

PROSTOR

27 [2019] 1 [57]

ZNANSTVENI ČASOPIS ZA ARHITEKTURU I URBANIZAM  
A SCHOLARLY JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

SVEUČILIŠTE  
U ZAGREBU,  
ARHITEKTONSKI  
FAKULTET  
UNIVERSITY  
OF ZAGREB,  
FACULTY OF  
ARCHITECTURE

ISSN 1330-0652  
[https://doi.org/  
10.31522/p](https://doi.org/10.31522/p)  
UDK | UDC 71/72  
CODEN PORREV  
27 [2019] 1 [57]  
1-190  
1-6 [2019]

POSEBNI OTISAK / SEPARAT | OFFPRINT

ZNANSTVENI PRILOZI | SCIENTIFIC PAPERS

132-139 **MILJENKO HAIMAN**

OBLIKOVANJE GREDNIH DRVENIH  
LIJEPLJENIH LAMELIRANIH NOSAČA

PREGLEDNI ZNANSTVENI ČLANAK  
[HTTPS://DOI.ORG/10.31522/P.27.1\(57\).10](https://doi.org/10.31522/p.27.1(57).10)  
UDK 72.011:721.013

DESIGNING THE GLULAM (GLUED  
LAMINATED) TIMBER BEAM GIRDERS

SCIENTIFIC SUBJECT REVIEW  
[HTTPS://DOI.ORG/10.31522/P.27.1\(57\).10](https://doi.org/10.31522/p.27.1(57).10)  
UDC 72.011:721.013



Af



SL. 1. PRIKAZ LAMELIRANIH NOSAČA KROVNE KONSTRUKCIJE U Sv. MARTINU NA MURI U FAZI MONTAŽE. VIDLJIVE SU ZATEGE ZBOG KOJIH JE POSTIGNUTA UŠTEDA U VISINI POPREČNOG PRESJEKA NOSAČA. ARHITEKT: V. PEDIŠIĆ, AUTORI KONSTRUKCIJE: M. HAIMAN I B. BALJKAS, GODINA IZGRADNJE: 2005.

FIG. 1 GLULAM ROOF STRUCTURE GIRDERS IN Sv. MARTIN NA MURI [ST. MARTIN ON THE MURA], IN THE ASSEMBLY PHASE. TIE RODS THAT ALLOW THE REDUCTION AT THE HEIGHT OF THE GIRDERS' CROSS-SECTION, ARE VISIBLE. ARCHITECT: V. PEDIŠIĆ, THE STRUCTURE DESIGNED BY: M. HAIMAN AND B. BALJKAS, YEAR OF CONSTRUCTION: 2005



## MILJENKO HAIMAN

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
ARHITEKTONSKI FAKULTET  
HR – 10000 ZAGREB, KAČICEVA 26  
mhaiman@arhitekt.hr

PREGLEDNI ZNAJSTVENI ČLANAK  
[https://doi.org/10.31522/p.27.1\(57\).10](https://doi.org/10.31522/p.27.1(57).10)  
UDK 72.011:721.013

TEHNIČKE ZNAJSTOSTI / ARHITEKTURA I URBANIZAM

2.01.03. – ARHITEKTONSKE KONSTRUKCIJE, FIZIKA ZGRADE,  
MATERIJALI I TEHNOLOGIJA GRAĐENJA

TEHNIČKE ZNAJSTOSTI / GRAĐEVINARSTVO

2.05.02. – NOSIVE KONSTRUKCIJE

ČLANAK PRIMLJEN / PRIHVACEN: 31. 5. 2019. / 17. 6. 2019.

UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF ARCHITECTURE  
CROATIA – 10000 ZAGREB, KAČICEVA 26  
mhaiman@arhitekt.hr

SCIENTIFIC SUBJECT REVIEW  
[https://doi.org/10.31522/p.27.1\(57\).10](https://doi.org/10.31522/p.27.1(57).10)  
UDC 72.011:721.013

TECHNICAL SCIENCES / ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

2.01.03. – ARCHITECTURAL STRUCTURES, BUILDING PHYSICS,  
MATERIALS AND BUILDING TECHNOLOGY

TECHNICAL SCIENCES / CIVIL ENGINEERING

2.05.02. – STRUCTURAL SYSTEMS

ARTICLE RECEIVED / ACCEPTED: 31. 5. 2019. / 17. 6. 2019.

# OBLIKOVANJE GREDNIH DRVENIH LIJEPLJENIH LAMELIRANIH NOSAČA

## DESIGNING THE GLULAM (GLUED LAMINATED) TIMBER BEAM GIRDERS

DRVENI LAMELIRANI NOSAČI  
GREDNI NOSAČI  
NUMERIČKI PRORAČUN  
OPTIMALNO OBLIKOVANJE  
VLAČNO NAPREZANJE OKOMITO NA VLAKANCA

U radu se analizira šest različitih primjera lameliranih grednih drvenih nosača kojima su dimenzije određene za najveća ista opterećenja na rasponu od 24 m. Cilj analiza bio je određivanje složenog polja naprezanja koja se javljaju u grednim drvenim lijepljenim lameliranim nosačima u ovisnosti o obliku. Oblik bitno utječe na stanje naprezanja u nosačima te stoga ove analize ukazuju na činjenicu njihova povoljnog oblikovanja. Drugi je cilj istraživanja bio sa što manje materijala svladati određeni raspon i tako izvesti jeftiniju konstrukciju.

GLULAM TIMBER GIRDERS  
BEAM GIRDERS  
NUMERICAL ANALYSIS  
OPTIMAL DESIGN  
TENSILE STRESS PERPENDICULAR TO THE FIBRES

This paper presents the analyses of 6 different models of glulam (glued laminated) timber girders whose dimensions are determined for the same maximal stresses on a 24-metre span. The goal is to determine a complex area of stresses that occur in the timber girders depending on their form. The form considerably affects the stresses in the girders. The analyses therefore highlight the importance of an appropriate design. Another goal of this research is to minimize the quantity of the materials needed to control a particular span resulting in a cheaper structure.

