

ДГКС

Друштво грађевинских
конструктора Србије



ASES

Association of Structural
Engineers of Serbia

SIMPOZIJUM 2016.

ZLATIBOR 15-17. SEPTEMBAR

ZBORNIK RADOVA 2016

U SARADNJI SA



POKROVITELJ



Република Србија
Министарство грађевинарства,
саобраћаја и инфраструктуре
Министарство просвете,
науке и технолошког развоја

SPONZORI



CIP - Каталогизација у публикацији
Библиотека Матице српске, Нови Сад

624(082)

69(082)

ДРУШТВО грађевинских конструктора Србије. Симпозијум (2016 ; Златибор)

Zbornik radova [Elektronski izvori] / Društvo građevinskih konstruktora Srbije, Simpozijum, 15-17. septembar, Zlatibor ; [urednici Đorđe Lađinović, Zlatko Marković, Boško Stevanović]. - Beograd : Društvo građevinskih konstruktora Srbije, 2016. - 1 elektronski optički disk (CD-ROM) ; 12 cm

Radovi na srp. i engl. jeziku. - Bibliografija uz svaki rad. - Rezime na engl. jeziku uz pojedine radove.

ISBN 978-86-7892-839-0

a) Грађевинарство - Зборници

COBISS.SR-ID 308004359

Izdavač: Društvo građevinskih konstruktora Srbije
Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73/I

Urednici: prof. dr Đorđe Lađinović
prof. dr Zlatko Marković
prof. dr Boško Stevanović

Tehnički urednik: doc. dr Jelena Dobrić

Tehnička priprema: asist. Nina Gluhović
asist. Marija Todorović

Gafički dizajn: asist. Tijana Stevanović

Dizajn korica: asist. Jelena Dragaš

Štampa: Grafički centar – GRID
Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu

Tiraž: 250 primeraka

Beograd, septembar 2016.

Aljoša Filipović¹, Jelena Dobrić², Milan Spremić³, Zlatko Marković⁴, Nina Gluhović⁵

NUMERIČKA ANALIZA NOSIVOSTI NEUNIFORMNIH PRITISNUTIH ELEMENATA NA FLEKSIONO IZVIJANJE

Rezime:

Rad prikazuje parametarsku linearno-elastičnu analizu izvijanja idealizovanog neuniformnog elementa i nelinearnu analizu izvijanja istog elementa sa zadatim ekvivalentnim geometrijskim imperfekcijama urađenu u programu Abaqus. Analizom su obuhvaćeni zglobno oslonjeni elementi sa stepenastom promenom poprečnog preseka kod kojih je variran odnos krutosti gornjeg i donjeg segmenta i odnos aksijalnih sila na vrhu, odnosno mestu promene preseka. Cilj rada je da se na osnovu relevantne i pouzdane baze podataka, definišu aproksimativni nomogrami za određivanje koeficijenata dužine izvijanja neuniformnih elemenata i utvrdi pouzdanost opšte metode date u EC3 za proračun fleksionog izvijanja.

Ključne reči: neuniformni element, izvijanje, FEA, opšta metoda, Evrokod 3

NUMERICAL ANALYSIS OF FLEXURAL BUCKLING RESISTANCE OF COMPRESSED NON-UNIFORM MEMBERS

Summary:

This paper presents parametric linear-elastic buckling analysis of idealized non-uniform members and non-linear analysis of the same member with the given geometric imperfections created in a software Abaqus. The analysis included hinged ends members with stepped change in cross-section in which was varied the ratio of rigidity and the ratio of axial force of the top and bottom segment. Purpose of this paper is to define the approximate nomograms for determining coefficients of buckling of individual non-uniform member and determine the reliability of the general method for flexural buckling resistance according to EC3.

