

UDK 624.072.2001.8:69.009.182

Primljeno 14. 3. 2006.

# Proračun sačastih nosača prema Eurokodu 3

Višnja Tkalčević, Ivica Džeba, Boris Androić

## Ključne riječi

sačasti nosač,  
proračun,  
Eurokod 3,  
otpornost na savijanje,  
dimenzioniranje,  
norma DIN

## Key words

castellated beam,  
analysis,  
Eurocode 3,  
bending resistance,  
design,  
DIN standard

## Mots clés

poutre ajourées,  
Eurocode 3,  
résistance à la flexion,  
dimensionnement,  
norme DIN

## Ключевые слова

сотовая балка,  
расчёт,  
Еврокод 3,  
сопротивление на изгиб,  
димензионирование,  
норма DIN

## Schlüsselworte

Wabenträger,  
Berechnung,  
Eurocode 3,  
Biegebeständigkeit,  
Bemessung,  
DIN-Norm

V. Tkalčević, I. Džeba. B. Androić

Pregledni rad

## Proračun sačastih nosača prema Eurokodu 3

Razmatrani su sačasti nosači kao alternativa punostijenim nosačima na velikim rasponima. Opisana su novija istraživanja i mogući načini otkazivanja takvih konstrukcijskih elemenata. U radu je prikazan proračun takvih nosača prema normi Eurokod 3, a dobiveni rezultati uspoređuju se s normom DIN koja se rabila u nas. Na temelju provedenih parametarskih analiza upozoreno je na područje ekonomske primjene sačastih nosača s obzirom na njihove relativne vitkosti i veličine otvora.

V. Tkalčević, I. Džeba. B. Androić

Subject review

## Analysis of castellated beams according to Eurocode 3

The use of castellated beams instead of solid web beams for large spans is considered. Some recent studies are presented, and conditions under which such structural elements can prove defective are proposed. The analysis of such beams according to Eurocode 3 is presented in the paper, and the results obtained are compared with the DIN standard, which is used in our country. Taking note of appropriate parametric analyses, the authors point to the area in which castellated beams can be economical, because of their relative slenderness and span sizes.

V. Tkalčević, I. Džeba. B. Androić

Ouvrage de synthèse

## L'analyse de poutres ajourées selon l'Eurocode 3

L'emploi de poutres ajourées au lieu de poutres à âme pleine, pour les longues portées, est considéré. Quelques études récentes sont présentées, et les conditions sous lesquelles ces éléments structurels peuvent se montrer défectifs, sont proposées. L'analyse de ces poutres selon l'Eurocode 3 est présentée dans l'ouvrage, et les résultats obtenus sont comparés avec la norme DIN, qui est normalement utilisé dans notre pays. En prenant compte des analyses paramétriques appropriées, les auteurs mettent en relief la zone dans laquelle les poutres ajourées devraient s'avérer économiques, à cause de leur relative minceur et la grandeur de portées.

B. Tkalčević, I. Džeba, B. Androić

Обзорная работа

## Расчёт сотовых балок согласно Еврокоду 3

В работе рассматривались сотовые балки в качестве альтернативы полнотенным балкам на больших пролётах. Показаны новейшие исследования и возможные способы отказа таких конструктивных элементов. В работе показан расчёт таких балок согласно Еврокоду 3, а полученные результаты сравниваются с нормой DIN, которая применялась и у нас. На основании проведённых параметрических анализов указано на область экономичного применения сотовых балок с учётом их относительной гибкости и величины отверстия.

V. Tkalčević, I. Džeba. B. Androić

Übersichtsarbeit

## Berechnung von Wabenträgern nach Eurocode 3

Man betrachtete Wabenträger als Alternative zu Vollwandträgern bei grossen Spannweiten. Dargestellt sind neuere Forschungen und mögliche Absagungsarten solcher Tragwerkselemente. Im Artikel ist die Berechnung solcher Träger nach der Norm Eurocode 3 dargestellt und die gewonnenen Ergebnisse mit der DIN-Norm verglichen die in Kroatien benützt wird. Auf Grund durchgeführter Parameteranalysen wird auf das Gebiet der wirtschaftlichen Anwendung von Wabenträgern hinsichtlich deren relativen Schlankheit und der Spannweite hingewiesen.

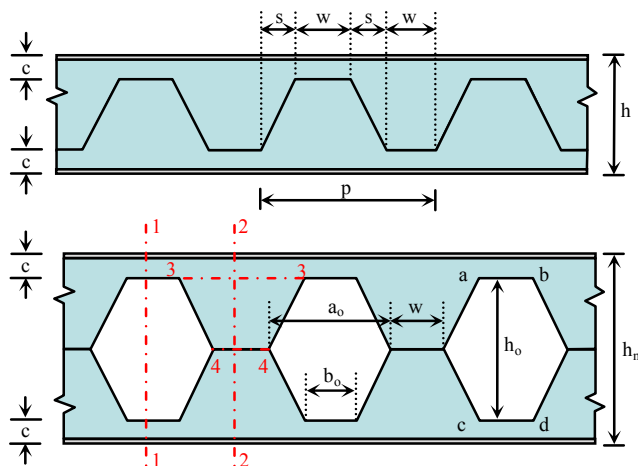
Autori: Mr. sc. **Višnja Tkalčević**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Ivica Džeba**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Boris Androić**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