## UVOD

### INTRODUCTION

U arhitektonskoj praksi vrlo se često za svladavanje raspona oko 30 m i više koriste gredni nosači oblika dvostrukoga skosenog krova, za što su vrlo prikladni drveni lamelirani nosači koji su analizirani u ovome radu. Namjene građevina na kojima možemo primijeniti takve krovne konstrukcije mogu biti različite – od uporabe za javne zgrade, sportske i sakralne građevine do poljoprivredne namjene i sl.

Drvo ima sve širu primjenu u graditeljskoj praksi i često se upotrebljava za glavnu nosivu konstrukciju. Ponajprije se to odnosi na lijepljene drvene lamelirane nosače kojih je proizvodnja danas visoko sofisticirana i gdje se u svijetu danas planski plantažno uzgajaju drva četinarara za proizvodnju lameliranih drvenih konstrukcija.

Lamelirano drvo u upotrebi je gotovo sto godina, a datira otkad je razvijena industrija kvalitetnih rezorcinskih i melaminskih ljepila početkom 20. stoljeća. Vrste drva za lamelirane nosače u Europi jesu jela, smreka i bor. Osim ovih vrsta drva u svijetu se još koriste kanadska duglazija, američki *redwood* (mahagonij), kao i *eukaliptus grandis*. Od ovih posljednjih spomenutih vrsta izvedene su drvene konstrukcije najvećih raspona u svijetu, kao npr. *Tacoma Dome* u Tacomi (Washington, SAD), najvećeg raspona 163 m, izvedena od *redwooda*; odnosno *Odate Dome* u Japanu, najvećeg raspona 157 m, izvedena od eukaliptusa.

U radu je analizirano šest različitih tipova grednih lameliranih drvenih nosača [GLDN] koji mogu jednakovrijedno sudjelovati u prijenosu vanjskih sila akcija, no zbog nepovoljnog stanja unutarnjeg polja naprezanja okomito na vlakanca drva, nosači za isto opterećenje moraju biti znatno višega poprečnog presjeka, ovisno o vanjskom obliku.

Drvo je materijal koji po mehaničkim karakteristikama pripada u anizotropne, tzv. ortotropne materijale, gdje se, prema J. Bodigu<sup>1</sup>, ta ortotropija točnije definira kao rombična ortotropija. Konstrukcijski materijal drvo analizira se u svim smjerovima i najslabije je kod pojave vlačnoga naprezanja u smjeru okomito na vlakna. Ako usporedimo samo tlak i vlak okomito na vlakanca, možemo vidjeti da je prema EC5 i do 13 puta manja lomna čvrstoća na okomiti vlak u odnosu na okomiti tlak. Znači, tlačno okomito na vlakanca drvo je znatno čvršće nego kod pojave vlačnoga naprezanja.

Određivanje mjerodavnih dimenzija provodi se prema nekoliko kriterija, a upravo ta karakteristika vrlo male okomite nosivosti mjerodavna je za određivanje minimalnih potrebnih dimenzija. Naglasak u ovome radu dan je upravo na toj analizi nosivosti okomito na vlakanca.

## NUMERIČKE ANALIZE 6 TIPOVA NOSAČA

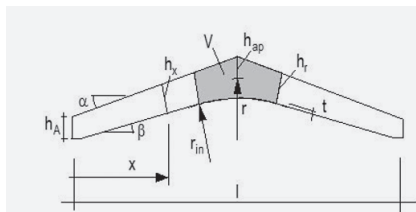
### NUMERICAL ANALYSES OF 6 GIRDER TYPES

U radu su analizirani oblici grednih nosača koji se najčešće upotrebljavaju za svladavanje raspona i do 40 m. Problem kod tih nosača uglavnom je povezan s transportom od tvornice do mjesta ugradnje. Transportni uvjeti ne dopuštaju Transporte nosača duljih od 40 m sa strelicom u polovini raspona maksimalno do 6 m.

Za numeričku analizu odabran je primjer da su svi nosači istih raspona 24 m i da im je međusobni razmak u tlocrtnom prikazu 5,5 m, što je ključno u određivanju opterećenja. Razmak je odabran na temelju istraživanja kod kojih je pokazano da će utrosak drva biti najmanji za razmak od 5,7 m.

Nosači koji su analizirani u ovome radu<sup>2</sup> prikazani su na Sl. 2. Podatci o geometrijskim veličinama dani su u Tabl. 1., kao i skica obilježanih veličina. Analizirani su nosači do nagiba gornjega ruba od 15° jer iznad te veličine već za taj raspon nosača (24 m) dimenzija visine poprečnog presjeka u sljemenu (apeksu) jedva je prihvatljiva za transport.

U ovoj analizi nosač TIP 3 ima visinu poprečnog presjeka u apeksu  $h_{ap}=385$  cm. Širina pravokutnoga poprečnog presjeka svih nosača jest  $b=20$  cm, a osni je raspon  $l=24,0$  m. Unutarnji radijus  $r_{in}=26,0$  m. Debljine lamela za krivljenih nosača jesu 32 mm. Analiza svih



Tabl. I. GEOMETRIJSKE VELIČINE ANALIZIRANIH TIPOVA NOSAČA  
TABLE I GEOMETRICAL DATA OF THE ANALYZED GIRDER TYPES

	TIP 1	TIP 2	TIP 3	TIP 4	TIP 5	TIP 6
$h_A$ [cm]	81	196	222	82	82	142
$h_{ap}$ [cm]	187	320	385	187	187	305
$\alpha$	5	10	15	5	5	15
$\beta$	0	6	10	–	–	10

nosača provedena je za isto vanjsko opterećenje od utjecaja stalnog opterećenja i najvećega pokretnoga vanjskog opterećenja snijegom za područje kontinentalne Hrvatske. Računski moment u polovini raspona za računsko faktorizirano opterećenje  $q = 14,85$  kN/m jest:  $M_{max} = 1069,20$  kNm. Podatci za mehanicke karakteristike uzeti su za lijepljeno lamelirano drvo razreda čvrstoće GL28h prema Tabl. II.<sup>3</sup>

