

Utjecaj varijacije kuta vlakanaca furnirske ploče na savojna svojstva sendvič-ploče

Influence of plywood grain direction on sandwich panel bending properties

Izvorni znanstveni rad • Original scientific paper

Prispjelo – received: 24. 2. 2009.

Prihvaćeno – accepted: 21. 5. 2009.

UDK: 630*832.282; 630*832.284

SAŽETAK • U radu je istraživana utjecaj varijacije kuta vlakanaca u furnirskoj ploči na savojna svojstva sendvič-ploče te na naprezanja u pojedinim slojevima. Eksperimentalne sendvič-ploče ($t_{nom} = 29$ mm) izrađene su od dvije troslojne furnirske ploče i krute PVC srednjice između njih. Kutovi vlakanaca vanjskih slojeva furnirskih ploča kretali su se u rasponu od 0 do 90° kontinuirano rastući po 15°. Ukupno je izrađeno sedam modela sendvič-ploča. Savojna svojstva sendvič ploče određena su metodom s tri uporišne točke, a naprezanja u njihovim pojedinim slojevima dobivena su uporabom računalnoga simulacijskog programa, tj. metodom konačnih elemenata. Simulacijski modeli kreirani su prema jednakim uvjetima opterećenja kao i pri empirijskom mjerenju savojnih svojstava eksperimentalne sendvič-ploče. Rezultati istraživanja pokazuju da varijacija kuta vlakanaca ima velik utjecaj na promjenu savojnih svojstava sendvič-ploče, kao i na veličinu naprezanja u pojedinim njezinim slojevima. Rezultati također upućuju na važnost analiziranja naprezanja u svakom sloju furnirske ploče, radi izbjegavanja koncentracije naprezanja u pojedinim slojevima, s ciljem optimizacije strukturne konstrukcije sendvič-ploče. Takve vrste analize naprezanja ne obuhvaćaju se standardiziranim empirijskim metodama određivanja savojnih svojstava sendvič-ploče.

Ključne riječi: sendvič-ploča, furnirska ploča, naprezanje, FEM, strukturna konstrukcija

ABSTRACT • This paper investigates the influence of plywood grain direction on bending properties of a sandwich panel, as well as on stress distribution in each layer. Experimental sandwich panels ($t_{nom} = 29$ mm) were made of two three-ply plywood panels and a rigid PVC core between them. Grain directions of plywood panels were between 0° and 90°, continuously raised by 15°. Seven models of sandwich panels were made. Bending properties of a sandwich panel was determined by three point bending method and stress in each layer was determined by using finite element method. Simulation models were developed with equal load conditions as applied during empirical measurement of bending properties of the sandwich panel. The research results show that grain direction has a great influence on bending properties of the sandwich panel, as well as on stress values in each layer. Results also indicate the importance of analyzing stress in each layer of plywood for the purpose of avoiding stress concentration in respective layers and for optimizing structural construction of the sandwich panel. Such stress analyses are not covered by standardized empirical methods for determining bending properties of sandwich panels.

Keywords: sandwich panel, veneer plywood, stress, FEM, structural construction

Autori su docent¹, izvanredni profesor² i asistent³ na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska.

The authors are assistant professor¹, associate professor² and assistant³ at the Faculty of Forestry, University of Zagreb, Croatia.