## 1 Uvod

Saćasti nosači kao dijelovi čeličnih konstrukcija imaju tehničku i ekonomsku opravdanost primjene u industrijskim i višekatnim građevinama itd. U usporedbi s izvornim punostijenim nosačima od kojih se izrađuju, saćasti nosači mogu redovito prenijeti veće opterećenje, što ovisi o duljini nosača te obliku, veličini i rasporedu otvora u hrptu nosača. Zbog znatno veće visine imaju i veći moment tromosti presjeka, što saćaste nosače, uza sve prije navedene prednosti, čini pogodnim za veće raspone. Uz to, otvori u hrptu omogućuju nesmetan prolazak instalacija unutar visine nosača, čime se dodatno ne povećava visina konstrukcije.

Međutim, u slučajevima kada se pojavljuju koncentrirane sile visokog intenziteta, potrebno je izvesti dodatna ukrućenja hrpta nosača. Također, u slučajevima gdje su postavljeni visoki zahtjevi za požarnu otpornost, saćasti nosači imaju nešto slabije karakteristike u odnosu na punostijene valjane profile.

Saćasti se nosači rade od valjanih ili zavarenih I profila rezanjem hrpta, razmicanjem i horizontalnim pomicanjem gornjeg dijela nosača u odnosu na donji te zavarivanjem istaknutih dijelova hrpta, čime se dobivaju nosači veće visine od izvornih I profila (slika 1.). U ovome radu obrađen je najčešće upotrebljavani saćasti nosač s pravilnim šesterokutnim otvorima u hrptu.

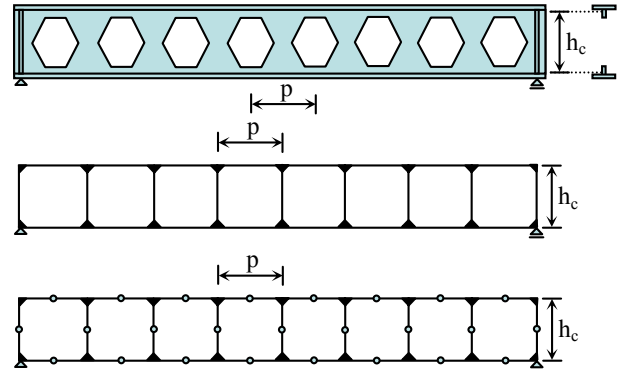


Slika 1. Saćasti nosač

## 2 Metode proračuna

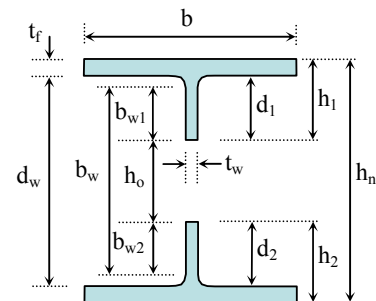
Zbog postojanja otvora u hrptu nosača, mehanizam otkazivanja drukčiji je nego u slučaju punostijenih I profila. Stoga i određivanje otpornosti saćastih nosača opterećenih na savijanje podliježe drukčijim pravilima. Dosta se često radi pogreška tako da se otpornost na savijanje saćastog nosača određuje tako da se dva razmaknuta

pojasna T presjeka promatraju kao jedan jedinstveni presjek, a da se otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu određuje na mjestu nosača s punim hrptom. Takav je tretman saćastog nosača pogrešan i daje rezultate na strani manje sigurnosti.



Slika 2. Saćasti nosači i računski modeli

Promatranjem načina otkazivanja pokazalo se da je najbolje rješenje za proračun momenata i unutarnjih sila odabir Vierendeel nosača (slika 2.) [1]. Raspodjela unutarnjih sila i momenata pokazala je da su momenti u sredinama vertikalna i pojava približno jednaki nuli, tako da se na tim mjestima mogu postaviti zglobovi i na taj način eliminirati "unutarnja" statička neodređenost Vierendeelova nosača.



$$p = 2(w + s)$$

$$a_o = w + 2 \cdot s$$

$$b_o = w$$

$$h_n = 2(h - c)$$

Na takav se način mogu proračunavati uzdužne sile u dijelovima nosača iznad i ispod otvora, kao posljedica djelovanja momenta savijanja u nosaču, te proračunavati momenti savijanja nastali zbog djelovanja poprečne sile u dijelovima nosača između otvora te iznad i ispod otvora.

