

# Utjecaj kuta orijentacije sintetičkih vlakana na savojna svojstva kompozitne furnirske ploče

## Influence of Synthetic Fibers Angle Orientation on Bending Properties of Composite Plywood

Izvorni znanstveni rad • Original scientific paper

Prispjelo – received: 6. 9. 2010.

Prihvaćeno – accepted: 30. 11. 2010.

UDK: 630\*863

**SAŽETAK** • U radu je istraživana utjecaj varijacije kuta orijentacije karbonskih vlakana i količine karbonskih vlakana po snopu pletiva na savojna svojstva furnirske ploče. Za tu su namjenu izrađeni modeli epruveta definirani kao višeslojni kompoziti sastavljeni od karbonskih vlakana i furnira, pri čemu su slojevi vlakana umetnuti u drugu i treću sljubnicu, s varijacijama kuta po 15°. Od dobivenih rezultata analizirana su naprezanja i pripadajuće deformacije u relevantnim slojevima te progib kompozitnih furnirskih ploča. Nakon analize rezultata vidljiv je izrazit utjecaj varijacije kuta orijentacije karbonskih vlakana na svojstva kompozitnih furnirskih ploča pri savijanju odnosno na iznose naprezanja i deformacija, te je on najpovoljniji kada su karbonska vlakna orijentirana pod kutom od 0°, a u dvosmjernih karbonskih vlakana (BCF) i pri kutu orijentacije od 90°.

Najnepovoljniji kut orijentacije karbonskih vlakana jest kada su dvosmjerna karbonska vlakna (BCF) orijentirana pod kutom od 45°, dok za jednosmjerna karbonska vlakna (UCF) taj kut orijentacije iznosi 65°. Veća količina karbonskih vlakana po snopu pletiva pozitivno djeluje na smanjenje naprezanja i pripadajućih deformacija u slojevima furnira te povećava krutost furnirske ploče.

**Ključne riječi:** furnir, karbonska vlakna, kut orijentacije, furnirska ploča, savojna svojstva

**ABSTRACT** • This paper presents the results of research on carbon fiber angle orientation and quantity of carbon fibers in yarn on bending properties of plywood. For that purpose the specimens have been defined as multilayer composites made from carbon fibers and veneer. Carbon fibers were inserted in the second and third glue line of the composite with angle variation of 15°. Stresses and strain were analyzed in significant layers together with displacement of the whole composite plate. The influence of carbon fiber angle orientation on properties of the composite (amount of stresses and related strains) was significant. The best results have been achieved with carbon fiber angle of 0°, and bidirectional carbon fiber type (BCF) with the orientation angle of 90°. The lowest values have been achieved with carbon fiber angle of 65° (unidirectional carbon fibers-UCF), and bidirectional carbon fiber type (BCF) with the orientation angle of 45°. Greater quantity of carbon fibers per one yarn has positive influence on decrease of stresses and strains in veneer layers and provides better stiffness of plywood.

**Key words:** veneer, carbon fibers, angle of orientation, plywood, bending properties

Autori su izvanredni profesori<sup>1</sup> i docenti<sup>2</sup> Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska.

The authors are associate professors<sup>1</sup> and assistant professors<sup>2</sup> at the Faculty of Forestry, University of Zagreb, Croatia.

## 1. UVOD 1 INTRODUCTION

Iz rezultata prethodnih istraživanja sendvič-ploča, izrađenih od furnirske ploče i PVC srednjice, vidljivo je da na savojna svojstva sendvič-ploča znatno utječu promjena debljinskog udjela furnira i varijacija orijentacije kuta vlakana furnirske ploče.

