

Primljen / Received: 15.5.2021.

Ispravljen / Corrected: 14.1.2022.

Prihvaćen / Accepted: 25.3.2022.

Dostupno online / Available online: 10.5.2022.

# Pristup projektiranja ekonomičnih hibridnih CLT podova

## Autori:



Mr.sc. **Nemanja Marković**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Nišu, Srbija  
Fakultet građevinarstva i arhitekture  
[nemanja.markovic@gaf.ni.ac.rs](mailto:nemanja.markovic@gaf.ni.ac.rs)



Doc.dr.sc. **Miroslav Marjanović**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Beogradu, Srbija  
Građevinski fakultet  
[mmarjanovic@grf.bg.ac.rs](mailto:mmarjanovic@grf.bg.ac.rs)  
Autor za korespondenciju



Doc.dr.sc. **Radovan Cvetković**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Nišu, Srbija  
Fakultet građevinarstva i arhitekture  
[radovan.cvetkovic@gaf.ni.ac.rs](mailto:radovan.cvetkovic@gaf.ni.ac.rs)

Pregledni rad

**Nemanja Marković, Miroslav Marjanović, Radovan Cvetković**

## Pristup projektiranja ekonomičnih hibridnih CLT podova

Postoji sve veći interes za istraživanjem i izradom hibridnih križno lameliranih drvenih ploča (CLT) koje su sastavljene od slojeva drva različite kvalitete, a koje će smanjiti proizvodne troškove. Iz tog razloga ovaj se rad bavi pristupom projektiranja isplativih hibridnih CLT panela opterećenih na savijanje i to primjenom postojećih analitičkih postupaka te neispitanih postupaka konačnih elemenata. U analizi kvadratnih panela primjenjuju se gama-metoda, proširena verzija gama-metode te kompozitna teorija, a model temeljen na teoriji konačnih elemenata primjenjuje se ako je panel složenog oblika koji je opterećen na savijanje. Provedeno je opsežno istraživanje na 25 CLT panela u kojima se uzimaju u obzir različite dimenzije, sheme laminiranja, geometrije i rubnih uvjeti. Ističu se i kvantificiraju uštede troškova koristeći niži razred drva u središnjim zonama CLT panela. Taj je koncept pokazao ekonomski potencijal koji bi se trebao uzeti u obzir tijekom projektiranja i proizvodnje CLT panela u konstrukcijskom inženjerstvu poput laganih podnih konstrukcija.

### Ključne riječi:

križno lamelirano drvo, lameliranje, analiza troškova, metoda konačnih elemenata

Research Paper - Subject review

**Nemanja Marković, Miroslav Marjanović, Radovan Cvetković**

## Design approach for cost-effective hybrid CLT floors

There is a growing research and production interest for the application of lower-cost hybrid cross-laminated timber (CLT) panels composed of timber layers of dissimilar quality. Therefore, an approach for the design of cost-effective hybrid CLT panels in bending, based on the existing analytical and novel finite element procedures, is presented in the paper. The gamma-method, the extended gamma method, and the composite theory are applied in the analysis of square panels, while the finite element model based on the Reddy's full layerwise theory is used for the complex-shape panels in bending. An extensive benchmark technical and economic study is performed for 25 CLT panels, considering various spans, lamination schemes, geometries, and boundary conditions. Cost savings made by using a lower timber class in central zones of CLT panels are highlighted and quantified. This concept shows an economic potential that should be considered during the design and production of CLT panels in structural engineering applications, such as lightweight floor structures.

### Key words:

cross-laminated timber, laminate, cost analysis, FEM

## 1. Uvod

Velike dimenzije križno lameliranih drvenih (eng. cross-laminated timber - CLT) elemenata, njihovo jednostavno rukovanje i različita primjena omogućavaju da se drveno inženjerstvo proširi na tržišta koja se tradicionalno čuvaju za čvrste građevne materijale koji se temelje na mineralima. CLT sustav razvio se u Austriji i Njemačkoj posljednjih desetljeća i brzo se širi većinom europskih zemalja. Ranih 2000-ih gradnja uz pomoć CLT-a vrlo se naglo povećala, i to djelomično zbog usmjerenosti na zelenu gradnju, ali i zbog bolje učinkovitosti, promjena kodeksa te poboljšanog marketinga.

CLT (jednako poznat i kao *X-lam*, *križni lam*, *masivno drvo* ili *Brettsperholz*) inovativni je materijal u kojem se drvene ploče načinjene od domaće vrste drva (uglavnom smreka) montiraju u slojevima i lijepe dijagonalno kako bi stvorile masivni drveni zid i podne panele. Metoda križnog lameliranja daje novi materijal velike krutosti, dobrih mehaničkih svojstava, dobre toplinske izolacije te pouzdanog ponašanja u slučaju potresa ili požara. To je primjenjivo i u slučaju pojedinačne kuće, ali i u slučaju višekatnica (višeobiteljski stanovi, poduzeće na više katova ili upravne zgrade). Osim toga, vrata, prozori i drugi otvori jednostavno se mogu pozicionirati i provesti unutar CLT panela pri čemu se omogućava visok stupanj montaže. U odnosu na fiziku gradnje i u usporedbi s laganim drvenim konstrukcijama, CLT pokazuje manje propusnosti zraka te karakterističan kapacitet specifičnog skladištenja za vlažnost i toplinsku energiju.

Kapacitet proizvodnje CLT-a brzo je rastao, 15–20 % godišnje, osobito u Austriji i Njemačkoj. Volumen svjetske proizvodnje 2014. godine povećao se do 625,000 m<sup>3</sup> [1]. Postoji sadašnji trend kojim CLT neprekidno pomiče granice u slučaju velikih drvenih zgrada. Primjeri su 14-katnica *The Tree* u Bergenu, Norveška [2, 3], *Ho-Ho* u Beču ili *Mjostarnet* u Norveškoj (CLT toranj visok 85,4 m). Osim u visokogradnji, CLT također ima velik potencijal kad je riječ o upotrebi u inženjerstvu mostova gdje se može koristiti samostalno ili u kombinaciji s drugim drvenim i/ili čeličnim materijalima u gradnji rebrastih i/ili sandučastih nosača [4].

Projektiranje CLT-a regulira se pomoću međunarodnih Europskih tehničkih dopuštenja (ETA) počevši 2006. godine. Prve aktivnosti kojima je počela standardizacija CLT-a u Europi počele su 2008. godine, a prva europska norma EN 16351 [5] za CLT nedavno je i službeno zaživjela. Planira se da CLT bude uključen u novu generaciju konstrukcijskih Eurokodova, odnosno Eurokoda 5 [6]. Razlog sporog napretka razvoja normi za projektiranje drvenih konstrukcija, a posebice u smislu poteškoća u potpunom razumijevanju mehanike drvenih materijala, leži uglavnom u vrlo složenoj prirodi drvene mikrostrukture [7].

Cilj je ovoga rada izložiti pristup projektiranja za daljnje optimiziranje CLT panela opterećenih savijanjem. Motivacija proizlazi iz prethodnih studija vezanih uz polazno optimiziranje [8, 9], a koje su pokazale da 52 do 77 % troškova u proizvodnji CLT panela čini sirovi materijal, drvo. Jednako tako, postoji i interes za istraživanjem i proizvodnjom te primjenom hibridnih

CLT panela izloženih savijanju, a koje su rezultat prethodnih optimizacijskih studija [10–13]. Kako koncept laminacije CLT-a omogućava upotrebu drva niže kvalitete u srednjem dijelu poprečnog presjeka (gdje središnji slojevi nisu izloženi maksimalnom naprezanju koje vodi do deformacije), drvo niže cijene može se koristiti u tu svrhu te smanjiti cijenu hibridnih panela u usporedbi sa standardnima.