Da bi sačasti nosač udovoljavao uobičajenim zahtjevima za prijenos opterećenja te da se mogu primijeniti ovdje opisane metode proračuna, dimenzije i raspored otvora moraju zadovoljiti sljedeće kriterije s oznakama prikazanim na slici 1.:

- (1)  $h_o \leq 0,75 \cdot d_w$       (4)  $a_o \leq h_o$   
 (2)  $d_1 \geq 0,10 \cdot d_w$       (5)  $b_o = w$   
 (3)  $d_2 = d_1$               (6)  $0,25 \cdot a_o \leq w \leq 0,5 \cdot a_o$

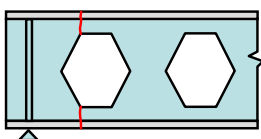
### 3 Načini otkazivanja za granično stanje nosivosti

#### 3.1. Općenito

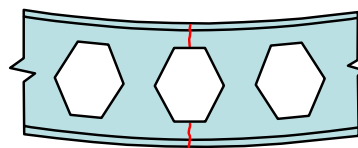
Posljednjih desetak godina istraživanja sačastih nosača bitno su napredovala, tako da su se bolje mogli vidjeti mogući načini otkazivanja. To je rezultiralo i znatno složenijim postupkom dimenzioniranja ovih nosača u odnosu na otprije poznate postupke. Za sačaste nosače treba provjeriti sljedeće načine otkazivanja, kako je to sadržano u [1]:

- I. Otkazivanje gornjeg i donjeg **T** profila na mjestu otvora (presjek 1-1 na slici 1.) zbog pojedinačnih djelovanja i njihovih kombinacija (slika 3.):
  - proračunske poprečne sile u nosaču  $V_{Ed}$ ;
  - proračunske uzdužne sile  $N_{M,Ed}$  od djelovanja proračunskog momenta savijanja na nosaču  $M_{Ed}$ ;
  - proračunskog momenta savijanja na Vierendeelovu nosaču  $M_{V,Ed}$  zbog djelovanja proračunske poprečne sile na nosaču  $V_{Ed}$ ;
- II. Otkazivanje dijela hrpta između otvora zbog kombinacije djelovanja (presjek 2-2 na slici 1.):
  - proračunskih poprečnih sila na Vierendeelovu nosaču  $V_{V,Ed}$  zbog djelovanja proračunske poprečne sile na nosaču  $V_{Ed}$ ;
  - proračunskih momenata savijanja na Vierendeelovu nosaču  $M_{V,Ed}$  zbog djelovanja proračunske poprečne sile na nosaču  $V_{Ed}$ ;
  - računskih uzdužnih sila  $N_{F,Ed}$  poradi djelovanja vanjskih poprečnih vertikalnih proračunskih sila  $F_{Ed}$ .
- III. Otkazivanje sačastog nosača na savijanje zbog bočnog torzijskog izvijanja
- IV. Lokalno otkazivanje zbog poprečnog opterećenja.

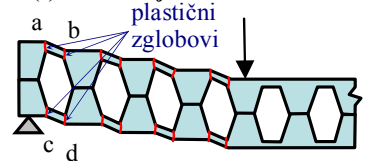
(a) Otkazivanje zbog poprečne sile



(b) Otkazivanje zbog momenta savijanja



(c) Deformacija Vierendeelova nosača



Slika 3. Otkazivanje sačastog nosača za poprečne presjeka s otvorom u hrptu

U ovome je slučaju promatran sačasti nosač s pridržanim tlačnim pojasom, tako da je izbjegnuto otkazivanje poradi bočnog torzijskog izvijanja.

#### 3.2 Otkazivanje poprečnog presjeka na mjestu otvora

Za poprečne presjeka nosača na mjestu otvora u hrptu (presjek 1-1 na slici 1.) provjerava se otpornost na učinke djelovanja proračunskog momenta savijanja  $M_{Ed}$  i proračunske poprečne sile  $V_{Ed}$  poradi vanjskog opterećenja.

- Proračunska otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu -  $V_{Rd}$

Provjerava se hrpat **T** presjeka koji preuzima pola ukupne proračunske poprečne sile  $V_{Ed}$  (slika 3.a) tako da bude zadovoljen uvjet:

$$V_{T,Ed} = 0,5 \cdot V_{Ed} \leq V_{pl,Rd} = \frac{h_1 \cdot t_w \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

gdje je  $f_y$  granica popuštanja čelika, a  $\gamma_{M0}$  parcijalni faktor na strani otpornosti.

- Proračunska otpornost poprečnog presjeka na uzdužnu silu -  $N_{T,Rd}$

Proračunski moment savijanja  $M_{Ed}$  rastavlja se na par sile koje djeluju u težištu gornjeg odnosno donjeg **T** presjeka (slika 3.b.) tako da vrijedi:

$$N_{M,Ed} = M_{Ed} / h_c$$

gdje je  $h_c$  udaljenost između težišta gornjeg i donjeg **T** poprečnog presjeka.

