

ANALIZA STANJA POJAVE PREKOMJERNIH VLAČNIH NAPREZANJA U ZONI SLJEMENA RADIJALNO ZAKRIVLJENIH (SEDLASTIH) GREDNIH LIJEPLJENIH LAMELIRANIH NOSAČA

ANALYSIS OF EXCESSIVE TENSILE STRESSES IN THE APEX ZONE IN CURVED (PITCHED CAMBERED) TAPERED LAMINATED BEAMS

Marko Ključanin¹, Dean Čizmar²

¹Student TVZ-a, Graditeljski odjel

²Tehničko veleučilište u Zagrebu, Graditeljski odjel

Sažetak

Svrha rada je analiza ojačanja zakrivljenih lijepljenih lameliranih nosača koji prilikom opterećenja od savijanja doživljavaju stanje naprezanja kod kojih su poprečna vlačna naprezanja posebno interesantna obzirom na ortotropno ponašanje drva. Prikazan je postupak proračuna uzdužnih i poprečnih naprezanja prema normi HRN EN1995 i prema ASTM normama. Nadalje, u radu se analizira postupak ojačanja sljemena s čeličnim šipkama prema ASTM normama. Rezultati dobiveni prema normama se uspoređuju s numeričkim analizama. Prema dobivenom se može zaključiti da norme dobro aproksimiraju vrijednosti naprezanja no prilikom ojačanja treba biti vrlo oprezan jer se samo pomoću numeričkih analiza može dobiti vrijednost preostalih naprezanja poprečnih na vlakanca nakon ojačanja. Na osnovu ovoga može se precizno izračunati nosivost nosača i provesti optimizacija (povećanje razmaka između nosača ili opterećenja).

Ključne riječi: *radijalno zakrivljeni nosači, vlačna naprezanja poprečno na vlakanca, poprečna ojačanja, numeričke analize.*

Abstract

The purpose of this paper is to analyze the strengthening of glued laminated beams of tapered curved geometry, which under bending moment create a complex stress state in which the tension stress perpendicular to grain is the most interesting one, having in mind the anisotropic –orthotropic properties of wood. The procedure for longitudinal and vertical stresses in accordance with EN1995 and ASTM standards is made. Furthermore, the paper presents a method of apex

strengthening with steel bars according to ASTM standards. The results obtained by comparing the standards with complex numerical model are presented. According to obtained results, it can be concluded that standards very well approximate the value of stresses, but one should be very careful when dealing with reinforced beam, because only by means of numerical modeling, the value of residual stresses perpendicular to grain can be obtained. On this basis, the bearing capacity can be very precisely calculated and optimization can be made (increase of the distance between beams or increase of a load).

Keyword: *curved tapered laminated beams, tensile stresses perpendicular to grain, radial reinforcement, numerical analysis.*

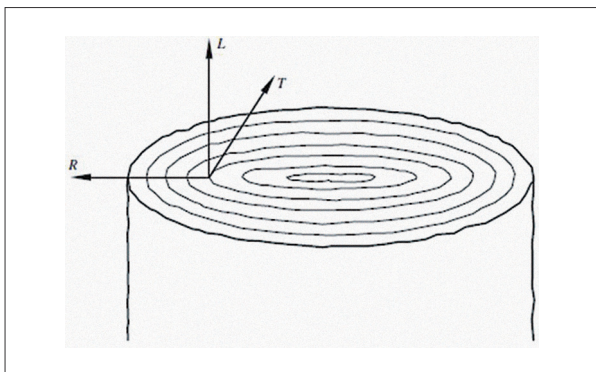
1. Uvod

1. Introduction

Drvo je ortotropan materijal što je posljedica njegovog rasta. Važno svojstvo koje proizlazi iz te činjenice su tri ravnine simetrije – L, R i T (longitudinalna, radijalna i tangencijalna). Longitudinalni smjer odgovara smjeru paralelno s vlakancima, radijalno jest smjer poprečno na vlakanca, a tangencijalno je smjer tangencijalan na godove drveta (Slika 1).

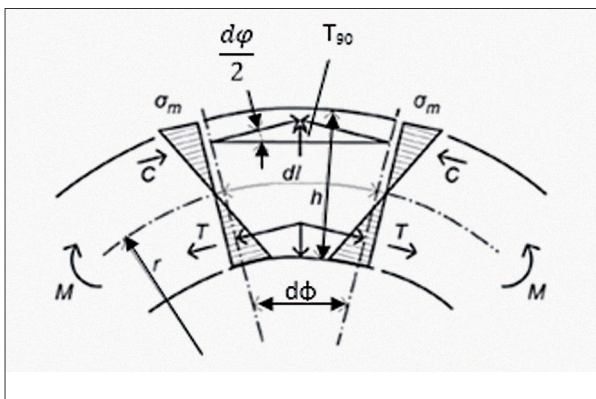
Navedena svojstva drvenog materijala izrazito su bitna za lamelirane nosače velikih raspona koji doživljavaju razne oblike opterećenja u vidu djelovanja snijega i/ili vjetra.