Modeliranje svih tipova grednih elemenata provedeno je metodom konačnih elemenata SHELL4L elementima u COSMOSM podršci unutar softverskog paketa Solidworks.<sup>4</sup> Prema podacima iz Priručnika ta vrsta elemenata uzima u obzir ortotropno ponašanje u analizi modela i daje vrlo točne rezultate naponskog polja u nosačima. Ležajevi na koje se nosači oslanjaju modelirani su kao kruti elementi od čelika S235, kako se to inače izvodi u praksi. Kako se radi o numeričkoj analizi pomoću konačnih elemenata [KE], debljina presjeka nosača uzeta je preko debljine elemenata [THICKNESS 200 mm].

Nacin pojave diferencijalnih unutarnjih sila teoretski se može objasniti prikazom na Sl. 3. Tu je vidljivo da zbog oblika nosača neminovno dolazi do pojave vlakna okomito na vlakanca koji predstavlja slabu točku gotovo svih vrsta drva od kojih se izvode lamelirani nosači.<sup>5</sup> Prema tome, ako na Sl. 3. lijevo okrenemo nosače oko njihove uzdužne osi za  $180^\circ$ , siljati će dio biti s donje strane [TIP 4], a tada će stanje diferencijalnih unutarnjih sila biti tlak okomito na vlakanca. Čvrstoća na tlak, prema HRN EN 14080:2013, višestruko je veća. To ukazuje na mnogo povoljnije stanje naprezanja u tako oblikovanim nosačima.

U numeričkoj analizi analizirano je polje stanja glavnih naprezanja usporedno s vlaknima drva u nosaču, tj. u smjeru lameliranja [SX]. Zatim je analizirano polje posmičnih naprezanja [TAUXY], kao i ključna naprezanja koja utječu na dimenzioniranje tih vrsta nosača na njihovo polje poprečnih naprezanja [SY]. Kontrolirane su i deformacije, kao i analiza

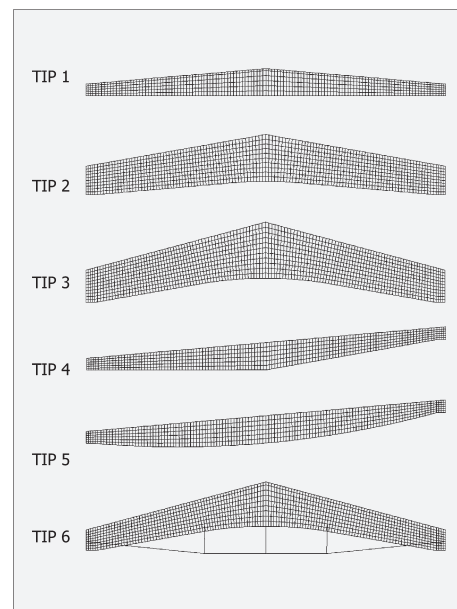
Tabl. II. PODATCI O MODULIMA ELASTIČNOSTI E I MODULU POSMIKA G [N/MM<sup>2</sup>], GUSTOĆA [DENS] U N/MM<sup>3</sup>

TABLE II DATA ABOUT THE YOUNG MODULE E AND SHEAR MODULE G [N/MM<sup>2</sup>], DENSITY [DENS] IN N/MM<sup>3</sup>

Materijal	Ime modula	Veličina
drvo	EX	12.500,00
drvo	EY	600,00
drvo	EZ	450,00
drvo	NUXY	0,027
drvo	NUYZ	0,6
drvo	NUXZ	0,033
drvo	GXY	650,00
drvo	GYZ	60,00
drvo	GXZ	650,00
drvo	DENS	0,000004
čelik	EX	210.000,00
čelik	NUXY	0,3
čelik	GXY	8.400,00
čelik	DENS	0,0000785

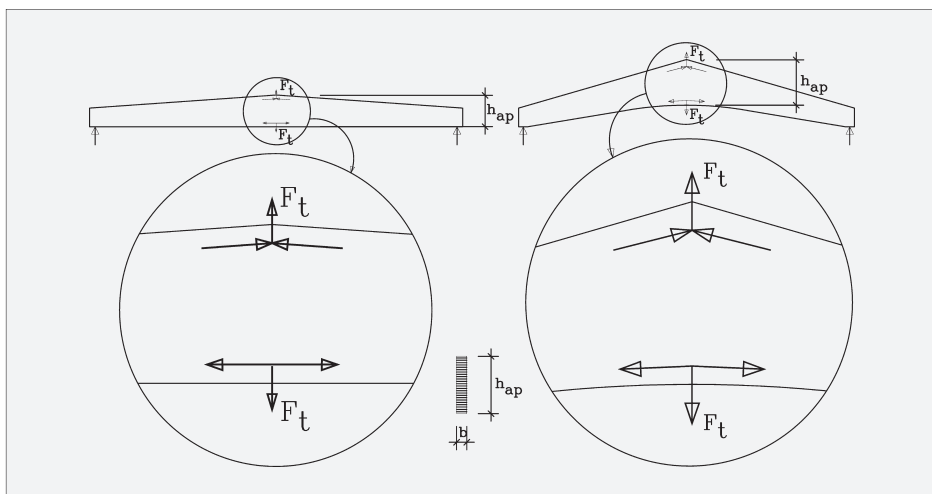
globalne stabilnosti nosača, što je kod tih nosača neizbježno. Radi se, naime, o visokim plošnim nosačima koji u svojoj ravni primaju veliko opterećenje što uzrokuje pojavu bočnog izbočivanja, izbacivanja plohe nosača izvan ravnine.