Key words: non-uniform member, buckling, FEA, general method, Eurocode 3

¹ Student doktorskih studija, master inž. građ, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, aphilipovic@grf.bg.ac.rs

² Dr, docent, dipl.inž. građ, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, jelena@imk.grf.bg.ac.rs

³ Dr, docent, dipl.inž. građ, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, spremitc@imk.grf.bg.ac.rs

⁴ Dr, redovni profesor, dipl.inž. građ, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, zlatko@grf.bg.ac.rs

⁵ Student doktorskih studija, master inž. građ, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, nina@imk.grf.bg.ac.rs

1 UVOD

Opšta metoda proračuna nosivosti pritisnutih elemenata na fleksiono izvijanje, koja je data u SRPS EN 1993-1-1 [1], se zasniva na analitičkoj zavisnosti između bezdimenzionalnog koeficijenta χ , odnosno odnosa proračunske nosivosti elementa na fleksiono izvijanje i proračunske nosivosti njegovog poprečnog preseka $N_{b,Rd}/A_{fy}$ sa jedne strane i bezdimenzionalne relativne vitkosti $\bar{\lambda}$, odnosno odnosa nosivosti poprečnog preseka i elastične kritične sile izvijanja sa druge strane $\sqrt{A_{fy}/N_{cr}}$. Ova zavisnost, u osnovi zasnovana na Ayrton-Perijevoj funkciji, predstavljena je familijom pet krivih izvijanja kojima su obuhvaćene početne nesavršenosti realnih konstruktivnih elemenata. Kod elemenata sa neuniformnom promenom poprečnog preseka i/ili aksijalne sile pritiska, ovoj metodi prethodi postupak određivanja elastične kritične sile izvijanja, koji nije propisan standardom. Tačnost u određivanju vrednosti kritične sile izvijanja zavisi od pouzdanosti interpretacije geometrijskih karakteristika po dužini elementa, graničnih uslova oslanjanja i postojanja eventualnih ekscentriciteta u položaju sistemnih osa susednih segmenta elemenata sa stepenastom promenom preseka. Aktuelni standard SRPS EN 1993-1-1 [1] ne daje preporuke koje odslikavaju matematičko rešenje kritične sile izvijanja, što stvara poteškoće inženjerima u praksi. U opštem slučaju, ona se može odrediti koristeći teorijske analize koje zahtevaju nalaženje rešenja nelinearne diferencijalne jednačine izvijanja ili primenom neke od metoda naprednih numeričkih analiza. U jednostavnijim slučajevima mogu se koristiti uprošćeni postupci proračuna u kojima se vrednost elastične kritične sile izvijanja određuje jednim od osnovnih Ojlerovih izraza za izvijanje uniformnih elemenata, ali sa ekvivalentnim momentom inercije ili ekvivalentnom dužinom izvijanja kojima se uzima u obzir geometrijska neuniformnost analiziranog elementa.

Ovaj rad prikazuje rezultate parametarske numeričke analize neuniformnih, obostrano zglobno oslonjenih elemenata koja je sprovedena u softveru Abaqus [2]. Neuniformnost se ogledala u promeni poprečnog preseka kroz dva segmenta i stepenastoj promeni aksijalne sile pritiska. Variiran je odnos poprečnih preseka gornjeg i donjeg segmenta i odnos aksijalnih sila na vrhu i mestu promene poprečnog preseka elementa. Dužina elemenata je 10 m, visina gornjeg segmenta 4 m, visina donjeg segmenta 6 m. Poprečni presek donjeg segmenta je HEA 300 dok je poprečni presek gornjeg segmenta variran u opsegu: HEA 160, HEA 180, HEA 200, HEA 220 i HEA 240. Analiziran opseg odnosa reaktivnih sila na krajevima FE modela, $P_1/(P_1+P_2)$ je od 0,05 do 0,50 sa korakom od 0,05. Ukupan broj analiziranih FE modela je 50. Svrha ovog rada je da se na osnovu zadatih parametara i rezultata linearne analize izvijanja utvrdi opseg koeficijeneta dužine izvijanja oko jače ose inercije pojedinačnih segmenata i razviju nomogrami za njihovo aproksimativno određivanje. Takođe, da se proceni tačnost prediktivnih računskih vrednosti fleksione stabilnosti prema opštoj metodi proračuna [1] kroz njihovo poređenje sa rezultatima statičke nelinearne analize.