1. UVOD

1 INTRODUCTION

U prethodnom istraživanju istih autora analizirana su naprezanja i strukturna konstrukcija sendvič-ploče izrađene od dvije troslojne furnirske ploče i PVC krute srednjice. Pri tome je provedena analiza utjecaja debljinskog udjela pojedinih furnira u furnirskoj ploči na veličinu naprezanja i deformacija u svim slojevima sendvič-ploče. Rezultati su pokazali velik utjecaj debljine furnira na distribuciju naprezanja u sendvič-ploči (Kljak i Brezović, 2007). Također se pokazalo da je standardna konstrukcija furnirske ploče s tri furnira jednake debljine optimalan izbor ako se želi dobiti sendvič-ploča ujednačenih svojstava u smjeru njezine dužine i širine. Takav se zaključak ne bi mogao izvesti samo na temelju poznavanja svojstava troslojne furnirske ploče jer ona zasebno pokazuje upravo suprotna svojstva, odnosno u te su ploče velike razlike u savojnim svojstvima u smjeru dužine i širine. Iz navedenog primjera odmah je jasno kako se relacije unutar mehaničkih svojstava furnirske ploče ne mogu izravno preslikati i na svojstva sendvič-ploča već je potrebno proučiti naprezanja u svakom sloju furnirske ploče kada je ona ukomponirana kao strukturni element sendvič-ploče. Osnovni razlog tome je položaj neutralne osi u odnosu prema furnirskoj ploči. U troslojne furnirske ploče neutralna os prolazi kroz središnji sloj, zbog čega on ima vrlo slab utjecaj na savojna svojstva. Kada se furnirska ploča postavi na površinu krute srednjice, istodobno se i neutralna os pomiče prema sredini krute srednjice, pri čemu središnji list furnirske ploče dobiva znatno veći utjecaj na savojna svojstva sendvič-ploče jer mu je omogućeno preuzimanje vanjskog opterećenja (ponajprije u smjeru širine ploče). Dakle u tom će slučaju debljinski udio pojedinih listova furnira unutar furnirske ploče imati velik utjecaj na optimizaciju strukturne konstrukcije cjelokupne sendvič-ploče. S obzirom na to da je riječ o troslojnim furnirskim pločama, varijacijom samo debljinskog udjela furnira moguća su optimizacijska rješenja djelomično ograničena. Povećanje ukupnog broja slojeva furnirske ploče, a time i njezine debljine, smanjilo bi povoljan odnos između težine i krutosti sendvič-ploče. Zato se kao druga mogućnost optimizacije sendvič-ploče, pri konstantnoj debljini furnirske ploče, pojavljuje mogućnost varijacije kuta drvnih vlakana među pojedinih slojevima furnira.

Utjecaj kuta vlakana na savojna svojstva drva općenito je poznat. S povećanjem kuta drvnih vlakana u odnosu prema smjeru djelovanja sile smanjuju se savojna svojstva drva (Wood Handbook, 1999). Istraživan je i međusobni odnos kuta drvnih vlakana i smjera djelovanje sile u furnirskim pločama (Kollmann *et al*, 1975), no to se ponajprije odnosi na djelovanje sile u ravnini pri vlačnom opterećenju ploče. Radi određivanja savojnih svojstava, razvijeno je dosta metoda koje se ponajprije baziraju na elastičnim ili elastično-plastičnim svojstvima furnira. Pregled pojedinih računskih metoda dao je u svom radu Booth, (1990), no te se metode odnose isključivo na unakrsnu konstrukciju furnirske ploče, pri čemu su svi listovi furnira međusobno zakrenuti za 90°. Slično tome, i europska

norma HRN EN 14272 propisuje računski postupak za određivanje svojstva furnirske ploče, ali ona se također odnosi samo na unakrsnu orijentaciju listova furnira, uz stanovito zanemarivanje čvrstoće poprečno orijentiranih listova furnira (Kljak *et al*, 2005). No kao što je već rečeno, zanemarivanje pojedinih slojeva furnirske ploče pri izradi sendvič-ploče može uzrokovati velika odstupanja proračunskih od stvarnih vrijednosti, poglavito ako se optimizacija strukturne konstrukcije temelji na međusobnom zakretanju pojedinih listova furnira. Stoga je bilo potrebno obaviti analizu naprezanja pri savojnom opterećenju i varijaciji kuta drvnih vlakana radi određivanja smjernica pri optimizaciji strukturne konstrukcije sendvič-ploče.

2. MATERIJALI I METODE

2 MATERIALS AND METHODS

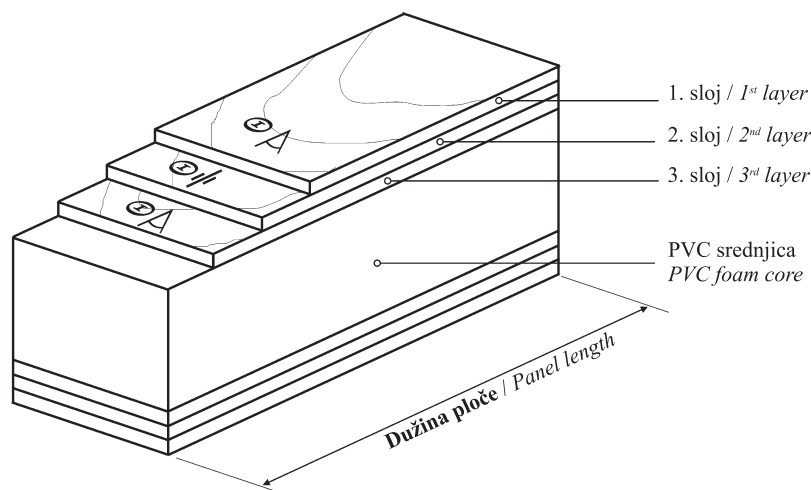
Istraživanje se sastojalo od eksperimentalnog rada i simulacije računalnim programom.