U numeričkom modelu nosači su bočno pridržani na ležajevima, a za elastičnu analizu globalne stabilnosti za isto maksimalno optere-



Sl. 2. PRIKAZ MREŽE KONAČNIH ELEMENATA ANALIZIRANIH TIPOVA NOSAČA RASPONA 24 M  
FIG. 2 FINAL ELEMENT MESH OF THE ANALYZED GIRDER TYPES WITH A 24-METRE SPAN

Sl. 3. LLD NOSAČI S PRAVOCRTNIM ILI RADIJALNO ZAKRIVLJENIM INTRADOSOM  
FIG. 3 GLULAM GIRDERS WITH A RECTILINEAR OR RADIALLY CURVED INTRADOS



1 BODIG, JANE, 1982.

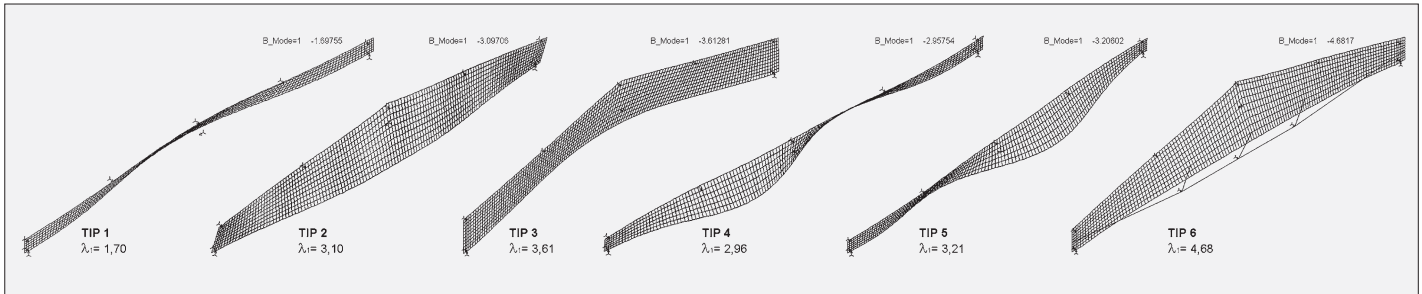
2 \*\*\* 1989.; GLISOVIĆ I DR., 2019.; HRN EN 1995-1-1, lipanj 2013.

3 HAIMAN, 2001.; ŽAGAR, 2005.

4 \*\*\* 2008.

5 HAIMAN, 2001.





SL. 4. REZULTAT ANALIZE BOČNOG IZBOČIVANJA  $\lambda_1$  ZA ANALIZIRANE NOSAČE  
FIG. 4 RESULT OF THE ANALYSIS OF LATERAL BUCKLING FOR THE ANALYZED GIRDERS

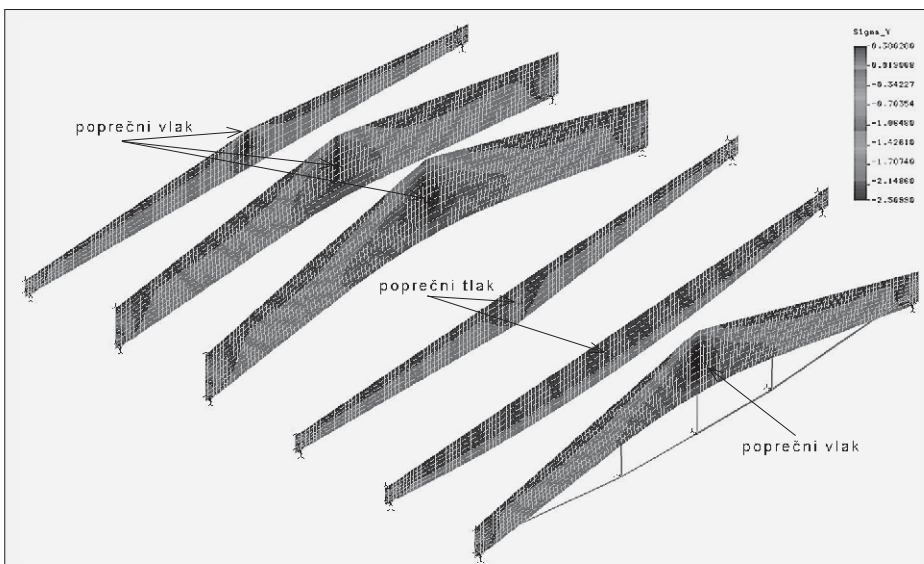
cenje potrebno ih je još pridržati najmanje u sredini. Tzv. *buckling* analiza, odnosno proračun izbočivanja, pokazao je da je najbolje, osim pridržanja u polovini raspona, bočna pridržanja pomoću vezova za sprečavanje bočnog izbočivanja konstrukcije izvesti i s pridržanjima u četvrtinama raspona. Time se postize visok koeficijent bočne sigurnosti. Poznato je da se bočna pridržanja nosača trebaju izvesti u gornjim polovinama visine poprečnoga presjeka, ali što bliže gornjemu tlačnom rubu.<sup>6</sup>

#### REZULTATI ANALIZIRANIH TIPOVA NOSAČA

##### THE RESULTS OF THE ANALYZED GIRDER TYPES

Određivanje minimalno potrebnih dimenzija nosača provodi se uz uvjet zadovoljavanja nekoliko vrsta naprezanja koja se mogu pojaviti u nosaču, kao i uz uvjet zadovoljavanja deformacija u granicama dopuštenih. Također, treba zadovoljiti uvjet stabilnosti na izbočivanje da koeficijent elastične sigurnosti  $\lambda_1$  bude veći od 2,5. U ovome radu naglasak je na vlačna naprezanja okomito na vlakanca, koja su ključna u određivanju dimenzija sedlastih tipova nosača Tip 1, 2 i 3.<sup>7</sup>

SL. 5. PRIKAZ POLJA POPREČNIH NAPREZANJA [SY], VLAČNIH ILI TLAČNIH, ZA ANALIZIRANE NOSAČE  
FIG. 5 AREA OF TRANSVERSAL STRESSES [SY], TENSILE OR COMPRESSIVE ONES FOR THE ANALYZED GIRDERS



U Tabl. III. prikazuju se rezultati mjerodavnih naprezanja za sve tipove analiziranih nosača. Vrijednosti su u N/mm<sup>2</sup>. Granične su vrijednosti sljedeće:  $\sigma_{m,d} = 19,38$  N/mm<sup>2</sup> za lamelirano drvo GL28c;  $\sigma_{t,90,d} = 0,35$  N/mm<sup>2</sup>;  $\kappa_{mod} = 0,9$  i  $\gamma_M = 1,3$ . Maksimalan dopušteni progib jest:  $L/200 = 120$  mm. Kritična sila izbočivanja treba biti 2,5 puta veća od maksimalnoga računskog opterećenja.

