u području dopuštenih veličina.

#### 4.2 Rezultati provedenih ispitivanja

Ispitivanja su provedena u laboratoriju Zavoda za tehničku mehaniku na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Svi su ispitivani nosači otkazali, kao što se i očekivalo, bočno-torzijskim izvijanjem, pri čemu je deformirana os nosača oblikovala karakterističnu  $S$  liniju (slika 5).



a) Prije ispitivanja

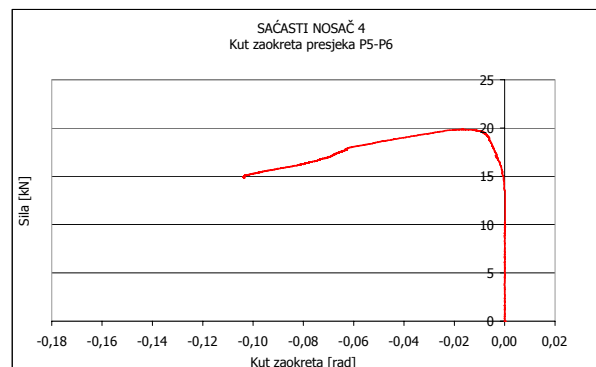
b) U tijeku ispitivanja

Slika 5. Uzorak prije i u tijeku ispitivanja prije otkazivanja

Tijekom ispitivanja mjereni su horizontalni i vertikalni pomaci u više karakterističnih točaka duž raspona uzorka, kao i pripadajuća sila kojom se opterećivao uzorak. Na dijagramu odnosa sile i kuta zaokreta nosača u polovicama razmaka između točaka bočnih pridržanja očitana je najveća sila koju je nosač preuzeo prije otkazivanja (slika 6).

Dobiveni rezultati obrađeni su na razini momenata savijanja, i to za

sve četiri linije izvijanja, zbog potreba nastavka istraživanja na probabilističkoj razini. Cilj je bio odrediti faktor korekcije proračunskog modela otpornosti  $b_i$ . On je definiran odnosom otpornosti dobivene pokusom  $M_{exp}$  i



Slika 6. Promjena kuta zaokreta poprečnoga presjeka sačastoga nosača CB-4 u odnosu prema veličini sile

teorijske otpornosti  $M_{b,Rk}$  prema izrazu (1), a uzima u obzir razliku u ponašanju stvarnog nosača prema usvojenom računskom modelu otpornosti [16, 17]. Dobiveni su rezultati prikazani u tablici 4.

#### 5 Modeliranje baznih varijabla i konstanta

Kao što je već bilo rečeno, najveći utjecaj na indeks pouzdanosti ima bazna varijabla faktora korekcije proračunskog modela otpornosti  $b$ . Kako su sačasti nosači s obzirom na otkazivanja bočno-torzijskim izvijanjem vrlo malo ispitivani, za određivanje statističkih parametara ove bazne varijable iskorišteni su rezultati vlastitih laboratorijskih ispitivanja i rezultati koje je dobio Kerdal [7] i [8].

U tablici 5. je sumarni prikaz statističkih parametara za svaku od uporabljenih baznih varijabla, dok su razlozi usvajanja upravo ovih statističkih parametara detaljnije obrazloženi u [6].

Tablica 4. Faktor korekcije proračunskog modela otpornosti

Nosač	$M_{exp}$ [kNm]	$M_{b,Rk}$ [kNm] prema [2]				$b_i = M_{exp} / M_{b,Rk}$			
		Linija izvijanja				Linija izvijanja			
		a	b	c	d	a	b	c	d
CB-1	29,15	18,82	16,92	15,32	13,27	1,549	1,722	1,902	2,197
CB-2	22,99	19,15	17,23	15,60	13,51	1,200	1,334	1,473	1,702
CB-3	24,15	18,33	16,44	14,86	12,85	1,318	1,470	1,625	1,879
CB-4	23,84	18,37	16,47	14,90	12,88	1,298	1,447	1,601	1,851
CB-5	27,49	17,66	15,84	14,32	12,39	1,557	1,736	1,920	2,220