Već i vrlo male promjene debljinskog udjela furnira, kao i manje varijacije kuta orijentacije vlakana furnira, uzrokuju nagli porast naprezanja u PVC srednjici pri savijanju (Kljak i Brezović, 2007; Kljak i sur., 2009). Te varijacije debljinskog udjela furnira i kuta orijentacije u malim iznosima postoje u gotovo svim furnirskim pločama i ne utječu značajno na željena svojstva furnirske ploče već samo uzrokuju male promjene naprezanja u furnirima. Kada takvu furnirsku ploču ugradimo u sendvič-ploču, zbog nižih mehaničkih svojstava srednjice, i te relativno male promjene naprezanja u furnirima uzrokovat će znatan porast naprezanja u srednjici (Kljak i sur., 2009). S obzirom na to da na srednjicu intenzivno utječu već i onako male varijacije debljinskog udjela furnira te kuta orijentacije vlakana, pretpostavlja se da bi se uvođenjem novog materijala u furnirsku ploču taj utjecaj mogao znatno umanjiti, što bi pozitivno djelovalo na cijelu konstrukciju sendvič-ploče i znatno umanjilo naprezanja koja se pojavljuju u PVC srednjici. Kao jedna od prihvatljivijih mogućnosti za taj novi materijal, a zbog svojih dobrih svojstava, nameće se uporaba sintetičkih vlakana, i to anizotropnih karbonskih.

Kako se u konstrukciju sendvič-ploče uvodi novi materijal dominantnih mehaničkih svojstava, prije odluke o najpovoljnijoj kombinaciji svih triju materijala potrebno je istražiti sve relevantne aspekte međudjelovanja furnira i vlakana u furnirskoj ploči, što je predmet ovog rada, kako bi se na temelju tih spoznaja donijele ispravne odluke o optimalnim konstrukcijama sendvič-ploče.

Iz prijašnjih istraživanja primjene dvosmjernih karbonskih vlakana kao ojačivača u konstrukciji furnirske ploče vidljiv je povoljan utjecaj na njezina mehanička svojstva te na povećanje ujednačenosti savojnih svojstava po dužini i širini furnirske ploče (Brezović i sur., 2002).

Također je vidljivo da količina karbonskih vlakana utječe na vrijednost savojne čvrstoće, ali to povećanje količine vlakana ne uzrokuje adekvatno povećanje savojne čvrstoće, dok je za modul elastičnosti taj utjecaj mnogo izraženiji (Brezović i sur. 2003).

Budući da su karbonska vlakna u kompozitnim sustavima važan čimbenik koji utječe na mehanička svojstva, što se osobito očituje kada se primijene u kombinaciji s materijalima slabijih mehaničkih svojstava, pri čemu znatan dio svojih mehaničkih svojstava prenose na taj kompozitni proizvod (Xu i sur., 1998.), nastoji se istražiti na koje načine orijentacija kuta vlakana utječe na raspodjelu naprezanja i deformacija unutar kompozitnog sustava, u ovom primjeru kompozitne furnirske ploče pri savijanju. Također se želi vidjeti kako će količina vlakana u pletivu utjecati na ra-

spodjelu naprezanja i deformacija, a pri promjeni kuta orijentacije sloja vlakana u odnosu prema smjeru drvnih vlakana vanjskog lista furnira kompozitne furnirske ploče.

Također je zanimljivo koliko i kako ti slojevi ispleteni od vlakana istorodnog materijala (karbon-karbon) i oni ispleteni od vlakana raznorodnih materijala (karbon-staklo) pri promjenama kuta orijentacije vlakana utječu na savojna svojstva ploča, ali i na raspodjelu naprezanja i deformacija u relevantnim slojevima ploče.

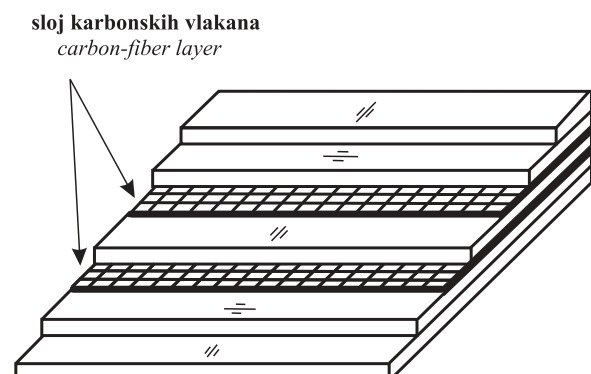
Te će spoznaje omogućiti da se pri projektiranju svojstava materijala može provesti optimizacija u skladu s postavljenim zahtjevima s obzirom na željena svojstva furnirskih, ali i sendvič-ploča.