Proračunska otpornost dijelova poprečnog presjeka na tlačnu odnosno vlačnu silu  $N_{T,Rd}$  određuje se prema [1]. Poprečni presjek zadovoljava ako je zadovoljen uvjet:

$$N_{M,Ed} \leq N_{T,Rd}$$

- Proračunska otpornost poprečnog presjeka na savijanje -  $M_{V,Rd}$

Budući da se sačasti nosači mogu analizirati kao istovrijedni Vierendeelovi nosači, u točkama *a*, *b*, *c* i *d* prema slici 3.c pojavljuju se momenti savijanja poradi djelovanja proračunske poprečne sile. Potrebno je provjeriti uvjet da moment savijanja na Vierendeelovu nosaču  $\sum M_{V,Ed}$

mora biti manji ili jednak ukupnoj otpornosti na proračunski moment savijanja za Vierendeelov nosač  $\sum M_{V,Rd}$ :

$$\sum M_{V,Ed} \leq \sum M_{V,Rd}$$

gdje je:

$$\sum M_{V,Ed} = 4 \cdot (b_o/2) \cdot (V_{Ed}/2) = b_o \cdot V_{Ed}$$

$$\sum M_{V,Rd} = M_{a,Rd} + M_{b,Rd} + M_{c,Rd} + M_{d,Rd} = 4 \cdot M_{T,Rd}$$

gdje je  $M_{T,Rd}$  proračunska otpornost na savijanje jednog T presjeka.

- Proračunska otpornost poprečnog presjeka za interakciju djelovanja (M-N-V)

Ako je proračunska poprečna sila  $V_{T,Ed}$ , koja otpada na jedan T poprečni presjek, manja ili jednaka od polovice proračunske otpornosti poprečnog presjeka na poprečnu silu  $V_{T,Rd}$  ( $V_{T,Ed} \leq 0,5 \cdot V_{T,Rd}$ ), proračunska otpornost poprečnog presjeka na savijanje  $M_{NV,Rd}$  određuje se prema sljedećim izrazima:

- za T presjek bez dodatnih ukrućenja:

$$M_{NV,Rd} = M_{V,Rd} \cdot \left[ 1 - \left( N_{M,Ed} / N_{T,Rd} \right)^2 \right]$$

- za T presjek sa dodatnim ukrućenjima:

$$M_{NV,Rd} = M_{V,Rd} \cdot \left[ 1 - \left( N_{M,Ed} / N_{T,Rd} \right) \right]$$

Ako je proračunska poprečna sila  $V_{T,Ed}$  veća od polovice proračunske otpornosti poprečnog presjeka na poprečnu silu  $V_{T,Rd}$  ( $V_{T,Ed} > 0,5 \cdot V_{T,Rd}$ ), proračunska otpornost poprečnog presjeka na savijanje  $M_{N,V,Rd}$  određuje se uporabom smanjene vrijednosti granice popuštanja  $f_{y,V}$  na hrptu T profila [2]:

$$f_{y,V} = [1 - \rho] \cdot f_y = \left[ 1 - \left( 2 \frac{V_{T,Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \right] \cdot f_y$$

### 3.3 Otkazivanje dijela hrpta između otvora

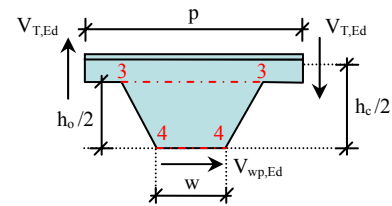
- Proračunska otpornost presjeka na poprečnu silu u horizontalnom smjeru -  $V_{wp,Rd}$

Analizom Vierendeelova nosača dobije se proračunska poprečna sila  $V_{wp,Ed}$ , koja djeluje između dvaju otvora na sredini visine otvora (presjek 4-4 na slici 4.) i određuje se prema izrazu:

$$V_{wp,Ed} = \frac{V_{T,Ed} \cdot p}{h_c/2}$$

i koja mora biti manja ili jednaka proračunskoj otpornosti promatranog dijela poprečnog presjeka na poprečnu silu  $V_{wp,Rd}$ :

$$V_{wp,Ed} \leq V_{wp,Rd} = w \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$



Slika 4. Određivanje poprečne sile na gornjoj polovici Vierendeelova nosača

- Proračunska otpornost presjeka na moment savijanja

Ako je lokalna vitkost cijelog hrpta  $h_o/t_w$  manja ili jednaka od  $60\varepsilon$ , gdje je  $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$  [N/mm<sup>2</sup>], otpornost neukrućenog hrpta na izbočavanje zadovoljena je ako su ispunjena sljedeća dva uvjeta:

$$M_{wp,Ed} \leq (C_1 \cdot \alpha - C_2 \cdot \alpha^2 - C_3) \cdot M_{el,Rd} \quad (1)$$

$$M_{wp,Ed} \leq 0,6 \cdot M_{el,Rd} \quad (2)$$

U izrazima (1) i (2) proračunski moment savijanja  $M_{wp,Ed}$  na kritičnom presjeku hrpta 3-3 određuje se prema slici 4. tako da je:

$$M_{wp,Ed} = V_{wp,Ed} \cdot \frac{h_o}{2}$$

Zbog relativno velike lokalne vitkosti dijela poprečnog presjeka na mjestu 3-3, otpornost kritičnog presjeka hrpta na savijanje određuje se primjenom teorije elastičnosti.

