

Mehanička svojstva površinski karbonizirane bukovine

Majstorović, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry / Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:575613>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-16**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



ŠUMARSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ
DRVNOTEHNOLOŠKI PROCESI

FILIP MAJSTOROVIĆ

Mehanička svojstva površinski karbonizirane bukovine

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2020.

ŠUMARSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

Mehanička svojstva površinski karbonizirane bukovine

DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij: Drvnotehnološki procesi

Predmet: Modifikacije drva

Ispitno povjerenstvo: 1. doc.dr.sc. Vjekoslav Živković

2. prof.dr.sc. Hrvoje Turkulin

3. izv.prof.dr.sc. Marin Hasan

Student: Filip Majstorović, bacc. ing. lign.

JMBAG: 0068228031

Broj indeksa: 1013/18

Datum odobrenja teme: 19.4.2020

Datum predaje rada: 22.8.2020

Datum obrane rada: 4.9.2020

Zagreb, Rujan, 2020.

Dokumentacijska kartica

Naslov	Mehanička svojstva površinski karbonizirane bukovine
Title	Mechanical properties of surface charred beech
Autor	Filip Majstorović
Adresa autora	Gundulićeva 8, 10000 Zagreb
Mjesto izrade	Mendel University, Brno
Vrsta objave	Diplomski rad
Mentor	doc. dr. sc. Vjekoslav Živković
Izradu rada pomogao	Dr. Peter Rademacher, doc. Ing. Petr Čermák, Ing. Martin Brabec
Godina objave	2020.
Obujam	I-IV + 36 pages + 18 pictures + 3 tables
Ključne riječi	Površinska karbonizacija, Modifikacija drva, Termička modifikacija, Mehanička svojstva
Key words	Surface Charring, Wood modification, Thermal Modification, Mechanical properties
Sažetak	U ovom istraživanju provela se jednostrana površinska karbonizacija bukovine pri raznim temperaturama i vremenima procesa. Proces se odvijao pomoću laboratorijske opreme koja je omogućila provođenje (kontaktnog) prijenosa topline u drvu. Cilj samog istraživanja bio je razvoj nove tehnike modifikacije drva bukovine s dodatnom vrijednošću i poboljšanim uporabnim svojstvima. Rezultati istraživanja dokazali su kako je površinska karbonizacija ekološki prihvatljiv, potencijalan i inovativan način za poboljšanje uporabnih svojstava drva. Površinski karbonizirana bukovina pokazala se kao pogodan materijal za proizvode kao što su fasade i slični proizvodi kod kojih prirodna savitljivost materijala nije od velikog značaja.

	IZJAVA O IZVORNOSTI RADA	OB ŠF 05 07
		Revizija: 1
		Datum: 28.6.2017.

„Izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mogega rada te da se u izradi istoga nisam koristio /la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

vlastoručni potpis

Filip Majstorović

U Zagrebu, 04.09.2020

Sadržaj

Popis slika	II
Popis tablica	III
Predgovor	IV
1. UVOD	1
2. Cilj istraživanja	4
3. Materijali i metode.....	5
3.1 Priprema uzoraka i tehnologija procesa karbonizacije	5
3.2 Određivanje mehaničkih svojstava površinski karbonizirane bukovine	9
3.2.1. Ispitivanje uzoraka i Digital Image Correlation (DIC) metoda.....	9
3.2.2. Čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti.....	12
4. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava	14
4.1 Dijagrami naprezanja	14
4.2 Čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti	23
4.3 Pozicija neutralne linije	29
5. ZAKLJUČAK	36
LITERATURA	38

Popis slika

Slika 1. Uzorci radijalnog i tangentnog smjera namijenjeni površinskoj karbonizaciji drva

Slika 2. Laboratorijska oprema za proces površinske karbonizacije drva

Slika 3. Promjena boje površine drva nakon postupka karbonizacije

Slika 4. Shematski prikaz rasporeda krojenja uzoraka za ispitivanja te njihove dimenzije

Slika 5. Univerzalni stroj za ispitivanje mehaničkih svojstava te oprema potrebna za izvođenje DIC (digital image correlation) metode

Slika 6. Priprema uzoraka za ispitivanje korelacije digitalne slike

Slika 7. Raspored naprezanja i položaj neutralne linije referentnog uzorka pri 70% iznosa maksimalne sile (F_{max}) (Podaci dobiveni u programu Vic-3D v. 2010)

Slika 8. Dijagram naprezanja i njegove karakteristične vrijednosti

Slika 9. Dijagrami naprezanja za različite vremensko-temperaturne režime

Slika 10. Maksimalne sile (R i T) za pojedine skupine uzoraka

Slika 11. Produljenje uzoraka (R i T) u trenutku djelovanja maksimalne sile (F_{max})

Slika 12. Rad potreban da se dosegne maksimalna sila (F_{max}) (R i T)

Slika 13. Čvrstoća na savijanje (R i T)

Slika 14. Modul elastičnosti (R i T)

Slika 15. Korelacija čvrstoće na savijanje i modula elastičnosti s gustoćom

Slika 16. Primjer uzorka iz skupine 400/60s T u trenutku djelovanja sile u iznosu od 70% vrijednosti maksimalne sile (F_{max})

Slika 17. Prikaz rasporeda aksijalnih naprezanja po debljini uzoraka

Slika 18. Pozicija neutralne linije za pojedine skupine uzoraka (R i T)

Slika 19. Priprema funkcionalnog uzorka drvene fasade s karboniziranom površinom

Popis tablica

Tablica 1. Vremensko-temperaturni režimi površinski karbonizirane bukovine

Tablica 2. Prikaz karakterističnih maksimalnih sila i gustoća karboniziranih uzoraka

Tablica 3. Čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti referentnih i modificiranih uzoraka

Predgovor

Istraživanje za ovaj rad provedeno je tijekom šestomjesečnog ERASMUS+ boravka na Mendel Sveučilištu u Brnu gdje sam sudjelovao u projektu kojem je fokus bio na površinskoj karbonizaciji bukovine. Samo istraživanje provodilo se u laboratoriju lociranom u naselju Utechov, a veći dio obrade podataka proveo sam na Mendel Sveučilištu. Tijekom istraživanja imao sam priliku upoznati i surađivati s djelatnicima Drvnotehnološkog odsjeka koji su mi pružili mnogo korisnih savjeta, te je ovaj rad rezultat naše suradnje.

Ovim putem se želim zahvaliti svojem mentoru doc. dr. sc. Vjekoslavu Živkoviću na podršci i pomoći tijekom pisanja ovog diplomskog rada. Također se želim zahvaliti Dr. Peter Rademacheru na svojoj pruženoj pomoći za vrijeme boravka u Brnu, te svim djelatnicima Mendel Sveučilišta u Brnu koji su mi asistirali u istraživanju kojim je rezultirao ovaj rad.

1. UVOD

Zbog ekoloških izazova s kojima se društvo suočava, znanost o materijalima sve se više usredotočava na biopolimerne materijale na bazi lignoceluloze, poput drva. Proizvodi od drva imaju povoljan ekološki otisak u usporedbi s ekvivalentnim proizvodima drugih materijala (Werner i Richter, 2007). Ugljik pohranjen u drvu koje se koristi za gradnju ostaje praktički neometan tijekom životnog vijeka materijala, ali drvene zgrade također zahtijevaju manje procesne energije tijekom same izrade i obnavljanja za vrijeme uporabe, te stoga rezultiraju manjom emisijom ugljičnog dioksida od većine ostalih struktura izgrađenih od neobnovljivih materijala. Znanost uporno pokušava poboljšati svojstva drva i njegove derivate kako bi se dobili materijali koji će zadržati svoje prednosti tijekom vremena uporabe, te istodobno smanjiti njihove nedostatke poput prirodne varijabilnosti, dimenzijske nestabilnosti ili biološke razgradljivosti (Kutnar i Muthu, 2016).

Inovativne metode modifikacije drva omogućile su smanjenje ili čak uklanjanje prirodnih nedostataka drva kako bi se postigla bolja uporabna svojstva tijekom životnog vijeka materijala na bazi drva. Kemijska, termička i mehanička obrada obično se primjenjuju na drvo što rezultira trajnim ili privremenim promjenama svojstava drva (Esteves i Pereira, 2009). Termička modifikacija pri povišenoj temperaturi dugo se smatrala najuspješnijom i najučinkovitijom metodom za smanjenje ravnotežnog sadržaja vode drva i poboljšanje njegove dimenzijske stabilnosti i biološke otpornosti (Viitanen i dr., 1994). Iako je termički modificirano (TM) drvo ekološki prihvatljivo i pogodno za mnoge primjene, postoje i određeni nedostaci. Bez obzira na korišteni postupak, TM drvo pokazuje niža mehanička svojstva koja sprječavaju njegovu uporabu u nosivim konstrukcijama (Boonstra i dr., 2007). Pri izloženosti u eksterijeru, boja će izblijediti, postoji šansa za nastankom grešaka kao što su pukotine i koritavost, a interval održavanja (ponovno nanošenje premaza) ne može se značajno povećati u odnosu na nemodificirano drvo (Hill, 2006.). Postupci modifikacija također su dugotrajni (Esteves i Pereira, 2015.) povećavajući cijenu proizvoda.

Poznato je da je termička degradacija drva skup reakcija koje se preklapaju. Na niskim temperaturama između 20 i 150 °C, drvo se suši, počevši s gubitkom slobodne vode i završava s gubitkom vezane vode. Temperature od 180-250 °C se obično koriste za tradicionalne termičke modifikacije. Drvo prolazi kroz važne kemijske transformacije, a rezultira razgradnjom nekristalizirajućih ugljikohidrata, dok se razgradnja lignina i celuloze događa iznad 280 °C. Grijanje do 300 °C rezultira depolimerizacijom celuloze, nastankom hlapljivih spojeva, stvaranjem oksidacijskih proizvoda i naposljetku karbonizacijom drva.

Kao alternativa tradicionalnoj termičkoj modifikaciji, drvo se može modificirati samo na površini koja je izložena vanjskim uvjetima, štedeći vrijeme i troškove i čuvajući strukturna svojstva drva (Gosselink i dr., 2004). Jednostrana karbonizacija površine drva tradicionalno se koristila pretežno u Japanu (Akizuki i dr., 2001). U ovom se pristupu drvo veže u „toranj“ trokutastog oblika, nakon čega se vatra postavlja s donje strane, a kada se dobije željeni izgled, vatra se ugasi. Piljenice za vanjsku uporabu brušene su od viška ugljena, ali se ne tretiraju na bilo koji dodatni način, a rečeno je da dobiveni izgled traje desetljećima (Miller, 2015). Zbog svog estetskog i prirodnog izgleda, danas se u Europi i SAD-u nalazi nekoliko proizvođača karboniziranog drva.

S gledišta učinkovite i ekonomične industrijske uporabe, praćenja utjecaja pojedinih procesnih parametara, stupnja promjene boje i kontrole kvalitete (homogenosti) površine, donešen je zaključak za korištenjem kontaktnog (provodljivog) grijanja u temperaturnom rasponu od 200 do 400 °C. Prvi rezultati na ovom području pokazuju da drvo s karboniziranom površinom pokazuje bolja hidrofobna svojstva (kut kvašenja), niži ravnotežni sadržaj vlage i bolju dimenzijsku stabilnost što u konačnici rješava glavni problem drva kao prirodnog materijala. Osim što se smanjenjem ravnotežnog sadržaja vode u konačnici dobiva materijal boljih mehaničkih svojstava, također se i u velikoj mjeri povećava mogućnost uporabe takvog materijala. Promjene dimenzija drva, (poznate kao i bubrenje i utezanje) uzrokovane varijacijama sadržaja vode, glavni su razlog zašto se u mnogim situacijama izbjegava koristiti drvo (npr. u eksterijeru). Ovisno o vrsti korištenog drva, temperaturi i vremenu procesa, moguće je stvoriti različite stupnjeve površinske obrade, kako u širokom rasponu promjena boja (estetska procjena) tako i u promjenama svojstava površine

(funkcionalna procjena). Unatoč općim saznanjima o promjenama kemijskog sastava i svojstava materijala zbog utjecaja temperatura u opsegu od 200 ° C do 400 ° C, ponašanje površinski karboniziranih elemenata još je uvijek neistraženo područje i trenutno ne postoji tehnologija i tehnološka oprema za industrijsku uporabu kontaktnim grijanjem. Razvoj ove tehnologije može dovesti do pojave novih i inovativnih rješenja za uporabu bukovog drva, za koja još nije pronađena praktična primjena na području građevinskih elemenata. Povećanje životnog vijeka drvenih konstrukcija bez istovremenog povećanja troškova održavanja i opterećenja okoliša pomoglo bi pri ublažavanju klimatskih promjena i pružilo zanimljive alternative za građevinsku industriju.

2. Cilj istraživanja

U Češkoj Republici, gdje je istraživanje za ovaj rad provedeno, bukva je najrasprostranjenija listača te zauzima 7,2% ukupne površine šuma. Drvo bukve je izrazito konkurentno na plodnom tlu zbog visokog stasa (može biti i više od 40 m), guste krošnje, te životnog vijeka od 200 do 300 godina. Bukva je također najrasprostranjenija vrsta u šumama Hrvatske, te je tradicionalni materijal za drvoprerađivačku industriju; međutim, potencijal uporabe nije u potpunosti iskorišten. Bukovina je poznata po svojim izvanrednim mehaničkim svojstvima, ali njezina trajnost se smatra nedostatnom kada se govori o uporabi u eksterijeru. Drvo bukovine također ima slaba hidrofobna svojstva, te upija vodu u većoj mjeri od nekih drugih komercijalnih vrsta što u konačnici dovodi do izraženijih promjena dimenzija.

Do sada jednostrana površinska karbonizacija drva bukovine na umjerenim temperaturama nije istraživana u dovoljnoj mjeri, a znanje o njezinoj učinkovitosti prilično je ograničeno. Zahvaljujući prijašnjim istraživanjima, neka fizikalna svojstva površinski karboniziranog drva, kao što su ravnotežni sadržaj vode, vodoupojnost i dimenzijska stabilnost su proučavana, ali što se može očekivati kada se pažnja okrene na mehanička svojstva istog materijala? Da li je moguće optimizirati proces karbonizacije kako bi gubitak mehaničkih svojstava bio minimalan i kako bi se uporaba takvog modificiranog materijala mogla iskoristiti u graditeljstvu?

U ovom istraživanju provela se jednostrana površinska karbonizacija bukovine pri raznim temperaturama i vremenima procesa s ciljem razvitka nove tehnike modifikacije drva bukovine s dodatnom vrijednošću i poboljšanim uporabnim svojstvima.

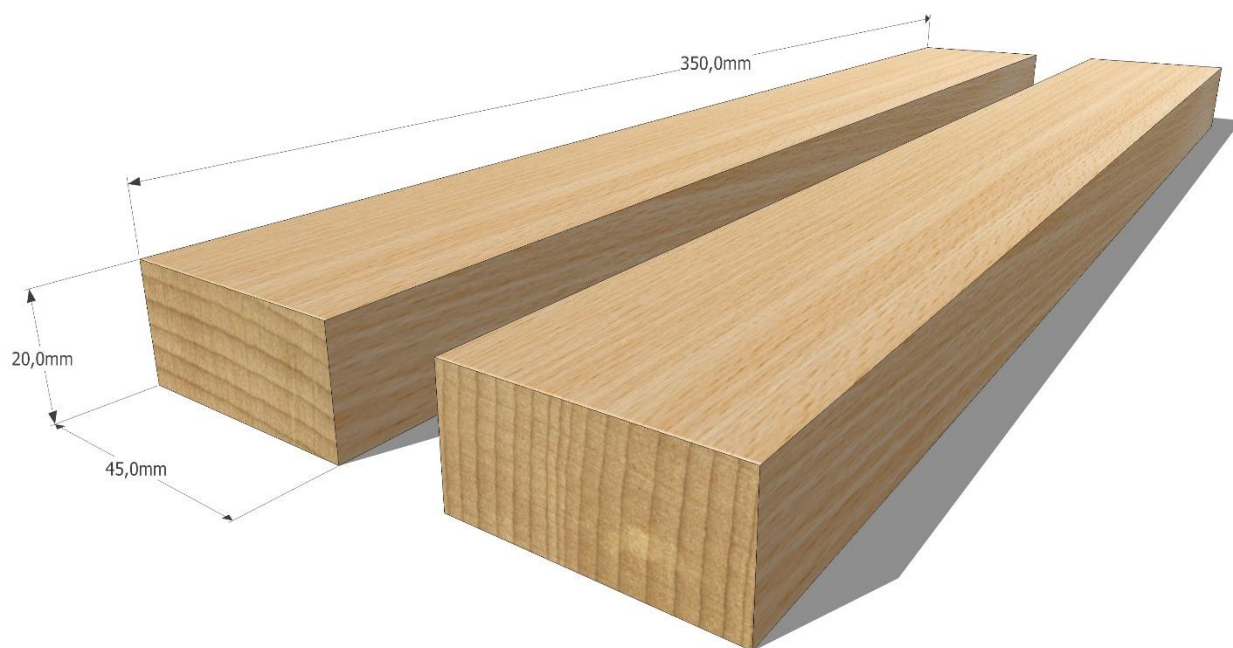
3. Materijali i metode

3.1 Priprema uzoraka i tehnologija procesa karbonizacije

Ispitivanje je vršeno na europskom drvu bukve (*Fagus sylvatica* L.) koje je dobiveno iz šuma Češke Republike. Uzorci su osušeni do apsolutno suhog stanja prema standardu ČSN EN 49 0103 i potom su razvrstani u grupe prema gustoći. Sušenje ispitnih uzoraka do 0% sadržaja vode izvršeno je kako bi se uklonile deformacije koje mogu nastati promjenom sadržaja vode tijekom karbonizacije površine drva.