Eksperimentalni se rad sastojao od dvije faze. U prvoj su izrađene troslojne furnirske ploče od bukovine postupkom taktog prešanja. Svi listovi furnira bili su jednake debljine ($t_{nom} = 1,5$ mm), a mijenjali su se kutovi vlakana. Kutovi vlakana vanjskih slojeva kretali su se u rasponu od 0 do 90°, kontinuirano rastući po 15°. Sve furnirske ploče izrađene su kao troslojne ploče konstantne debljine od 4,5 mm. Za izradu furnirskih ploča upotrijebljena je karbamid-formaldehidna smola LENDUR 120 (Nafta-Petrochem, d.o.o.). Tehnološki parametri prešanja bukovine furnirske ploče bili su: količina nanosa ljepila 220 g/m², temperatura prešanja 120 °C, tlak prešanja 1,6 N/mm², vrijeme prešanja 7 min.

U drugoj fazi izrađene su sendvič-ploče lijepljenjem troslojnih furnirskih ploča na površinu krute PVC srednjice (HEREX C79.75, Alcan Airex AG), također postupkom taktog prešanja (sl. 1). PVC srednjica bila je debljine 20 mm. Za sljepljivanje furnirske ploče na krutu PVC srednjicu upotrijebljeno je poliuretansko ljepilo KLEIBERIT PUR-LEIM 501 (KLEBCHEMIE M. G. Becker + Co. KG). Tehnološki parametri prešanja za sendvič-ploču bili su: količina nanosa ljepila 180 g/m², temperatura prešanja 50 °C, tlak prešanja 0,8 N/mm², a vrijeme prešanja 20 minuta.

Ukupno je izrađeno šest različitih strukturnih konstrukcija sendvič-ploče, a njihove oznake i strukture prikazane su u tablici 1.

Izrada simulacijskih modela temeljila se na linearno-elastičnoj teoriji i primjeni softverskog paketa COSMOS/M 2.6. Ukupno je izrađeno šest FEM modela identičnih struktura te uvjetima opterećenja kao i eksperimentalne sendvič ploče. Svi FEM modeli opterećeni su jednakom silom. Elastična svojstva strukturnih materijala određena su na temelju literaturnih podataka. Modul elastičnosti za bukvu iznosio je: $E_X = 13\,700$ N/mm², $E_Y = 1\,140$ N/mm², $E_Z = 2\,240$ N/mm²; modul smicanja $G_{XY} = 1\,060$ N/mm², $G_{YZ} = 460$ N/mm², $G_{XZ} = 1\,610$ N/mm² i Poissonov broj $\nu_{XY} = 0,51$, $\nu_{YZ} = 0,36$, $\nu_{XZ} = 0,45$ (Dinwoodie, *et al*, 1981).



Slika 1. Struktura sendvič-ploče
Figure 1 Sandwich panel structure

Tablica 1. Oznake i strukturna konstrukcija sendvič-ploče
Table 1 Symbols and structure of the sandwich panel

Oznaka / Symbol	Struktura sendvič-ploče / Sandwich panel structure	Legenda / Legend
SP0	$[0_{1,5}/0_{1,5}/0_{1,5}/0_{10}]_S$	$[\theta_{t1}/\theta_{t2}/\theta_{t3}/\theta_{t4}]_S$
SP15	$[15_{1,5}/0_{1,5}/-15_{1,5}/0_{10}]_S$	
SP30	$[30_{1,5}/0_{1,5}/-30_{1,5}/0_{10}]_S$	θ – kut vlakancima, ° / layer angle, °
SP45	$[45_{1,5}/0_{1,5}/-45_{1,5}/0_{10}]_S$	t – debljina sloja, mm / layer thickness, mm
SP60	$[60_{1,5}/0_{1,5}/-60_{1,5}/0_{10}]_S$	S – simetrično s obzirom na neutralnu ravninu symetric about the midplane
SP75	$[75_{1,5}/0_{1,5}/-75_{1,5}/0_{10}]_S$	
SP90	$[90_{1,5}/0_{1,5}/90_{1,5}/0_{10}]_S$	

Elastična svojstva krute PVC srednjice temelje se na ovim proizvođačevim tehničkim podacima: modul elastičnosti 83 N/mm², modul smicanja 30 N/mm² i Poissonov broj 0,3 N/mm².