Ako analiziramo dobivene rezultate za tih šest tipova nosača, vidimo da su kod prva tri tipa, kojima su dimenzije određene prema uvjetu maksimalne iskoristivosti okomitoga vlačnog naprezanja, sva naprezanja u granicama dopuštenih. Zadovoljenje toga uvjeta bilo je ključno kod svih nosača pa su prema tome dobivene njihove dimenzije i volumen prikazan u posljednjem redu Tabl. III. Prikaz polja poprečnih vlačnih ili tlačnih naprezanja kod svih tipova nosača vidljiv je na Sl. 5.

Nosači TIP 4 i TIP 5 tako su oblikovani da se kod njih ne pojavljuje okomiti vlak nego tlak. Dopuštena vrijednost poprečnoga tlaka višestruko je veća i ti nosači ne trebaju biti prikazani dimenzija, već bi se one mogle smanjiti. Pritom treba obratiti pozornost na bočnu stabilnost, gdje nosač TIP 4 ima faktor sigurnosti na izbočivanje 2,96. Također, uvjet je upravnosti iskoristiven u cijelosti pa bi glede toga taj nosač ostao odabranih dimenzija i volumena. Za razliku od toga, nosač TIP 1 ne zadovoljava uvjet izbočivanja  $\lambda_1 = 1,70$  s pridržanjima samo u tlačnoj zoni, nego bi ga trebalo pridržati i u donjoj zoni na nekoliko mjesta kako ne bi dolazilo do izbočivanja vlačne zone, što je kod ovako visokih lameliranih nosača moguće. Slično je napravljeno na primjeru nosača u dvorani Gimnazije u Sesvetama<sup>8</sup> (Sl. 7.).

Posebno je analiziran nosač TIP 6 gdje se htjelo pokazati da se zahvatom na konstrukciji znatno mogu poboljšati i smanjiti unutarnja naprezanja, a zadržati oblik koji je u arhitektonskoj praksi vrlo cijenjen i prihvatljiv. Na tom je primjeru pokazana ušteda drva od

6 ŽAGAR, 2005.

7 HAIMAN, 2001.; HRN EN 1995-1-1, lipanj 2013.; GLIŠOVIĆ I DR., 2019.

37% (oko 3,9 m<sup>3</sup>) smanjenjem visine nosača za 80 cm i uza zadovoljenje svih potrebnih uvjeta dimenzioniranja. Utrošak čelika za zatege i spojne papuče na nosač reda jest veličine 420 kg/nosaču. Očito je takav nosač, uza zadovoljenje svih uvjeta dimenzioniranja, znatno povoljniji od nosača TIP 3 koji ima isti nagib gornjega ruba krovne plohe i veći utrošak drvene građe.

Glede izbočivanja prikazuju se rezultati za sve nosače u Sl. 4. Vidljivo je da je postignuta sigurnost na izbočivanje za sve nosače, osim TIP 1, veća od 2,5. Nosač TIP 1 trebalo bi bočno pridržati i u donjoj vlačnoj zoni kako se ne bi izbacivao iz svoje ravnine.

Prema tome, sile bočnog izbočivanja donje vlačne zone treba uobičajenim kosim pridrzanjima prenijeti u gornju zonu gdje sigurnost obvezatno osigurava spreg protiv bočnog izbočivanja i vjetra.

## DISKUSIJA

### DISCUSSION

Gredni sedlasti nosači oblikovani su tako da s unutarnje strane imaju konkavno zakrivljen donji rub, intrados nosača, po nekom radijusu koji je propisan prema EC5 i koji mora biti takav da se zakrivljenjem lamela u nosače ne unose preveliki rezidualni naponi. Poznato je da savijanjem drvene daske preko granice nosivosti dolazi do njena pucanja, a napreznja ovisi o debljini daske i radijusu zakrivljenja, kao i o vrsti drva. Spomenute vrste drva za lamelirane nosače vrlo se slično ponašaju, tako da za sve vrijedi isto pravilo. Radijus konkavnog zakrivljenja donje strane nosača mora biti veći od 200 d, gdje je d = debljina lamele. Uobičajene debljine lamela jesu 32 mm ili manje. Naravno, kad je potrebno izvesti nosače manjeg radijusa, može ga se smanjiti, ali će tada debljina lamele biti manja, no ne manja od 10 mm. Radijus zakrivljenosti kod lamela debljine 1 cm sukladno propisima jest 150 d. Tanje lamele tvore tzv. furnirano drvo.

U ovoj analizi situacija je bila sljedeća. Prvi nosač TIP 1 ima ravan donji rub i svega 5° nagiba krovne plohe. Takav nosač, prema analizi, može imati vrlo malu visinu i dimenzije da bi zadovoljio iste uvjete opterećenja i predstavlja racionalno rješenje. Glede oblikovanja tog nosača, on je prihvatljiv za male nagibe krovne plohe.

Kod potrebe većega nagiba krovne plohe vrlo se često pribjegava rješenju nosača TIP 2 i 3.

