

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Dominik Koderman

**ANALIZA TRDNOSTI PLOŠČNEGA
KOMPOZITNEGA ELEMENTA Z METODO
KONČNIH ELEMENTOV**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Dominik Koderman

**ANALIZA TRDNOSTI PLOŠČNEGA KOMPOZITNEGA ELEMENTA
Z METODO KONČNIH ELEMENTOV**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

**STRENGTH ANALYSIS OF PLANAR COMPOSITE ELEMENT
WITH THE FINITE ELEMENT METHOD**

GRADUATION THESIS

University studies

Ljubljana, 2016

Diplomsko delo je zaključek univerzitetnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo v delovni skupini za mehanske obdelovalne tehnologije v sodelovanju s katedro za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin na Oddelku za lesarstvo, Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval doc. dr. Mirana Merharja, za recenzenta pa prof. dr. Milana Šerneka.

Mentor: doc. dr. Miran Merhar

Recenzent: prof. dr. Milan Šernek

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomsko delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svoje naloge v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddal v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

Dominik Koderman

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dn
DK	UDK 630*862
KG	metoda končnih elementov/kompozitni les/upogibna trdnost/porušitvene hipoteze
AV	KODERMAN, Dominik
SA	MERHAR, Miran (mentor)/ ŠERNEK, Milan (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2016
IN	ANALIZA TRDNOSTI PLOŠČNEGA KOMPOZITNEGA ELEMENTA Z METODO KONČNIH ELEMENTOV
TD	Diplomsko delo (Univerzitetni študij)
OP	X, 51 str., 9 pregl., 30 sl., 23 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	V nalogi smo ugotavljali korelacijo med numeričnim izračunom trdnosti kompozitnega elementa in eksperimentalno dobljenimi vrednostmi pri štiri točkovnem upogibu. Numerično analizo smo naredili z metodo končnih elementov (FEM) s programom Solidworks Simulation, kjer smo vzorce modelirali kot linearno elastičen ortotropen kompozitni element. Izdelali smo vezane plošče z različno usmerjenimi sloji bukovega furnirja in različnim številom slojev. Vzorce iz vezanih plošč smo izrezali pod različnimi koti, tako, da je bil prvi sloj vzorca pod različnim kotom glede na vzdolžno usmerjenost vzorca. Lastnosti materiala za definiranje materiala v simulaciji smo določili eksperimentalno z mehanskimi preizkusi bukovega furnirja debeline 1,5 mm in vzdolžno vezanih vzorcev večjih debelin. V povprečju je bil rezultat računalniške simulacije štiri točkovnega upogiba 55% rezultata mehanskega preizkusa in v nobenem primeru ni presegel vrednosti maksimalne obremenitve v mehanskem preizkusu.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn
DC UDC 630*862
CX finite element method/wood composites/bending strength/failure criteria
AU KODERMAN, Dominik
AA MERHAR, Miran (supervisor)/ ŠERNEK, Milan (reviewer)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2016
TI STRENGTH ANALYSIS OF PLANAR COMPOSITE ELEMENT WITH THE FINITE ELEMENT METHOD
DT Graduation Thesis (University studies)
NO X, 51 p., 9 tab., 30 fig., 23 ref.
LA sl
AL sl/en
AB The correlation between numerically computed strength of composite element and experimentally acquired values from four point bending test was researched. Numerical analysis was made with the finite element method (FEM) with Solidworks Simulation software, where samples were modeled as linear elastic orthotropic composite element. Plywood panels with different orientations of veneer plies and different numbers of plies were made. Samples were cut from plywood boards at different angles so that the first ply of the sample was at an varying angle compared to the length of the sample. Material properties for simulation were obtained experimentally with mechanical tests of beech veneer of 1,5 mm thickness and parallelly glued samples of bigger thicknesses. The result of computer simulation was on average 55% of the result of mechanical test and in no case it didn't exceed value of maximum load in mechanical test.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	VIII
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	IX
SLOVARČEK.....	X
1 UVOD	1
2 PREGLED OBJAV	2
2.1 KOMPOZITNI MATERIALI	2
2.1.1 Lesni kompoziti.....	4
2.1.1.1 Furnirne plošče	4
2.1.1.1.1 Zgodovina furnirnih plošč	5
2.1.1.1.2 Prednosti furnirnih plošč	5
2.1.1.1.3 Mehanske lastnosti furnirnih plošč.....	6
2.2 RAČUNALNIŠKO PODPRTO INŽENIRSTVO	9
2.2.1 Metoda končnih elementov	10
2.2.1.1 Faze simulacije elastomehanskega problema	11
2.2.1.2 Linearno obravnavanje trdnostnega problema	13
2.2.1.3 Kompozitne lupine	14
2.2.1.4 Transformacija napetosti v koordinate materiala	15
2.2.1.5 Porušitvene hipoteze.....	17
2.2.1.5.1 Linearni model.....	17
2.2.1.5.2 Kvadratni model	18
2.2.1.5.3 Tsai-Hill model.....	18
2.2.1.5.4 Tsai-Wu model	19
2.2.1.5.5 Primerjava porušitvenih modelov.....	19
2.2.2 Varnostni faktor	20

2.3	STANDARDI ZA PREIZKUŠANJE LESNIH VZORCEV	21
2.3.1	SIST EN 789:2005 (EN 789:2004)	22
2.3.2	SIST EN 408:2004 (EN 408:2003)	24
2.3.3	SIST EN 310:1996 (EN 310:1993)	25
2.3.4	Primerjava standardov EN 310 / EN 789	27
3	MATERIALI IN METODE	28
3.1	UPORABLJENI MATERIALI	28
3.2	TEORIJA IZVEDBE EKSPERIMENTA	29
3.2.1	Mehanski preizkus.....	29
3.2.2	Računalniška simulacija	32
4	REZULTATI.....	35
4.1	MEHANSKI PREIZKUS	35
4.1.2	Meritve lastnosti materiala	35
4.1.3	Meritve trdnosti kompozitnih elementov	38
4.2	NUMERIČNA ANALIZA TRDNOSTI KOMPOZITNIH ELEMENTOV	39
5	RAZPRAVA IN SKLEPI.....	47
5.1	RAZPRAVA.....	47
5.2	SKLEPI.....	48
6	POVZETEK.....	49
7	VIRI IN LITERATURA	50
7.1	PISNI VIRI.....	50
7.2	ELEKTRONSKI VIRI	51

ZAHVALA

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Elastičnostni in strižni moduli ter Poissonova razmerja za važnejše materiale in nekaj komercialnih lesov. (Torelli, 2002)	8
Preglednica 2: Primerjava mehanskih lastnosti masivnega lesa in furnirne plošče. (Thoemen, 2010)	9
Preglednica 3: Vlažnost furnirja pred izdelavo plošč.	27
Preglednica 4: Tipi izdelanih furnirnih plošč. (P-pravokotna, K-kotna)	29
Preglednica 5: Mehanske lastnosti lesa bukve, uporabljene v računalniški simulaciji. ...	33
Preglednica 6: Rezultati meritev nateznega preizkusa vzorcev furnirja v longitudinalni in tangencialni smeri.	34
Preglednica 7: Rezultati meritev tlačnega preizkusa vzorcev furnirja v longitudinalni in tangencialni smeri.	36
Preglednica 8: Elastični moduli v simulaciji uporabljenega materiala bukve v longitudinalni in tangencialni smeri.	36
Preglednica 9a: Primerjava upogibne trdnosti izmerjene v eksperimentalnem preizkusu in upogibne trdnosti izračunane v numerični analizi (z metodo končnih elementov). Za vzorce iz plošč 3P, 7P in 11P.	42
Preglednica 9b: Primerjava upogibne trdnosti izmerjene v eksperimentalnem preizkusu in upogibne trdnosti izračunane v numerični analizi (z metodo končnih elementov). Za vzorce iz plošč 7K in 11K.	43

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz sestave kompozitnega materiala. (Wikipedia, composite material).	2
Slika 2: Smučka podjetja Scott. (scott-sports.com)	3
Slika 3: Traheida lesa iglavca. (Ansell, 2015)	3
Slika 4: Razporeditev napetosti v upogibno obremenjeni furnirni plošči.	8
Slika 5: 3D model nosilca (lepljeni lamelirani les) in mreža modela za simulacijo.	11
Slika 6: Element mreže, ki je osnova za računanje napetosti in mreža v prerezu.	12
Slika 7: Rezultat simulacije - obarvan 3D model.	13
Slika 8: Prerez 3D mreže sestavnega dela majhne debeline.	14
Slika 9: 2D mreža sestavnega dela. Analiza poteka s pomočjo kompozitne lupine.	15
Slika 10: Transformacija smeri napetosti v točki v telesu iz kompozitnega materiala. ...	16
Slika 11: Porušitvene hipoteze. Krivulje prikazujejo meje porušnih napetosti.	20
Slika 12: Shema postavitve za 4-točkovni upogibni test in <i>NTM</i> diagram.	23
Slika 13: Shema postavitve za 4-točkovni upogibni test po standardu EN 408.	24
Slika 14: Shema postavitve za 3-točkovni upogibni test in <i>NTM</i> diagram.	26
Slika 15: Usmeritev listov furnirja pri 7K furnirnih ploščah. Kot α je usmerjenost lista furnirja glede na vzdolžno os furnirne plošče.	29
Slika 16: Usmeritev listov furnirja pri 11K furnirnih ploščah. Kot α je usmerjenost lista furnirja glede na vzdolžno os furnirne plošče.	30
Slika 17: Skica načina izreza vzorcev iz plošč.	28
Slika 18: Izdelane furnirne plošče (550×550 mm), pripravljene za razrez vzorcev.	31
Slika 19: Izrezek iz programa Solidworks. Prikazana je tretja plast furnirja.	32
Slika 20: Natezni preizkus lista furnirja na merilnem stroju.	35
Slika 21: Porušeni vzorci iz tlačnega preizkusa. Levo vzorca iz tlačnega preizkusa v longitudinalni smeri, desno vzorca porušena v tangencialni smeri.	35
Slika 22: Vzorec na upogibnem testu v preizkuševalni napravi.	37
Slika 23: Porušen vzorec iz upogibnega testa.	37
Slika 24: Razmerje napetost-deformacija kot rezultat upogibnega preizkusa.	38
Slika 25: Izrezek iz programa Solidworks Simulation. Rezultat izračuna FOS.	39
Slika 26: Izrezek iz programa Solidworks Simulation. Prikazana je porazdelitev nateznih napetosti v spodnjem sloju furnirne plošče.	39
Slika 27: Izrezek iz programa Solidworks Simulation. Prikazana je porazdelitev vzdolžnih napetosti (x os).	40
Slika 28: Izrezek iz programa Solidworks. Prikazana je porazdelitev prečnih napetosti. ..	41
Slika 29: Graf prikazuje delež izračunane maksimalne sile, v stolpcu izmerjene porušne sile.	44
Slika 30: Grafi prikazuje delež izračunane maksimalne sile, v stolpcu izmerjene porušne sile.	45

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

CAD computer aided design
CAE computer aided engineering
CAM computer aided manufacturing
PDM product data management
PLM product lifecycle management

CEN European Committee for Standardization
Cenelec European Committee for Electrotechnical Standardization
ETSI European Telecommunications Standards Institute

E_L elastični modul v longitudinalni smeri
 E_T elastični modul v tangencialni smeri
 E_R elastični modul v radialni smeri

F_{max}^e - maksimalna obremenitev pridobljena z eksperimentalnim (e) (mehanskim) preizkusom.

