

Primljen / Received: 3.11.2016.

Ispravljen / Corrected: 24.3.2017.

Prihvaćen / Accepted: 5.4.2017.

Dostupno online / Available online: 10.6.2017.

Optimizacija ukrućenih tlačnih pojasnica u sandučastom presjeku mosta

Autori:



Doc.dr.sc. **Anđelko Vlašić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
vlastic@grad.hr



Mr.sc. **Nijaz Mujkanović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
nijaz@grad.hr

Pregledni rad

Anđelko Vlašić, Nijaz Mujkanović

Optimizacija ukrućenih tlačnih pojasnica u sandučastom presjeku mosta

Uslijed savijanja, pojasnice čeličnih sandučastih presjeka grednih mostova ponašaju se kao tlačni pločasti elementi i zahtijevaju ukrućenja. Koristeći dokaz stabilnosti prema EN 1993-1-5 provedena je parametarska analiza za 6 različitih tipova ukrućenja. Dobiveni dijagrami pokazuju računsko naprezanje otpornosti na izbočivanje za različite širine i debljine ploča, te tip i broj ukrućenja. Nadalje, proveden je optimizacijski postupak kojim se pronalazi najpovoljniji tip i broj rebara ovisno o djelujućoj računskoj tlačnoj sili. Optimizacijski parametri su minimalna površina čelika i minimalni broj rebara.

Ključne riječi:

most, čelični sanduk, tlačni pojas, izbočivanje, ukrućenje, metoda smanjenog naprezanja

Subject review

Anđelko Vlašić, Nijaz Mujkanović

Optimization of compressed stiffened flanges in bridge box girder cross section

Due to bending, flanges of steel box girder cross sections act as compression plates and require stiffeners. Using stability evidence from EN 1993-1-5, a parametric study was performed for six different types of stiffeners. The obtained diagrams show design buckling resistance stress for various plate width and thickness values, and the type and number of stiffeners. Furthermore, an optimization process was performed to find the most suitable types and number of stiffeners, depending on the acting design compression force. Optimization parameters are the minimum steel area and minimum number of stiffeners.

Key words:

bridge, steel box, compression flange, buckling, stiffening, reduced stress method

Übersichtsarbeit

Anđelko Vlašić, Nijaz Mujkanović

Optimierung ausgesteifter Druckflanschen kastenförmiger Brückenquerschnitte

Bei Biegungsverhalten sich Flanschen kastenförmiger Stahlquerschnitte von Balkenbrücken wie Druckplattenelemente und erfordern Aussteifungen. Dem Stabilitätsnachweis gemäß EN 1993-1-5 folgend wurde eine Parameteranalyse für sechs Aussteifungstypen durchgeführt. Die resultierenden Diagramme zeigen Bemessungswerte des Knickwiderstands für verschiedene Plattenbreiten und -stärken, sowie Typ und Anzahl der Aussteifungen. Des Weiteren wurde ein Optimierungsverfahren durchgeführt, um in Abhängigkeit der einwirkenden Berechnungsdruckkraft den passenden Typ und die Anzahl der Aussteifungen zu ermitteln. Als Optimierungsparameter gelten eine minimale Stahlfläche sowie eine minimale Anzahl Rippen.

Schlüsselwörter:

Brücke, kastenförmiger Stahlquerschnitt, Druckband, Knicken, Aussteifung, Methode reduzierter Spannungen

1. Uvod

Mnogi mostovi u sastavu gornjeg ustroja imaju čelični sandučasti poprečni presjek koji je opterećen savijanjem. Najčešće su to statički sustavi kontinuiranih nosača srednjih do velikih raspona (karakteristično od 70 do 250 m). Pojasi tih nosača su tlačne i vlačne ploče sa ukrućenjima. Vrsta i broj ukrućenja može se znatno razlikovati ovisno o projektu. Kao priprema za ovo istraživanje prikupljeni su podaci iz 14 različitih stvarnih projekata mostova iz Hrvatske, izvedenih ili pred izvođenjem. Svi ti mostovi zadovoljili su postupak revizije u periodu od 2004. do 2015. godine. Pregledom tipova ukrućenja ovih mostova, prema debljinama i širinama ploča koje ona ukrućuju (slika 1.), mogu se uočiti velike razlike. Među ovim primjerima nije vidljiva jasna veza koja bi pokazala kako je odabran tip i broj ukrućenja. S obzirom na to da su gotovo svi ovi mostovi projektirani prema europskoj normi (Eurokodu), može se zaključiti da se iskoristivosti ovih ukrućenih ploča znatno razlikuju, što utječe na njihovu ekonomičnost kroz utrošak materijala i vrijeme izrade u radionici.

Postojeća istraživanja na optimizaciji ukrućenih ploča u mostovima obuhvaćaju presjeke gdje su hrptovi ukrućeni s jednim ukrućenjem, pojasi neukrućeni, a opterećenje je konstantno [1]. Također, izvedene su optimizacije presjeka kontinuiranih nosača koristeći algoritme [2], ali ploče tih presjeka nisu bile podložne izbočivanju zbog malih raspona i širina ploča. Istražena je i plastična otpornost za spregnute otvorene presjeke mostova s ukrućenim hrptovima podložnim izbočivanju [3], pri čemu je preporučeno da se plastični moment otpora ne iskoristi u potpunosti na sredini raspona. Tlak u

ukrućenim pojasi iznad oslonaca u ovom istraživanju nije promatran. Za ukrućene pojasnice čeličnih sandučastih nosača su izvedene krivulje za graničnu čvrstoću prema nelinearnoj analizi metodom konačnih elemenata, i uspoređene su s krivuljama prema proračunu iz Eurokoda [4]. Ostala relevantna istraživanja izbočivanja ploča predlažu faktore izbočivanja za hrptove bez ukrućenja s promjenjivim debljinama, ovisno o odnosu stranica, odnosu naprezanja i odnosu debljina unutar tih hrptova [5].

Cilj istraživanja prikazanog u ovom radu je optimizacija utroška čelika u ukrućenim tlačnim pločama koje djeluju kao pojasnice u sandučastom presjeku grednog mosta izborom najpogodnijeg tipa i broja ukrućenja s obzirom na tlačnu silu i debljinu ploče pojasa. Otpornost na izbočivanje je određena prema HRN EN 1993-1-5, poglavlje 10 [6] metodom smanjenog naprezanja koja se preporučuje primjenjivati u dokazu stabilnosti presjeka mostova [7]. Tom metodom se proračunava faktor iskoristivosti ukrućene ploče pri djelovanju naprezanja graničnog stanja nosivosti (poglavlje 3.1). Pretpostavljajući faktor iskoristivosti 1.0 (puna iskoristivost) izračunana su najveća računska naprezanja u ploči i posljedično, prema njenoj površini, najveća računska uzdužna sila u ukrućenoj ploči. Na osnovi ovih rezultata izvedeni su dijagrami u kojima se za različite širine ploča i tipove ukrućenja prikazuje potreban broj ukrućenja, debljina ploče i ukupna površina čelika ukrućene ploče, ovisno o tlačnoj sili u ploči. Analizom tih dijagrama može se odabrati optimalno rješenje ukrućene ploče. U obzir su uzeti i utjecaji zaostajanja posmika ("shear lag effect") uslijed ortotropije pojasa, preko odgovarajuće redukcije površine pojasa (sudjelujuća širina pojasa).

#	Ukruta donjeg pojasa	Širina ploče / razmak ukruta Debljina ploče	#	Ukruta donjeg pojasa	Širina ploče / razmak ukruta Debljina ploče	#	Ukruta donjeg pojasa	Širina ploče / razmak ukruta Debljina ploče
1		6000 / 800 $t_f = 30$	6		6600 / 1000 $t_f = 85$	11		6760 / 1300 $t_f = 80$ 8440 / 1300 $t_f = 60$
2		6300 / 800 $t_f = 25$	7		5700 / 600 $t_f = 40$	12		9000 / 1550 $t_f = 50$
3		7940 / 900 $t_f = 25$	8		6000 / 850 $t_f = 30$	13		3900 / 865 $t_f = 30$
4		9900 / 880 $t_f = 40$	9		4000 / 1150 $t_f = 50$	14		6300 / 1100 $t_f = 28$
5		9900 / 880 $t_f = 12$	10		5000 / 1000 $t_f = 16$			

Slika 1. Ukrućenja za donje pojase sandučastih presjeka u stvarnim mostovima

2. Područje primjene

2.1. Vrsta mosta, duljina raspona i poprečni presjek

Iako se pretpostavke ove najpovoljnije metode mogu primijeniti na bilo koju ukrućenu ploču, neke od početnih fiksnih varijabli koje utječu na otpornost prema izbočivanju odabrane su da najbolje odgovaraju poprečnom presjeku sandučastog grednog mosta. Analizirane ploče odgovaraju pojasima sandučastih nosača s razmakom hrptova od 4 do 10 m (slika 2.) što definira širinu ploče.