Dimenzije uzoraka odabrane su s obzirom na veličinu laboratorijske opreme za karbonizaciju površine drva.

Uzorci dimenzija 50 × 20 × 350 mm (slika 1) razvrstani su u dvadeset i dvije skupine s po deset proba u svakoj skupini koje predstavljaju orijentaciju karbonizirane površine, tj. radijalni smjer, tangentni smjer i vremensko-temperaturni režim (sve skupine ispitane su i u radijalnom i tangentnom smjeru) (Tab. 1). Predloženi režimi odabrani su s obzirom na preliminarna ispitivanja i željeni stupanj toplinske degradacije površine drva. Za procjenu utjecaja karbonizacije na kakvoću površine i na svojstva materijala korišteni su različiti vremensko temperaturni režimi, gdje je za svaku skupinu uzoraka korištena jedna temperatura te 2 različita vremena procesa kako bi se utvrdio utjecaj vremena na proces karbonizacije.



Slika 1 Uzorci radijalnog i tangentnog smjera namijenjeni površinskoj karbonizaciji drva

Tablica 1 Vremensko-temperaturni režimi površinski karbonizirane bukovine

Temperatura	Vrijeme 1	Vrijeme 2	Orijentacija godova	
Ref	–	–	R	T
200 °C	6 min	20 min	R	T
250 °C	4 min	6 min	R	T
300 °C	2 min	4 min	R	T
350 °C	1 min	2 min	R	T
400 °C	0,5 min	1 min	R	T

Uzorci su pripremljeni uzevši u obzir iduće parametre:

1) orijentacija godova – uzorci u tangentnom i radijalnom smjeru (mikroskopska struktura drva, raspored anatomskih elemenata i orijentacija godova utječu na toplinsku vodljivost drva, a time i na stupanj karbonizacije i debljinu modificiranog sloja)

2) temperatura karbonizacije – temperatura u rasponu od 200-400 °C

3) vrijeme karbonizacije - vrijeme procesa u rasponu od 0,5 - 20 min s obzirom na odabrani temperaturni režim

Karbonizacija površine ispitivanih uzoraka izvršena je laboratorijskom opremom koja omogućuje provođenje (kontaktnog) prijenosa topline u drvu s mogućnošću odstranjivanja dimnih plinova (Slika 2). Laboratorijska oprema sastoji se od staklokeramičke ploče za grijanje s dimenzijama grijače ploče 450 × 450 mm i s mogućnošću kontinuirane regulacije temperature od 50 do 500 ° C.



Slika 2 Laboratorijska oprema za proces površinske karbonizacije drva

Ploča za grijanje postavlja se u komoru od nehrđajućeg čelika, osiguravajući stalne uvjete tijekom procesa karbonizacije. Uređaj je povezan s ispušnim dimnjakom s upravljačkim prigušivačem (podešavanje intenziteta ekstrakcije) za odvod plinova stvorenih tijekom procesa karbonizacije, posebno na temperaturama iznad 250 ° C.

Postupak površinske karbonizacije drva sastoji se od:

faze 1 - **zagrijavanje grijače ploče**

faze 2 - **karbonizacija površine drva**

faze 3 - **hlađenje / klimatizacija komore**

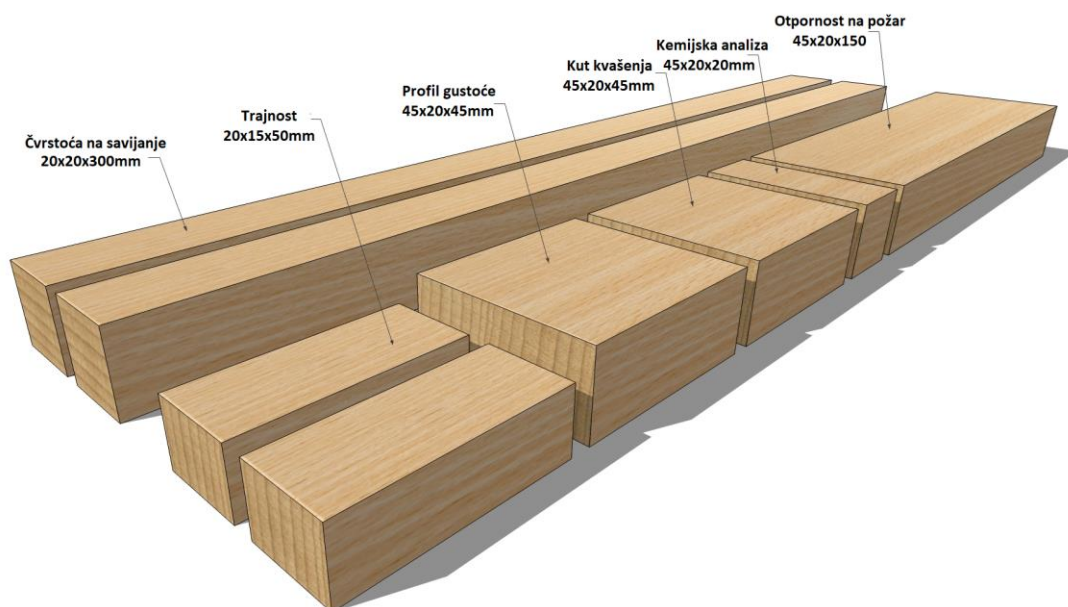
Nakon postizanja potrebne temperature (kontrolno mjerenje pomoću infracrvenog termometra IR-380, Voltcraft), ispitni uzorak je stavljen u prostor modifikacijske komore, a istovremeno se započeo postupak ekstrakcije dimnih plinova. Po završetku postupka karbonizacije, ispitni uzorak je uklonjen iz komore, izvagan (gubitak težine) i zatim kondicioniran u standardnim uvjetima (20 ° C i 65% R.V.Z.) u trajanju od sedam dana.



Slika 3 Promjena boje površine drva nakon postupka karbonizacije (Redosljed režima od vrha prema dnu - referentni uzorak, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C)

Uzorci bukovine s karboniziranom površinom dodatno su razvrstani na uzorke za daljnja mjerenja (Slika 4). Ovo istraživanje je dio većeg projekta koji se sastoji od

raznih ispitivanja, a u ovom radu fokus će se staviti na ispitivanje mehaničkih svojstava površinski karboniziranog drva bukovine. Na temelju eksperimentalne provjere svojstava drva s karboniziranom površinom, utvrditi će se optimalni uvjeti postupka za razmatrane građevinske elemente, npr. fasadne elemente.



Slika 4 Shematski prikaz rasporeda krojenja uzoraka za ispitivanja te njihove dimenzije

Za ispitivanje mehaničkih svojstava u ovom radu koristili su se uzorci za ispitivanje čvrstoće na savijanje (dimenzije 20x20x300mm).

3.2 Određivanje mehaničkih svojstava površinski karbonizirane bukovine

3.2.1. Ispitivanje uzoraka i Digital Image Correlation (DIC) metoda

3.2.1.1. Mjerenje deformacije

Opterećenje u tri točke do loma uzoraka (raspon nosača = 222 mm) u tangentnom i radijalnom smjeru izvršeno je korištenjem univerzalnog ispitnog stroja Zwick Z050 / TH 3A® (Zwick Roell AG, Ulm, Njemačka) na slici 5.



Slika 5 Univerzalni stroj za ispitivanje mehaničkih svojstava te oprema potrebna za izvođenje DIC (digital image correlation) metode

Stohastički i visoko kontrastni crno bijeli uzorak, dobiven pomoću industrijskih sprejeva, primijenjen je na odgovarajuću površinu drva kako bi se poboljšalo podudaranje dobivenih slika unutar softwera korištenog za korelaciju digitalnih slika (Digital image correlation metoda) (slika 5).



Slika 6 Priprema uzoraka za ispitivanje korelacije digitalne slike

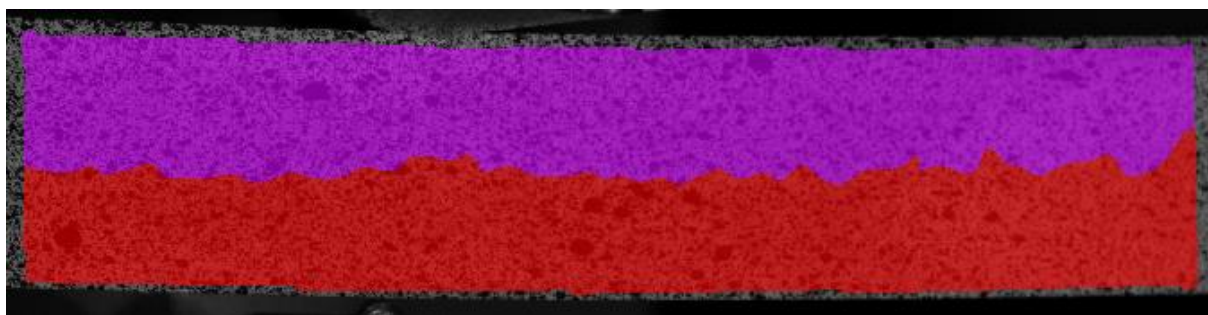
Deformacije izazvane u uzorcima pri 70% iznosa maksimalne sile opterećenja (F_{max}) zabilježene su s dvije CCD kamere AVT Stingray Copper F-504B® (Allied Vision Technologies, Osnabrück, Njemačka) opremljene lećama Pentax C2514-M® (Pentax Precision Co., Ltd., Tokyo, Japan). Polje vida postavljeno je na područje od interesa koje zauzima cijelu površinu uzorka u ispitivanom smjeru. Kamere su kalibrirane na način stereoskopskog mjerenja (kut kamera od 25°) kroz odgovarajuće pozicioniranje kalibracijske mreže. Ovaj optički raspored imao je faktor konverzije 8 px mm^{-1} (prostorna rezolucija $0,125 \text{ mm}$). Slike i primijenjena sila sinkronizirano su dobivani svakih $0,5 \text{ s}$ (4 Hz). Kontrast između komponenata uzorka na uzorkovanoj površini ispitivanog materijala poboljšao je pomoću dva izvora svjetlosti SobrietyCube 360 (Sobriety sro, Kuřim, Češka) opremljena LED senzorima Luminus Phlatlight CSM-360 (Luminus Devices Inc., Billerica-MA, SAD). Visoki kontrast ispitivane površine dobiven pripremom uzoraka industrijskim sprejevima osigurao je dovoljnu gustoću koreliranih točaka. Da bi se položaj neutralne linije dobio što preciznije, naprezanja su izračunata iz djelomičnih derivata pomaka koristeći Lagrangeovu notaciju u Vic-3D® v. 2010 (Correlated Solutions Inc., Columbia-SC, USA) koristeći najmanji dostupan filter naprezanja veličine 5×5 piksela.

3.2.1.2. Kalibracija sustava i položaj opreme za prikupljanje podataka

Da bi se dobila maksimalna prostorna razlučivost površine uzorka, prostor slike je postavljen na područje od interesa, koje zauzima cijelu površinu uzorka od $20 \times 300 \text{ mm}^2$. Takav prostor slike dobiven je na udaljenosti od 216 mm , koja je postavljena uz pomoć laserskog daljinomjera Bosh GLM 50 Professional (Robert Bosch GmbH, Leinfelden-Echterdingen, Njemačka), koji je postavljen na sredini utora između kamera. Optimalni kut kamere od 25° koji osigurava odgovarajući kut vida s obzirom na točnost mjerenja postignut je kada su kamere postavljene na klizač raspona 96 mm , a svaka kamera čini točno polovinu kuta kamere. Klizač s kamerama postavljen je uz pomoć laserskog snopa koji emitira daljinomjer na takav način da identificira centar slike s obzirom na središte prostora od interesa. Opisana geometrija optičkog uređaja kalibrirana je uz pomoć 60 lijevih i desnih slika kalibracijske mreže s razmakom od 4 mm u različitim geometrijskim orijentacijama. Takav optički raspored daje faktor pretvorbe $31,5 \text{ px mm}^{-1}$.

3.2.1.3. Prikupljanje podataka i točnost mjerenja

Svi eksperimentalni podaci sinkronizirano su dobivani svakih 0,5 s (4 Hz) pomoću hardverskog okidača, što je bilo primjereno s obzirom na induciranu brzinu opterećenja i za prepoznavanje uzorkovane površine drva od strane korištenog softvera. Polja naprezanja izračunata su iz djelomičnih derivata pomaka pomoću Lagrangeove notacije u Vic-3D v. 2010 (Correlated Solutions Inc., Columbia-SC, USA) (Slika 7). Da bi se postigao što je moguće precizniji položaj neutralne linije s odgovarajućom prostornom razlučivošću duž duljine uzorka, naprezanja su izračunata uz pomoć najmanjeg mogućeg pomičnog polja od 3×3 piksela i veličine filtra za naprezanje od 5×5 piksela. Stvaranje visokog kontrasta na površini uzoraka te pravilno podešavanje sustava osigurali su optimalan omjer između gustoće koreliranih točaka (6 piksela / mm²) i robusnosti podudaranja slike. Prosječna točnost mjerenja procijenjena je na temelju polja pomaka i naprezanja utvrđenih na 5 slika dok sila opterećenja nije bila primijenjena. Naprezanje u aksijalnom smjeru određeno je s točnošću 0,008935%, tj. 52 mikro naprezanja.



Slika 7 Raspored naprezanja i položaj neutralne linije referentnog uzorka pri 70% iznosa maksimalne sile (F_{max}) (Podaci dobiveni u programu Vic-3D v. 2010)

3.2.2. Čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti

Za test savijanja u 3 točke, raspon između nižih nosača bio je 222 mm. Središnja točka opterećenja je bila fiksna. Granica proporcionalnosti, krajnje opterećenje i pomak dobiveni su iz krivulja pomaka i opterećenja.

Čvrstoća na savijanje dobivena je na sljedeći način:

$$\sigma_s = \frac{3 \times F_{max} \times l}{2 \times b \times h^2} [MPa]$$

gdje je F_{max} sila loma [N], l je razmak između oslonaca [mm], b je širina [mm], a h visina (debljina) uzorka [mm].

Za modul elastičnosti koristili su se podaci ispitnog stroja koji je zabilježio pomak deflektometra pri djelovanju sile.