F_{max}^n - maksimalna obremenitev modela vzorca, pridobljena z numerično (n) analizo (metoda končnih elementov).

F_{max}^n/F_{max}^e - razmerje med maksimalno obremenitvijo pridobljeno z mehanskim preizkusom in maksimalno obremenitvijo pridobljeno z numerično analizo.

F_{max}^{ns} - maksimalna obremenitev spodnjega (s) sloja vzorca furnirne plošče (numerična analiza).

F_{max}^{nz} - maksimalna obremenitev zgornjega (z) sloja vzorca furnirne plošče (numerična analiza).

SLOVARČEK

MKE - metoda končnih elementov FEM - finite element method
kompozitna lupina composite shell

SCL - structural composite lumber konstrukcijski kompozitni les

LVL - laminated veneer lumber slojnat furnirni les

Glulam - glue-laminated timber lepljeni lamelirani les

PSL - parallel strand lumber

LSL - laminated strand lumber

KLH - kreuzlagen holz KLL - križno lepljen les

MDF - medium density fiberboard vlaknena plošča

HDF - high density fiberboard

OSB - oriented strand board

WPC - wood-polymer composites lesno-polimerni kompoziti

longitudinalno vzdolžno, aksialno, osno

porušna (zrušilna) napetost največja napetost, ki se lahko pojavi
v nekem materialu tik pred porušitvijo

EN 408:2003 Timber structures - Structural timber and glued laminated timber -

Determination of some physical and mechanical properties SIST EN 408:2004

Lesene konstrukcije - Konstrukcijski les in lepljeni lamelirani les - Ugotavljanje nekaterih
fizikalnih in mehanskih lastnosti

EN 310:1993 Wood-based panels - Determination of modulus of elasticity in bending and
of bending strength SIST EN 310:1996 Lesne plošče -

ugotavljanje upogibne trdnosti in modula elastičnosti

EN 789:2004 Timber structures - Test methods - Determination of mechanical properties
of wood based panels SIST EN 789:2005 Lesene konstrukcije -

Preskusni postopki - Ugotavljanje mehanskih lastnosti lesnih plošč

1 UVOD

V sodobnem času je čedalje večji poudarek na smotrnem ravnanju z naravo in izrabo naravnih dobrin. Eden izmed najstarejših in najbolj pogosto uporabljenih materialov je les. Les je ekološki material in leseni izdelki so prijetni za uporabo. Les se uporablja tudi v konstrukcijske namene in takrat so pomembne mehanske lastnosti lesa kot materiala. Da se izboljšajo mehanske lastnosti in poveča izkoristek lesa, se les predeluje v različne lesne kompozite. Les v obliki kompozitnega materiala je pogosto uporabljan za najrazličnejše namene, in pomembno je, da se določi mehanske lastnosti tega materiala.

Mehanske lastnosti lesa se ugotavljajo eksperimentalno, največkrat na osnovi predpisanih standardov. Pri konstruiranju se podatki o mehanskih lastnostih uporabijo za dimenzioniranje konstrukcij oz. izdelkov. Za pravilno dimenzioniranje se je v zadnjih desetletjih močno razmahnila uporaba računalnika s programi za računalniško podprto inženirstvo. Simulacije s pomočjo teh programov omogočajo hitro reševanje kompleksnih konstrukcijskih problemov.

Za pravičen rezultat simulacije je potrebnih veliko število spremenljivk, zato je pomembno dobro poznavanje tega področja. V tem diplomskem delu je obravnavano reševanje problemov trdnosti kompozitnega lesa z uporabo računalniške analize. Narejena je primerjava rezultatov računalniške simulacije z eksperimentalnimi preizkusi vzorcev furnirnih plošč.

2 PREGLED OBJAV

Pregled objav je razdeljen v tri sklope. V prvem sklopu so obravnavani kompozitni materiali s poudarkom na furnirnih vezanih ploščah. V drugem sklopu je obravnavano področje računalniško podprto inženirstvo (CAE) in objasnjen pojem metoda končnih elementov (FEM) ter teorija simulacij trdnosti kompozitnih materialov. V tretjem delu pregleda objav so opisani različni standardi (SIST-EN) za preizkušanje lesnih materialov.

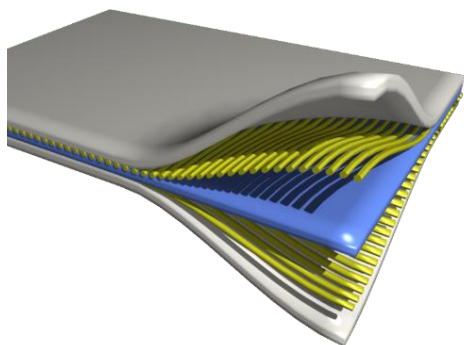
2.1 KOMPOZITNI MATERIALI

Kompozitni materiali (kratko: kompoziti) so materiali, ki so sestavljeni iz dveh ali več komponent (sestavlin). Te komponente imajo zelo različne fizikalne in kemične lastnosti. Ko pa so vezane skupaj v kompozit, so lastnosti novonastalega materiala različne kot lastnosti posameznih komponent. V splošnem so kompoziti sestavljeni iz homogenega materiala - matriksa in v matriksu razporejenih vlaken.

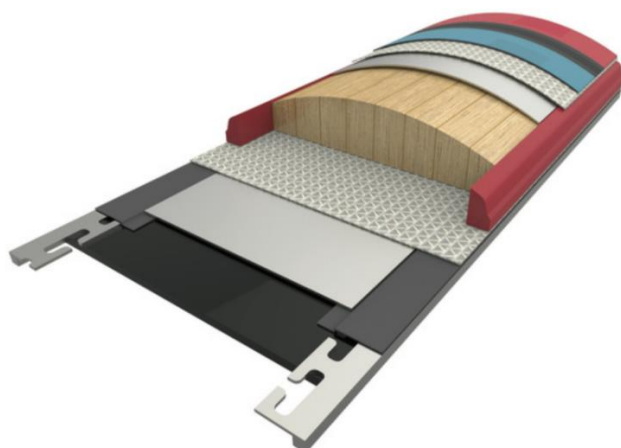
Umetni kompozitni materiali, narejeni iz različnih komponent:

- beton ojačan z jeklom (največkrat uporabljan umeten kompozit)
- ojačani plastični materiali (polimerni kompoziti so termoplasti oz. duroplasti, ojačani s steklenimi, ogljikovimi ali aramidnimi (kevlar) vlakni)
- kovinski kompoziti (material iz kovinskih vlaken, ki ojačajo drug kovinski material)
- keramični kompoziti (keramična vlakna v keramičnem matriksu)

Na sliki 1 je prikazan primer sestave kompozitnega elementa iz treh plasti matriksa in dveh plasti vlaken.



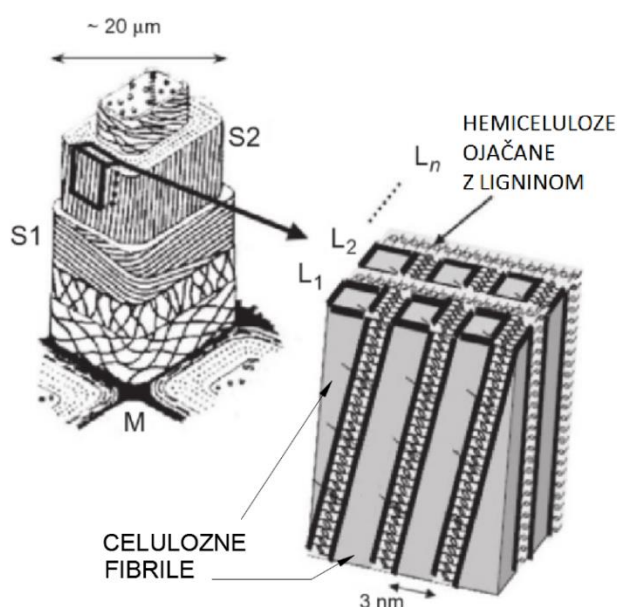
Slika 1: Prikaz sestave kompozitnega materiala. (Wikipedia, composite material)



Slika 2: Smučka podjetja Scott. (scott-sports.com)

Ko so prisotni vsaj trije različni materiali, se material imenuje hibridni kompozit. Na sliki 2 je prikazan primer hibridnega kompozita s sredico iz lesa.

Kot kompozit se lahko obravnava tudi les. Je naravni kompozitni material sestavljen iz celuloznih vlaken, ki so razporejena v matriksu iz lignina. Celuloza so velike, kristalizirane, linearne, usmerjene molekule. Lignin je amorfen 3-D polimer. V lesu listavca je okoli 45% celuloze, 30% polioz in 20% lignina (Gorišek, 2009). Na sliki 3 je prikazana traheida lesa iglavca s plastmi celične stene in struktura celične stene.



Slika 3: Traheida lesa iglavca. (Ansell, 2015)

Lesni kompoziti so sestavljeni iz manjših delcev že naravnega kompozita lesa.