Radijalno zakrivljeni lijepljeni lamelirani nosači su izgledom daleko atraktivniji od trapeznih nosača



Slika 1 Longitudinalni, radijalni i tangencijalni smjer
Figure 1 Longitudinal, radial and tangential direction

ravnog intradosa, ali u konstruktorskom su smislu zahtjevniji za proračun i izvedbu zbog relativno komplicirane geometrije, ali i pojave dodatnih naprezanja koja su rezultat zakrivljenosti lamela tijekom proizvodnje [1] [2] [3].

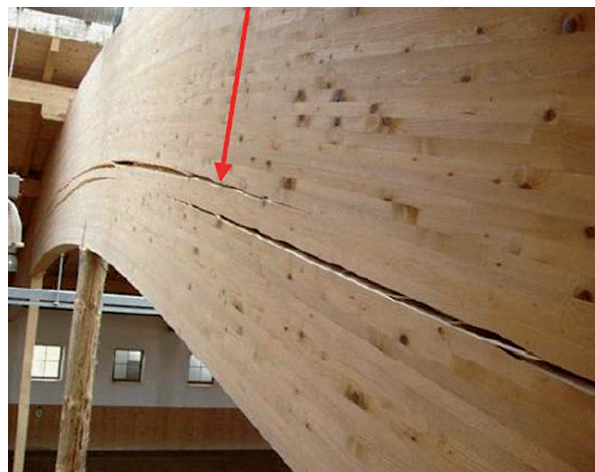


Slika 2 Općenito teoretsko tumačenje pojave poprečnih naprezanja
Figure 2 General theoretical interpretation of radial stresses

U zakrivljenom području dvostranih simetričnih nosača karakteristična je pojava složenog stanja naprezanja. Poprečna naprezanja okomito na smjer na pravac vlakanca izrazito su nelinearne raspodjele te nastaju kao posljedica djelovanja resultantnih sila prouzročenih momentom savijanja i zakrivljenošću lamela (Slika 2). Uslijed specifične geometrije, uzdužna naprezanja su različitih apsolutnih vrijednosti te stoga poprečni presjek doživljava najveće naprezanje na vlačno opterećenom rubu.

Prekoračenje izrazito male čvrstoće na naprezanja poprečno na vlakanca očituje se u otvaranju pukotina okomito na smjer lamela nosača (Slika 3). Opisano složeno stanje naprezanja

posebno se ističe kod nosača oštrog loma u geometriji – ekstrados sedlastih nosača [1] [4] [5].



Slika 3 Prekoračenje otpornosti na naprezanja poprečno na vlakanca [10]
Figure 3 Cracks caused by over stress perpendicular to grain [10]

Pojam krtog loma kod pukotina poprečno na vlakanca drva teško je predvidjeti zbog nedovoljne nosivosti drva poprečno na vlakanca uzrokovane složenom mikrostrukturom drva. Konstruktivne mjere ojačanja napreznog presjeka su obostrano nalijepljena daščana proširenja, vijci za drvo te uljepljene čelične šipke [2] [5].

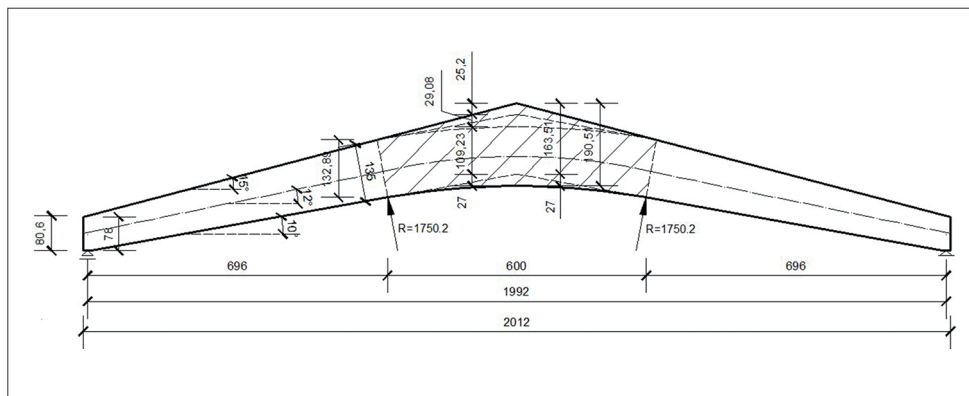
S ekonomskog stajališta ovakvi su oblici lameliranih nosača puno skuplji izbor, a dodatne troškove izaziva povećanje visine nosača u sredini raspona koje je nužno zbog izbjegavanja naprezanja vlaka poprečno na vlakanca [1].

Svrha ovog rada je analizirati numerički model nosača te usporediti dobivene rezultate s postupkom proračuna danim u nomi HRN EN1995. Nadalje, u radu se analizira postupak ojačanja sljemena s čeličnim šipkama prema ASTM normama [6]. Ovaj proračun se uspoređuje s rezultatima numeričkih analiza.