## 2. Analitičke metode projektiranja CLT panela

### 2.1. Matematičke formule i jednadžbe

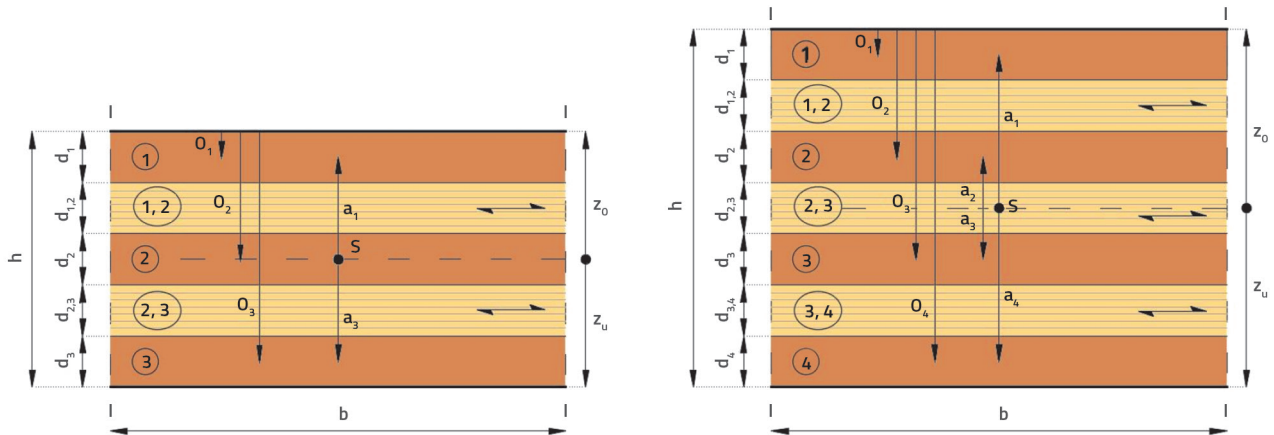
Kada je riječ o konstrukcijskom projektiranju CLT panela opterećenog savijanjem, obično se primjenjuju analitički postupci poput gama-metode ( $\gamma$ -metoda) koja se nalazi u Aneksu B Eurokoda 5 [6]. Osim te metode, drugi analitički postupci uključuju: (i) kompozitna teorija (ili „k-method“) Blaß [14] te (ii) metoda po Kreuzingeru [15]. Sve te metode imaju pojednostavljeni pristup prema kojem se na 2D konstrukcije gleda kao na grede metar široke koje ne iskorištavaju u potpunosti mehanička svojstva koja se dobivaju križnim laminiranjem. One su primjenjive u analizi CLT panela pravilnog oblika. Međutim, u slučaju složene geometrije, važno je primijeniti napredne analitičke metode u kojima se na panele gleda kao na ortogonalne ploče.

### 2.2. Gama-metoda i njezina proširena verzija

Gama-metodu izvorno je razvio Möhler za grede (u obliku slova I ili T u poprečnom presjeku) koje su povezane ravnomjerno razmaknutim mehaničkim spojnica uzduž cijele grede [16]. Tom metodom objašnjava se horizontalna deformacija u posmiku koja se događa u slojevima koji su orijentirani okomito na smjer raspona te vertikalna deformacija u posmiku u longitudinalnim slojevima [17]. Longitudinalni slojevi shvaćaju se kao elementi grede koji su povezani *zamišljenim spojnica* čija je krutost jednaka onoj u poprečnim slojevima u posmiku za vrijeme ljujanja zida. Prema toj metodi svojstva krutosti definiraju se upotrebom efektivnog momenta inercije  $I_{0,ef}$  koji ovisi o svojstvima profila i faktoru efikasnosti  $\gamma$ . Gama-metoda može se primijeniti za najviše pet slojeva i preporučuje se onda kad je omjer između površine i visine poprečnog presjeka veći od 30. Ako CLT panel ima više od pet slojeva, potrebna je primjena proširene verzije gama-metode (EGM). U ovom poglavlju na slici 1. prikazane su glavne jednadžbe  $\gamma$ -metode. Centar gravitacije  $z_s$  i neto površina presjeka  $A_{0,net}$  dobivaju se prema izrazu (1):

$$z_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot b_i \cdot d_i \cdot o_i}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot b_i \cdot d_i}, \quad A_{0,net} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot b \cdot d_i \quad (1)$$

gdje je  $E_i$  Youngov modul elastičnosti za sloj  $i$ ,  $E_c$  je tipični Youngov modul (ovdje usvojen kao najveći longitudinalni



Slika 1. Poprečni presjek te osnovni ulazni parametri za  $\gamma$ -metodu na CLT panelu s pet slojeva (lijevo) i sedam slojeva (desno)

Youngov modul CLT panela),  $b$  je širina panela,  $d_i$  je debljina sloja,  $o_i$  je udaljenost od vrha CLT panela do centra gravitacije sloja  $i$ . Faktori efikasnosti u području spoja  $\gamma$  za petoslojni CLT panel su sljedeći (Slika 1., lijevo):

$$\gamma_1 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1}{I_{ref}^2} \cdot \frac{d_{1,2}}{b \cdot G_{R,12}}\right)}, \quad \gamma_2 = 1,0 \quad (2)$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_3 \cdot A_3}{I_{ref}^2} \cdot \frac{d_{2,3}}{b \cdot G_{R,23}}\right)}$$

gdje su  $E_1$  i  $E_3$  Youngovi moduli koji se poklapaju sa zrnom slojeva 1, odnosno 3,  $A_1$  i  $A_3$  su područja slojeva 1, odnosno 3,  $d_{1,2}$  i  $d_{2,3}$  predstavljaju debljinu slojeva 12, odnosno 23,  $I_{ref}$  je opseg panela,  $b$  je širina panela (1 m), a  $G_{R,12}$  i  $G_{R,13}$  su moduli smicanja pri kotrljanju slojeva 12, odnosno 13. Faktor  $\gamma$  može imati vrijednost između 0 i 1. Vrijednost  $\gamma = 1$  odgovara tvrdom spoju,  $\gamma = 0$  u slučaju kad ne postoji spoj, a  $\gamma = 0,85 - 0,95$  [27, 28] su uobičajene vrijednosti za CLT. Udaljenosti od poprečnog presjeka centra gravitacije do centra gravitacije:

$$a_1 = \left(\frac{d_1}{2} + d_{1,2} + \frac{d_2}{2}\right) - a_2, \quad a_3 = \left(\frac{d_2}{2} + d_{2,3} + \frac{d_3}{2}\right) + a_2 \quad (3a)$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot \frac{E_1}{E_c} \cdot b \cdot d_1 \left(\frac{d_1}{2} + d_{1,2} + \frac{d_2}{2}\right) - \gamma_3 \cdot \frac{E_3}{E_c} \cdot b \cdot d_3 \left(\frac{d_2}{2} + d_{2,3} + \frac{d_3}{2}\right)}{\sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot \frac{E_i}{E_c} \cdot b \cdot d_i} \quad (3b)$$

Naposljetku, efektivni moment inercije  $I_{0,ef}$  može se odrediti sljedećim izrazom (4):

$$I_{0,ef} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_c} \cdot \frac{b \cdot d^3}{12} + \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot \frac{E_i}{E_c} \cdot b \cdot d_i \cdot a_i^2 \quad (4)$$

Normalno naprezanje ( $\sigma_{m,i,d}$ ) i posmično naprezanje ( $\tau_{V,i,d}$ ) mogu se odrediti uporabom efektivnom momenta inercije i  $\gamma$  faktora pomoću izraza (5):

$$\sigma_{m,i,d} = \pm \frac{E_i}{E_c} \cdot \frac{M_{0,d}}{I_{0,ef}} \left( \gamma_i \cdot a_i \pm \frac{d_i}{2} \right), \quad \tau_{V,i,d} = \frac{V_{0,d} \cdot S_{0,i,net}}{I_{0,ef} \cdot b} \quad (5)$$

$$S_{0,i,net} = \sum_{i=1}^{k_i} \frac{E_i}{E_c} \cdot b \cdot d_i \cdot a_i$$

gdje je  $M_{0,d}$  projektirani moment savijanja,  $V_{0,d}$  je projektirana posmična sila,  $S_{0,i,net}$  je statički moment površine,  $k_i$  je pokazatelj uzdužnog sloba koji je najbliži centru gravitacije kada se gleda s vrha poprečnog presjeka.