2.1.1 Lesni kompoziti

Lesni kompoziti so sestavljeni iz osnovnih lesnih gradnikov kot so furnir, iveri ali vlakna, ki so z lepilom povezani v proizvod z določeno strukturo in obliko (Šernek 2008).

Vrste lesnih kompozitov:

- lepljeni lamelirani les (Glulam)
- križno lepljen les (KLH)
- konstrukcijski kompozitni les (LVL, PSL, LSL)
- I-nosilci
- lesno-polimerni kompoziti (WPC - wood-polymer composites)
- razne vrste lesnih plošč

Vrste lesnih plošč:

- vezane plošče (furnirne, mizarske, opažne, sataste)
- plošče iz masivnega lesa
- iverne in vlaknene (MDF, HDF) plošče
- OSB plošče (oriented strand board)

2.1.1.1 Furnirne plošče

Furnirne plošče po standardu SIST EN 313-1 uvrščamo v skupino -vezan les in podskupino -vezane plošče. Furnirna plošča je plošča, ki je izdelana iz najmanj treh medsebojno zlepljenih listov furnirja. Listi furnirja so najpogostejše zloženi med seboj pod pravim kotom, glede na usmerjenost lesnih vlaken. Kvaliteta furnirnih plošč je močno odvisna od kvalitete furnirja.

Večina furnirja (>90%) je izdelanega z luščenjem. Za izdelovanje furnirnih plošč se uporablja luščen furnir. Rezan (plemeniti, dekorativni) furnir se uporablja pri izdelavi kakovostnejšega pohištva.

2.1.1.1.1 Zgodovina furnirnih plošč

Furnirne plošče imajo resnično dolgo zgodovino. Najdena je bila vrsta furnirne plošče izpred 3.500 let nazaj, ki je bila del krste egipčanske 3. dinastije (Ansell, 2015). Narejena je bila iz šestih 4 mm debelih plasti žaganega lesa, zloženih navzkrižno in povezanih z lesenimi moziki. Kasnejši razvoj je bila zamenjava lesenih klinov z lepili na živalski osnovi in tanjše plasti lesa.

Moderne furnirne plošče so narejene na podoben način, vendar iz listov furnirja, ki so luščeni iz hlodov na posebnih luščilnih strojih. Listi furnirja so nato sušeni, prevlečeni z lepilom, zloženi ortogonalno drug na drugega in stisnjeni v stiskalnici v obliko plošč ali krivljenega izdelka. Izdelava luščenega furnirja za furnirne plošče je bila omogočena šele z iznajdbo luščilnega stroja konec 19. stoletja. V začetku 20. stoletja so bila razvita sintetična vodoodporna lepila kot je fenol-formaldehidno lepilo (FF), kar je vodilo v izdelavo močnih in trajnih lesnih kompozitov primernih za uporabo v zahtevnih zunanjih razmerah.

V 60. letih prejšnjega stoletja je bil razvit LVL (slojnat furnirni les). LVL je lesni kompozit iz listov furnirja, vseh usmerjenih v isto smer (ne pravokotno drug na drugega, kot pri furnirnih ploščah) in spada v kategorijo: konstrukcijski kompozitni les.

2.1.1.1.2 Prednosti furnirnih plošč

Ena največjih prednosti uporabe furnirja namesto žaganega lesa je maksimalen izkoristek materiala iz debla. To je še posebno pomembno pri uporabi redkih in eksotičnih drevesnih vrst za furnirano pohištvo, kjer se les ekonomično izkoristi.

Prednost kompozitnega lesa je tudi v tem, ker se lahko izdelata produkt veliko večjih dimenzij (npr. LVL nosilec dolžine 25m) kot pa je to mogoče v primeru masivnega lesa, kjer je omejitev dimenzija debla in napake v lesu.

Ker so furnirne plošče narejene iz med seboj pravokotno zloženih listov furnirja, je dimenzijska stabilnost plošč velika. Spremembe dimenzij zaradi spremembe vlažnosti so minimalizirane. Razlike v spremembi dimenzij plošče v vzdolžni in prečni smeri plošče so minimalne. Prav tako je zaradi navzkrižnih slojev v furnirnih ploščah anizotropija mehanskih lastnosti občutno zmanjšana.

V masivnem lesu so vgrajene napake (grče, smolike, zavita rast, reakcijski les,...), ki vplivajo na mehanske lastnosti proizvoda. Z luščenjem furnirja oz. pri izdelavi furnirnih plošč se te napake s sortiranjem furnirja delno izloči, hkrati pa je zaradi prerazporeditve materiala končni proizvod glede napak homogeniziran.

Trajnost furnirne plošče napram masivnemu lesu je občutno povečana zaradi vpliva lepila, križanja slojev, pritiska in temperature v stiskalnici.

Prednost je tudi možnost oblikovanja s krivljenjem in tako proizvodnje sedal in naslonov za stole, športnih rekvizitov,... Obstaja veliko število načinov uporabe furnirja in furnirnih plošč v posebne namene.

2.1.1.1.3 Mehanske lastnosti furnirnih plošč

Zaradi ortotropnosti materiala (lesa), so furnirne plošče izdelane iz lihega števila listov. Krčenje in nabrekanje masivnega lesa se zaradi krčitvene anizotropije razlikuje glede na anatomske smeri. Razmerje krčenja v longitudinalni : radialni : tangencialni smeri je 1 : 10 : 20. Dvoslojna furnirska plošča bi se zaradi tega ob spremembi vlažnosti zvijala, plošča iz lihega števila slojev pa je po debelini simetrična in sile zaradi krčenja/nabrekanja materiala so uravnovešene.

Fizikalne lastnosti kompozitni materialov, gledano s strani simetrije materiala, v splošnem niso izotropne narave, ampak anizotropne (fizikalne lastnosti različne glede na smer obremenitve). Torej, trdnost plošče iz kompozitnega materiala je odvisna od orientacije plošče glede na obremenitev, ki jo plošča nosi. V primeru izotropnega materiala, kot je aluminij ali jeklo, je trdnost enaka neglede na orientacijo obremenitve.

Razmerje med napetostjo in deformacijo je pri izotropnih materialih opisano s tremi materialnimi lastnostmi: elastičnim modulom, strižnim modulom in poissonovim razmerjem, v razmeroma enostavni matematični obliki. V primeru anizotropnega materiala je za opis fizikalnih lastnosti potreben tenzor drugega reda in 21 materialnih konstant. V primeru ortotropnosti (tri ortogonalne ravnine simetrije), so potrebne po tri materialne konstante za elastični modul, strižni modul in Poissonovo razmerje, torej skupaj 9 konstant za opis razmerja napetost - deformacija.

Les se obravnava kot ortotropen (ortogonalno anizotropen) material s tremi ravninami/osmi simetrije: longitudinalno, radialno in tangencialno, ki sovpadajo z osmi kartezičnega

koordinatnega sistema (x, y, z). Majhna razlika med E_R in E_T pojasnjuje, zakaj je mogoče zanemariti ukrivljenost prirastnih plasti in obravnavati les kot ortotropen material (Torelli 2002). Les se lahko obravnava tudi kot cilindrično (polarno) ortotropen material, kar bolj sovпада s karakteristiko rasti, vendar je tudi bolj matematično kompleksno za izračune v praksi.

Hookeov zakon za les v matrični obliki (Ansell, 2015):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_{RT} \\ \varepsilon_{LT} \\ \varepsilon_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_L & -\nu_{RL}/E_R & -\nu_{TL}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LR}/E_L & 1/E_R & -\nu_{TR}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LT}/E_L & -\nu_{RT}/E_R & 1/E_T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{RT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{bmatrix} \quad (1)$$

kjer je ε deformacija, σ napetost, τ strižna napetost, E elastični modul, G strižni modul in ν poissonovo razmerje. Indeksi L , R in T so longitudinalna, radialna in tangencialna smer.

Iz enačbe (1) lahko izračunamo deformacijo v longitudinalni smeri:

$$\varepsilon_L = 1/E_L \cdot \sigma_L - \nu_{RL}/E_R \cdot \sigma_R - \nu_{TL}/E_T \cdot \sigma_T \quad (2)$$

in podobo še deformacije v preostalih petih smereh.

Ko je list luščenega furnirja poravnan v ravnino, je usmeritev furnirja longitudinalno - tangencialna, z radialno smerjo pravokotno na ravnino. V primeru ploskovnega kompozitnega elementa (vezana plošča) je 2D razmerje med ravninskimi napetostmi in ravninskimi deformacijami izraženo kot poenostavitev enačbe (1) (Ansell, 2015):

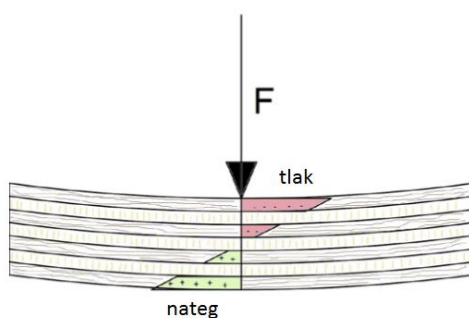
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_L & -\nu_{TL}/E_T & 0 \\ -\nu_{LT}/E_L & 1/E_T & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{LT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Preglednica 1: Elastičnostni in strižni moduli ter Poissonova razmerja za važnejše materiale in nekaj komercialnih lesov. (Torelli, 2002)

Material	E [GPa]			G [GPa]			ν		
siva litina	100			40			0,25		
temprana litina	170			68			0,30		
jeklo	210			81			0,30		
baker	125			48			0,30		
aluminij	72			28			0,30		
umetne smole	4-16			1,4-5,5			0,45		
steklo	56			22			0,25		
beton	14-50			-			0,17		
les	E_L [GPa]	E_R [GPa]	E_T [GPa]	G_{LT} [GPa]	G_{LR} [GPa]	G_{RT} [GPa]	ν_{LT} [GPa]	ν_{LR} [GPa]	ν_{RT} [GPa]
smreka	10,7	0,71	0,43	0,62	0,50	0,046	0,51	0,38	0,51
rdeči bor	16,3	1,10	0,57	0,68	1,16	0,066	0,51	0,42	0,68
bukev	13,7	2,24	1,14	1,06	1,61	0,460	0,51	0,45	0,75
jesen	15,8	1,51	0,80	0,89	1,34	0,270	0,51	0,46	0,71

V preglednici 1 so prikazane nekatere mehanske lastnosti važnejših materialov in nekaj komercialnih lesov.