2. Geometrijske karakteristike lameliranog nosača.

2. Geometrical characteristics of the laminated tapered curved beam

Na slici 4 prikazane su geometrijske karakteristike analiziranog nosača (raspon, visina na ležaju, visina u sljemenu, nagib intradosa i ekstradosa, osni razmak, radijus zakrivljenosti intradosa). Nosač je oslonjen na



Slika 4 Geometrijske karakteristike nosača (dimenzije u cm)

Figure 4 Geometrical characteristics of the beam (dimensions in cm)

Čvrstoća	Karakteristična vrijednost [MPa]	Proračunska vrijednost [MPa]
Savijanje	$f_{m,g,k} = 28$	$f_{m,d} = 19.3$
Vlak paralelno na vlakanca	$f_{t,0,g,k} = 19.5$	$f_{t,0,d} = 13.5$
Vlak poprečno na vlakanca	$f_{t,90,g,k} = 0.45$	$f_{t,90,d} = 0.3$
Tlak paralelno na vlakanca	$f_{c,0,g,k} = 26.5$	$f_{c,0,d} = 18.3$
Tlak poprečno na vlakanca	$f_{c,90,g,k} = 3.0$	$f_{c,90,d} = 2.1$
Posmik	$f_{v,g,k} = 3.2$	$f_{v,d} = 2.2$

Tablica 1 Vrijednosti čvrstoća u N/mm^2 – prema Eurocode HRN EN 1995.

Table 1 Strength values in N/mm^2 – according to Eurocode HRN EN 1995

čelične ležajne pločice duljine 20 cm. Širina nosača iznosi 20 cm. Proračunska vrijednost vertikalnog opterećenja iznosi $q_d=15.11kN/m'$. Materijalne karakteristike nosača su prikazane u tablici 1.

3. Proračun nosača prema normama

3. Analysis according to standards

3.1. Proračun prema normi HRN EN 1995

3.1. Analysis according to HRN EN 1995

3.1.1. Dokaz na savijanje karakterističnog presjeka izvan područja zakrivljenosti (mjerodavan presjek)

3.1.1. Analysis of characteristic cross section beyond curved area (bending)

Položaj karakterističnog presjeka

$$x = \frac{l}{2} \frac{h_a}{h_{ap,1}} = 10060 \frac{806}{1635.1} = 4958.93mm$$

Visina nosača u presjeku x-x

$$h_{x,v} = h_a \left(2 - \frac{h_a}{h_{ap,1}} \right) = 806 \left(2 - \frac{806}{1635.1} \right) = 1214.69mm$$

Moment savijanja u presjeku x-x

$$M_{y,d}^{x-x} = 152 * 4.958 - 0.5 * 15.11 * 4.958^2 = 567.9kNm$$

Moment otpora u presjeku x-x

$$W_{y,d}^{x-x} = \frac{200 * 1188.14^2}{6} = 47055888.65mm^3$$

Naprezanje uslijed savijanja u presjeku x-x

$$\sigma_{y,d}^{x-x} = \frac{M_{y,d}^{x-x}}{W_{y,d}^{x-x}} = \frac{567.9 * 10^6}{47055888.65} = 12.06 N/mm^2$$

Provjera naprezanja na vlačno opterećenom rubu ($\gamma = \alpha - \beta$)

$$\sigma_{m,0,d} = (1 + 4tg^2(\gamma)) \frac{6 M_{y,d}^{x-x}}{bh_x^2} \leq f_{m,d}$$

$$\sigma_{m,0,d} = (1 + 4tg^2(5)) 12.06 = 12.4 MPa$$

Provjera naprezanja na tlačno opterećenom rubu ($\gamma = \alpha - \beta$)

$$\sigma_{m,\gamma,d} = (1 - 4tg^2(\gamma)) \frac{6 M_{y,d}^{x-x}}{bh_x^2} \leq f_{m,\gamma,d}$$

$$\sigma_{m,\gamma,d} = (1 - 4tg^2(5)) 12.06 = 11.7 MPa$$

Provjera iskoristivosti otpornosti presjeka na savijanje

$$f_{m,\gamma,d} = \frac{f_{m,d}}{\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} * \sin \gamma^2 + \cos \gamma^2} = \frac{19.3}{9.19 * 0.005 + 0.995} = 18.5 MPa$$

$$\frac{\sigma_{m,0,d}}{f_{m,d}} = \frac{12.4}{19.3} < 1 \quad \frac{\sigma_{m,\gamma,d}}{f_{m,\gamma,d}} = \frac{11.7}{18.5} < 1$$

Presjek zadovoljava na savijanje.

3.1.2. Dokaz nosača na radijalna naprezanja (naprezanja poprečno na smjer vlaknaca) po HRN EN 1995

3.1.2. Analysis of the radial stresses (stresses perpendicular to grain) according to HRN EN 1995

Volumen nosača u području zakrivljenosti

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = 1.74 m^3$$

Proračunska vrijednost vlačnih naprezanja okomito na vlaknaca

$$\sigma_{t,90,d} = k_\rho \frac{M_{ap}}{W_{ap}} = 0.058 * 6.3 = 0.362 MPa$$

Proračunska čvrstoća nosača u sredini raspona na vlačna naprezanja okomito na vlaknaca

$$k_{dis} \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0.2} f_{t,90,d} = 1.7 * \left(\frac{0.01}{1.74}\right)^{0.2} * 0.3 = 0.18 MPa$$

Iskoristivost nosača

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0.2} f_{t,90,d}} = \frac{0.362}{0.18} = 201\%$$

Presjek ne zadovoljava!