## 2. MATERIJALI I METODE 2 MATERIALS AND METHODS

Da bi se ustanovila distribucija naprezanja i deformacija unutar kompozitne furnirske ploče izrađeni su modeli koji po dimenzijama i konturnim uvjetima odgovaraju stvarnim epruvetama korištenim pri određivanju savojne čvrstoće i modula elastičnosti pri savijanju. Modeli se temelje na eksperimentalno izrađenim peteroslojnim furnirskim pločama od topolova furnira debljine 2,2 mm, ojačanim impregniranim slojevima karbonskih vlakana umetnutima u drugu i treću sljubnicu (sl. 1).

Razlog smještanja vlakana u drugu i treću sljubnicu jest činjenica da zbog prevelike razlike između svojstava korištenih materijala pri ispitivanju savojnih svojstava ploča može doći do raslojavanja slojeva zbog prevelikoga smicajnog naprezanja (Brezović i sur., 2003). Pojava toga neželjenog prevelikog naprezanja može se izbjeći tako da se utjecaj vlakana na svojstva furnirske ploče svede na minimum. S obzirom na to da položaj vlakana bliže neutralnoj osi furnirske ploče ima slabiji ojačivački učinak (Xu i sur., 1996), i taj se nepovoljni efekt umanjuje smještanjem vlakna bliže neutralnoj osi, odnosno u drugu i treću sljubnicu. Učinak ojačivanja vlakana time je umanjeno, ali vlakna i dalje pozitivno djeluju na furnirsku ploču, a može se vidjeti i njihov utjecaj na savojna svojstva furnirske ploče.

Korištena karbonska vlakna, parametri impregnacije i prešanja ploča jednakih su obilježja kao i u prijašnjim istraživanjima (Brezović i sur., 2003).



Slika 1. Konstrukcija kompozitne furnirske ploče  
Figure 1 Construction of composite plywood

Tablica 1. Elastična svojstva materijala

Table 1 Elastic properties of materials

Modul elastičnosti Modulus of elasticity	Furnir Veneer	BCF	UCF
$E_x$	9600	193350	168150
$E_y$	420	3938	3928
$E_z$	880	3938	3928
Modul smicanja / Shear modulus (MPa)			
$G_{xy}$	660	1080	1078
$G_{xz}$	720	1080	1078
$G_{yz}$	110	884	883
Poissonov broj / Poisson's Ratio			
$\nu_{xy}$	0,39	0,244	0,244
$\nu_{xz}$	0,32	0,244	0,244
$\nu_{yz}$	0,33	0,57	0,57

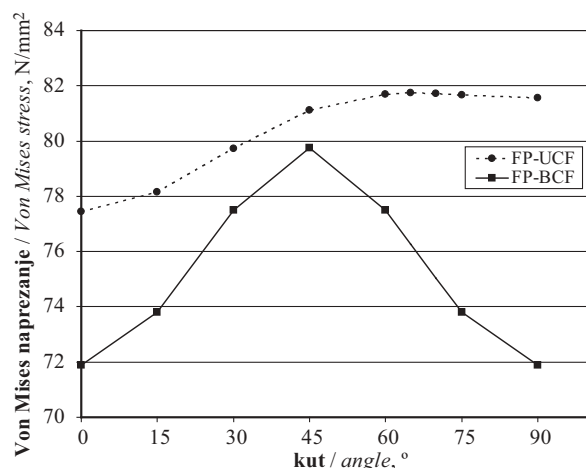
Modeli epruveta definirani su kao višeslojni kompoziti čiji je svaki sloj podijeljen na 400 konačnih elemenata i sastoji se u prvom slučaju od furnira i dvosmjernoga križno pletenog karbonskog vlakna s 12 000 vlakana u snopu (BCF) te nose oznaku FP-BCF, a u drugomu promatranom slučaju od furnira i jednosmjernoga karbonskog vlakna s 3 000 vlakana u snopu i s ispunom od staklenih vlakana, a označeni su kao FP-UCF.