Pri upogibni obremenitvi furnirne plošče nastajajo v spodnjih listih furnirja natezne napetosti, v zgornjih pa tlačne (slika 4). Les ima v longitudinalni smeri veliko večji elastični modul (bukev: 16.000 N/mm²) kot v tangencialni (bukev: 1.200 N/mm²). Ker je zato v longitudinalni smeri veliko bolj tog oz. v tangencialni smeri veliko bolj podajen (upogljiv), je napetost v longitudinalno obremenjenem nosilcu veliko večja v listih furnirja, ki so usmerjeni longitudinalno. V listih furnirja, ki ležijo prečno na smer obremenitve je napetost veliko manjša in tako ti listi nimajo večjega vpliva na nosilnost v longitudinalni smeri (Slika 4).



Slika 4: Razporeditev napetosti v upogibno obremenjeni furnirni plošči.

Prostorninska masa furnirne plošče je povprečno 18-20% večja glede na masiven les in luščen furnir. Na prostorninsko maso, poleg seveda drevesne vrste, vpliva specifičen pritisk v stiskalnici in temperatura ter debelina furnirja. Tanjši furnirji se bolj stisnejo zaradi večje plastične deformacije. Lepilo vpliva na prostorninsko maso tako, da z večjim številom slojev, pri enaki debelini plošče, naraste količina lepila.

V preglednici 2 je navedena primerjava mehanskih lastnosti masivnega lesa duglazije in furnirnih plošč.

Preglednica 2: Primerjava mehanskih lastnosti masivnega lesa in furnirne plošče. (Thoemen, 2010)

	debelina [mm]	gostota [kg/m ³]	upogibna trdnost [MPa]		elastični modul [MPa]	
			longitud.	prečno	longitud.	prečno
duglazija - masiven les	20	500	80	2,2	12.700	800
duglazija - furnirna plošča	19	600	60	33	10.750	3.310

2.2 RAČUNALNIŠKO PODPRTO INŽENIRSTVO

Računalniško podprto inženirstvo, angl. computer-aided engineering (CAE), je uporaba računalniških programov za simulacijo učinkovitosti izdelka, z namenom izboljšati konstrukcijo izdelka ali kot pomoč pri reševanju inženirskih problemov v širokem spektru industrijskih panog. Analiza sistemov in njihova simulacija na računalnikih vse bolj dopolnjujeta tradicionalne poskuse v laboratoriju na vseh področjih. Tako lahko s pomočjo analiz in simulacij natančno predvidimo obnašanje in delovanje neke naprave, drago tehnologijo izdelave prototipa pa uporabimo samo za različico, ki se je pri tem postopku pokazala za optimalno. S tem prihranimo čas in denar. Takšni računalniški poskusi so tudi povsem ponovljivi, kar omogoča nadzorovano spreminjanje posameznega parametra. Vse te analize in simulacije uporabljajo različne numerične metode (med katerimi je tudi metoda končnih elementov) s katerimi lahko izvajamo poskuse, ki so zelo blizu realnim pogojem.

CAE se deli na naslednja področja:

- analiza napetosti v sestavnih delih in sklopih z uporabo metode končnih elementov - finite element method (FEM)
- simulacija gibanja fluidov in toplot - computational fluid dynamics (CFD)
- dinamika togih teles – multibody dynamics (MBD) in kinematika
- orodja za simuliranje operacij kot je litje, brizganje in štancanje
- optimizacija izdelka ali procesa

CAE orodje je lahko v uporabi kot samostojen program, vendar se v novejšem obdobju kaže trend v postavitvi CAE orodja v večji sistem - PLM (product lifecycle management), kjer je CAE integriran z drugimi orodji (CAD, CAM, PDM), kar omogoča hiter pretok informacij in sodelovanje zaposlenih (z različnih oddelkov) na projektu v realnem času.

V osnovi je delo s CAE orodjem razdeljeno na tri faze:

- pred-procesiranje (pre-processing) - definiranje modela in zunanjih faktorjev delujočih na model
- računanje (solver) - računsko delo, ki ga opravi računalnik
- post-procesiranje (post-processing) - evaluacija rezultatov

V fazi pred-procesiranja je 3D model diskretiziran (razdeljen) za uporabo različnih numeričnih tehnik z različnimi matematičnimi osnovami.

2.2.1 Metoda končnih elementov

Metoda končnih elementov (MKE) oziroma finite element method (FEM) je splošna numerična metoda, razvita konec 50. let na podlagi inženirskih metod. Je ena izmed metod, ki se uporablja za reševanje problemov na mnogih področjih tehnike, fizike, matematike. Na tehničnem področju se uporablja za termalne analize, analize tokov tekočin (computational fluid dynamics - CFD), analize elektromagnetnega polja, v mehaniki deformabilnih teles pa za reševanje statičnih in dinamičnih problemov. Pomembna lastnost metode končnih elementov je prilagodljivost robnim pogojem v geometrijskem in matematičnem smislu.

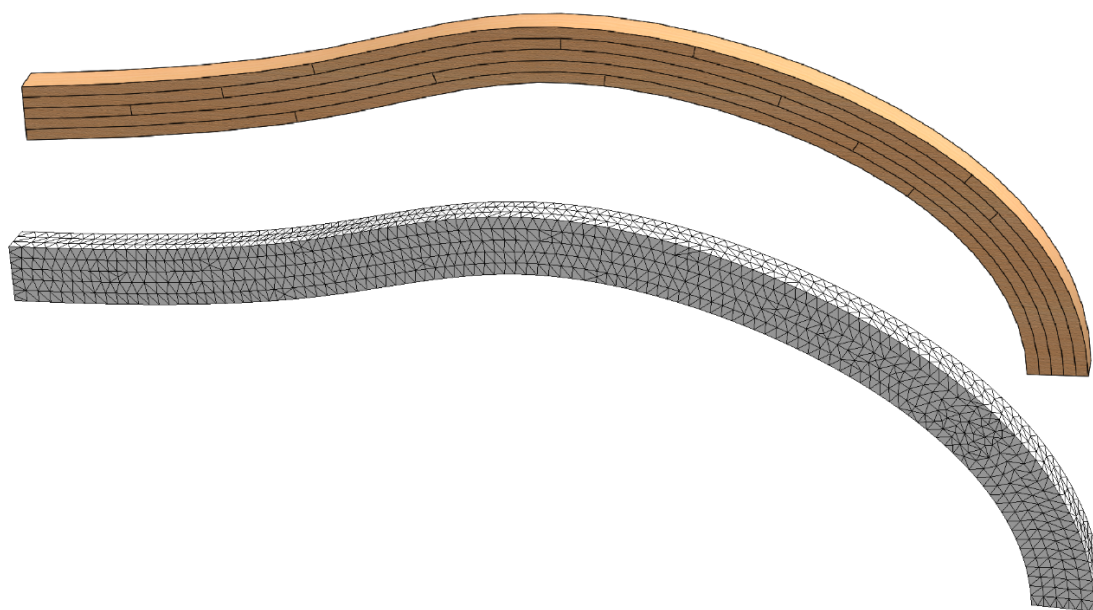
V mehaniki deformabilnih teles (elastomehaniki) se metoda končnih elementov uporablja za izračun napetosti in deformacij v telesu. Analiza napetosti je primarna naloga inženirjev, vključenih v konstruiranje struktur vseh velikosti, kot so tuneli, mostovi, jezovi, letala,

avtomobili, mehanski deli v napravah. Analiza napetosti se uporablja tudi pri vzdrževanju teh struktur in za preiskovanje vzrokov strukturnih porušitev. Metoda končnih elementov (FEM) je bila v osnovi razvita za numerično reševanje kompleksnih problemov elastomehanike in je za analizo teh problemov največkrat uporabljana.

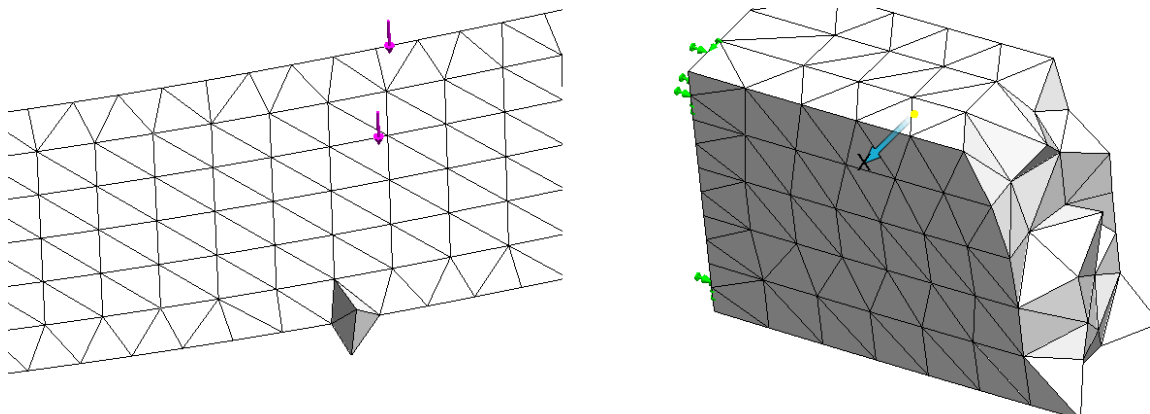
2.2.1.1 Faze simulacije elastomehanskega problema

Pred-procesor je faza izgradnje geometrijskega modela sestavnega dela, ki se analizira. Običajno se vzame 3D CAD model sestavnega dela in se ga razdeli (diskretizira) na tisoče majhnih enot (elementov) oblike kocke ali piramide (Slika 5 in 6). To se imenuje mreženje (meshing). V kompleksnih analizah je potrebno model razdeliti tudi na več milijonov elementov.