Svi parametri eksperimentalnog rada, kao i postupak kreiranja FEM modela, bili su istih vrijednosti kao i u prethodnom istraživanju (Kljak i Brezović, 2007). Na taj način je omogućeno izravno uspoređivanje dobivenih podataka.

3. REZULTATI I DISKUSIJA 3 RESULTS AND DISCUSSION

Određivanje savojnih svojstava obavljeno je metodom s tri uporišne točke prema normi ASTM C 393. Rezultati empirijskog mjerenja dani su u tablici 2. U tablici su posebno prikazani rezultati u smjeru dužine ploče (paralelno) te u smjeru širine ploče (okomito). Za furnirske ploče standardni se način određivanja smjera dužine i širine ploče temelji na smjeru vlakancima vanjskog sloja. Pri izradi eksperimentalne sendvič-ploče takav način nije prikladan jer prvi i treći sloj rotiraju oko drugog sloja za određeni kut, a to znači da je smjer vlakancima konstantan samo u drugom sloju. Stoga je smjer dužine i širine ploče određen na temelju smjera vlakancima drugog sloja, tj. dužina ploče je smjer paralelan s

vlakancima drugog sloja, a širina ploče je smjer okomit na vlakanca drugog sloja.

Rezultati empirijskog mjerenja su očekivani. Vidljivo je da se krutost sendvič-ploče smanjuje s povećanjem kuta vlakancima (u smjeru dužine ploče), odnosno povećava (u smjeru širine ploče). No na temelju tih rezultata nije bilo moguće odrediti naprezanja u svim slojevima furnirske ploče. Stoga je provedena analiza primjenom FEM modela. Bilo je potrebno provesti analizu naprezanja u svim slojevima kako bi se, unatoč ostvarenju željene krutosti sendvič-ploče, izbjeglo stvaranje koncentracije unutarnjih naprezanja odnosno deformacija kao posljedice varijacije kuta vlakancima.

Na slici 2. prikazane su krivulje naprezanja za sva tri sloja, tj. furnira. Promjene u smjeru dužine ploče označene su punim linijama, dok su promjene u smjeru širine ploče označene crtkanim crtama. Općenito, vidljivo je da se s povećanjem kuta vlakancima povećavaju i razlike u Von Mises naprezanjima u smjeru dužine i širine ploče. No ako se usporede naprezanja između pojedinih slojeva furnira, uočljive su velike razlike.

U prvom je sloju vidljiv kontinuirani rast naprezanja (u smjeru širine ploče) odnosno pad naprezanja (u smjeru dužine ploče), s tim da se značajnije razlike u naprezanjima pojavljuju tek iza modela SP30, tj. kada kut vlakancima u furnirskoj ploči postane veći od 30°.

Tablica 2. Savojna svojstva sendvič ploče
Table 2 Bending properties of sandwich panel