Modul elastičnosti dobio se prema formuli:

$$E = \frac{(F_{40\%} - F_{10\%}) \times l^3}{4 \times b \times h^3 \times (u_{40\%} - u_{10\%})} [GPa]$$

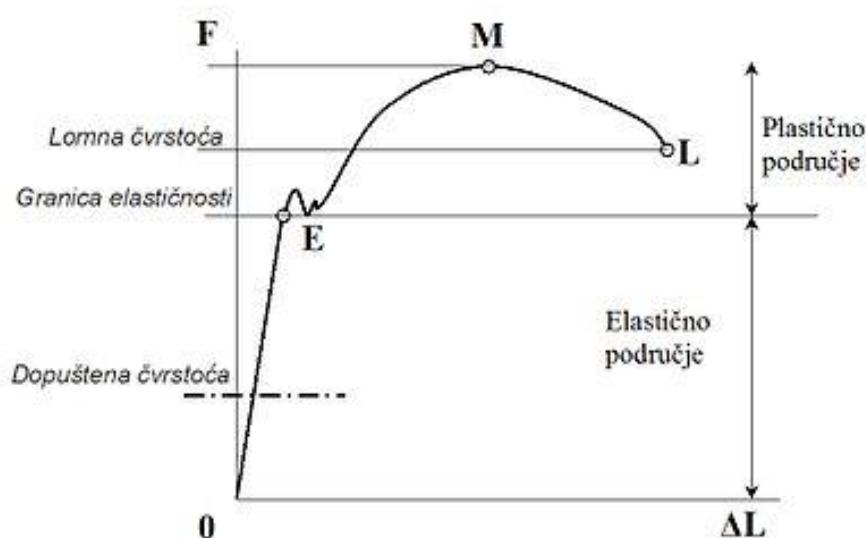
Gdje su $F_{10\%}$ i $F_{40\%}$ sile u iznosu 10 i 40% sile loma (F_{max}) [N], l je razmak između oslonaca [mm], b je širina uzorka [mm], h je visina (debljina) uzorka [mm], a $u_{10\%}$ i $u_{40\%}$ su pomaci u iznosu od 10 i 40% pomaka sile loma (F_{max})

Sva statistička analiza podataka vezana uz mehanička svojstva modificiranog materijala izvršena je u programu Statistica 13.

4. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava

4.1 Dijagrami naprezanja

Ispitivanjem karboniziranih uzoraka na savojnu čvrstoću dobiveni su dijagrami naprezanja koji predstavljaju međuovisnost σ – naprezanja i ϵ – relativnog produljenja ili linijske vlačne deformacije. U modificiranom materijalu koji je bio opterećen silom (F) nastaju naprezanja (σ) koja su uzrokovala njegovu deformaciju.



Slika 8 Dijagram naprezanja i njegove karakteristične vrijednosti (Jelaska, 2011.)

Karakteristične vrijednosti dijagrama naprezanja:

Granica proporcionalnosti – najviša vrijednost naprezanja do kojega je istežanje proporcionalno naprezanju. Za određeni porast sile F , proporcionalno će porasti produljenje ΔL . Ispitni uzorci se rastežu po Hookeovu zakonu. Sve deformacije materijala u ovom području su elastične. Po prestanku opterećenja uzorak se vraća na početnu dužinu L_0 , a apsolutna produljenja ΔL su vrlo mala.

Granica elastičnosti - Granica elastičnosti je granica nakon koje materijal više neće vratiti svoj prvobitni oblik nakon prestanka opterećenja ili je to maksimalno naprezanje koje materijal može podnijeti, a da ne dođe do trajne ili zaostale deformacije kada se opterećenje potpuno ukloni.

Maksimalna čvrstoća – Točka u kojoj sila dostiže svoju maksimalnu vrijednost.

Maksimalna sila $F_{\max}$ dijeljenja s prvobitnom površinom presjeka uzorka daje čvrstoću materijala. Iako uzorak još nije slomljen, sila potrebna za njegovu daljnju deformaciju opada.

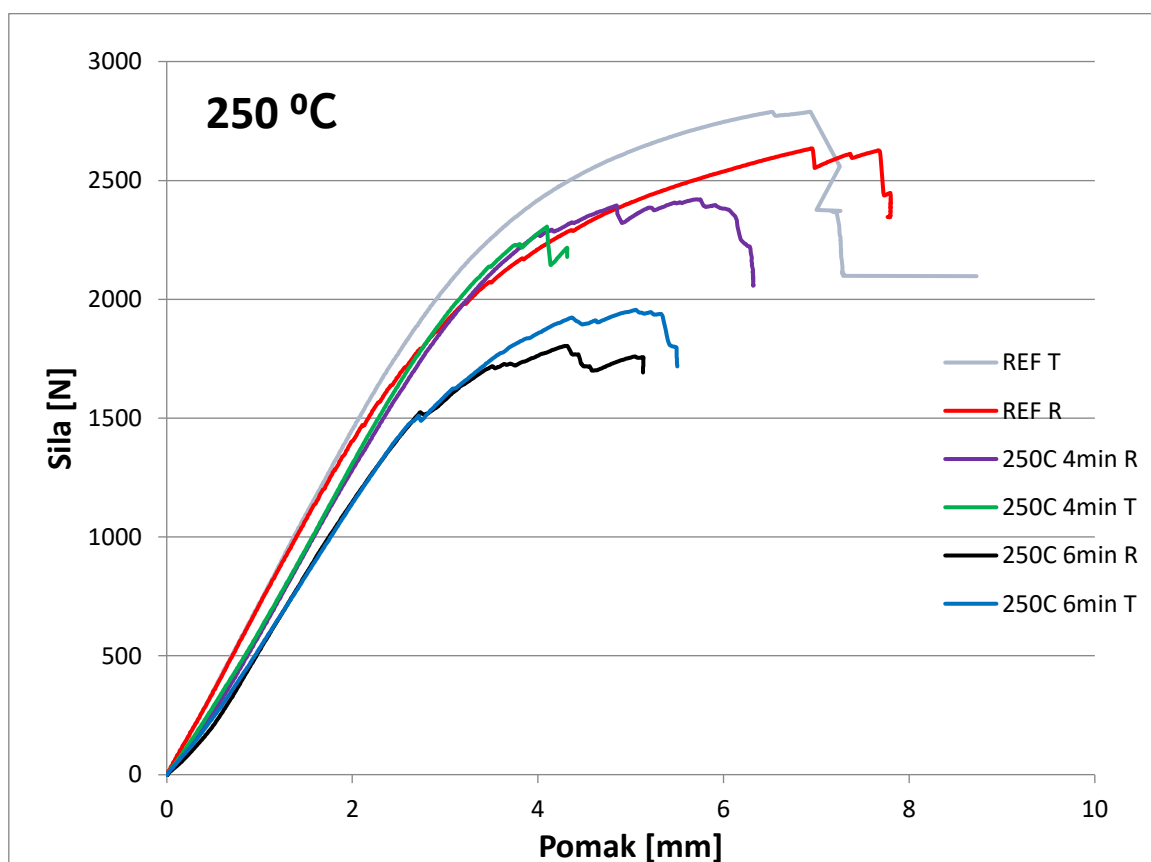
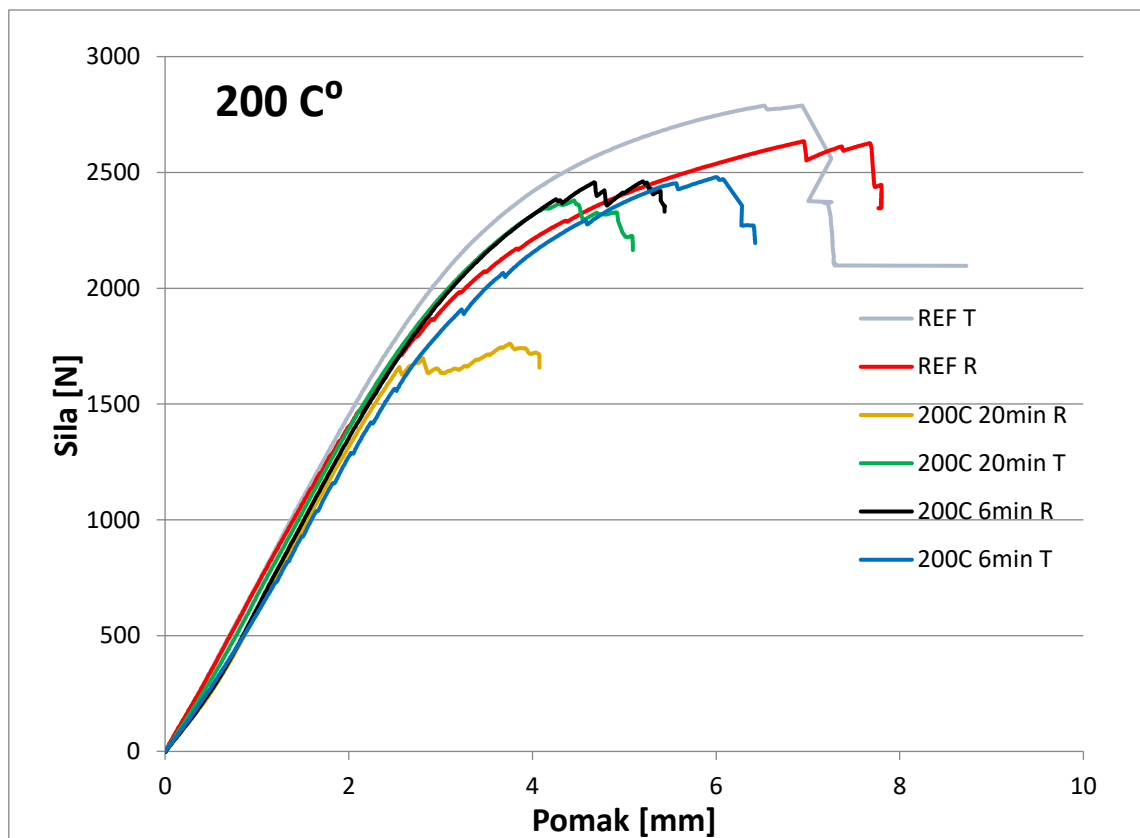
Čvrstoća loma - poslije točke M dolazi do daljnjeg izduženja uzorka uz pad sile. Ta izduženja imaju lokalni karakter i događaju se samo u zoni suženja, gdje je površina presjeka najmanja sve dok ne dođe do loma materijala.

Tablica 2 Prikaz karakterističnih maksimalnih sila i gustoća karboniziranih uzoraka (uzete su srednje vrijednosti)

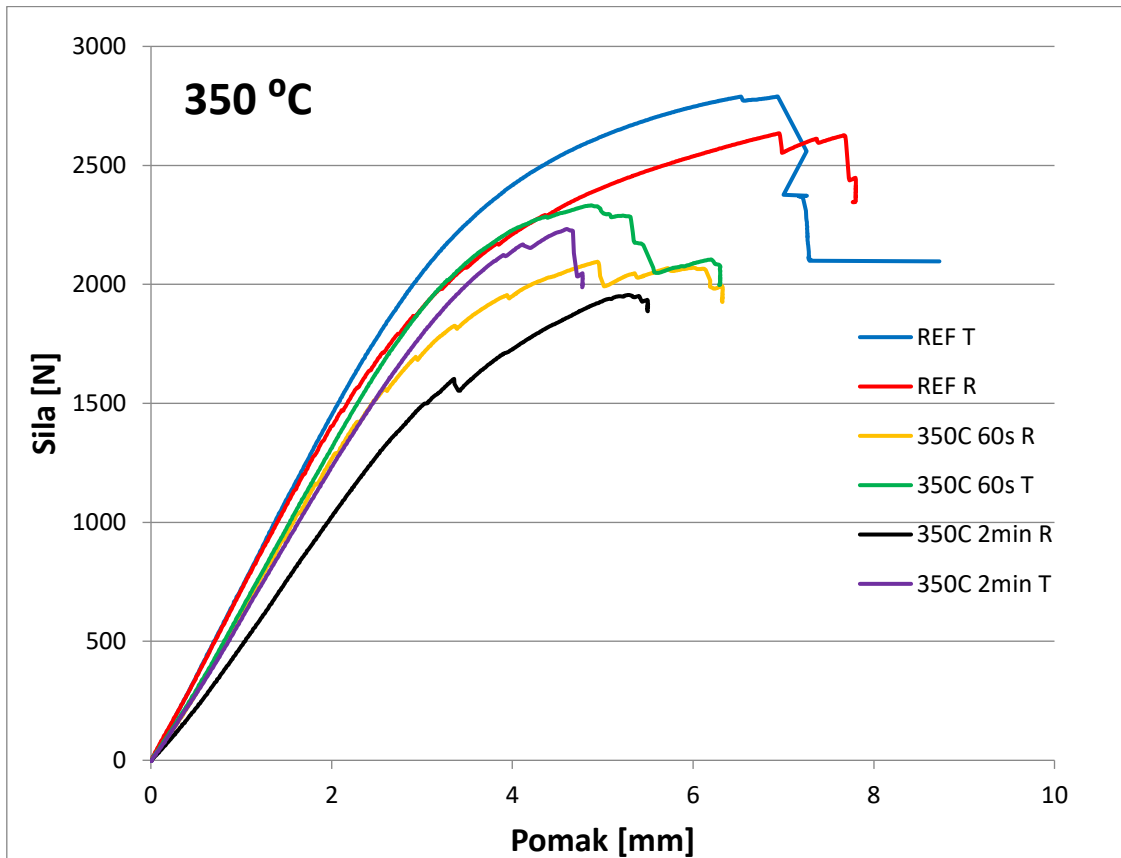
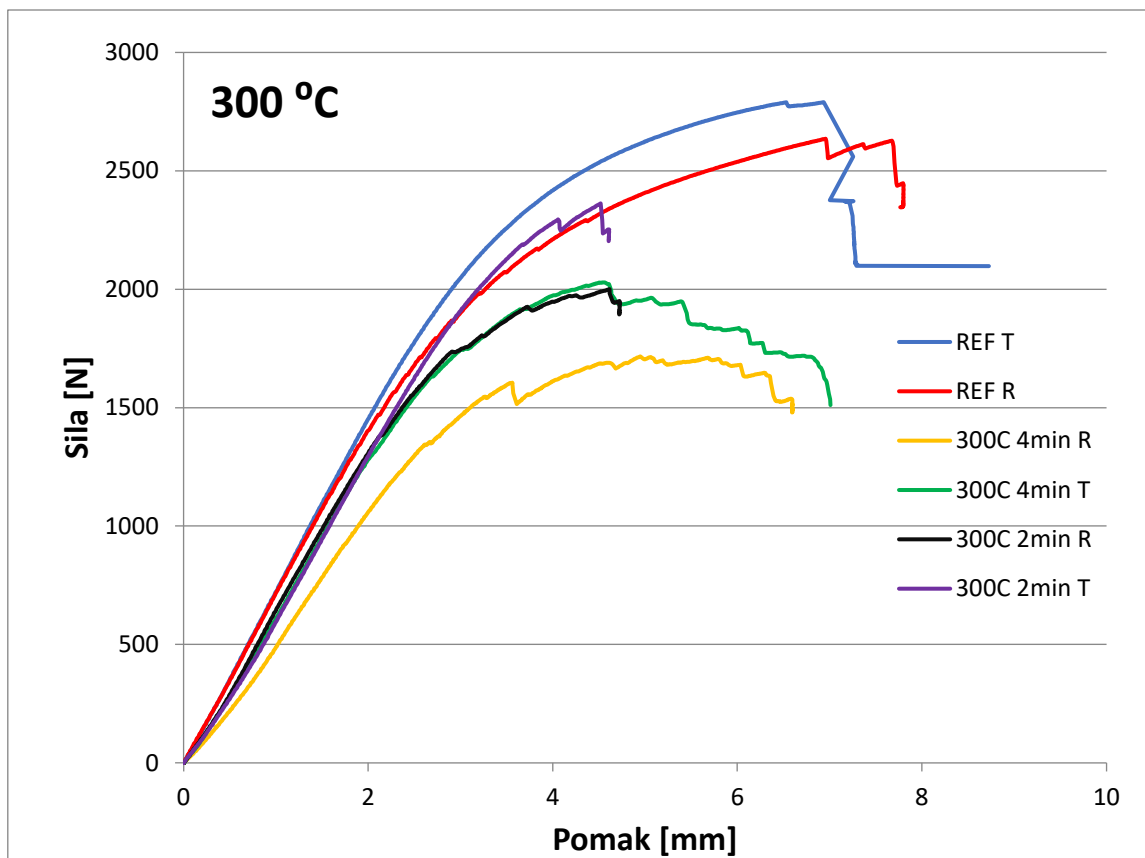
**U zagradama se nalaze standardne devijacije*