Karbonska vlakna i drvo definirani su kao ortotropni materijali te je za opis takvih materijala odnosno definiranja materijalnih svojstava modela potrebno poznavati njihova elastična svojstva. Za određivanje tih svojstava karbonskih vlakana poslužio je softver CADEC (Barbero, 1998) koji je na temelju svojstava vlakana i matrice izračunao potrebna elastična svojstva za jedan sloj.

Elastična svojstva furnira i sloja karbonskih vlakana namijenjenih definiranju materijalnih svojstava modela prikazana su u tablici 1.

Modeli su smješteni u Kartezijev koordinatni sustav, u kojem se pravci koordinata podudaraju s tri glavna smjera materijalnih osi.

Smjerovi materijalnih osi  $x$ ,  $y$  i  $z$  u karbonskih vlakana odgovaraju smjerovima L (longitudinalni), T (transverzalni) i R (radijalni) u furnira.



Slika 2. Naprezanja u sloju furnira  
Figure 2 Stress in veneer layer

Opterećenje modela obavljeno je srednjom vrijednosti sila koje su uzrokovale lom uzoraka pri određivanju savojne čvrstoće. Tako je model FP-BCF opterećen silom od 1 570 N, a model FP-UCF silom od 1 485 N, a da bi se ustanovio utjecaj kuta orijentacije vlakana, kut je variran za po 15 stupnjeva.

Na tako izrađenim i definiranim modelima obavljena je statička analiza metodom konačnih elemenata (softverski paket Cosmos/m 2.6) te su dobivene vrijednosti snimljene. Za relevantne slojeve u ploči analizirana su naprezanja i deformacije te je određen progib pri zadanim opterećenjima i varijacijama kuta orijentacije vlakana.

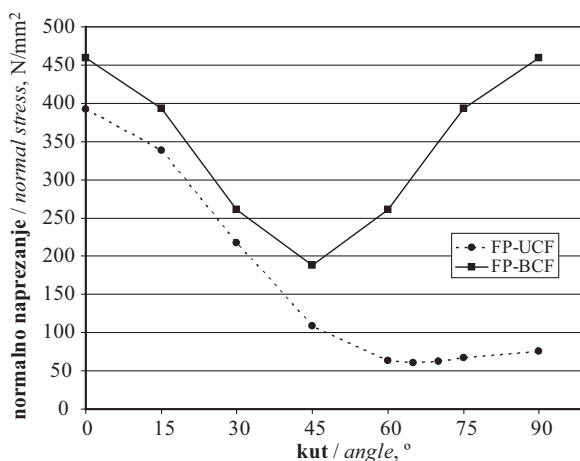
### 3. REZULTATI I DISKUSIJA 3 RESULTS AND DISCUSSION

S obzirom na to da je u modelima riječ o kombinaciji dvaju materijala, od kojih je jedan dominantnih svojstava, analizirat će se utjecaj varijacije orijentacije kuta vlakana na raspodjelu normalnih (sl. 3) i smicajnih naprezanja u karbonskim vlaknima (sl. 4). Također, s obzirom na to da se dobiveni rezultati planiraju primijeniti pri optimizaciji svojstava sendvič-ploča, te imajući na umu da mehanička svojstva furnira imaju znatan utjecaj na promjenu mehaničkih svojstava sendvič-ploča (Kawasaki i sur., 1999. i 2003; Hu i sur., 2005), pratit će se naprezanja koja se pojavljuju u furniru pri varijaciji orijentacije kuta vlakana, i to u prvom (donjem) sloju furnira odnosno u onom sloju u kojemu najprije dolazi do loma pri ispitivanju.

Jednako tako, analizirat će se i progib pri zadanim naprezanjima i kutovima orijentacije vlakana (sl. 5).

Među križno pletenim karbonskim vlaknima (BCF), prema istraživanjima nekih autora (Xu i sur., 1998), najveća će savojna svojstva imati vlakna orijentirana pod kutovima 0° i 90°, dok će najslabija savojna svojstva biti pri kutu od 45°. Kada je riječ o smicajnim svojstvima prema istim autorima, najbolja će biti pri kutu orijentacije vlakana od 45°, a najslabija pri kutovima od 0° i 90°.