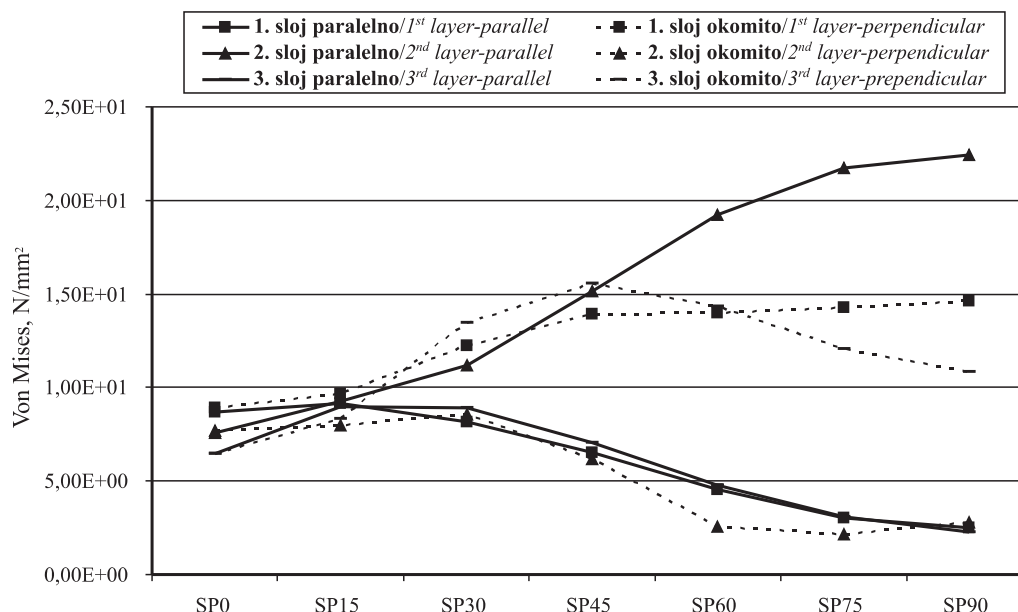
	τ_c N/mm ²	σ_f N/mm ²	D N-mm ²	U N	Δ mm
Paralelno – dužina ploče / <i>Parallel - panel length</i>					
SP0	1,559	33,410	865580954	47216,4	4,30
SP15	1,352	28,980	510045311	49802,5	4,18
SP30	0,965	20,684	317121459	50059,2	3,36
SP45	0,908	19,463	221996149	52435,9	3,68
SP60	0,902	19,320	98220175	53199,6	5,52
SP75	0,838	17,962	86864414	52110,0	5,43
SP90	0,724	15,523	63225457	43606,8	4,86
Okomito – širina ploče / <i>Perpendicular - panel width</i>					
SP0	0,394	8,435	48342916	48130,1	3,52
SP15	0,569	12,202	53742983	49720,3	4,88
SP30	0,671	14,387	84274115	50534,4	4,30
SP45	0,808	17,309	173038067	52485,6	3,64
SP60	0,995	21,318	282097781	52961,2	3,72
SP75	1,126	24,123	645422022	52552,3	3,40
SP90	1,155	24,746	658627820	43910,2	3,20

τ_c – naprezanje u srednjici / *core shear stress*; σ_f – naprezanje u vanjskim slojevima / *facing bending stress*; D – savojna krutost ploče / *panel bending stiffness*; U – smicajna krutost ploče / *panel shear rigidity*; Δ – progib ploče / *total beam midspan deflection*

Naprezanja u trećem sloju slična su naprezanjima u prvom sloju, s tim što krivulja naprezanja u trećem sloju (širina ploče) pada nakon 45°, tj. iza modela SP45. Razlog tome je činjenica da je u vanjskim furnirima, odnosno u prvom i trećem sloju udio longitudinalnih naprezanja veći, pri čemu prvi list furnira preuzima najveći dio naprezanja, smanjujući na taj način naprezanja u trećem sloju. To potvrđuje i analiza pojedinih kompo-

nenata naprezanja, pri čemu se uočava da postoji opći trend pada vrijednosti, osim stanovitog porasta normalnih naprezanja u smjeru z te posmičnih u smjeru xy , uz vrlo male iznose ostalih posmičnih naprezanja (tabl. 3).

Za razliku od prvoga i trećeg sloja, krivulje naprezanja u drugom sloju obrnuto su orijentirane. U drugom sloju s povećanjem kuta vlaknaca rastu i naprezanja u smjeru dužine ploče, dok padaju u smjeru širine ploče.



Slika 2. Naprezanje u slojevima furnira
Figure 2 Stress in veneer layers

Tablica 3. Komponente naprezanja u trećem sloju furnira – okomito
Table 3 Stress components in the third veneer layer – perpendicular