TABL. III. ANALIZIRANA KLJUČNA NAPREZANJA ZA SVE TIPOVE NOSAČA [N/MM<sup>2</sup>]  
TABLE III ANALYZED STRESSES FOR ALL GIRDER TYPES [N/MM<sup>2</sup>]

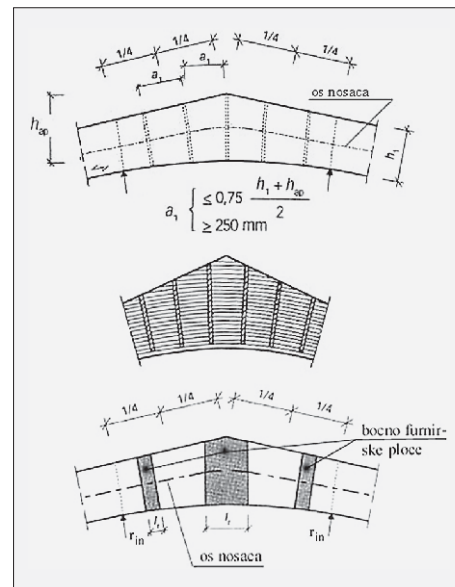
	TIP 1	TIP 2	TIP 3	TIP 4	TIP 5	TIP 6
$\sigma_{m,d}$	11,0	4,48	3,48	9,1	10,6	3,75
$\sigma_{t,90,d}$	0,34	0,29	0,30	-0,51	-0,077	0,36
$\sigma_{m,x,d}$	14,76	4,61	4,04	14,75	10,6	5,1
$u_{max}$ [mm]	114	24	19	119	86	30
fakt.sig. $\lambda_1$	1,69	3,10	3,61	2,96	3,21	4,68
V [m <sup>3</sup> ]	6,58	12,62	14,43	6,54	7,36	10,52

Oni su također analizirani za iste uvjete opterećenja, no pokazuje se da je nosač TIP 3, koji ima nagib gornjega ruba 15°, graničan s obzirom na potrebnu visinu u polovini raspona i s obzirom na mogućnosti transporta. Očito je da se nosači većega nagiba ne mogu koristiti a da se ne izvedu potrebna dodatna ojačanja. Mogući načini ojačanja srednje zone prikazani su na Sl. 6.<sup>9</sup>

Kako bi se pokazalo da se sa znatno manjom količinom utroška drva može svladati ovaj raspon, analizirani su primjeri nosača TIP 4 i 5, gdje su obadva nosača prihvatljiva i potpuno zadovoljavaju uvjete nosivosti i uporabivosti. Najbolje se ponaša nosač TIP 5 koji ima

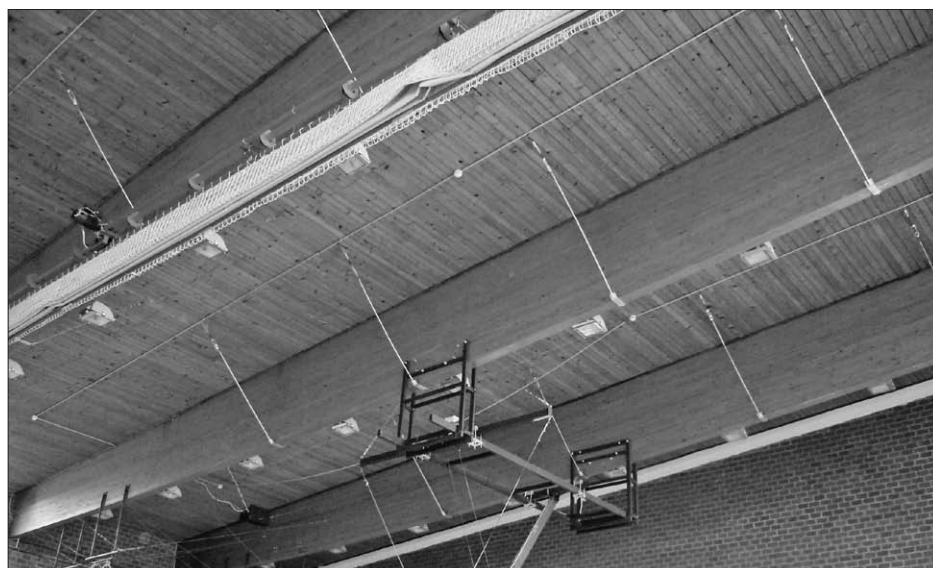
SL. 6. MOGUĆA OJAČANJA SREDNJE ZONE UGRADNOM NAVOJNIM SIPKI ILI LIJEPLJENJEM BOČNO FURNIRSKIH PLOČA

FIG. 6 POSSIBLE STRENGTHENING OF THE CENTRAL ZONE WITH THREAD RODS OR GLUING THE LATERAL VENEER PLATES



SL. 7. KROVNI NOSAČI TIP 5 SPORTSKE DVORANE GIMNAZIJE U SESVETAMA; RASPON 33 M. VIDLJIVA SU BOČNA PRIDRŽANJA DONJEGA VLAČNOG POJASA. KONSTRUKCIJA KOŠA OVMJEŠENA JE NA NOSAČE. ARHITEKT: NENAD PAULIĆ, AUTORI KONSTRUKCIJE: M. HAIMAN I B. BALJKAS, GODINA IZGRADNJE: 2000.

FIG. 7 ROOF GIRDERS TYPE 5 OF A HIGH SCHOOL SPORTS HALL IN SESVETE. SPAN OF 33 M. LATERAL TIES OF THE LOWER TENSILE BOOM ARE VISIBLE. THE BASKET CONSTRUCTION IS SUSPENDED ON THE GIRDERS. ARCHITECT: NENAD PAULIĆ, THE STRUCTURE DESIGNED BY: M. HAIMAN AND B. BALJKAS, YEAR OF CONSTRUCTION: 2000



<sup>8</sup> Arhitekt: Nenad Paulić, autori konstrukcije: M. Haiman i B. Baljkas, godina izgradnje: 2000.

