

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE

Petar Konsa

**PRIMJENA RAČUNALNIH SIMULACIJA ZA
ISPITIVANJE INOVATIVNIH DRVNO-
KONSTRUKCIJSKIH RJEŠENJA UNUTAR
PROGRAMA AUTODESK INVENTOR**

U Zagrebu, 2024.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za namještaj i drvo u graditeljstvu na Fakultetu šumarstva i drvne tehnologije pod vodstvom prof. dr. sc. Silvane Prekrat i predan je na Natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2023./2024.

Kratice korištene u radu:

2D skica – dvodimenzionalna skica

3D model – trodimenzionalni model

CFRP - *Carbon Fiber Reinforced Polymer* – karbonska ili ugljična vlakna

E_L - modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru

E_R - modul elastičnosti u radijalnom smjeru

E_T - modul elastičnosti u tangencijalnom smjeru

E_t - tangencijalni modul

F – sila

FEM - *Finite Element Method*

F_{\max} – maksimalna sila ili sila loma

G_{LR} - modul klizanja između longitudinalnog i radijalnog smjera

G_{LT} - modul klizanja između longitudinalnog i tangencijalnog smjera

G_{RT} - modul klizanja između radijalnog i tangencijalnog smjera

MKE - metoda konačnih elemenata

PUR ljepilo – poliuretansko ljepilo

σ_y - granice puzanja

ν_{LR} - poissonov koeficijent između longitudinalnog i radijalnog smjera

ν_{LT} - poissonov koeficijent između longitudinalnog i tangencijalnog smjera

ν_{RT} - poissonov koeficijent između radijalnog i tangencijalnog smjera

Sadržaj rada:

1. Uvod.....	1
2. Problem.....	2
3. Hipoteza.....	4
4. Cilj rada.....	5
5. Provedena istraživanja.....	6
6. Materijali i metode.....	9
6.1. Drvno-kompozitni materijali.....	13
6.2. Definiranje virtualnih modela.....	14
6.2.1. Definiranje uvjeta simulacije u programu Inventor Nastran.....	19
6.2.1.1. Postavljanje sila.....	22
6.2.1.2. Postavljanje oslonaca.....	24
6.2.1.3. Definiranje mreže – idealizacija modela.....	25
6.2.2. Svojstva drva (<i>Quercus Robur L.</i>) unutar računalnih simulacija.....	27
6.2.2.1. Definiranje 3D ortotropnog materijala <i>Quercus Robur L.</i>	30
6.2.2.2. Definiranje nelinearnog modela drva.....	31
6.2.3. Svojstva ugljičnih vlakana (CFRP) unutar računalnih simulacija.....	33
6.2.3.1. Definiranje 3D ortotropnog materijala ugljičnih vlakana.....	33
6.2.3.2. Definiranje nelinearnog modela ugljičnih vlakana.....	34
7. Rezultati.....	35
8. Diskusija.....	45
9. Zaključak.....	49
10.Literatura.....	50
11.Sažetak.....	53
12.Summary.....	54
Zahvale.....	55
Životopis.....	56

1. Uvod

U kontekstu sve manjeg jaza između virtualnog i stvarnog svijeta, razvoja nove industrijske revolucije i sve većih adaptivnih procesa na istu; industrija kao proces proizvodnje, ali i pružanja usluga definitivni je kreator i inicijator naprednih procesa djelovanja i naprednih globalnih promjena. Industrija kao takva nije izolirani otok u globalnom kontekstu. Takvo ponašanje industrijskih okvira možemo poistovjetiti s ponašanjem tržišta kojem industrija služi kao sredstvo ostvarivanja uspjeha i progresivnog rasta.

Tržište nije regresivan već progresivan pojam koji za svoju progresivnost može zahvaliti jasnim inputima i dobrom metodologijom ispitivanja istog. Nakon detekcije promjena na tržištu pristupa se promjenama u industrijskom pristupu. Unutar tih promjena nedvosmisleno ulazi dodavanje novih ili revidiranje starih produkata industrije. Da bi industrija bila postavljena u položaj u kojem može pratiti tržište određene metodologije mora biti podložne promjenama.

Promjene u industrijskim okvirima u jako puno slučajeva su vezanu uz znanstvena dostignuća i trendove. Sama pojava nove industrijske revolucije omogućena je novonastalim znanstvenim spoznajama koje su se adaptirale na stručnu i proizvodnu razinu.

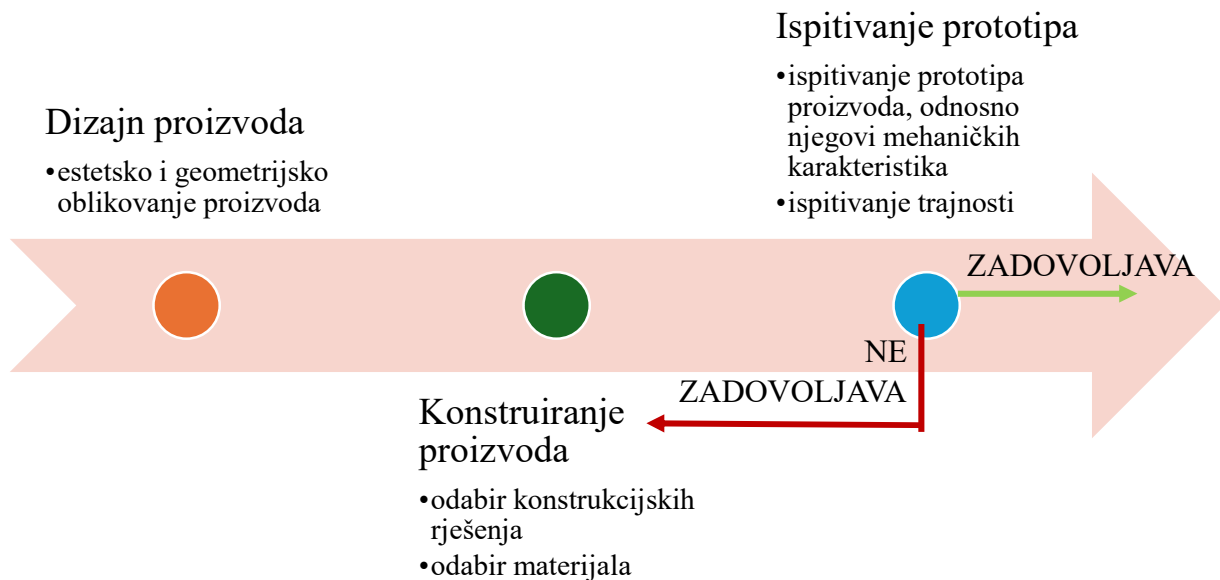
U skladu s navedenim može se zaključiti da je industrija sve više ovisna o tržištu i promjenama na njemu, posljedično i o znanstvenom napretku. Primjenom novih tehnologija i novih načina proizvodnje u drvoprerađivačkoj industriji doživjela je procvat u proteklom desetljeću.

Ideja rada je na znanstvenoj osnovi primijeniti računalne simulacije inovativnih drvo-konstruktivskih rješenja kakve se primjenjuju u proizvodnji namještaja i ostalom dijelu drvoprerađivačkog sektora.,

Unutar drvne industrije metoda konačnih elemenata nije zastupljena kao metoda s pomoću koje rješavaju konstrukcijski problemi. Kao metoda podliježe gotovo isključivo u znanstvenim svrhama. Iako je metoda sama po sebi kompleksna čak i kao alat primjene ipak je pronašla svoje mjesto u ostalim industrijama kao što su to industrije koje se vežu za građevinarstvo i strojarstvo, ali i brojne druge srodne industrije. Kao najveći razlog takvog otpora implementaciji ove metode u industrijske grane možemo promatrati kompleksnost drva kao prirodnog materijala koje je anizotropno, odnosno higroskopno. Svojstva drva u svim smjerovima su drugačija, opetovano ta drugačija svojstva ovise o sadržaju vode, ali i brojnim drugim parametrima koji su manje ili više industrijski mjerljivi.

2. Problem

Zahtjev tržišta polazišna je točka proizvodnje. Na temelju dobivenih informacije poduzeću, a nakon analize tržišnih traženja i analize konkurentske ponude pristupa se konceptualizaciji i dizajnu novog proizvoda, sve to i još mnogo više dio je tradicionalne metodologije razvoja proizvoda, međutim često se razvoj proizvoda zapravo poistovjećuje s razvojem dizajna i konstrukcije koji su najvažniji aspekt postavljanja proizvoda na tržište. Takav pristup proizvodnji unutar sebe sadrži kontrolne mehanizme ispitivanja samog proizvoda, odnosno njegovih mehaničkih karakteristika i zahtjeva trajnosti proizvoda (Slika 1).



Slika 1 Prikaz dijela tradicionalnog razvoja proizvoda

U početnom dijelu razvoja ujedno se događa i najveća kružna stagnacija procesa. Finalni proizvod naime mora ispunjati brojne uvijete, a neki od njih direktno su vezani za samu konstrukciju proizvoda i izbor materijala kao njezin dio. U kontekstu takvog pristupa može se reći da ovakav proces zahtijeva i širu sliku i pregled koji bi uključivao i zadovoljavanje estetskih odnosno pojava karakteristika proizvoda, u konačnici i tehnološku proizvodnost proizvoda. Upravo iz ovog niza navedenih razloga proizlazi i niz traženja na konstruktivne zahtjeve novog proizvoda nerijetko se dogodi da prototipovi proizvoda ne udovolje traženim zahtjevima unutar fizičkih ispitivanja. Ako se procesu razvoja proizvoda pridoda i ekonomska komponenta, može se reći da se radi o krajnje neekonomičnom i rizičnom postupku, čak i ako se radi samo o

prototipu koji nije zadovoljio traženja. Ako se pridoda činjenica da se takav ishod može iterativno ponavljati onda se možemo zaključiti da se u ovisnosti o složenosti proizvoda radi o izdancima koje je moguće izbjeći što je potvrđeno najčešće u metaloprerađivačkoj industriji (Bonte et al., 2008), a rjeđe za drvene proizvode (Konsa, Prekrat; 2023). Primjena simulacija u svrhu pronalazjenja optimalnog rješenja gotovo je u svakodnevnoj uporabi u složenijim proizvodima kao što je avio ili auto industrija ili građevinarstvo, no za proizvode široke potrošnje kao što je namještaj primjena MKE i simulacija vrlo je rijetka.

Razlog nekorištenja MKE i simulacija u ranoj fazi razvoja namještaja i drvnih proizvoda je djelomično u korištenju iskustveno potvrđenih standardno dimenzioniranih elemenata konstrukcijskih sastava i materijala. Razvoj materijala, sve veći individualni dizajnerski zahtjevi kao i maloserijska te unikatna proizvodnja uvjetuju promjene.

3. Hipoteza

Hipoteza ovog rada je da izvođenje računalnih simulacija s pomoću metode konačnih elemenata (MKE) u ranom stadiju projektiranja drvenih i drvno-kompozitnih konstrukcija omogućuje brzu izradu velikog broja varijanti, što ubrzava proces projektiranja, smanjuje troškove proizvodnje, te poboljšava predviđanje mehaničkih svojstava i performansi materijala. Primjenom ovih simulacija moguće je precizno predvidjeti ponašanje geometrije u stvarnim uvjetima, što bi bilo teško postići tradicionalnim analitičkim metodama zbog nehomogenosti i kombinacija materijala.

4. Cilj rada

Cilj rada je implementacija metode konačnih elemenata u proces razvoja proizvoda od drva ali i ispitati samu točnost i pouzdanost pri podešavanju takvih simulacija u odnosu na provedena ispitivanja.

Primjena metode konačnih elemenata s obzirom na sve veću prisutnost 3D CAD programa za modeliranje u projektiranju namještaja i drvoprerađivačkom sektoru može doprinijeti razvoju sektora. U odnosu na područje automobilske, avio industrije te općenito sektora prerade metala može se reći da u drvoprerađivačkom sektoru postoji neiskorišteni potencijal. se da će biti potencijalno korak bliže boljoj implementaciji metoda simulacija u projektiranju proizvoda od drva unutar drvoprerađivačke industrije.

Iako je u radu Sumardzewski, Prekrat (2018.) dokazano da se simuliranim metodama mogu predvidjeti i elastične karakteristike, uključujući Youngove i Kirchhoffove module elastičnosti u testovima savijanja i torzije, što se je odnosilo na drvno-kompozitni panel, ovaj rad će se fokusirati na najviše na deformabilne čimbenike utjecaja sile.

5. Dosadašnja istraživanja

Ranije studije o mehaničkim svojstvima hrasta (*Quercus robur* L.) istaknule su njegovu značajnu složenost zbog anizotropne i hijerarhijske strukture ovog materijala. Prvotno je bilo potrebno sukladno tomu utvrditi mehaničko ponašanje drva unutar stvarnih ispitivanja, kako bi se isti rezultati mogli implementirati unutar simulacijskih programa. U kontekstu toga razvijen je precizan ortotropni elasto-plastični model za hrastovo drvo (*Quercus robur* L.) pri dvije različite razine vlažnosti (12% i 25,6%), primjenjiv za analize konačnih elemenata (FEA). Kako se navodi u radu Tankut et al. (2014.) metoda se koristi za modeliranje složenih struktura izrađenih od drva, uključujući elemente namještaja, skeletne konstrukcije i druge drvene proizvode. Kako bi se postigao taj cilj, provedeni su standardni testovi na uzorcima u kompresiji, napetosti i smicanju u tri ortogonalna smjera. Svi uzorci su kondicionirani na 12% i 25,6% vlažnosti prije mehaničkih ispitivanja. Rezultati su integrirani u konzistentne numeričke materijalne modele koji su validirani usporedbom numerički predviđenih vrijednosti s eksperimentalnim podacima. Materijalni modeli su iterativno kalibrirani prilagodbom pojedinih materijalnih karakteristika kako bi se minimizirala pogreška. Razvijeni modeli pokazali su prosječne relativne pogreške od 5,2% za 12% vlažnosti i 5,8% za 25,6% vlažnosti, što ukazuje na njihovu učinkovitost u predviđanju elasto-plastičnog odgovora hrastovog drva. Zaključak ove provedene ekspertize je da su razvijeni i validirani elasto-plastični materijalni modeli hrastovog drva pri različitim razinama vlažnosti, čime se poboljšava točnost numeričkih simulacija za primjene koje uključuju drvene materijale što je dokazano u radu Tippner et al. (2022.).

Glavni cilj istraživanja rada Novosel et al. (2021.) bio je poboljšati mehanička svojstva drvenih nosača kroz implantaciju predfleksibiliziranih ugljičnih vlakana. Kroz laboratorijske testove četiri točke savijanja, rezultati su pokazali značajno povećanje krutosti i smanjenje deformacija ojačanih nosača u usporedbi s neojačanim nosačima. Najveći učinak ojačanja postignut je s jednim ili dva sloja ugljičnih vlakana, dok veći broj slojeva može smanjiti presjek drvenog nosača. Zaključci istraživanja upućuju na to da optimalno ojačanje može značajno poboljšati nosivost i duktilnost drvenih konstrukcija.

Isto je potvrđeno i u radu Borri et al. (2005.) gdje su provedena istraživanja i eksperimentalna ispitivanja pokazala da su primjena CFRP (karbonska vlakna ojačana polimerima) materijala

kao vanjske armature na drvene grede rezultira značajnim povećanjem savojne krutosti i nosivosti, bez potrebe za uklanjanjem dijelova postojećih drvenih struktura.

U članku Kawecki (2021.) detaljno se obrađuju smjernice za nelinearno modeliranje drveno-CFRP greda korištenjem metode konačnih elemenata (FEM) u softveru Simulia ABAQUS. U radu se ističe složenost numeričkih modela koji uzimaju u obzir ortotropiju i plastičnost drva i CFRP traka, kao i krutost adhezivnih slojeva s delaminacijom. Laboratorijski eksperimenti potvrđuju pretpostavke modela kroz statistički značajan broj uzoraka. Model je pogodan za analizu ponašanja drveno-CFRP kompozita u različitim konfiguracijama ojačanja, pružajući visoku točnost simulacija u odnosu na laboratorijske rezultate.

Ipak taj rad potvrđuje ispravnost modela unutar programa ABAQUS, studija Magomedov, Sebaeva (2020.) uspoređuje sposobnosti četiri popularna softverska paketa za analizu metodom konačnih elemenata: Abaqus, Ansys, SOLIDWORKS i Inventor Nastran. Zaključeno je da, iako SOLIDWORKS ima određena ograničenja u analitičkim sposobnostima, on nudi superiorne mogućnosti za modeliranje i sklapanje, što ga čini korisnim u kombinaciji s drugim alatima za analizu složenih problema. Rad je istaknuo važnost odabira odgovarajućeg softverskog paketa ovisno o specifičnim potrebama istraživača ili industrije. Iz rada se zaključuje da Inventor Nastran pruža optimalne mogućnosti za modeliranje i analizu unutar Autodesk okruženja, s naglaskom na jednostavnost korištenja i integraciju različitih modula.

U radu Hu et al (2019.) na temelju usporedbe između eksperimentalnih rezultata i FEM simulacija sugeriraju da se točnost FEM modela povećava s porastom omjera širine i visine uzorka (≤ 1) korištenog za određivanje elastičnih konstanti. Preporučuje se korištenje malih kubičnih drvenih uzoraka za određivanje elastičnih mehaničkih svojstava potrebnih za FEM analizu konstrukcija od bukve. Daljnja istraživanja usmjerena na pronalaženje optimalnih dimenzija drvenih uzoraka za dobivanje mehaničkih svojstava za FEM modele su neophodna.

Vrijedno je napomenuti da je Mackerle (2005.) proveo opsežan pregled više od 300 znanstvenih radova objavljenih između 1995. i 2004. godine, posebno vezanih za primjenu metode konačnih elemenata (FEM) u drvenim proizvodima i građevinarstvu. Nalazi iz ovog pregleda naglasili su izuzetnu važnost razumijevanja mehaničkih svojstava drva u kontekstu primjene FEM-a u drvenim proizvodima.

Točnost metode konačnih elemenata podrazumijeva postavljanje graničnih uvjeta točnosti na maksimalnih 10% odstupanja u odnosu na fizički provedene testove. Na primjer, u studiji Durgun, Ertan (2014). usporedbe fizičkih i simulacijskih ispitivanja 3D ispisanih struktura pod

naprezanjem savijanja, rezultati su bili u uskoj korelaciji (unutar spomenutih 10%), pokazujući da se MKE simulacije mogu pouzdano primijeniti za predviđanje mehaničkog ponašanja s razumnom korelacijom prema fizičkim testovima. To je potvrđeno i istraživanjima primjena računalnih FEA simulacija za strukturnu analizu pruža razumne procjene ukupne čvrstoće ovih struktura, dosljedno usklađujući se s rezultatima stvarnih testiranja performansi. Ovaj zaključak vrijedi za razne strukturne materijale, naglašavajući značaj točne strukturne analize i razumijevanja mehaničkih svojstava (Ceylan at all 2021.).

6. Materijali i metode

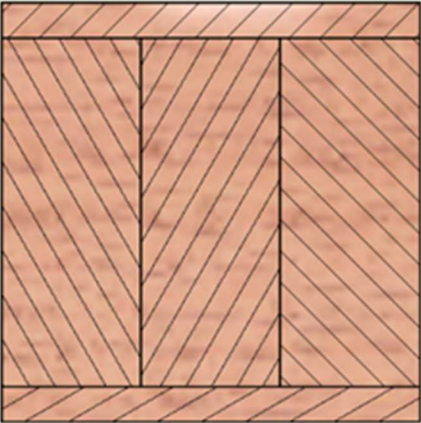
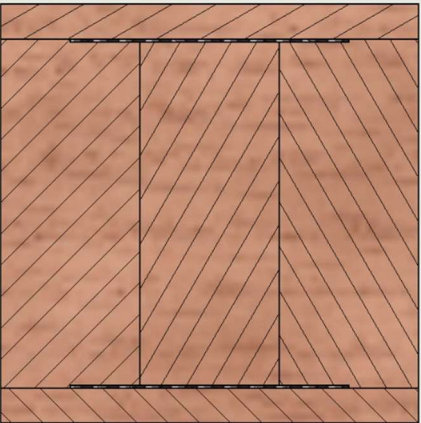
Metodologija ovog rada uvelike se razlikuje od metodologije dobivanja rezultata dosadašnjih istraživanja na kojima se ovaj rad bazira. Računalne simulacije u ovom pogledu mogu biti potpuno novi i opće primjenjiviji način ispitivanja orijentacionih svojstava konstrukcija i novih drvno-kompozitnih materijala.