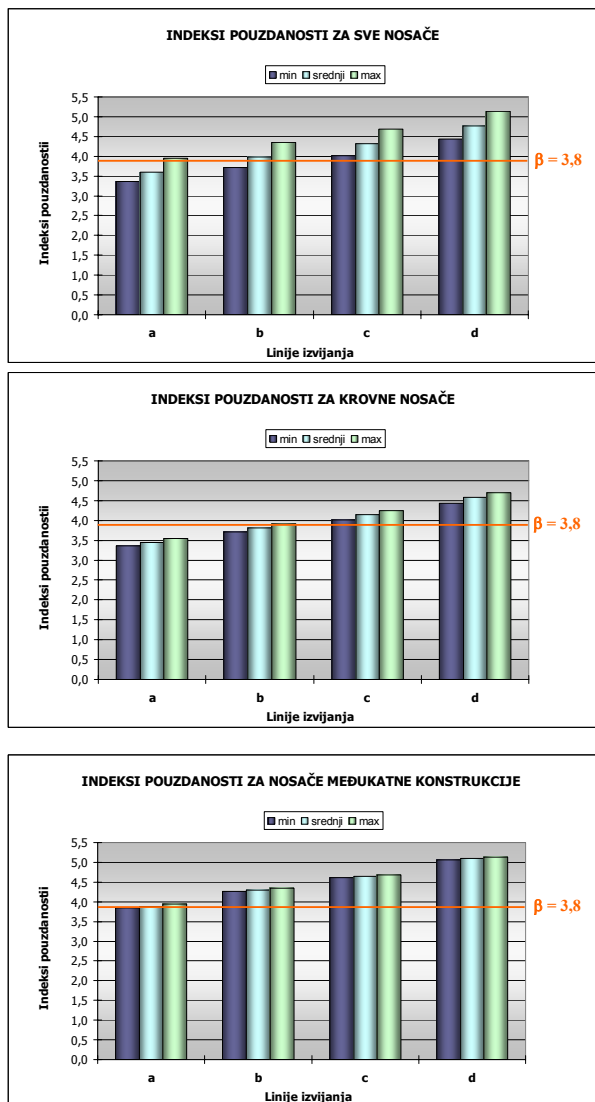
Tablica 5. Statistički parametri baznih varijabla

BAZNE VARIJABLE OTPORNOSTI				Nazivna vrijednost	Srednja vrijednost	Koeficijent varijacije	Distribucija	
X1	faktor korekcije proračunskog modela otpornosti (sva ispitivanja)	linija izvijanja <b>a</b>	<b>b</b>		1,5421	0,1823	normalna	
		linija izvijanja <b>b</b>			1,7033	0,1706		
		linija izvijanja <b>c</b>			1,8722	0,1628		
		linija izvijanja <b>d</b>			2,1517	0,1547		
	faktor korekcije proračunskog modela otpornosti (vlastita ispitanja)	linija izvijanja <b>a</b>			1,3843	0,1157		
		linija izvijanja <b>b</b>			1,5418	0,1157		
		linija izvijanja <b>c</b>			1,7041	0,1158		
		linija izvijanja <b>d</b>			1,9698	0,1159		
X2	granica popuštanja	$f_y$	$N/mm^2$	235	279,65	0,068	log-normalna	
				275	330	0,100		
				355	418,9	0,054		
X3	modul elastičnosti	$E$	$N/mm^2$	210000	216000	0,023	normalna	
X4	moment otpora	$W_y$	$cm^3$		nazivna	0,06	normalna	
X5	moment tromosti oko z-osi	$I_z$	$cm^4$		nazivna	0,06	normalna	
X6	torzijska konstanta	$I_t$	$cm^4$		nazivna	0,06	normalna	
X7	konstanta krivljenja	$I_w$	$cm^6$		nazivna	0,06	normalna	
X8	razmak točaka bočnih pridržanja	$L$	$cm$		nazivna	0,01	normalna	
BAZNE VARIJABLE DJELOVANJA				Nazivna vrijednost	Srednja vrijednost	Koeficijent varijacije	Distribucija	
X9	raspon sačastih nosača	$L_{uk}$	$cm$		nazivna	0,01	normalna	
X10	razmak sačastih nosača	$e$	$cm$		nazivna	0,01	normalna	
X11	vlastita težina sačastih nosača	$g_{k1}$	$kN/m$		nazivna	0,15	normalna	
X12	težina pokrova	$g_{k2}$	$kN/m^2$	lagani	0,3	0,3	0,15	normalna
				teški	1,0	1,0		
X13	vlastita težina AB ploče	$g_{k3}$	$kN/m^2$	3,5	3,5	0,15	normalna	
X14	snijeg	$s_k$	$kN/m^2$	I. područje – 100 mmm	0,872	0,36	0,688	Gumbel
				II. područje – 600 mmm	2,5	1,232		
X15	uporabno opterećenje	$p_k$	$kN/m^2$	prostor za kupovanje	4,0	0,940	0,74	Gumbel
				prostor za skladištenje	5,0	0,965		