Prema modelu EC5, krajnja deformacija  $w_{fin}$  posljedica je trenutačne deformacije ( $w_{inst}$ ) i deformacije pri puzanju ( $w_{creep}$ ):

$$w_{inst} = w_G + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot w_{Q,i}, \quad w_{creep} = k_{def} \cdot w_{inst} \quad (6)$$

$$w_{fin} = w_{inst} \cdot (1 + k_{def}) \leq \frac{l}{250}$$

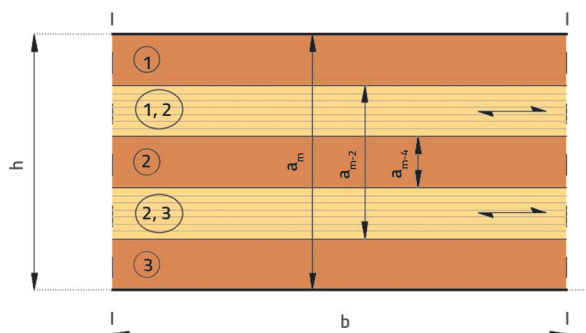
gdje je  $w_G$  deformacija pod trajnim opterećenjem i  $w_Q$  deformacija pod promjenjivim opterećenjem,  $k_{def}$  je faktor deformacije,  $\psi_2$  je faktor kvazistalne vrijednosti promjenjivog djelovanja, a  $l$  je najkraći opseg CLT panela. U radu se primjenjuju vrijednosti  $k_{def} = 0,8$  i  $\psi_2 = 0,3$ .

U slučaju CLT panela koji imaju više od pet slojeva potrebno je primijenjivati EGM. Metoda pretpostavlja sinusoidno opterećenje te postojanje odgovarajućeg oblika CLT panela.  $\gamma$  faktori u EGM modelu određuju se postupkom izloženim u [23]. Nakon što se odrede  $\gamma$  faktori, određivanje efektivnog momenta inercije te normalnog i posmičnog naprezanja može se postići uporabom istog postupka kao i u konvencionalnoj  $\gamma$ -metodi.

### 2.3. Kompozitna teorija (k-metoda)

U ovoj se metodi uzimaju u obzir svojstva čvrstoće i krutosti pojedinih slojeva i to faktorom sastava ( $k$ ) prikazanim u

[14]. Faktor sastava omjer je između čvrstoće i krutosti razmatranog poprečnog presjeka te čvrstoće ili krutosti nesloženog istovrsnog poprečnog presjeka gdje se zrna svih slojeva poklapaju sa smjerom naprezanja [14]. Ovom metodom prihvaća se Bernoullijeva hipoteza te linearni odnos između naprezanja i deformacije. Ova metoda ne uzima u obzir posmičnu deformaciju. Stoga se može primijeniti samo za omjer između opsega i dubine koji je veći od 30.



Slika 2. Poprečni presjek CLT-a te temeljni ulazni parametri za k-metodu

Faktor sastava za savijanje izvan ravnine koje se podudara sa sastavom vanjskih slojeva 1 i 3 (slika 2.) je:

$$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots + a_1^3}{a_m^3} \quad (7)$$

U izrazu (7),  $E_0$  i  $E_{90}$  su Youngovi moduli koji se poklapaju s, odnosno okomiti su na sastav. Udaljenosti  $a_i$  prikazuje slika 2. Efektivna krutost na savijanje CLT panela određuje se izrazom (8):

$$(EI)_{ef} = E_0 \cdot \frac{b \cdot a_m^3}{12} \cdot k_1 \quad (8)$$

Slika 2. prikazuje normalna naprezanja koja se podudaraju sa smjerom sastava vanjskih slojeva koja su izazvana savijanjem CLT panela izvan ravnine na granici slojeva  $m, m-2$ , odnosno  $m-4$ :

$$\sigma_m = \frac{M}{(EI)_{ef}} \cdot E_0 \cdot \frac{a_m}{2}, \quad \sigma_{m-2} = \frac{M}{(EI)_{ef}} \cdot E_0 \cdot \frac{a_{m-2}}{2}, \quad (9)$$

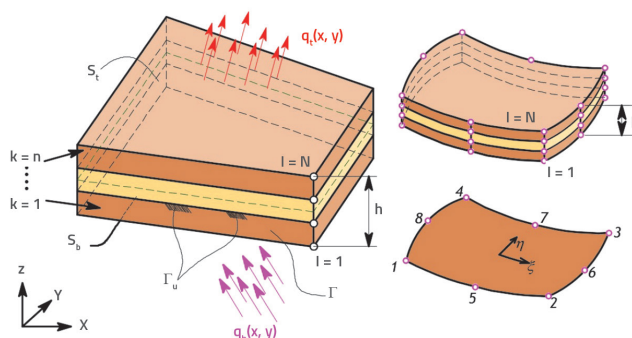
$$\sigma_{m-4} = \frac{M}{(EI)_{ef}} \cdot E_0 \cdot \frac{a_{m-4}}{2}$$

### 3. Numerički model (FEM) koji se temelji na slojevitoj teoriji ploča

#### 3.1. Definicija modela

Postojeći analitički postupci vezani uz projektiranje CLT panela poprilično su složeni i ograničeni su na jednostavne geometrije (poput grede ili pravokutnika) te su poduprti rubnim uvjetima

i jednostavnim opterećenjima kao što to prikazuje prethodni odjeljak. Očito da postoji potreba primjene numeričkih metoda za analizu CLT panela u većini stvarnih slučajeva u inženjerskoj praksi. Iz tog razloga koristi se opći oblik Reddyjeve slojevite teorije ploča (eng. *full-layerwise theory* - FLWT) [19]. FLWT uzima u obzir kompozitne laminate (npr. CLT panele) koji se sastoje od  $n$  ortotropnih slojeva ( $k = 1, 2, \dots, n$ ). Određuje se ukupna debljina ploče kao  $h$  (vidi sliku 3., lijevo). Ploču se podupire duž dijela  $\Gamma_u$  graničnog  $\Gamma$  izloženog opterećenjima  $q_t(x, y)$  te  $q_b(x, y)$  koji djeluju ili na vrhu ili dnu površine ploče ( $S_t$  or  $S_b$ ). Definiira se linearna promjenjivost po komadu svih triju pomaknutih komponenti ploče što vodi do prikaza 3D naprezanja svih slojeva materijala [19].



Slika 3. Lamelinarna kompozitna ploča koja ima n materijalne slojeve te N numerička sučelja

Polje pomaka ( $u, v, w$ ) neke proizvoljne točke  $(x, y, z)$  na laminatu prikazuje:

$$u(x, y, z) = \sum_{l=1}^N U^l(x, y) \Phi^l(z), \quad v(x, y, z) = \sum_{l=1}^N V^l(x, y) \Phi^l(z), \quad (10)$$

$$w(x, y, z) = \sum_{l=1}^N W^l(x, y) \Phi^l(z)$$

gdje su  $U^l(x, y)$ ,  $V^l(x, y)$  i  $W^l(x, y)$  sastavnice pomaka numeričkog sloja ploče  $l$  u smjerovima  $x, y$ , odnosno  $z$ , dok je  $N$  broj sučelja između slojeva  $S_t$  i  $S_b$ .  $\Phi^l(z)$  su linearna kombinacija slojeviten neprekidnih funkcija  $z$ -koordinate koje se mogu pronaći u [19]. Polje linearnog naprezanja koje je povezano s poljem pomaka (10) također se može pronaći u [19]. Naprezanja u sloju  $k$  mogu se izračunati poznatim konstitutivnim jednadžbama za 3D lamele koje prikazuju odnos naprezanja i deformacije  $(x, y, z)$  koordinatama. Transformacijska matrica  $\mathbf{T}^{(k)}$  za sloj  $k$  laminata određuje odnos između  $(x, y, z)$  koordinata i koordinata materijala  $(1, 2, 3)$  [19]. Naposljedku, Euler-Lagrangeova jednadžba pokreta FLWT-a dobiva se primjenom načela virtualnih pomaka. Model pomaka konačnog elementa (slabi oblik) dobiva se na temelju FLWT-a upotrebom simulirane interpolacije polja pomaka:

$$U^l(x, y) = \sum_{j=1}^m U_j^l \psi_j(x, y), \quad V^l(x, y) = \sum_{j=1}^m V_j^l \psi_j(x, y), \quad (11)$$

$$W^l(x, y) = \sum_{j=1}^m W_j^l \psi_j(x, y)$$

Tablica 1. Mehanička svojstva za drvo razreda C24 i C16

	$E_L$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_T = E_R$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{LT} = G_{LR}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{RT}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\nu_{LT}$	$\nu_{LR}$	$\nu_{RT}$
<b>C24</b>	11000	370	690	69	0,49	0,39	0,64
<b>C16</b>	8000	270	500	50	0,49	0,39	0,64

U izrazu (11),  $m$  je broj čvorova po 2-D elementu,  $u_j, v_j, w_j$  su vrijednosti pomaka u čvorovima  $U, V$  odnosno  $W$  u čvoru  $j$  2-D elementa, dok su  $\psi_j(x,y)$  2-D polinomi Lagrangeove interpolacije povezani s elementom čvora  $j$ . Očito da slojeviti konačni elementi nalažu samo  $C^0$  neprekidnost generaliziranih pomaka duž rubova elemenata zato što se elementi translacijskog pomaka usvajaju kao stupnjevi slobode čvora.