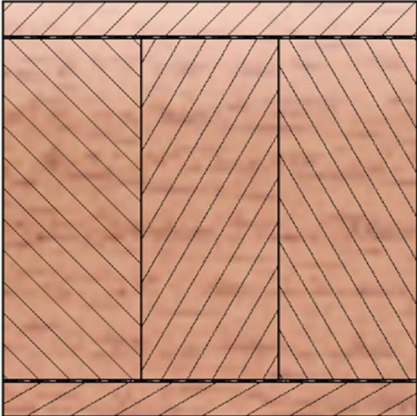
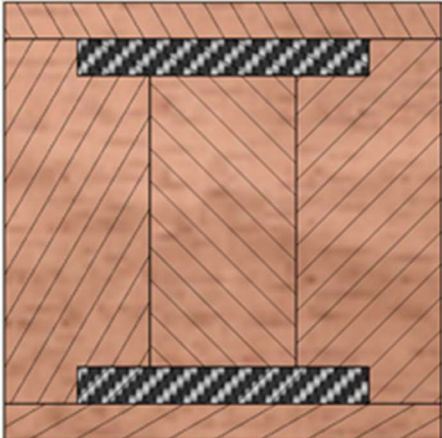
U ovom radu su korištene računalne simulacije na hrastovim lameliranim gredama, koje su dodatno ojačane karbonskim vlaknima. Ovakav pristup podrazumijeva idealizaciju fizičkog modela ispitivanja, pod tim se misli da će se idealizacija vrši prema lijepljenju spoja., u ovom slučaju ispitivanja koje se vrši na kidalici a provedeno je od strane Novosel at all (2021.). Ovaj rad zapravo objedinjuje rezultate zasebnog ispitivanja svojstava drva i svojstava lameliranih hrastovih greda. Navedene rezultate drugom metodologijom računalne simulacije, odnosno metode konačnih elemenata, pokušava približiti stvarnim ponašanjima materijala. U početku metodologija će se baviti ulaznim parametrima modela i postavljanja FEM analize. Takva će parametrizacija u konačnici dovesti do toga da se nakon pridavanja dimenzijskih i materijalnih karakteristika uzoraka, može pristupiti samom mehaničkom virtualnom ispitivanju, odnosno generiranju mreže, oslonaca uzorka i sila koje djeluju unutar ispitivanja na sam uzorak.

Za simulacije bit će korišten program Autesk Inventor 2023. s pripadajućim dodatkom Autodesk Inventor Nastran 2023 koji je takoreći dio industrije već godinama, što će za rezultat imati još veću adaptivnost unutar industrijskih okvira.

Unutar simulacije ispitivat će se modeli sa sljedećim dimenzijskim i materijalnim karakteristikama (Tablica 1).

Tablica 1 Pregled ispitivanih uzoraka i njihove karakteristike

Naziv uzorka	Slika uzorka	Dimenzijske i materijalne karakteristike uzorka
Uzorak O (Slika 2)	 <p data-bbox="488 981 839 1010"><i>Slika 2 Poprečni presjek uzorka O</i></p>	<p>Uzorak O sastavljen je kao lamelirani hrastov uzorak punog drva, debljinski lijepljen od tri elementa 20 x 50 mm (troslojno usporedno) i naknadno lijepljene dvije hrastove lamele debljine 5 mm sa svake strane uzorka. Što u konačnici rezultira poprečnim presjekom od 60 x 60 mm. Greda je duga 1000 mm.</p>
Uzorak C1 (Slika 3)	 <p data-bbox="488 1648 852 1677"><i>Slika 3 Poprečni presjek uzorka C1</i></p>	<p>Uzorak C1 sastavljen je kao lamelirani hrastov uzorak punog drva, debljinski lijepljen od tri elementa 20 x 50 mm (troslojno usporedno) i naknadno lijepljene dvije hrastove lamele debljine 5 mm sa svake strane uzorka. Unutar uzorka nalaze se karbonska vlakna dimenzija 40 x 0,4 mm za koje je unutar debljinski lijepljene strukture izveden utor. Što u konačnici rezultira poprečnim presjekom od 60 x 60 mm. Greda je duga 1000 mm.</p>

<p>Uzorak C2 (Slika 4)</p>	 <p><i>Slika 4 Poprečni presjek uzorka C2</i></p>	<p>Uzorak C1 sastavljen je kao lamelirani hrastov uzorak punog drva, debljinski lijepljen od tri elementa 20 x 50 mm (troslojno usporedno) i naknadno lijepljene dvije hrastove lamele debljine 5 mm sa svake strane uzorka. Unutar uzorka nalaze se karbonska vlakna dimenzija 60 x 0,4 mm za čiju je debljinu, debljinski lijepljena masivna hrastova struktura brušena. Što u konačnici rezultira poprečnim presjekom od 60 x 60 mm. Greda je duga 1000 mm.</p>
<p>Uzorak C3 (Slika 5)</p>	 <p><i>Slika 5 Poprečni presjek uzorka C3</i></p>	<p>Uzorak C3 sastavljen je kao lamelirani hrastov uzorak punog drva, debljinski lijepljen od tri elementa 20 x 50 mm (troslojno usporedno) i naknadno lijepljene dvije hrastove lamele debljine 5 mm sa svake strane uzorka. Unutar uzorka nalaze se karbonska vlakna dimenzija 40 x 5 mm za koje je unutar debljinski lijepljene strukture izveden utor. Što u konačnici rezultira poprečnim presjekom od 60 x 60 mm. Greda je duga 1000 mm.</p>

Mehaničke karakteristike karbonskih vlakana su preuzete iz rada Kawecki, (2021) (Tablica 2.).

Tablica 2 Mehanički parametri ugljičnih vlakana Kawecki, (2021).

Modul elastičnosti (MPa)			Modul klizanja (MPa)			Poissonov koeficijent		
E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}	V_{LR}	V_{LT}	V_{RT}
175000	7100	7100	2730	2730	2730	0,3	0,3	0,3

Mehaničke karakteristike drva *Quercus Robur L.* (Tablica 3.) aproksimirani podatci prema radu (Tippner et al 2022.). Aproksimacija i detaljnije specifikacije bit će prikazane u nastavku.

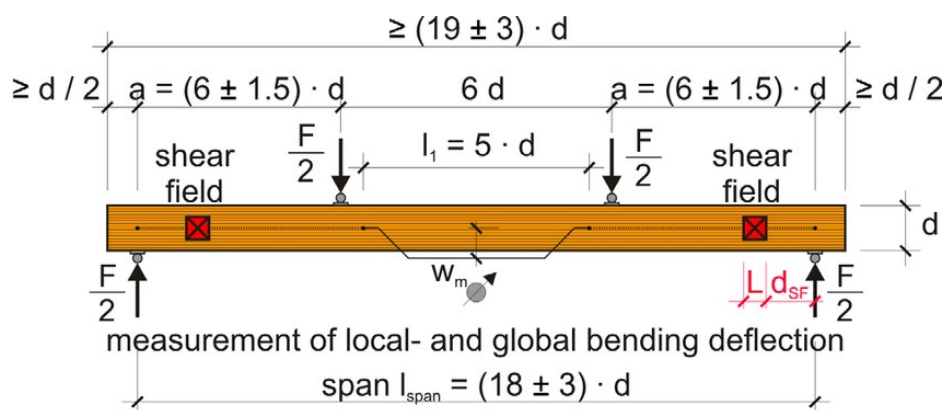
$\rho_{Quercus Robur L.} = 715,86 \text{ kg/m}^3$ pri 9% sadržaja vlage

Tablica 3. Mehanički parametri pri 9% sadržaja vlage

Modul elastičnosti (MPa)			Modul klizanja (MPa)			Poissonov koeficijent		
E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}	V_{LR}	V_{LT}	V_{RT}
15549	695	524	1985,5	2106,7	132,7	0,036	0,028	0,321

Sila koja djeluje na uzorke izvedena je kao skala umjerena prema uzorku O. Prilikom ispitivanja uzorka O uzeta je u obzir sila loma, odnosno maksimalna sila koju je uzorak podnio neposredno pred pucanje i iznosio je 22,84 kN u radu Novosel et al (2021.). U odnosu na to zbog bolje mogućnosti usporedbe rezultata uzete su referentne točke gledanja na 100% F_{\max} uzorka O, 50% F_{\max} uzorka O, i 25% F_{\max} uzorka O što u konačnici rezultira referentnim točkama na 22,84 kN, 11,42 kN i 5,71 kN. Ovim točkama pod pretpostavkom da je sila loma iznad klasične grede zbog dodatka karbonskih vlakana kao ojačanja pridružuje se i točka loma ostalih uzoraka.

Fizičko ispitivanje provedeno je prema normi HRN EN 408:2012. (Slika 6) Takvo se ispitivanje prenosi u virtualno okruženje. Sam prienos bit će rastumačen u narednim poglavljima.



Slika 6 Normativni okvir ispitivanja grede prema HRN EN 408:201

6.1. Drvno-kompozitni materijali

Drvno kompozitni materijali su materijali koji se sastoje od drvne mase kombinirane s drugim komponentama kao što su plastika, cement, staklo ili metali. Ovi materijali su dizajnirani kako bi kombinirali najbolje osobine drveta s poboljšanim karakteristikama ostalih materijala.

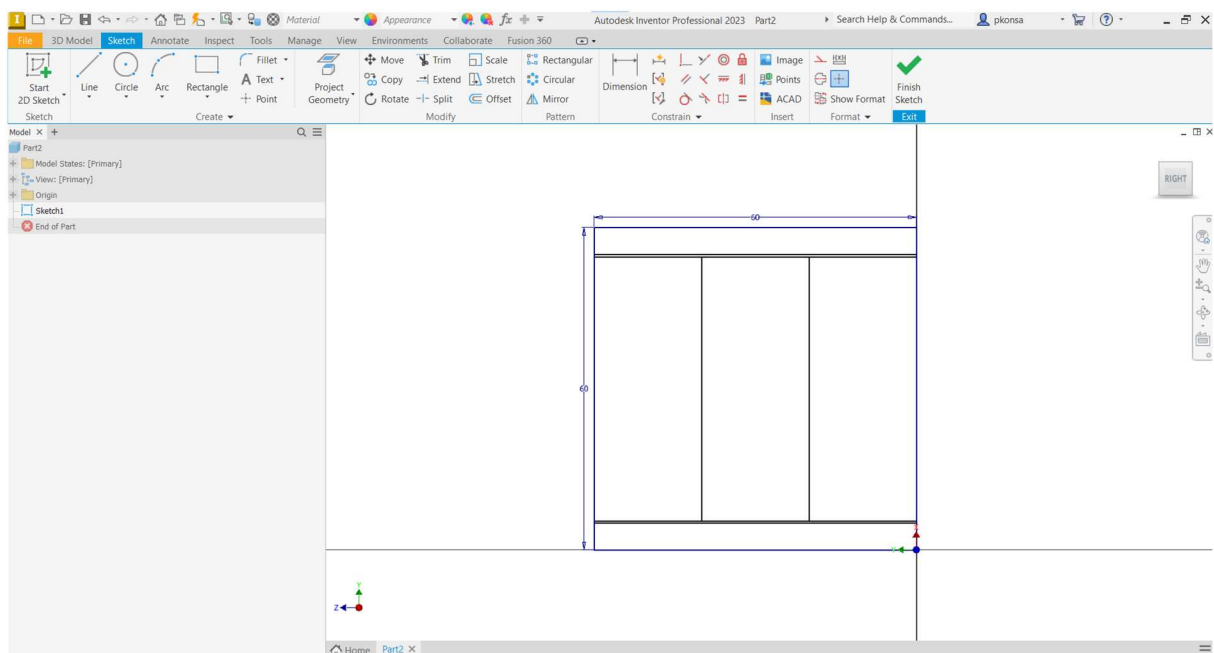
Ovaj rad proučava kompozitne grede koje su izrađene kao lamelirane drvene grede ojačane karbonskim vlaknima u raznim oblicima. Ovakav koncept greda i kompozita datira još iz 1990.-ih. (Slika 7)



*Slika 7 Prikaz grede ojačane karbonskim vlaknima Izvor:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116306050>*

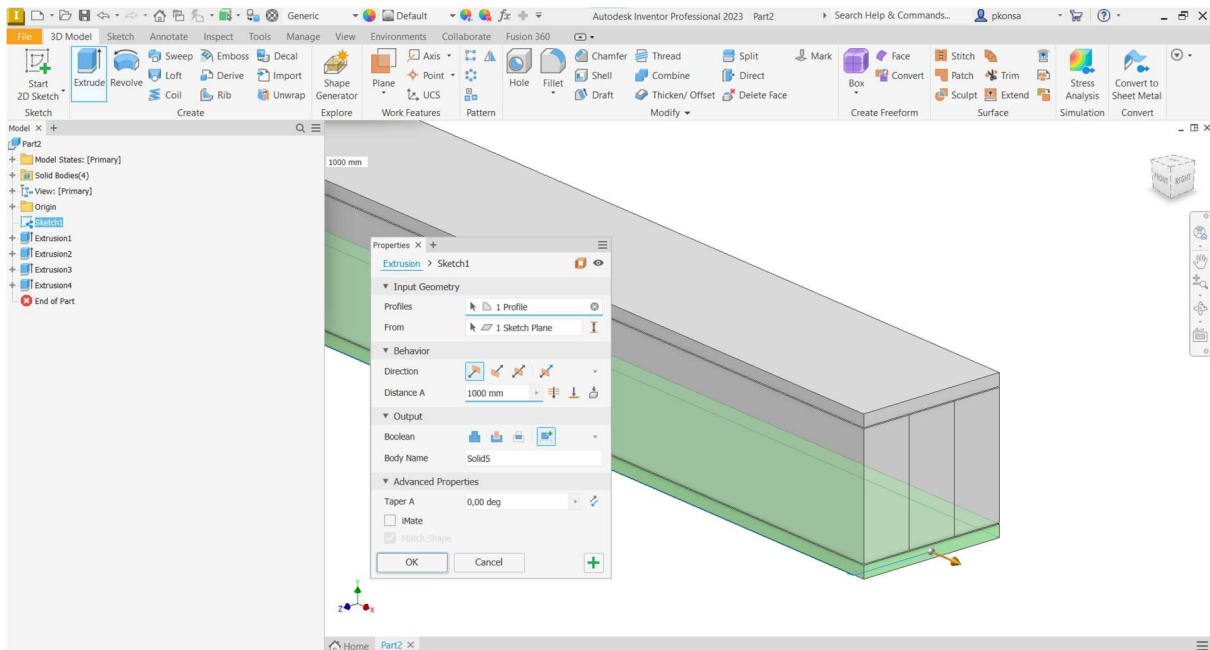
6.2. Definiranje virtualnih modela

Za izradu baze koja je u ovom slučaju poprečni presjek grede koristi se 2D skica ukupnih dimenzija 60x60 u softveru Inventor koja se crta unutar YZ ravnine. Osnova za kreiranje trodimenzionalnog tijela sastoji se od dvodimenzionalne skice na kojoj se koriste različiti geometrijski oblici kako bi se stvorilo trodimenzionalno tijelo Prekrat, Čavlović (2022.). Nakon 2D nacrtu prema željenim dimenzijama koji je napravljen naredbama „Rectangle“ (Slika 8) prelazi se u trodimenzionalni način rada gdje se 2D lik u skici s pomoću naredbe za kreiranje tijela transformira u željenu trodimenzionalnu virtualnu modularnu formu. Početna skica uključuje u ovom slučaju i predviđena mjesta za CFRP vlakna.



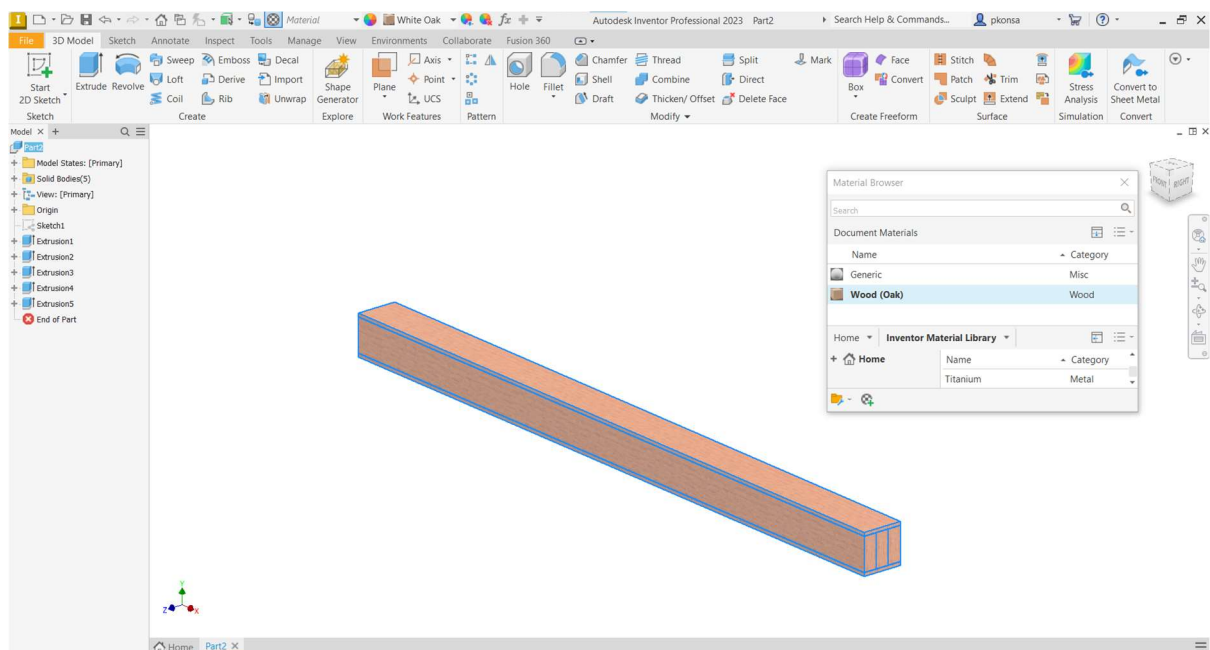
Slika 8 2D skica poprečnog presjeka grede u Inventoru

Naknadno naredbom „Extrude“ i zadavanjem dimenzije duljine grede stvara se željena forma 3D modela (Slika 9). Ova naredba unutar sebe posjeduje značajke s kojom se može svaki segment lamelirane građe drvene grede dodati zasebno, što je naknadno bitno za valjano funkcioniranje modela unutar simulacije.



Slika 9 3D model u Inventoru

Naknadno se za svaki od segmenata virtualnog modela dodaje materijal od kojeg je izrađen. U ovom slučaju s obzirom na naknadne promjene koje će se učiniti unutar postavki materijala to i nije od presudne važnosti. U ovom primjeru primijenjeni su materijali koji se nalaze unutar Inventorove zbirke koji se zove „Wood (Oak)“ (Slika 10).