## 6 Dobiveni rezultati istraživanja s komentarom

Istraživanje veličine indeksa pouzdanosti  $\beta$  obuhvatilo je ukupno 216 sačastih nosača - po 54 nosača za svaku liniju izvijanja. Dobivene vrijednosti metodom FORM, SORM i IS s 1000 simulacija gotovo su istovjetne, odnosno razlike u veličinama indeksa pouzdanosti su zanemarivo male. Svi su nosači, što je i inače najčešći slučaj kod sačastih nosača, s odnosom  $h_n/b_f > 2$ .

Na slici 7. prikazane su najmanje, srednje i najveće proračunate veličine indeksa pouzdanosti  $\beta$  u odnosu prema ciljanoj vrijednosti 3,8 za razred konstrukcija RC2.



Slika 7. Indeksi pouzdanosti za sačaste nosače u visokogradnji

Vidi se da sačasti nosači kao dio međukatne konstrukcije zgrada iskazuju nešto veće indekse pouzdanosti od krovnih nosača.

Međutim, za ocjenu prikazanih rezultata radi odabira mjerodavne linije izvijanja za bočno-torzijsko izvijanje

trebalo bi postaviti jednoznačan kriterij. Naime, pitanje je trebaju li sve proračunate veličine indeksa pouzdanosti  $\beta$  biti veće od ciljane vrijednosti, ili samo srednja ili neka fraktilirana vrijednost. Znanstvenici - istraživači još nemaju jedinstveno mišljenje o tome pa je u ovom istraživanju postavljen, najvjerojatnije i prestrogo, kriterij da sve proračunate vrijednosti indeksa pouzdanosti moraju biti veće od ciljane vrijednosti 3,8.

Kad bi se mogle odvojeno promatrati međukatne konstrukcije zgrada, tada bi za tu vrstu konstrukcija primjena linije izvijanja *a* bila prihvatljiva. Međutim, kod krovnih konstrukcija postavljeni kriterij zadovoljava tek linija izvijanja *c*. Isti je slučaj i kad se promatraju sve vrste istraživanih konstrukcija zajedno.

Očito je da primjena linija izvijanja *d* propisana eurokodom kod sačastih nosača s odnosom  $h_n/b_f > 2$  daje konstrukcije s većom razinom pouzdanosti od ciljane vrijednosti te da bi na sačaste nosače bila primjenjiva linija izvijanja *c*. Takvo se rješenje i očekivalo s obzirom na usporedbu razine vlastitih naprezanja i početnih geometrijskih imperfekcija valjanih, klasičnih zavarenih i sačastih nosača.

Kako u dostupnoj literaturi ima izrazito malo rezultata laboratorijskih ispitivanja sačastih nosača s obzirom na otkazivanje bočno-torzijskim izvijanjem, ne mogu se donijeti konačni zaključci vezani za primjenu možda još blaže linije izvijanja, pogotovo za odnose  $h_n/b_f \leq 2$ . Međutim, dosadašnji rezultati istraživanja pokazuju da bi za odnose  $h_n/b_f \leq 2$  trebalo primijeniti liniju izvijanja *b*.

Potvrda ovakvog prijedloga dobivena je i istraživanjem veličine parcijalnih faktora  $\gamma_{M1}$  na semiprobabilističkoj razini [6], koja daje inače konzervativnije vrijednosti, odnosno veličine parcijalnih faktora na strani pouzdanosti.