Ostale veličine iz izraza (1) i (2) određuju se kako slijedi:

$$C_1 = 5,097 + 0,1464 \beta - 0,00174 \beta^2$$

$$C_2 = 1,441 + 0,0625 \beta - 0,000683 \beta^2$$

$$C_3 = 3,645 + 0,0853 \beta - 0,00108 \beta^2$$

$$\alpha = p/h_o$$

$$\beta = h_o/t_w$$

### 3.4 Otpornost poprečnog presjeka na djelovanje poprečnog vertikalnog opterećenja

#### 3.4.1 Konstrukcijski zahtjevi

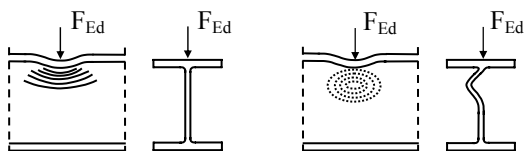
Kao što je već rečeno, saćasti nosači nisu pogodni za unos koncentriranih sila u području otvora bez dodatnih konstrukcijskih zahvata. Dakle, uz pretpostavku da je nosač opterećen jednoliko raspodijeljenim opterećenjem,

ostaje potreba dokaza sigurnosti za unos koncentrirane sile na mjestu ležaja nosača. Kako se reakcija ne unosi u nosač u jednome uskom području, potrebno je osigurati da je duljina punog hrpta od teorijskog ležaja do početka prvog otvora najmanje jednaka duljini  $a_p$  koja se određuje iz sljedećih uvjeta:

- ako je  $d_w/t_w \leq 90 \cdot \varepsilon \rightarrow a_p = h_o$ ,
- ako je  $d_w/t_w > 90 \cdot \varepsilon \rightarrow a_p = \left( \frac{d_w/t_w}{90 \cdot \varepsilon} \right) h_o$ .

### 3.4.2 Dodatni zahtjevi

Na mjestu unosa koncentrirane sile (ležajne reakcije) potrebno je posebno dokazati otpornost na plastično gnječenje hrpta (slika 5.) te otpornost na lokalno izbočavanje (slika 6.) prema odredbama Eurokoda 3 [2].



Slika 5. Plastično gnječenje hrpta Slika 6. Lokalno izbočavanje hrpta

## 4 Granično stanje uporabivosti

Progib sačastih nosača može se približno odrediti kao i za punostijene nosače, pri čemu se u izraz za progib uvrštava moment tromosti poprečnog presjeka na mjestu otvora. Točniji proračun provodi se na Vierendeelovu nosaču s vertikalnim veznim elementima na razmaku  $p$  i horizontalnim elementima na razmaku težišta dva **T** poprečnog presjeka,  $h_c$ .

## 5 Analize nosivosti sačastih nosača

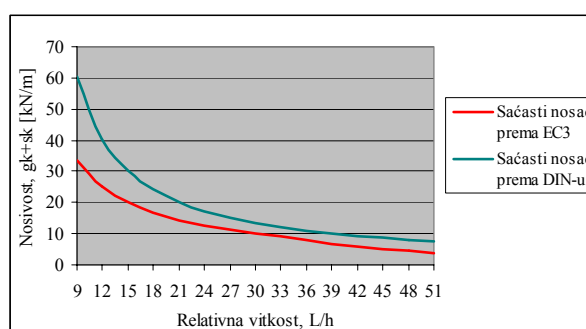
Provedene su analize nosivosti sačastih nosača u odnosu na izvorne uskopojasne (IPE) i širokopojasne (HE B) punostijene nosače od kojih su sačasti nosači izrađeni. Analize su provedene za dva slučaja: uzimanjem u obzir uvjeta samo za granično stanje nosivosti (GSN) i u drugom slučaju uz uvjete za granično stanje nosivosti uzeti su u obzir i uvjeti za granično stanje uporabivosti (GSU). Razmatranje je provedeno u ovisnosti o različitim relativnim vitkostima nosača  $L/h$ , gdje je  $L$  duljina nosača, a  $h$  visina izvornog profila, granici popuštanja čelika te veličini i obliku otvora. Pri tome je pretpostavljeno da su nosači statičkog sustava grede na dva ležaja i bočno pridržani pa je razmatrano otkazivanje nosača bez problema bočnog torzijskog izvijanja.

### 5.1 Usporedba proračuna prema Eurokodu 3 [1] i DIN-u [3]

Prije pojave Eurokoda, za proračun sačastih nosača u našoj su se zemlji najčešće primjenjivale njemačke DIN

norme u nedostatku odgovarajućih hrvatskih propisa i norma. U prvom se dijelu istraživanja uspoređuju nosivosti sačastih nosača prema Eurokodu 3 i DIN-u s obzirom na različite relativne vitkosti nosača  $L/h$ . Kako su navedene dvije norme zasnovane na različitim konceptima sigurnosti, radi omogućavanja usporedbe usvojen je odnos karakterističnih vrijednosti stalnog djelovanja  $g_k$  i opterećenja snijegom  $s_k$  0,2, što odgovara krovnomu nosaču s laganim pokrovom.

Na slici 7. prikazani su rezultati analize za sačaste nosače izrađene od profila IPE 200 s najvećim dopuštenim veličinama šesterokutnih otvora. Slični odnosi nosivosti vrijede i za ostale uskopojasne IPE profile i za širokopojasne HE B profile.