<sup>9</sup> HAIMAN, 2001.

konveksno zakrivljen intrados, gdje oblik nosača zapravo predstavlja afini lik razvoja maksimalnog momenta za najčešće kontinuirano opterećenje. Takav nosač ima manje deformacije, manja unutarnja glavna i poprečna naprezanja, te zadovoljava s obzirom na izbočivanje. U projektantskoj praksi takvi su nosači primijenjeni na sportskoj dvorani škole u Sesvetama, gdje je projektirani raspon bio 33 m. Nakon svih dokaza nosivosti i uporabivosti jedino je kontrola bočne stabilnosti tih nosača zahtijevala pridržanje donjega ruba izvan ravnine kako se ne bi dogodilo stanje izbočivanja vidljivo na Sl. 4. Izvedeni glavni nosači sportske dvorane Gimnazije u Sesvetama prikazani su na Sl. 7. Dvorana je u funkciji od 2000. godine.

Posljednji je od analiziranih nosača TIP 6 koji je po nagibu gornjega ruba 15° identičan nosaču TIP 3. Taj je nosač 80 cm niži po visini, a ugradnjom zatege u donjoj zoni, koja se preporuča kad je god to moguće i arhitektima prihvatljivo, postiže se da je stanje naprezanja u takvom nosaču u dopuštenim granicama pa se time, uz 37% manji utrošak drvnoga materijala, može svladati isti raspon. Ugradnja zatege bitno utječe na smanjenje stanja poprečnih vlačnih naprezanja.

Još je jedan slučaj gdje su u praksi, uza suglasnost arhitekta V. Pedišića, na objektu natkriivanja bazena u toplicama Sv. Martin na Muri, ugradili zatege na zakrivljenim krovnim nosačima.<sup>10</sup> Tako je smanjena visina nosača od potrebnih 160 cm na 120 cm i bitno je smanjen volumen, što je utjecalo na smanjenje

konačne cijene konstrukcije. Prikaz je spomenute konstrukcije na Sl. 7.

## ZAKLJUČAK

### CONCLUSION

Ovim se radom nastoji pokazati i ukazati arhitektima i projektantima drvenih konstrukcija na činjenicu da pojava okomitih vlačnih naprezanja kod sedlastih grednih nosača bitno utječe na određivanje konačnih dimenzija nosača. Jednostavno rečeno, drvo je daleko više vlačno rascjepljivo (poprečno puca) nego što će doći do pucanja pojavom velikoga tlačnog naprezanja okomito na vlakanca.<sup>11</sup> Također se nastoji pokazati da bez dodatnih zahvata potrebna dimenzija mora biti gotovo dvostruko veća upravo za uvjet zadovoljenja okomitih vlačnih naprezanja. Sva ostala naprezanja iskorištena su 30% do maksimalno 40% od dopuštenih graničnih vrijednosti. Analiza je također pokazala da je najbolji nosač TIP 5 konveksno zaobljenog intradosa, a zahtijeva li se baš dvostrešni krov, može se primijeniti rješenje prema nosaču TIP 6 kod kojeg je ugradnjom zatege postignuta ušteda u volumenu od 37% samo na jednom nosaču.

Ključna vodilja projektantima treba biti što racionalnije rješenje kod kojeg ce utrošak materijala biti minimalan uza zadovoljenje oblikovnih zahtjeva. Istraživanja koja se provode na takvim nosačima imaju za cilj upravo optimalno oblikovanje i preuzimanje spomenutih kritičnih naprezanja.

## LITERATURA BIBLIOGRAPHY

1. BODIG, J.; JANE, B. A. (1982.), *Mechanics of Wood and Wood Composites*, Pub. by Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, USA
2. GLIŠOVIĆ, I.; STEVANOVIĆ, B.; TODOROVIĆ, M. (2019.), *Proračun drvenih konstrukcija prema Evrokodu 5*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd
3. HAIMAN, M. (2001.), *Analiza sigurnosti lameliranih nosača*, disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb
4. ŽAGAR, Z. (2005.), *Drvene konstrukcije I i II*, 2. izd., PRETEL, Zagreb
5. \*\*\* (1989.), *Holzbau-Taschenbuch*, Band 2: DIN 1052 und Erläuterungen – Formeln – Tabellen – Nomogramme 8. vollst.neubearb, Aufl. Berlin: Ernst, Verlag für Architektur u. techn. Wiss.
6. \*\*\* (2008.), *COSMOS/M Manuals Geostar V2.95*

## IZVORI SOURCES

### INTERNETSKI IZVORI

#### INTERNET SOURCES

1. <https://www.westernwoodstructures.com/index.php/timber-domes/> [5.2019.]
2. <http://architectuul.com/architecture/odate-dome> [5.2019.]

### DOKUMENTACIJSKI IZVORI

#### DOCUMENT SOURCES

1. HRN EN 1995-1-1, lipanj 2013., *Projektiranje drvenih konstrukcija*, Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1995-1-1:2004+AC:2006+A1:2008), drugo izdanje
2. HRN EN 1995-1-1:2013/NA – Nacionalni dodatak
3. HRN EN 1995-1-1:2013/A2 Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1995-1-1:2004/A2:2014)

### IZVORI ILUSTRACIJA I TABLICA

#### ILLUSTRATION AND TABLE SOURCES

- Sl. 1., 2., 4., 5., 7. Autor  
Sl. 3., 6. HAIMAN, 2001.  
Tabl. I.-III. Autor

<sup>10</sup> Arhitekt: V. Pedišić, autori konstrukcije: M. Haiman i B. Baljkas, godina izgradnje: 2005.

<sup>11</sup> HAIMAN, 2001.; GLIŠOVIĆ i dr., 2019.



## SAŽETAK

## SUMMARY

## DESIGNING THE GLULAM (GLUED LAMINATED) TIMBER BEAM GIRDERS

The paper examines the laminated timber girders with special emphasis on the analysis of the area of transversal stresses – tensile or compressive ones. The stress area depends on the form of the girders according to the performed numerical analyses. It is well known that transversal tensile stresses are the key elements that determine the sufficient dimensions of the girders. This requirement is highly relevant for final girder dimensions. In order to show all possible solutions and additional interventions that may reduce transversal stresses, the analysis of 6 girder types was carried out and the results are described in this paper.