3.2. Dokaz nosača na radijalna naprezanja (naprezanja poprečno na smjer vlaknaca) prema ASTM normi

3.2. Analysis of the radial stresses (stresses perpendicular to grain) according to ASTM standard

Radijalna naprezanja za drvene nosače posebnih geometrija

$$f_r = K_{rs} * C_{rs} * \frac{6M_{ap}}{b * h_{ap}^2}$$

Gdje je;

K_{rs} = faktor redukcije radijalnih naprezanja

$$K_{rs} = 0.29 * \left(\frac{h_{ap}}{R_m}\right)^2 + 0.32 * \tan^{1.2} \alpha$$

C_{rs} = faktor geometrije radijalnih naprezanja

$$C_{rs} = 0.27 * \ln(\tan \alpha) + 0.28 * \ln\left(\frac{l}{l_{luka}}\right) - 0.8 * \left(\frac{h_{ap}}{R_m}\right) + 1 \leq 1.0$$

$$K_{rs} = 0.068, C_{rs} = 0.902$$

$$f_r = K_{rs} * C_{rs} * \frac{6M_{ap}}{b * h_{ap}^2} = 0.068 * 0.902 * \frac{6 * 764.6 * 10^6}{200 * 1905.1^2} = 0.386 MPa$$

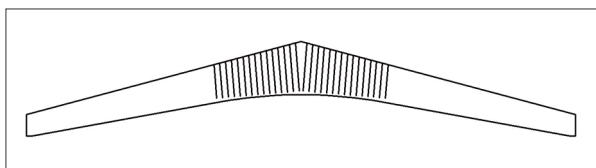
Izraz po ASTM normi daje veća naprezanja za otprilike 6% u odnosu na HRN EN 1995

4. Proračun konstruktivnog ojačanja sljemenog volumena (ASTM norma)

4. Analysis of apex strengthening according to ASTM standard

- Geometrija nosača u velikoj mjeri utječe na pojavu naprezanja poprečno na vlaknaca.
- Elementi ojačanja trebali bi biti postavljeni simetrično oko središnjeg presjeka nosača, na način da niti jedan element ojačanja ne dodiruje točku maksimalnog momenta savijanja – ojačanja u samom središnjem presjeku trebalo bi izbjegavati (Slika 5)
- Svaki element postaviti od ruba ekstradosa sve do 5 – 12 cm do ruba intradosa (ako to dozvoljava visina nosača).
- Izvesti svaki element tako da je okomit na smjer lamela nosača na radijalno zakrivljenom dijelu nosača
- Ojačanja sljemenog volumena rasporediti i izvesti po cijeloj dužini kružnog luka.
- Preporučljivo je koristiti međusobne udaljenosti elementa ojačanja otprilike do 10d.
- Iznos unutarnje sile koju preuzima pojedini element ojačanja ne smije biti veći od

maksimalne dopuštene unutarnje uzdužne sile i maksimalne dopuštene sile čupanja s obzirom na drveni materijal.



Slika 5 Raspored ojačanja sljemenog volumena

Slika 5 Raspored ojačanja sljemenog volumena

Radijalna sila u pojedinom elementu ojačanja gdje je;

$$T_r = \sigma_{t,90,d} * b * s$$

$\sigma_{t,90,d}$ radijalno naprezanje u sljemenom volumenu nosača,

b širina lamela i

s razmak između sredstva ojačanja.

Broj potrebnih sredstava ojačanja

$$S_c = R_m * \theta$$

Gdje je;

S_c duljina kružnog luka intradosa nosača, R_m radijus zakrivljenosti (osno)

$$\theta = 2 * \beta * \frac{\pi}{180}$$

β je nagib donje izvodnice nosača

$$n = \frac{S_c}{s}$$

n = potrebni broj sredstava ojačanja

Nakon postupka određivanja geometrije elemenata ojačanja (poprečni presjek i duljina), potrebno je još jednom dokazati oslabljeni presjek na savijanje. Moment otpora presjeka reduciran je bušenom rupom radijalnog ojačanja. Presjek u vlačnoj zoni je reduciran površinom bušene rupe, dok je u tlačnoj zoni osiguran prijenos naprezanja te nije potreban račun redukcije presjeka (Slika 6). Reducirani moment tromosti i moment otpora