Model konačnog elementa nedavno je usvojen u sklopu izvornog koda konačnog elementa FLWTFEM [20] koji je napisao drugi autor, a koji je dostupan na internetu kao dio GitHub repozitorija. U radu se iz FLWTFEM knjižnice odabiru kvadrilateralni elementi koji su kvadratno slojeviti metodom kvadratnog slučajnog otkrivenja (Q8) sa smanjenim udjelom integracije (slika 3., desno), a koja je pokazala da daje pouzdane rezultate u analizi CLT-a opterećenog savijanjem [20].

Simulirana po dijelovima, linearna interpolacija polja pomaka kroz laminat omogućava neprekidna naprezanja na sučelju između susjednih slojeva. Jednom kad se postignu nodalni pomaci, naprezanja  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}$  te  $\tau_{xy}$  se mogu izračunati na temelju konstitutivnih odnosa svakog sloja. Naprezanja se računaju na sučeljima sloja i neprekidni su zbog ortotropne prirode svakog sloja. Kako interlaminarna naprezanja  $\tau_{yz}, \tau_{xz}$  i  $\sigma_z$  koja se računaju na ovaj način ne zadovoljavaju neprekidnu raspodjelu kroz laminat, ona se ponovno računaju primjenom algoritma oporavka originalnog naprezanja prikazanog u [22, 23], kojim se osrednjavaju interlaminarna naprezanja svakog sloja te se koriste 3D jednadžbe ravnoteže koje su vezane uz naprezanja.

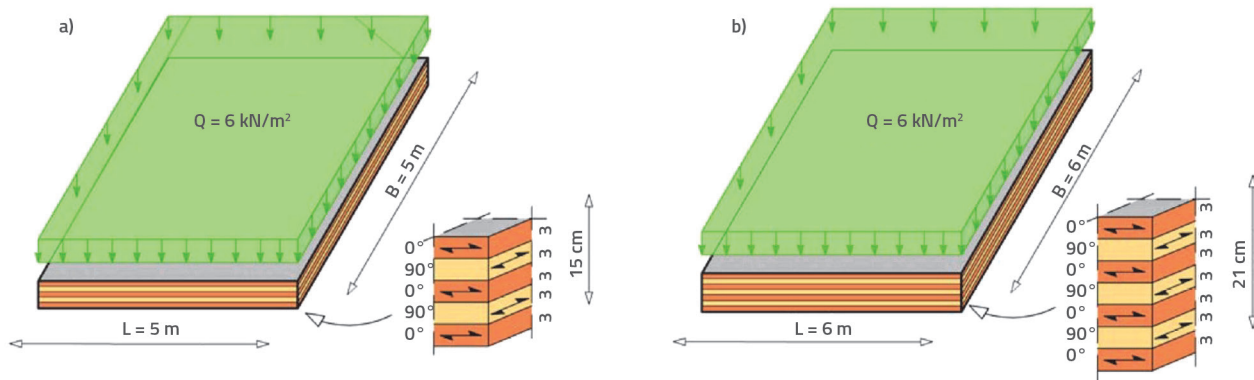
### 3.2. Model provjere autentičnosti u usporedbi s uobičajenim projektnim postupcima

U ovom potpoglavlju koristi se model autentičnosti u usporedbi s projektnim postupcima koji se obično primjenjuju za CLT (opisani u poglavlju 2). Cilj je dokazati da novi postupak koji se temelji na FEM-u ima potencijal u praktičnoj primjeni u inženjerskim izračunima. Detaljnija studija validacije prikazana je u [22].

Razmatraju se četvrtasti CLT paneli koji su samo poduprti duž  $B$ -stranica te su slobodni duž  $L$ -stranica. Ploče su na površini izložene podjednako raspoređenom opterećenju koje iznosi  $Q = 6 \text{ kN/m}^2$ . Prva ploča (slika 4.a) koja ima pet slojeva ( $h_i = 3 \text{ cm}$ ) te dimenzije  $L = B = 5 \times 5 \text{ m}$  i ukupne je debljine u iznosu  $h = 15 \text{ cm}$  ( $L/h = 33,3$ ). Prva ploča (slika 4.a) koja ima 5 slojeva ( $h_i = 3 \text{ cm}$ ) te dimenzije  $L = B = 6 \times 6 \text{ m}$  s ukupnom debljinom koja iznosi  $h = 21 \text{ cm}$  ( $L/h = 28,5$ ). Ima sedam slojeva ( $h_i = 3 \text{ cm}$ ). Na svaki se sloj gleda kao na jednosmjernu C24 lamelu sa svojstvima materijala koje prikazuje tablica 1., a koji se usvajaju prema [24, 25].

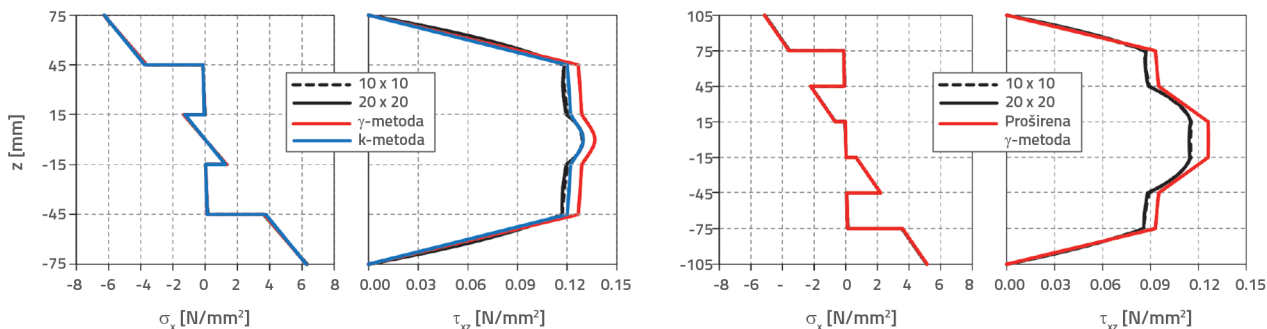
Predviđanje naprezanja u prvoj ploči provodi se primjenom  $\gamma$ -metoda i  $k$ -metoda, dok se to za drugu ploču računa prema EGM-u zbog prisutnosti sedam slojeva. U svim analitičkim postupcima razmatrani CLT paneli analiziraju se kao ekvivalentni greda metar širokih. U  $\gamma$ -metodi kao i u EGM-u svojstva krutosti definiraju se uporabom efektivnog momenta inercije  $I_{0,ef}$ . U  $k$ -metodi uzimaju se u obzir svojstva čvrstoće i krutosti pojedinih slojeva i to faktorom sastava ( $k$ ).

U modelu konačnog elementa rubni uvjeti određuju se u rubnim čvorovima:  $V = W = 0$  za rubove koji se podudaraju s  $B$ . Dvije



Slika 4. Razmatrani CLT paneli s pet (a) i sedam (b) slojeva koji se koriste kao model provjere autentičnosti u usporedbi s uobičajenim projektnim postupcima





Slika 5. Naprezanja  $\sigma_x (L/2, B/2)$  i  $\tau_{xz} (0, B/2)$  CLT panela s 5 slojeva (lijevo) i 7 slojeva (desno) izazvanih podjednako raspoređenim opterećenjem koje iznosi  $Q = 6\text{kN/m}^2$ , a uzima u obzir različite projektne postupke i gustoće mreže

različite veličine mreža uzimaju se u obzir u oba modela: 10 x 10 i 20 x 20 Q8 konačni elementi sa smanjenom mogućnošću integracije.

Slika 5. prikazuje raspodjelu komponenti naprezanja  $\sigma_x$  i  $\tau_{xz}$  zajedno s rezultatima dobivenim primjenom  $\gamma$ -metode,  $k$ -metode i EGM-a. Raspodjela se računa u točkama panela gdje naprezanja postižu najveće vrijednosti. Očigledno, normalno naprezanje  $\sigma_x$  pokazuje ispravne karakteristike isprekidanog oblika sa značajno drugačijim kosinama u mekim i krutim slojevima. Odlično podudaranje sa  $\sigma_x$  postiže se u slučaju panela s pet i sedam slojeva u usporedbi s numeričkim i analitičkim postupcima (slika 5.). Raspodjela posmičnog naprezanja po visini poprečnog presjeka koji se dobiva analitičkim postupcima i modelima konačnog elementa koji se temelje na FLWT-u pokazuju specifičan pravac laminata. Uočava se neznatni previd  $\tau_{xz}$  u analitičkim postupcima koji ne predstavlja sigurnosni problem u inženjerskim izračunima. U modelu konačnog elementa očito je da je čak i gruba mreža predviđjela raspodjelu  $\tau_{xz}$ .