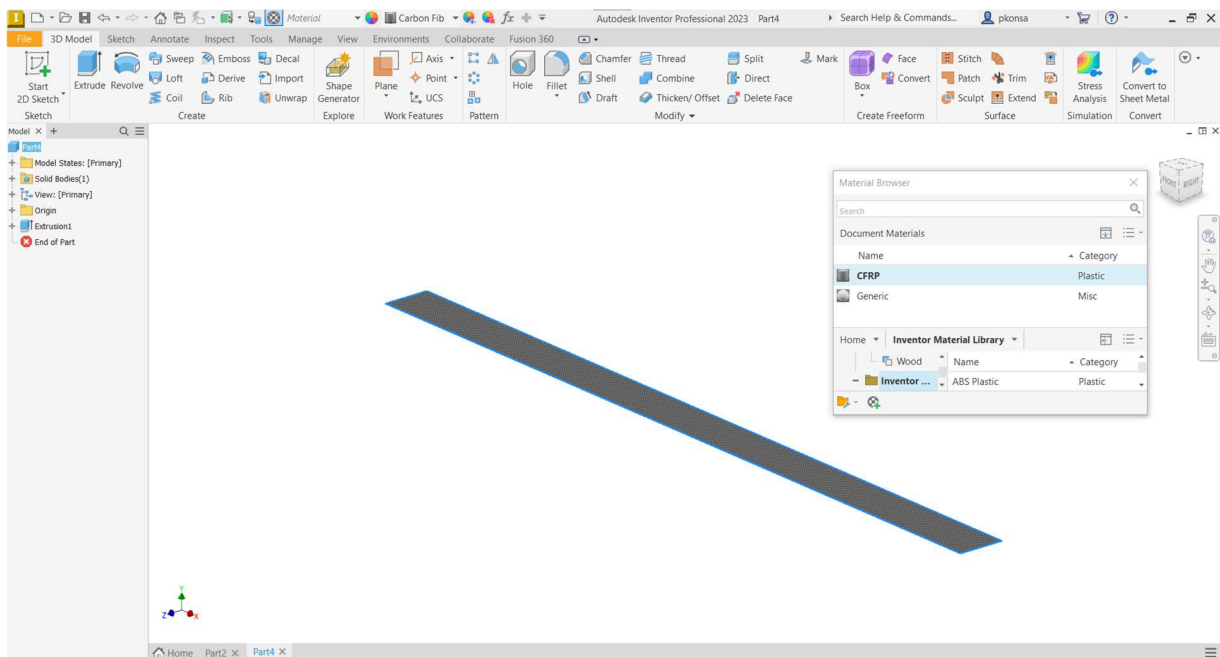


Slika 10 Dodavanje svojstva materijala 3D modelu hrast

Ono što je važno za naglasiti naredbom „Extrude“ nisu presječno izvučena mjesta koja su unutar složaja grede pokrivena CFRP vlaknima. Ona unutar ovakve forme ostaju prazna. Takva prazna mjesta koja su unaprijed predviđena za ugrađivanje karbonskih vlakana moraju

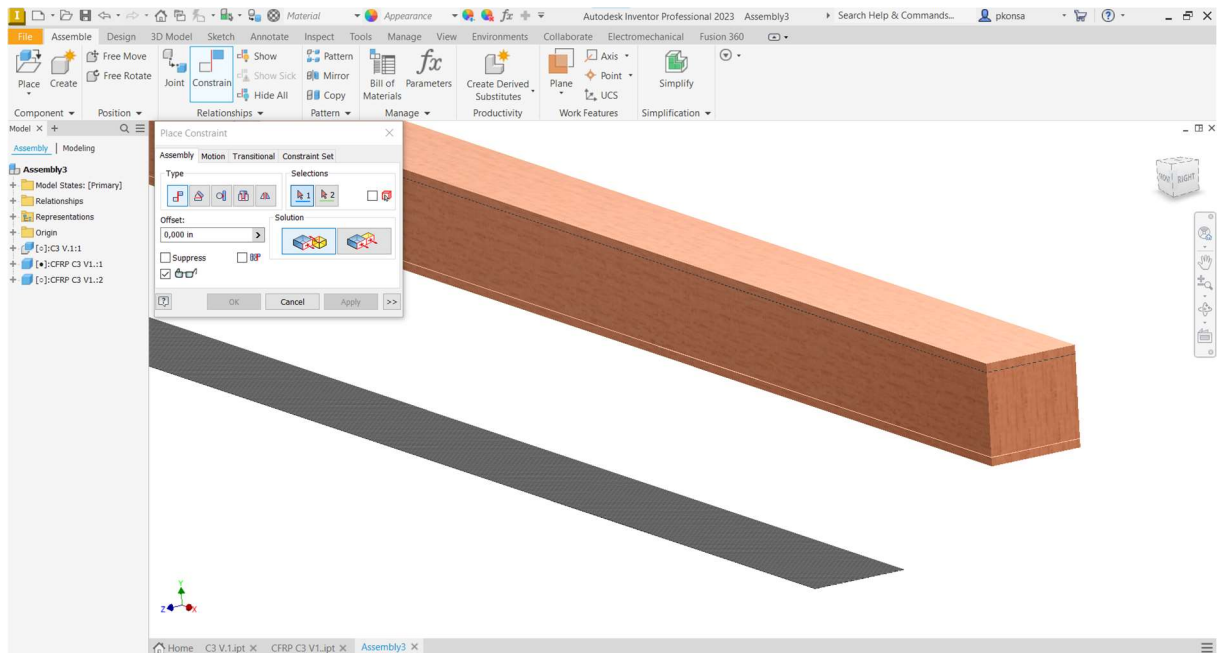
odgovarati dimenzijama karbonskih vlakana u specifikaciji poprečnog presjeka grede (40x0,4 mm, 60x0,4 mm i 40x5 mm).

Unutar nove skice i novog dijela ponavlja se postupak crtanja 2D skice te se naknadno 3D modelira drugi dio grede, koji je u ovom slučaju napravljen od CFRP vlakana (prema poprečnim presjecima uzoraka 40x0,4 mm, 60x0,4 mm i 40x5 mm). Ujedno je to uz dimenzijsku jedina velika promjena u odnosu na modeliranje prvotnog drvenog dijela. Novo modeliranom 3D tijelu pridružuju se svojstva materijala iz Inventorove zbirke koji se zove „CFRP“ (Slika 11).



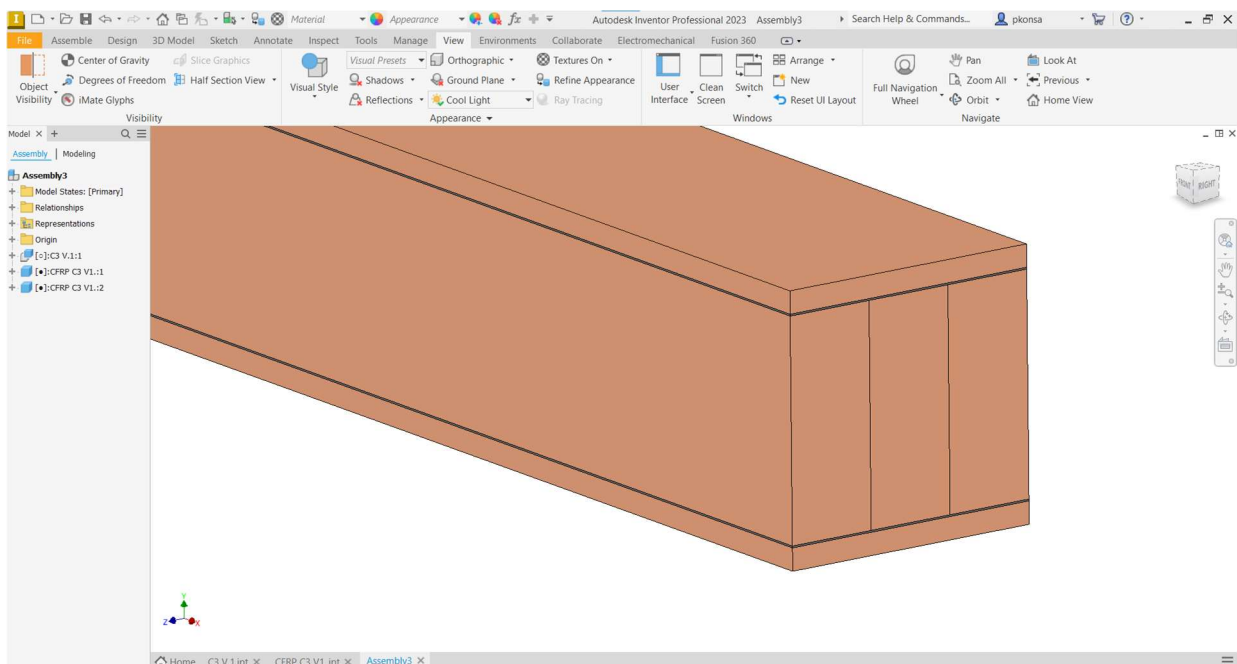
Slika 11 Dodavanje svojstava materijala 3D modelu CFRP

Unutar zasebnog novootvorene datoteke koja omogućava spajanje različitih dijelova unutar sebe („Assembly“) učitavaju se oba prethodno nacrtana dijela i to tako da multiplicira dio s karbonskim vlaknima prema broju definiranih slojeva. Položaj elemenata u sklopu modelirane hrastove grede određuje se grupom naredbi „Place Constraint“ CFRP kojima se određuje točan položaj unutar sklopa. (Slika 12).



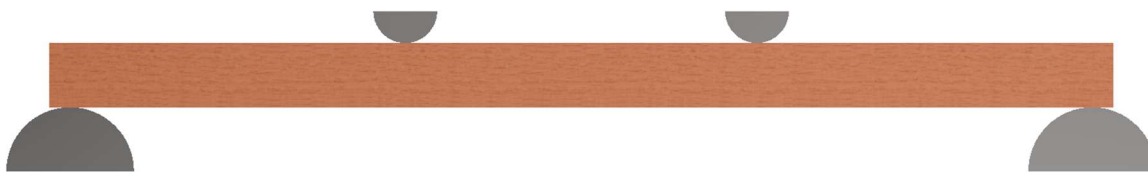
Slika 12 Spajanje hrastove grede s CFRP vlaknima

Finalno greda mora unutar sebe sadržavati sve lamelirane elemente kao zasebne cjeline i pravilno pozicionirane dijelove izrađene od CFRP vlakana (Slika 13).



Slika 13 Finalni izgled grede

Za provođenje virtualnog ispitivanja (navesti kakvog i po kojoj normi) naknadno se na greda dodaju oslonci na slici označiti gdje su oslonci, a gdje pritisna tijela i kotirati iste i pritisna tijela od metala kako bi se što vjernije približilo ovo ispitivanje fizičkom u laboratoriju (Slika 14).



Slika 14 Postavljeni oslonci i pritisna tijela

Prilikom postavljanja oslonaca i pritisnih tijela važno je voditi računa o njihovom razmaku. Oslonci se postavljaju u razmak od 1000 mm, dok su dva pritisna tijela postavljena na trećinama razmaka oslonaca odnosno na 333,33 mm dimenzije ucrtati u sliku. (HRN EN 408:2012.)

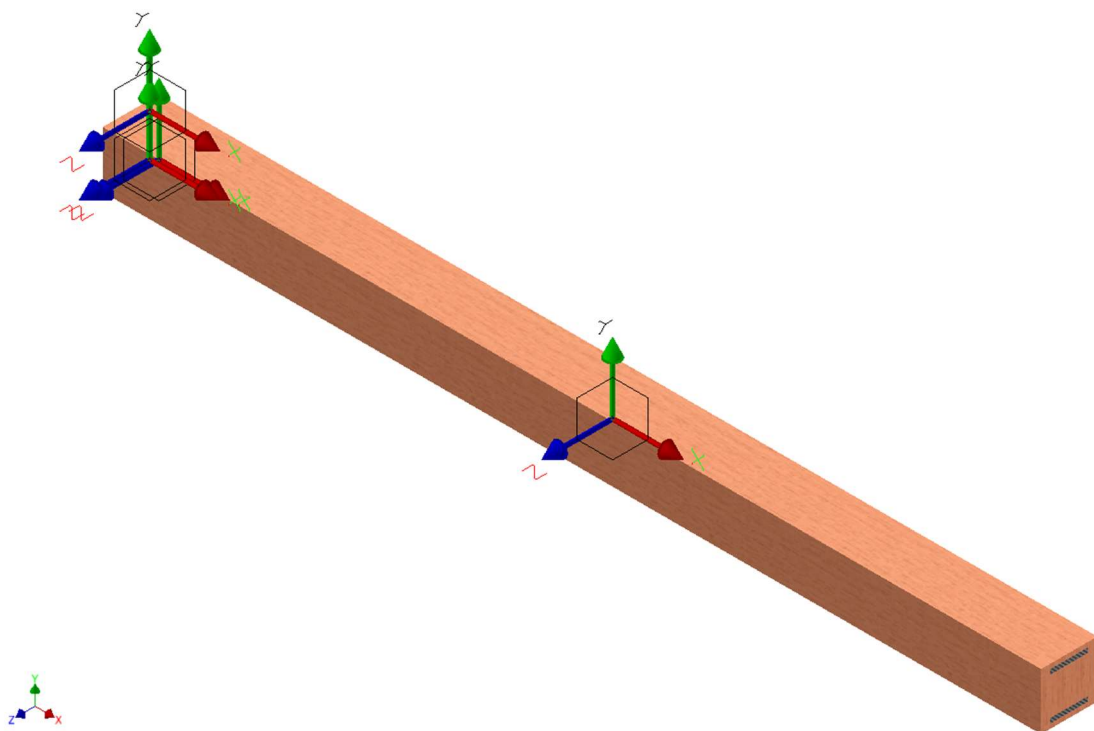
S obzirom na sve navedeno važno je naglasiti razloge pravilne usmjerenosti koordinatnog sustava na početku skiciranja 2D skice. Poprečni presjeci svih greda moraju biti napravljeni unutar YZ ravnine kako bi njihov longitudinalni smjer bio orijentiran uzduž X osi koordinatnog sustava, što će biti važno prilikom postavki materijala.

Jednak postupak ponavlja se za sve tražene uzorke, koje se naknadno dimenzijski izmjenjuje prema željenim formama čime se izrađuje više inačica.

6.2.1. Definiranje uvjeta simulaciju u programu Inventor Nastran

Postavljanje MKE analize unutar okvira računalne simulacije nadovezuje se na stvoreni 3D model. Inventor primarno, kao softver ima ulogu crtanja, dvodimenzionalnih, odnosno modeliranja trodimenzionalnih modela. Primjenom njegovog dodatka Inventor Nastrana prelazi se u modul koji služi za izradu simulacija za koju se koriste ulazni parametri koji se odnose na svojstva materijala i metodu ispitivanja modela.

Za izvođenje probne simulacije uzoraka korištena su svojstva ortotropnih materijala, zbog čega treba izvršiti kontrolu smjerova koordinatnog sustava svih elemenata u modelu (Slika 15).

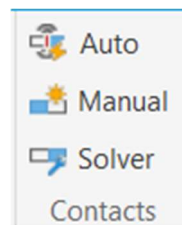


Slika 15 Usmjerenje modela u odnosu na koordinatni sustav

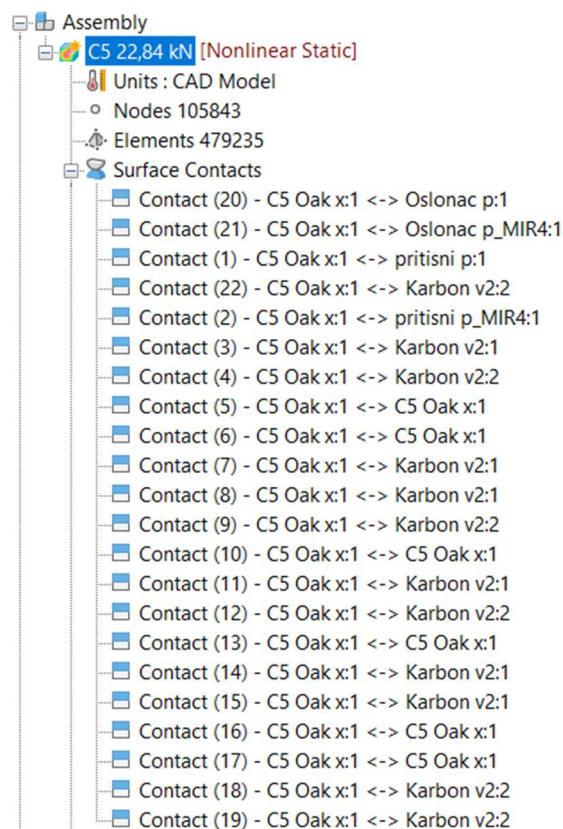
Longitudinalni smjer drva bi se trebao poklapati s X koordinatom sustava, dok bi se radijalni smjer drva trebao preklapati s Y koordinatom, a Z smjer bi trebao odgovarati tangენტnom usmjerenju.

Iako su studije pokazale da kohezivna krutost slojeva ljepila može značajno utjecati na elastične performanse savijenih drvenih-CFRP greda jer je smanjena koncentracija smičnih naprezanja u sloju ljepila, PUR ljepilo također uzrokuje smanjenje krutosti spojeva u usporedbi s, primjerice, epoksidnim ljepilima Kaweck, (2021.), Zbog jednostavnosti izrade simulacije modela, ali i ograničenja koja ima Inventor Nastran dio spojeva koji su lijepljeni bit će zanemareni, i postavljeni kao idealni vrsta kontakta „bonded“. Navedena vrsta spoja ostvaruje

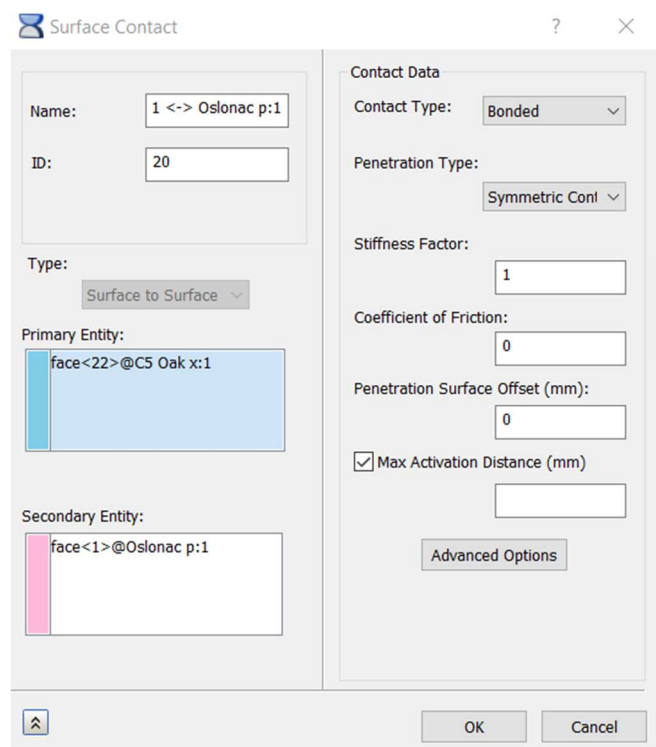
se unutar kartice „Contacts“ (Slika 16) unutar koje se model označava i naknadno bira opcija unutar kartice „Auto“ koja automatski stvara kontakte čiji je popis vidljiv u stablu operacija. Radi se o kontaktima u kombinaciji drvo-drvo (Oak), drvo-pritisno tijelo/oslonac i CFRP-drvo (kod tri od četiri uzorka). Takvi se kontakti ostvaruju unutar cijelog sklopa ako se za naredbu uzima automatsko postavljanje idealnih kontakata. Navedene automatski postavljene kontakte kako smo ranije ustvrdili potrebno je revidirati u dijelu drvo-pritisno tijelo/oslonac. To se ostvaruje uređivanjem kontakta u unutar stabla provedenih operacija (Slika 17). Pritisno tijelo i oslonac ne odgovaraju idealiziranom lijepljenom spoju, već se radi samo o kontaktu između ploha koje nisu ni na koji način međusobno povezane. Stoga se kontakti između njih uređuju kao „separation“ (Slika 18 i 19).