$$I_{xx,red} = \frac{b(d-c)^3}{3} + \frac{bc^3}{3} - \frac{b'(c-a)^3}{3}$$

$$W_{xx,red} = \frac{I_{xx,red}}{c}$$

$$c = \frac{bd^2 - b'c^2 + b'a^2}{2(bd - b'c + b'a)}$$

gdje je

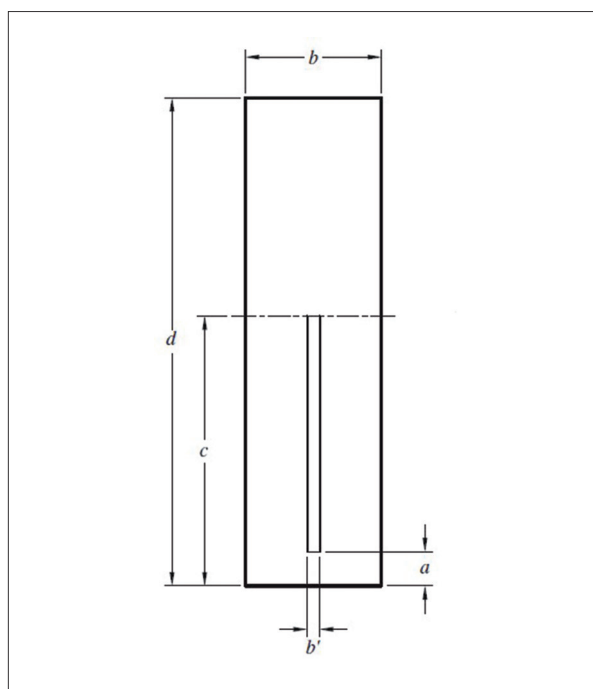
a udaljenost donje izvodnice do sredstva ojačanja,

b širina presjeka,

b' dijаметar sredstva armiranja,

c udaljenost donje izvodnice do neutralne osi presjeka,

d visina presjeka.



Slika 6 Reducirani presjek

Figure 6 Reduced cross section

4.1. Primjer proračuna ojačanja sljemenog volumena prema ASTM normi

4.1. An example of analysis of the apex volume strengthening according to ASTM standard

Odabrane čelične šipke d=24 mm.

Maksimalna vlačna sila u svakom elementu ojačanja je određena tablično uzimajući u obzir otpornost poprečnog presjeka elemenata ojačanja te čupanja elementa iz drvenog materijala.

$$T_{max} = \min \left\{ \begin{matrix} 42,5 \\ 93,9 \end{matrix} \right\} kN$$

$$T_r = \sigma_{t,90,d} * b * s$$

$$T_r = 0.362 * 200 * 220 = 15,9 \text{ kN} < T_{max}$$

$$S_c = R_m * \theta$$

$$R_m = 18454.8 \text{ mm}$$

$$\theta = 2 * \beta * \frac{\pi}{180}$$

$$\theta = \frac{\pi}{9}$$

$$S_c = 6441.9 \text{ mm}$$

Duljina kružnog luka unutarnje izvodnice
– intrados

$$n = \frac{S_c}{s}$$

$$n = \frac{6441.9}{220} = 29.28$$

U sljemenom volumenu jednoliko i simetrično
će se rasporediti 30 čeličnih šipki.

Proračun reducirane otpornosti presjeka u
sljemeni i provjera naprezanja od savijanja nakon
redukcije (c se uobičajeno uzima kao pola visine
promatranog presjeka)

$$c_1 = \frac{bd^2 - b'c^2 + b'a^2}{2(bd - b'c + b'a)}$$

$$c_1 = 982.35 \text{ mm}$$

Proračun se provodi s parametrom c_1 da bi se
dobio konačni položaj neutralne osi

$$c_2 = \frac{bd^2 - b'c_1^2 + b'a^2}{2(bd - b'c_1 + b'a)}$$

$$c_2 = 982.37 \text{ mm}$$

Određivanje reduciranog momenta tromosti

$$I_{ap,red} = \frac{b(d-c_2)^3}{3} + \frac{bc_2^3}{3} - \frac{b'(c_2-a)^3}{3} = 1.11 * 10^{11} \text{ mm}^4$$

Određivanje reduciranog momenta otpora
presjeka

$$W_{ap,red} = \frac{I_{ap,red}}{c_2}$$

$$W_{ap,red} = \frac{1.11 * 10^{11}}{982.37} = 113949595.8 \text{ mm}^3$$

Provjera naprezanja od savijanja nakon redukcije
presjeka

$$\sigma_{y,d}^{ap} = k_t \frac{M_{y,d}^{ap}}{W_{y,d}^{ap}} = 1.55 \frac{764.6 * 10^6}{113949595.8} = 10.4 \text{ N/mm}^2$$

Naprezanje na reduciranom presjeku povećalo
se za otprilike 6% u odnosu na ne-ojačan model

5. Numeričke analize nosača

5. Numerical analysis of the beam

Napravljena su dva modela pomoću računalnog
programa ABAQUS, neojačani nosač te nosač
ojačan s uljepljenim čeličnim šipkama. Napravljen
je trodimenzionalni nosač koji je modeliran kao
ortotropan linearno-elastičan element [7] [8].

