

ANALIZA DISTRIBUCIJE NAPONA KOD SAVIJANJA U SLOJEVIMA DRVETA PRIMJENOM NUMERIČKE SIMULACIJE

ANALYSIS OF STRESS DISTRIBUTION DURING BENDING IN WOOD LAYERS USING NUMERICAL SIMULATION

Mr. Nedim Hurem
HARA doo (PhD student)
Gračanica bb
Visoko
Bosna i Hercegovina

Dr. sc. Amra Talić-Čikmiš
Mašinski fakultet
Univerzitet u Zenici
Zenica
Bosna i Hercegovina

Dr. sc. Aida Imamović
Metalurško-tehnološki
fakultet
Univerzitet u Zenici
Zenica
Bosna i Hercegovina

REZIME

U radu je prikazana primjena analize ponašanja pri savijanju grede od drveta primjenom numeričke simulacije s komercijalnim softverom Abaqus

Numerička analiza služi za interpretaciju i verifikaciju eksperimentalnih rezultata i boljem razumijevanju mehaničkog ponašanja grede. Model dobiven u numeričkoj simulaciji savijanja grede se jednostavno može prilagoditi različitim geometrijama i svojstvima materijala, te stoga predstavlja koristan alat za optimizaciju dizajna grede. Usporedba vrijednosti za maksimalno opterećenje je pokazatelj odstupanja i validnosti rezultata dobivenih eksperimentalnom i numeričkom putem¹

Keywords: Simulia Abaqus, metoda konačnih elemenata, numerički model

ABSTRACT

The paper presents the application of the analysis of bending behavior of different types of wood using numerical simulation with the commercial software Abaqus

Numerical analysis serves for the interpretation and verification of experimental results and a better understanding of the mechanical behavior of the beam. The model obtained in numerical simulation of beam bending can easily be adapted to different geometries and material properties, and therefore represented a useful tool for beam design optimization. The comparison of the values for the maximum load is an indicator of the deviation and validity of the results obtained experimentally and numerically.

Keywords: Simulia Abaqus, finite element method, numerical model

1. UVOD

Kako je drvo organski materijal, koji nastaje prirodnim biološkim procesom, moguće su različite nepravilnosti (greške) koje manje ili više utiču na mogućnost njegove upotrebe u konstrukcijama. Razlikuju se nastale promjene strukture, koje se već formiraju kod živog drveta u toku rasta, i promjene koje su posljedice fizičkih, mehaničkih i hemijskih uticaja koji mogu da se jave u toku rasta ili u toku obrade i upotrebe. Takođe, postoje i greške koje nisu posljedica svojstava drveta, već greške mašina, odnosno čovjeka, koje nastaju pri obradi drveta.

Laboratorijskim ispitivanjima [1] je konstatovano da pri zakošenju vlakana 1:8 od čvrstoće na savijanje ostaje svega oko 53%, a za zakošenje 1:15 oko 76%. Stoprocentna čvrstoća drveta na savijanje ostaje ako je zakošenost vlakana 1:20. Ili, na primjer, čvrstoća na pritisak pri zakošenosti vlakana 1:15 ostaje 100%, a za zakošenost vlakana 1:6 ostaje nešto oko 56%. U slučaju napreznja na zatezanje, zakošenost vlakana vodi ka zatezanju upravno na vlakana, što je najslabiji pravac napreznja drveta.

Drvo je izrazito anizotropan materijal, tj. njegove fizičke i mehaničke karakteristike zavise od pravca. Kod oblog drveta, bez kore, sa pravilnom konturom presjeka i pravilnim rasporedom elemenata mikrostrukture, jasno je izražena cilindrična anizotropija. Glavni pravci anizotropije su longitudinalni (L), paralelno sa vlaknima, tangencijalni (T), u pravcu tangente na godove i upravno na vlakna, i radijalni (R), u pravcu poluprečnika godova i upravno na vlakna. Mehaničke karakteristike se određuju prema standardno definisanoj proceduri, na malim „čistim“ uzorcima drveta određene vlažnosti (obično 12%). U tabeli 1 dat je prikaz vrijednosti čvrstoća na zatezanje (f_t), pritisak (f_c) i smicanje (f_v) različitih vrsta drveta datih u literaturi.