2 OPIS NUMERIČKIH MODELA

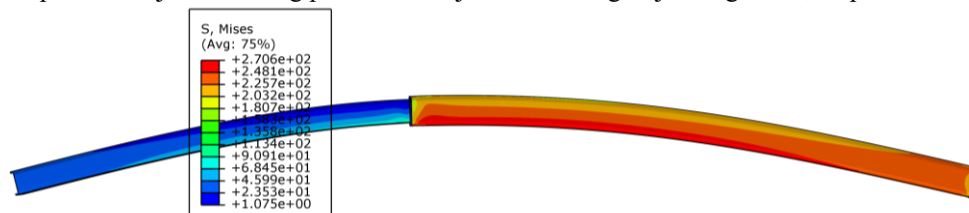
Dve različite vrste analiza su urađene za svaki numerički model: linearna elastična analiza i nelinearna statička analiza fleksionog izvijanja oko jače ose inercije, koristeći Riksov solver. Linearna elastična analiza, zasnovana na problemu bifurkacione stabilnosti, daje procenu

elastične kritične sile izvijanja idealno pravog elemenata bez strukturnih imperfekcija. Odgovor elementa je praćen zanemarljivo malim bočnim deformacijama, a kada sila dostigne graničnu (kritičnu) vrednost dolazi do naglog izvijanja koje je praćeno velikim deformacijama. Kako je modul elastičnosti u linearno-elastičnoj oblasti konstantan, vrednost kritične sile izvijanja isključivo zavisi od vitkosti elemenata i graničnih uslova na krajevima ili duž elementa. Sa druge strane, materijalna i geometrijska nelinearnost kao i strukturne imperfekcije realnih konstruktivnih elemenata ograničavaju njihovu sposobnost u dostizanju teoretske elastične sile izvijanja. U takvim slučajevima linearna elastična analiza se koristi za procenu osnovnih oblika izvijanja, a njeni rezultati za interpretaciju početnih geometrijskih imperfekcija u kasnijim fazama analize stabilitetnih problema realnih elemenata. U Abaqusu postoji nekoliko različitih numeričkih metoda za rešavanje nelineranih statičkih problema. Metoda Riksa ili metoda kružnog luka je osnovna i najviše korišćena metoda u analizi ponašanja pritisnutih elemenata za različite vrste izvijanja. Uslov za njenu primenu jeste da kriva sila-pomeranje bude glatka i bez grananja. Tačnost procene vrednosti granične sile značajno zavisi od veličine početnih geometrijskih imperfekcija realnog elementa. Ukoliko su ova odstupanja idealizovana, odnosno zanemarljivo mala, početni, uzlazni deo krive je "strm" sa naglim prelaskom u nestabilno ravnotežno kada primena Rikosve metode može dovesti do divergencije rešenja.