5.1. Materijalne karakteristike nosača

5.1. Material properties of the beam

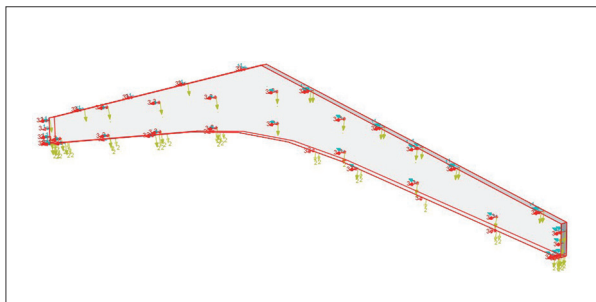
Ortotropnost nosača ostvarena je pomoću
zadavanja lokalnog koordinatnog sustava
unutar modela, s tri ravnine simetrije. Isto je
ostvareno pomoću funkcije discrete orientations
gdje L (1) ravnina prati intrados nosača, dok je
R (2) ravnina okomita na L, te su na taj način
određene sve tri ravnine simetrije. (Slika 7)
Ortotropna elastičnost materijala definirana je
pomoću 9 odgovarajućih nezavisnih konstanti,
te su dane u tablici 2 odgovarajuće materijalne
vrijednosti [9].

Tablica 2 Materijalne karakteristike drva

Table 2 Material properties of wood

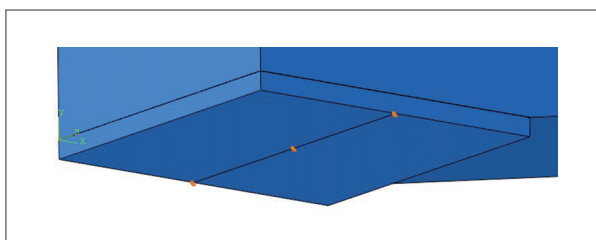
Parametar	Vrijednost[MPa]
E1	12500
E2	800
E3	625
G12	800
G13	750
G23	80
μ_{12}	0.292
μ_{13}	0.449
μ_{23}	0.39

Nosač naliježe na čelične pločice dimenzija
200x200x12 mm (Slika 8), materijalnih
parametra opisanih u tablici 3. Čelične šipke u
ojačanom nosaču, materijalni parametri u tablici
3, modelirani su kao prostorni štapasti elementi
promjera 24mm, različitih duljina.



Slika 7 Lokalni koordinatni sustav numeričkog modela

Figure 7 Local coordinate system of numerical model



Slika 8 Rubni uvjeti nosača – onemogućena translacija

Figure 8 Beam boundary conditions – restrained translation

Tablica 3 Materijalne karakteristike čelika

Table 3 Material properties of steel

Parametar	Vrijednost(MPa)
E	210000
G	81000
μ	0.3

Interakcijsko svojstvo između šipke i drvenog elementa modelirano je s funkcijom tie-constraint. Ova funkcija predstavlja jednostavan način kako elemente povezati pomoću master i slave čvorova. Funkcija onemogućava slave čvorovima relativan pomak u odnosu na master čvorove što predstavlja

dovoljno precizan način prikazivanja djelovanja ljepila između čelične šipke i drvenog materijala. Za mrežu konačnih elemenata korišteni su 10-čvorni tetraedarski elementi (nomenklatura ABAQUS-a; C3D10 elements).

Ograničenja numeričkog modela

- Lamelirani nosač modeliran je kao jedna cjelina i izostavljen je raspored laminacija unutar elementa
- Analiza je usredotočena na vlačna naprezanja unutar sljemenog volumena
- Godovi, te razne imperfekcije unutar mehaničkih karakteristika drva i lamela nosača su izostavljene, dakle analizira se homogen element
- Spoj između uljepljene šipke i nosača se smatra potpuno upetim, odnosno pomaci čvorova šipki su jednaki pomacima čvorova nosača.