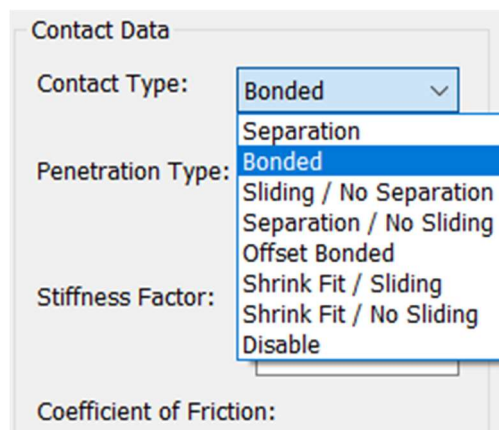
Slika 16 Alatna kartica



Slika 17 Prikazani spojevi u stablu operacija



Slika 18 Uređivanje kontakata

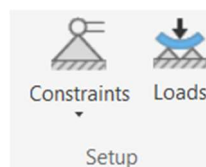


Slika 19 Mogućnosti revidiranja u "Separation contact"

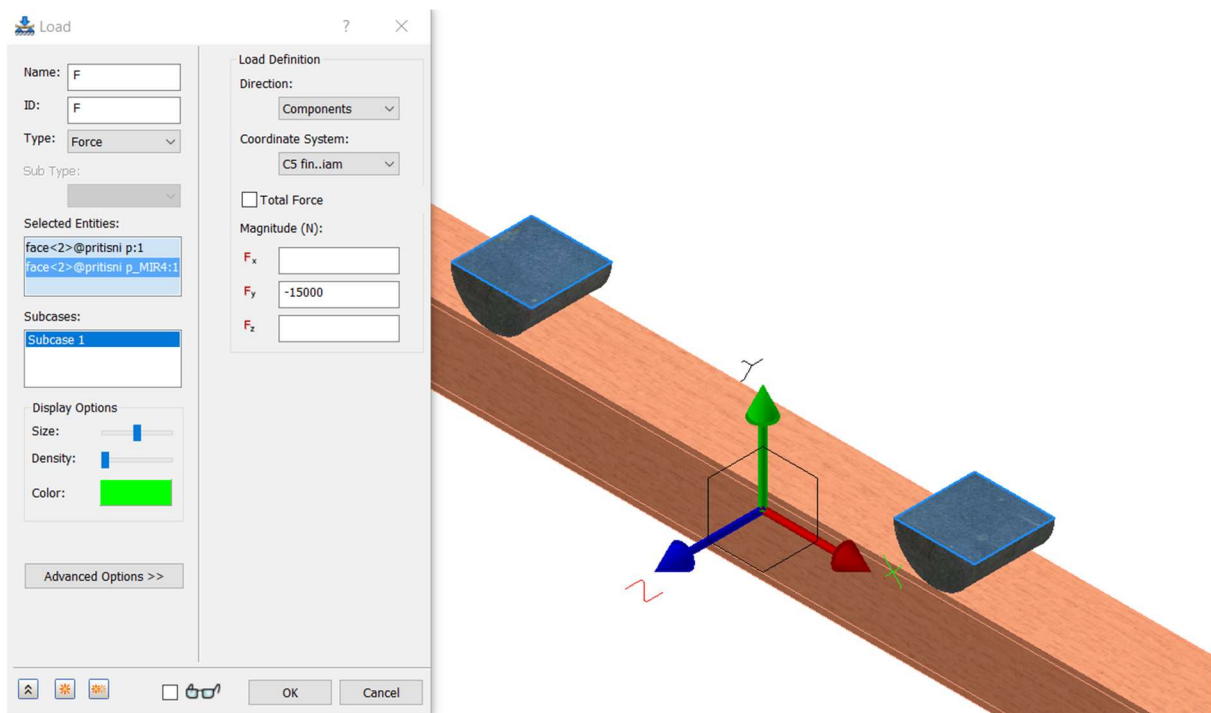
6.2.1.1. Postavljanje sila

Sila je veličina koja je opisiva vektorom, što podrazumijeva poznavanje pravca njenog djelovanja, hvatišta i veličine sile. Takva postavka očekuje se i u okviru ovog modela proračuna. Na prethodno definirana pritisna tijela postavljaju se navedene sile. Prema provedenom ispitivanju one su umjerene prema maksimalnom iznosu sile prije loma koju podnosi uzorak, odnosno uzorak koji predstavlja klasičnu lameliranu hrastovu gredu bez dodatka karbonskih ojačanja. Ostale sile odredit će se kao 25% i 50% maksimalne sile loma uzorka O.

Postavljanje sila unutar programskog okvira započinje naredbom „Load“ unutar kartice „Setup“ (Slika 20) gdje se izborom sile pojavljuju moguća tri smjera djelovanja unutar koordinatnog sustava modela, nakon odabira vršnih ploha pritisnih tijela (Slika 21). U ovom slučaju potrebno je samo upisati iznos sile unutar okvira koji podrazumijeva njezino djelovanje u Y smjeru koordinatnog sustava modela odnosno F_y .

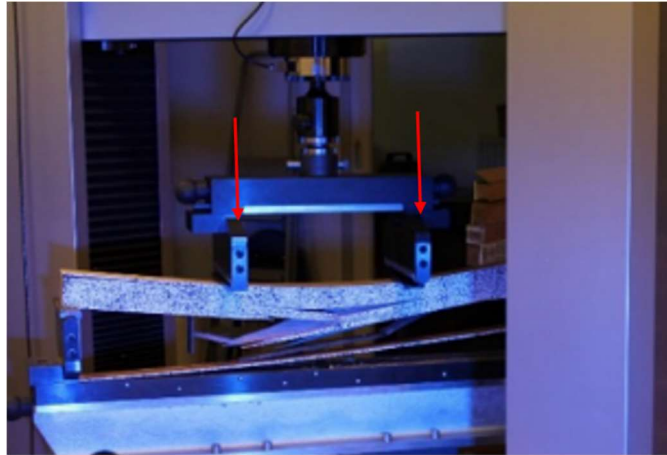


Slika 20 Kartica Setup

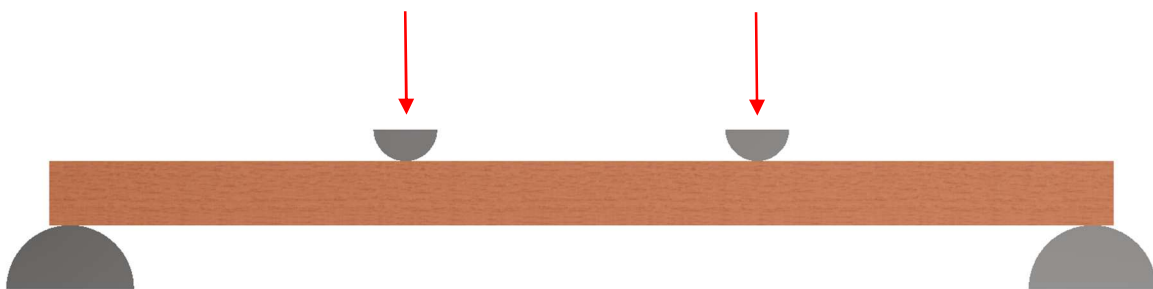


Slika 21 Postavljanje sila

Smjer djelovanja sile određuje se predznakom, što znači da dodjeljuje se minus predznak ako se želi postići da je smjer sile drugačije usmjeren u odnosu na početni koordinatni sustav modela. Traženi parametri veličine sile upisuju se u njutnima (N). Navedene sile dodijeljene su gornjim površinama pritisnih tijela modela, što u stvarnosti odgovara modelu fizičkog ispitivanja na kidalici (Slika 22 i 23).



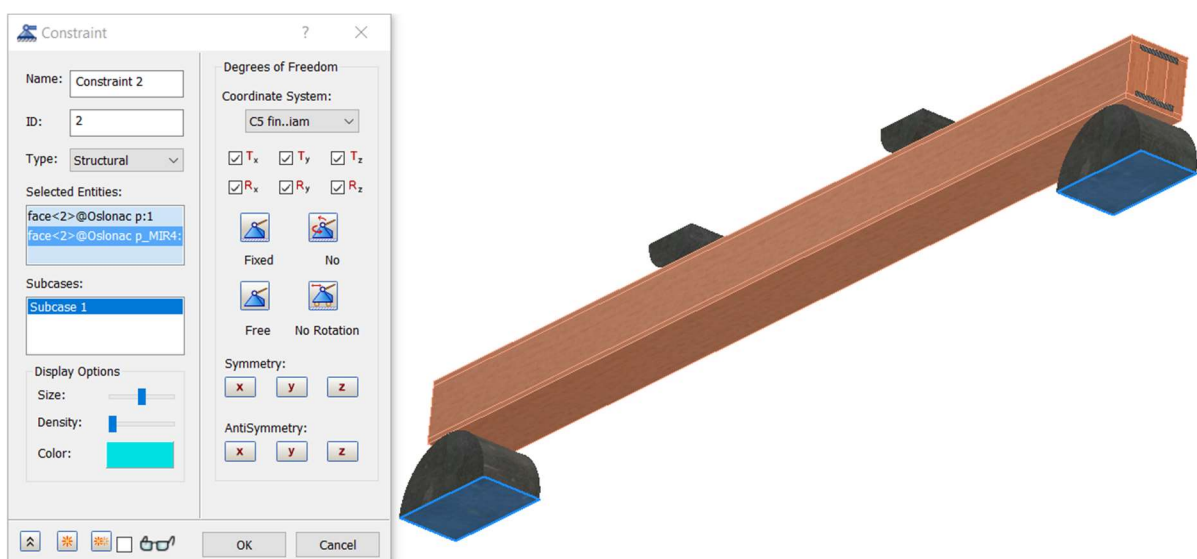
Slika 22 Uzorak na kidalici (Novosel et al 2021.)



Slika 23 Slika modela s postavljenim silama na pritisnim tijelima

6.2.1.2. Postavljanje oslonaca

Postavljanje oslonaca u ovom primjeru slično je onom postavljanju sila, na istoj kartici „*Setup*“ alatom „*Constraint*“. Unutar metode konačnih elemenata postoji generalna problematika postavljanja oslonaca unutar računalnih simulacija koji podrazumijeva maksimalni dozvoljeni stupanj slobode oslonaca koji se ne bi trebao razlikovati od stvarnih uvjeta unutar kojih se produkt bilo kakve vrste nalazi, što ponekad traži dobro razumijevanje mehaničkih ponašanja odnosa oslonaca. Potrebno je na pravilan način definirati površine, točke i linije koje moraju biti fiksirane. U ovom primjeru to nije teško odrediti. S donje strane uzorka postavljaju se dva oslonca (Slika 24).



Slika 24 Vezivanje oslonaca

Prilikom postavljanja oslonaca potrebno je definirati i stupnjeve slobode kojih u ovom slučaju s obzirom na to da vezivanje postavljamo na zasebni element 3D oslonca nema. Stoga nam stupnjevi slobode postavkom „*Fixed*“ odgovaraju.

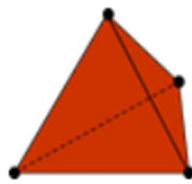
6.2.1.3. Postavljanje mreže – idealizacija modela

Vrsta mreže i njezin položaj. Mreža je zapravo dio postupka idealizacije koja započinje definiranjem materijala, a završava podjelom modela ili njegovog dijela na mrežu manjih elemenata kojima Inventor Nastran računa položaj pomaka metodom konačnih elemenata.

Postavke mreže definirane su, finoćom mreže koja je određena brojem elemenata na zadanoj površini. Što je mreža gušća, odnosno finija rezultati bi trebali biti točniji. Međutim takav pristup ima i nedostatke koji se ogledaju u potrebi za računalima koja čije karakteristike mogu podnijeti zadane operacije.. Potrebno je da mreža dobro prati geometriju grede.

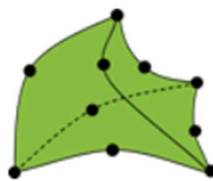
Vrste elemenata na koju se geometrija ispitnog elementa dijeli u Nastranu unutar postavki mreže za takozvani „*Solid element*“ koja podrazumijeva trodimenzionalnost modela je tetraedar. Tetraedar unutar takvih postavki može imati dva oblika.

Prvi oblik je linearni tetraedar i on podrazumijeva ravne plohe s 4 točke čvorišta (Slika 25).



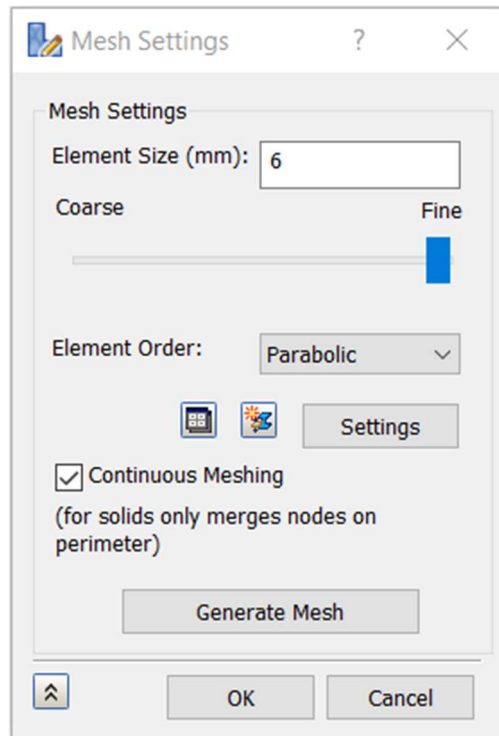
Slika 25 Linearni tetraedar

Odnosno, oblik paraboličnog tetraedra koji podrazumijeva zakrivljene plohe s 10 točaka čvorišta (Slika 26).



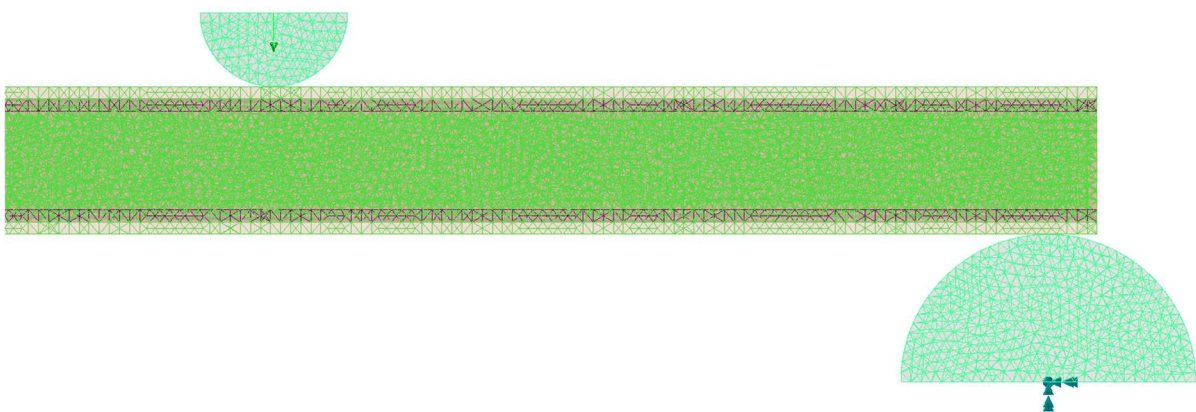
Slika 26 Parabolični tetraedar

Parabolična mreža ima veću točnost u primjeni jer ima mogućnost slobodnog zakrivljenja rubova i bolje aproksimacije zakrivljene geometrije, stoga je prilikom generiranja mreže ona i odabrana. „*Element size*“ u milimetrima unutar postavki mreže je vrijednost koja je direktno povezana s finoćom mreže (Slika 27).



Slika 27 Postavke mreže

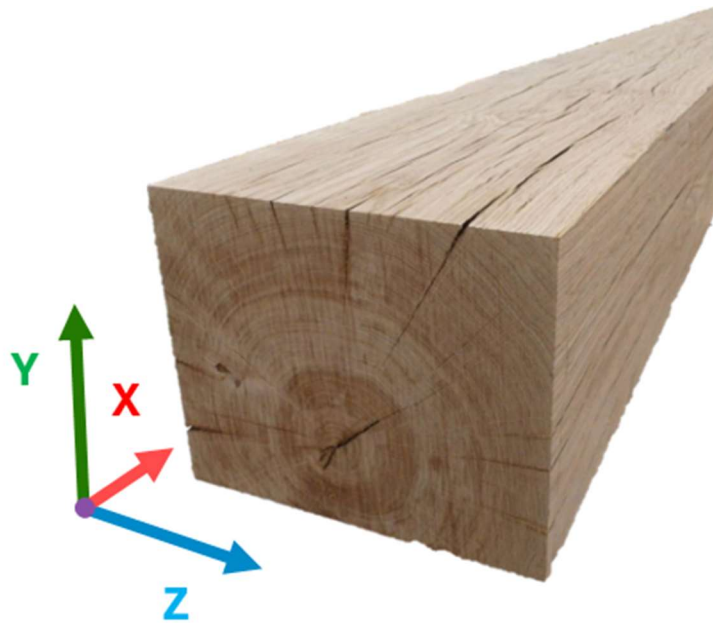
Konačno izveden model unutar Inventor Nastrana s generiranom mrežom, osloncima i pritisnim tijelima izgleda kao na slici (Slika 28) koja prikazuje polovinu grede čiji je ostatak simetričan ovome dijelu, a prikazuje oslonac s dodijeljenim karakteristikama, pritisno tijelo s dodijeljenom silom i samu gredu, odnosno uzorak.



Slika 28 Polovina modela - prikaz mreže, oslonaca i pritisnih tijela

6.2.2. Svojstva drva (*Quercus Robur L.*) unutar računalnih simulacija

Drvo se definira kao anizotropni materijal jer njegova svojstva variraju u odnosu na sve moguće smjerove, odnosno presjeke. Mehanički gledano, kroz metodu konačnih elemenata, drvo će biti podvrgnut 3D ortotropnom modelu promatranja. 3D ortotropni modeli unutar FEM analize predstavljaju prikazivanje mehaničkih svojstava materijala i njegovog ponašanja pri simulaciji s obzirom na tri osnovna smjera promatranja. U ovom slučaju, mehanička svojstva drva mogu se odrediti u longitudinalnom, radijalnom i tangencijalnom smjeru s pomoću odgovarajućih uzoraka drva Hu et al (2021.).



Slika 29 Smjerovi drva u ovisnosti o koordinatnom sustavu modela

Model se unutar FEM analize postavlja tako da se prate navedeni smjerovi, odnosno X smjer koordinatnog sustava u longitudinalnom smjeru drva, Y smjer koordinatnog sustava u radijalnom smjeru u odnosu na poprečni presjek, a Z smjer u odnosu na tangencijalni smjer drva (Slika 29). Ovako postavljene smjerove kod drva stvaraju presjeke u kojima se drvo inače tehnički promatra i s mehaničkih stajališta, ali i sa stajališta higroskopnosti i ostalih svojstava drva.

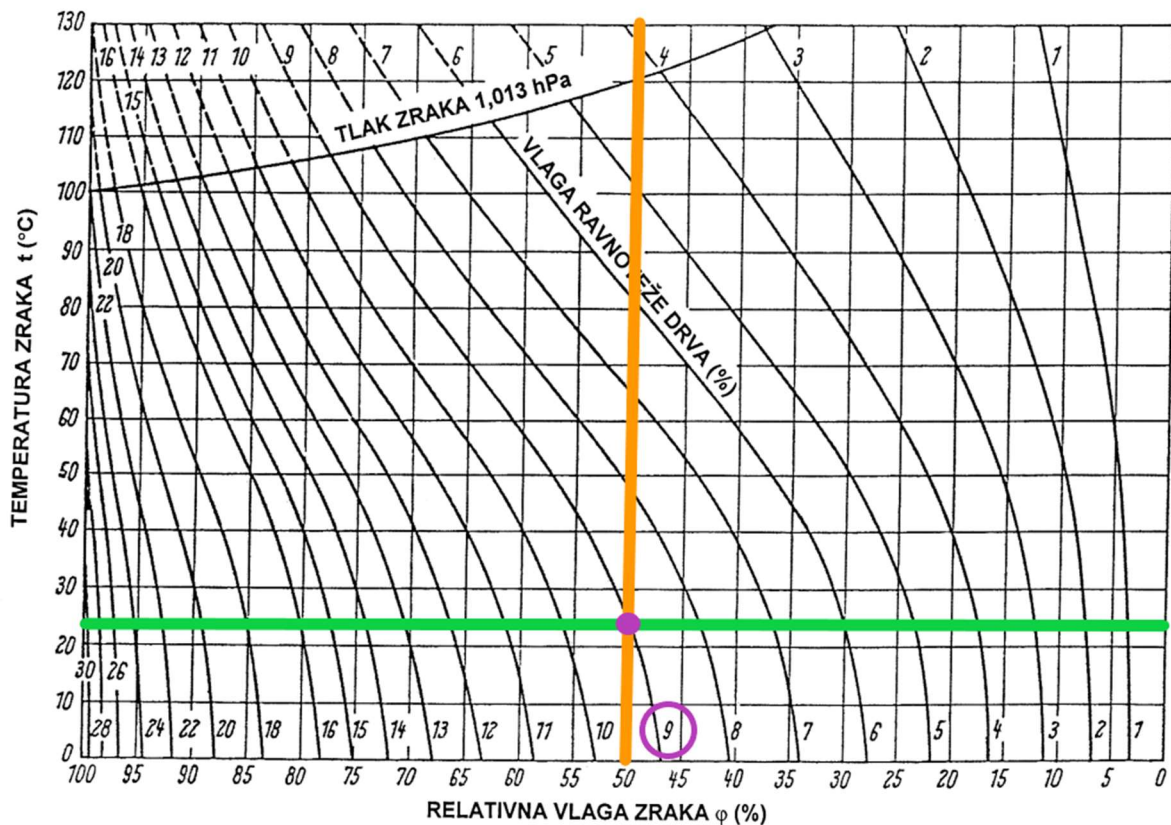
Naknadno se ovako usmjerenom i koordinatno određenom modelu pridodaju mehanička svojstva. Mehanička svojstva drva uglavnom se promatraju u 12% sadržaja vlage, što je standard u gotovo svim priručnicima. Stoga u odnosu na smjerove, odnosno presjeke za drvo (*Quercus Robur L.*) iz članka (Tippner et al 2022.) preuzeti su sljedeći parametri (Tablica 4).