Čvrstoća drveta na zatezanje u pravcu vlakana je 20-50 puta veća od čvrstoće na zatezanje upravno na vlakna, dok je čvrstoća na pritisak u pravcu vlakana 5-10 puta veća od čvrstoće upravno na vlakna. Čvrstoća na smicanje upravno na vlakna je približno istog reda veličine kao čvrstoća na zatezanje upravno na vlakna.


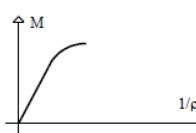
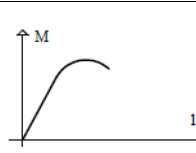
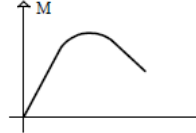
Tabela 1 Mehaničke karakteristike različitih vrsta drva[2]

Vrsta	$f_{t,90}$ [MPa]	$f_{t,0}$ [MPa]	$f_{c,90}$ [MPa]	$f_{c,0}$ [MPa]	F_v [MPa]
Smreka	3	90	6	30	7
Bor	4	10	4	30	10
Ariš	2	100	8	35	9
Bukva	7	140	9	40	11
Hrast	4	90	8	40	11

Kada se drvo ispituje do loma aksijalnim zatezanjem, veza napon-dilatacija je prilično linearna da graničnog opterećanja, a lom je krt. Pri aksijalnom pritisku, drvo je znatno duktilniji materijal, sa linearnom vezom napon-dilatacija do granice proporcionalnosti, poslije čega slijedi plastično tečenje do dostizanja granične dilatacije.

Varijabilnosti materijala, nelinearno ponašanje pri pritisku i prisustvo defekata onemogućavaju da se ponašanje drveta na savijanje odrediti direktno na osnovu ispitivanja na zatezanje i pritisak. Stoga, važeći standardi razmatraju čvrstoću na savijanje kao nezavisnu karakteristiku. U tabeli 2. objašnjeni su glavni oblici loma drveta pri čistom savijanju u zavisnosti od odnosa čvrstoća na zatezanje i pritisak u pravcu vlakana ($\eta = f_t/f_c$). U tehničkoj praksi, dati oblici loma imaju različitu vjerovatnoću događanja.

Tabela 2. Glavni oblici loma drveta pri čistom savijanju [3]

	Opis loma	Uslov	Dijagram moment-krivina
1	Krt lom u zategnutoj zoni sa linearnom vezom između momenta savijanja I krivine do loma.	$k \geq l$	
2	Lom u zategnutoj zoni praćen plastifikacijom pritisnute zone I spuštanjem neutralne ose. Veza moment-krivina se razlikuje od linearnog trenda.	k, l	
3	Lom u zategnutoj zoni sa velikom duktilnošću usljed plastifikacije poprečnog presjeka. Dijagram moment-krivina pokazuje mali opadajući trend.	$kA1$	
4	Lom u pritisnutoj zoni sa velikom duktilnošću usljed znatne plastifikacije poprečnog presjeka. Dijagram moment-krivina pokazuje evidentni opadajući trend.	$kAA1$	

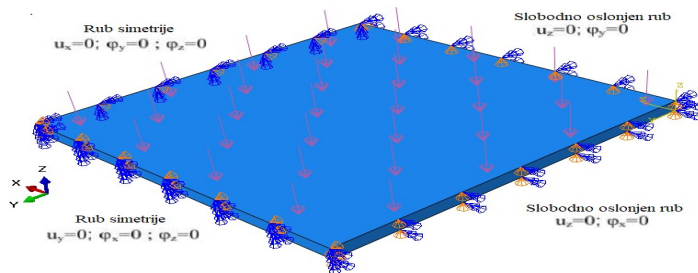
2. NUMERIČKO MODELIRANJE

Glavni cilj numeričkog modeliranja odgovarajućih postupaka tretiranja drva je usporedba rezultata numeričke analize i rezultata dobivenih eksperimentalnim ispitivanjem [6]. Numerička analiza provedena je metodom konačnih elemenata (MKE) s komercijalnim softverom Abaqus. Ovaj program omogućuje trodimenzionalnu nelinearnu analizu elemenata izrađenih od ortotropnih materijala, kao i analizu rješenja stalnih problema.