Iz svega navedenoga može se zaključiti da se model konačnog elementa može pouzdano koristiti u predviđanjima naprezanja tankih i debelih CLT panela. U sljedećem poglavlju primijenit će se FEM model u analizi CLT panela s otvorima koji su opterećeni savijanjem, a u slučaju gdje nisu primjenjivi analitički postupci opisani u poglavlju 2.

#### 4. Referentna točka tehnokonomske studije

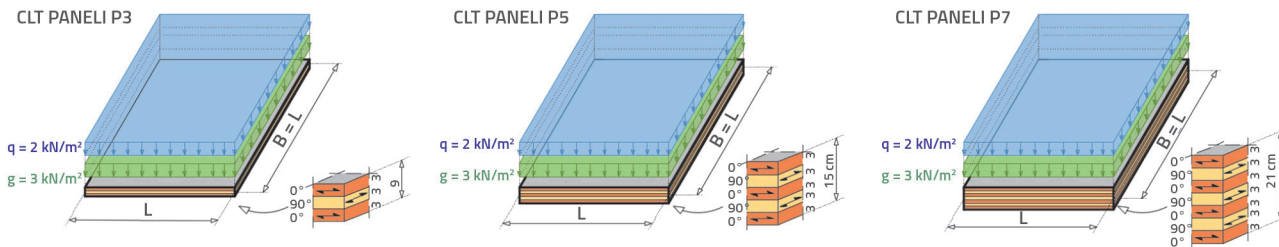
Dobro je poznata primjena drva nižeg razreda u srednjim slojevima CLT panela. Međutim, podaci tehnokonomske analize

i analize troškova slabo su zastupljeni u dostupnoj literaturi. Zato podaci koji su izloženi u ovom poglavlju mogu poslužiti kao referentna točka za daljnja ispitivanja hibridnih CLT panela opterećenih savijanjem. Studija uzima u obzir jednostavno poduprte CLT panele:

- standardne koji imaju istu kvalitetu drva (C24) u svim slojevima
- hibridne panele sa središnjim slojevima koji imaju drvo niže čvrstoće (C16).

Studija obuhvaća 25 CLT panela: 11 standardnih i 14 hibridnih, a prikazuje ih tablica 2. Odabiru se omjeri opsega i debljine ( $L/h$ ) kako bi pokrili širok raspon moguće praktične primjene. Debljina sloja svih analiziranih CLT panela iznosi 3 cm. Pravac vlakana vanjskih slojeva CLT panela podudara se s opsegom  $L$ , a poprečni slojevi podudaraju se s pravcem  $B$  (slika 6. i 7.). Četvrtasti paneli jednostavno su poduprti duž rubova koji se podudaraju s pravcem  $B$ . Elastična svojstva materijala C16 prikazuje tablica 1.

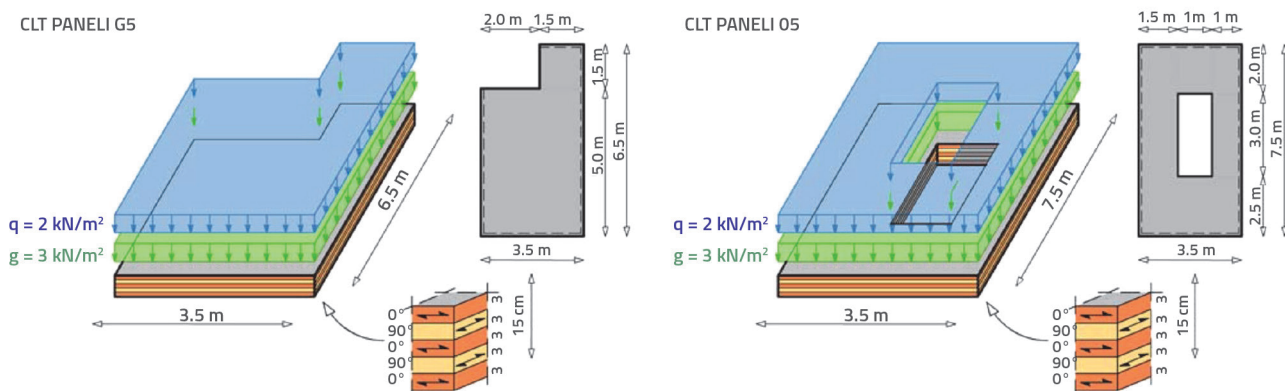
Provodi se numeričko ispitivanje o utjecaju sljedećih parametara: broj slojeva, dimenzije panela, razred drva u srednjem dijelu sloja, broj središnjih slojeva nižeg razreda drva te oblik i rubni uvjeti CLT panela. Paneli su analizirani s naglaskom na aktivnost trajnog opterećenja ( $G = 3\text{ kN/m}^2$  – vlastita težina, težina poda te odgovarajući zidovi CLT-a) i korisno opterećenje ( $Q = 2\text{ kN/m}^2$  – za stambene zgrade u skladu s [26]), vidi sliku 6. i 7. Normalna i posmična naprezanja računaju se za krajnje opterećenje s djelomičnim faktorima sigurnosti  $\gamma_G = 1,35$  i  $\gamma_Q = 1,50$ .



Slika 6. Izgled četvrtastog CLT panela koji se razmatra u studiji (ispravljena slika)

Tablica 2. Sheme lameliranja i opseg analiziranih CLT panela

Oznaka	Opis	Nacrt laminiranja
P3-200 P3-250 P3-300	Standardni četvrtasti 3-slojni CLT panel, L = B = 2,0 m Standardni četvrtasti 3-slojni CLT panel, L = B = 2,5 m Standardni četvrtasti 3-slojni CLT panel, L = B = 3,0 m	24/24/24
P3-200-H1 P3-250-H1 P3-300-H1	Hibridni četvrtasti 3-slojni CLT panel, L = B = 2,0 m Hibridni četvrtasti 3-slojni CLT panel, L = B = 2,5 m Hibridni četvrtasti 3-slojni CLT panel, L = B = 3,0 m	24/16/24
P5-350 P5-400 P5-450	Standardni četvrtasti 5-slojni CLT panel, L = B = 3,5 m Standardni četvrtasti 5-slojni CLT panel, L = B = 4,0 m Standardni četvrtasti 5-slojni CLT panel, L = B = 4,5 m	24/24/24/24/24
P5-350-H1 P5-400-H1 P5-450-H1	Četvrtasti 5-slojni CLT panel, L = B = 3,5 m, s jednim slojem C16 Četvrtasti 5-slojni CLT panel, L = B = 4,0 m, s jednim slojem C16 Četvrtasti 5-slojni CLT panel, L = B = 4,5 m, s jednim slojem C16	24/24/16/24/24
P5-350-H3 P5-400-H3 P5-450-H3	Četvrtasti 5-slojni CLT panel, L = B = 3,5 m, s tri sloja C16 Četvrtasti 5-slojni CLT panel, L = B = 4,0 m, s tri sloja C16 Četvrtasti 5-slojni CLT panel, L = B = 4,5 m, s tri sloja C16	24/16/16/16/24
G5-350 O5-350	Standardni 5-slojni CLT panel s rubnim otvorom, L = 3,5 m, B = 6,5 m Standardni 5-slojni CLT panel sa središnjim otvorom, L = 3,5 m, B = 6,5 m	24/24/24/24/24
G5-350-H3 O5-350-H3	5-slojni CLT panel s rubnim otvorom i tri sloja C16, L = 3,5 m, B = 7,5 m 5-slojni CLT panel sa središnjim otvorom i tri sloja C16, L = 3,5 m, B = 7,5 m	24/16/16/16/24
P7-500 P7-550 P7-600	Standardni četvrtasti 7-slojni CLT panel, L = B = 5,0 m Standardni četvrtasti 7-slojni CLT panel, L = B = 5,5 m Standardni četvrtasti 7-slojni CLT panel, L = B = 6,0 m	24/24/24/24/24/24/24
P7-500-H3 P7-550-H3 P7-600-H3	Četvrtasti 7-slojni CLT panel, L = B = 5,0 m, s tri sloja C16 Četvrtasti 7-slojni CLT panel, L = B = 5,5 m, s tri sloja C16 Četvrtasti 7-slojni CLT panel, L = B = 6,0 m, s tri sloja C16	24/24/24/16/16/16/24/24



Slika 7. Izgled složenog CLT panela koji se razmatra u studiji

Analiza CLT panela s tri i pet slojeva provedena je na temelju  $\gamma$ -metode, a za CLT panele sa sedam slojeva na temelju proširene verzije gama-metode. Složeni oblici CLT panela (G5 i O5) numerički se analiziraju primjenom modela koji se temelji na FLWT-u. To je omogućilo raspodjelu naprezanja za obje vrste slojeva – longitudinalne i transverzalne – što nije bio slučaj kod analitičkih postupaka. Numeričko rješenje primjenjuje se iz dva razloga:

- nemogućnost da analitičke metode objasne dvosmjerni kapacitet CLT panela da nosi opterećenje
- nemogućnost analitičkih metoda da uzmu u obzir geometriju složenih ploča.