Timber is the material whose mechanical properties define it as anisotropic the so-called orthotropic materials. According to J. Bodiga this orthotropy is more accurately defined as rhomboid orthotropy. The structural material wood is analyzed in all directions. It is weakest at the moment of tensile stress in transversal direction, perpendicular to the fibres. If we compare only the transversal compression on the fibres and transversal tension, we can see that breaking strength is five times weaker on the transversal tension in comparison with transversal tension. This means that wood exhibits far greater strength under transversal compression than transversal tension.

This paper describes the analysis of 6 laminated beam girders in different forms. Their forms play a key role in the development of stresses in them. They are presented as follows:

The girder Type 1 is commonly applicable in architecture. The analysis shows that such girders are exposed to transversal tensile stresses that do not determine great height of the cross-section in mid span. The analyzed girders are characterized by the same span, the same width of the cross-section and the fulfilled requirements of load-bearing capacity and usability that are crucial in determining dimensions.

The girder Type 2 is architecturally acceptable with a curved edge on the radius 26 m which is far more than the permissible curve of the lamellas 32 mm thick. The minimal radius of the curvature for such

plates is 6 m. The upper edges of this girder are double-sloping symmetrical with inclination of 10° while the lower edge is also bevelled on the radius of 6° and tangentially turns into a radially curved part. All supports are made of steel or neoprenic rubber with the adherence width of 300 mm. The base of the bearing is 200x300 mm which in all analyzed cases results in contact stresses within permissible limits.

The girder Type 3 has its upper edge bevelled at an angle of 15° while its inner edge is inclined at an angle of 10°. The central part has intrados of the bearing on the radius of 26 m as the other examples. The girder is architecturally acceptable. However, its drawback is precisely its form which generates great tensile stresses perpendicular to the fibres. In order to solve this problem and to keep the stresses within the acceptable limits, the girder must be very tall in its apex. For the Type 3 with a 24-metre span and stress requirements as in all other girders, this height should be 385 cm. This height gives the form to the girder which has its limit dimensions due to the transport conditions. In the text below the Type 6 is described which has the same inclination of the upper and lower edge but due to the tie rods and reduced internal forces and stresses, the same girder for the same type of stress can be 80 cm lower. Such a girder is far more economical: reductions of laminated timber per girder amount to almost 4 m<sup>3</sup>.

In order to show how the quantity of the material can be considerably reduced, the girders Type 4 and Type 5 are analyzed.

The girder Type 4 can be used for a shed roof. The lower edge of this girder is bevelled so that the greatest height of the cross-section is in the mid span. Towards the bearings this girder is reduced to the necessary height considering the dimensions needed to take over transversal stresses which are strongest at this point. Dimensions of this girder are identical to those of the girder Type 1 but it is turned around its axis by 180° and its upper edge is rectilinear, while the lower edge is bevelled on both sides. According to the analysis of

differential internal forces in the central zone of the girder, this type exhibits internal transversal compression. Breaking strength of wood under compression is far greater, more than 5 times and therefore in such girders there is no problem with transversal tension which appears in girders Type 1, 2 and 3.

If we compare the girders Type 1 and Type 4 we can see that they need the same quantity of materials. But the Type 4 girder requires additional safety measures regarding its lateral stability. Accordingly, in this case we cannot achieve ifurther reductions and benefits.

By contrast, the Type 5 girder which has a convex intrados, the condition of the field of internal stresses in the girder is better and thus this type proves to be the best and the most economical solution to control the span. But as the sports hall of the Sesvete high school indicates, such girders usually need a laterally supported lower edge due to the fact that the analysis of stability shows lateral deformation of the girder's lower edge. The supports are spanned at approximately 5 m and in such cases sufficient safety can be achieved.

Type 6 girder is analyzed in order to show that considerable reductions in the quantity of the materials used for the girder can be achieved with the same geometrical form, the same bevelling of the upper and lower girder edge, the same radius of the curvature of the intrados and for the same stresses. This girder was equipped with external tie rods in the lower zone in order to reduce spring behaviour of this girder (the effect of the leaf spring in mechanical engineering) as well as to reduce the internal transversal stresses into acceptable limits. This example shows that the quantity of timber per one girder is 3,9 m<sup>3</sup> smaller (37%). Rational design of this girder might have resulted in greater reductions. In general, the girders analyzed in this research serve as examples of a more rational design of the laminated timber beams in order to reduce the quantity of the material used. The goal of a rational design has always been to use the material for a structure as rationally as possible.

## BIOGRAFIJA

## BIOGRAPHY

Izv.prof. dr.sc. **MILJENKO HAIMAN**, dipl.ing.grad., diplomirao je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 1978., gdje je 1993. magistrirao i 2001. doktorirao. Od 1980. do 2006. bio je nastavnik i znanstveni suradnik na Građevinskom fakultetu, gdje je sudjelovao u nastavi i istraživačkom radu u području drvenih konstrukcija. Od 2006. do danas radi kao docent, a poslije izvanredni profesor na Arhitektonskom fakultetu, na predmetima Nosivih konstrukcija te zatim Čeličnih i drvenih konstrukcija. Voditelj je kabineta za Nosive konstrukcije.

**MILJENKO HAIMAN**, Dipl. Civil Eng., Ph.D., Associate Professor. He graduated from the Faculty of Civil Engineering of the University of Zagreb in 1978, earned his (post-graduate) M.Sc. degree in 1993 and his Ph.D. in 2001. From 1980 to 2006 he was a professor and a research associate at the Faculty of Civil Engineering. He took part in teaching and scientific research on timber structural systems. Since 2006 he has been working at the Faculty of Architecture. He is head of the Cabinet for Structural Systems