Uzorci	Vrijeme procesa	Maksimalna sila ($F_{\max}$) [N]		Gustoća (ρ) [kg/m ³]	
		R	T	R	T
Referentni	/	2606.21 (262.20)	2807.48 (298.40)	708.01 (42.17)	703.93 (50.54)
200 °C	6min	2230.00 (132.20)	2524.49 (191.62)	680.71 (31.76)	737.74 (31.89)
	20min	1724.00 (188.70)	2443.18 (280.15)	680.02 (43.61)	701.09 (31.88)
250 °C	4min	2523.66 (215.15)	2307.59 (159.36)	661.38 (84.61)	704.74 (13.10)
	6min	1820.86 (152.11)	1937.60 (347.96)	689.27 (41.87)	688.52 (19.35)
300 °C	2min	1968.02 (235.38)	2350.37 (180.68)	651.88 (59.60)	710.59 (34.93)
	4min	1717.59 (116.35)	2065.07 (183.82)	691.83 (27.90)	714.29 (25.95)
350 °C	60s	2059.85 (87.19)	2396.55 (193.09)	665.80 (38.36)	707.24 (19.42)
	2min	1961.80 (206.89)	2243.75 (180.76)	695.24 (43.11)	706.45 (32.83)
400 °C	30s	2243.43 (250.84)	2285.52 (148.41)	664.53 (38.08)	717.19 (28.06)
	60s	1820.42 (303.36)	2138.24 (142.43)	710.75 (39.50)	705.54 (18.12)

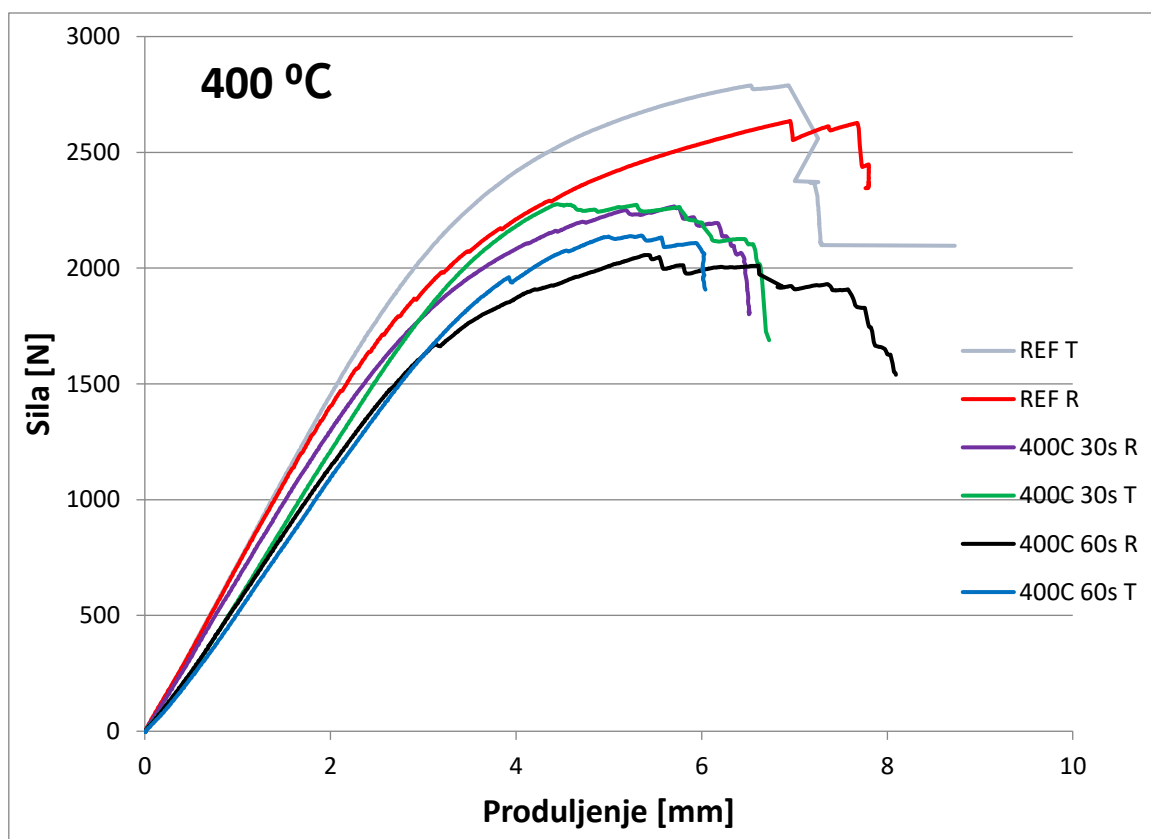
Za svaku temperaturnu grupu uzoraka izrađeni su dijagrami naprezanja kako bi se prikazale razlike maksimalnih sila između referentnih i modificiranih uzoraka bukovine.



Slika 9 Dijagrami naprezanja za različite vremensko-temperaturne režime



Slika 9 Dijagrami naprezanja za različite vremensko-temperaturne režime



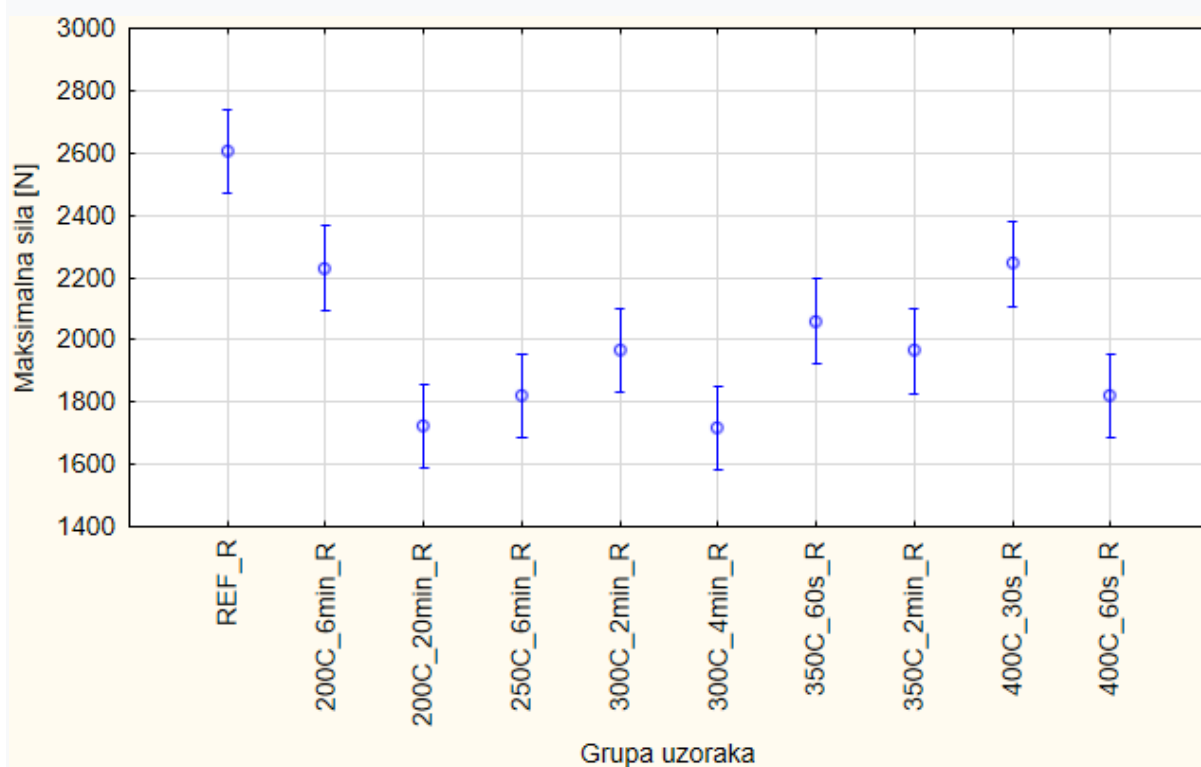
Slika 9 Dijagrami naprezanja za različite vremensko-temperaturne režime

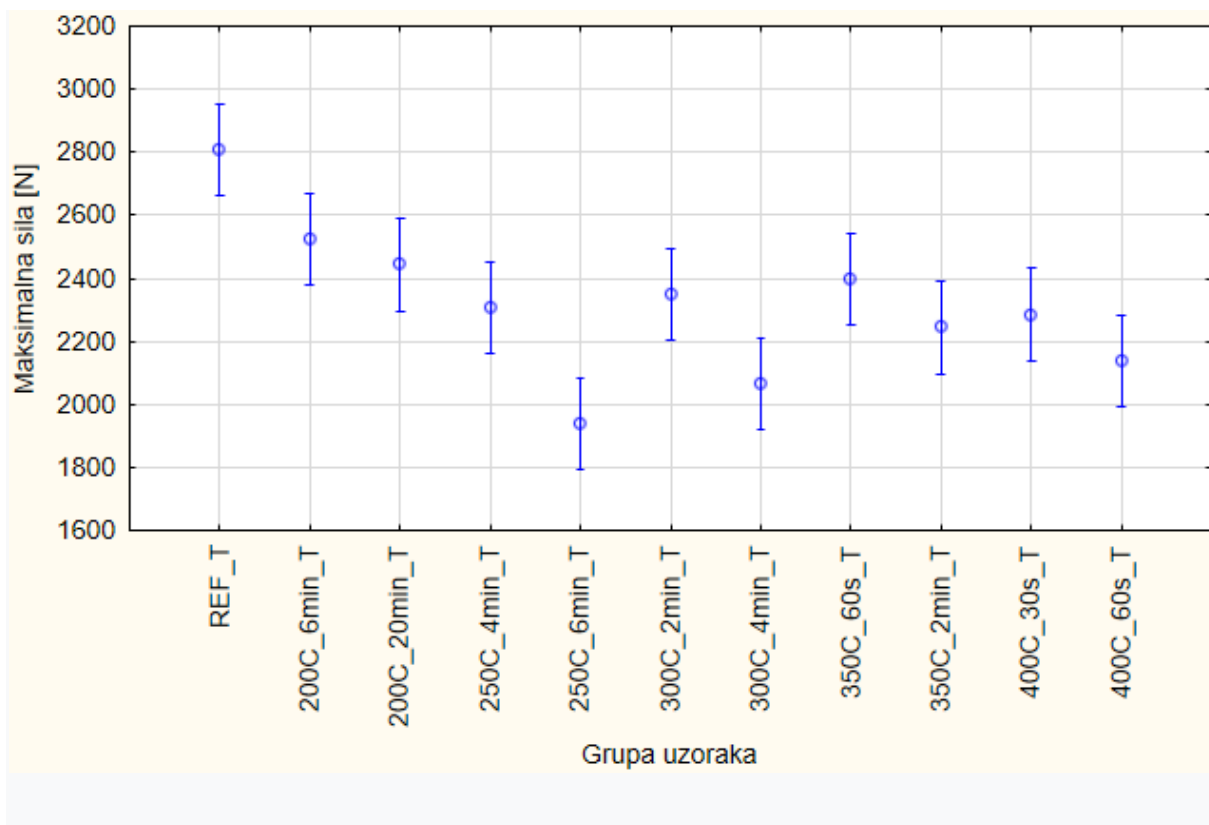
Kao i što je očekivano, maksimalna sila referentnih uzoraka veća je u odnosu na maksimalnu silu površinski karboniziranih uzoraka. U nedavnim istraživanjima degradacija hemiceluloze navedena je kao glavni faktor gubitka mehaničkih svojstava termički modificiranih uzoraka, a posebno utječe na savojnu čvrstoću (Cademartori i dr., 2012). Jedan od razloga za pad mehaničkih svojstava površinski karboniziranih uzoraka može biti i kristalizacija amorfne celuloze.

Mehanička svojstva u tangentnom smjeru su veća nego u radijalnom smjeru. Iznimka je skupina uzoraka karbonizirana pri temperaturi od 250 °C u trajanju od 4min, gdje je maksimalna sila u radijalnom smjeru veća od maksimalne sile u tangentnom smjeru. Nakon analize uzoraka (250 °C / 4min T) zaključilo se kako pojedini uzorci imaju nepravilan tok vlaknaca uzduž uzorka, te se može pretpostaviti kako je to rezultiralo manjoj čvrstoći materijala. Također je bitno navesti kako su uzorci ispitivani u tangentnom smjeru imali generalno veću gustoću (u prosjeku za 25 kg/m³). Neki uzorci tretirani istim temperaturama također su rezultirali većom gustoćom pri duljim vremenskim režimima (npr. gustoća uzoraka tretiranih pri 300 °C u trajanju od 2min

iznosi 651.88, dok kod tretiranja u trajanju od 4min iznosi 691.83). Ovo se može pripisati intenzitetu karbonizacije tijekom duljem izlaganju uzoraka, što rezultira pucanjem površine, a samim time i povećanjem poroznosti. Rezultat toga je povećana kapilarna adsorpcija vode, te se može pretpostaviti kako su takvi uzorci imali veći sadržaj vode.

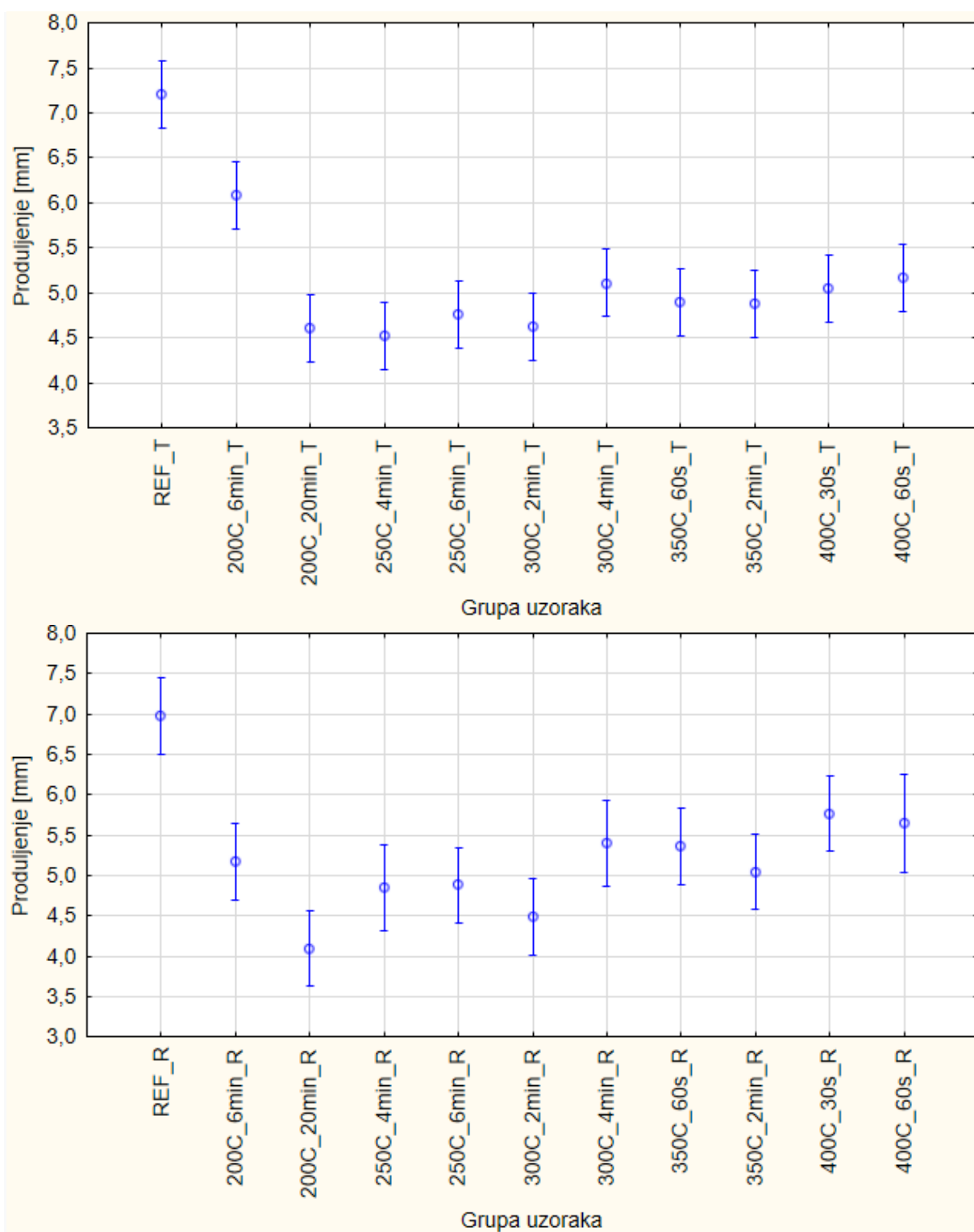
Poznata je činjenica da mehanička svojstva drva opadaju kako se temperatura procesa termičke modifikacije povećava. Ovo istraživanje pokazalo je da vrijeme procesa znatno utječe na konačna mehanička svojstva materijala, te se iz priloženih rezultata može vidjeti da neke skupine uzoraka imaju veća mehanička svojstva iako su modificirane pri višim temperaturama. Tako je npr. skupina uzoraka 400 °C/30s R podnijela skoro identičnu maksimalnu silu kao i skupina uzoraka 200 °C/6min R. Iz ovoga se može vidjeti kako vrijeme procesa igra veliku ulogu u degradaciji hemiceluloze, čak i kada je temperatura procesa dvostruko veća kao u iznad navedenoj usporedbi. Maksimalne sile s obzirom na pojedine skupine uzoraka mogu se vidjeti na slici 10.