Glede utjecaja promjene kuta orijentacije jednosmjernih vlakana (UCF) na savojna svojstva kompozit-



Slika 3. Naprezanja u sloju karbonskih vlakana  
Figure 3 Stress in carbon fiber layer

nih furnirskih ploča moguće je za pretpostaviti da je najslabiji utjecaju što ga ima promjena kuta vlaknaca drva na ista svojstva, ali nema dostupnih podataka koji bi to potvrdili.

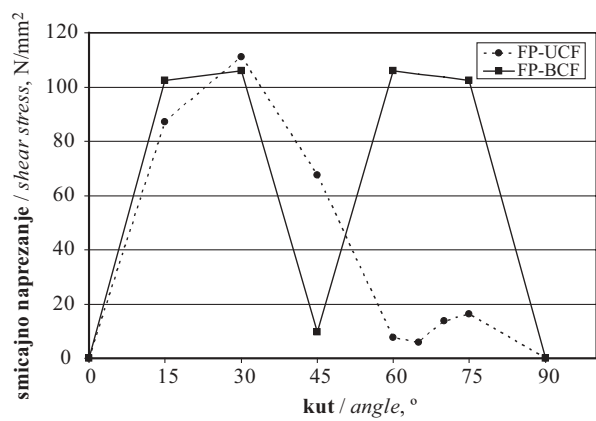
Promatrajući normalna naprezanja u dvosmjernim karbonskim vlaknima smještenim u ploči FP-BCF, može se uočiti da su najveća naprezanja koja preuzimaju karbonska vlakna sukladna očekivanjima (pri 0° i 90°) (sl. 3). S time je usko povezana činjenica da su najveća naprezanja koja se pojavljuju u furniru pri kutu od 45°, a najmanja pri kutovima orijentacije karbonskih vlakana od 0° i 90° (sl. 2). Kao što je poznato, furnir je najslabiji dio u konstrukciji tih dvaju materijala i do destabilizacije cijele konstrukcije dolazi upravo zbog prevelikih naprezanja i deformacija koje se pojavljuju u furniru. Stoga se može reći da je za stabilnost cijele konstrukcije najnepovoljnije kada furnir mora preuzeti najveće naprezanje, a to znači kada su karbonska vlakna orijentirana pod kutom od 45°. Najpovoljniji slučaj za cijelu konstrukciju jest kada furnir preuzima najmanje naprezanja, tj. pri orijentaciji vlakana pod kutovima od 0° i 90°.

Za ploče FP-UCF, nakon snimljenih rezultata i njihove preliminarne analize, pojavila se potreba dodatnih ispitivanja u intervalu kutova orijentacije vlakana između 60° i 75° kako bi se odredile minimalne i maksimalne vrijednosti naprezanja. Za tu svrhu izrađena su još dva modela u kojima su vlakna bila orijentirana pod kutovima od 65° i 70°.

Analizirajući sve dobivene vrijednosti naprezanja jednosmjernih vlakana i furnira ploče FP-UCF, vidljivo je da će najbolja svojstva biti kada su karbonska vlakna orijentirana paralelno s vlakancima vanjskog lista furnira, dok će najslabija svojstva biti ne pri kutu od 90°, kako je očekivano, nego pri kutu od 65°. Trend iznosa naprezanja u furniru suprotan je i najmanje naprezanje u furniru pojavljuje se pri kutu od 0°, a najveće pri kutu orijentacije karbonskih vlakana od 65° (sl. 2). Usporedbom krivulje nastale varijacijom kuta vlakana i one za drvo koja je dobivena varijacijom kuta vlaknaca, uočiti će se razlika zbog djelovanja materijala koji služi kao ispuna u karbonskim vlaknima, a koji ima bolja svojstva od drva, ali mnogo slabija u usporedbi s karbonskim vlaknima.