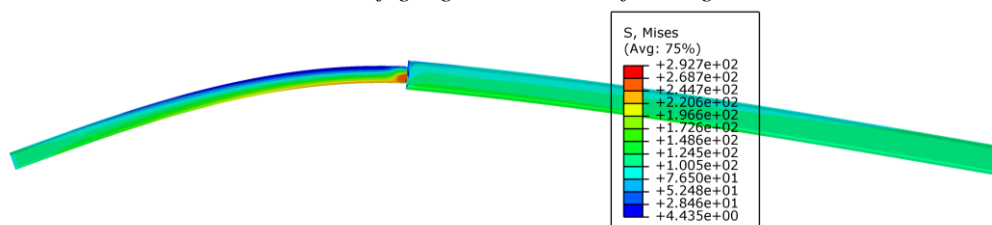
FE modeli su realizovani sa „*solid*“ elementima i mrežom „*wedge*“ konačnih elemenata dimenzija 15 mm. U težištima poprečnih preseka, na oba kraja FE modela, definisane su referentne tačke koje su povezane sa površinama krajnjih poprečnih preseka preko opcije „*kinematic coupling type*“. U obe referentne tačke dopuštena je rotacija oko glavnih osa poprečnog preseka, sprečena torziona obrtanja oko podužne ose i sprečena translatorska pomeranja. Koncentrisane sile pritiska u pravcu podužne ose FE modela su zadate u težištu krajnjeg gornjeg poprečnog preseka, odnosno na mestu stepenaste promene poprečnog preseka, respektivno. Nominalne vrednosti krive napon-dilatacija koja je dobijena eksperimentalnim ispitivanjem epruveta uzetih iz finalnog vruće-valjanog profila HEB 260 sa kvalitetom čeličnog materijala S275 [3] usvojena je za opisivanje mehaničkih svojstava materijala svih FE modela. Eksperimentalne vrednosti su transformisane u stvarne vrednosti napon-dilatacija. Elastični domen naprezanja određen je modulom elastičnosti $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ i Poasonovim koeficijentom $\nu = 0,3$. Rezidualni naponi nastali kao rezultat proizvodnog procesa nisu modelirani. Evropski standard SRPS EN 1993-1-5 [3] u Prilogu C sugeriše da se geometrijske imperfekcije mogu bazirati na obliku kritičnog (prvog) oblika izvijanja i dopušta redukciju geometrijskih tolerancija fabričke izrade u iznosu od 80% u interpretaciji početnih nesavršenosti. Međutim, obzirom da rezidualni naponi nisu uključeni u analizi statičkog odgovora elementa, za amplitudu početne imperfekcije usvojena je dopuštena proizvodna tolerancija koja uključuje odstupanje ose elementa od vertikalnosti u punom iznosu od $L/750$, u skladu sa standardom SRPS EN 1090-2 [5]. Normalizovane vrednosti koordinata deformisanog modela za kritični oblik izvijanja su skalirane i učitane su naredbom „*Imperfection*“ u opciji „*Edit keyword*“ za svaki pojedinačni model. Uticaj lokalnih imperfekcija poprečnog preseka je zanemaren u okviru analize.

3 PRIKAZ REZULTATA NUMERICKE ANALIZE

Slike 1 i 2 prikazuju raspodelu Misesovih napona pri graničnom stanju nosivosti analiziranog neuniformnog elementa usled fleksionog izvijanja oko jače ose inercije koji je određen plastifikacijom kritičnog preseka u donjem, odnosno gornjem segmentu, respektivno.



Slika 1 – Lom donjeg segmenta FE neuniformnog modela



Slika 2 – Lom gornjeg segmenta FE neuniformnog modela

Ključni rezultati elastične linearne i statičke nelinearane analize fleksionog izvijanja sumirani su redom u tabelama od 1 do 5, gde su: N_{cr} elastična kritična sila izvijanja; β koeficijent dužine izvijanja pojedinačnih segemenata, λ bezdimenzionalna relativna vitkost, $N_{b,FEA}$ numerička granična nosivost na fleksiono izvijanje oko jače ose preseka, $N_{b,EC}$ računaska granična nosivost na fleksiono izvijanje oko jače ose prema opštoj metodi [1].

Tabela 1 - Rezultati numeričke analize za odnos $I_2/I_1 = 0,09$

$I_2/I_1=0,09$		$P_2/(P_1+P_2)$									
		0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Donji segment HEA300	N_{cr} (kN)	1996	1828	1686	1563	1456	1363	1280	1207	1141	1082
	β	2,30	2,40	2,50	2,59	2,69	2,78	2,87	2,95	3,04	3,12
	λ	1,24	1,29	1,35	1,40	1,45	1,50	1,54	1,59	1,64	1,68
	Lom	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$N_{b,FEA}$ (kN)	1583	1444	1324	1221	1135	1046	976	917	870	823
	$N_{b,EC}$ (kN)	1400	1315	1238	1168	1105	1048	997	949	906	866
	$N_{b,FEA}/N_{b,EC}$	1,13	1,10	1,07	1,05	1,03	1,00	0,98	0,97	0,96	0,95
Gornji segment HEA160	N_{cr} (kN)	99,8	182,8	252,9	312,6	364,1	408,8	448,1	482,7	513,5	541,1
	β	4,66	3,44	2,92	2,63	2,44	2,30	2,20	2,12	2,05	2,00
	λ	3,24	2,39	2,04	1,83	1,70	1,60	1,53	1,47	1,43	1,39
	Lom	DA	DA	DA	DA	DA	DA	DA	DA	DA	DA
	$N_{b,FEA}$ (kN)	79	144	199	244	284	314	342	367	391	411
	$N_{b,EC}$ (kN)	90	159	213	256	292	322	348	369	388	404
	$N_{b,FEA}/N_{b,EC}$	0,88	0,91	0,93	0,95	0,97	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02