Za kompleksne sestavne dele ne obstajajo analitični pristopi (matematične formule), s katerimi bi enostavno izračunali napetosti in deformacije v analiziranem sestavnem delu. Z razdelitvijo sestavnega dela na majhne elemente, pa je omogočen numeričen izračun napetosti med posameznimi elementi in rezultati združeni v celoto, pokažejo porazdelitev napetosti in deformacije v analiziranem sestavnem delu.



Slika 5: 3D model nosilca (lepljeni lamelirani les) in mreža modela za simulacijo.

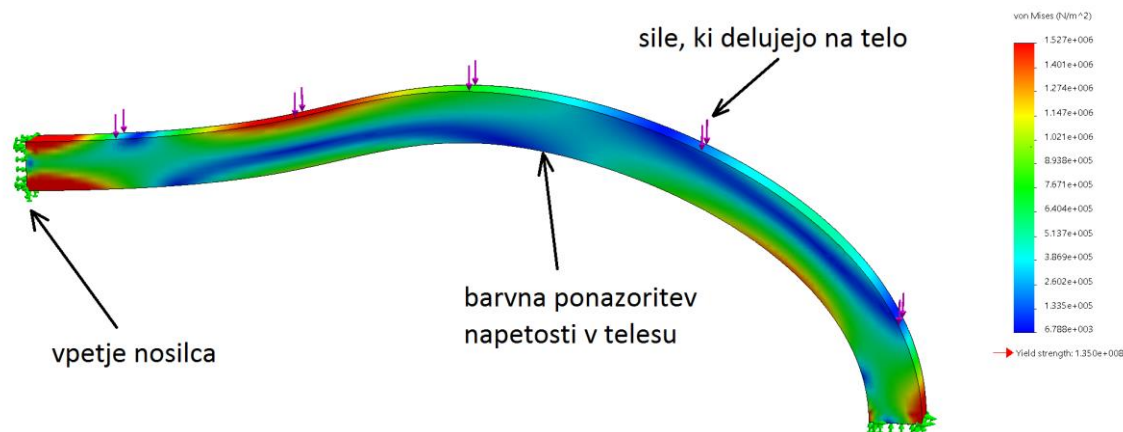


Slika 6: Element mreže, ki je osnova za računanje napetosti in mreža v prerezu.

Mreženje CAD modela poteka avtomatično, vendar je pri nastavitvi za mreženje potrebno vedeti, da bolj kot je mreža gosta (več elementov), bolj je rezultat simulacije natančen. Hkrati z večanjem števila elementov se večja čas izračuna, ki je seveda odvisen tudi od hitrosti računalnika. V fazi pred-procesiranja je potrebno določiti tudi lastnosti materiala. Torej gostoto, natezno trdnost, elastični modul, strižni modul, poissonovo razmerje in drugo, odvisno od kompleksnosti analize. Nato je potrebno določiti sile, ki delujejo na telo. Določimo lahko, da sila deluje na določeno točko ali pa kot moment, pritisk, temperatura, hitrost, pospešek (težnost). Da je omogočen izračun simulacije, je potrebno nastaviti še robne pogoje, kar pomeni določiti, kje je model vpet oz. v katere smeri je onemogočeno premikanje.

Solver je naslednja faza simulacije, v kateri računalnik opravi računsko delo. Program, ki opravi računanje se imenuje solver. Gre skozi mrežo, ki je bila kreirana v prejšnji fazi in reši enačbe za vsak element mreže. Reševanje poteka po za določen problem primerni matematični formulaciji fizike, ki je podlaga za problem. Za kompleksne primere so v uporabi visoko zmogljivi računalniki, čas računanja pa se meri v urah ali celo dnevih.

Post-processing je del analize, ki vključuje pregled in interpretacijo rezultatov iz solver-ja. V 60. letih prejšnjega stoletja je bil rezultat kup papirja, z natisnjenimi številkami, ki so jih morali inženirji pregledati, da so razumeli rezultat simulacije. Danes je, po zahvali sodobnih računalnikov in programov, rezultat post-processor programa obarvan 3D model (Slika 7), kjer se vidijo deformacije in razporeditev napetosti.



Slika 7: Rezultat simulacije - obarvan 3D model.

Vseeno pa natančna interpretacija zahteva temeljito znanje o napetostih, lastnostih materialov in inženirskega obravnavanja problema. Na ta način inženir, ki dela analizo ve, kakšne spremembe so potrebne na obravnavanem sestavnem delu, da bi se zmanjšale kritične napetosti in celo kje in koliko materiala se lahko odvzame, da je rezultat močnejši in lažji sestavni del.

2.2.1.2 Linearno obravnavanje trdnostnega problema

Problem trdnosti izdelka v analizi, se obravnava linearno ali nelinearno. Linearna statična analiza predvideva, da je razmerje med obremenitvijo in povzročeno reakcijo linearno. Velja enačba iz Hookovega zakona:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (4)$$

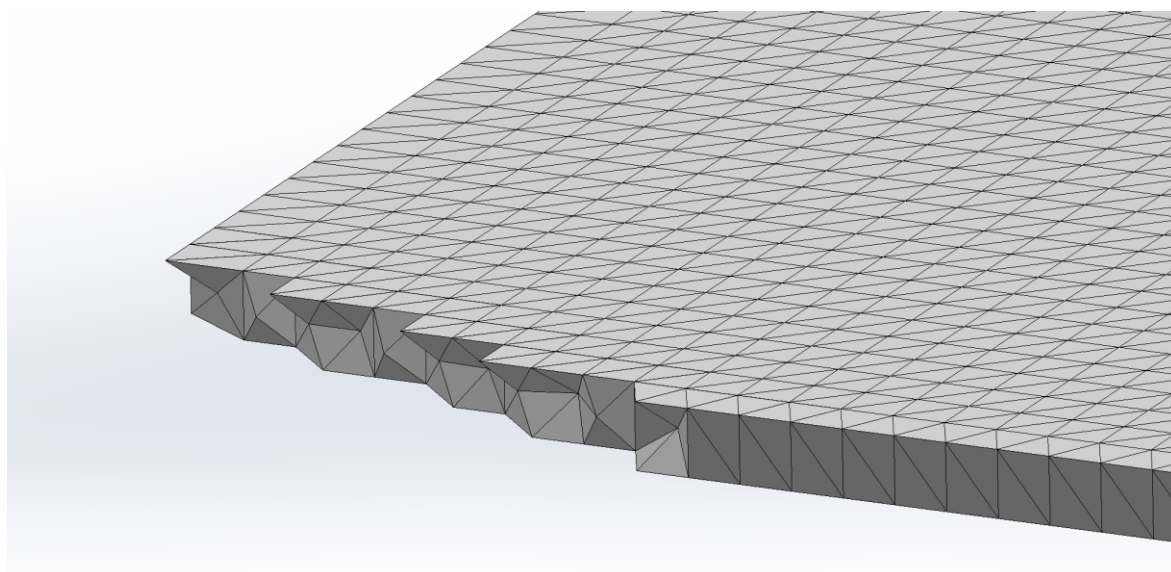
Konstrukcije pa se v praksi ob določeni obremenitvi in ob določenih pogojih obnašajo nelinearno. Nelinearnost je lahko materialna, geometrijska ali kontaktna. Materialna nelinearnost je posledica nelinearnosti razmerja napetost-deformacija. Geometrijska je posledica velikih pomikov geometrije. Kontaktna nelinearnost nastane zaradi spremembe robnih pogojev konstrukcije v gibanju.

Simulacijo linearnega sistema je enostavneje konfigurirati in velikokrat zadošča za analizo trdnosti konstrukcije do meje plastičnosti. Linearna analiza se lahko uporablja za analiziranje

konstrukcij z linearnih materialov s predpostavko, da ni vključenih drugih tipov nelinearnosti. V linearni analizi se predvideva, da so robni pogoji konstantni. Linearni materiali so lahko izotropni, ortotropni ali anizotropni. Les se obravnava kot ortotropen material. V simulaciji lesenih konstrukcij se upošteva linearnost razmerja napetost-deformacija.

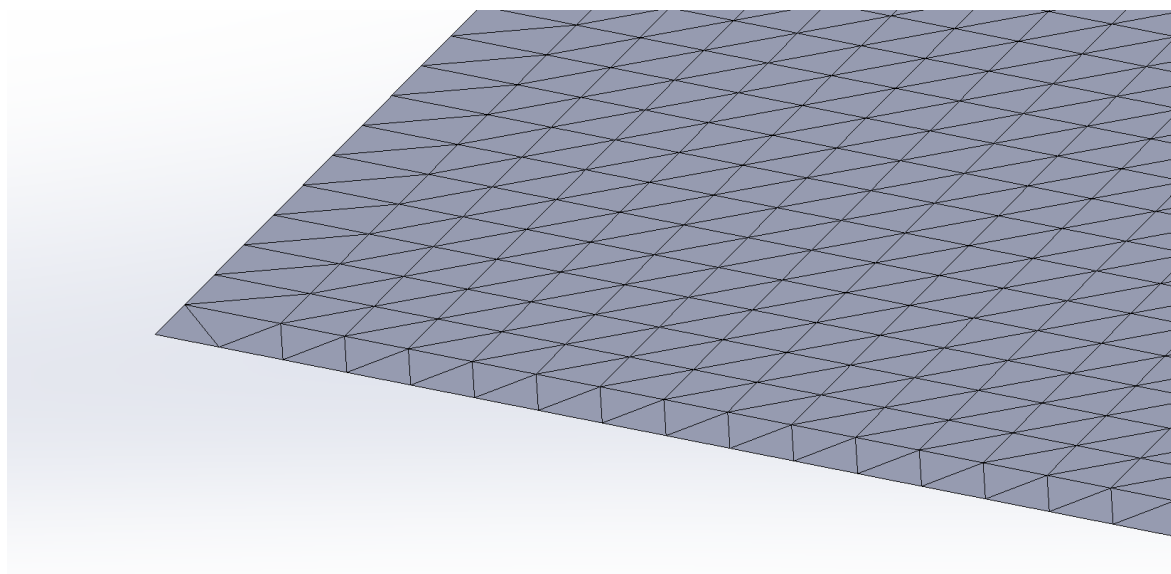
2.2.1.3 Kompozitne lupine

Pri mreženju (pred-procesor faza simulacije) 3D modela konstrukcije z majhnim razmerjem debelina/dolžina (plošče, lupine), je velikost elementa mreže primerljiva z debelino 3D modela konstrukcije (slika 8) in rezultat simulacije je nerealen. Za doseg več elementov po debelini, bi morali v tem primeru za mreženje uporabiti veliko manjše elemente in s tem bi močno povečali število elementov in čas simulacije (solver).