Slika 10 Maksimalne sile (R i T) za pojedine skupine uzoraka

Čvrstoća na savijanje i žilavost su svojstva koja su najviše izmijenjena tijekom termičke modifikacije drva (Rapp i dr., 2006). Slike 11 i 12 prikazuju utjecaj površinske karbonizacije na deformabilnost (pomak) (mm) i rad do F-max (N mm) te utjecaj na uzorke tijekom ispitivanja savojne čvrstoće statičkim ispitivanjem u 3 točke, što može biti dobar pokazatelj smanjenja žilavosti modificiranog materijala.

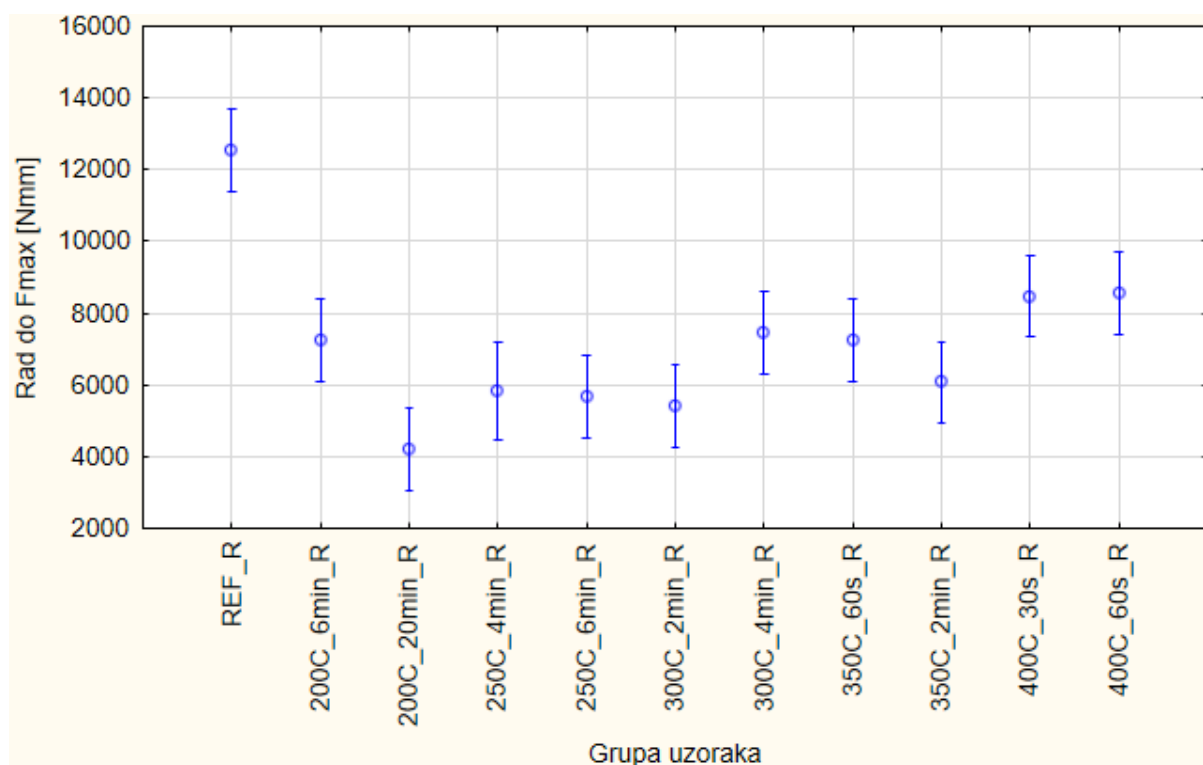


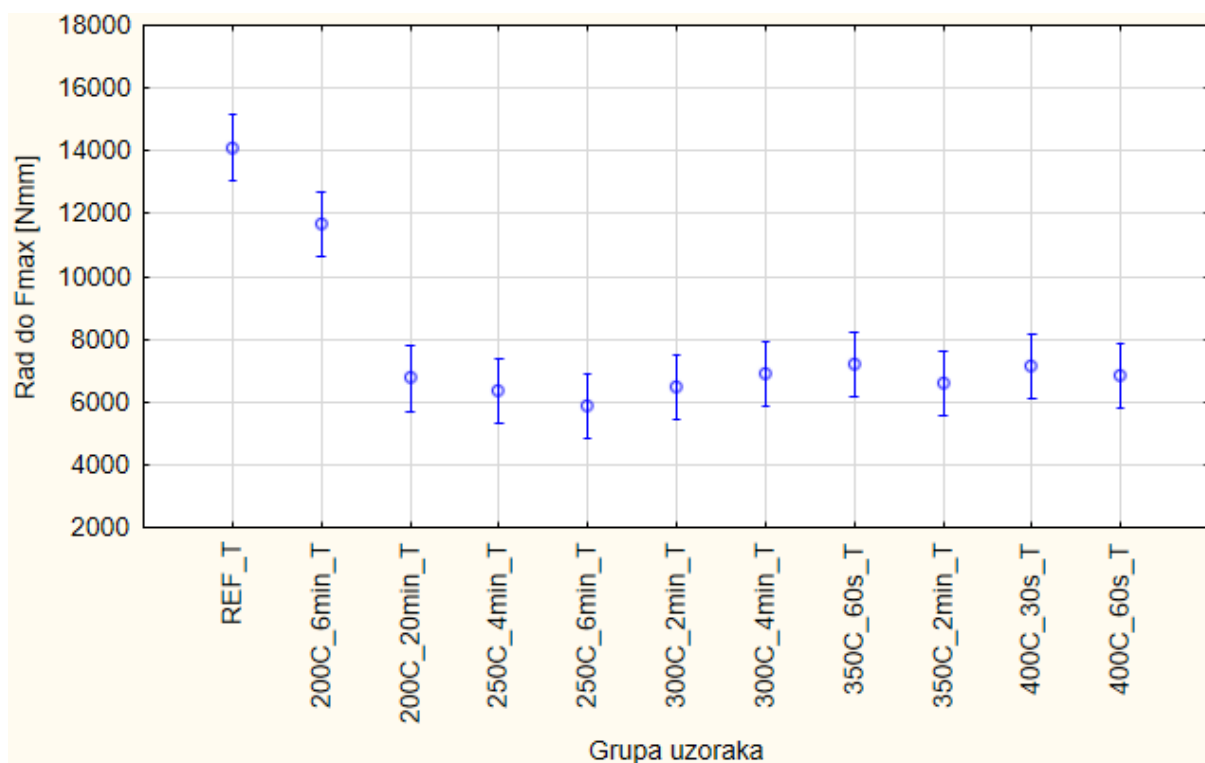
Slika 11 Produljenje uzoraka (R i T) u trenutku djelovanja maksimalne sile (F_{max})

Iz priložene statističke analize može se zaključiti kako su modificirani uzorci podnijeli znatno manju silu prilikom loma od referentnih uzoraka. Kod uzoraka ispitanih u radijalnom smjeru vidi se da su pomaci uzoraka manji kod nižih temperatura, te duljih vremena procesa (uzorak ispitivan u trajanju od 20 minuta ima najmanji pomak).

Kod uzoraka ispitanih u tangentnom smjeru vidi se da je uzorak modificiran pri 200°C/ 6min izdržao znatno veću silu prije loma od ostatka modificiranih uzoraka. Osim što je bila tretirana pri nižoj temperaturi, ta skupina uzoraka je također imala najveću prosječnu gustoću uzoraka i samim time najveću maksimalnu čvrstoću. Pomaci ostalih uzoraka neznajčajno rastu smanjenjem vremena procesa, iako su temperature procesa veće.

S obzirom na rezultate može se zaključiti kako površinski karbonizirana bukovina nije potencijalno pogodan materijal za primjenu gdje je prirodna savitljivost materijala potrebna (bačve, brodovi, ograde itd.)





Slika 12 Rad potreban da se dosegne maksimalna sila (F_{max}) (R i T)

Kod rada potrebnog da se dosegne maksimalna sila vidi se sličan trend kao i kod prikaza deformacija prilikom maksimalne sile. Kod uzoraka ispitanih u radijalnom smjeru vidi se da je kod nižih temperatura i kraćih vremena procesa generalno potreban veći rad kako bi se dosegla maksimalna sila.

Kod uzoraka ispitanih u tangentnom smjeru opet se vidi da je za skupinu uzoraka 200°C/6min T bio potreban najveći rad kako bi se dosegla maksimalna sila u odnosu na ostale modificirane uzorke.

4.2 Čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti

Čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti referentnih i jednostrano karboniziranih uzoraka prikazani su u tablici 3. Ispitivanje na savijanje se vršilo tako da je karbonizirana površina bila u vlačnoj zoni.

Tablica 3 Čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti referentnih i modificiranih uzoraka (uzete su srednje vrijednosti)

*u zagradama se nalaze standardne devijacije

Uzorci	Vrijeme procesa	Čvrstoća na savijanje [MPa]		Modul elastičnosti [GPa]	
		R	T	R	T
Referentni	/	116.53 (10.45)	126.61 (14.77)	13.78 (1.12)	14.68 (1.40)
200 C ⁰	6min	99.06 (6.62)	118.31 (16.54)	12.68 (0.97)	15.01 (2.21)
	20min	80.15 (8.68)	112.12 (12.58)	11.93 (0.88)	14.91 (0.78)
250 C ⁰	4min	99.39 (9.88)	105.27 (6.97)	12.78 (0.75)	14.07 (0.71)
	6min	86.04 (7.82)	88.98 (16.45)	12.82 (1.28)	13.75 (1.89)
300 C ⁰	2min	87.61 (12.25)	109.33 (9.80)	12.07 (1.69)	14.31 (1.16)
	4min	84.42 (6.35)	97.48 (9.45)	12.16 (0.56)	13.89 (0.86)
350 C ⁰	60s	92.09 (3.23)	110.17 (7.44)	12.61 (0.35)	13.85 (1.17)
	2min	95.09 (9.21)	105.94 (9.41)	12.53 (1.49)	13.08 (0.99)
400 C ⁰	30s	101.83 (13.50)	107.06 (6.82)	12.90 (1.35)	13.47 (0.70)
	60s	87.33 (14.10)	103.58 (8.18)	11.91 (1.51)	12.91 (0.89)

Generalno govoreći, termička modifikacija značajno smanjuje čvrstoću na savijanje. Pad čvrstoće na savijanje manji je u tangentnom smjeru, nego u radijalnom smjeru. Najmanji pad čvrstoće na savijanje otkriven je kod skupine uzoraka modificiranoj pri 200°C u tangentnom smjeru, gdje je pri vremenu procesa od 6min zapažen pad čvrstoće na savijanje od samo 7%, a pri 20min pad čvrstoće na savijanje iznosio je 11%. Iz ovih rezultata se vidi da pri 200°C degradacija hemiceluloze nije bila intenzivna, te mehanička svojstva nisu znatno narušena u odnosu na ostale skupine uzoraka.

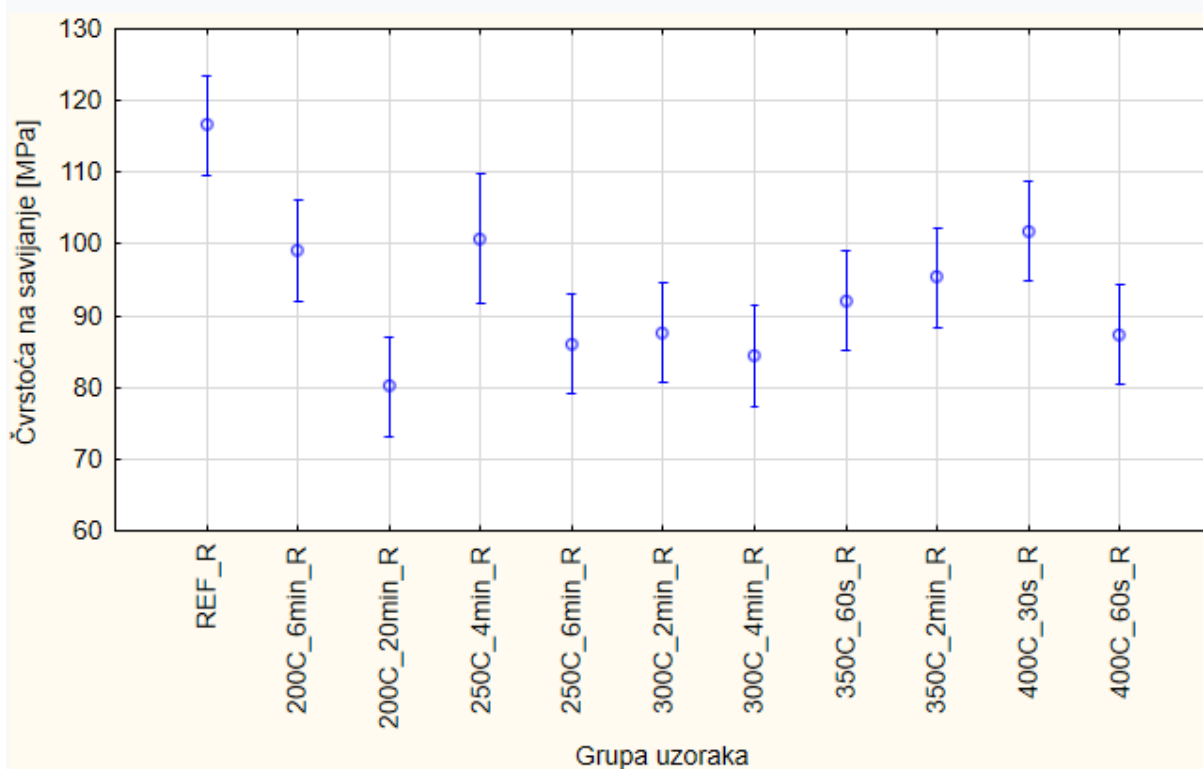
Pad čvrstoće na savijanje kod uzoraka ispitanih u radijalnom smjeru kretao se od 12-31%, dok se kod uzoraka ispitanih u tangentnom smjeru pad čvrstoće na savijanje kretao od 7-23%.