Tabela 2 - Rezultati numeričke analize za odnos $I_2/I_1 = 0,14$

$I_2/I_1=0,14$		$P_2/(P_1+P_2)$									
		0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Donji segment HEA300	N_{cr} (kN)	2760	2541	2353	2189	2045	1919	1807	1706	1616	1535
	β	1,95	2,03	2,11	2,19	2,27	2,34	2,41	2,48	2,55	2,62
	λ	1,05	1,10	1,14	1,18	1,22	1,26	1,30	1,34	1,37	1,41
	Lom	DA	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$N_{b,FEA}$ (kN)	2146	1968	1805	1649	1527	1424	1325	1240	1185	1088
	$N_{b,EC}$ (kN)	1723	1641	1563	1491	1424	1361	1303	1249	1199	1152
	$N_{b,FEA}/N_{b,EC}$	1,25	1,20	1,15	1,11	1,07	1,05	1,02	0,99	0,99	0,94
Gornji segment HEA180	N_{cr} (kN)	138	254	353	438	511	576	632	682	727	767
	β	4,85	3,58	3,04	2,73	2,52	2,38	2,27	2,18	2,11	2,06
	λ	2,98	2,19	1,86	1,67	1,55	1,46	1,39	1,34	1,30	1,26
	Lom	-	DA	DA	DA	DA	DA	DA	DA	DA	DA
	$N_{b,FEA}$ (kN)	107	197	271	330	382	427	464	496	515	544
	$N_{b,EC}$ (kN)	123	217	291	350	398	438	472	500	524	545
	$N_{b,FEA}/N_{b,EC}$	0,87	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	0,98	1,00

Tabela 3 - Rezultati numeričke analize za odnos $I_2/I_1 = 0,20$

$I_2/I_1=0,20$		$P_2/(P_1+P_2)$									
		0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Donji segment HEA300	N_{cr} (kN)	3670	3404	3170	2964	2782	2619	2473	2342	2224	2117
	β	1,69	1,76	1,82	1,88	1,94	2,00	2,06	2,12	2,17	2,23
	λ	0,91	0,95	1,01	1,01	1,05	1,08	1,11	1,14	1,17	1,20
	Lom	DA	DA	DA	-	-	-	-	-	-	-
	$N_{b,FEA}$ (kN)	2557	2498	2363	2187	2029	1904	1779	1639	1558	1463
	$N_{b,EC}$ (kN)	1994	1925	1858	1793	1731	1671	1614	1559	1507	1458
	$N_{b,FEA}/N_{b,EC}$	1,28	1,30	1,27	1,22	1,17	1,14	1,10	1,05	1,03	1,00
Gornji segment HEA200	N_{cr} (kN)	184	340	476	593	695	786	866	937	1001	1058
	β	5,10	3,75	3,17	2,84	2,62	2,47	2,35	2,26	2,19	2,13
	λ	2,81	2,07	1,75	1,57	1,45	1,36	1,30	1,25	1,20	1,17
	Lom	-	-	-	DA	DA	DA	DA	DA	DA	DA
	$N_{b,FEA}$ (kN)	128	250	354	437	507	571	623	655	701	732
	$N_{b,EC}$ (kN)	163	287	385	464	528	580	623	660	691	717
	$N_{b,FEA}/N_{b,EC}$	0,78	0,87	0,92	0,94	0,96	0,99	1,00	0,99	1,02	1,02