Za moguće još povoljnije korekcije linije izvijanja za bočno-torzijsko izvijanje sačastih nosača rješenje bi trebalo tražiti u većem broju provedenih laboratorijskih ispitivanja. Naime, bazna varijabla korekcije računskog modela otpornosti *b* pokazuje najveću osjetljivost na promjenu veličine indeksa pouzdanosti, a rezultati dostupnih laboratorijskih ispitivanja podliježu relativno velikom osipanju rezultata.

## 7 Zaključak

Provedena istraživanja pouzdanosti sačastih nosača s obzirom na bočno-torzijsko izvijanje za proračunski model otpornosti kakav je dan u Eurokodu 3 [1] pokazuju da su propisane linije izvijanja *c* odnosno *d* za zavarene nosače, u koje bi trebalo ubrojiti i sačaste, prestroge za ciljane vrijednosti indeksa pouzdanosti 3,8 za razred konstrukcija RC2.



Za sačaste nosače s odnosom  $h_w/b_f > 2$ , za koje postoji podloga u provedenim laboratorijskim ispitivanjima, predlaže se primjena linija izvijanja  $c$  umjesto  $d$ . Tako-

đer se očekuje da bi se na sličan način mogla primijeniti linija izvijanja  $b$  umjesto predložene  $c$  za odnose  $h_w/b_f \leq 2$ .

#### LITERATURA

- [1] CEN - European Committee for Standardization (1992): Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, ENV 1993-1-1:1992/A2:1998, Annex N
- [2] CEN - European Committee for Standardization (2005): Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1993-1-1:2005
- [3] CEN - European Committee for Standardization (1992): Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, ENV 1993-1-1:1992
- [4] Tkalčević, V., Džeba, I., Androić, B.: *Proračun sačastih nosača prema Eurokodu 3*, Građevinar 58 (2006) 9, pp. 709-716
- [5] CEN - European Committee for Standardization (2001): Eurocode – Basis of structural design, prEN 1990:2001 (E)
- [6] Tkalčević, V.: *Pouzdanost sačastih nosača iz aspekta bočnog izvijanja*, Disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2006.
- [7] Kerdal, D. E.-D.: *Lateral-torsional buckling strength of castellated beams (Buckling strength)*, Dissertation, University of Sheffield (United Kingdom), 1982.
- [8] Nethercot, D. A.; Kerdal, D.: *Lateral-torsional buckling of castellated beams*; The Structural Engineer, Volume 60B, No. 3, September 1982.
- [9] Toprac, A. A.; Cooke, B. R.: *An experimental investigation of open-web beams*; Welding Research Council Bulletin Series, No.47; New York, 1959
- [10] Kolosowski, J.: *Stresses and deflections in castellated beams*, The Structural Engineer, 42 (1964), pp. 19-24
- [11] Bazile, A.; Texier, J.: *Essais des poutres ajourées*, Construction Métallique, 3 (1968), pp. 12-25
- [12] THE UNITED STEEL CO. LTD., Res. and Dev. Dep., Swinden laboratories, Rotherham, Properties and strengths of castella beams. Consideration of previous tests, Report D. GE. 71/262, 27th April 1957.
- [13] THE UNITED STEEL CO. LTD., Res. and Dev. Dep., Swinden laboratories, Rotherham, Properties and strengths of castella beams. Further tests, Report D. GE. 71/261/1, 26th July 1958.
- [14] Hohenbichler, R.; Rackwitz, R.: *Improvement of second - order reliability estimates by importance sampling*, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.114, 1988, pp. 2195-2199
- [15] STRUREL Manual, RCP GmbH, München, 1992.
- [16] Bijlaard, F. S. K.; Sedlacek, G.; Stark, J. W. B.: *Procedure for the determination of the design resistance from tests*, Faculteit Bouwkunde, Vakgroep Constructie, Technische Universiteit Eindhoven, August 31, 1987., 114 str.
- [17] Kersken-Bradley, M. et al.: *Background document for chapter 2 of Eurocode 3*, Draft, Aachen, Sept. 8, 1987., 29 str.