Rezultati se mogu primijeniti samo na donji pojas gdje ne postoje dodatni lokalni utjecaji od osovina vozila okomito na ravninu ploče, pa je jedino djelujuće opterećenje na ukrućenu ploču jednoliki uzdužni tlak. Proračun izbočivanja ne ovisi izravno o rasponu mosta, međutim, kako su u obzir uzeti i utjecaji zaostajanja posmika (poglavlje 4.1), preporučuje se da su primijenjeni rasponi od 70 do 250 m. Ovo područje raspona obuhvaća tipične srednje do velike raspone čeličnih i spregnutih sandučastih grednih mostova, gdje su efektivni rasponi (L_e prema HRN EN 1993-1-5 3.2.1 [6]) za proračun sudjelujućih širina donjih tlačnih pojava između 40 i 130 m. Sve dok su efektivni rasponi unutar ovih granica, najveća greška unutar optimizacijskih dijagrama iznosi manje od prihvatljivih 4,37 % (poglavlje 4.1). Sandučasti nosači u mostovima su uobičajeno poprečno ukrućeni za savijanje svaka 4 metra. Također, u presjecima s ortotropnom pločom, poprečni nosači i okviri unutar presjeka su postavljeni na razmake od 4 m. Zbog toga je proračun otpornosti na izbočivanje izveden s duljinom tlačne ploče od 4 m, pa je ova varijabla zadana kao fiksna i izostavljena iz postupka optimizacije. U proračunima je korišten materijal S355 čvrstoće $f_y = 355$ MPa za debljine $t \leq 40$ mm, i $f_y = 335$ MPa za $t \leq 80$ mm. Osnovna norma HRN EN 1993-1-1 (tablica 3.19) [8] dopušta primjenu ovako reduciranog broja razreda mehaničkih karakteristika za toplo valjani konstrukcijski čelik. Konstrukcijski čelik za mostove prethodno navedenih raspona se rijetko razlikuje od kvalitete S355.

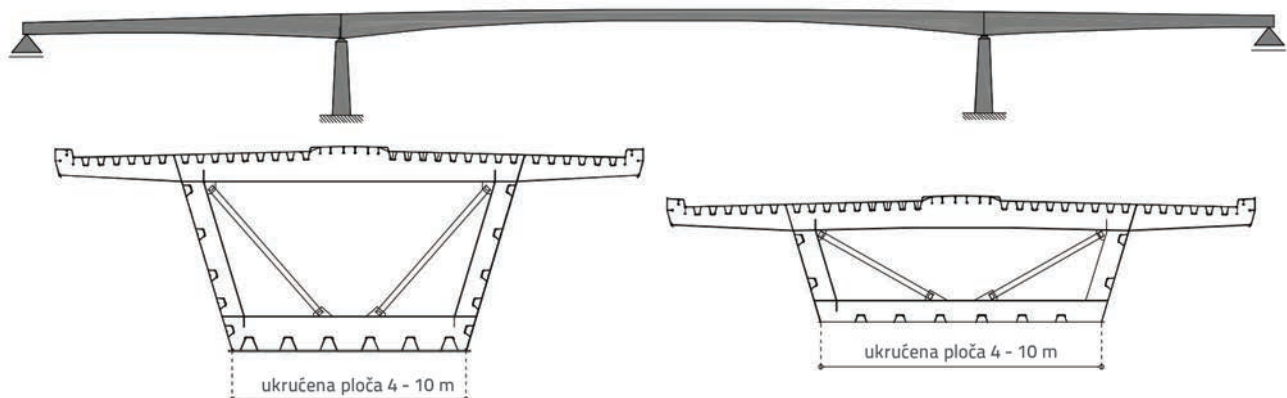
2.2. Tipovi ukrućenja i debljine ploča

Na slici 1. stvarna ukrućenja se mogu grupirati u nekoliko karakterističnih tipova. Sva ta ukrućenja su zatvorenog presjeka, koji se danas gotovo isključivo koristi u tlačnim pojasima. Otvorena rebra se kod dokaza stabilnosti moraju obavezno još provjeriti i na torzijsko izvijanje. Zbog toga, konzervativno, prema poglavlju 9.2.2 iz HRN EN 1993-1-5 [6], ravna otvorena ukrućenja moraju zadovoljiti i sljedeći uvjet:

$$\frac{I_T}{I_P} \geq 5,3 \frac{f_y}{E} \quad (1)$$

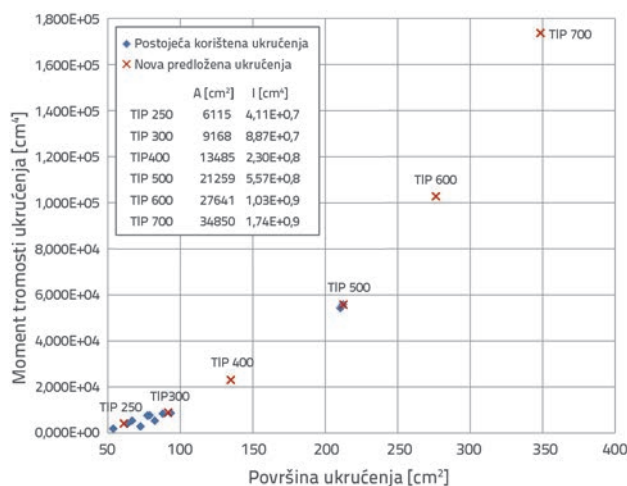
Taj uvjet je vrlo teško zadovoljiti kada ukrućenje ima debljinu manju od 20 mm. Za ostale otvorene presjeke ukrućenja koja imaju i krutost na savijanje (T ili Γ ukrućenja) postoje slični uvjeti [9], također teško zadovoljivi. Zbog ovih potreba dodatnih provjera koje idu uz otvorena ukrućenja, i zbog njihove rijetke primjene, ona nisu uključena u područje ovog istraživanja. Ostala istraživanja ponašanja otvorenih ukrućenja su provedena za T ukrućenja gdje se primjenjuju rješenja metode konačnih elemenata [10, 11], ili analitička rješenja [12].

Ponašanje ukrućenja najviše ovisi o njegovoj visini, koja u navedenim primjerima (slika 1.) iznosi od 240 mm do 490 mm. Dvije glavne karakteristike ukrućenja, površina i moment tromosti, prikazane su na slici 3. Većina prikazanih ukrućenja ima visinu od 240 mm do 300 mm i slične karakteristike. Jedan je od ciljeva ovog istraživanja da se ukrućenja iz prakse grupiraju u nekoliko tipova prema karakteristikama, i da se predlože novi tipovi kako bi postojala šira baza za optimizaciju. Nedostatak ukrućenja visine veće od 490 mm rezultirao bi nepotpunom analizom, a za sanduke velikih visina (moguće visine i preko 10 m) i posebno za sanduke sa širokim donjim pojasom, ukrućenja visina većih od 400 mm su vrlo ekonomična, što će ovo istraživanje i pokazati (interpretacija u poglavlju 4.3). Tako je ukupno definirano 6 tipova prema njihovim visinama od 250, 300, 400, 500, 600 i 700 mm, i prikazano na slici 4. Njihove karakteristike su uspoređene s stvarnim rebrima (slika



Slika 2. Primjeri ukrućenih tlačnih ploča u presjecima mostova

3.). Za dimenzioniranje presjeka sa trapeznim ukrućenjima karakteristike ukrućenja se određuju primjenom ravne geometrije osi hrptova i pojasa trapeznog ukrućenja (veličine iskazane po osnim linijama ukrućenja na slici 1. i 4.). U izračunu karakteristika i otpornosti presjeka ukrućenja uobičajena je praksa da se zanemaruje vrlo mali "gubitak" ostvaren izvedbom radijusa u spoju hrpta i pojasa [9]. Pretpostavlja se izvedba radijusa od $r \geq 2t$ (t je debljina lima iz kojega se izvodi ukrućenje), a minimalni radijus je 20 mm (vrijedi za limove od 8 mm, dok se limovi manje debljine izbjegavaju). Izborom kvalitete materijala nadzire se da uobičajeni postupci tehnološke obrade (savijanje i zavarivanje) ne ugroze mehaničku otpornost i stabilnost. Za "debele" limove ukrućenja (za materijale debljine $t \geq 12$ mm) preporučeni postupak izvedbe pojedinog ukrućenja je uzdužno zavarivanje između hrpta i pojasa. Kod ovako izvedenih uzdužnih ukrućenja gubitak materijala u odnosu na proračun je još manji. Sa slike 3. je vidljivo da tipovi 250, 300 i 500 svojim karakteristikama vrlo dobro odgovaraju ukrućenjima iz prakse. Dodana ukrućenja tipa 400, 600 i 700 omogućit će širu usporedbu ponašanja zbog svojih karakteristika koje u prikazanom dijagramu (slika 3.) popunjavaju praznine.



Slika 3. Karakteristike ukrućenja, površina i moment tromosti

Nagib hrpta ukrućenja prema ploči koju ukrućuje za sve je tipove odabran 73°. Ova vrijednost je između najveće (81°) i najmanje (68°) zabilježene vrijednosti na stvarnim ukrućenjima. Koristeći ovu vrijednost nagiba, izbjegavaju se problemi koji su vezani uz manje kutove gdje pojas samog ukrućenja postaje premali

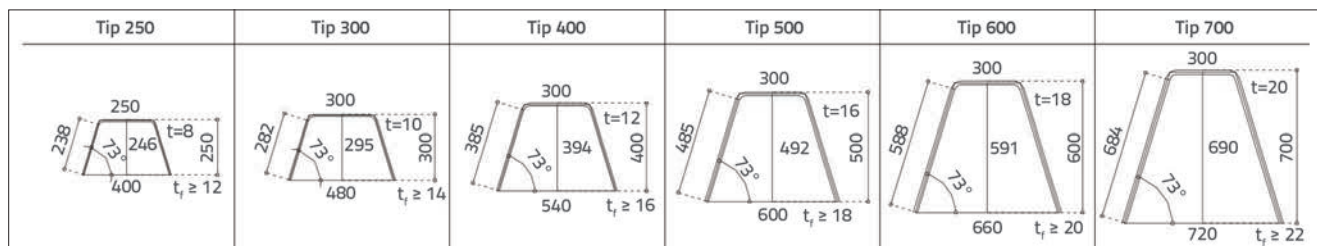
kod većih visina ukrućenja, pa tako moment tromosti rebra nije nepotrebno smanjen. Također, odabrani kut nije niti prevelik, što bi uzrokovalo manji razmak između hrptova istog rebra kod spoja s pločom, i posljedično više potrebnih ukrućenja za istu širinu ploče.