$\rho_{\text{Quercus Robur L.}} = 738 \text{ kg/m}^3$ pri 12% sadržaja vlage

Tablica 4 Mehanički parametri pri 12% sadržaja vlage

Modul elastičnosti (MPa)			Modul klizanja (MPa)			Poissonov koeficijent		
E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}	V_{LR}	V_{LT}	V_{RT}
14699	656	494	1900	2015	127	0,037	0,028	0,326

U istraživanju Novosel et al (2021.) koje je fizički izvedeno uzorci su se kondicionali na $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ i $50\% \pm 5\%$ što bi prema nomogramu za određivanje ravnoteže sadržaja vlage bilo ekvivalentno 9% sadržaja vlage u drvu (Slika 30).



Slika 30 Keylwerth dijagram očitavanje vlage ravnoteže drva

S obzirom na to da mehanička svojstva drva, zbog njegove higroskopnosti variraju, a potrebne vrijednosti navedene u literaturi odnose se na 12% sadržaja vode izvršena je aproksimacija na 9% sadržaja vode (Tablica 5).

$$E_{MC2} = E_{MC1} \times (1 + k_E \times (MC2 - MC1))$$

$$G_{MC2} = G_{MC1} \times (1 + k_G \times (MC2 - MC1))$$

$$v_{MC2} = v_{MC1} \times (1 + k_v \times (MC2 - MC1))$$

$$k_E = -0,02$$

$$k_G = -0,015$$

$$k_v = -0,005$$

$$MC1 = 12\%$$

$$MC2 = 9\%$$

$$E_L(9\%) = 14,669 \times (1 - 0,02 \times (9 - 12)) = 14,669 \times 1,06 \approx 15549 \text{ MPa}$$

$$E_R(9\%) = 656 \times (1 - 0,02 \times (9 - 12)) = 656 \times 1,06 \approx 695 \text{ MPa}$$

$$E_T(9\%) = 494 \times (1 - 0,02 \times (9 - 12)) = 494 \times 1,06 \approx 524 \text{ MPa}$$

$$G_{LR}(9\%) = 1900 \times (1 - 0,015 \times (9 - 12)) = 1900 \times 1,045 \approx 1985,5 \text{ MPa}$$

$$G_{RT}(9\%) = 127 \times (1 - 0,015 \times (9 - 12)) = 127 \times 1,045 \approx 132,7 \text{ MPa}$$

$$G_{LT}(9\%) = 2015 \times (1 - 0,015 \times (9 - 12)) = 2015 \times 1,045 \approx 2106,7 \text{ MPa}$$

$$v_{LR}(9\%) = 0,037 \times (1 - 0,005 \times (9 - 12)) = 0,037 \times 0,985 \approx 0,036$$

$$v_{RT}(9\%) = 0,326 \times (1 - 0,005 \times (9 - 12)) = 0,326 \times 0,985 \approx 0,321$$

$$v_{LR}(9\%) = 0,028 \times (1 - 0,005 \times (9 - 12)) = 0,028 \times 0,985 \approx 0,028$$

$\rho_{Quercus Robur L.} = 715,86 \text{ kg/m}^3$ pri 9% sadržaja vlage

Tablica 5 Mehanički parametri pri 9% sadržaja vlage

Modul elastičnosti (MPa)			Modul klizanja (MPa)			Poissonov koeficijent		
E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}	V_{LR}	V_{LT}	V_{RT}
15549	695	524	1985,5	2106,7	132,7	0,036	0,028	0,321

6.2.2.1. Definiranje 3D ortotropnog materijala

Drvo se unutar tehničkih, ali i bioloških okvira promatra u tri ravnine presjeka, odnosno ravninama poprečnog, tangentsnog i radijalnog presjeka. Te tri ravnine presjeka međusobno su okomite jedna na drugu i dobro opisuju svojstva drva u ovisnosti o njegovoj izotropnosti i nehomogenoj građi.

Prema opisu Inventor Nastran unutar postavki materijala nudi upravo navedene parametre. Unutar postavki materijala sada upisuju se željena mehanička svojstva prema Tablici 2., odnosno aproksimirana mehanička svojstva drva pri 9% sadržaja vlage. U postavkama materijala „*Orthotropic 3D*“ traženi su podaci modul elastičnosti, modul klizanja i poissonov koeficijent, riječ je ujedno o ključnim mehaničkim odrednicama nekog materijala. Svaki podatak tražen je u tri smjera presjeka (Slika 31).

The screenshot shows the 'Material' dialog box with the following sections and values:

- General:**
 - ρ : 7,6e-10
 - GE: 0
 - T_{REF} : (empty)
- Stiffness:**
 - E_1 : 15549
 - E_2 : 694
 - E_3 : 524
- Thermal:** (checkbox checked)
 - C: 1,2e+9
 - K_{11} : 16,3
 - K_{22} : 16,3
 - K_{33} : 16,3
 - K_{12} : 0
 - K_{13} : 0
 - K_{23} : 0
- Shear Modulus:**
 - G_{12} : 2014
 - G_{23} : 2135,9
 - G_{31} : 2135,9
- Poisson's Ratio:**
 - ν_{12} : 0,036
 - ν_{23} : 0,028
 - ν_{13} : 0,321
- Thermal Exp. Coeff.:**
 - α_1 : (empty)
 - α_2 : (empty)
 - α_3 : (empty)
- Allowables:**
 - X_T : (empty)
 - Y_T : (empty)
 - Z_T : (empty)
 - S_{12} : (empty)
 - S_{23} : (empty)
 - S_{13} : (empty)
 - X_C : (empty)
 - Y_C : (empty)
 - Z_C : (empty)
 - F_{12} : (empty)
 - F_{23} : (empty)
 - F_{13} : (empty)

Additional controls on the left include: 'Select Material', Name: 'Wood (Oak)', ID: '1', Type: 'Orthotropic 3D', Sub Type: 'Neo-Hookean', Idealizations: 'Solid 1', 'Save New Material', and Analysis Specific Data: 'Nonlinear', 'Fatigue', 'PPFA'. Buttons 'OK' and 'Cancel' are at the bottom right.

Slika 31 Podešavanje 3D ortotropnih parametara drva

6.2.2.2. Definiranje nelinearnog modela drva *Quercus Robur L.*

Nelinearnost MKE poznaje dvije razine, jedna je geometrijska nelinearnost, dok je druga vezana uz materijal, stoga je riječ o materijalnom nelinearnosti, koja je u ovom primjeru puno relevantniji čimbenik. Kako Sorić (2021.) zaključuje: ovisno o geometriji i materijalu, odziv konstrukcije poradi opterećenja može biti povećanje ili smanjenje krutosti s obzirom na linearno ponašanje. Kod nelinearnog ponašanja materijala matrica materijala ovisi o naprezanju što je svojstvenom području neelastičnog ponašanja materijala.

Generalne razlike između linearne i nelinearne analize opisana je u tablici (Tablica 6).

Tablica 6 Razlike između linearne i nelinearne analize MKE

Linearna analiza	Nelinearna analiza
Pretpostavlja da je odnos između sile i pomaka proporcionalan	Uzima u obzir promjenu između sile i pomaka
Materijal se smatra potpuno elastičnim	Materijal slijedi zakonitosti plastičnosti i elastičnosti
Zanemaruje određene promjene u geometriji modela u odnosu na deformaciju	Uzima u obzir sve promjene geometrije
Koristi linearnu jednadžbu za rješavanje metode	Primjenjuje iterativne metode rješavanja
Upotrebljavaju manje računalnih resursa	Zahtjevnije su stoga su potrebni veći računalni resursi

Prilikom definiranja nelinearnog modela postoje brojne opcije koje opisuju ponašanje materijala prilikom opterećenja. Takve opcije služe da bi se što bolje približilo stvarno ponašanje materijala računalnoj simulaciji.

Drvo se u ovom slučaju definira kao elastično-plastičan materijal za čije je postavke unutar programskog okvira potrebno poznavati granicu puzanja i tangencijalni model (Slika 32).

Tražene dimenzije za definiranje ovakvog modela su tangencijalni modul E_t u MPa koji definira krutost materijala nakon granice puzanja i početna granica puzanja također u MPa. Granica puzanja također je dana za sadržaj vlage od 12%, stoga ju je potrebno aproksimirati na 9%.

Aproksimacija granice puzanja s 12% sadržaja vlage na 9%.

$$\sigma_{y,12\%} = 48 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y,9\%} = \sigma_{y,12\%} \times (1 - k_y \times (9 - 12))$$

$$\sigma_{y,9\%} = 48 \times (1 - (-0.02) \times (9 - 12))$$

$$\sigma_{y,9\%} = 48 \times 1.06$$

$$\sigma_{y,9\%} \approx 50.88 \text{ MPa}$$

Tangencijalni modul E_t izveden je kao 5% srednjeg elastičnog modela (Forest Products Laboratory. (2010).).

$$E_{avg} = \frac{E_L + E_R + E_T}{3}$$

$$E_{avg,9\%} = \frac{15,549 + 695 + 524}{3}$$

$$E_{avg,9\%} \approx 5,589.33 \text{ MPa}$$

$$E_t = 0.05 \times E_{avg}$$

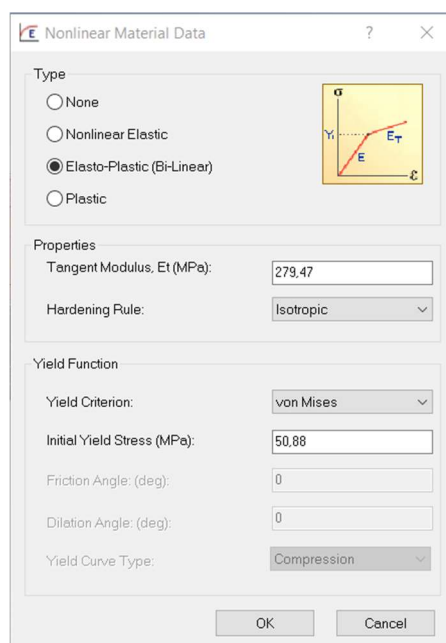
$$E_t \approx 0.05 \times 5,589.33$$

$$E_t \approx 279.47 \text{ MPa}$$

Iz čega proizlazi (Tablica 7) prikaza opisa nelinearnog ponašanja drva *Quercus Robur L.*

Tablica 7 Nelinearne postavke *Quercus Robur L.*

Tangencijalni model E_t (MPa)	279,47 MPa
Granica puzanja (MPa)	50,88 MPa



Slika 32 Definiranje nelinearnog modela drva

6.2.3. Svojstva ugljičnih vlakana (CFRP) unutar računalnih simulacija

Ugljična vlakna se kao i drvo mogu promatrati unutar jednakog modela 3D ortotropnog materijala. Za takav opis potrebni su isti parametri kao i kod drva. CFRP kao materijal nije higroskopan stog aproksimacija na kondicionirani sadržaj vlage nije potrebna (Tablica 8). Vrijednosti su preuzete iz rada Kawecki (2021).

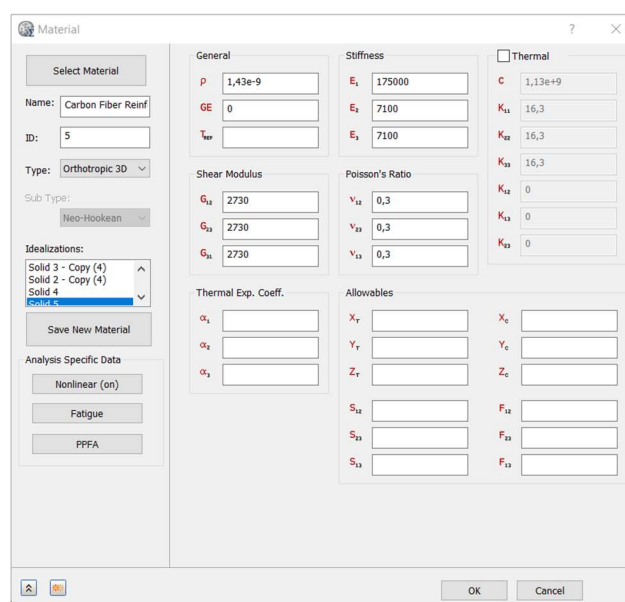
Tablica 8 Mehanički parametri ugljičnih vlakana Kawecki, (2021).

Modul elastičnosti (MPa)			Modul klizanja (MPa)			Poissonov koeficijent		
E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}
175000	7100	7100	2730	2730	2730	0,3	0,3	0,3

Vlakna CFRP pokazuju nelinearno ponašanje u određenim uvjetima opterećenja. Njihovo ponašanje pod tlačnim opterećenjem karakterizirano je nelinearnom krivuljom naprezanja-deformacije prema radu Barour at all (2022.), isti rad donosi i model koji nije primjenjiv na postavke materijala u Inventor Nastran-u).

6.2.3.1. Definiranje 3D ortotropnog materijala ugljičnih vlakana

Unutar postavki materijala upisuju se željena mehanička svojstva prema Tablici 8., odnosno mehanička svojstva karbonskih vlakana (Slika 33). Unutar postavki koje su jednake kao i za drvo u ovakvoj metodologiji („*Orthotropic 3D*“) traženi su podaci modul elastičnosti, modul klizanja i poissonov koeficijent, riječ je ujedno o ključnim mehaničkim odrednicama nekog materijala. Svaki podatak tražen je u tri smjera presjeka



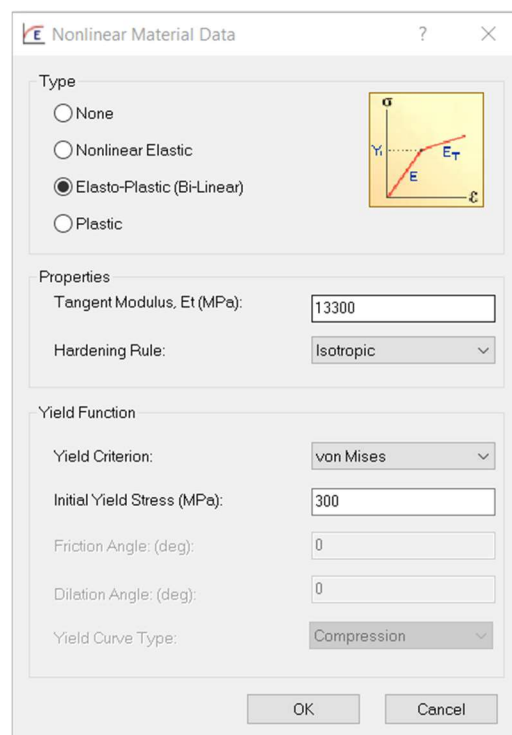
Slika 33 Podešavanje 3D ortotropnih parametara karbonskih vlakana

6.2.3.2. Definiranje nelinearnog modela ugljičnih vlakana

Nelinearno ponašanje karbonskih vlakana najbolje opisuje elastično-plastični model. Postavke unutar programskog okvira jednako je kao i kod drva i potrebno je poznavati granicu puzanja i tangencijalni model (E_t) (Tablica 9) (Slika 34).

Tablica 9 Nelinearne postavke ugljičnih vlakana prema radu Barour at all (2022.)

Tangencijalni model E_t (MPa)	13300 MPa
Granica puzanja (MPa)	300 MPa



Slika 34 Definicija nelinearnog modela ugljičnih vlakana

7. Rezultati

Uzorak O (uzorak lameliranog drva bez dodataka ostalih materijala) je prema navedenim parametrima unutar simulacije pokazao sljedeće rezultate, analize deformacija unutar modela pri sili od 22,84 kN iznosila je 29,67 mm (Slika 35), dok je deformacija prema upola manjoj sili 11,42 kN iznosila 13,55 mm (Slika 36). Prema najmanjoj ispitnoj i referentnoj sili koja iznosi 5,71 kN deformacija iznosi 8,31 mm (Slika 37).



Slika 35 Deformacija uzorka O pri 22,84 kN



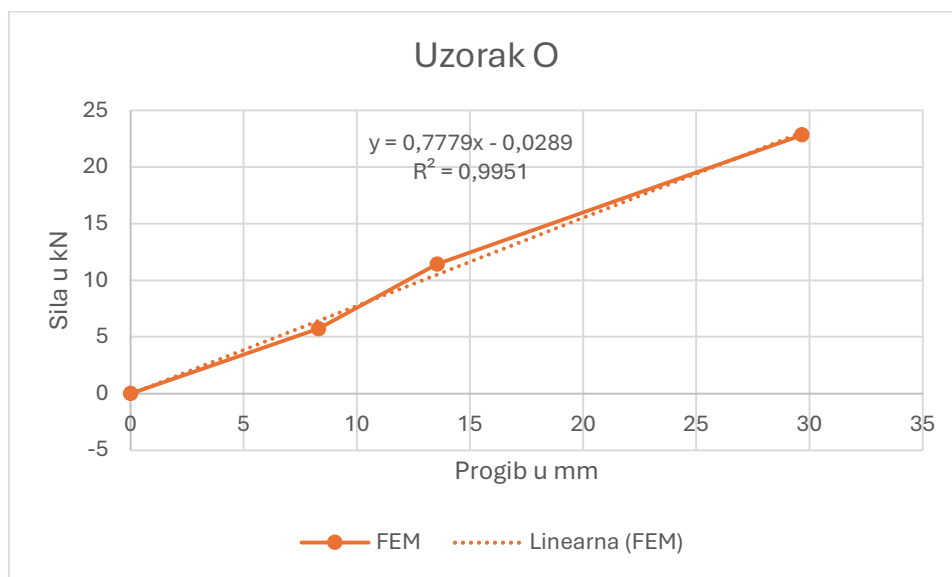
Slika 36 Deformacija uzorka O pri 11,42 kN



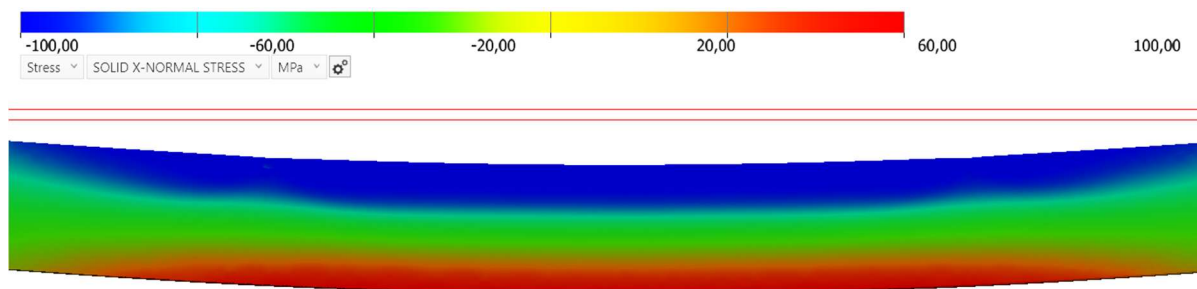
Slika 37 Deformacija uzorka O pri 5,71 kN

Ako grafički, točkastim grafikonom možemo vidjeti trend i odstupanje navedenih rezultata od linearne analize (Grafikon 1).

Grafikon 1 Prikaz rezultata nelinearne MKE u odnosu na lineariziranu za uzorak O

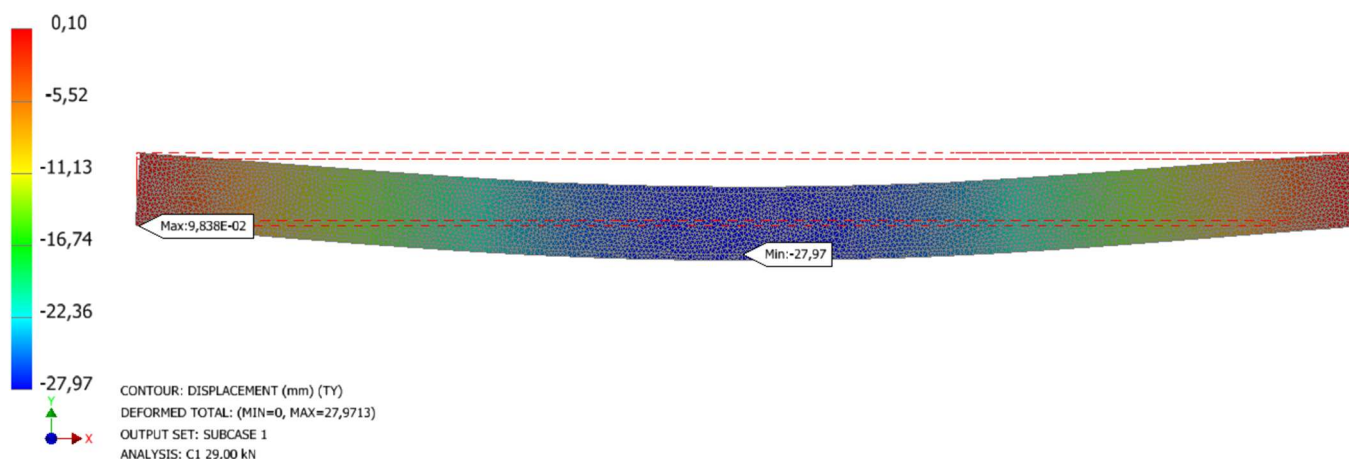


Skala je prilagođena kako bi se vizualni pregled mogao izvršiti u rasponu vizualne skale boja od -100 i 100 (Slika 38).