Vrijednosti iznosa smicajnih svojstava prikazane na slici 4. pokazuju da najmanja naprezanja karbonska vlakna preuzimaju pri kutovima orijentacije od 0° i 90°. Za razliku od očekivanja, najveći iznos smicajnih naprezanja koji karbonska vlakna mogu preuzeti nije pri kutu od 45° nego pri kutovima od 30° i 60°, no utjecaj tog odstupanja zanemariv je i nije se odrazio na očekivanu promjenu trenda krivulje naprezanja u furniru.

Smicajna svojstva ploče FP-UCF najbolja su u cijeloj konstrukciji pri kutu orijentacije karbonskih vlakana od 30°, što se može uzeti u relaciju s istovjetnim zaključkom za križno pletena karbonska vlakna u ploči FP-BCF. Najmanji je iznos smicanja pri kutu orijentacije od 65°, nakon čega karbonska vlakna (UCF) najvjerojatnije više ne utječu na to svojstvo nego na nj utječe kut orijentacije ispune, uz preduvjet da posjeduje određena relevantna mehanička svojstva,

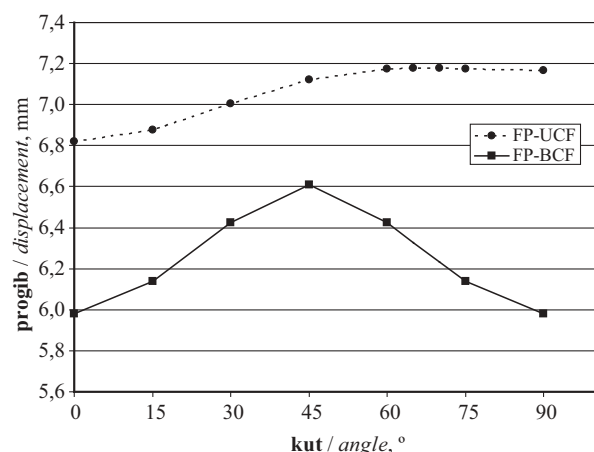


Slika 4. Smicajna naprezanja u sloju karbonskih vlakana  
Figure 4 Shear stress in carbon fiber layer

kao u promatranom primjeru gdje su kao ispuna upotrijebljena staklena vlakna. Pri kutu orijentacije karbonskih vlakana od 90° iznos smicanja je najmanji jer tada na smicanje u potpunosti utječe ispuna odnosno njezina svojstva.

Može se reći da je utjecaj kuta orijentacije karbonskih vlakana na svojstva kompozitnih furnirskih ploča pri savijanju velik, bez obzira na to je li riječ o križno pletenim ili jednosmjernim vlaknima. Normalna naprezanja koja se pojavljuju pri promjeni kuta orijentacije vlakana potvrđuju očekivanja, što se osobito odnosi na križno pletena vlakna, dok jednosmjerna vlakna odstupaju od očekivanja, ovisno o materijalu koji se rabi kao ispuna. Ako se upotrijebe samo jednosmjerna karbonska vlakna bez ispune, može se pretpostaviti da bi utjecaj promjene kuta orijentacije vlakana na svojstva ojačanih ploča imao isti trend kao i utjecaj promjene kuta vlaknaca drva na ta svojstva.

Promatrajući svojstva kompozitne furnirske ploče vidi se da umetnuta karbonska vlakna preuzimaju znatne iznose naprezanja i istodobno smanjuju naprezanja u slojevima furnira. Evidentno je da su i pri tim znatno većim naprezanjima, deformacije u karbonskim vlaknima znatno manje nego u furniru. To se može objasniti mnogo boljim elastičnim svojstvima karbonskih vlakana nego drva te njihovim znatno većim prekidnim produljenjem.



Slika 5. Progib furnirskih ploča  
Figure 5 Displacement of plywood



Utjecaj varijacije orijentacije kuta vlakana na progib prikazan je na slici 5. i ima sličan utjecaj kao i na naprezanja u sloju furnira. Tako je u ploče FP-BCF progib najmanji pri kutovima orijentacije od 0° i 90°, a najveći pri kutu od 45°, dok je u ploče FP-UCF najpovoljnija orijentacija vlakana pri kutu od 0°, pri kojemu je i najmanja vrijednost progiba ploče, a najnepovoljniji je pri kutu orijentacije 65°. U intervalu između 65° i 90° na svojstva ploče znatno više utječe ispuna nego karbonska vlakna.