Slika 8: Prerez 3D mreže sestavnega dela majhne debeline. Element mreže je velikosti polovice debeline sestavnega dela.

V primeru konstrukcij iz kompozitnih materialov (vezana plošča), kjer je razmerje debelina/dolžina majhno, se lahko konstrukcija v simulaciji obravnava ploskovno (kot dvodimenzionalna struktura) iz več dvodimenzionalnih (2D) plasti (furnir). To imenujemo kompozitna lupina (composite shell).



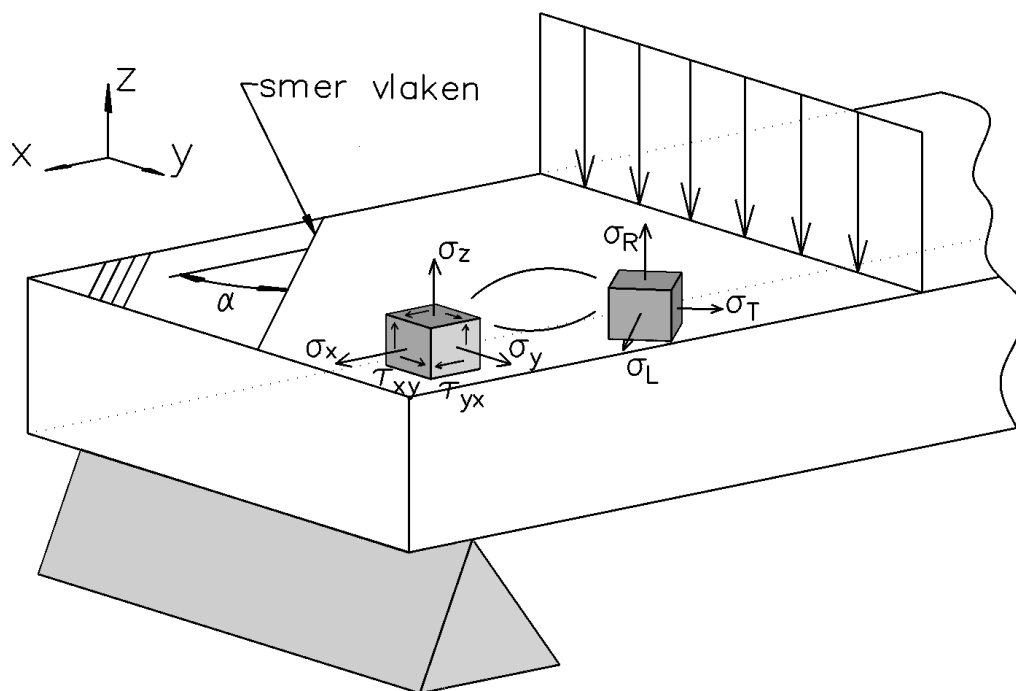
Slika 9: 2D mreža sestavnega dela. Analiza poteka s pomočjo kompozitne lupine.

Pri izdelavi mreže, je vsaka plast kompozitne lupine mrežena dvodimenzionalno. V matematičnem izračunu v solver fazi se upošteva debelina plasti. Rezultat simulacije so napetosti v zgornjem, spodnjem in srednjem delu vsake plasti (furnir). V pred-procesor fazi simulacije se za vsako plast kompozitne lupine določi: smer plasti (vlaknen), vrsta materiala (mehanske lastnosti), debelina.

2.2.1.4 Transformacija napetosti v koordinate materiala

Poznane so posamezne elastomehanske karakteristike materiala, kot je natezna trdnost, tlačna trdnost, upogibna trdnost, strižna trdnost, elastični modul. Za material ki je ortotropen, so te mehanske lastnosti navedene za tri različne smeri. V primeru lesa, ki se ga obravnava kot ortotropen material, so te smeri longitudinalna, radialna in tangencialna.

V rezultatu simulacije je mogoč pregled porazdelitve napetosti v posameznih smereh. Te smeri so osi koordinatnega sistema kamor je postavljen 3D model. Za izračun porušne napetosti sestavnega dela je napetosti potrebno transformirati v drug koordinatni sistem oziroma v smeri (ortotropnega) materiala v katerih so mehanske lastnosti materiala poznane.



Slika 10: Transformacija smeri napetosti v točki v telesu iz kompozitnega materiala.

V primeru ploskovno obremenjene vezane plošče iz luščenega furnirja so obravnavane smeri longitudinalna (smer vlaken) in tangencialna (prečno na smer vlaken). Radialna smer je v tem primeru pravokotna na površino ploskve vezane plošče in napetosti v tej smeri so zanemarljive.

Transformacijska enačba napetostnega tenzorja, ki upošteva okoli "z" osi rotiran koordinatni sistem (slika 10). Os "L" je za kot α rotirana glede na os "x" (Aicher in Klöck, 2001):

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin^2 \alpha & 2 \cos \alpha \sin \alpha \\ \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha & -2 \cos \alpha \sin \alpha \\ -\cos \alpha \sin \alpha & \cos \alpha \sin \alpha & \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

V primeru enoosne obremenitve σ_x (v smeri "x" osi) in z longitudinalno smerjo (smer vlaken) pod kotom α , iz transformacijske enačbe velja:

$$\sigma_L = \cos^2 \alpha \cdot \sigma_x \quad (6)$$

$$\sigma_T = \sin^2 \alpha \cdot \sigma_x \quad (7)$$

$$|\tau_{LT}| = \cos \alpha \sin \alpha \cdot \sigma_x \quad (8)$$

kjer so σ_L , σ_T in τ_{LT} napetosti v smeri materiala. σ_x , σ_y in τ_{xy} so napetosti v smeri postavitve obravnavanega elementa (slika 10).

2.2.1.5 Porušitvene hipoteze

Mehanizem porušitev kompozitnih konstrukcij ni natančno poznan. Predlagani so bili različni porušitveni modeli.

Za določitev, ali bo v konstrukciji ob obremenitvi prišlo do porušitve, CAE program najprej izračuna napetosti. V primeru kompozitnega materiala (vezana plošča) CAE program izračuna napetosti posebej za vsak sloj. Nato program na podlagi teh napetosti z uporabo porušitvenih hipotez določi kriterij porušitve. Porušitev v kompozitnih materialih nastopi v več stopnjah. Ko nastopi porušitev v enem sloju, lahko kompozit še nosi obremenitev, vendar se z varnostnega vidika že porušitev enega sloja obravnava kot nezadostno varna konstrukcija.

Porušitveni kriterij določi razmerja napetosti, pri katerih pride do porušitve.

2.2.1.5.1 Linearni model

Linearni kriterij je enostaven kriterij za določitev porušitve. V primeru obremenitve v ravnini (ko je $\sigma_z=0$, $\tau_{xz}=0$, $\tau_{yz}=0$) v dveh glavnih smereh ortotropnega materiala, je linearni kriterij (Cabrero in Gebremedhin, 2010):

$$\frac{\sigma_x}{X} + \frac{\sigma_y}{Y} + \frac{\tau_{xy}}{S} = 1 \quad (9)$$

σ_x , σ_y in τ_{xy} so predvidene obremenitve

$X=\sigma_{x \max}$, $Y=\sigma_{y \max}$ in $S=\tau_{xy \max}$ so največje napetosti, ki se lahko pojavijo v materialu preden pride do porušitve (porušna napetost)

V primeru enoosne obremenitve σ_x pod kotom α glede na usmeritev vlaken materiala, iz enačb (6, 7, 8) in enačbe (9) velja:

$$\sigma_x \left(\frac{\cos^2 \alpha}{X} + \frac{\sin^2 \alpha}{Y} + \frac{\cos \alpha \sin \alpha}{S} \right) = 1 \quad (10)$$

2.2.1.5.2 Kvadratni model

Iz kvadratnega modela porušitve izhajajo elipsoidna oblika dopustnih napetosti (Slika 11). Kvadratni model tako kot linearni ne upošteva interakcije med normalnima napetostma σ_x in σ_y .

Kvadratni kriterij porušitve (trdnosti) (Cabrero in Gebremedhin, 2010):

$$\left(\frac{\sigma_x}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2 = 1 \quad (11)$$

V primeru enoosne obremenitve σ_x pod kotom α glede na usmeritev vlaken materiala, iz enačb (6, 7, 8), in enačbe (11) velja:

$$\sigma_x^2 \left(\frac{\cos^4 \alpha}{X^2} + \frac{\sin^4 \alpha}{Y^2} + \frac{\cos^2 \alpha \sin^2 \alpha}{S^2} \right) = 1 \quad (12)$$

Iz enačbe (12) se izračuna σ_x , ki je največja dovoljena obremenitev (enoosna obremenitev).

2.2.1.5.3 Tsai-Hill model

Tsai-Hill model porušitve (Cabrero in Gebremedhin, 2010):

$$\left(\frac{\sigma_x}{X}\right)^2 - \frac{\sigma_x \sigma_y}{X^2} + \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2 = 1 \quad (13)$$

Tsai-Hill model predpostavlja, da so porušne napetosti enake v primeru natezne obremenitve in tlačne obremenitve, kar pa ne velja v primeru lesa. V nasprotju z linearnim in kvadratnim modelom, Tsai-Hill model vključuje interakcijo napetosti σ_x in σ_y .