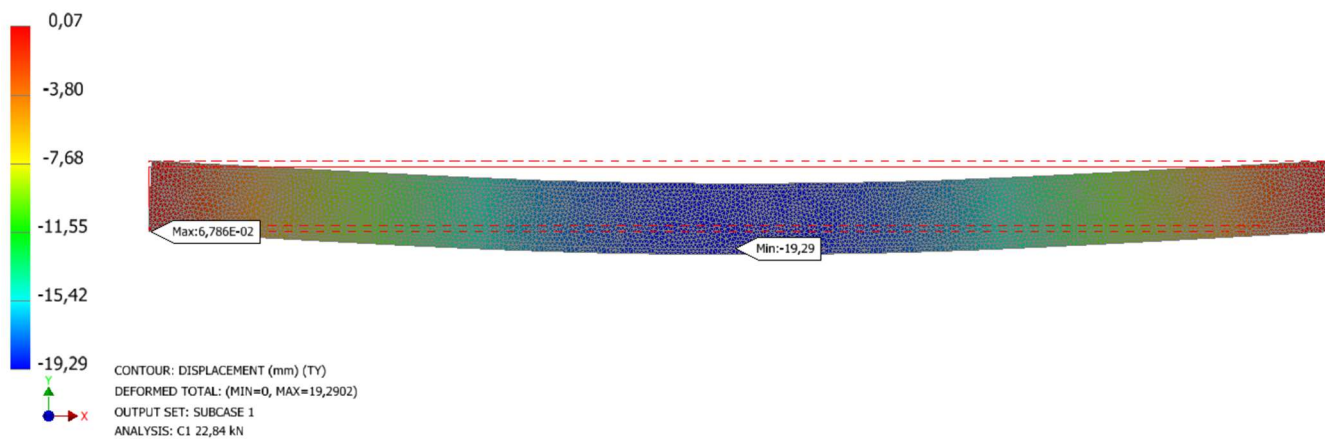


Slika 38 Distribucija naprezanja uzorka O pri 22,84 kN

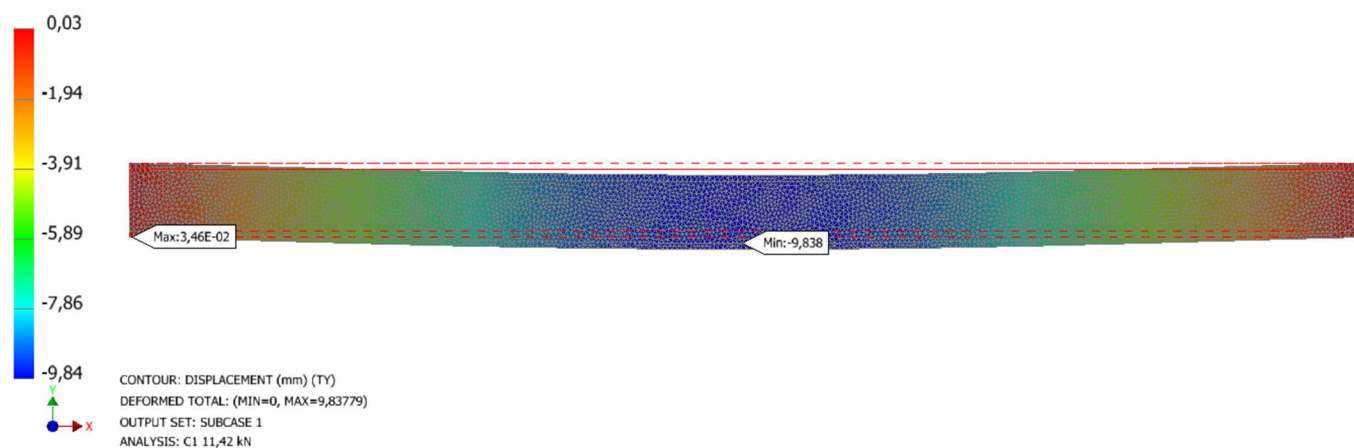
Uzorak C1 (uzorak lameliranog drva ojačan karbonskim vlaknima 2xCFRP 40×0,4 mm) je prema navedenim parametrima unutar simulacije pokazao sljedeće rezultate, analize deformacija unutar modela na sili neposredno pred očekivani lom koja iznosi 45,49 kN imao deformaciju od 27,97 mm (Slika 39), dok je pri sili od 22,84 kN ona iznosila je 19,29 mm (Slika 40), deformacija prema upola manjoj sili 11,42 kN iznosila 9,84 mm (Slika 41). Prema najmanjoj ispitnoj i referentnoj sili koja iznosi 5,71 kN deformacija iznosi 5,02 mm (Slika 42).



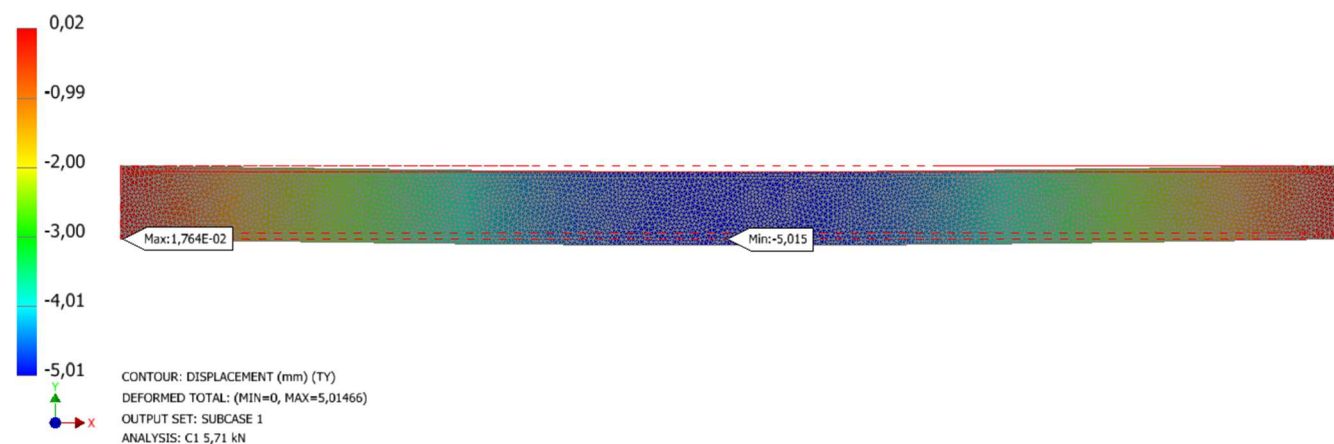
Slika 39 Deformacija uzorka C1 pri 29,00 kN



Slika 40 Deformacija uzorka C1 pri 22,84 kN



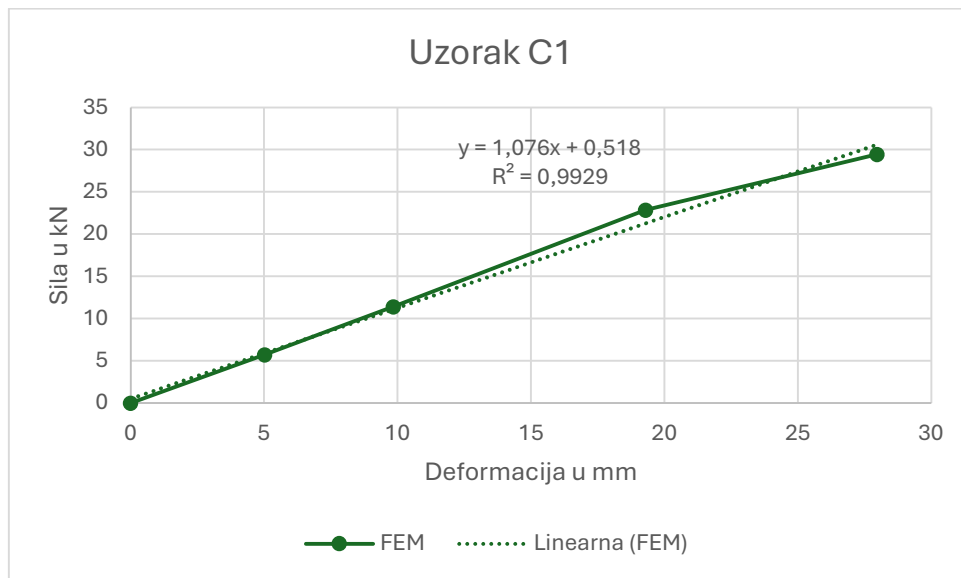
Slika 41 Deformacija uzorka C1 pri 11,42 kN



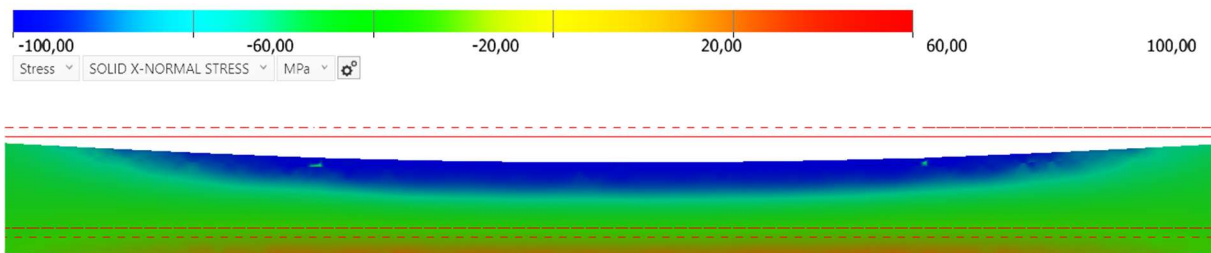
Slika 42 Deformacija uzorka C1 pri 5,71 kN

Ako navedene rezultate prikazemo grafički, točkastim grafikonom možemo vidjeti trend i odstupanje navedenih rezultata od linearne analize (Grafikon 2).

Grafikon 2 Prikaz rezultata nelinearne MKE u odnosu na lineariziranu za uzorak C1

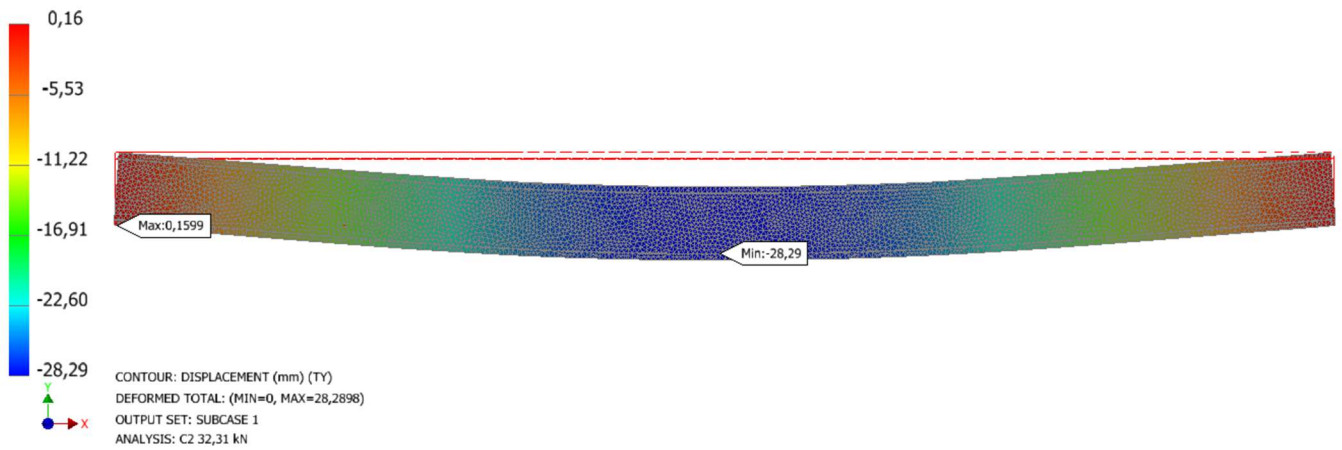


Distribucija naprezanja prema svemu navedenom promatrano u odnosu na os X je pravilna i za iznos sile od 22,84 kN prikazuje naprezanja sukladno deformaciji. Skala je prilagođena kako bi se vizualni pregled mogao izvršiti u rasponu vizualne skale boja od -100 i 100 (Slika 43).

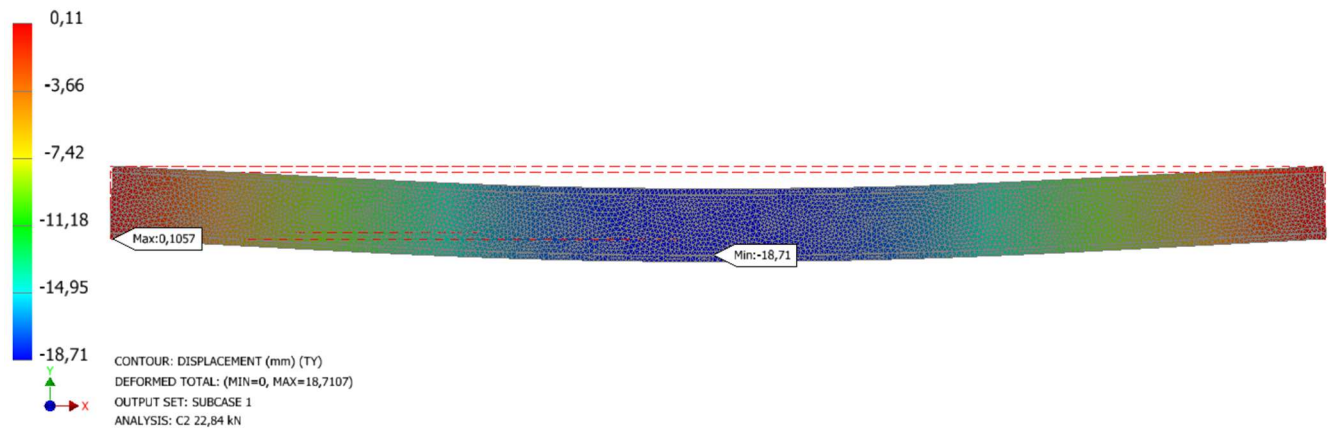


Slika 43 Distribucija naprezanja uzorka C1 pri 22,84 kN

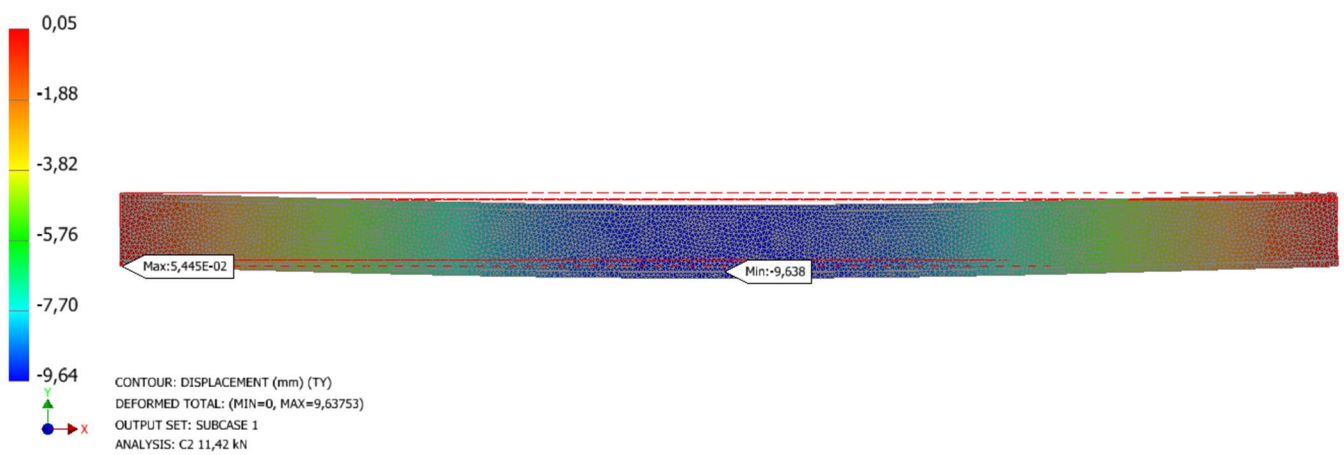
Uzorak C2 (uzorak lameliranog drva ojačan karbonskim vlaknima $2 \times \text{CFRP } 40 \times 5 \text{ mm}$) je prema navedenim parametrima unutar simulacije pokazao sljedeće rezultate, analize deformacija unutar modela na sili neposredno pred očekivani lom koja iznosi 32,31 kN imao deformaciju od 28,29 mm (Slika 44), dok je pri sili od 22,84 kN ona iznosila je 18,71 mm (Slika 45), deformacija prema upola manjoj sili 11,42 kN iznosila 9,64 mm (Slika 46). Prema najmanjoj ispitnoj i referentnoj sili koja iznosi 5,71 kN deformacija iznosi 4,91 mm (Slika 47).



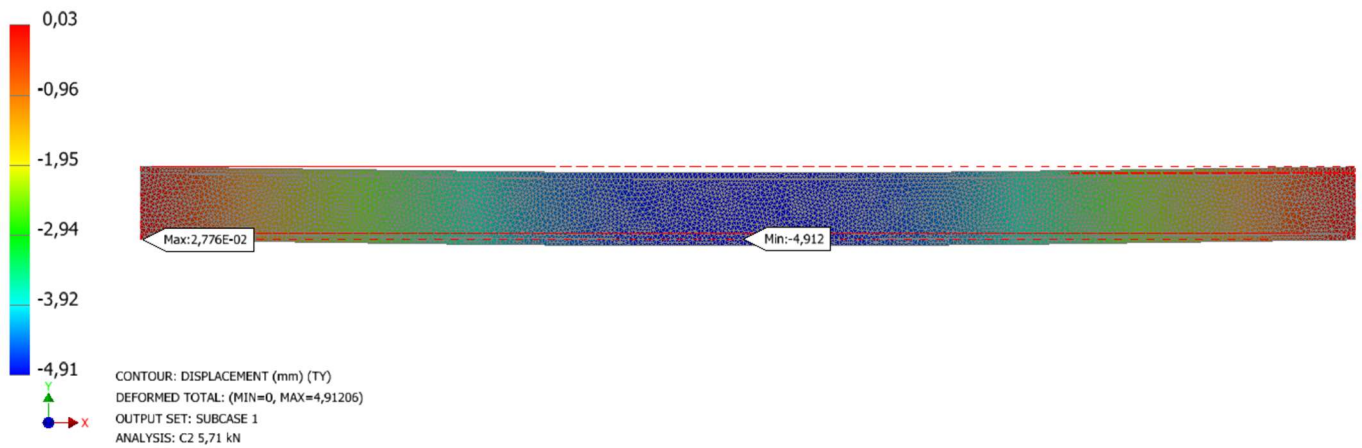
Slika 44 Deformacija uzorka C2 pri 32,31 kN



Slika 45 Deformacija uzorka C2 pri 22,84 kN



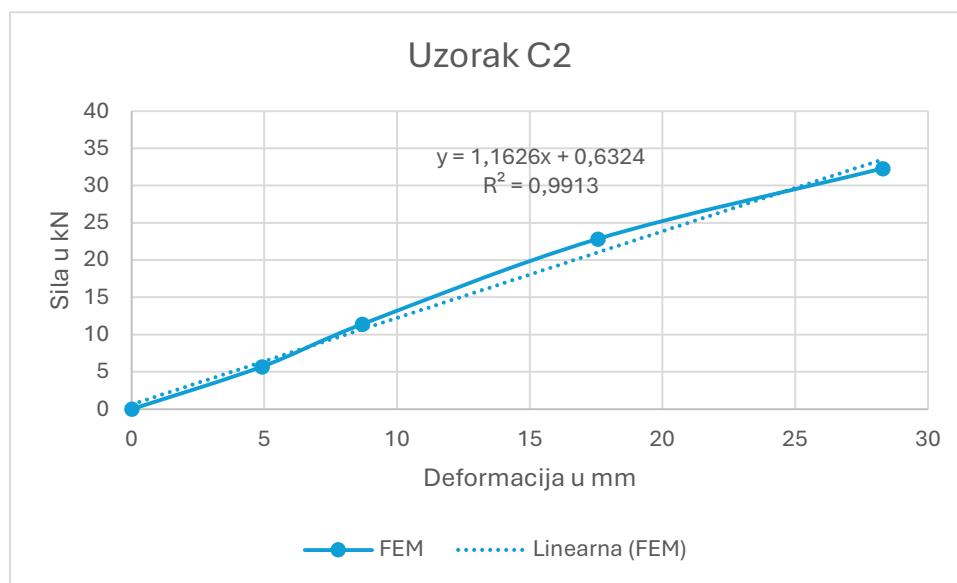
Slika 46 Deformacija uzorka C2 pri 11,42 kN



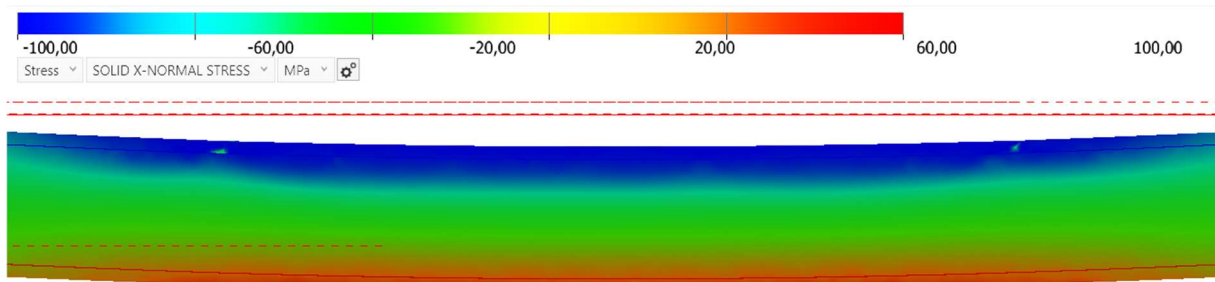
Slika 47 Deformacija uzorka C2 pri 5,71 kN

Ako navedene rezultate prikažemo grafički, točkastim grafikonom možemo vidjeti trend i odstupanje navedenih rezultata od linearne analize (Grafikon 3).