Slika 7. Usporedba nosivosti sačastih nosača dimenzioniranih prema Eurokodu 3 i DIN-u

S obzirom na intenzivnije proučavanje ovih nosača, detaljnije su razrađeni mogući načini otkazivanja, što je rezultiralo načinom dimenzioniranja sačastih nosača sadržanim u Eurokodu 3. Vidljivo je da se primjenom ovih norma [1] dobiva manja nosivost sačastih nosača u odnosu na prije primjenjivane proračune. To je posebno izraženo kod nosača manjih raspona.

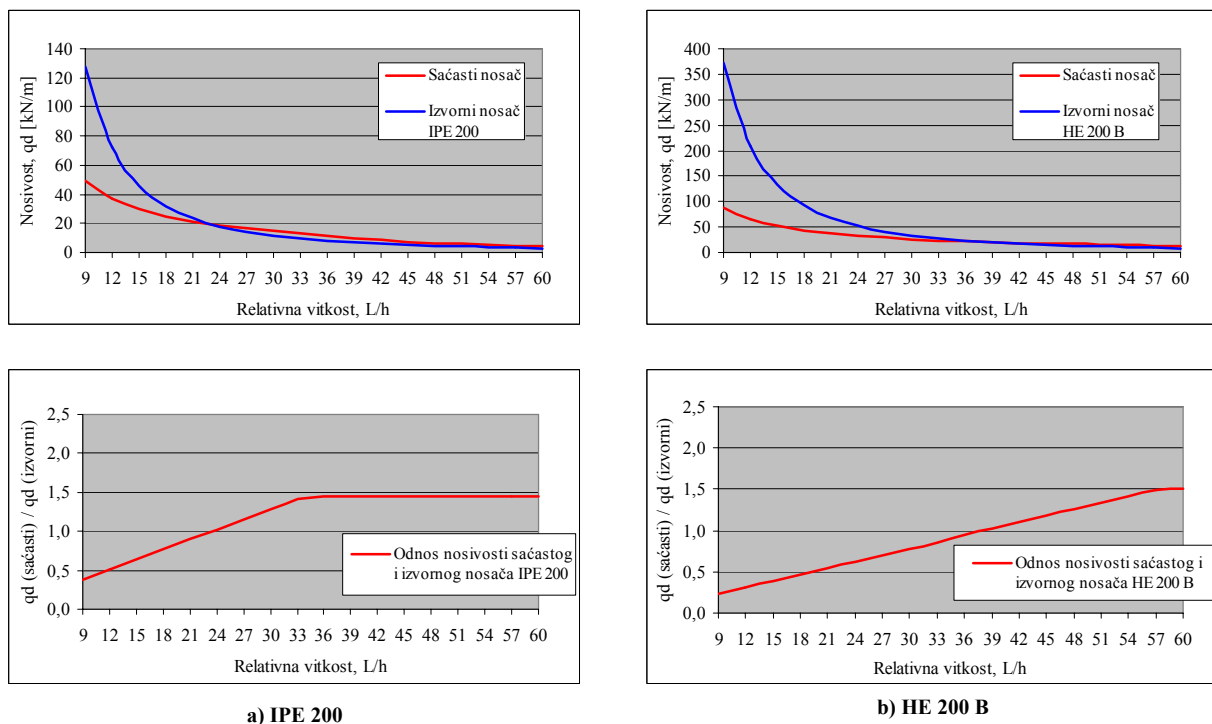
### 5.2 Analize sačastih nosača dimenzioniranih prema Eurokodu 3

#### 5.2.1 Usporedba nosivosti sačastih i izvornih punostijenih nosača ovisno o relativnoj vitkosti

Ovaj dio analiza obuhvaća nosivosti sačastih i izvornih punostijenih nosača od kojih su izrađeni, u odnosu na relativne vitkosti, pri čemu se uspoređuju proračunska opterećenja. Prvo su prikazane analize s obzirom na granično stanje nosivosti i nakon toga analize koje istodobno obuhvaćaju uvjete za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabivosti.

#### Analize nosivosti s obzirom na granično stanje nosivosti

Na slici 8. prikazana je usporedba nosivosti sačastih i izvornih nosača IPE 200 i HE 200 B. Može se vidjeti da svi tokovi linija imaju jednaku tendenciju. Tako kod malih relativnih vitkosti, zbog utjecaja poprečne sile, sačasti



Slika 8. Ovisnost nosivosti sačastih i izvornih nosača u odnosu relativne vitkosti s obzirom na GSN

nosači imaju znatno manju nosivost u odnosu na izvorne punostijene nosače pa nisu isplativi. Povećanjem relativne vitkosti smanjuje se i razlika u nosivosti, da bi se pri određenoj relativnoj vitkosti nosivost izjednačila. Daljnjim povećanjem relativne vitkosti, nosivost sačastih nosača u odnosu na izvorne lagano raste do određene vrijednosti i onda ostaje gotovo ista bez obzira na daljnje povećanje relativne vitkosti. To povećanje nosivosti kreće se u konačnici oko 50% u odnosu prema izvornim profilima. Analize su pokazale da je kod uskopojasnih profila (slika 8.a) granica isplative primjene sačastih nosača oko vrijednosti  $L/h = 24 - 27$ , dok kod širokopojasnih HE B profila ta granica varira od profila do profila. Tako je ona, na primjer, za profile HE 120 B i HE 200 B oko 39 (slika 8.b), za HE 300 B otprilike 42, dok je za HE 600 B oko 28.