Veća količina vlakana više smanjuje naprezanja i deformacije u furniru, što pozitivno djeluje na savojna svojstva furnirskih ploča, odnosno manje su vrijednosti progiba u ploče FP-BCF nego u ploče FP-UCF, i to promatrano pri svim varijacijama orijentacije kuta vlakana. Stoga se može reći da veća količina vlakana povećava krutost furnirske ploče iako pri odabiru količine vlakana treba voditi brigu o svim aspektima međudjelovanja dvaju materijala izrazito različitih svojstava te se tek nakon detaljne analize mogu donijeti odluke o upotrebi karbonskih pletiva s većim ili manjim brojem vlakana u snopu.

#### 4. ZAKLJUČAK 4 CONCLUSION

Na temelju dobivenih rezultata analize modela, možemo zaključiti da varijacija kuta orijentacije karbonskih vlakana ima znatan utjecaj na svojstva kompozitnih furnirskih ploča pri savijanju. Taj je utjecaj najpovoljniji kada su karbonska vlakna, u oba promatrana slučaja, orijentirana pod kutom od 0°, a za dvosmjerna karbonska vlakna (BCF), i pri kutu orijentacije od 90°.

Najnepovoljniji kut orijentacije karbonskih vlakana jest kada su dvosmjerna karbonska vlakna (BCF) orijentirana pod kutom od 45°, dok za jednosmjerna karbonska vlakna (UCF) taj kut orijentacije iznosi 65°.

Analizirajući utjecaj količine karbonskih vlakana, evidentno je da veća količina karbonskih vlakana po snopu pletiva pozitivno djeluje na smanjenje naprezanja i deformacija u slojevima furnira te pozitivno djeluje na krutost furnirske ploče.

#### 5. LITERATURA 5 REFERENCES

1. Barbero, E.J., 1998: Introduction to Composite Materials Design. London. Taylor and Francis.
2. Brezović, M., Jambrečić, V., Kljak, J., 2002: Utjecaj karbonskih vlakana na neka relevantna svojstva furnirskih ploča. *Drvena industrija*, 53 (1): 23-31.
3. Brezović, M., Jambrečić, V., Pervan, S., 2003: Bending properties of carbon fiber reinforced plywood. *Wood research*, 48 (4): 13-24.
4. Hu, Y., Nakao, T., Nakai, T., Gu, J., Wang, F., 2005: Dynamic properties of three types of wood-based composite. *Journal of Wood Science*, 51 (1):7-12.
5. Kljak, J., Brezović, M., 2007: Influence of plywood structure on sandwich panel properties: variability of veneer thickness ratio. *Wood research*, 52 (2): 77-88.
6. Kljak, J.; Brezović, M.; Antonović, A., 2009: Utjecaj varijacije kuta vlakana na savojna svojstva sendvič-ploče. *Drvena industrija*, 60 (2): 83-88.
7. Kawasaki, T., Zhang, M., Kawai, S., 1999.: Sandwich panel of veneer-overlaid low-density fiberboard. *Journal of Wood Science*, (45) 4: 291-298.
8. Kawasaki, T., Hwang, K., Komatsu, K., Kawai, S., 2003.: In-plane shear properties of the wood-based sandwich panel as a small shear wall evaluated by the shear test method using tie-rods. *Journal of Wood Science*, 49 (3): 199-209.
9. Xu, H., Tanaka, C., Nakao, T., Joshinobu, M., Katayama, H., 1998: Effects of fiber length and orientation on elasticity of fiber-reinforced plywood. *Journal of Wood science*, (44): 343-347.
10. Xu, H., Tanaka, C., Nakao, T., Nishino, Y., Katayama, H., 1996: Flexural and Shear Properties of Fiber-Reinforced Plywood. *Mokuzai Gakkaishi*, 42 (4): 376-382.

#### Corresponding address:

Associate professor MLADEN BREZOVIĆ, Ph.D.

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