2.2.1.5.4 Tsai-Wu model

Tsai-Wu je porušitveni kriterij, ki je največkrat uporabljan v primeru ortotropnih kompozitnih materialov, ki imajo različne vrednosti natezne in tlačne trdnosti. Zato je primeren za uporabo v primeru lesa.

$$f(\sigma) = F_i \cdot \sigma_i + F_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j \quad i, j = 1 \dots 6 \quad (14)$$

V primeru 2D ploskovnih napetosti ($\sigma_z=0$, $\tau_{xz}=0$, $\tau_{yz}=0$), je Tsai-Wu kriterij izražen v enačbi (Cabrero in Gebremedhin, 2010):

$$\left(\frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}\right)\sigma_x + \left(\frac{1}{Y_T} + \frac{1}{Y_C}\right)\sigma_y + \left(\frac{1}{X_T X_C}\right)\sigma_x^2 + \left(\frac{1}{Y_T Y_C}\right)\sigma_y^2 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_T X_C} \cdot \frac{1}{Y_T Y_C}} \cdot \sigma_x \sigma_y + \frac{1}{S^2} \tau_{xy}^2 = 1 \quad (15)$$

X_T je natezna trdnost (longitudinalna smer) (tension)

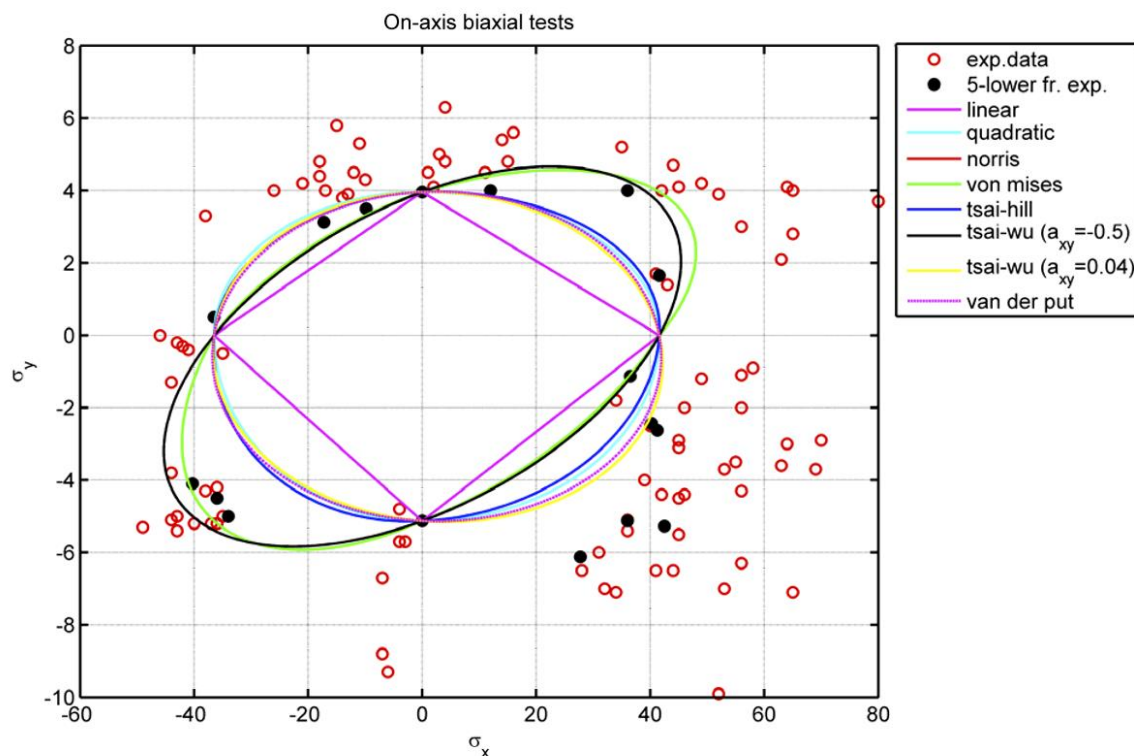
X_C je tlačna trdnost (longitudinalna smer) (compression)

Y_T je natezna trdnost (tangencialna smer) (tension)

Y_C je tlačna trdnost (tangencialna smer) (compression)

2.2.1.5.5 Primerjava porušitvenih modelov

V literaturi je veliko podatkov o enoosnih napetostnih stanjih lesa, kar pa ne velja za večosna napetostna stanja. Eberhardsteiner (2002) je objavil obsežne podatke s testov navzkrižno lepljenega lesa smreke obremenjenega v dveh smereh. Opravil je 450 posameznih testov. Na sliki 11 so prikazani rezultati teh eksperimentalnih testov in porušitvene krivulje različnih porušitvenih modelov, v primeru obremenitve v dveh smereh (σ_x in σ_y). X os je longitudinalna os lesa, Y os pa je pravokotna na smer vlaken.



Slika 11: Porušitvene hipoteze. Krivulje prikazujejo meje porušnih napetosti.
(Cabrero in Gebremedhin, 2010)

2.2.2 Varnostni faktor

Varnostni faktor oziroma factor of safety (FOS) opisuje kapaciteto konstrukcije za nošenje obremenitve izven meja predvidenih obremenitev. Konstrukcije so velikokrat grajene mnogo močnejše kot je potrebno zaradi nepredvidljivih obremenitev, izrabe,... Varnostni faktor je lahko tudi predpisan z zakonom, standardi, specifikacijami.

Dopustna napetost je obseg obremenitve do katere je konstrukcija predvidena in je definirana kot:

$$\sigma_{dop} = \frac{\sigma_{max}}{\gamma} \quad (16)$$

kjer je σ_{max} trdnost materiala (porušna napetost), γ pa varnostni faktor konstrukcije. Običajno je vrednost varnostnega faktorja med 3 in 4.

Varnostni faktor v CAE simulaciji se izračuna iz porušitvenega kriterija. V primeru kvadratnega modela porušitvenega kriterija (11) je varnostni faktor (FOS):

$$FOS = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2}} \quad (17)$$

2.3 STANDARDI ZA PREIZKUŠANJE LESNIH VZORCEV

Standard je dokument, ki predpisuje zahteve, specifikacije, navodila, karakteristike za dejavnosti in njihove rezultate - izdelke, storitve, procese in proizvodne postopke. Standardizacija temelji na prostovoljnem sodelovanju med industrijo, podjetji, javnimi organi in drugimi deležniki (npr. raziskovalci, potrošniškimi organizacijami, socialnimi partnerji ali okoljskimi deležniki). Skladnost s standardom je prostovoljno in ni avtomatičnih zakonskih obvez, vendar se lahko zakoni in predpisi nanašajo na standarde. Vsi standardi se po 5 letih pregledajo in revidirajo ali nadomestijo z novimi. Zaradi inovacij in hitrega tehničnega napredka je stalna potreba tudi po novih standardih..

Evropski standardi (EN) so dokumenti, ki so bili odobreni s strani ene izmed treh evropskih organizacij za standardizacijo: Evropskega odbora za standardizacijo (CEN), Evropskega odbora za elektrotehnično standardizacijo (Cenelec) ali Evropskega inštituta za telekomunikacijske standarde (ETSI). Evropski standardi se ponavadi pripravijo na pobudo deležnikov, ki zaznajo potrebo po standardizaciji. Približno petina evropskih standardov se pripravi na podlagi zahteve za standardizacijo (naročila), ki jo evropskim organizacijam za standardizacijo poda Evropska komisija.

Na ravni držav standardizacijo urejajo nacionalni organi za standardizacijo, ki sprejemajo in objavljajo nacionalne standarde. V Sloveniji standarde odobri SIST - Slovenski inštitut za standardizacijo. Nacionalni standardi so po večini privzeti po evropskih ali mednarodnih dokumentih. Kot polnopravni član mednarodnih organizacij za standardizacijo ISO in IEC ter evropskih organizacij CEN in CENELEC, je SIST dolžan ščititi avtorske pravice standardov, promovirati uporabo standardov in širiti informacije o pravilni uporabi standardov. Nacionalni organi za standardizacijo morajo evropske standarde po njihovem sprejemu prenesti v nacionalno ureditev kot identične nacionalne standarde in umakniti morebitne nasprotujoče nacionalne standarde.

SIST je v okviru lesne panoge sprejel 74 standardov z oznako »Lesene konstrukcije«, 62 z oznako »Lesne plošče«, 206 z oznako »Pohištvo«, 265 z oznako »Les, lesni izdelki in zaščita lesa«.

2.3.1 SIST EN 789:2005 (EN 789:2004)

Slovenski standard »SIST EN 789:2005 Lesene konstrukcije - Preskusni postopki - Ugotavljanje mehanskih lastnosti lesnih plošč« predpisuje pripravo testnih kosov in postopek ugotavljanja upogibnega modula elastičnosti, upogibne trdnosti, tlačnega modula elastičnosti, tlačne trdnosti, nateznega modula elastičnosti, natezne trdnosti, strižnega modula in strižne trdnosti. SIST EN 789:2005 je nadomestil standard SIST EN 789:1996 iz leta 1996.

Standard predpisuje kako izrezati testne vzorce iz testnih plošč. Za posamezen test se lahko izreže samo po en vzorec iz ene plošče. Vzorci iz plošč se zaradi variabilnosti izrežejo vedno iz drugega položaja na plošči.

Na sliki 12 je prikazana shema postavitve za upogibni test, z debelino testnega vzorca t in dolžino $2 \times 16t + 300\text{mm}$. Na sliki je prikazan tudi *NTM* diagram: $N=0$, $T=F/2$, $M_{\max}=F \times l_2/2$. Zaradi dveh podpor in obremenitve na dveh mestih se test imenuje tudi 4-točkovni test.