Grafikon 3 Prikaz rezultata nelinearne MKE u odnosu na lineariziranu za uzorak C2

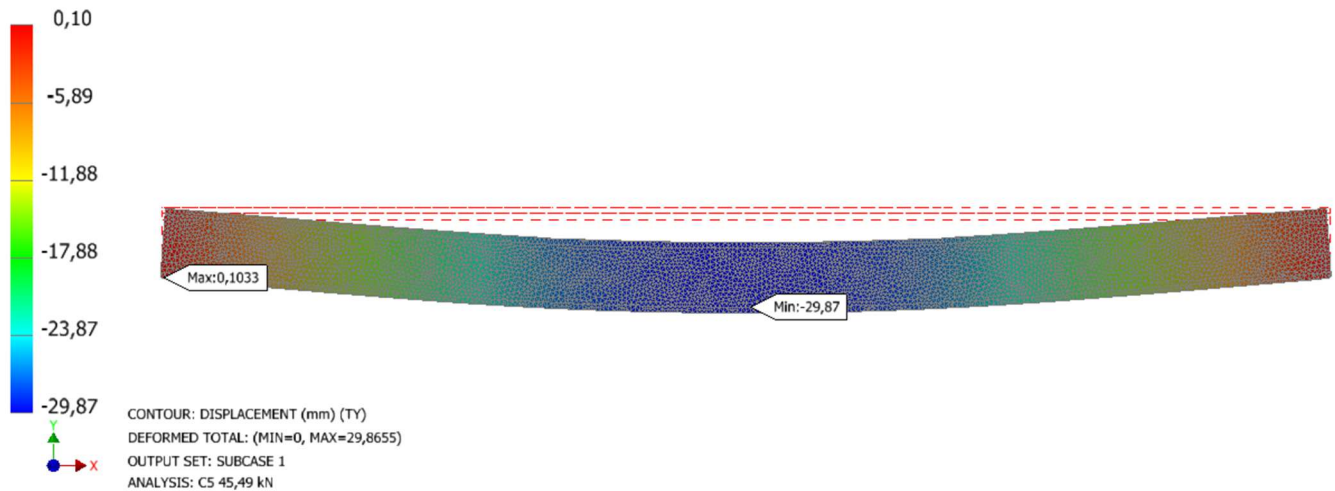


Distribucija naprezanja prema svemu navedenom promatrano u odnosu na os X je pravilna i za iznos sile od 22,84 kN prikazuje naprezanja sukladno deformaciji. Skala je prilagođena kako bi se vizualni pregled mogao izvršiti u rasponu vizualne skale boja od -100 i 100 (Slika 48).

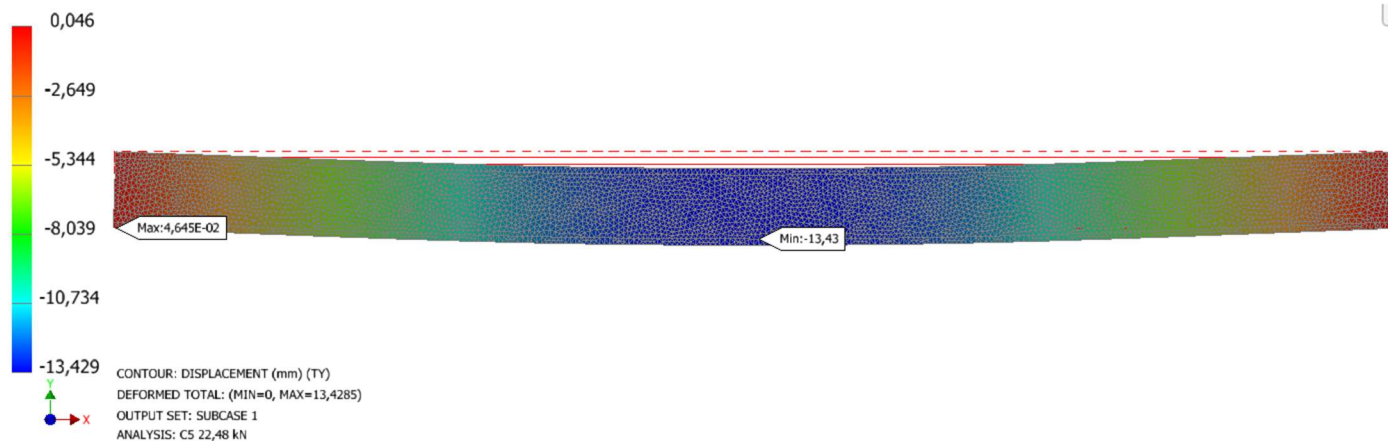


Slika 48 Distribucija naprezanja uzorka C2 pri 22,84 kN

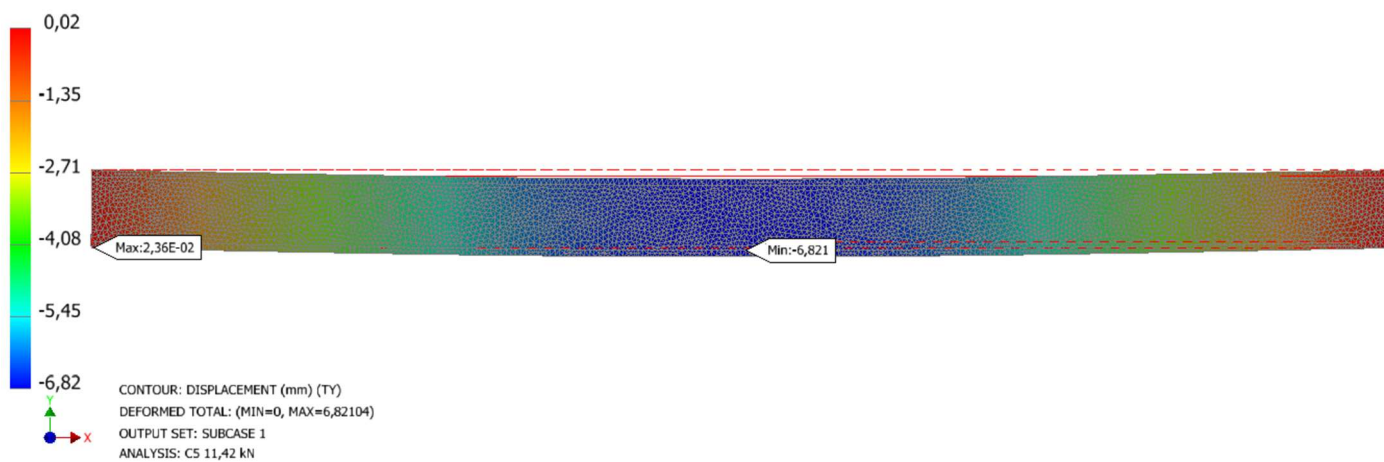
Uzorak C3 (uzorak lameliranog drva ojačan karbonskim vlaknima $2 \times \text{CFRP } 40 \times 5 \text{ mm}$) je prema navedenim parametrima unutar simulacije pokazao sljedeće rezultate, analize deformacija unutar modela na sili neposredno pred očekivani lom koja iznosi 45,49 kN imao deformaciju od 29,87 mm (Slika 49), dok je pri sili od 22,84 kN ona iznosila je 13,42 mm (Slika 50), deformacija prema upola manjoj sili 11,42 kN iznosila 6,82 mm (Slika 51). Prema najmanjoj ispitnoj i referentnoj sili koja iznosi 5,71 kN deformacija iznosi 3,41 mm (Slika 52).



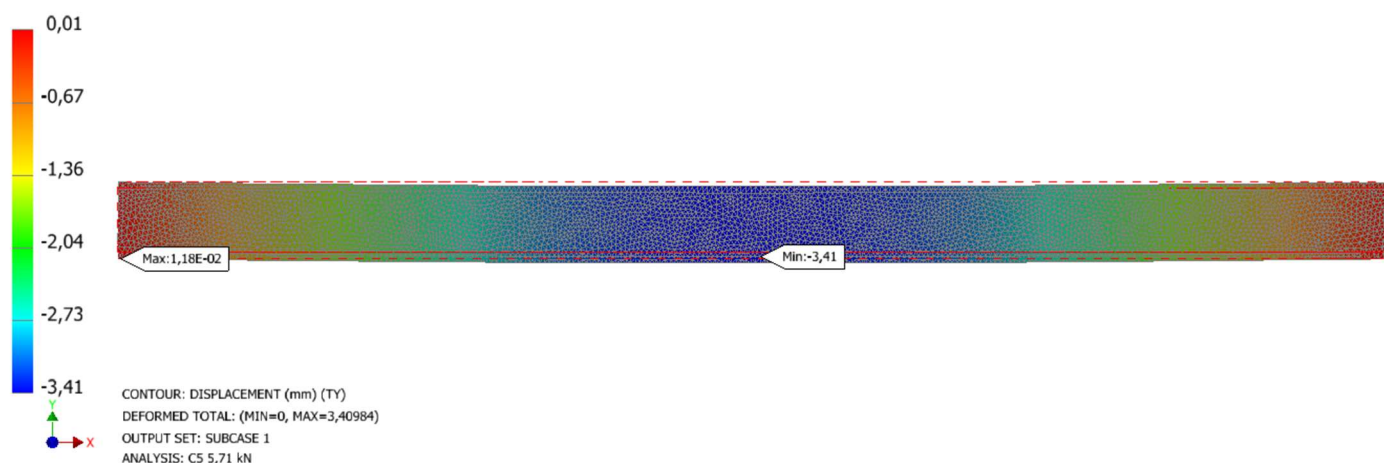
Slika 49 Deformacija uzorka C3 pri 45,49 kN



Slika 50 Deformacija uzorka C3 pri 22,84 kN



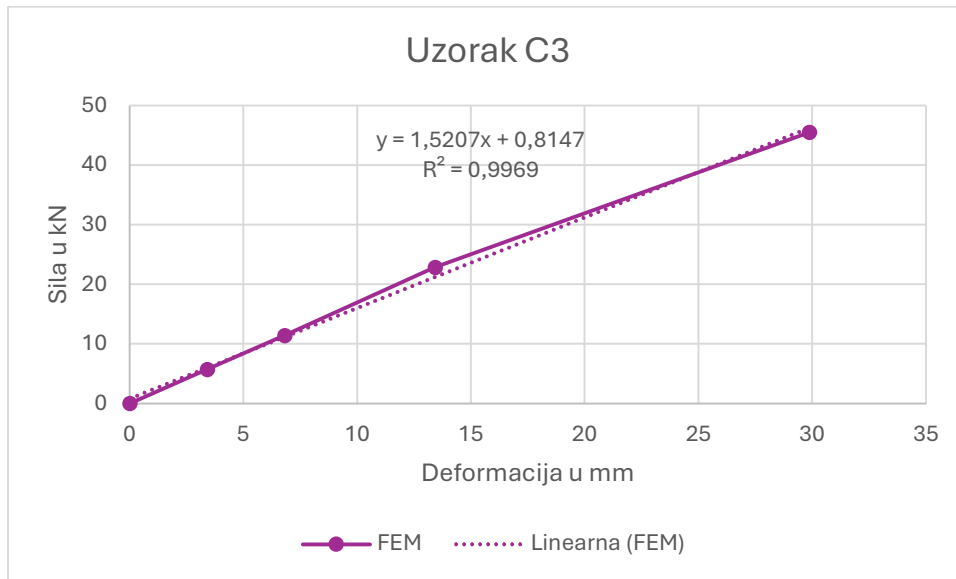
Slika 51 Deformacija uzorka C3 pri 11,42 kN



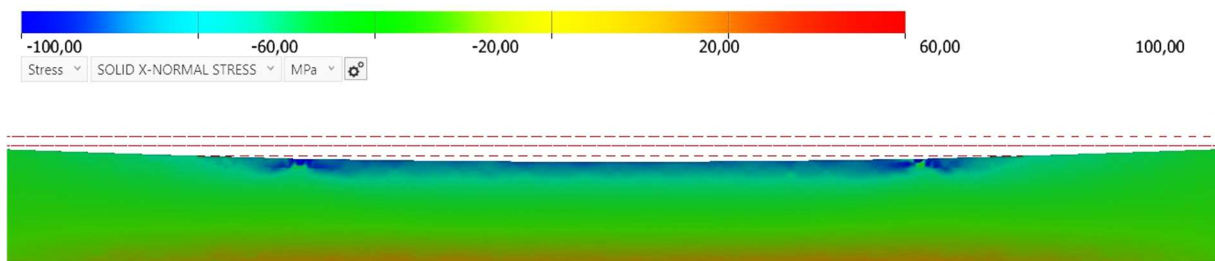
Slika 52 Deformacija uzorka C3 pri 5,71 kN

Ako navedene rezultate prikažemo grafički, točkastim grafikonom možemo vidjeti trend i odstupanje navedenih rezultata od linearne analize (Grafikon 4).

Grafikon 4 Prikaz rezultata nelinearne MKE u odnosu na lineariziranu za uzorak C3



Distribucija naprezanja prema svemu navedenom promatrano u odnosu na os X je pravilna i za iznos sile od 22,84 kN prikazuje naprezanja sukladno deformaciji. Skala je prilagođena kako bi se vizualni pregled mogao izvršiti u rasponu vizualne skale boja od -100 i 100 (Slika 53).



Slika 53 Distribucija naprezanja uzorka C3 pri 22,84 kN

8. Diskusija

Rezultati analiza uzoraka lameliranog drva pokazuju da ojačanje karbonskim vlaknima značajno smanjuje deformacije u odnosu na neojačani uzorak (O). Uzorak O pokazuje veće deformacije pod opterećenjem u usporedbi s uzorcima C1, C2 i C3, koji su ojačani karbonskim vlaknima.

Uzorak C1, ojačan tanjim slojem karbonskih vlakana (2xCFRP 40×0,4 mm), pokazuje manju deformaciju pod istim opterećenjima u usporedbi s uzorkom O. Ovaj trend je jasno prikazan na Grafikonu 2, gdje je vidljivo smanjenje deformacije uzorka C1 u usporedbi s neojačanim uzorkom.

Uzorak C2, ojačan debljim slojem karbonskih vlakana (2xCFRP 40×5 mm), dodatno smanjuje deformacije pod opterećenjem u usporedbi s uzorcima O i C1. Grafikon 3 prikazuje kako C2 pokazuje još veće smanjenje deformacija, potvrđujući učinkovitost debljih slojeva ojačanja.

Uzorak C3, također ojačan karbonskim vlaknima (2xCFRP 40×5 mm), pokazuje najmanje deformacije među analiziranim uzorcima. Na Grafikonu 4 se može vidjeti kako deformacije uzorka C3 ostaju značajno niže u usporedbi s ostalim uzorcima, što dodatno potvrđuje prednost karbonskih vlakana u poboljšanju mehaničkih svojstava lameliranog drva.

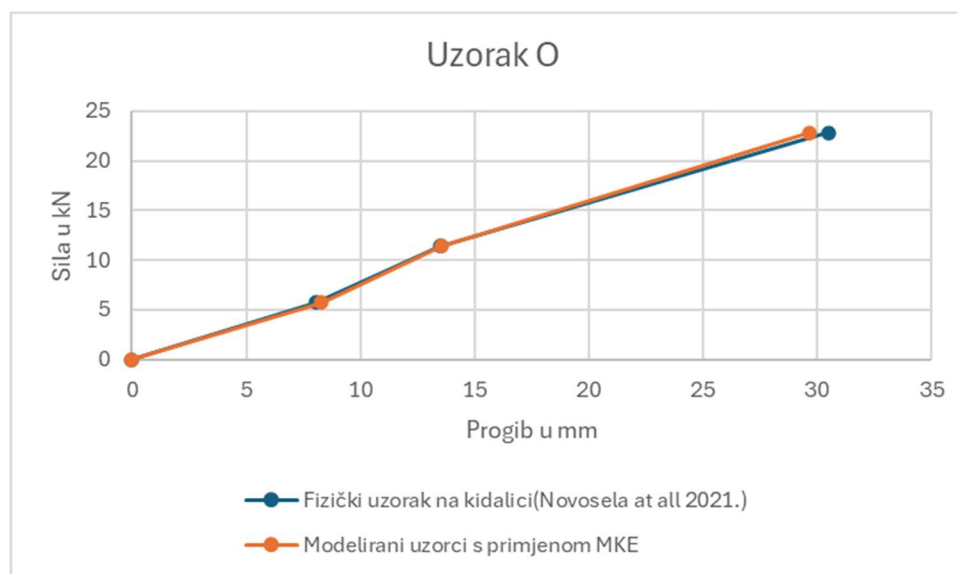
Usporedba rezultata dobivenih FEM analizom sa stvarnim podacima koji su uzeti iz rada Novosel et al (2021.) pokazuje visoku podudarnost, s minimalnim odstupanjima. Na primjer, za uzorak O pri sili od 22,84 kN, FEM rezultat je 29,67 mm, dok stvarni podaci pokazuju deformaciju od 30,5 mm. Slično, za uzorak C1 pri istoj sili, FEM rezultat je 19,29 mm, dok stvarni podaci pokazuju deformaciju od 18,82 mm (Tablica 10). Ova podudarnost potvrđuje upotrebljivost FEM analize u predviđanju ponašanja lameliranog drva pod opterećenjem koje je moguće provesti u ranoj fazi projektiranja tj. razvoja proizvoda.