U modelu konačnog elementa rubni uvjeti određuju se u rubnim čvorovima:  $U' = W' = 0$  za rubove koji se poklapaju s  $L$ , te  $V' = W' = 0$  za rubove koji se poklapaju s  $B$ . Koristi se veličina elementa koja iznosi 0.25m, što za posljedicu ima 316 elemenata u slučaju G5 i 372 elementa u slučaju O5. Koriste se Q8 elementi smanjene integracije. Lamelle se modeliraju kao jedinstveni numerički sloj te se primjenjuje linearna raspodjela pomaka duž lamela. Tablica 3. prikazuje karakteristične i projektne čvrstoće za drvo razreda C24 i C16.

Računanjem konačne deformacije u središnjem dijelu CLT panela uzeo se u obzir rok uporabivosti. Primijenjen je djelomični faktor

sigurnosti za svojstvo materijala  $\gamma_m = 1,25$  te faktor modifikacije  $k_{mod} = 0,8$  kojim se uzima u obzir utjecaj trajanja opterećenja te razred uporabivosti.

**Tablica 3. Projektne i karakteristične vrijednosti čvrstoće [N/mm<sup>2</sup>] za drvo razreda C24 i C16**

Čvrstoća	C16	C24
$f_{m,k}$	16,00	24,00
$f_{m,d}$	10,24	15,36
$f_{VR,k}$	0,80	1,10
$f_{VR,d}$	0,512	0,70

## 4.1. Rezultati i diskusija

### 4.1.1. Četvrtasti paneli

Tablica 4. prikazuje rezultate normalnih i posmičnih naprezanja kao i deformacija analiziranih četvrtastih CLT ploča koji su dobiveni primjenom g-metode te EG metode. Prikazane su sljedeće vrijednosti: normalno naprezanje na sredini opsega, u vanjskim slojevima, krajnje opterećenje ( $\sigma_{m,d}$ ), posmično naprezanje iznad oslonca u središtu gravitacije poprečnog presjeka, krajnje opterećenje ( $\tau_{R,d}$ ) te krajnja deformacija u sredini opsega ( $w_{fin}$ ).

Relativne razlike (izražene u %) u vrijednostima naprezanja i deformacije prikazane su u tablici 4., a dobivene su se usporedbom hibridnih i standardnih panela. Primijenjen

je sljedeći odnos cijene za drvo razreda C24 (PC24) i C16 (PC24) : PC16/PC24 = 0,785, a predstavlja trenutni trend na srednjoeuropskom tržištu. Prema tome, u tablici 4. prikazano je smanjenje cijene za sirovi materijal drva koji se koristi u hibridnim panelima.

Kao prvo, a očito je iz tablice 4. da vrijednosti normalnog i posmičnog naprezanja ne prelaze 50 % projektne čvrstoće za sve analizirane panele (prikazane u tablici 3.), pa stoga granično stanje nije važan čimbenik u projektiranju. Najveća deformacija manja je nego dopuštena deformacija  $w_d$  (L/300) za gotovo sve panele. Kao što je i očekivano, postižu se niže vrijednosti naprezanja i veće vrijednosti deformacije u slučaju standardnih CLT panela. Ipak, postotak odstupanja varira od zanemarivih do manjih vrijednosti. Nakon svega navedenoga slijedi detaljnija analiza za različite vrste panela.

**Troslojni paneli (P3):** Povećanje naprezanja i deformacije u upotrebi hibridnih modela varira od 0,04 % to 0,28 % (tablica 4.) što se može smatrati zanemarivim. Trošak drva koje se upotrebljava u proizvodnji CLT panela smanjuje se za približno 7,76 %. Izračunan je omjer iskoristivosti panela P3-300 u odnosu na granične vrijednosti:

$$P3-300: \quad \sigma_{m,d} / f_{m,d,C24} = 41.24 \% , \tau_{R,d} / f_{VR,d,C24} = 26.71 \% , \\ w_{fin} / w_d = 121.30 \%$$

$$P3-300-H1: \quad \sigma_{m,d} / f_{m,d,C24} = 41.25 \% , \tau_{R,d} / f_{VR,d,C24} = 36.52 \% , \\ w_{fin} / w_d = 121.30 \%$$

**Tablica 4. Rezultati naprezanja i deformacije za standardne i hibridne četvrtaste CLT panele s relativnim razlikama (izraženim u %) te vrijednostima smanjenja cijena**

Oznaka panela	$\sigma_{m,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{R,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$w_{fin}$ [mm]	Smanjenje cijene [%]
P3-200 P3-200-H1	2,946 2,947 (0,05 %)	0,140 0,141 (0,28 %)	2,760 2,761 (0,04 %)	-7,76
P3-250 P3-250-H1	4,472 4,474 (0,04 %)	0,164 0,164 (0,06 %)	6,164 6,167 (0,04 %)	-7,76
P3-300 P3-300-H1	6,334 6,336 (0,04 %)	0,187 0,187 (0,04 %)	12,13 12,13 (0,04 %)	-7,76
P5-350 P5-350-H1 P5-350-H3	3,673 3,685 (0,30 %) 3,693 (0,54 %)	0,119 0,119 (0,17 %) 0,119 (0,50 %)	5,693 5,711 (0,30 %) 5,724 (0,54 %)	-4,49 -14,81
P5-400 P5-400-H1 P5-400-H3	4,822 4,833 (0,23 %) 4,838 (0,33 %)	0,133 0,134 (0,90 %) 0,135 (1,26 %)	9,574 9,591 (0,18 %) 9,608 (0,35 %)	-4,49 -14,81
P5-450 P5-450-H1 P5-450-H3	6,028 6,061 (0,55 %) 6,066 (0,63 %)	0,146 0,147 (0,82 %) 0,148 (1,62 %)	14,94 15,03 (0,55 %) 15,04 (0,62 %)	-4,49 -14,81
P7-500 P7-500-H3	4,214 4,275 (1,43 %)	0,127 0,130 (2,16 %)	9,428 9,643 (2,22 %)	-10,15
P7-550 P7-550-H3	5,087 5,158 (1,37 %)	0,138 0,141 (2,06 %)	13,60 13,88 (2,05 %)	-10,15
P7-600 P7-600-H3	6,043 6,124 (1,32 %)	0,148 0,151 (1,92 %)	19,04 19,42 (1,99 %)	-10,15



Tablica 5. Rezultati naprezanja i deformacije za standardne i hibridne CLT panele složenog oblika s relativnim razlikama (izraženim u %) te vrijednostima smanjenja cijena

Oznaka panela	$\sigma_{m,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{R,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$w_{fin}$ [mm]	Smanjenje cijene [%]
G5-350 G5-350-H3	5,50 5,82 (5,50 %)	0,20 0,18 (-10,00 %)	5,92 6,25 (5,28 %)	-14,81
O5-350 O5-350-H3	12,74 12,82 (0,62 %)	0,45 0,39 (-13,33 %)	18,26 19,25 (5,14 %)	-14,81

Najveća iskoristivost postigla se u slučaju deformacije, što iznosi 21 % iznad granične vrijednosti, a to pokazuje da opseg  $L = 3,0$  m predstavlja granicu za troslojnu ploču ( $h = 9$  cm) u slučaju navedenog opterećenja. Povećanje stupnja iskoristivosti u slučaju deformacije u primjeni modela s hibridnom pločom bilo je zanemarivo. Značajnije povećanje stupnja iskoristivosti pojavljuje se u slučaju posmičnih naprezanja (9,81 %).