Debljina pojedinog tipa ukrućenja je odabrana prema uvjetu za klasu 3, $c/t \leq 42\sqrt{(235/f_y)}$ ili $c/t \leq 34,2$ za $f_y = 355$ MPa, koji daje najmanju debljinu od 8 mm za tip 250 i 20 mm za tip 700 (slika 4.). Ovaj uvjet je važan zbog dokaza stabilnosti koji se provodi prema metodi smanjenog naprezanja (poglavlje 10 iz HRN EN 1993-1-5 [6]), koja uvjetuje da najslabiji dio presjeka definira redukciju čitavog presjeka. Ispunjenje uvjeta za klasu 3 samog ukrućenja osigurava da neće doći do redukcije presjeka ukrućenja, i da će mjerodavni redukcijski faktor biti rezultat globalne analize izbočivanja ukrućene ploče. Tako je razlika između dokaza prema metodi efektivnog presjeka i prema metodi smanjenog naprezanja zanemariva. Debljina ploče je odabrana od minimalno 12 mm do najviše 80 mm (u koracima od 12, 16, 20, 30, 40, 50, 60, 70 i 80 mm). Iz istog razloga kao i prije, uvjet za klasu 3 onemogućuje upotrebu svih tipova ukrućenja za bilo koju debljinu ploče, kako bi odnos $c/t \leq 42\sqrt{(235/f_y)}$ bio zadovoljen za dio ploče između hrptova ukrućenja. Slika 3. također prikazuje i dopuštenu debljinu ploče (t_f) za svaki tip ukrućenja.

3. Dokaz izbočivanja prema smanjenim naprezanjima – parametarska studija

3.1. Komentar dokaza prema EN 1993-1-5

Metoda dokaza izbočivanja na kojoj se temelji ovo istraživanje je metoda smanjenog naprezanja prema HRN EN 1993-1-5, poglavlje 10 [6]. Prema Hrvatskom nacionalnom dodatku za čelične mostove (HRN EN 1993-2:2014/NA, točka 2.19 [13]), primjena ove metode je obavezna za granično stanje nosivosti ili za karakterističnu kombinaciju graničnog stanja uporabljivosti. Za razliku od metode koja koristi karakteristike efektivnih presjeka, ova metoda ograničava tlačna naprezanja u ploči [14]. Pretpostavljena je linearna raspodjela naprezanja do granice naprezanja kod kojeg se prvi element ploče izbočuje [9]. Prije te granice naprezanja, poprečni presjek je u potpunosti aktivan. Prema tome, svi dijelovi presjeka su kategorizirani kao elementi klase 3. Kod neukrućenih ploča, ova metoda daje isti rezultat kao i metoda efektivnih presjeka. Kod ukrućenih ploča, metoda smanjenog naprezanja ne uzima u obzir redistribuciju



Slika 4. Definirani tipovi ukrućenja za istraživanje

opterećenja iz područja visokih naprezanja u područje niskih naprezanja. Zbog toga je najslabiji dio ploče mjerodavan za čitav dokaz [9]. Kako bi se svladalo ovo ograničenje, tip i razmak ukrućenja su u ovom istraživanju odabrani tako da su svi pločasti elementi u presjeku ukrućene ploče najviše kategorije 3 (opširnije objašnjeno u poglavlju 2.2 za ukrućenja i poglavlju 3.2 za debljinu ploče). Izbočivanje se dokazuje sljedećim von Mises uvjetom:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z \cdot f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z \cdot f_y / \gamma_{M1}}\right) + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 \leq 1,0 \quad (2)$$

gdje su $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$, τ_{Ed} računski naprezanja, f_y je čvrstoća čelika, ρ_x i χ_w su redukcijски faktori, a γ_{M1} je parcijalni faktor sigurnosti (za čelik u tlaku kod provjere stabilnosti on iznosi 1.1 prema HRN EN 1993-2:2014/NA, točka 2.19 [13]). Kada se ovaj dokaz primjenjuje na ploče u uniaksijalnom tlaku (tlačne pojasnice u sandučastim presjecima mostova), preostaje samo prvi član izraza:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 \leq 1,0 \quad (3)$$

Redukcijski faktori se računaju prema:

$$\rho_x = (\rho - \chi_c) \xi (2 - \xi) + \chi_c \quad (4)$$

gdje je ρ redukcija uslijed pločastog ponašanja, a χ_c je redukcija uslijed štapnog ponašanja jedne ukrute. Krivulja izvijanja za izračun χ_c određuje se prema izrazu:

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} \quad (5)$$

gdje je $\alpha = 0,34$ (krivulja izvijanja b za zatvorena ukrućenja), $i = \sqrt{\frac{I_{y1}}{A_{y1}}}$, $A_{sl,1}$, $I_{sl,1}$ su karakteristike jednog ukrućenja uzimajući u obzir pripadajuću širinu ploče, e je veća vrijednost udaljenosti težišta ukrućenja s pripadajućom širinom ploče do težišta ploče ili do težišta ukrućenja bez ploče (sve prema slici A.1 iz HRN EN 1993-1-5 [6]). Interakcijski faktor ξ za ova dva načina ponašanja iznosi:

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 \quad (6)$$

gdje je $\sigma_{cr,p}$ naprezanje elastičnog izbočivanja:

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (7)$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{2\left((1+\alpha^2) + \gamma - 1\right)}{\alpha^2 (\psi_x + 1)(1+\delta)} \quad \text{za } \lambda \leq \sqrt[4]{\gamma} \quad (8)$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{4(1+\sqrt{\gamma})}{(\psi_x + 1)(1+\delta)} \quad \text{za } \lambda > \sqrt[4]{\gamma}, \alpha = \frac{a}{b}, \delta = \frac{\sum A_{sl}}{A_p}, \gamma = \frac{I_{sl}}{I_p} \quad (9)$$

gdje je t debljina ploče; b širina ploče; a duljina ploče (4000 mm); $\sum A_{sl}$, I_{sl} su karakteristike svih ukrućenja; A_p , I_p su karakteristike ploče bez ukrućenja; ψ_x je odnos rubnih naprezanja (za čisti tlak iznosi 1.0). $\sigma_{cr,c}$ je naprezanje elastičnog kritičnog izvijanja štapa (ukrute):

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 E I_{sl,1}}{A_{sl,1} a^2} \quad (10)$$

gdje su $A_{sl,1}$, $I_{sl,1}$ karakteristike jednog ukrućenja uzimajući u obzir pripadajuću širinu ploče prema HRN EN 1993-1-5, slika A.1 [6]. Redukcijski faktori ρ i χ_w se računaju prema relativnoj vitkosti ploče:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} \quad (11)$$

gdje su $\alpha_{ult,k}$ i α_{cr} minimalni množitelji proračunskog opterećenja kako bi se dosegla kritična otpornost i elastično kritično opterećenje:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)^2 \quad (12)$$

$$\alpha_{cr} = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{x,Ed}} \quad (13)$$

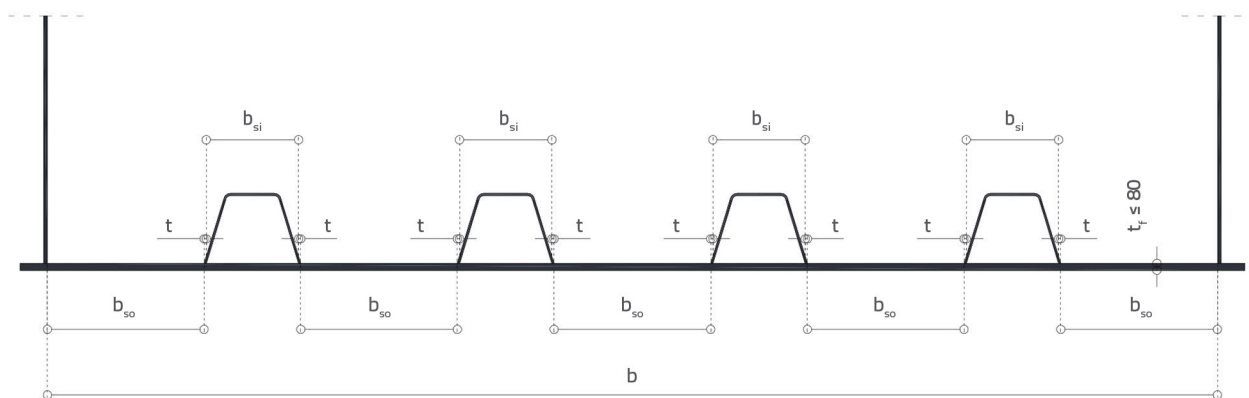
Dokaz prema izrazu (3) korišten je kako bi se odredila naprezanja za svaku ukrućenu ploču obrađenu u području ovog istraživanja. Primjena ove metode preporučena je za mostove [7] i Nacionalni dodaci nekih zemalja je podržavaju [13].