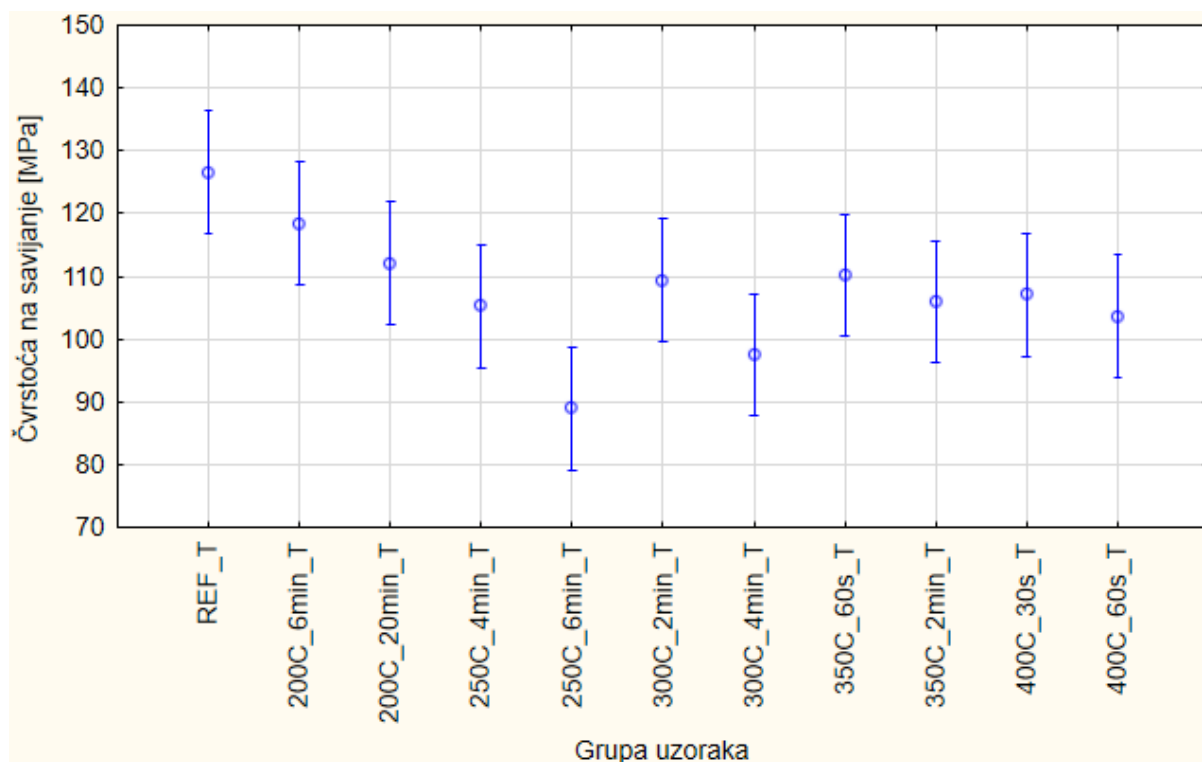
Cademartori i suradnici (2012) naveli su da je nakon termičke modifikacije pri 180°C u trajanju od 4 sata čvrstoća na savijanje smanjena za oko 21,29% i oko 49,9% kada su parametri procesa bili 240°C i 8 sati. Iz ovoga se može vidjeti kako se

površinskom karbonizacijom mogu koristiti znatno veće temperature i kraća vremena procesa uz postizanje zadovoljavajućih rezultata (npr. kod režima 400/30s T i 400/60s T primijećen je pad čvrstoće na savijanje u vrijednosti od samo 15% i 18%).

Mnoga su istraživanja pokazala neznatno povećanje modula elastičnosti kod drva koje se tretiralo kraćim vremenima procesa, jer smanjenje ovog svojstva ovisi o temperaturi i uvjetima procesa (Hill, 2006). Tako se kod režima 200/6min T i 200/20min T modul elastičnosti povećao za ~2%. Ostale vrijednosti modula elastičnosti za uzorke radijalnih i tangentialnih smjerova pale su za 8-10%. Iz prijašnjih istraživanja prikazano je kako promjene modula elastičnosti u velikoj mjeri ovise o vrsti drva.

Statistička analiza podataka za čvrstoću na savijanje i modul elastičnosti prikazani su na slikama 13 i 14.



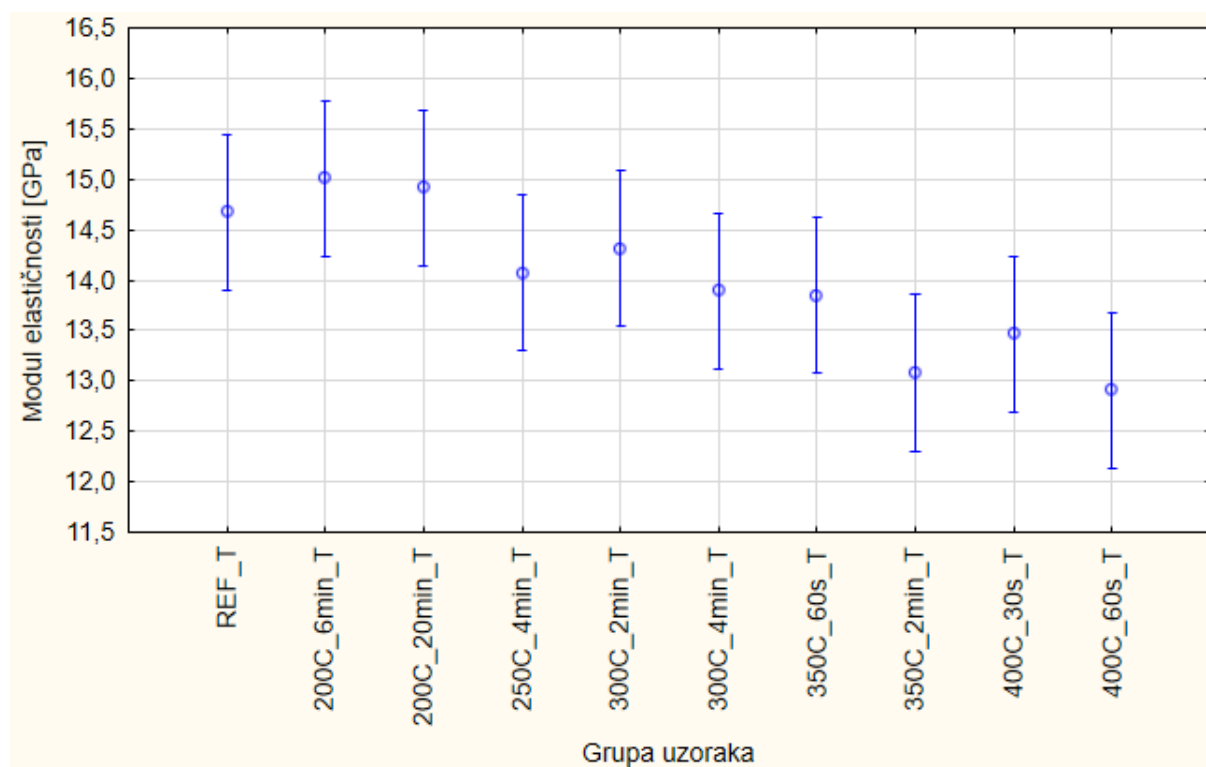
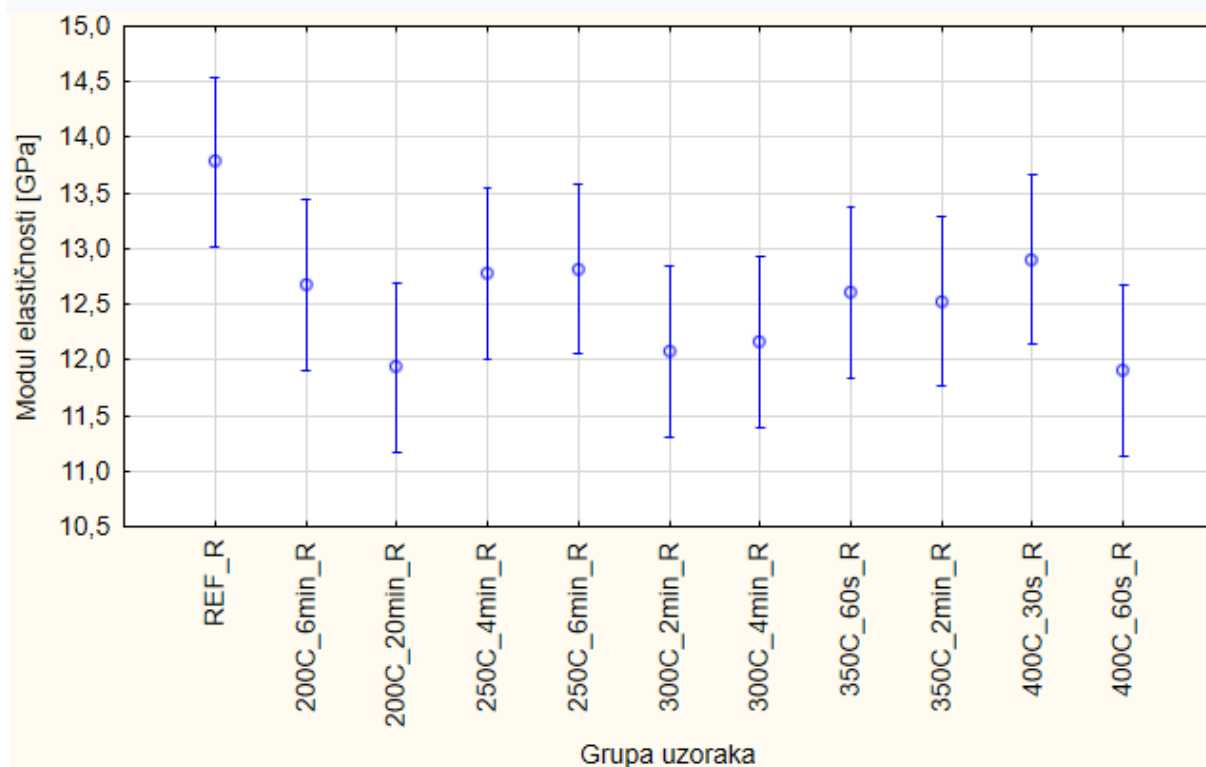


Slika 13 Čvrstoća na savijanje (R i T)

Iz prikazanih rezultata mogu se vidjeti odstupanja vrijednosti čvrstoće na savijanje za ispitane uzorke. Kod uzoraka ispitanih u radialnom smjeru vide se varijacije u čvrstoći na savijanje. Uzorci ispitivani pri nižim temperaturama i kraćim vremenima pokazuju nešto veću čvrstoću na savijanje (iznimka je skupina uzoraka 400/60s R). Kod uzoraka ispitanih u tangentnom smjeru vidi se da skupina uzoraka 250/6min T pokazuje nižu čvrstoću na savijanje od ostalih skupina. Ta skupina uzoraka imala je najmanju gustoću uzoraka te najmanju maksimalnu čvrstoću u tangentnom smjeru.

Varijacije rezultata mogu ovisiti i o nekoliko drugih razloga. Prvo, varijacije karakteristika prirodnog drva (varijacije gustoće, širina godova i njihova orijentacija) mogu imati neznatan utjecaj na rezultate iako su uzorci izrađeni od istih piljenica. Drugo, površinska karbonizacija drva dovela je do smanjenog ravnotežnog sadržaja vode i samim time različite skupine uzoraka imaju varijacije u sadržaju vlage. Prema literaturi, smanjenjem sadržaja vode za 1% (odnosi se na vezanu vodu) čvrstoća

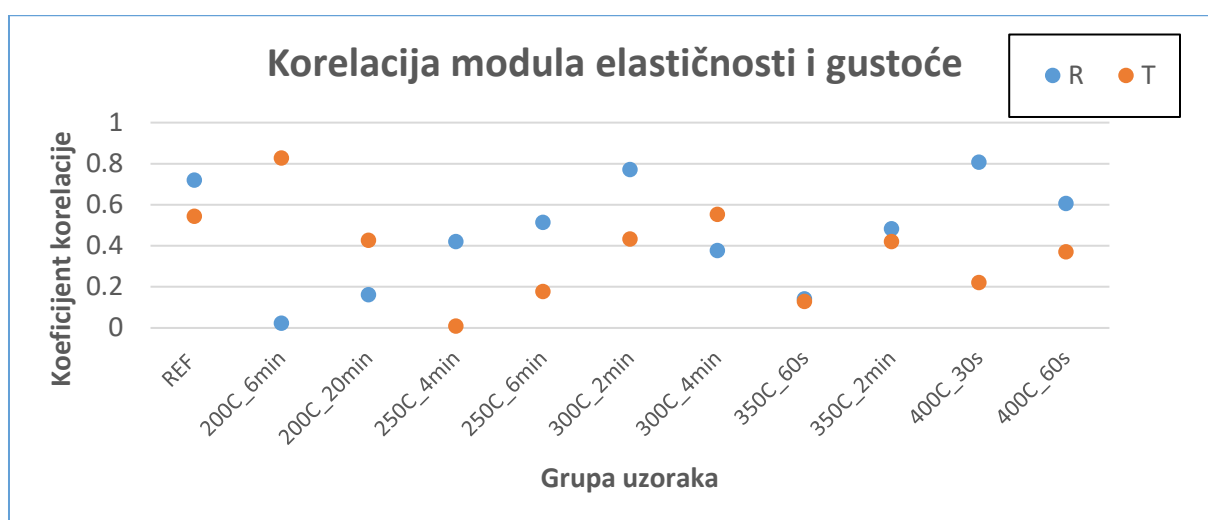
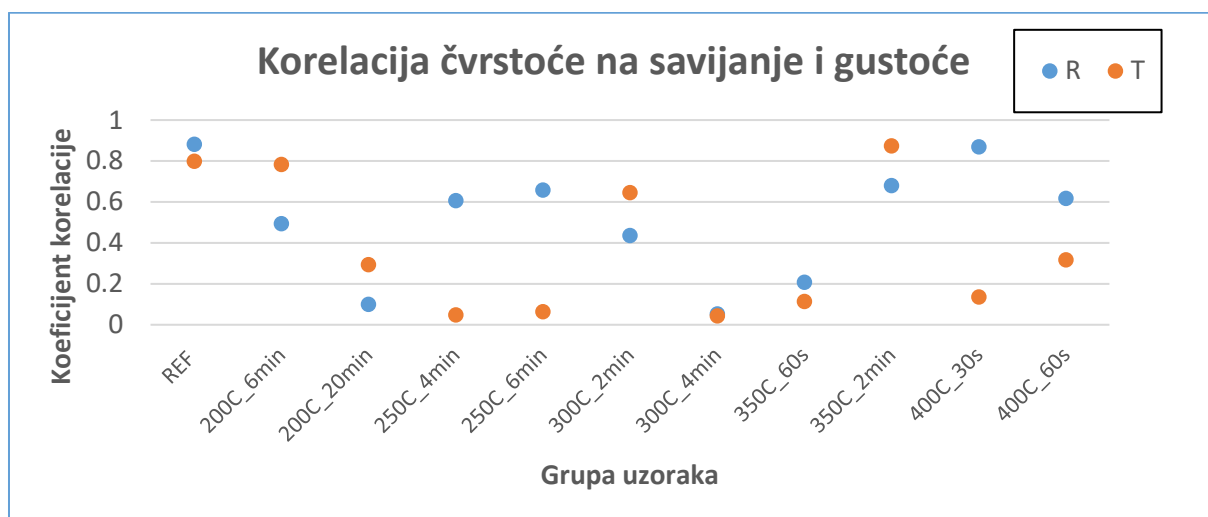
drva povećava se za ~3-4%. Treće, karbonizirana površina se može komprimirati kao posljedica omekšanja površine (plastifikacija) tijekom izlaganja uzoraka visokim temperaturama. To bi znatno utjecalo na čvrstoću komprimirane strane tijekom ispitivanja na savojnu čvrstoću.



Slika 14 Modul elastičnosti (R i T)

Rezultati modula elastičnosti za skupinu uzoraka ispitanih u radijalnom smjeru pokazuju da su uzorci tretirani nižim temperaturama i kraćim vremenima procesa imali nešto veći modul elastičnosti (vidi se da su skupine uzoraka tretirane najduljim vremenom (20min) i najvećom temperaturom (400°C) imale najmanji modul elastičnosti). Iz toga se može zaključiti da su temperatura i vrijeme imali utjecaj na ovo svojstvo.

Kod uzoraka ispitanih u tangენტnom smjeru vidi se neznatan porast modula elastičnosti (oko 2%) kod skupina uzoraka ispitanih pri 200°C. Kod ostalih skupina uzoraka vidi se da modul elastičnosti pada porastom temperature procesa.



Slika 15 Korelacija čvrstoće na savijanje i modula elastičnosti s gustoćom

Gustoća se obično smatra najbitnijom karakteristikom drva koja utječe na mehanička svojstva. S povećanjem gustoće unutrašnja naprezanja raspoređena su preko veće količine materijala i samim time mehanička svojstva su veća.

Iz priloženih grafova može se vidjeti da je kod nekih skupina uzoraka korelacija između čvrstoće na savijanje i gustoće, te modula elastičnosti i gustoće skoro pa nepostojeća. Do ovakvih rezultata moglo je doći iz nekoliko razloga.