**Petoslojni paneli (P5):** Izračunan je omjer iskoristivosti panela P5-450 u odnosu na granične vrijednosti. Opet, valjani kriterij za te panele stupanj je deformacije s očitim stupnjem iskoristivosti koja iznosi 100 %. Postignute su sljedeće vrijednosti i omjeri iskoristivosti:

P5-450:  $\sigma_{m,d} / f_{m,d,C24} = 39.24 \%$ ,  $\tau_{R,d} / f_{VR,d,C24} = 20.86 \%$ ,  
 $w_{fin} / w_d = 99.60 \%$

P5-450-H1:  $\sigma_{m,d} / f_{m,d,C24} = 39.46 \%$ ,  $\tau_{R,d} / f_{VR,d,C16} = 28.72 \%$ ,  
 $w_{fin} / w_d = 100.20 \%$

P5-450-H3:  $\sigma_{m,d} / f_{m,d,C24} = 39.49 \%$ ,  $\tau_{R,d} / f_{VR,d,C16} = 28.91 \%$ ,  
 $w_{fin} / w_d = 100.27 \%$ .

U slučaju panela P5-450-H1 (vidi tablicu 2. za detalje), promjena naprezanja koje vodi do deformacije varira od 0,17 % do 0,90 %, a smanjenje cijene iznosi približno 4,50 % što nije zanemarivo. U slučaju panela P5-450-H3, promjena naprezanja koje vodi do deformacije varira od 0,35 % do 1,62 %, a smanjenje cijene iznosi približno 15 % što je značajna ušteda. Analiza je pokazala da je opseg  $L = 4,5$  m granična vrijednost za petoslojnu ploču ( $h$

= 15 cm) u slučaju navedenog opterećenja. Očito da nisu važna normalna i posmična naprezanja čiji je stupanj iskoristivosti ispod 40 %.

**Sedmoslojni paneli (P7):** Povećanje naprezanja koje vodi do deformacije varira od 1,32 % to 2,22 % (tablica 4.), a smanjenje cijene iznosi 10 %. U slučaju opsega  $L = 6,0$  m, stupanj iskoristivosti koja vodi do deformacije poprilično je visok (između 95 i 97 %). Primjenom hibridnih panela ne povećava se značajno krajnja deformacija. Postignute su sljedeće vrijednosti omjera iskoristivosti:

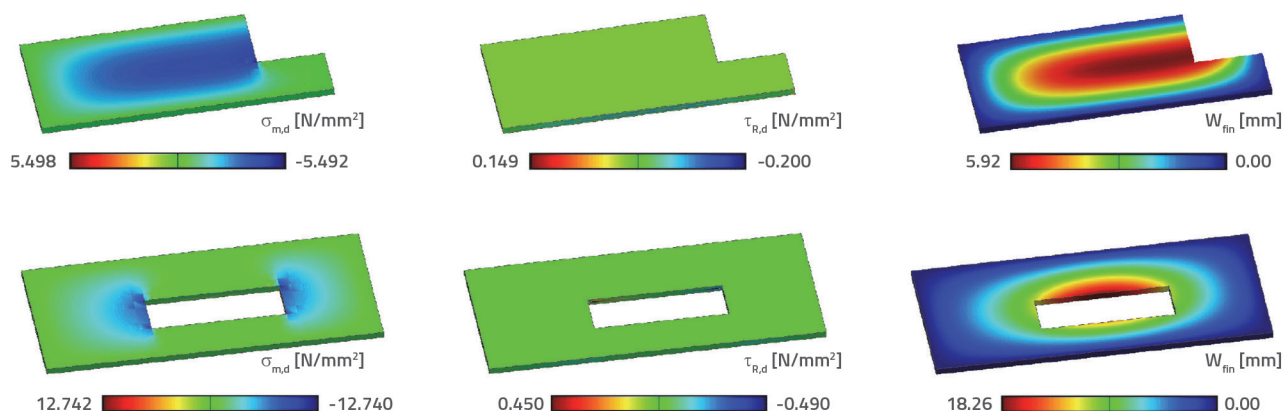
P7-600:  $\sigma_{m,d} / f_{m,d,C24} = 39,34 \%$ ,  $\tau_{R,d} / f_{VR,d,C24} = 21,20 \%$ ,  
 $w_{fin} / w_d = 95,18 \%$ ,

P7-600-H3:  $\sigma_{m,d} / f_{m,d,C24} = 39,87 \%$ ,  $\tau_{R,d} / f_{VR,d,C16} = 29,55 \%$ ,  
 $w_{fin} / w_d = 97,12 \%$ .

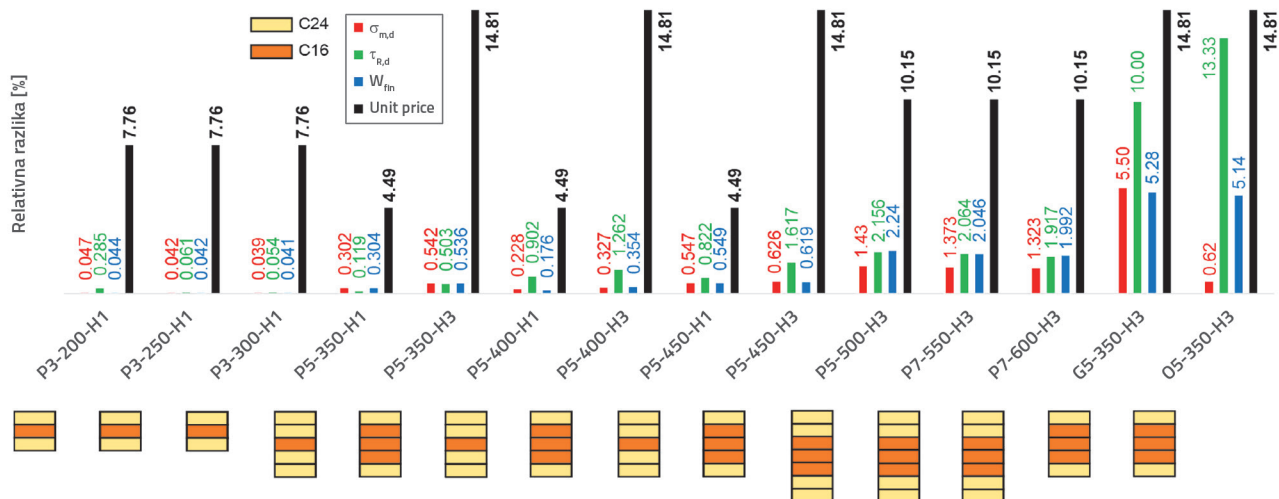
Opet, nisu važna normalna i posmična naprezanja čiji je stupanj iskoristivosti ispod 40 %.

#### 4.1.2. Paneli složenog oblika

Nasuprot analizi četvrtastih panela, kad se uzmu u obzir CLT paneli s otvorima, ključni čimbenik u projektiranju su naprezanje i deformacija. Koncentracija naprezanja javlja se zbog prisutnosti otvora zbog čega kriterij naprezanja može biti ograničavajući čimbenik u projektiranju panela. Slika 8. prikazuje raspodjelu naprezanja i deformacije u panelima G5-350 i O5-350 (tablica 2.), odnosno prikazuje pojavu koncentracije naprezanja oko otvora.



Slika 8. Raspodjela naprezanja i deformacije u standardnim CLT panelima složenog oblika G5-350 (gornji red) i O5-350 (donji red) koji su dobiveni u programu FLWTFEM



Slika 9. Relativne razlike u normalnim naprezanjima ( $\sigma_{m,d}$ ), posmičnim naprezanjima ( $\tau_{R,d}$ ), krajnja deformacija ( $w_{fin}$ ) te jedinična cijena za hibridne CLT panele uzimajući u obzir različiti broj/orijentaciju slojeva i opsega

Očito da je deformacija glavni čimbenik u projektiranju G5 panela (s rubnim otvorima). Omjer iskoristivosti  $w_{fin}/w_d = 53,57\%$  veći je u usporedbi s  $\sigma_{m,d}/f_{m,d} = 37,89\%$  i  $\tau_{R,d}/f_{VR,d} = 35,16\%$ . Međutim, glavni je čimbenik u projektiranju O5 panela (sa središnjim otvorom) kriterij naprezanja ( $\sigma_{m,d}/f_{m,d} = 83,46\%$ ). Obje vrste CLT panela pokazuju da je relativni trošak sirovog drva koje se upotrebljava u proizvodnji CLT-a niži za 15 % kada se koriste hibridni paneli, što pokazuje da je navedeni koncept opravdan. Slika 9. pokazuje relativne razlike u normalnim i posmičnim naprezanjima, krajnju deformaciju i jediničnu cijenu za sve navedene CLT panele. Očigledno da je relativna ušteda troška sirovog drva koje se upotrebljava u proizvodnji CLT panela (crni stupovi na slici 9.) veća nego razlika u naprezanjima i deformaciji koja je izražena u postocima (stupovi u boji na slici 9.) što potvrđuje potencijal prikazanog pristupa.