Tabela 4 - Rezultati numeričke analize za odnos $I_2/I_1 = 0,30$

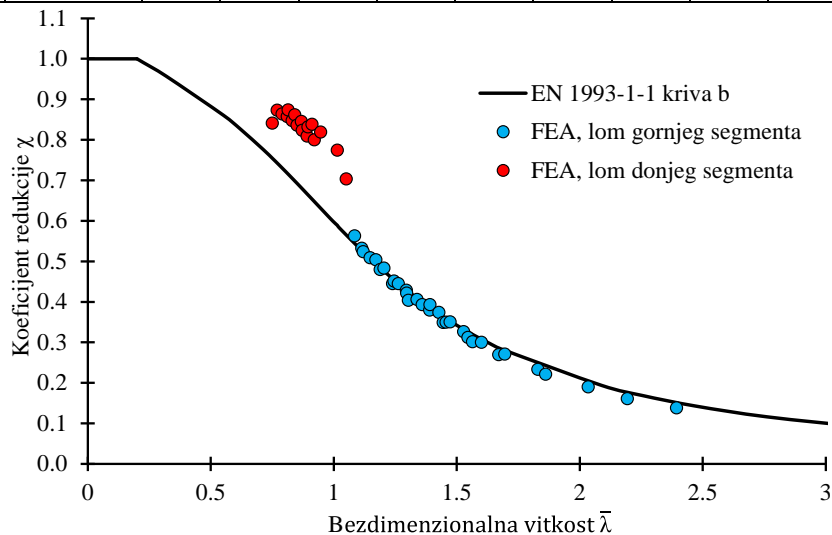
$I_2/I_1=0,30$		$P_2/(P_1+P_2)$									
		0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Donji segment HEA300	N_{cr} (kN)	4594	4304	4043	3807	3595	3403	3229	3070	2926	2793
	β	1,51	1,56	1,61	1,66	1,71	1,76	1,80	1,85	1,90	1,94
	λ	0,81	0,84	0,87	0,90	0,92	0,95	0,97	1,00	1,02	1,05
	Lom	DA	DA	DA	DA	DA	-	-	-	-	-
	$N_{b,FEA}$ (kN)	2665	2628	2578	2537	2441	2337	2205	2080	1963	1849
	$N_{b,EC}$ (kN)	2182	2130	2078	2027	1976	1925	1876	1828	1781	1735
	$N_{b,FEA}/N_{b,EC}$	1,22	1,23	1,24	1,25	1,24	1,21	1,18	1,14	1,10	1,07

Tabela 4 - Nastavak

$I_2/I_1=0,30$		$P_2/(P_1+P_2)$									
		0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Gornji segment HEA220	N_{cr} (kN)	230	430	606	761	899	1021	1130	1228	1317	1397
	β	5,52	4,04	3,40	3,03	2,79	2,62	2,49	2,39	2,31	2,24
	λ	2,75	2,01	1,69	1,51	1,39	1,30	1,24	1,19	1,15	1,11
	Lom	-	-	-	-	-	DA	DA	DA	DA	DA
	$N_{b,FEA}$ (kN)	133	263	387	508	610	701	772	832	884	924
	$N_{b,EC}$ (kN)	203	361	487	588	670	738	794	841	880	914
	$N_{b,FEA}/N_{b,EC}$	0,65	0,73	0,79	0,86	0,91	0,95	0,97	0,99	1,00	1,01