3.2. Odabir varijabli – širina ploče i raspored ukrućenja

Kako bi se provela parametarska studija i ocijenilo ponašanje pojedinog ukrućenja, potrebno je zadati grupe varijabli. Te varijable su: širina ploče, debljina ploče, tip ukrućenja i raspored ukrućenja. Raspored ukrućenja je određen brojem ukrućenja raspodijeljenim na širinu ploče.

Uvjeti odabira debljina ploče i tipa ukrućenja već su navedeni i komentirani u poglavlju 2.2. Prema tome, varijabla debljine ploče kreće se od 12 do 80 mm, a mogući tip ukrućenja (od 6 pred definiranih tipova) odabire se primjereno za svaku debljinu ploče.

Širine ploča su odabrane prema mogućnostima primjene u sandučastim presjecima mosta. Kod tih presjeka širina ploče je određena razmakom između hrptova sanduka (slika 2.), koji ovisi o ukupnoj širini mosta i broju komora unutar sanduka. Za većinu sandučastih presjeka mostova, širine ploča iznose od 4 do 10 m (vidljivo i na primjerima sa slike 1.). Uz mogućnosti zakošenih hrptova, ove širine dolaze u obzir za bilo koju mogućnost prometne širine presjeka mosta. Iako cjelokupno istraživanje uključuje sve širine od 4 do 10 m s korakom od 1 m, u ovom radu će se prezentirati rezultati za širine 4, 6, 8 i 10 m. Širine koje su između neće se razmatrati zbog preopsežnog prikaza svih rezultata.



Slika 5. Raspored ukrućenja po širini ploče

Posljednja promatrana varijabla je raspored ukrućenja duž širine ploče. Taj raspored je određen udaljenošću između susjednih ukrućenja i njime je definiran ukupan broj ukrućenja za pojedinu širinu ploče. Broj ukrućenja je određen prema uvjetima (oznake prema slici 5.) kako slijedi:

a. Neukrućeni dio ploče (dio između hrvtova susjednih ukrućenja) mora zadovoljiti uvjet za klasu 3 presjeka prema izrazu:

$$b_{so} \leq t_f \cdot 42\varepsilon \Rightarrow N_{min} \geq \frac{b - 42\varepsilon \cdot t_f}{42\varepsilon \cdot t_f + b_{si} + 2t} \tag{14}$$

b. Neukrućeni dio ploče mora biti kraći od 1000 mm:

$$b_{so} \leq 1000 \text{ mm} \Rightarrow N_{min} \geq \frac{b - 1000}{1000 + b_{si} + 2t} \tag{15}$$

Ovaj uvjet je usvojen iskustveno prema ocjeni autora. Kod velikih sanduka se zbog održavanja unutar sanduka ponekad transportira oprema, pa se pojavljuju lokalna opterećenja donje ploče. Ograničenje širine neukrućene ploče osigurava da se ta opterećenja mogu adekvatno prenijeti.

- c. Za ploče širine 4 m uzimaju se minimalno 3 ukrućenja ($N_{min} = 3$).
- d. Najveći broj ukrućenja određen je prema uvjetu da neukrućeni dio ploče između hrvtova susjednih ukrućenja bude barem

širine koja odgovara 80 % razmaka između hrvtova istog ukrućenja:

$$b_{so} \geq 0,8 \cdot b_{si} \Rightarrow N_{max} \leq \frac{b - 0,8 \cdot b_{si}}{1,8 \cdot b_{si} + 2t} \tag{16}$$

Ovaj uvjet je također usvojen iskustveno, kako bi proračunski algoritam preskočio ploče s pregusto postavljenim ukrućenjima. Ukrućenja na manjem razmaku od tako postavljenog uvjeta više ne doprinose otpornosti ploče na izbočivanje.

Uvjeti a. do d. definiraju granice za mogući izbor broja ukrućenja za svaku širinu ploče, debljinu ploče i tip ukrućenja. Tablica 1. pokazuje moguće konfiguracije ukrućenja prema ovim uvjetima.

3.3. Parametarski prikaz računskih naprezanja otpornosti na izbočivanje

Grupa ploča s parametrima koji su prethodno opisani izračunava se prema HRN EN 1993-1-5 [6]. Proračun je proveden algoritmom koji povećava računsko tlačno naprezanje $\sigma_{x,Ed}$ i provjerava jednadžbu (3).

Računsko tlačno naprezanje $\sigma_{x,Ed}$ je kod dimenzioniranja posljedica faktoriziranih djelovanja parcijalnim faktorima sigurnosti i faktorima kombinacije za različita istodobna djelovanja prema izrazima za granična stanja.

Iz jednadžbe (3) slijedi da za dokaz stabilnosti računsko tlačno naprezanje mora uvijek biti manje od računске vrijednosti

Tablica 1. Mogući broj ukrućenja i debljina ploče za različite širine ploča i tipove ukrućenja

	Tip ukrućenja (visina ukrućenja u [mm])					
	250	300	400	500	600	700
	Minimalna debljina ploče [mm]					
	12	16	16	20	20	30
Širina ploče [m]	Broj ukrućenja					
4	3 – 5	3 – 4	3 – 4	3	3	3
6	4 – 7	4 – 6	4 – 5	4 – 5	3 – 4	3 – 4
8	5 – 10	5 – 8	5 – 7	5 – 6	5 – 6	5
10	7 – 13	7 – 11	6 – 9	6 – 8	6 – 7	6 – 7

otpornosti na izbočivanje ukrućene ploče ili jednako toj vrijednosti:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{red,Rd} = \rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1} \quad (17)$$

Važno je upamtiti da je u izrazu (17) faktor ρ_x funkcija od računskog naprezanja $\sigma_{x,Ed}$. Algoritmom je zabilježen najveći $\sigma_{red,Rd}$ za koji je zadovoljen izraz (17), i to za svaku ploču. Rezultati su iscrtani na dijagramima (slika 6. – slika 9.) za ploče širina 4, 6, 8 i 10 m. Ti dijagrami pokazuju računsko tlačno naprezanje kod kojeg svaka ukrućena ploča prema svojoj debljini zadovoljava dokaz izbočivanja s punom iskoristivosti $\sigma_{x,Ed} / (\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}) = 1,0$; odnosno računsko naprezanje otpornosti na izbočivanje. Svaka krivulja u dijagramu predstavlja različiti tip i broj ukrućenja. U svakom dijagramu je dodana i krivulja za ploču bez ukrućenja (prema primjeru iz [15]). Svaki dijagram također pokazuje najveće računsko naprezanje kada izbočivanje nije moguće. Diskontinuitet u krivuljama postoji kod debljina ploča od 40 mm zbog promjene čvrstoće čelika. Kod ploča s manjim širinama i manjim brojem ukrućenja može se uočiti povećanje računskih otpornosti na izbočivanje s povećanjem njihove debljine zbog povećanja interakcijskog faktora pločastog i štapnog ponašanja

(ξ iz izraza (6)). Povećanje tog faktora utječe na izraženije pločasto ponašanje, koje je naročito prisutno kako se približava debljini od 80 mm.

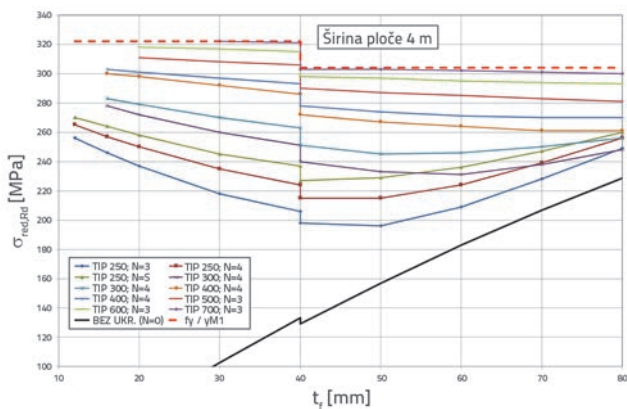
4. Postupak optimizacije ukrućene ploče

4.1. Utjecaji zaostajanja posmika

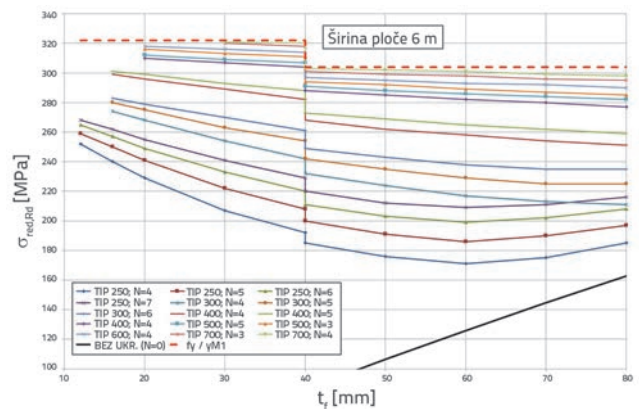
Optimizacijski dijagrami, koji će se izvesti u poglavlju 4.2, pokazuju potrebnu površinu ukrućene ploče za danu računsku tlačnu silu u pojasu i tip ukrućenja. Računska tlačna sila u pojasu računa se prema prethodno prikazanim računskim naprezanjima otpornosti $\sigma_{red,Rd}$:

$$F = A_{fs} \cdot \beta \cdot \sigma_{red,Rd} \quad (18)$$

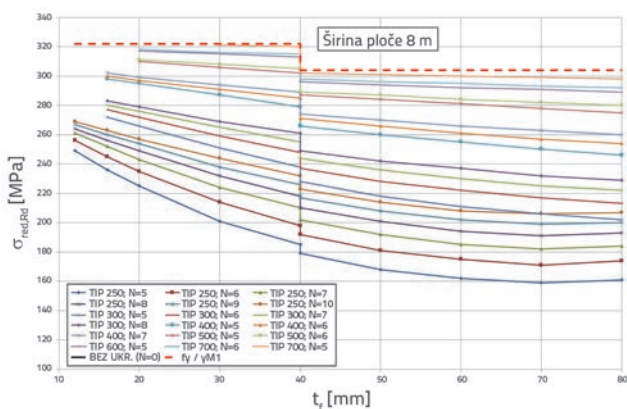
gdje je A_{fs} ukupna površina ploče s ukrućenjima, β je redukcijski faktor uslijed zaostajanja posmika, a $\sigma_{red,Rd}$ je računsko naprezanje otpornosti u ploči nakon kojeg će nastupiti izbočivanje. Redukcija zbog zaostajanja posmika u području negativnog momenta savijanja nosača (koji uzrokuje tlak u donjoj ukrućenoj pojasnici)



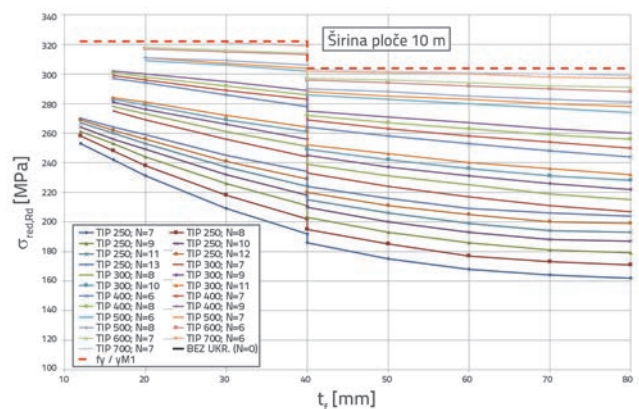
Slika 6. Računsko naprezanje otpornosti na izbočivanje za ukrućene ploče širine 4 m



Slika 7. Računsko naprezanje otpornosti na izbočivanje za ukrućene ploče širine 6 m



Slika 8. Računsko naprezanje otpornosti na izbočivanje za ukrućene ploče širine 8 m



Slika 9. Računsko naprezanje otpornosti na izbočivanje za ukrućene ploče širine 10 m

ovisi o duljini efektivnog raspona, širini ploče i odnosu površine ukrućenja prema površini ploča (utjecaj ortotropije):

$$\beta = \frac{1}{1 + 6 \left(\kappa - \frac{1}{2500\kappa} \right) + 1,6\kappa^2}, \kappa = \alpha_0 b_0 / L_e, \alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 t}} \quad (19)$$

gdje je:

- A_{sl} - površina ukrućenja
- b_0 - polovica širine ploče
- L_e - duljina efektivnog raspona
- α_0 - koeficijent koji uzima u obzir utjecaj ortotropije na redukciju uslijed zaostajanja posmika.

Ako bi se tlačna sila, koja se računa prema izrazu (18), učinila nezavisnom od faktora redukcije β , tada bi dijagrami u poglavlju 4 bili primjenjivi na bilo koji most neovisno o duljinama njegovih raspona. Međutim, u takvom slučaju, krivulje koje prikazuju potrebnu površinu svake ukrućene ploče, a koje će se izvesti za različite tipove i količinu ukrućenja, ne bi bile usporedive jer učinak redukcije uslijed zaostajanja posmika ovisni o odnosu površine ukrućenja i ploče (α_0). Ploče jednake širine, koje su prisutne u presjeku mosta sa istim efektivnim rasponom, mogu dakle imati različitu redukciju uslijed zaostajanja posmika, zbog različitog broja i tipa ukrućenja. Prema tome optimizacija kojom se pronalazi ukrućena ploča minimalne površine ne bi bila točna. Rješenje kojim bi se ovaj problem izbjegao podrazumijeva da se redukcijski faktor β razdvoji na dvije komponente – utjecaj koji dolazi od širine ploče i duljine efektivnog raspona (β'), i utjecaj koji proizlazi iz odnosa površine ukrućenja i ploče (α'):

$$\beta = f(\kappa) = f(\alpha_0, b_0, L_e) = f(\alpha_0) \cdot f(b_0, L_e) = \alpha' \cdot \beta' \Rightarrow \alpha' = \frac{\beta}{\beta'} \quad (20)$$

U izrazu (20) β' je redukcijski faktor izračunan sa $\kappa = b_0 / L_e$ koji ne uzima u obzir utjecaj odnosa površine ukrućenja i ploče. Vraćajući se na izraz (19), jasno je da rješenje za α' nije moguće kao analitički egzaktno. U daljnjem rješavanju ovog problema provedena je analiza vrijednosti β , α' i β' da bi se vidjelo kako se one mijenjaju s promjenama α_0 , b_0 i L_e . Za opseg ploča i

ukrućenja iz ovog istraživanja α_0 se nalazi u području od 1,02 do 1,43, a opseg b_0 i L_e uzet je kako je objašnjeno u poglavlju 3.2. Tablica 2. prikazuje rezultate ove analize.

Cilj je analize prema tablici 2. da se pronađe i usvoji konstantna duljina efektivnog raspona (L_e) koja će se i dalje primjenjivati za izračune α' prema izrazu (20). Uvjet za usvajanje određene duljine L_e jest taj da u redukcijama α' koristeći taj L_e razlika bude minimalna bez obzira na najmanji i najveći mogući L_e . Sve redukcije su provjerene za slučajeve mogućih α_0 ($\alpha_0 = 1,0$ do 1,43) i mogućih širina ploča ($b_0 = 2$ do 5 m). Pronađeni L_e koji najbolje zadovoljava ovaj uvjet iznosi 66 m, pri čemu najveća greška iznosi 4,37 %. Veća greška od 6.89 % pojavljuje se samo kada se pretpostavi β' (redukcija ne uzimajući u obzir doprinos ukrućenja) s iznosom 1.0, što se događa samo kada su efektivne duljine vrlo velike. Takvi slučajevi nisu mogući za presjeke gdje je donji pojas u tlaku (presjeci iznad oslonca s negativnim momentima savijanja). Prema rezultatima iz tablice 2., za sve daljnje proračune usvojena je efektivna duljina od 66 m. Tlačna sila iz izraza (18) sada se može odrediti prema:

$$F = A_{fs} \cdot \beta' \cdot \alpha'(L_e = 66 \text{ m}) \cdot \sigma_{red,RD} \quad (21)$$

$$F_\beta = \frac{F}{\beta'} = A_{fs} \cdot \alpha'(L_e = 66 \text{ m}) \cdot \sigma_{red,Rd} \quad (22)$$

Tlačna sila F_β , izračunana na ovaj način, nije više ovisna o promjenjivoj efektivnoj duljini, ali i dalje uzima u obzir utjecaj površine ukrućenja kod redukcije uslijed zaostajanja posmika. Prema tome, krivulje u dijagramima iz poglavlja 4 usporedive su za istu tlačnu silu F_β i mogu se koristiti za bilo koju efektivnu duljinu, uz usvojenu najveću grešku od 4,37 % kada su efektivne duljine minimalne (40 m).

4.2. Algoritam za izračun optimizacijskih dijagrama

Ukrućena ploča je opterećena računskom tlačnom silom. U visokim sandučastim nosačima, koji su prisutni u mostovima, može se pretpostaviti da su tlačna naprezanja uslijed te sile raspodijeljena duž visine ukrućenja [9]. Ova pretpostavka je

Tablica 2. Parametarska analiza utjecaja na redukciju uslijed zaostajanja posmika

b_0	2			5		
L_e	40	66	130	40	66	130
	β					
$\alpha_0 = 1,02$	0,792	0,901	1,0	0,564	0,693	0,85
$\alpha_0 = 1,43$	0,712	0,828	0,977	0,474	0,607	0,774
	β'					
$\alpha_0 = 1,0$	0,796	0,906	1,0	0,57	0,698	0,854
	$\alpha' = \beta / \beta'$					
$\alpha_0 = 1,02$	0,995	0,994	1,0	0,989	0,993	0,995
$\alpha_0 = 1,43$	0,894	0,914	0,977	0,831	0,869	0,906
	GREŠKA za α' : [$\alpha'(L_e = 66 \text{ m}) - \alpha'$] / $\alpha'(L_e = 66 \text{ m})$					
$\alpha_0 = 1,43$	2,19 %	0 %	-6,89 %	4,37 %	0 %	-4,26 %

točnija s povećanjem odnosa visine ukrućenja i visine presjeka. Prema tome, ukupna tlačna sila u ukrućenoj ploči preuzima se ukupnom površinom ploče i ukrućenja. Naprezanja djeluju na efektivnoj širini ukrućene ploče. Najveća računski tlačna sila prije pojave izbočivanja može se izračunati prema izrazu (18) ili izrazu (22) ako se izostavi utjecaj zaostajanja posmika uslijed efektivne duljine raspona, kako je opisano u poglavlju 4.1.