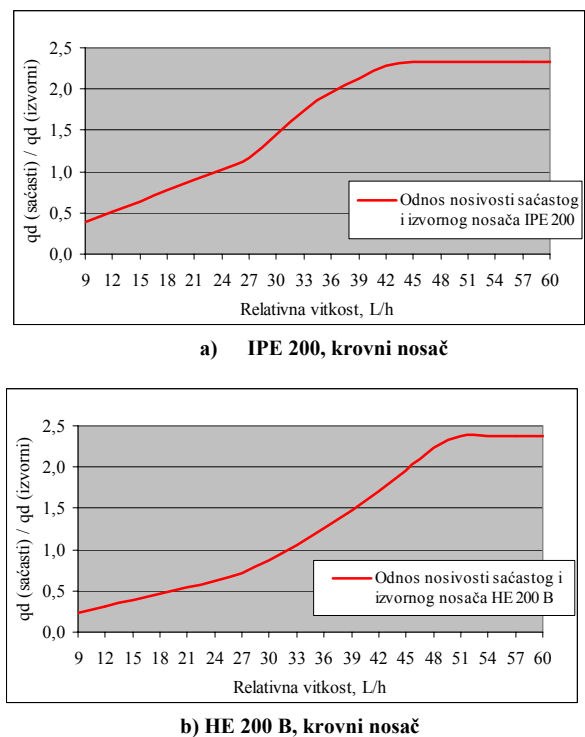
#### Analize nosivosti s obzirom na granično stanje nosivosti i granično stanje uporabivosti

Analize nosivosti s obzirom na granično stanje nosivosti i granično stanje uporabivosti provedene su također za uskopojasne i širokopojasne profile te za dvije namjene nosača: krovne nosače i nosače međukatnih konstrukcija.

U ovome se slučaju granica ekonomske primjene sačastih nosača kod uskopojasnih profila ne mijenja (slika 9.), dok kod širokopojasnih profila varira od profila do profila i kreće se najčešće u granicama od 35 do 40.

Linije odnosa nosivosti sačastih i izvornih nosača imaju sličan tok kao i pri analizama navedenim u prethodnoj

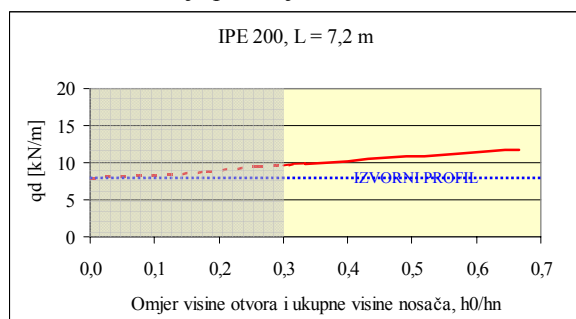
točki. Međutim, u ovome se slučaju može vidjeti da povećanjem relativnih vitkosti, sačasti nosači imaju znatno veću nosivost u odnosu na punostijene nosače. To je povećanje do 140% u odnosu prema izvornim nosačima.



Slika 9. Ovisnost nosivosti sačastih i izvornih nosača u odnosu relativne vitkosti obzirom na GSN i GSU

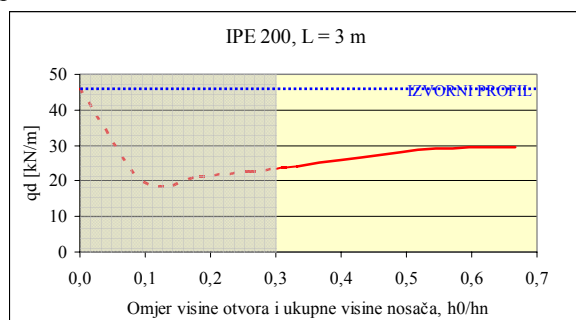
### 5.2.2 Usporedba nosivosti sačastih nosača s obzirom na veličinu i oblik otvora

Provedene su i usporedbe nosivosti niza sačastih nosača s veličinama otvora koje se kreću u granicama definiranim prema normi EC3, i to od najmanjih do najvećih mogućih otvora, pri čemu, naravno, s povećanjem veličine otvora raste i visina poprečnog presjeka sačastih nosača. Kao referencijski nosač odabran je izvorni punostijeni nosač s veličinom otvora jednakom 0. Analize su rađene za tri grupe s obzirom na relativnu vitkost nosača, odnosno isplativost sačastih nosača prema izvornim punostijenim nosačima. Na sljedećim su slikama prikazani odnosi proračunskog opterećenja i veličine otvora za IPE 200 profile, i to za svaku grupu relativnih vitkosti. Kako analogija Vierendeelovih nosača nije primjenjiva za jako male otvore, razmatrano je područje  $h_0/h_n \geq 0,3$ .