Tabela 5 - Rezultati numeričke analize za odnos $I_2/I_1 = 0,42$

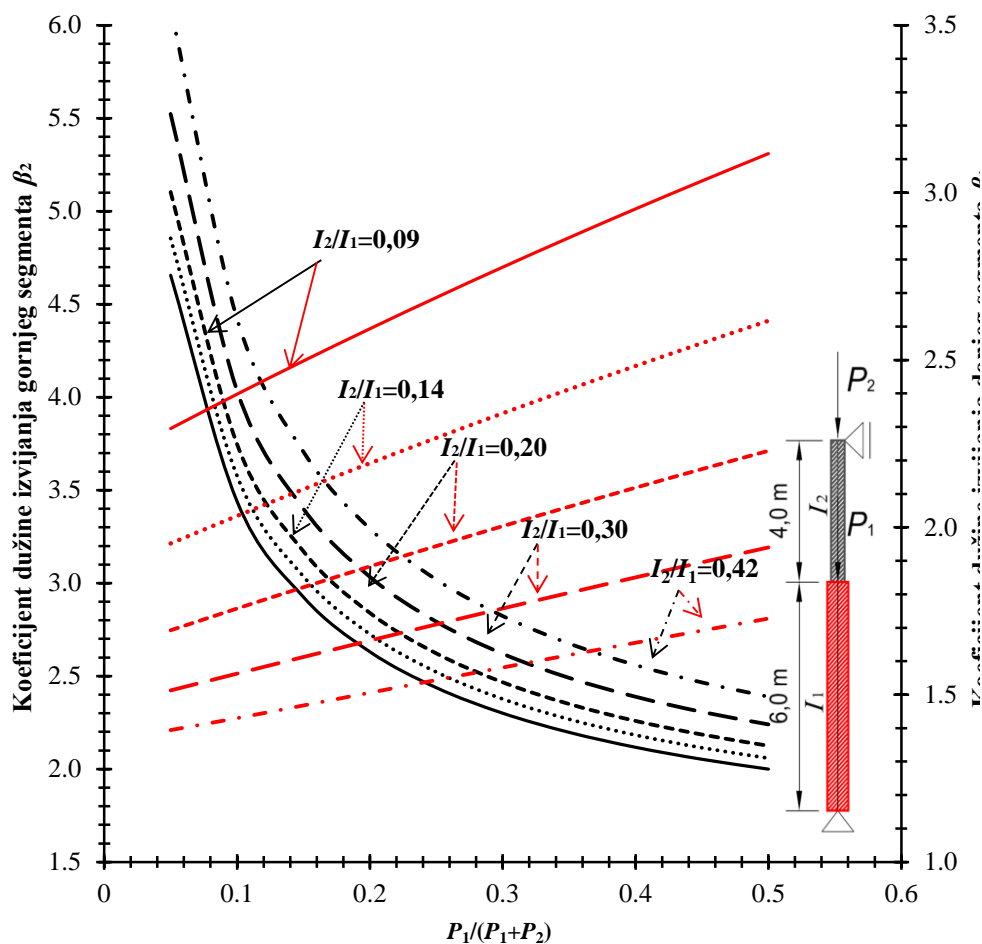
$I_2/I_1=0,42$		$P_2/(P_1+P_2)$									
		0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Donji segment HEA300	N_{cr} (kN)	5408	5142	4879	4636	4412	4205	4014	3837	3674	3523
	β	1,39	1,43	1,47	1,51	1,54	1,58	1,62	1,66	1,69	1,73
	λ	0,75	0,77	0,79	0,81	0,83	0,85	0,87	0,89	0,91	0,93
	Lom	DA	DA	DA	DA	DA	DA	DA	DA	-	-
	$N_{b,FEA}$ (kN)	2566	2663	2635	2614	2585	2551	2511	2468	2413	2334
	$N_{b,EC}$ (kN)	2301	2266	2228	2189	2150	2111	2072	2034	1995	1957
		$N_{b,FEA}/N_{b,EC}$	1,12	1,18	1,18	1,19	1,20	1,21	1,21	1,21	1,21
Gornji segment HEA240	N_{cr} (kN)	270	514	732	927	1103	1261	1405	1535	1653	1762
	β	6,10	4,42	3,71	3,29	3,02	2,82	2,67	2,56	2,47	2,39
	λ	2,77	2,01	1,68	1,50	1,37	1,28	1,21	1,16	1,12	1,08
	Lom	-	-	-	-	-	-	-	-	DA	DA
	$N_{b,FEA}$ (kN)	128	266	395	523	646	765	879	987	1086	1167
	$N_{b,EC}$ (kN)	240	431	586	713	817	903	975	1035	1085	1129
	$N_{b,FEA}/N_{b,EC}$	0,54	0,62	0,67	0,73	0,79	0,85	0,90	0,95	1,00	1,03