Za svaku ploču, kako se navodi u poglavlju 3.3, algoritam računa površinu A_{fs} i redukcijski faktor α' , i konačno tlačnu silu F_{β} . Algoritam također bilježi ukupnu površinu čelika za čitavu ukrućenu ploču. Ova površina predstavlja potrebnu količinu čelika za preuzimanje tlačne sile, i kao takva je jedan od parametara za optimizaciju. Na osnovi rezultata algoritma iscrtani su dijagrami (slika 10. – slika 13.) koji pokazuju potrebnu površinu čelika pojasa za svaku širinu ukrućene ploče. Svaki dijagram sadrži krivulje koje predstavljaju tip i broj ukrućenja. Dodatne krivulje su iscrtane da povežu točke iste debljine ploče unutar dijagrama (trend linije). Međudebljine ploča se mogu grafički interpolirati između ovih linija. Svaka točka na iscrtanim krivuljama prikazuje dopuštenu računsku tlačnu silu i pripadnu ukupnu površinu čelika za pojedini tip i broj ukrućenja, na odvojenim dijagramima prema širinama ploča.

4.3. Interpretacija dijagrama i kriteriji za optimizaciju

Očekivano, krivulje na dijagramima (slika 10. do 13.) koje predstavljaju deblje ploče u višem su području dijagrama. Krivulje ploča s jačim ukrućenjima, ili s većim brojem ukrućenja položene su više desno u dijagramima (veća dozvoljena računski tlačna sila). Krivulje ploča sa slabijim ukrućenjima završavaju prije u dijagramu (manja dopuštena računski tlačna sila). Za usporedbu je u svakom dijagramu iscrtana krivulja koja predstavlja neukrućenu ploču.

Vrijednosti računski tlačne sile koju ukrućena ploča može preuzeti uvjetovane su prije svega njenom površinom, pa se podrazumijeva da ploče veće širine dosežu veće maksimalne vrijednosti unutar dijagrama. Zanimljivo je uočiti da se kod ukrućenih ploča širine 4 m dijagrami za najmanja ukrućenja (tip 250) i najveća ukrućenja (tip 600 i tip 700) nalaze relativno blizu, odnosno potrebne površine ploča za preuzimanje iste tlačne sile ne razlikuju se mnogo za različite vrste ukrućenja. Ovo je Primjerice, za vrijednost tlačne sile od 90 MN, ploča koja s najmanjom površinom zadovoljava stabilnost je tip 700 ($t = 50$ mm), a ploča koja sa najvećom površinom zadovoljava stabilnost je tip 250 ($t = 70$ mm). Razlike u tim dvjema površinama su samo 11 %. Ako za usporedbu promotrimo ploču širine 6 m i istu tlačnu silu, ploče koje zadovoljavaju stabilnost s najmanjom površinom (tip 700, $t = 30$ mm) i najvećom površinom (tip 250, $t = 70$ mm) razlikuju se u svojoj površini za približno 66 %. Još veće razlike mogu se primijetiti kod ploča širina 8 m i 10 m. Objašnjenje za ovo slijedi iz interakcije pločastog i štapnog ponašanja ukrućene ploče pri gubitku stabilnosti (4). Kod ploča većih širina interakcijski faktor ξ (6) je ili 0 ili vrlo mali, što znači da se gubitak

stabilnosti realizira preko štapnog otkazivanja pojedine ukrute. Za ploče manjih širina (posebno uočljivo na ploči od 4 m), i većih debljina, interakcijski faktor ξ je veći – do 0,353 za ploče sa slabijim rebrima tipa 250. U takvim slučajevima, zbog udjela pločastog ponašanja, redukcija naprezanja uslijed izbočivanja je mnogo manja, što je i prethodno bilo vidljivo na slici 6. (uzlazni dio dijagrama za tip 250 i tip 300 kod povećanja debljine ploče). Kod ploča većih širina, povećanje debljine ploče neće imati toliko utjecaj na povećanje računskog naprezanja otpornosti na izbočivanje već se ono ostvaruje samo kroz povećanje krutosti (visine) samog rebra. Iz tog razloga je kod ploča većih širina uvijek racionalnije koristiti manju debljinu ploče i rebro veće visine, što je iz dijagrama jasno vidljivo.

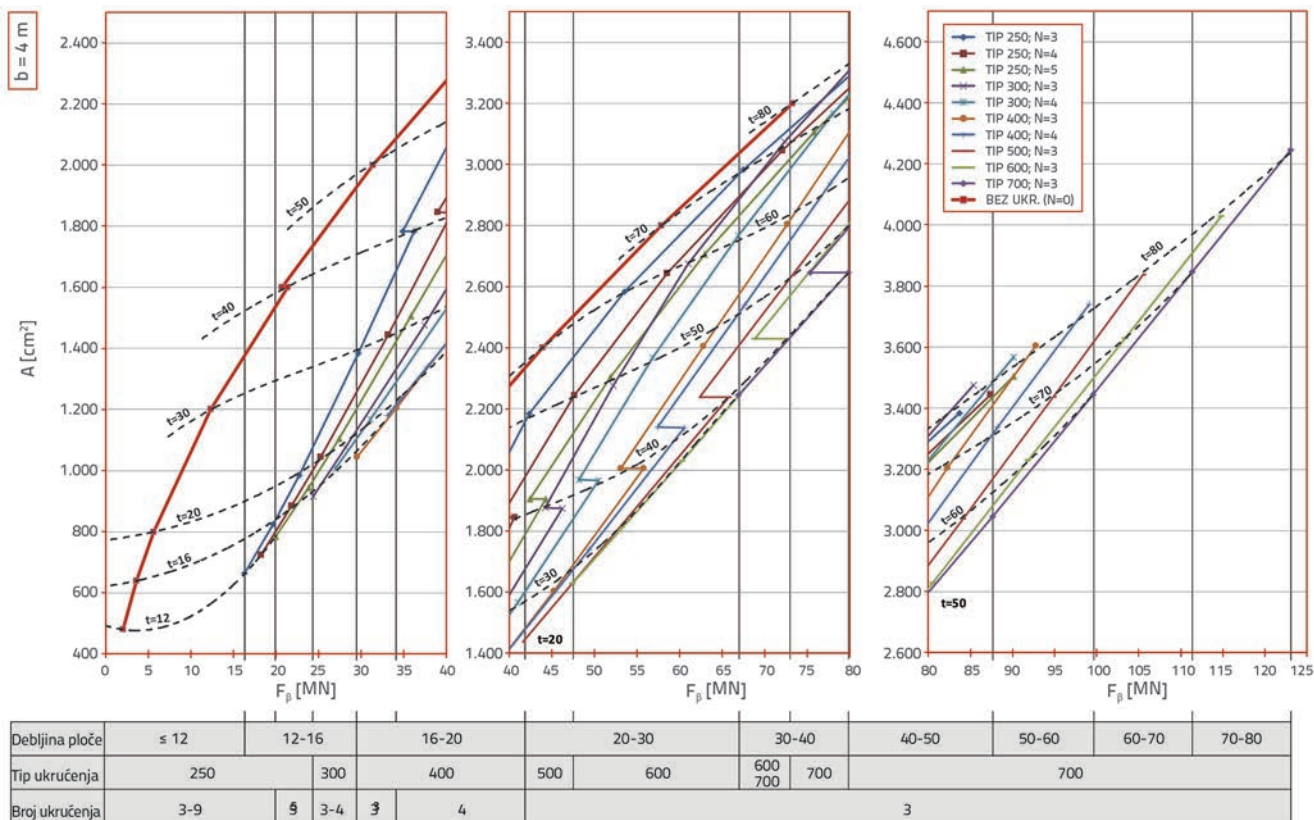
Naposlijetku, korištenjem ovih dijagrama moguća je optimizacija koja definira najpovoljniji tip i broj ukrućenja prema djelujućoj tlačnoj sili, za svaku širinu ploče. Usvojeni kriteriji optimizacije preferiraju određene debljine ploča, tip ukrućenja i njihov broj prema sljedećim pravilima:

- Odabiru se ukrućene ploče s najmanjom ukupnom površinom čelika (uvjet potrošnje materijala).
- Kada više ukrućenih ploča ima istu površinu (krivulje koje se preklapaju ili su vrlo bliske), odabire se ploča s manjim brojem ukrućenja (uvjet vremena radioničke izrade ploče).