Kao što je prethodno spomenuto, različite skupine uzoraka imaju različit ravnotežni sadržaj vode zbog različitih temperatura tijekom procesa karbonizacije. Također je bitno navesti varijacije u gustoći između pojedinih skupina uzoraka koje se mogu vidjeti u tablici 2. Slaba korelacija određenih grupa uzoraka može se pripisati i relativno malom broju proba po pojedinoj grupi uzoraka (10 proba po grupi uzoraka). Smatra se da su na slabu korelaciju u najvećoj mjeri utjecale mikropukotine koje su nastale na pojedinim uzorcima tijekom procesa karbonizacije, te plastifikacija površine koja je nastala pri visokim temperaturama i znatno utjecala na čvrstoću uzoraka.

S obzirom na iznad navedene razloge, u ovom istraživanju gustoća se ne može koristiti kao dobar prediktor mehaničkog ponašanja ispitivanih vrsta drva.

4.3 Pozicija neutralne linije

Neutralna linija kod drva definirana je kao uzdužna ravnina u presjeku koja nije podvrgnuta nikakvim naprezanjima ili promjenama duljine kada je materijal podvrgnut savijanju. Tijekom ispitivanja uzoraka na savijanje, dio presjeka iznad neutralne linije biti će opterećen tlačnim naprezanjima, dok će dio presjeka ispod neutralne linije biti opterećen vlačnim naprezanjima. Prema tome, neutralna linija je mjesto na kojem naprezanja prelaze iz vlačne zone u tlačnu zonu (Bedford i Leichti, 2001). Ako je modul elastičnosti materijala u zoni vlaka i tlaka jednak, područja vlačih i tlačnih naprezanja u drvu također će biti jednaka, te će neutralna linija biti smještena u sredini uzorka (Gere i Timoshenko, 1997). Ovo pravilo vrijedi za izotropne i homogene materijale. Za drvene elemente, ovo ne mora uvijek biti slučaj (Betts i dr. 2010). Greške drva kao npr. kvрге, različite tekstura te svojstva presjeka čine drvo

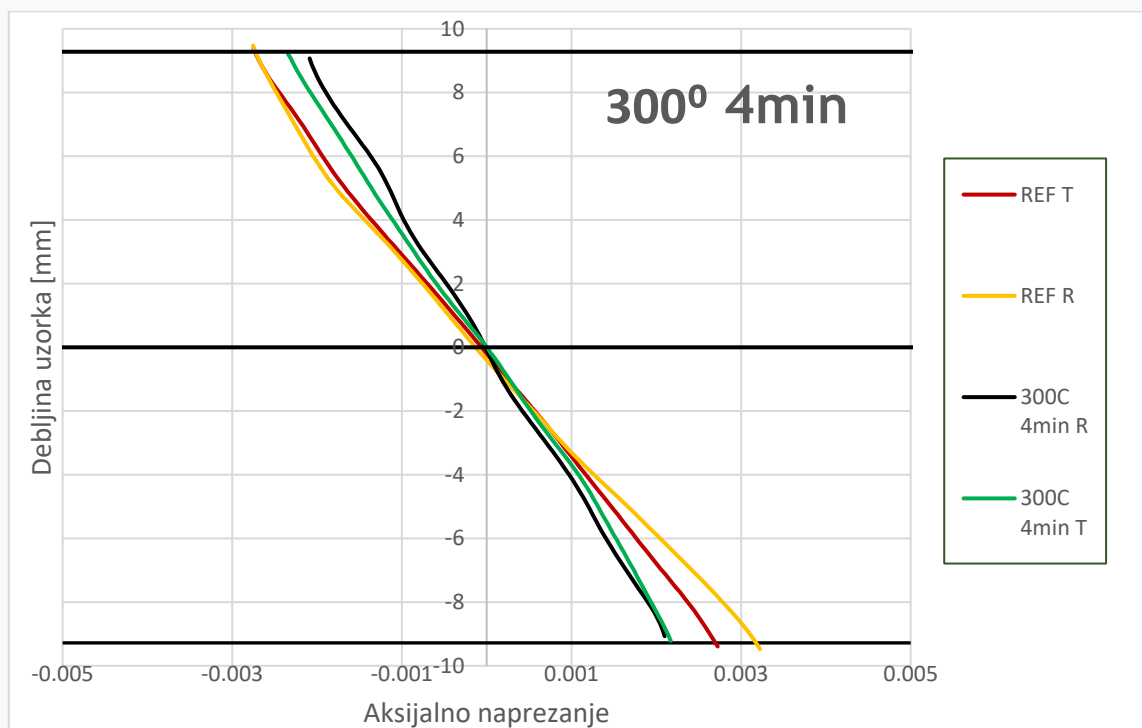
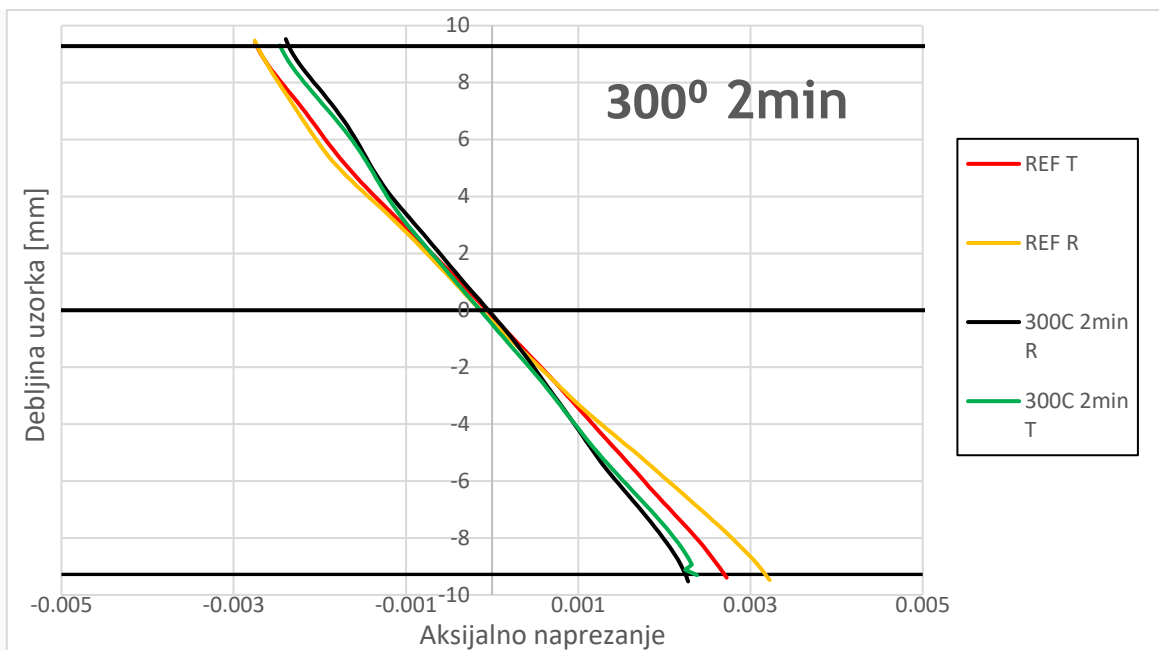
anizotropnim i nehomogenim materijalom te uzrokuju dodatna odstupanja od idealnog stanja.

Poznavanje stvarne pozicije neutralne linije olakšala bi bolje razumijevanje mehaničkih svojstava drvenih elemenata. Kako bi se došlo do odgovora na to pitanje, korištena je metoda digitalne korelacije slike tijekom ispitivanja uzoraka drva na statičko savijanje u tri točke. Neutralna linija odredila se preko informacija o aksijalnim naprezanjima dobivenih DIC metodom u trenutku djelovanja sile na uzorak u iznosu od 70% vrijednosti maksimalne sile (F_{max}) .

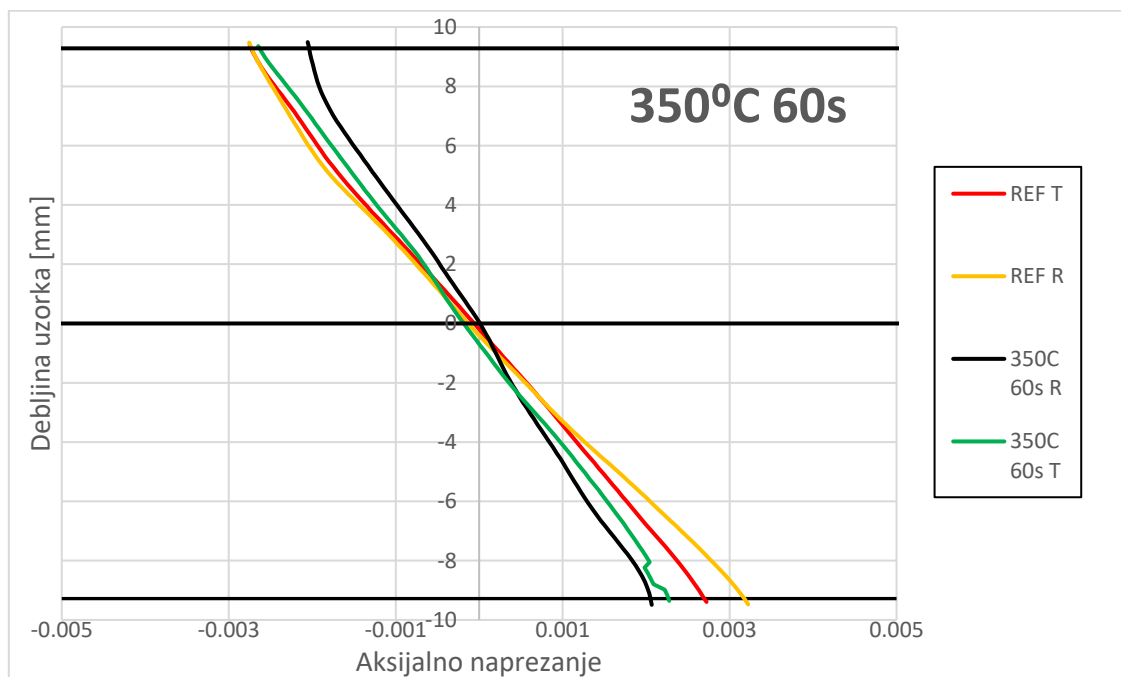
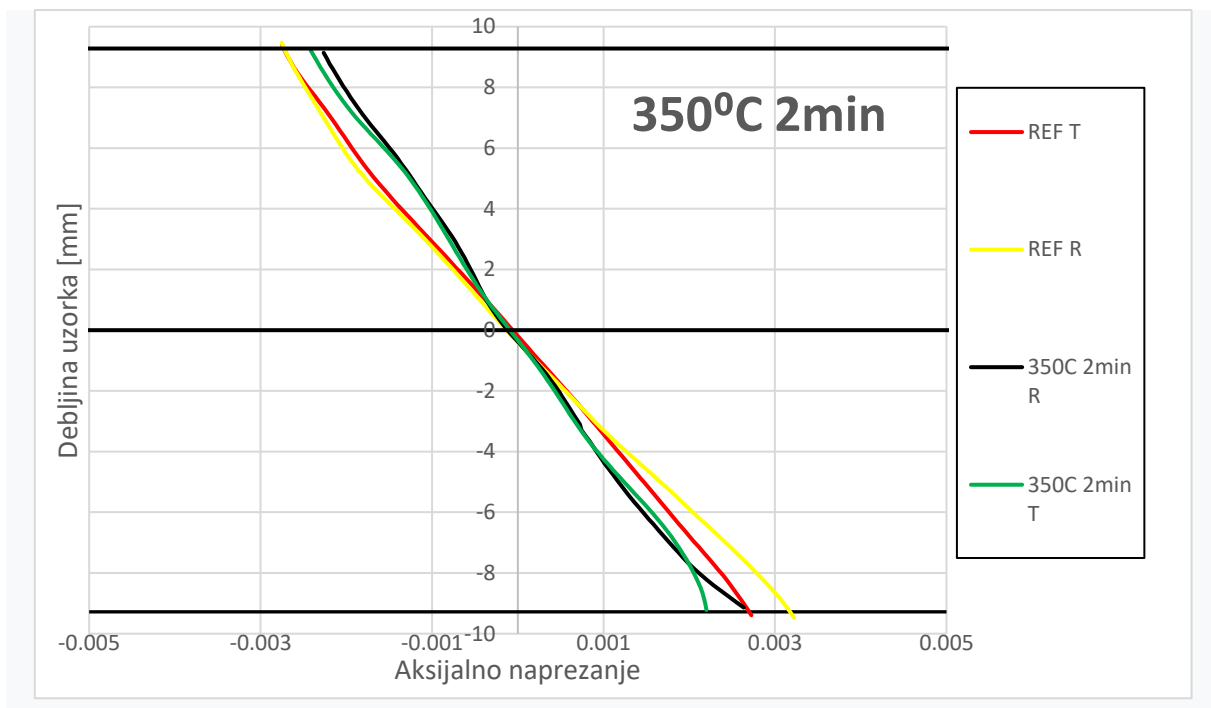


Slika 16 Primjer uzorka iz skupine 400/60s T u trenutku djelovanja sile u iznosu od 70% vrijednosti maksimalne sile (F_{max})

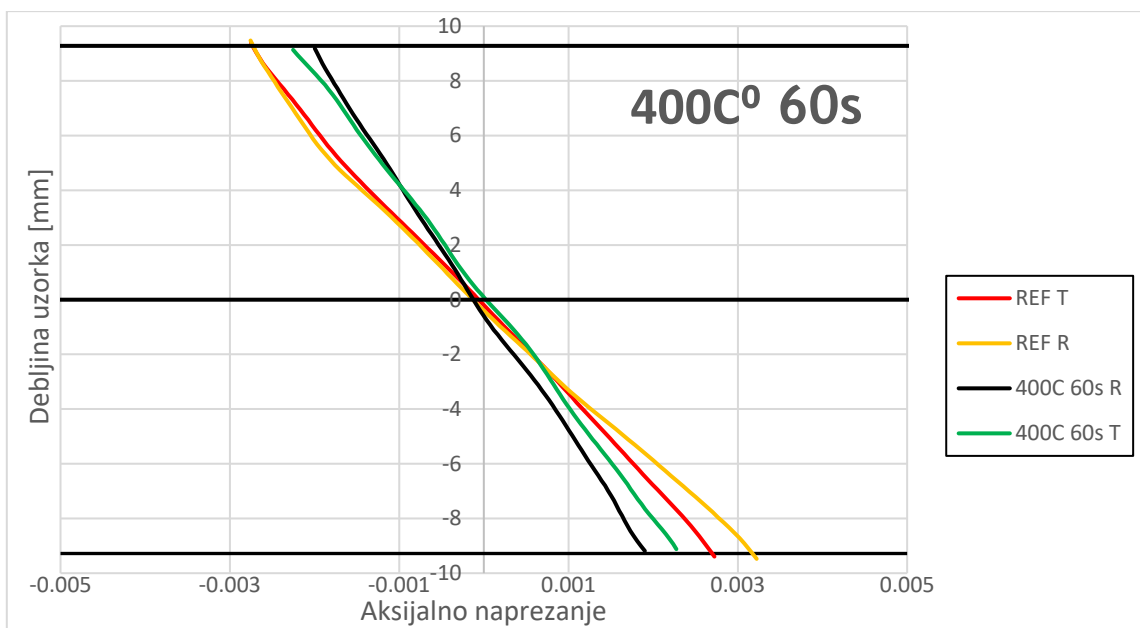
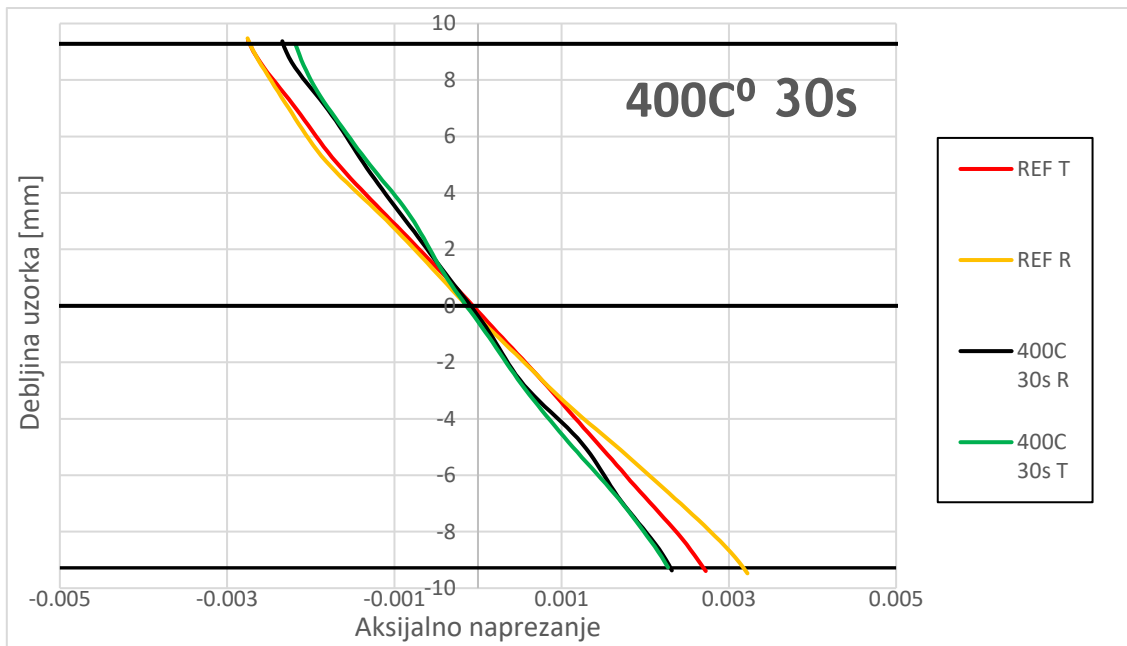
Kao što se vidi na slici 16, pozicija neutralne linije nije ravna linija, već je nazubljena te njena lokacija varira po duljini presjeka. Za prikazivanje pozicije neutralne linije korištene su srednje vrijednosti iz pojedinih skupina uzoraka.