Svi elementi sistema modelirani su "čvrstim" konačnim elementima (C3D8) – prostornim 3D konačnim elementima s 8 čvorova. Ovi elementi u svakom čvoru imaju 6 stupnjeva slobode, tri pomaka i tri rotacije. Progib u središtu nosača i reakcija oslonca bilježe se za svaki korak kako bi se nacrtao dijagram opterećenje-progib, koji najbolje opisuje ponašanje nosača. Usled simetrije u geometriji, opterećenju i graničnim uslovima, modelirna je samo 1/4 nosača (slika 1), dok su uklonjeni dijelovi zamjenjeni sa ograničenjima odgovarajućih pomjeranja i obrtanja. U poprečnoj ravni simetrije, postavljeni su granični uslovi tako da je ograničeno pomjeranje u podužnom pravcu i obrtanje oko horizontalne i vertikalne ose ($u_x \neq 0, u_y \neq 0, u_z = 0, \varphi_x = 0, \varphi_y = 0, \varphi_z \neq 0$). Slično, u podužnoj ravni simetrije ograničeno je pomjeranje u pravcu poprečne horizontalne ose i obrtanje oko podužne ose i poprečne vertikalne ose ($u_x = 0, u_y \neq 0, u_z \neq 0, \varphi_x \neq 0, \varphi_y = 0, \varphi_z = 0$). Oslonac na kraju nosača je modeliran kao valjkasti oslonac sprječavajući pomjeranje nosača u vertikalnom pravcu.

Pomjeranje nosača u podužnom pravcu je dopušteno, kao što je to dopušteno u toku eksperimentalnog ispitivanja.

Prema rezultatima eksperimentalnog ispitivanja, kriterij loma temelje se na stanju maksimalnog naprezanja, odnosno kada naprezanje na zatezanje u uzdužnom smjeru, u određenom koraku kretanja, dosegne graničnu vrijednost.



Slika 1. Rubni uvjeti i opterećenja 3D modela ploče

2.1. Karakteristike materijala

Definisati odgovarajući model za materijal je ključno za postizanje tačnog predviđanja mehaničkih karakteristika nosača. Kod neojačanih nosača od lepljenog lameliranog drveta, lom se obično događa u zategnutoj zoni, prije nego što se ikakva plastifikacija javi u pritisnutoj zoni, tako da je linearno-elastični model sasvim odgovarajući. Međutim, ovo nije slučaj za ojačane nosače gde se, zavisno od položaja i procenta ojačanja, može javiti značajna plastifikacija. Linearno-elastičan idealno-plastičan model materijala je upotrebljen za ponašanje drveta pri pritisku, dok je linearno-elastičan (krt) model upotrebljen za drvo izloženo zatezanju.

Teorija anizotropne plastičnosti je primjenjena u modelu kako bi se obuhvatilo plastično ponašanje drveta u tri gornje lamele u pritisnutoj zoni. Teorija obuhvata bilinearno ponašanje za drvo u tri ortogonalna pravca, kao i u tri smičuće ravni. Kao uslov za prelazak materijala u plastičnu oblast korišćen je Hill-ov kriterijum [80]. Ovaj kriterijum je generalizovana verzija Mises-ovog uslova plastičnog tečenja, kojom se uzima u obzir anizotropija u čvrstoći materijala. Hill-ova funkcija potencijala se može izraziti preko komponentalnih napona kao:

$$f(\sigma) = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2} \quad \dots(1)$$

gdje su F, G, H, L, M i N konstante koje se računaju na osnovu karakteristika čvrstoće materijala za različite pravce.

Karakteristike materijala korišćene u numeričkim modelima određene su na osnovu eksperimentalnog ispitivanja materijala [4] i na osnovu dobro utvrđenih relacija i objavljenih podataka u literaturi. Usvojeno je da su karakteristike materijala nezavisne od brzine nanošenja opterećenja. Prisustvo kvrga i drugih imperfekcija u drvetu nije uzeto u obzir. Efekti okruženja, kao što su vlažnost i temperatura, na ponašanje drveta, takođe, nisu razmatrani.