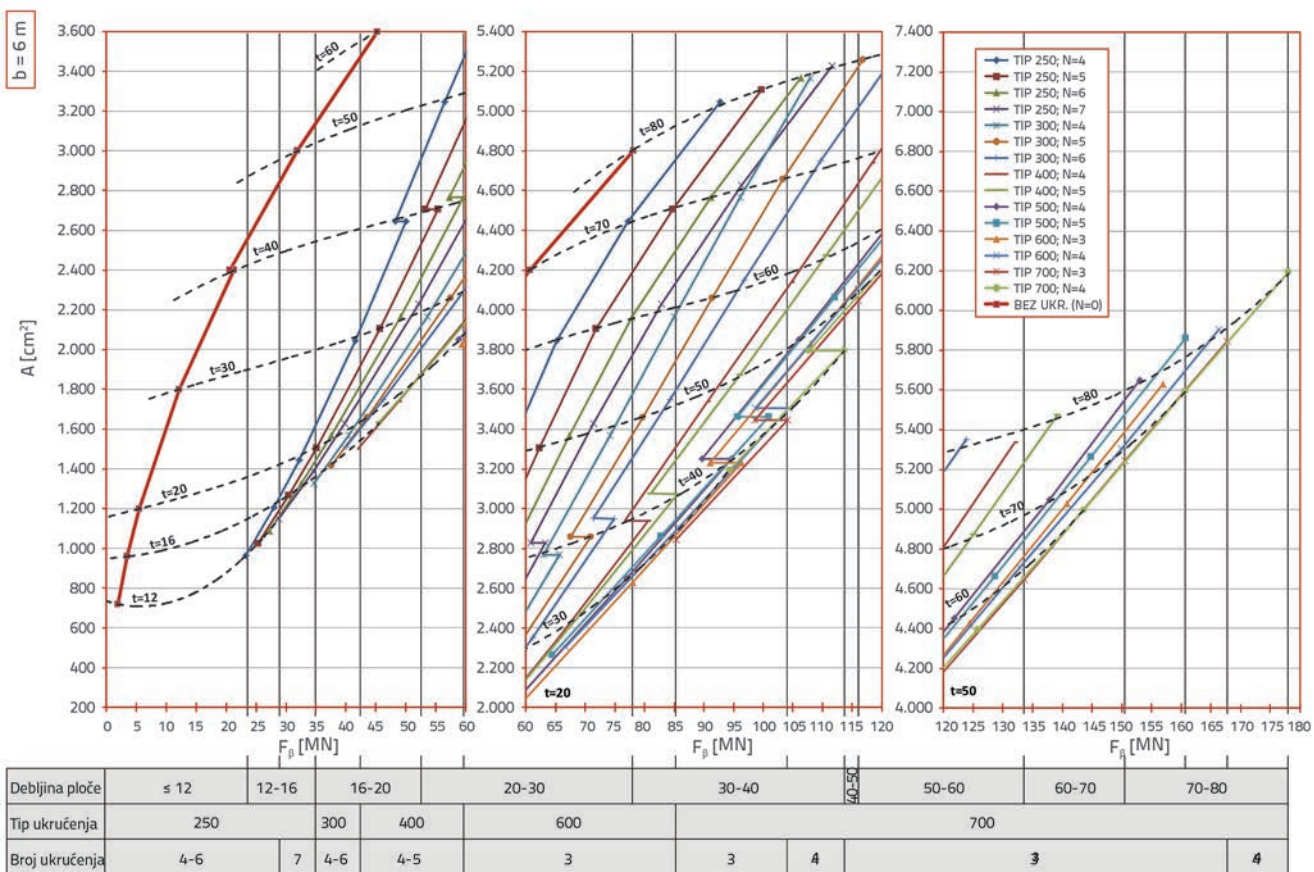
Ploče koje zadovoljavaju iskazane uvjete su navedene ispod svakog dijagrama u ovisnosti o veličini tlačne sile. One su rezultat najnižih vrijednosti anvelopa krivulja, i mogu se smatrati optimalnima prema dimenzioniranju na izbočivanje iz norme HRN EN 1993-1-5 [6]. Također se može uočiti da zadovoljavanjem navedenih uvjeta ploča ima najmanju moguću debljinu koja je pridružena višem ukrućenju. Kod viših ukrućenja, manji broj ukrućenja dat će optimalnu ploču zbog manje redukcije uslijed zaostajanja posmika (povoljniji odnos površine ukrućenja i površine ploče).

5. Primjena

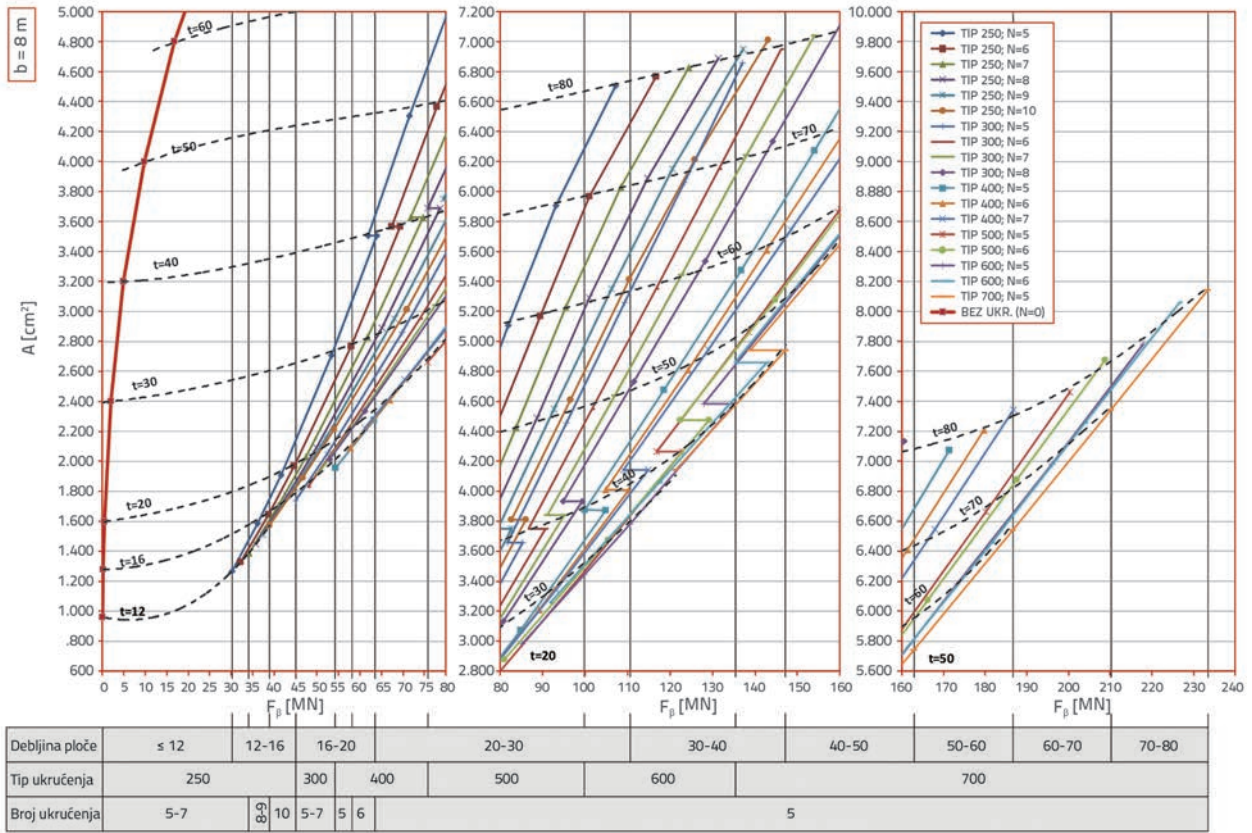
Dva seta dijagrama prezentirana u ovom radu primjenjiva su na čelične sandučaste gredne mostove s ukrućenim donjim tlačnim pojasom. Prvi set dijagrama (poglavlje 3.3) pokazuje računski naprezanja otpornosti prema HRN EN 1993-1-5 poglavlje 10 [6] za različite tipove ukrućenja i debljine i širine ploča. Svi ti tipovi ukrućenja uključuju one visine i oblike koji se najčešće koriste u mostogradnji, uz dodatak ukrućenja većih visina za širi spektar primjene. Prikazani prvi set dijagrama može primijeniti tijekom projektiranja kako bi se brzo provjerilo da li odabrana ploča s ukrućenjima, koja imaju iste ili slične karakteristike onima iz dijagrama, može preuzeti računski tlačna naprezanja bez izbočivanja. Pokaže li se da to nije moguće, tada se za istu debljinu ploče, prema dijagramima, može odabrati tip i broj ukrućenja koji će zadovoljiti zadana računski naprezanja. Drugi set dijagrama (poglavlje 4.3) može se primijeniti tijekom odabira optimalnog rješenja ukrućenja ploče. Za zadani poprečni presjek sandučastog nosača mosta (s pretpostavkom tlačnog donjeg pojasa) i djelujući računski moment savijanja, može