Slika 10. Utjecaj veličine otvora na nosivost sačastih nosača kod većih relativnih vitkosti

Na slici 10. prikazan je primjer nosača veće relativne vitkosti ( $L/h = 36$ ) na rasponu  $L = 7,2$  m. To je područje u kojem je ekonomski već opravdana primjena sačastog nosača. Može se vidjeti da povećanjem veličine otvora kontinuirano raste i nosivost sačastog nosača. Ovo je povećanje nosivosti u konačnici jednako kod gotovo svih valjanih profila i iznosi do 50% nosivosti izvornog profila.



Slika 11. Utjecaj veličine otvora na nosivost sačastih nosača kod malih relativnih vitkosti

## LITERATURA

[1] CEN - European Comitee 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

Veća razlika u nosivosti sačastih nosača s jako malim otvorima u odnosu na izvorne punostijene nosače može se vidjeti pri analizi nosača malih relativnih vitkosti ( $\lambda = 15$ ), tj. u slučajevima gdje se proračunski pokazalo da se sačasti nosači ne isplate raditi (slika 11.).

Daljnje analize s različitim kvalitetama čelika pokazale su slične odnose nosivosti sačastih i izvornih punostijenih nosača. Također se pokazalo da je najbolje odabrati otvore oblika pravilnog šesterokuta jer uski visoki i niski široki otvori ne odgovaraju geometrijskim ograničenjima za proračun sačastih nosača danim u Eurokodu 3.

## 6 Zaključak

Detaljnija suvremena istraživanja sačastih nosača opterećenih na savijanje rezultirala su sveobuhvatnim uočavanjem mogućih načina otkazivanja, što je ugrađeno u europsku normu Eurokod 3. Kako se do sada smatralo da ekonomična primjena ovih nosača započinje pri odnosu relativne vitkosti nosača  $L/h \geq 15$ , u ovome je radu pokazano da je ta granična vrijednost približno 24 na temelju rezultata suvremenih istraživanja. Isto tako, valja upozoriti na činjenicu da se danas zbog povoljnijeg iskorištavanja sačastih nosača propisuje najmanja udaljenost prvih otvora u hrptu u odnosu na ležaj nosača.

Uzmu li se u obzir uvjeti graničnog stanja uporabivosti, vidi se da sačasti nosači mogu preuzeti znatno veće opterećenje od izvornih punostijenih nosača od kojih su izrađeni.

Analize su pokazale isplativost primjene sačastih nosača praktično samo s najvećom veličinom otvora u hrptu i to na većim rasponima. Povećanje nosivosti sačastih nosača opterećenih na savijanje u tom je slučaju i do 50% u odnosu na izvorne valjane profile ako se analize provode samo na razini uvjeta za granično stanje nosivosti. Uključili se i uvjeti za granično stanje uporabivosti, tada se nosivost sačastih nosača povećava i do 140% u odnosu prema izvornim nosačima. Otvori u hrptu trebali bi biti, gdje je to god moguće, pravilnoga šesterokutnog oblika, budući da izduljeni i horizontalno rašireni šesterokuti ne daju odgovarajuće rezultate.

Granične vrijednosti ekonomične primjene sačastih nosača u odnosu na punostijene treba promatrati vrlo elastično. S jedne su strane prisutni nešto povećani troškovi izrade sačastih nosača, a s druge strane njihovom primjenom štedi se na visini međukatne konstrukcije zbog mogućnosti prolaska instalacija, a postižu se i dobri estetski učinci.

[2] CEN - European Comitee for Standardization (2003): *Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, prEN 1993-1-1:2003 (E)

- 
- [3] *Wabenträger - Merkblatt 361 der Beratungsstelle für Stahlverwendung*, Düsseldorf, 3r Auflage, 1976
- [4] Redwood, R.; Demirdjian, S.: *Castellated beam web buckling in shear*, Journal of Structural Engineering, Vol.124, No.10 (1998), paper 17436
- [5] Zaarour, W.; Redwood, R.: *Web buckling in thin-webbed castellated beams*, Journal of Structural Engineering, Vol.122, No.8 (1996), paper 11030
- [6] Hosain, M.U.; Speirs, W.G.: *Experiments on castellated steel beams*, Journal of American Welding Society, Vol. 52, August 1973., pp. 329-342
- [7] Kerdal, D.; Nethercot, D. A.: *Failure modes for castellated beams*, Journal of Constructional Steel Research, No. 4, 1984., pp. 295-315
- [8] Hosain, M.U.; Speirs, W.G.: *Failure of Castellated Beams due to Rupture of Welded Joints*, Acier, 1 (1971), pp. 34-40
- [9] Hirt, M.A.; Bez, R.: *Stahlbau: Grundbegriffe und Bemessungsverfahren*, Ernst & Sohn, Berlin, 1998.
- [10] Demirdjian, S.: *Stability of castellated beam webs*, Dissertation, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canada, March 1999.
- [11] Das, P.K.; Srimani, S.L.: *Handbook for the design of castellated beams*; Balkema, Rotterdam; 1985.
- [12] Omer W. Blodgett: *The Design of Welded Structures*, The James F. Lincoln arc welding foundation, Cleveland, Ohio, 1966.
- [13] Halleux, P.: *Grenzanalyse bei Wabenträgern*, Acier, 32 (1967), pp. 129-141
-