Drvo je razmatrano kao ortotropni materijali, prema tome ima nezavisne mehaničke karakteristike u tri međusobno upravna pravca (tj. longitudinalni pravac, paralelno drvenim vlaknima, i dva pravca upravna na longitudinalni pravac). Dvanaest elastičnih konstanti (devet od njih su nezavisne) je potrebno da okarakteriše elastično ponašanje drveta. Ove konstante su tri modula elastičnosti (E_i), tri modula klizanja (G_{ij}) i šest Poisson-ovih koeficijenata (ν_{ij}). Modul elastičnosti (E_1) u pravcu drvenih vlakana je određen eksperimentalno. Ostali moduli: $E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23}$ su izračunati prema sljedećim relacijama datih od strane Bodig i Jayne -a [5].

Materijalne konstante korišćene u numeričkoj analizi su date u tabeli 3. Drvo pri zatezanju, pritisku i savijanju ima različit modul elastičnosti u pravcu i upravno na pravac vlakana. Ipak, razlike su male i iz praktičnih razloga usvojeno je da moduli elastičnosti drveta imaju iste vrijednosti nezavisno od vrste napreznja.

Table 3 Pregled karakteristika materijala korišćenih u MKE simulaciji

Wood	
<i>Moduli elastičnosti E [MPa]</i>	
E_1	11080
E_2	886
E_3	554
<i>Poisson-ovi koeficijenti ν [-]</i>	
ν_1	0.37
ν_2	0.42
ν_3	0.47
<i>Moduli klizanja [MPa]</i>	
G_{12}	791
G_{13}	744
G_{23}	79

Usvojeni naponi na granici tečenja neophodni za definisanje plastičnog ponašanja drveta prikazani su u tabeli 4. Vrijednosti su određene eksperimentalno ($\bar{\sigma}_{11}, \bar{\sigma}_{12}$) i na osnovu podataka dostupnih u literaturi. Za potrebe proračuna uzeto je da su čvrstoće u poprečnim pravcima (radijalnom i tangencijalnom) iste. Inače, čvrstoća u radijalnom pravcu je nešto veća, zbog povećane otpornost usljed prisustva brojnih sržnih zraka.

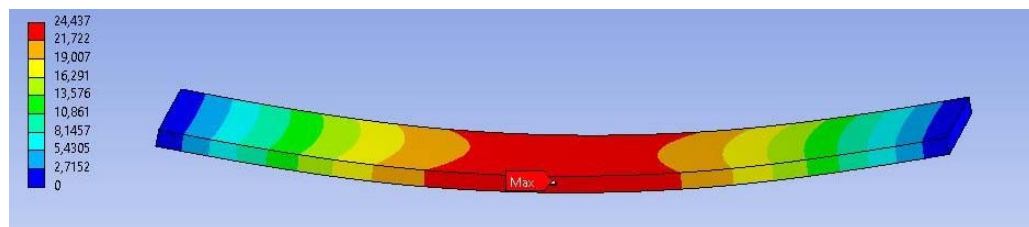
Table 4. Granice tečenja usvojene u numeričkoj analizi

Naponi tečenja (MPa)						
$\bar{\sigma}_{11}$	$\bar{\sigma}_{22}$	$\bar{\sigma}_{33}$	$\bar{\sigma}_{12}$	$\bar{\sigma}_{13}$	$\bar{\sigma}_{23}$	$\bar{\sigma}^0$
36.3	5.0	5.0	6.1	6.1	3.0	36.3