Tablica 10 Odnos progiba prema referentnim silama dobivenih metodologijom rada (FEM) i stvarnih podataka (Novosel i suradnici)

Progib (mm) prema referentnim silama (kN) u usporedbi sa stvarnim podacima fizičkog ispitivanja [11]						
Uzorak	Sila 5,71 kN		Sila 11,42 kN		Sila 22,84 kN	
	Modelirani uzorci s primjenom MKE	Fizički uzorak na kidalici(Novosela at all 2021.)	FEM	Stvarni podaci	FEM	Stvarni podaci
O	8,31	8,04	13,55	13,49	29,67	30,5
C1	5,02	5,11	9,84	9,15	19,29	18,82
C2	4,91	4,49	9,64	8,51	18,71	17,22
C3	3,41	3,62	6,82	6,98	13,43	13,72

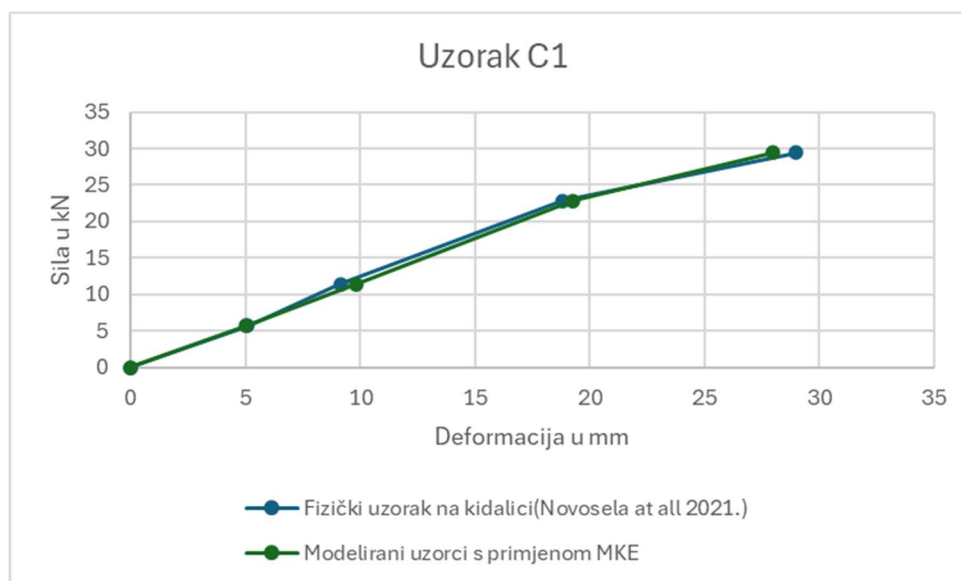
Usporedba rezultata uzorka O ispitivanjem fizičkih uzoraka na kidalici i virtualnih modela FEM analizom prikazana je grafikonom 5 iz koje se može zaključiti da je primjena MKE na modeliranim trodimenzionalnim modelima na primjeru grede s ojačanjima primjenjiva i može predstavljati pomoć u ubrzanju procesa razvoja proizvoda i donošenja odluka o konstrukciji u ranoj fazi projektiranja.

Grafikon 5 Grafička usporedba rezultata preuzetih iz ispitivanja fizičkih uzoraka na kidalici Novosel at all (2021.) i onih modeliranih s primjenom MKE za uzorak O

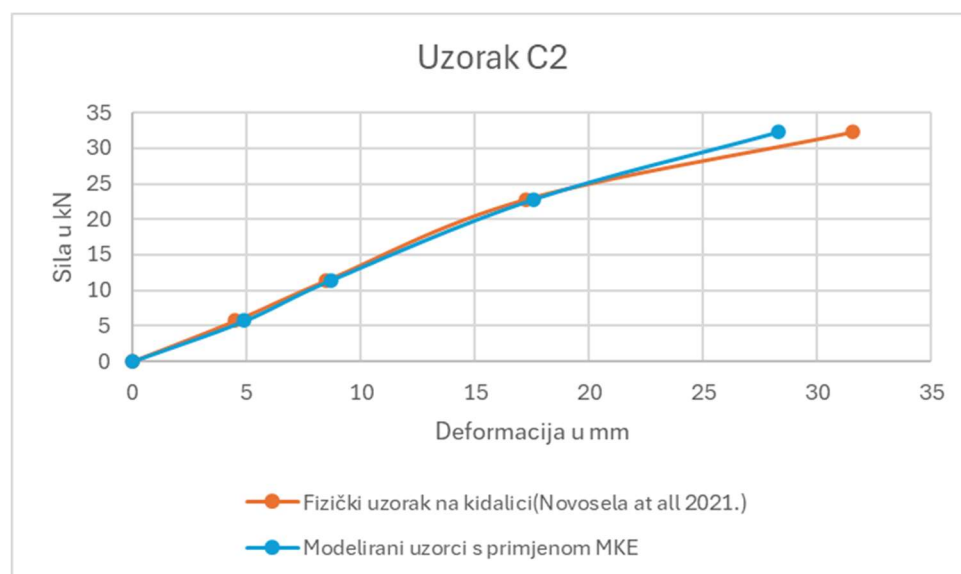


Kod uzorka C1 prema podacima dobivenim ispitivanjem i FEM analizom, uočava se minimalno odstupanje događa pri najvećim opterećenjima (Grafikon 6), kao i kod uzorka C2 gdje je to odstupanje još veće, ali i dalje uz primjerenu točnost i sljednost (Grafikon 7).

Grafikon 6 Grafička usporedba rezultata preuzetih iz ispitivanja fizičkih uzoraka na kidalici Novosela at all (2021.) i onih modeliranih s primjenom MKE za uzorak C1

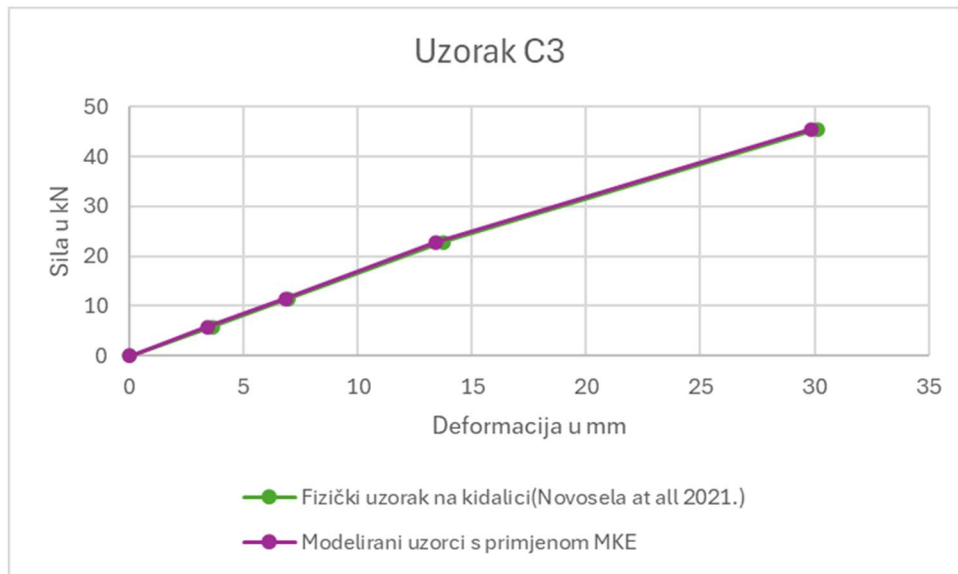


Grafikon 7 Grafička usporedba rezultata preuzetih iz ispitivanja fizičkih uzoraka na kidalici Novosela at all (2021.) i onih modeliranih s primjenom MKE za uzorak C2



Kod uzorka C3 poklapanje rezultata za obje metode ispitivanja je najveće. Kod ovog uzorka dominantna su karbonska vlakna u najvećem omjeru u odnosu na drvo, što je doprinijelo najboljoj preciznosti FEM simulacije u odnosu na stvarne rezultate (Grafikon 8).

Grafikon 8 Grafička usporedba rezultata preuzetih iz ispitivanje fizičkih uzoraka na kidalici Novosela at all (2021.) i onih modeliranih s primjenom MKE za uzorak C3



9. Zaključak

Usporedbom rezultata izvršenih na virtualnom i fizičkim modelima zaključci su sljedeći:

1. Potvrđena je hipoteza da primjena MKE na virtualnim modelima u programu Inventor može doprinijeti u donošenju odluka o izboru materijala i konstrukcije u ranoj fazi projektiranja.
2. Potvrđuje se velika adaptivnost Autodesk programa Inventor 2023 s pripadajućim FEM dodatkom Inventor Nastran 2023.
3. Utvrđuje se točnost postavljenog modela materijalnih, geometrijskih i metodoloških formi za analizirane uzorke u programskom okviru unutar raspona od -5,80 % do +9,85 % u odnosu na referentne rezultate fizički provedenog ispitivanja
 - 3.1. Minimalna i maksimalna odstupanja između rezultata FEM analize i fizičkog ispitivanja, koja su pokazala visoku preciznost modela. Na primjer, za uzorak bez ojačanja (Uzorak O), odstupanja su se kretala od 0,45 % pri sili od 11,42 kN do 3,36 % pri sili od 5,71 kN, što ukazuje na vrlo malu razliku između simuliranih i stvarnih vrijednosti.
 - 3.2. Kod uzoraka ojačanih tanjim slojem karbonskih vlakana (Uzorak C1), odstupanja su se kretala od -1,76 % pri sili od 5,71 kN do 7,54 % pri sili od 11,42 kN. Ovaj nizak raspon odstupanja potvrđuje učinkovitost tankih karbonskih vlakana u poboljšanju mehaničkih svojstava drva i pouzdanost FEM analize u predviđanju njihovih učinaka.
 - 3.3. Za uzorak ojačan debljim slojem karbonskih vlakana (Uzorak C2), maksimalna odstupanja bila su nešto veća, krećući se od 2,58 % pri sili od 5,71 kN do 9,85 % pri sili od 22,84 kN. Unatoč većim odstupanjima u odnosu na tanje slojeve, rezultati su i dalje unutar prihvatljivih granica, što potvrđuje da deblja karbonska vlakna također značajno poboljšavaju mehanička svojstva drva, dok FEM analiza ostaje pouzdana.
 - 3.4. Najmanja odstupanja zabilježena su kod uzorka ojačanog najdebljim slojem karbonskih vlakana (Uzorak C3). Ovdje su odstupanja varirala od -2,12 % pri sili od 22,84 kN do -5,80 % pri sili od 5,71 kN, što je vrlo mala razlika između simuliranih i stvarnih vrijednosti. Ovi rezultati posebno ističu učinkovitost najdebljih slojeva karbonskih vlakana u ojačanju drva i visoku točnost FEM analize.

10. Literatura

Barour, S., Zergua, A., Bouziadi, F., Kaloop, M. R., & El-Demerdash, W. E. (2022). Nonlinear numerical and analytical assessment of the shear strength of RC and SFRC beams externally strengthened with CFRP sheets. *Advances in Civil Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8741158>

Borri, A., Corradi, M., & Grazini, A. (2005). A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. *Composites Part B Engineering*, 36(2), 143-153. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.04.013>

Ceylan, E; Güray, E; Kasal, A; (2021): Structural Analyses of Wooden Chairs by Finite Element Method (FEM) and Assessment of the Cyclic Loading Performance in Comparison with Allowable Design Loads. *Maderas* (No. 23) pp. 1-16

Durgun, I., & Ertan, R. (2014). "Experimental and numerical analysis of 3D printed PLA material subjected to bending load." *Materials Testing*, 56(10), 861-865. doi:10.3139/120.110620.

Forest Products Laboratory. (2010). *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory

Hu, W., Chen, B., & Zhang, T. (2021). Experimental and numerical studies on mechanical behaviors of beech wood under compressive and tensile states. *Wood Research*, 66, 27-38.

Hu, W., Wan, H., & Guan, H. (2019). Size Effect on the Elastic Mechanical Properties of Beech and Its Application in Finite Element Analysis of Wood Structures. *Forests*, 10(9), 783. doi:10.3390/f10090783

Kawecki, B. (2021). Guidelines for FEM Modelling of Wood-CFRP Beams Using ABAQUS. *Archives of Civil Engineering*, 67(4), 175-191. DOI: 10.24425/ace.2021.138493

Kawecki, B., & Podgórski, J. (2020). The effect of glue cohesive stiffness on the elastic performance of bent wood-CFRP beams. *Materials*, 13(22), 5075. <https://doi.org/10.3390/ma13225075>

Konsa, P., & Prekrat, S. (2023). Rationalization of furniture constructions in the design phase using the CAD program Inventor. 32th International

Conference on Wood Science and Technology - ICWST 2023, University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology. <https://www.researchgate.net/publication/376754434>

Mackerle, J. (2005). Finite element analyses in wood research: a bibliography. *Wood Science and Technology*, 39(7), 579-600.

Magomedov, I. A., & Sebaeva, Z. S. (2020). Comparative study of finite element analysis software packages. *Journal of Physics: Conference Series*, 1515, 032073. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/3/032073>

Novosel, A., Sedlar, T., Čizmar, D., Turkulin, H., & Živković, V. (2021). Structural reinforcement of bi-directional oak-wood lamination by carbon fibre implants. *Construction and Building Materials*, 287, 123073. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123073>

Prekrat, S.; Čavlović, A. O. (2022): Osnove 3d modeliranja dijelova i sklopova namještaja i drvnih proizvoda. Faculty of Forestry and Wood Technology, University of Zagreb

Smardzewski, J., & Prekrat, S. (2018). Auxetic structures in layered furniture panels. Paper presented at the 29th International Conference on Wood Science and Technology (ICWST), Zagreb, Croatia. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/330701892_Auxetic_structures_in_layered_furniture_panels

Sorić, J. (2004). *Metoda konačnih elemenata*, Zagreb: Golden marketing - Tehnička knjiga

Tankut, N., Tankut, A. N., & Zor, M. (2014). Finite Element Analysis of Wood Materials. *Drvna industrija*, 65(2), 159-171. doi:10.5552/drind.2014.1254

Tippner, J., Milch, J., Sebera, V., & Brabec, M. (2022). Elasto-plastic material model of oak at two moisture content levels. *Holzforschung*, 76(10), 886-896 <https://doi.org/10.1515/hf-2022-0008>

Norma:

HRN EN 408:2012 Drvene konstrukcije - Konstrukcijsko drvo i lijepljeno lamelirano drvo - Određivanje fizikalnih i mehaničkih svojstava (EN 408:2010+A1:2012)

Programski jezici:

Autodesk Inventor 2023: Autodesk Inc., San Rafael, CA, USA

Autodesk Inc. (2023). Autodesk Inventor 2023. Available from
<https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>

Inventor Nastran 2023: Autodesk Inc., San Rafael, CA, USA

11. Sažetak

Primjena računalnih simulacija za ispitivanje inovativnih drvno-konstruktivskih rješenja unutar programa Autodesk Inventor

Petar Konsa

Rad analizira četiri uzorka lameliranog hrastovog drva, svaki s različitim dimenzijskim i materijalnim karakteristikama, kako bi se procijenila točnost i učinkovitost virtualnih simulacija uz pomoć Metode konačnih elemenata (MKE) u Autodesk Inventor 2023 programu, u usporedbi s fizičkim ispitivanjima. Za analize je korišten dodatak Inventor Nastran 2023, koji omogućava izvođenje FEM analiza.

Uzorak O sastoji se od tri sloja hrastovog drva dimenzija 20 x 50 mm, uz dodatne dvije lamele debljine 5 mm s obje strane, što rezultira poprečnim presjekom od 60 x 60 mm i duljinom od 1000 mm. Uzorak C1 uključuje iste osnovne dimenzije kao Uzorak O, ali s umetnutim karbonskim vlaknima dimenzija 40 x 0,4 mm. Uzorak C2 sadrži karbonska vlakna dimenzija 60x0,4 mm, a struktura drva je brušena za njihovu ugradnju. Uzorak C3 koristi karbonska vlakna dimenzija 40 x 5 mm, umetnuta unutar utora u drvenoj strukturi.

Rezultati pokazuju da primjena MKE u Inventoru može značajno unaprijediti donošenje odluka o materijalima i konstrukcijama u ranoj fazi projektiranja. Autodesk Inventor 2023 s dodatkom Inventor Nastran 2023 pokazuje visoku prilagodljivost i pouzdanost. Usporedba simulacija s fizičkim ispitivanjima otkriva točnost modela u rasponu od -5,80 % do +9,85 %. Specifična odstupanja uključuju: minimalna odstupanja za Uzorak O od 0,45 % do 3,36 %, koja potvrđuju visoku preciznost simulacija; odstupanja za Uzorak C1 od -1,76 % do 7,54 %, koja ukazuju na učinkovitost tankih karbonskih vlakana; odstupanja za Uzorak C2 od 2,58 % do 9,85 %, koja potvrđuju poboljšanje uz pomoć debljih karbonskih vlakana; te najmanja odstupanja za Uzorak C3 od -2,12 % do -5,80 %, koja ističu visoku učinkovitost najdebljih slojeva karbonskih vlakana u ojačanju drva. Općenito, rezultati potvrđuju pouzdanost FEM analize u predviđanju mehaničkih svojstava drva, odnosno drvnih kompozita s metodologijom rada koja je primijenjena.

Ključne riječi:

Lamelirano drvo, karbonska vlakna, drveni kompozit, metoda konačnih elemenata (MKE), Autodesk Inventor 2023

12. Summary

Application of Computer Simulations for Testing Innovative Wood-Construction Solutions Using Autodesk Inventor

Petar Konsa

The paper analyzes four samples of laminated oak wood, each with different dimensional and material characteristics, to evaluate the accuracy and effectiveness of virtual simulations using Finite Element Method (FEM) in Autodesk Inventor 2023, compared to physical testing. The analysis utilized the Inventor Nastran 2023 add-on, which enables FEM analysis.

Sample O consists of three layers of oak wood with dimensions of 20 x 50 mm, plus two additional 5 mm thick laminates on each side, resulting in a cross-section of 60 x 60 mm and a length of 1000 mm. sample C1 has the same basic dimensions as sample O but includes embedded carbon fibers with dimensions of 40 x 0.4 mm. sample C2 contains carbon fibers with dimensions of 60 x 0.4 mm, and the wood structure has been machined to accommodate them. sample C3 uses carbon fibers with dimensions of 40 x 5 mm, embedded within a groove in the wooden structure.

The results demonstrate that applying FEM in Inventor can significantly enhance decision-making regarding materials and structures in the early stages of design. Autodesk Inventor 2023, along with the Inventor Nastran 2023 add-on, shows high adaptability and reliability. The comparison of simulations with physical testing reveals model accuracy ranging from -5.80 % to +9.85 %. Specific deviations include: minimal deviations for sample O ranging from 0.45 % to 3.36 %, confirming high simulation precision; deviations for sample C1 from -1.76 % to 7.54%, indicating the effectiveness of thin carbon fibers; deviations for sample C2 from 2.58 % to 9.85 %, confirming the improvement with thicker carbon fibers; and the smallest deviations for sample C3 ranging from -2.12 % to -5.80 %, highlighting the high effectiveness of the thickest carbon fiber layers in strengthening the wood. Overall, the results confirm the reliability of FEM analysis in predicting the mechanical properties of wood and wood composites with the applied methodology.

Keywords:

Laminated wood, carbon fibers, wood composite, finite element method (FEM), Autodesk Inventor 2023

Zahvale

Hvala cijenjenoj prof. dr. sc. Silvani Prekrat na znanstvenom i stručnom mentorstvu koje je uvelike pridonijelo uspješnosti ovoga rada. Vaše vodstvo, strpljenje i podrška bili su nezamjenjivi te su mi omogućili bolje razumijevanje teme i postizanje kvalitetnih rezultata.

Također, želim izraziti iskrenu zahvalu svim profesorima na Fakultetu šumarstva i drvne tehnologije čije sam znanje i predavanja imao priliku slušati tijekom studija. Vaša predanost podučavanju i stručnost obogatili su moje obrazovanje i pripremili me za buduće izazove.

Životopis

Trenutno pohađam diplomski studij na Fakultetu šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, gdje sam na prvoj godini diplomskog studija Oblikovanje proizvoda od drva. Preddiplomski studij na istom fakultetu završio sam u periodu od 2020. do 2023. godine. Sudjelovao sam na ICWST znanstvenoj međunarodnoj konferenciji 2023. godine kao izlagač u sklopu koje sam objavio znanstveni članka "Rationalization of Furniture Constructions in the Design Phase Using the CAD Program Inventor", objavljenog u navedenom zborniku. Od 2021. do 2023. godine bio sam demonstrator na Zavodu za Procesne tehnike, gdje sam se bavio primijenjenom tehničkom grafikom. Aktivno sudjelujem u studentskim organizacijama i tijelima. Od 2022. do 2023. bio sam student mentor. 2024. bio sam sudionik BIP Erasmus+ programa na temu Forestry and Forest Bioeconomy in Central Europe na Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague.

Sudjelovanje u projektima:

2023. „*Igra u baštini*” - drvene inovativne višefunkcionalne igračke

2023. „*Molekula*“ - interdisciplinarni projekt uređenja eksterijera ispred paviljona četiri (FŠDT i AGR)

Sudjelovanje na izložbama:

2023. - *Zagreb design week* - izlagač

2023. - *Dan otvorenih vrata Fakulteta šumarstva i drvne tehnologije*

2023. - *Smotra Sveučilišta u Zagrebu* – panelist

2020. - *Razvoj i provedba stručne prakse na studijima Šumarskog fakulteta*