## 5. Zaključak

Rad se bavi pristupom projektiranja isplativih hibridnih CLT panela opterećenih na savijanje, a koji se sastoje od slojeva drva različite kvalitete i to primjenom postojećih analitičkih postupaka te neispitanih postupaka konačnog elementa. Daje se kratak pregled analitičkih postupaka, kao i opisa numeričkog modela koji se temelji na CLT panelima koji su implementirani u originalni računalni kod FLWTFEM. Provedena je parametrijska studija kako bi se usporedila stanja naprezanja koja vode do deformacije u slučaju odabranih standardnih i hibridnih CLT panela, a s ciljem da se procijene mogućnosti, prednosti i nedostaci provedbe izloženog koncepta. Referentna točka tehnoekonomske studije uključivala je 25 CLT panela (11 standardnih i 14 hibridnih) i to sa 3, 5 i 7 slojeva, uzimajući u obzir različite opsege, geometrije i rubne uvjete. Navedenom analizom dobiveni su sljedeći zaključci:

- Koncept po kojem se niži razred drva primjenjuje u središnjem području CLT panela opterećenih na savijanje ima vidljiv ekonomski potencijal koji bi se trebao uzeti u obzir tijekom projektiranja i proizvodnje CLT panela. Štoviše, upotreba hibridnih panela vodi prema većoj upotrebi drva niže čvrstoće, a to nosi ozbiljne dobrobiti u financijskom, logističkom i okolišnom smislu.
- U slučaju CLT panela koja imaju dva usporedna ruba, a koji su jednostavno poduprti, povećanje naprezanja ne prelazi 2,2 % kada se primjenjuje niži razred drva u središnjim slojevima, dok isplativost sirovog materijala u proizvodnji varira od 4,5 % do čak 14,8 %.
- Kao što je i očekivano, glavni je kriterij u projektiranju svih analiziranih pravokutnih CLT panela krajnja deformacija. Postotak uporabe deformacije (savijanja) u slučaju hibridnih CLT panela ne prelazi 2,0 %, a mogu se postići nezanemarive financijske uštede u proizvodnji CLT panela (i to oko 4,5 % do 14,8 %).
- Zbog pojave koncentracije naprezanja oko otvora, glavni bi čimbenik u projektiranju CLT panela s otvorima moglo biti naprezanje ili kriteriji deformacije. To zahtijeva primjenu poboljšanih numeričkih metoda u projektiranju panela složenih oblika s ciljem da se predvidi stanje složenog naprezanja u izrezanim područjima.

Naposlijetku, primjena oslonca uzduž svih rubova CLT panela vodi do bolje iskoristivosti svojstava CLT-a zato što se aktivira mehanizam dvosmjernog opterećenja.

## Zahvala

Ministarstvo prosvjete, znanosti i tehnološkog razvoja Republike Srbije financira rad kroz projekt 200092.

## LITERATURA

- [1] Muszynski, L., Hansen, E., Fernando, S., Schwarzmann, G., Rainer, J.: Insights into the Global Cross-Laminated Timber Industry, *BioProduct Business*, 2 (2017) 8, pp. 77-92.
- [2] Malo, K.A., Abrahamsen, R.B., Bjertnaes, M.A.: Some structural design issues of the 14-storey timber framed building "Treet" in Norway. *Eur J Wood Wood Prod*, 74 (2016) 3, pp. 407-424.
- [3] Cvetković, R., Stojić, D., Krasić, S., Marković, N.: Innovative structural CLT system in projecting and building of student houses, *Facta Universitatis – series Architecture and Civil Engineering*, 13 (2015) 1, pp. 57-64.
- [4] Jeleč, M., Varevac, D., Rajčić, V.: Cross-laminated timber (CLT) – a state of the art report, *Građevinar*, 70 (2018) 2, pp. 75-95, <https://doi.org/10.14256/JCE.2071.2017>
- [5] European Committee of Standardization (CEN). EN 16351: timber structures – Cross Laminated Timber –requirements, Bruxelles, Belgium, 2015.
- [6] European Committee of Standardization (CEN). EN 1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, Bruxelles, Belgium, 2004.
- [7] Flores, E.I.S., et al.: Analysis of cross-laminated timber by computational homogenization and experimental validation. *Compos Struct*, 121 (2015), pp. 386-394.
- [8] California Assessment of Wood Business Innovation Opportunities and Markets: Phase 2 Report, The Beck Group, 2015.
- [9] Toosi, B.: Cross Laminated Timber - The Market Opportunities in North America, 2011.
- [10] Wang, Z., Gong, M., Chui, Y.H.: Mechanical properties of laminated strand lumber and hybrid cross-laminated Timber, *Constr Build Mater*, 101 (2015), pp. 622-627.
- [11] Niederwestberg, J., Chui, Y.H., Gong, M.: Influence of layer and laminated characteristics on shear properties of cross laminated timber and hybrids, *World Conference on Timber Engineering WCTE 2016*, Vienna, Austria, 2016.
- [12] MahdaviFar, V.: Hybrid CLT panels for sustainable building solutions. *Conference OSU – Graduate Research Exposition*, Portland, USA, 2014.
- [13] Loss, C., Piazza, M., Zandonini, R.: Experimental Tests of Cross-Laminated Timber Floors to be used in Timber-Steel Hybrid Structures. *World Conference on Timber Engineering WCTE 2014*, Quebec City, Canada, 2014.
- [14] Blass, H.J., Fellmoser, P.: Design of solid wood panels with cross layers, *World Conference on Timber Engineering WCTE 2004*, Lahti, Finland, 2004.
- [15] Kreuzinger, H.: Platten, Scheiben und Schalen – ein Berechnungsmodell für gängige Statikprogramme, *Bauen mit Holz*, 1 (1999) 34.
- [16] Popovski, M., Gagnon, S.: Analytical Procedures for Determining Stiffness of CLT Elements in Bending, *Wood Design Focus*, 22 (2012) 2.
- [17] Jacquier, N.: Development and Evaluation of Mechanical Joints for Composite Floor Elements with Cross Laminated Timber, *Doctoral Thesis*, Lulea University of Technology, Sweden, 2015.
- [18] Walner-Novak, M., Koppelhuber, J., Pock, K.: Cross-Laminated Timber Structural Design, *ProHolz*, Austria, 2014.
- [19] Reddy, J.N.: *Mechanics of laminated composite plates and shells: Theory and analysis*, 2<sup>nd</sup> edition, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2003.
- [20] Marjanović, M., Meschke, G., Damjanović, E.: Object-oriented framework for 3D bending and free vibration analysis of multilayer plates: Application to cross-laminated timber and soft-core sandwich panels, *Compos Struct*, 255 (2021), pp. 112859.
- [21] <https://github.com/miregrf/FLWTFEM>.
- [22] Marjanović, M., Marković, N., Damjanović, E., Cvetković, R.: Three-dimensional stress analysis and design of cross-laminated timber panels using full-layerwise-theory-based finite element method, *Thin-Walled Struct*, 157 (2020), pp. 107-156.
- [23] Damjanović, E., Marjanović, M.: Three-dimensional stress analysis of laminated composite plates using FLWT-based finite elements, *7<sup>th</sup> International Congress of Serbian Society of Mechanics*, Sremski Karlovci, Serbia, 2019.
- [24] DIN 1052:2004: Design of timber structures – General rules and rules for buildings, *Beuth Verlag*, Berlin, Germany, 2004.
- [25] European Committee of Standardization (CEN). EN 338: Structural Timber – strength classes. Bruxelles, Belgium, 2009.
- [26] European Committee of Standardization (CEN). EN 1991-1-1: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings, Bruxelles, Belgium, 2004.