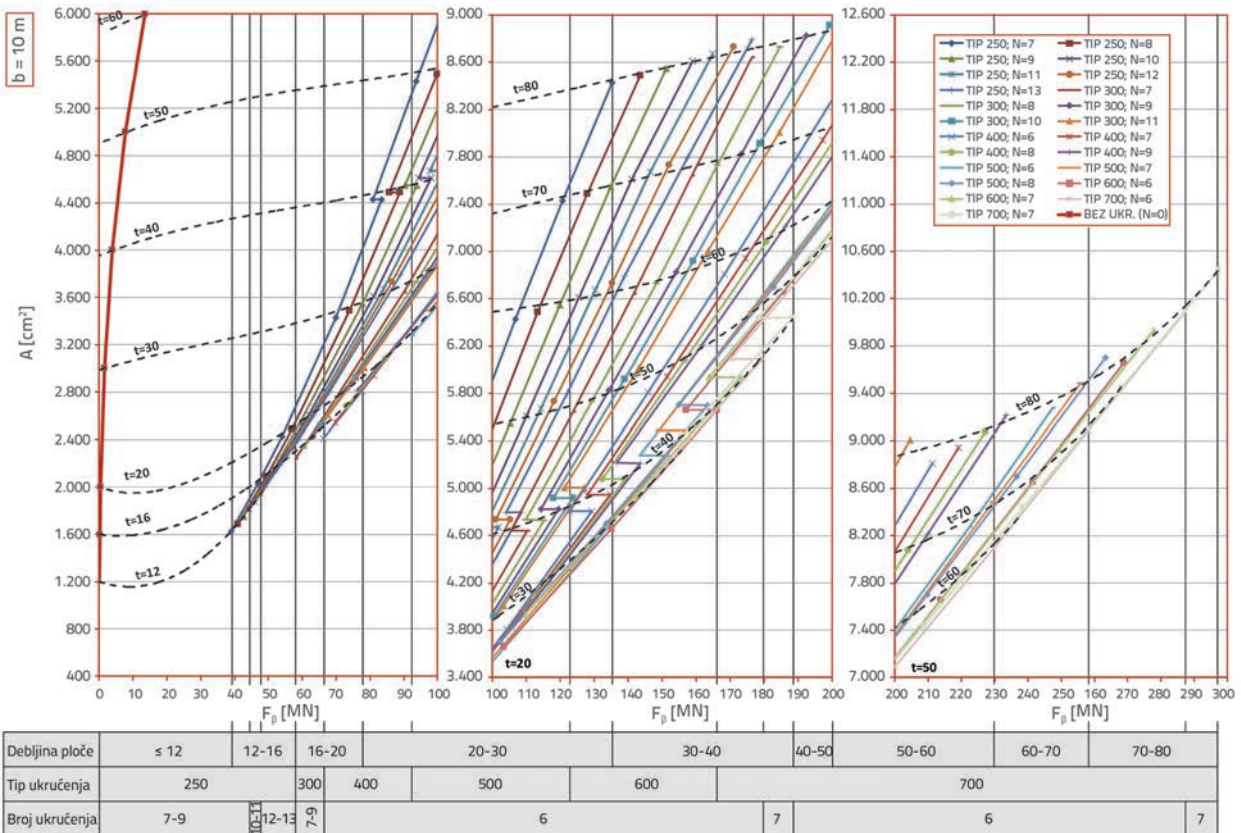
Slika 10. Optimizacijski dijagram za ploče širine 4 m



Slika 11. Optimizacijski dijagram za ploče širine 6 m



Slika 12. Optimizacijski dijagram za ploče širine 8 m



Slika 13. Optimizacijski dijagram za ploče širine 10 m

se pretpostaviti računski tlačna sila u donjem pojasu prema statičkim karakteristikama sandučastog presjeka. U prvoj iteraciji preporučuje se pretpostaviti da je ta sila nešto veća, uzimajući u obzir prije donesenu pretpostavku (poglavlje 4.2) da su naprezanja jednoliko raspoređena po visini ukrućenja. Budući da zbog savijanja ovo nije potpuno točno, poglavito u sanducima manjih visina, pretpostavljena veća sila dat će točnije očitavanje optimalne ploče iz dijagrama. Nakon toga se ova tlačna sila mora podijeliti s redukcijskim faktorom uslijed zaostajanja posmika β (ali koristeći koeficijent utjecaja ortotropije $\alpha_o=1.0$ jer je taj koeficijent već ugrađen u rezultate dijagrama), što će dati povećanu tlačnu silu F_{β} . Koristeći prikladan dijagram (prema širini ploče), može se odabrati optimalna ploča (određena debljinom, tipom i brojem ukrućenja) za tlačnu silu F_{β} . Ovaj postupak se učestalo ponavlja, tako da se u sljedećem koraku ponovno računaju statičke karakteristike sandučastog presjeka uzimajući u obzir donju ukrućenu ploču odabranu u prethodnom koraku, i ponovno se računa tlačna sila u donjem pojasu od savijanja. Kada je poznata debljina ploče i vrsta ukrućenja iz prve iteracije, tlačna sila se može točnije odrediti prema naprezanjima u donjem pojasu sanduka i ponovno usporediti s vrijednostima u dijagramu. Iteracije završavaju kada tlačna sila u pojasu za odabranu vrstu ukrućenja odgovara optimizacijskoj tablici ispod dijagrama. Kako se tlačna sila u pojasu visokog sandučastog nosača ne mijenja mnogo s promjenom debljine

i vrste ukrućenja pojasa, iteracijski postupak brzo konvergira i optimalna ukrućena ploča se može brzo pronaći. Ovi dijagrami mogu se također primijeniti ako je poznata tlačna sila F_{β} i zadana točna debljina pojasa. Odabirom krivulje najbliže točki koja je u dijagramu definirana ovim varijablama, vidjet će se optimalan tip i broj ukrućenja za takvu ploču.

6. Zaključak

Rezultati ovog istraživanja mogu se koristiti kod ukrućenih ploča u sandučastim čeličnim presjecima grednih mostova s duljinama ploča od 4 m (što je tipični razmak između poprečnih ukruta presjeka). Dobiveni dijagrami koji pokazuju računski naprezanja otpornosti na izbočivanje ukrućene ploče također se mogu primijeniti na bilo koju drugu vrstu konstrukcije sa sličnim dimenzijama i opterećenjem ukrućenih ploča. Koristeći rezultate ovog istraživanja moguće je brzo pronaći rješenje ukrućenja ploče koje zadovoljava dokaz prema HRN EN 1993-1-5, koje je optimalno u pogledu utroška materijala i vremena radioničke izrade. Rješenje ukrućenja podrazumijeva odabir između 6 tipova ukruta različite visine i debljine, odabir potrebnog broja tih ukrućenja i odabir debljine ploče. Konačan dokaz izbočivanja za ploču koja je odabrana prema smjernicama iz ovog istraživanja polučit će punu iskoristivost ploče i na taj način optimalno rješenje ukrućenja.

LITERATURA

- [1] Mensinger, M., Ndogmo, J., Parra, R.: Optimization of stiffened plates for steel bridges based on Eurocode 3 Part 1-5 using genetic algorithms, *STEEL CONSTRUCTION*, 4 (2011) 1, pp. 29-33, <https://doi.org/10.1002/stco.201110005>
- [2] Kaveh, A., Bakhshpoori, T., Barkhori, M.: Optimum design of multi-span composite box girder bridges using Cuckoo Search algorithm, *Steel and Composite Structures*, 17 (2011) 5, pp. 705-719.
- [3] Unterweger, H., Lechner, A., Greiner, R.: Plastic load bearing capacity of multispan composite highway bridges with longitudinally stiffened webs, *Steel and Composite Structures*, 11 (2011) 1, pp. 1-19, <https://doi.org/10.12989/scs.2011.11.1.001>
- [4] Ferreira, P., Virtuoso, F.: Stiffened flanges used in steel box girder bridges, *International Conference on Multi-Span Large Bridges*, Porto, Portugal, July 2015, <https://doi.org/10.1201/b18567-151>
- [5] Maiorana, E., Pellegrino, C.: Linear buckling analysis of welded girder webs with variable thickness, *Steel and Composite Structures*, 11 (2011) 6, pp. 505-524, <https://doi.org/10.12989/scs.2011.11.6.505>
- [6] HRN EN 1993-1-5:2006 Eurokod 3 Projektiranje čeličnih konstrukcija, dio 1-5: Pločasti konstrukcijski elementi (EN 1993-1-5:2006+AC:2009), Hrvatski zavod za norme, Zagreb, Hrvatska, 2014.
- [7] Naumes, J., Feldmann, M., Sedlacek, G.: Demonstration of the common basis of method 1 (effective width approach) and method 2 (stress limit approach) for the plate-buckling assessment of built-up steel components according to Eurocode 3-Part 1-5, *Stahlbau*, 78 (2009) 3, pp. 139-147, <https://doi.org/10.1002/stab.200910014>
- [8] HRN EN 1993-1-1:2014 Eurokod 3 Projektiranje čeličnih konstrukcija, dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1993-1-1:2005+AC:2009), Hrvatski zavod za norme, Zagreb, Hrvatska, 2014.
- [9] Beg, D., Kuhlmann, U., Davaine, L., Braun, B.: *Design of Plated Structures*, ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2010.
- [10] Grondin, G.Y., Elwi, A.E., Cheng, J.J.R.: Buckling of stiffened steel plates – a parametric study, *Journal of Constructional Steel Research*, 50 (1999), pp. 151-175, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(98\)00242-9](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(98)00242-9)
- [11] Sheikh, I.A., Elwi, A.E., Grondin, G.Y.: Stiffened steel plates under uniaxial compression, *Journal of Constructional Steel Research*, 58 (2002), pp. 1061-1080, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00083-9)
- [12] Mittelstedt, C.: Explicit analysis and design equations for buckling loads and minimum stiffener requirements of orthotropic and isotropic plates under compressive load braced by longitudinal stiffeners, *Thin-Walled Structures*, 46 (2008), pp. 1409-1429, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.03.007>
- [13] HRN EN 1993-2:2014/NA Eurokod 3 Projektiranje čeličnih konstrukcija, dio 2: Čelični mostovi – Nacionalni dodatak, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, Hrvatska, 2014.
- [14] Galéa, Y., Martin, P.-O.: Longitudinally stiffened plates in Eurocode 3: Calculation of the global critical buckling stress, *Journal of Constructional Steel Research*, 66 (2010), pp. 1345-1353, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.05.001>
- [15] Unterweger, H., Kettler, M.: Unstiffened panels - Really big differences between Eurocode EN 1993-1-5 and DIN 18800-3, *Stahlbau*, 82 (2013) 8, pp. 557-634.