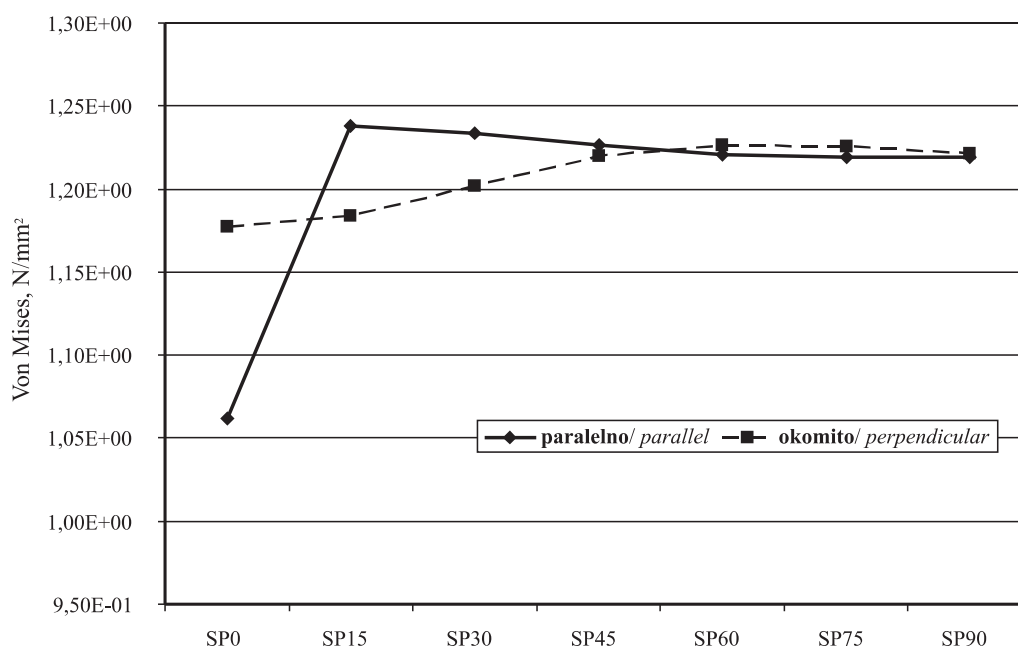
Model	Von Mises	SIGX	SIGY	SIGZ	TAUXY	TAUXZ	TAUYZ
SP0	6,49E+00	6,62E+00	1,36E+00	6,19E-01	9,60E-02	4,03E-02	6,64E-02
SP15	8,35E+00	7,18E+00	3,74E+00	6,56E-01	2,79E+00	4,32E-02	6,77E-02
SP30	1,34E+01	8,80E+00	6,46E+00	7,57E-01	5,96E+00	4,90E-02	6,98E-02
SP45	1,56E+01	1,05E+01	5,56E+00	8,57E-01	6,95E+00	5,12E-02	6,92E-02
SP60	1,43E+01	1,14E+01	2,94E+00	9,05E-01	5,38E+00	4,95E-02	6,72E-02
SP75	1,21E+01	1,11E+01	9,70E-01	9,23E-01	2,68E+00	4,69E-02	6,58E-02
SP90	1,08E+01	1,05E+01	3,27E-01	9,28E-01	1,21E-01	4,29E-02	6,58E-02

To je posljedica činjenice da je drugi sloj zapravo nosivi sloj (longitudinalni smjer drva $E_X=13\,700\text{ N/mm}^2$) pa smanjenjem nosivosti zakrenutih slojeva on preuzima većinu naprezanja, odnosno u smjeru širine ploče drugi sloj ima vrlo malu nosivost (tangencijalni smjer drva $E_Y=1\,140\text{ N/mm}^2$) pa u tom smjeru naprezanja preuzimaju prvi i treći sloj.

Za razliku od naprezanja u furnirima, naprezanje u krutoj srednjici od PVC-a ima drugačije karakteristike. Izgled krivulja naprezanja ne poprima oblik krivulja naprezanja za furnirske slojeve jer je srednjica izotropne građe i različitih elastičnih svojstava. Naprezanje u srednjici (sl. 3) karakterizira nagli porast vrijednosti pri promjeni kuta od SP0 do SP15, i to samo u kada sila djeluje u smjeru dužine ploče. Iz tako naglog porasta naprezanja vidljivo je da i mala rasterećenja vanjskih slojeva dovode do znatnog porasta naprezanja u srednjici.

Ako se i ostali rezultati FEM analize usporede s rezultatima prijašnjeg istraživanja (Kljak i Brezović, 2007) uočava se da su naprezanja u srednjici pri promjeni kuta vlakancu (maks. Von Mises naprezanja 1,23