Slika 3 – Poređenje numeričkih i računskih vrednosti nosivosti na fleksiono izvijanje

Numeričke vrednosti graničnih sila fleksionog izvijanja oko jače ose inercije, $N_{b,FEA}$ normalizovane su sa vrednošću sile pri kojoj dolazi do plastifikacije poprečnog preseka Af_y za svaki pojedinačni segmenat i upoređene sa krivom izvijanja b na slici 3. Kriva izvijanja b reprezentuje računске vrednosti graničnih sila fleksionog izvijanja prema opštoj metodi proračuna u EN 1993-1-1 [1] koje su normalizovane istom vrednošću sile Af_y .

Na osnovu zadatih ulaznih parametara koji se ogledaju u odnosu momenata inercije gornjeg i donjeg segmenta I_2/I_1 i odnosa sila na krajevima analiziranih FE modela $P_1/(P_1+P_2)$ sa jedne strane i dobijenih vrednosti kritičnih sila izvijanja N_{cr} sa druge strane definisani su nomogrami putem kojih se mogu odrediti približne vrednosti koeficijenta izvijanja β pojedinačnih segmenata. Nomogrami su prezentovani na slici 4 i važe u slučaju obostrano zglobno oslonjenih elemenata sa gornjim i donjim segmentom dužine 6 m odnosno 4 m.



Slika 4 – Koeficijent dužine izvijanja gornjeg i donjeg segmenta u funkciji odnosa momenta inercije I_2/I_1 i odnosa sila na krajevima elementa $P_1/(P_1+P_2)$

4 ZAKLJUČCI

Pregledom rezultata sprovedene numeričke analize koji su prezentovani u tabelama od 1 do 5 i grafički na slikama 3 i 4, mogu se izneti sledeći zaključci.

Vrednost koeficijenta dužine izvijanja za gornji segment elementa je u opsegu od 1,4 do 3,1 i ima veću vrednost pri većim vrednostima odnosa sile u vrhu i sile na kontaktu segmenta. Vrednost koeficijenta se smanjuje povećanjem odnosa krutosti gornjeg i donjeg segmenta.

Vrednost koeficijent dužine izvijanja za donji segment elementa je od 2 do 6,1 i opada sa povećanjem odnosa sile u vrhu i sile na spoju segmenata, a raste sa povećanjem odnosa krutosti gornjeg i donjeg segmenta.

Kada je krutost gornjeg segmenta značajno manja u odnosu na krutost donjeg segmenta (odnos $I_2/I_1=0,09$) do loma elemenata dolazi izvijanjem gornjeg segmenta Povećanjem odnosa krutosti gornjeg i donjeg segmenta do loma elemenata dolazi izvijanjem donjeg segmenta.

Opšta metoda proračuna u Evrokodu 3 sa visokom tačnošću daje predikciju granične nosivosti neuniformnog elementa na fleksiono izvijanje za slučaj loma gornjeg segmenta, sa odstupanjima u opsegu od +12% do -1%. U slučaju loma donjeg segmenta sa većim poprečnim presekom, odstupanja su znatno konzervativnija i nalaze se u opsegu od +12% do +30%.

LITERATURA

- [1] SRPS EN 1993-1-1: 2005 Evrokod 3: *Proračun čeličnih konstrukcija: Opšta pravila i pravila za zgrade*, CEN, 2005.
- [2] ABAQUS User Manual, Version 6,12, Providence, RI, USA: DS SIMULIA Corp; 2012.
- [3] Spremić M: *The analysis of headed studs group behavior in composite steel-concrete beam*, PhD thesis, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, October 2013
- [4] SRPS EN 1993-1-5: 2006 Evrokod 3: *Proračun čeličnih konstrukcija: Puni limeni elementi*, CEN, 2006.
- [5] EN 1090-2: *Execution of steel structures and aluminium structures, Part 2: Technical requirements for steel structures*, CEN, 2008.