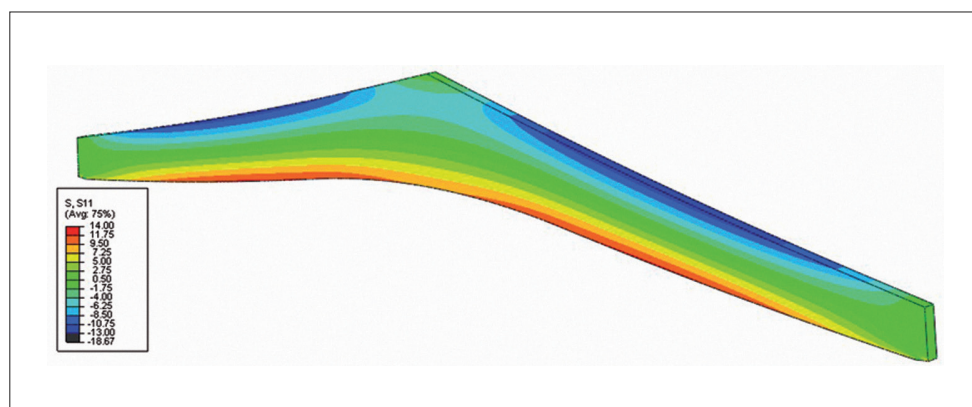
6. Rezultati numeričke analize

6. Results of the numerical analysis

6.1. Neojačani model

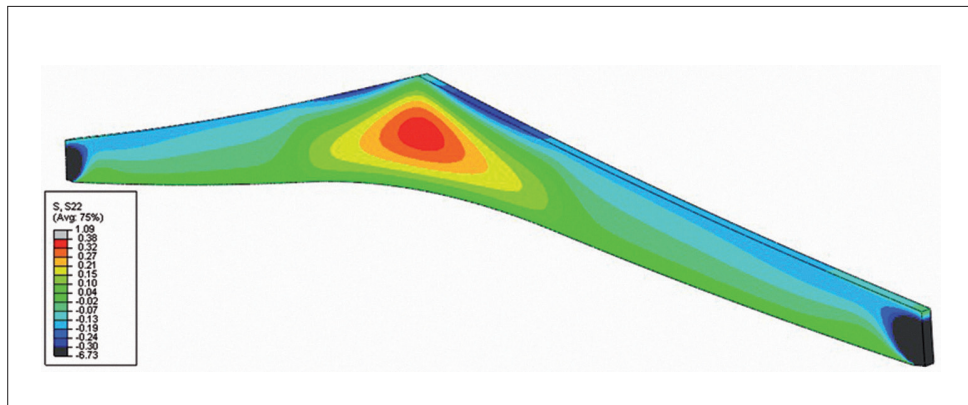
6.1. Unstrengthened model

U ovoj numeričkoj analizi korišten je nosač istih geometrijskih svojstava kao što je prikazano na slici 4. Opterećenje je izvršeno funkcijom surface traction (smjer vektora djelovanja opterećenja u smjeru globalno y osi) i iznosi, kao i u proračunskom modelu, 15.11 kN/m. Rezultati dobiveni numeričkim modelom u dobroj su korelaciji s proračunom danim u normi HRN EN 1995. Maksimalno vlačno naprezanje u modelu iznosi 11,75 MPa dok prema normi iznosi 12,4 MPa. Tlačna naprezanja su također vrlo slična (10,75 MPa prema modelu a 11,70 MPa prema normi).



Slika 9 Naprezanja paralelno s vlakancima (oznaka S11; MPa)

Figure 9 Stress longitudinal to grain (label S11; MPa)



Slika 10 Naprezanja poprečno na vlakanca (oznaka S22; MPa)

Figure 10 Stress perpendicular to grain (label S22; MPa)

Analiza nosača na naprezanja poprečno na vlakanca pokazuje istovjetne rezultate u usporedbi s proračunskim modelom izračunatim prema normi. Razmatrana naprezanja po proračunskom modelu (prema normi EN HRN 1995) iznose 0,36 MPa, što i numerički model pokazuje (Slika 10). Također, ovdje se može uočiti još jedna bitna činjenica: prema navedenoj ASTM normi šipke se postavljaju po cijelom zakrivljenom dijelu intradosa, bez obzira na malu iskoristivost. Na slici 10 se može jasno uočiti središnji dio koji je potrebno ojačati, dok ostali zakrivljeni dio nije potrebno ojačavati.

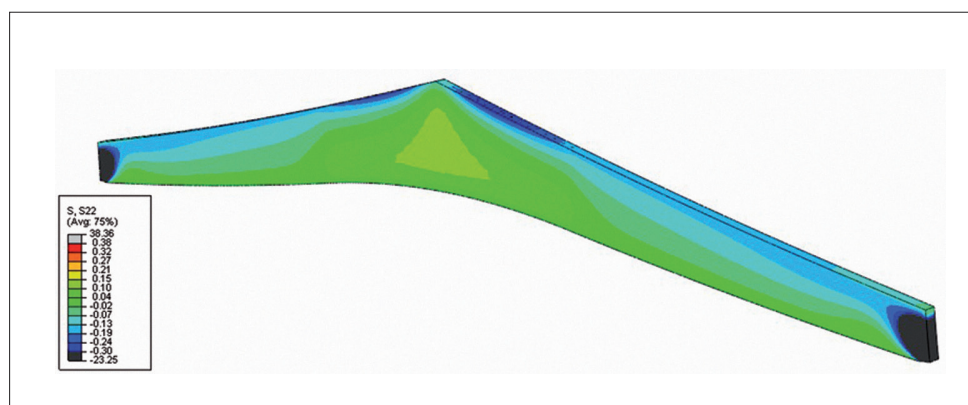
6.2. Rezultati numeričke analize - ojačanog modela

6.2. Results of the numerical analysis-reinforced model

Rezultati numeričkih analiza pokazuju značajno smanjenje naprezanja poprečno na vlakanca. Analiza pokazuje da su naprezanja smanjena na svega 1/3 naprezanja koje se javlja kod neojačanog presjeka – ispis pokazuje

maksimalno vlačno naprezanje od otprilike 0,10 MPa (Slika 11). S obzirom da ne postoji proračun kojim bi se mogla odrediti naprezanja u ojačanom nosaču već je to moguće samo numeričkim analizama, vrlo često se sam proračun ignorira i pretpostavlja da je sav iznos vlačnog naprezanja poprečno na vlakanca preuzet od strane elemenata ojačanja. Analiza pokazuje da je određen iznos naprezanja ostao unutar sljemenog volumena nosača i da drveni materijal i dalje doživljava određeni poprečni vlak (u velikoj mjeri reduciran u odnosu na neojačan model). Iznos naprezanja poprečno na vlakanca unutar drvenog materijala s ojačanjima u velikoj mjeri je određen rasporedom i načinom postavljanja elemenata ojačanja sljemenog volumena.