2.2. Rezultati numeričke analize

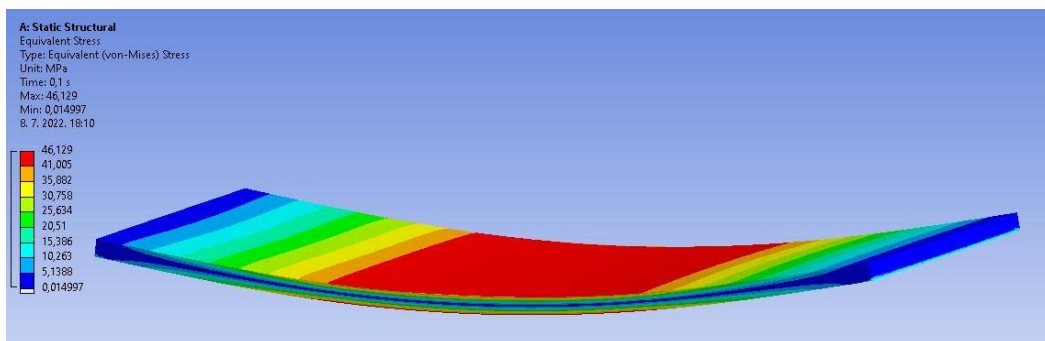
Numerička analiza, na prethodno opisanim modelima formiranih konačnim elementima, izvršena je za neojčan nosač od jedne vrste drveta. Modeli su inkrementalno opterećivani do dostizanja graničnog opterećenja.

Vrijednosti lomnog progiba određene numeričkim proračunom s prosječnim vrijednostima prikazana je na Slici 1.



Slika 1. Vrijednosti vertikalnog pomaka (mm) u MKE modelu

Slika 2. prikazuje raspodjelu naprežanja u drvu pri graničnom opterećenju. Uzdužni presjek u osi simetrije omogućuje jednostavno praćenje promjene napona duž nosača, kao i u poprečnim presjecima. Na temelju zadanih prikaza normalnih napona jasno se uočava područje maksimalnih napona.



Slika 2. Raspodjela naprezanja u slojevima na presjeku MKE modela

4. ZAKLJUČAK

Model dobiven i korišten u numeričkoj simulaciji savijanja grede može se lako prilagoditi različitim geometrijama i svojstvima materijala, te je stoga koristan alat za optimizaciju dizajna grede. Vrijednost maksimalne sile loma ovisi o gustoći drva i debljini ploče, s povećanjem obje vrijednosti raste i vrijednost sile loma.

Na osnovu analize modela i rezultata dobijenih ovom numeričkom analizom može se zaključiti da je metod konačnih elemenata dobar alat za predviđanje ponašanja kako neojačanih, tako i ojačanih drvenih nosača. Dati koncept modeliranja se dalje može iskoristiti za sprovođenje opsežne parametarske studije u cilju optimalnog dimenzionisanja greda, ali i u slučaju optimalnog izbora sistema ojačavanja, ali napraviti i kvalitetna analiza ponašanja grede pri savijanju za različite vrste drva.

5. REFERENCES

- [1] Gojković, M., Stojić, D.: Drvene konstrukcije, Građevinski fakultet u Beogradu, Beograd, 1996.
- [2] Gustafsson, P. J.: Chapter 7: Fracture perpendicular to grain – structural applications.” Timber engineering, S. Thelandersson and H. J. Larsen, eds., John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2003., pp.103-130.
- [3] CNR Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Timber structures, CNR-DT 201/2005, Rome, Italy.
- [4] Hurem, N., Hodžić, D., Hodžić, A.: Application of Comparative Experiment in Analysis of Wood Strength, International Conference of Applied Science ICAS 2020, 2020, Hunedoara, Romania
- [5] Bodig, J., Jayne, B. A.: Mechanics of wood and wood composites, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1989., USA.
- [6] Hurem, N., Hodžić, D.: Planiranje eksperimenta I matematički model čvrstoće na savijanje ploče od masivnog drveta, časopis Mašinstvo, ISSN 1512-5173, Vol. 17, No. 3-4, Juli-December 2020, pp. 93-102
- [7] Hurem, N., Talić-Čikmiš, A.; Imamović, A.: Experimental analysis of distribution of bending stresses in layers of wood with numerical verification, 11th. International Conference Mechanical Technologies and Structural Materials, MTSM 2022, Split, September 22nd-23rd, 2022., ISSN 1847-7917, pp 43-48