N/mm^2) vrlo slična i naprezanjima u srednjici pri promjeni debljinskog udjela furnira (maks. Von Mises naprezanja $1,24\text{ N/mm}^2$) uz prisutnost manjih odstupanja. Značajne razliku u naprezanjima pojavljuju se ponajprije u listovima furnira. Pri varijaciji debljinskog udjela furnira maksimalne se vrijednosti naprezanja u pojedinim listovima furnira kreću u rasponu od 2,29 do $49,4\text{ N/mm}^2$, što je znatno više od maksimalnih naprezanja pri varijaciji kuta vlakancu (od 2,15 do $22,5\text{ N/mm}^2$). Budući da se pri varijaciji debljinskog udjela furnira dobivaju znatno više maksimalne vrijednosti naprezanja, pri optimizaciji strukturne konstrukcije sendvič-ploče veću pozornost treba pridati izbjegavanju koncentracije naprezanja u tanjim slojevima furnira. S druge strane, pri varijaciji kuta vlakancu kritična naprezanja mogu se pojaviti u slojevima furnira (maks. Von Mises naprezanja $15,6\text{ N/mm}^2$) u kojih je smjer dužine vlakancu pod kutom od 45° s obzirom na smjer djelovanja sile. Navedene relacije odnose se samo na naprezanja u linearno-elastičnom području. Karakterizacija svojstva sendvič-ploča izvan tog područja trebala bi biti predmetom budućih istraživanja.



Slika 3. Naprezanja u PVC srednjici
Figure 3 Stress in the PVC foam core

4. ZAKLJUČAK

4 CONCLUSION

U radu je istraživana utjecaj kuta drvnih vlaknaca na savojna svojstva sendvič-ploče radi optimizacije napreznja odnosno radi strukturne konstrukcije ploče. Eksperimentalna sendvič-ploča izrađena je od dvije bukove troslojne furnirske ploče i krute PVC srednjice među njima. Rezultati istraživanja dobiveni su empirijskim mjerenjima savojnih svojstava te računalnom simulacijom napreznja u pojedinim slojevima sendvič-ploče. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da varijacija kuta drvnih vlaknaca u pojedinim slojevima furnirske ploče ima značajan utjecaj na promjenu napreznja u sendvič-ploči te se pri varijaciji kuta promjene po pravilu zbivaju prema krivuljama polinoma drugog stupnja. Maksimalna vrijednost napreznja u zakrenutom sloju furnira pojavljuje se pri kutu od 45°. Ako se želi postići približno podjednako napreznje u smjeru dužine i širine ploče, zakrenutost vlaknaca trebala bi biti do 30°. S daljnjim porastom kuta vlaknaca naglo se povećavaju razlike napreznja u smjeru dužine i širine ploče. Varijacija kuta vlaknaca ima znatno veći utjecaj na napreznja u furnirima nego u srednjici, no zbog nižih mehaničkih svojstava srednjice i relativno malo rasterećenje napreznja u furnirima uzrokuje znatan porast napreznja u srednjici.

5. LITERATURA

5 REFERENCES

1. Booth, L.G. 1990: Predicting the bending strength of structural plywood, Part I: Theoretical model. *Journal of the Institute of Wood Science*, 12(1) 14-47.
2. Dinwoodie, M. J. 1981: *Timber its nature and behaviour*. Van Nostrand Reinhold Co. Ltd.

3. Kljak, J.; Brezović, M. 2007: Influence of plywood structure on sandwich panel properties: variability of veneer thickness ratio. *Wood Research*, 52 (2) 77-88.
4. Kljak, J.; Brezović, M.; Jambrečković, V.; Antonović, A. 2005: Predicting mechanical properties of veneer plywood. 7th International scientific conference, April 22, 2005, Wood in the construction industry, Proceedings, 89-92, Zagreb.
5. Kollman, F.; Kuenzi, W.E.; Stamm, 1975: *Principles of wood science and technology I i II*. Springer-Verlag, Berlin.
6. *** 2000: ASTM C393 - Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions. ASTM International, West Conshohocken, PA.
7. *** European Committee for Standardization (CEN), 2002: HRN EN 14272 - Uslojeno drvo - Metode proračuna za pojedina mehanička svojstva. CEN, Brussels, B.
8. *** Structural Res. and Analysis Corporation (SRAC). 2001. *Electronic Documentation – COSMOS/M 2.6 (CD_ROM)*. SRAC, Los Angeles, California.
9. *** 1999: *Wood handbook - Wood as an Engineering Material*. Gen.Tech.Rep.FPL-GTR-113, Madison, Wisconsin.

Corresponding address:

Assistant professor JAROSLAV KLJAK, PhD

University of Zagreb, Faculty of Forestry
Department of Wood Technology
Svetošimunska 25
10000 Zagreb
Croatia
e-mail: kljak@sumfak.hr