Uzdužna sila u čeličnim šipkama ojačanih presjeka je daleko ispod dopuštene granice, te sukladno tome, naprezanje od uzdužne sile je vrlo malo. Maksimalno vlačno naprezanje iznosi 21,17 MPa, dok je maksimalno tlačno naprezanje 7 MPa. Dakle, složeno stanje naprezanja nosača utječe i na ojačanje koja također imaju nelinearnu raspodjelu naprezanja.



Slika 11 Naprezanja poprečno na vlakanca (oznaka S22; MPa)

Figure 11 Stress perpendicular to grain (label S22; MPa)

7. Zaključak

7. Conclusion

Svrha ovog rada bila je pomoću numeričke analize zakrivljenih nosača usporediti dobivene rezultate s postupkom proračuna danim u nomi HRN EN1995 i prema ASTM normama. U radu se prezentira postupak ojačanja sljemena nosača s čeličnim šipkama prema ASTM normama. Postupak ojačanja je rađen samo prema ASTM normama jer ovaj postupak ne postoji u Eurokod normi HRN EN1995. Za neojačane elemente može se zaključiti da norme dobro aproksimiraju vrijednosti naprezanja kako paralelno s vlakancima tako i poprečno na

vlakanca. Vezano uz ojačane nosače, numeričke analize pokazuje da su ojačanja smanjila intenzitet naprezanja poprečno na vlakanca na otprilike trećinu početnog iznosa. Zbog ovoga je moguće smanjiti broj glavnih nosača unutar konstrukcije za otprilike trećinu. Norma nalaže da se elementi ojačanja postavljaju tako da prate radijus zakrivljenosti ili da su okomiti na ekstrados nosača. U ovom radu ojačanja su postavljena tako da se unutar numeričkog modela formirala nova pomoćna ravnina (na koju su elementi ojačanja okomiti) nagiba 5° (Slika 5). Svrha pomoćne ravnine je da se stvori uvjet da prvi element ojačanja formira mali nagib kako bi razmak između šipki ostao zanemariv te se na taj način omogućava veća iskoristivost čeličnih šipki.

8. Reference

8. References

- [1] Rajčić V, Bjelanović A: Drvene konstrukcije prema europskim normama, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2007.
- [2] American Institute of timber construction: Standard for radially reinforcing curved glued laminated timber members to resist radial tension, American Institute of timber construction, 2005.
- [3] Porteous J, Kermani A: Structural timber design to Eurocode 5, Wiley - Blackwell Publishing, 2007.
- [4] Bjelanović A, Lustig N, Škec L: Effects of slope and apex zone geometry of glulam beams with special shape on their design, 8th International Scientific Conference on Production Engineering, Bihać, 2011.
- [5] Gopu V.K.A: Behavior and Design of Double-Tapered Pitched and Curved Glulam Beams, Colorado State University, 1975.
- [6] American Institute of timber construction: Timber construction manual, Wiley, John Wiley & Sons, 2012.
- [7] Person J: Numerical analysis of compression perpendicular to grain in glulam beams with and without reinforcement, Lund University of technology, 2010.
- [8] Mirianon F, Fortino S, Toratti T: A method to model wood by using ABAQUS finite element software, VTT Technical Research Centre of Finland, 2008.
- [9] Haasbroek D.F, Pretorius L: Orthotropic failure criterion for timber, R&D journal vol. 10, No. 1, 1994.
- [10] Dietsch P, (2008). Technische Universität München: Chair of Timber Structures and Building Construction. Dostupno na url: http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2008/EN1995_3_Dietsch.pdf [09. siječanj 2015]

AUTORI · AUTHORS**Marko Ključanin**

Rođen je 2. 08.1992. godine u Virovitici, gdje je završio i osnovnu školu i srednju Prirodoslovno-matematičku gimnaziju. 2011. godine upisao je studij graditeljstva na Tehničkom

veleučilištu u Zagrebu koji je završio 2014. godine obranom završnog rada "Drveni lijepljeni lamelirani nosači trapezne geometrije" pod mentorstvom dr.sc. Deana Čizmara. Također 2014. godine upisao je specijalistički diplomski stručni studij na TVZ. Za vrijeme preddiplomskog studija radio je kao studentski demonstrator iz predmeta Drvene konstrukcije i Metalne konstrukcije.

**Dean Čizmar**

1998. završio je V. gimnaziju, a 2003. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Nakon studija radio je u tvrtki Ekonerg, a od 2006. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta

u Zagrebu gdje je 2012. obranio je doktorsku disertaciju i 2013. biran u znanstveno zvanje viši znanstveni suradnik. Iste godine prelazi na TVZ. Koautor je dva sveučilišna udžbenika, dva rada indeksirana u Curent Contents, šest radova u SCI-E, te više od 25 radova na međunarodnim skupovima. Njegovi interesi obuhvaćaju drvene konstrukcije, održivu gradnju, energetska učinkovitost, pouzdanost i robusnost konstrukcija. Ovlašteni je inženjer, stalni sudski vještak za graditeljstvo i procjenu nekretnina, te energetska certifikator.

Korespondencija:

dcizmar@tvz.hr