Slika 17 Prikaz rasporeda aksijalnih naprezanja po debljini uzorka



Slika 17 Prikaz rasporeda aksijalnih naprezanja po debljini uzorka

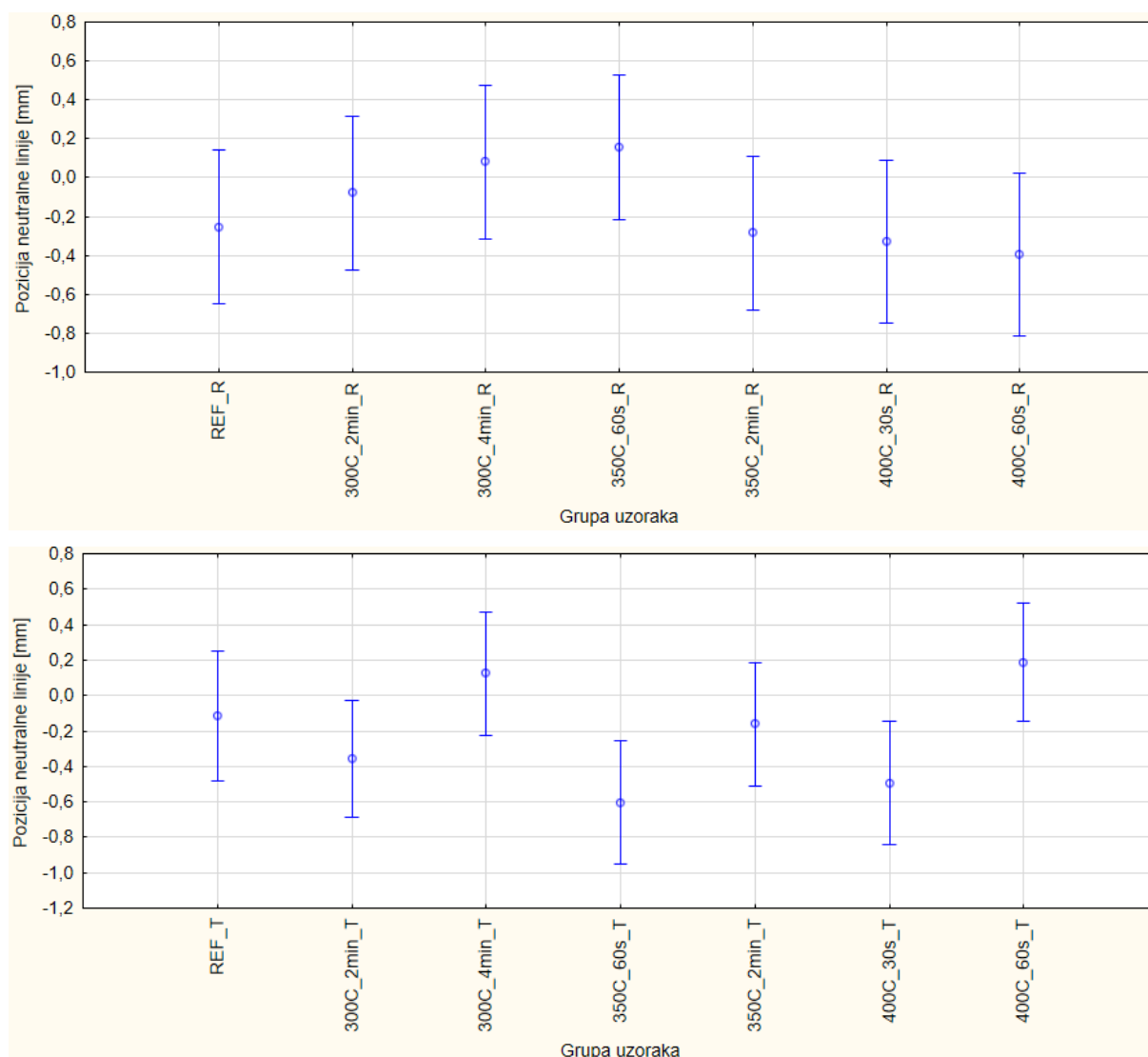


Slika 17 Prikaz rasporeda aksijalnih naprezanja po debljini uzorka

Iz priloženih grafova može se vidjeti raspored aksijalnih naprezanja po debljini uzorka. Pozitivne vrijednosti aksijalnih naprezanja predstavljaju vlačna naprezanja, dok negativne vrijednosti predstavljaju tlačna naprezanja. Horizontalna linija na sredini grafa predstavlja polovinu debljine uzorka, dok sjecište vertikalne linije i krivulja aksijalnih naprezanja predstavlja stvarnu poziciju neutralne linije. Neutralna linija određena je prema omjeru modula elastičnosti tlaka i vlaka u aksijalnom smjeru (Kollman, 1984.). Iz ovih rezultata se vidi da su aksijalna naprezanja svih

modificiranih uzoraka manja od aksijalnih naprezanja referentnih uzoraka. Može se zaključiti da se karbonizacijom površine uzoraka postigla bolja otpornost uzoraka na tlačna i vlačna naprezanja, te samim time dolazi do manje deformacije uzoraka pri opterećenju.

Stvarna pozicija neutralne linije bolje je vidljiva na slici 18, gdje se statističkom analizom utvrdilo odstupanje neutralne linije od središta presjeka uzorka.



Slika 18 Pozicija neutralne linije za pojedine skupine uzoraka (R i T)

Kao što je prethodno navedeno, pozicija neutralne linije ovisi o odnosu tlačnih i vlačnih naprezanja u pojedinim uzorcima drva. Rezultati odstupanja neutralne linije uvelike ovise o sadržaju vode uzoraka i temperaturi procesa. Nakon procesa

površinske karbonizacije različite skupine uzoraka imale su različit ravnotežni sadržaj vode, te je samim time došlo do varijacija mehaničkih svojstava.

Kollman (1956) je izradio krivulje koje prikazuju trend pada i rasta tlačne i vlačne čvrstoće drva u smjeru paralelno s vlakancima s obzirom na relativni sadržaj vode i temperaturu. Vlačna čvrstoća pokazuje najveću vrijednost pri sadržaju vode 4-8%, a ispod i iznad tih vrijednosti vidi se da vlačna čvrstoća pada. Proces površinske karbonizacije pri višim temperaturama je smanjio ravnotežni sadržaj vode na ispitivanoj površini uzorka, te je moguće da je vlačna čvrstoća pala s obzirom da je vrlo moguće da je sadržaj vode pao ispod kritičnih 4%. To se pogotovo vidi kod uzoraka gdje je pri određenim temperaturama neutralna linija pozicionirana ispod sredine uzorka, odnosno vidljivo je da su se vlačna naprezanja smanjila, a tlačna naprezanja povećala. Osim što temperatura smanjuje ravnotežni sadržaj vode, pri višim temperaturama također dolazi do značajnije termičke degradacije, te je to još jedan razlog većeg odstupanja neutralne linije pri višim temperaturama. Kod tlačne čvrstoće vidi se linearan pad mehaničkih svojstava u odnosu na smanjenje ravnotežnog sadržaja vode i temperature.

Kod uzoraka ispitanih u radijalnom smjeru vide se značajnije varijacije u poziciji neutralne linije. Vay i suradnici (2015.) su otkrili da je toplinska provodljivost bukovine u radijalnom smjeru veća za 18% u odnosu na tangentni smjer. To se može pripisati velikom udjelu drvnih trakova u drvu bukovine. Iz ovoga se vidi da su visoke temperature karbonizacije imale značajniji utjecaj na uzorke ispitane u radijalnom smjeru kada se govori u dubinskoj penetraciji topline, te su odstupanja neutralnih linija nešto veća.

Odstupanja neutralne linije za uzorke ispitane u radijalnom smjeru kreću se od -0.39 do 0.18 mm, dok se kod uzoraka ispitanih u tangentnom smjeru odstupanja neutralne linije kreću od -0.60 do 0.19 mm. S obzirom na prijašnja istraživanja, vidljivo je da površinska karbonizacija drva nije imala značajan utjecaj kada se govori o odstupanju pozicije neutralne linije od sredine uzoraka, te omjer vlačnih i tlačnih naprezanja nije znatno narušen.

5. ZAKLJUČAK

U ovom istraživanju vršilo se ispitivanje mehaničkih svojstava bukovine tretirane jednostranom površinskom karbonizacijom pri raznim temperaturama i vremenima procesa.

Preko dijagrama naprezanja vidljivo je da su karbonizirani uzorci ispitani u tangentnom smjeru imali veću maksimalnu čvrstoću od uzoraka ispitanih u radijalnom smjeru. Vrijeme procesa je imalo velik utjecaj na maksimalnu čvrstoću uzoraka pa se iz toga vidi da se čak i kod najvećih temperatura procesa (400°C) postigla zadovoljavajuća čvrstoća kada se koristilo kraće vrijeme procesa. Grafovi deformabilnosti i rada potrebnog da se dosegne maksimalna sila pokazuju kako su modificirani uzorci podnijeli znatno manju silu prije nego što je došlo do loma. Korištenjem nižih temperatura može se ublažiti pad tih svojstava. Ovi rezultati prikazuju kako ovakav materijal nije idealan za uporabu gdje je prirodna savitljivost materijala od velikog značaja.

Kao što je i očekivano, površinskom karbonizacijom došlo je do smanjenja čvrstoće na savijanje. Ono što se otkrilo je da su pri nižim temperaturama i kraćim vremenima procesa ta smanjenja manje izražena pa se i kod kombinacije najviših temperatura i kraćih vremena procesa vide zadovoljavajući rezultati. Površinska karbonizacija je potencijalno bolja opcija kada je potrebno samo poboljšati površinska svojstva materijala jer u ovom slučaju pad mehaničkih svojstava nije izražen kao kod ostalih tradicionalnih termičkih modifikacija. Modul elastičnosti modificiranih uzoraka generalno pada s porastom temperature, a kod uzoraka ispitanih u tangentnom smjeru pri blažim režimima vidi se i neznatan porast modula elastičnosti.

Rezultati ispitivanja pozicije neutralne linije pokazuju da su aksijalna naprezanja svih modificiranih uzoraka bila manja od aksijalnih naprezanja referentnih uzoraka. Iz ovoga se vidi da su karbonizirani uzorci bili otporniji na naprezanja u aksijalnom smjeru i samim time podnijeli manju deformaciju. Statistička analiza pokazala je kako površinska karbonizacija nije imala značajan utjecaj na poziciju neutralne linije pri opterećenju.

Iz priloženih rezultata može se vidjeti kako je površinska karbonizacija ekološki prihvatljiv, potencijalan i inovativan način za poboljšanje uporabnih svojstava drva. Kada je dovoljno poboljšati samo površinska svojstva drva, površinska karbonizacija je u mnogo načina optimalnija od tradicionalnih termičkih modifikacija (mogućnost korištenja većih temperatura uz manji pad mehaničkih svojstava, ušteda energije i vremena tijekom procesa modifikacije, očuvanje strukturnih svojstava drva, varijacije estetskih svojstava površine itd.). Iako je prikazano kako ovakav materijal nije najbolje rješenje kada se govori o proizvodima gdje je prirodna savitljivost materijala bitna, postoje mnogi proizvodi kod kojih bi ovaj način modifikacije bio poželjan. Jedan primjer takvog proizvoda može se vidjeti kod funkcionalnog uzorka drvenog fasadnog elementa (Rhombusov fasadni profil) s karboniziranom površinom na temperaturi od 250 i 350 °C (Slika 19), koji je bio izrađen u sklopu projekta koji je povezan s ovim radom.



Slika 19 Priprema funkcionalnog uzorka drvene fasade s karboniziranom površinom

LITERATURA

1. Akizuki M, Hasemi Y, Yasui N, Kinoshita K, Yammamoto K, Yoshida M, Tamura Y, Takeda M (2001) Fire safety studies in restoration of a historic wooden townhouse in Kyoto-fire safety experiments on Japanese Traditional wood based constructions. In: Proceedings 5th AOSFST. New-castle, pp. 329-340
2. Bedford, A.M., Leichti, K.M (2001). Mechanics of Materials. Prentice Hall, NJ
3. Betts, S.C., Miller, T.H., Gupta, R. (2010) Location of the neutral axis in wood beams – a preliminary study. Wood mater. Sci. Eng. 5:173-180
4. Boonstra, M.J.; van Acker, J.; Tjeerdsma, B.F.; Kegel, E.V. (2007) Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural constituents. Ann. Sci., 64, 679–690.
5. Cademartori, P.H., Schneid E., Gatto D. (2012) The effect of thermal treatment on physical and mechanical properties of luehea divaricata hardwood. Maderas-Cienc Tecnol, 16(4), 413-422.
6. Chow, S.Z.; Pickles, K.J. (2007) Thermal softening and degradation of wood and bark. Wood Fiber Sci., 3, 166–178.
7. Esteves B, Pereira H (2009) Wood modification by heat treatment: a review. BioResources 4(1):370–404
8. Gere, J., Timoshenko, S. Mechanics of Materials (4 th edition) (1997). PWS Publishing Co.
9. Gosselink RJA, Krosse AMA, van der Putten JC, van der Kolk JC, de Klerk-Engels B, van Dam JEG (2004) Wood preservation by low-temperature carbonisation. Ind Crops Prod 19(1):3–12
10. Hill, C.A.S. (2006) Wood Modification: Chemical, Thermal, and Other Processes; John Wiley & Sons Ltd.: Chichester, UK; ISBN 978-0-470-02172-9.
11. Jelaska D (2011), "Elementi strojeva", Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split
12. Kollman, F.F.P. Cote, W.A. (1984) Principles of Wood science and technology. Springer-Verlag, Berlin
13. Kutnar A, Muthu SS (2016) Environmental impacts of traditional and innovative forest-based bioproducts. Springer, Berlin, p 248

14. Miller H (2015) Japanese wood craftsmanship; Huge Miller Furniture: Liverpool, UK;64p.
15. Određivanje vlage tijekom fizičkih i mehaničkih ispitivanja (ČSN EN 49 0103)
16. Vay, O., Teischinger, A., De Borst, K., Muller, U (2015). Thermal conductivity of wood at angles to the principal anatomical directions, Wood Sci Technol 49:577-589
17. Viitanen H, Ja"msa" S, Paajanen L, Nurmi A, Viitaniemi P (1994) The effect of heat treatment on the properties of spruce—a preliminary report. International Research group on Wood Preservation. Document No. IRG/WP 94-40032
18. Werner F, Richter K (2007) Wooden building products in comparative LCA—a literature review. Int J LCA 12 (7) 470-479