Enačba za izračun upogibnega modula elastičnosti:

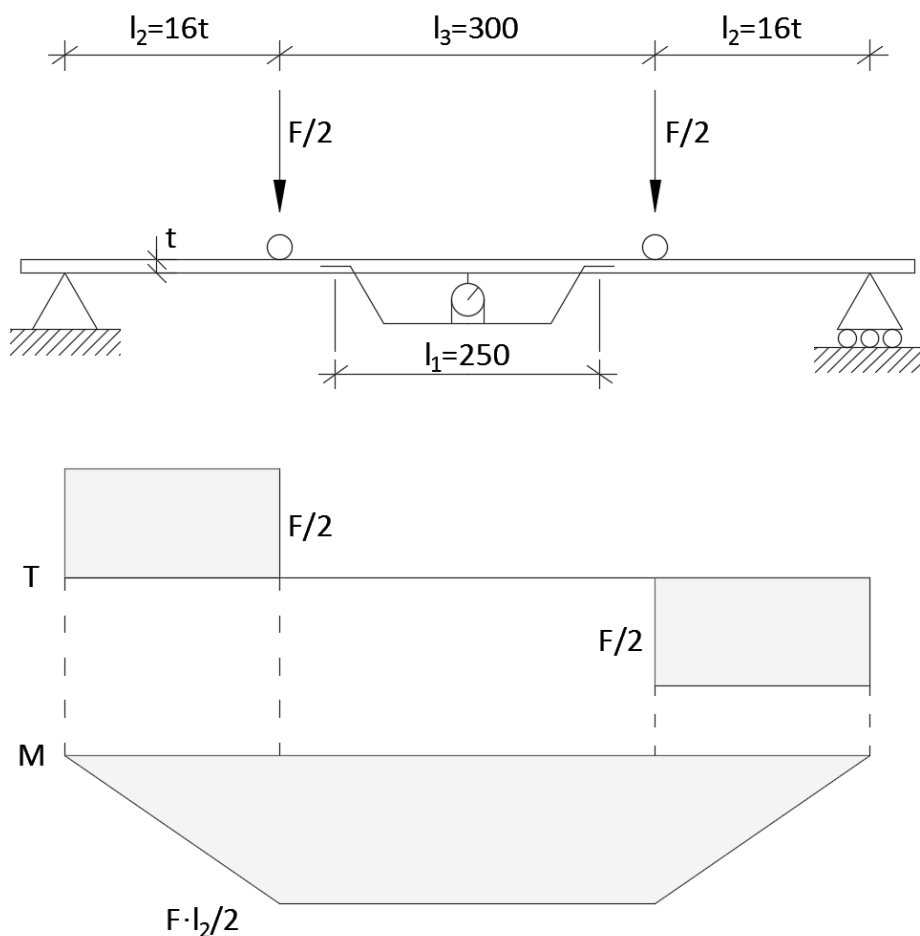
$$E_m = \frac{(F_2 - F_1)l_1^2 l_2}{16(u_2 - u_1)I} \quad (18)$$

$F_2 - F_1$ je korak obremenitve s silo v območju od $0,1F_{\max}$ do $0,4F_{\max}$ (linearno območje)
 $u_2 - u_1$ je upogibna deformacija, ki ustreza obremenitvi F_1, F_2

I je upogibni vztrajnostni moment prereza testnega vzorca:

$$I = \frac{bt^3}{12} \quad (19)$$

t je debelina testnega vzorca, b je širina testnega vzorca



Slika 12: Shema postavitve za 4-točkovni upogibni test in *NTM* diagram.

Upogibna trdnost se izračuna po enačbi:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max} l_2}{2W} \quad (20)$$

W je odpornostni moment prereza:

$$W = \frac{bt^2}{6} \quad (21)$$

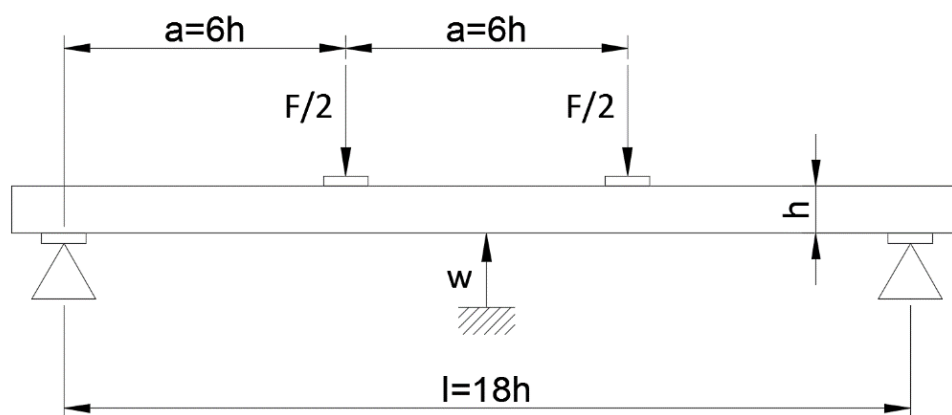
t je debelina testnega vzorca, b je širina testnega vzorca

2.3.2 SIST EN 408:2004 (EN 408:2003)

Slovenski standard »SIST EN 408:2004 Lesene konstrukcije - Konstrukcijski les in lepljeni lamelirani les - Ugotavljanje nekaterih fizikalnih in mehanskih lastnosti« predpisuje pripravo testnih kosov in postopek ugotavljanja naslednjih lastnosti:

- lokalni upogibni modul elastičnosti
- globalni upogibni modul elastičnosti
- natezni modul elastičnosti v longitudinalni smeri
- tlačni modul elastičnosti v longitudinalni smeri
- modul elastičnosti pravokotno na smer vlaken
- strižni modul
- upogibna trdnost
- natezna trdnost v longitudinalni smeri
- tlačna trdnost v longitudinalni smeri
- natezna in tlačna trdnost pravokotno na smer vlaken
- strižna trdnost v longitudinalni smeri

Določanje globalnega upogibnega modula elastičnosti poteka po postavitvi testa kot je prikazano na sliki 13.



Slika 13: Shema postavitve za 4-točkovni upogibni test po standardu EN 408.

Enačba za izračun globalnega upogibnega modula elastičnosti:

$$E_{m,g} = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{bh^3(w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad (22)$$

$F_2 - F_1$ je korak obremenitve s silo v območju od $0,1F_{max}$ do $0,4F_{max}$ (linearno območje)

$w_2 - w_1$ je upogibna deformacija, ki ustreza obremenitvi F_1, F_2

Ostali simboli so razvidni s slike 13.

Enačba za izračun upogibne trdnosti:

$$\sigma_{max} = \frac{a \cdot F_{max}}{2W} \quad (23)$$

W je odpornostni moment prereza:

$$W = \frac{bt^2}{6} \quad (24)$$

t je debelina testnega vzorca, b je širina testnega vzorca

2.3.3 SIST EN 310:1996 (EN 310:1993)

Slovenski standard »SIST EN 310:1996 Lesne plošče - ugotavljanje upogibne trdnosti in modula elastičnosti« predpisuje postopek za ugotovitev modula elastičnosti in upogibne trdnosti z obremenitvijo testnega vzorca na sredini dolžine in z dvema podporama (3-točkovni upogibni test).

Na sliki 14 je prikazana shema postavitve za upogibni test, z debelino testnega vzorca t in dolžino $20t$. Na sliki je prikazan tudi *NTM* diagram: $N=0$, $T=F/2$, $M_{max}=F \times l_1/4$.

Modul elastičnosti E_m vzorca se izračuna po enačbi:

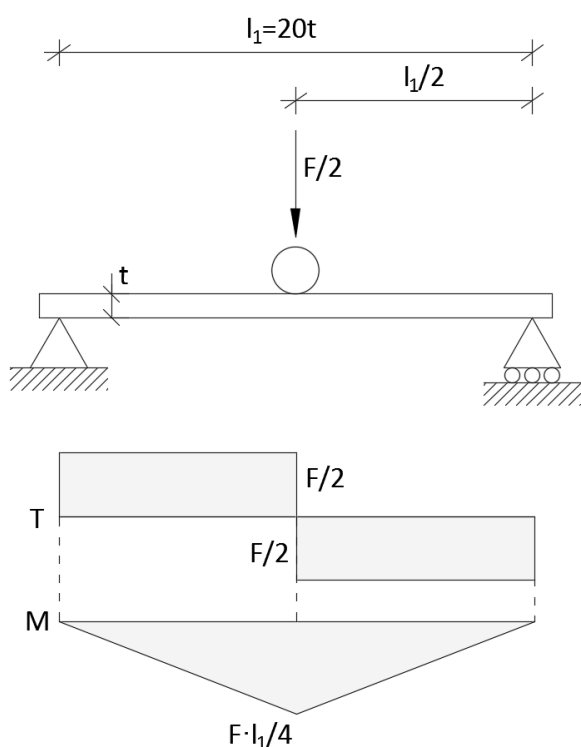
$$E_m = \frac{(F_2 - F_1)l_1^3}{4bt^3(u_2 - u_1)} \quad (25)$$

$F_2 - F_1$ je korak obremenitve s silo v območju od $0,1F_{max}$ do $0,4F_{max}$ (linearno območje).
 $u_2 - u_1$ je upogibna deformacija na sredini dolžine testnega vzorca, ki ustreza obremenitvi F_1, F_2 .

Upogibna trdnost se izračuna po enačbi:

$$\sigma_{max} = \frac{3F_{max}l_1}{2bt^2} \quad (26)$$

t je debelina testnega vzorca, b je širina testnega vzorca



Slika 14: Shema postavitve za 3-točkovni upogibni test in NTM diagram.

2.3.4 Primerjava standardov EN 310 / EN 789

Mehanske lastnosti furnirnih plošč se ugotavljajo z uporabo različnih testnih metod. Poleg tega, da za ugotavljanje ene mehanske lastnosti obstaja več standardov, so v industriji uporabljeni tudi drugi postopki.

Fun in Jumaat (2013) sta naredila primerjavo med standardoma EN 789 in EN 310 pri določanju upogibne trdnosti in modula elastičnosti furnirne plošče tropskega lesa meranti (*Shorea spp.*). Ugotovila sta, da je upogibna trdnost, določena po standardu EN 310, 12% do 20% (merjena longitudinalna smer plošče) in 7% do 24% (merjena prečna smer plošče) večja kot po standardu EN 789. Medtem ko je modul elastičnosti, določen po standardu EN 310, 28% do 41% (merjena longitudinalna smer plošče) in 30% do 36% (merjena prečna smer plošče) manjši kot po standardu EN 789. Ugotavljala sta tudi variabilnost pri uporabi različnih drevesnih vrst, kar bi lahko vplivalo na korelacijo med rezultati pridobljenimi z EN 310 in EN 789.

3 MATERIALI IN METODE

3.1 UPORABLJENI MATERIALI

Za potrebe eksperimentalnega dela diplomske naloge smo nabavili luščen furnir v podjetju Lesma iz Pivke. Furnir je bil narejen po naročilu iz lesa bukve in debeline 1,5 mm. Listi furnirja so bili dimenzij 600×1400 mm.

V podjetju Melamin Kočevje smo brezplačno dobili vzorčno količino melaminsko-sečninsko-formaldehidnega lepila Meldur H97, za potrebe lepljenja furnirnih plošč. Lepilo Meldur H97 se uporablja za termično lepljenje jelovega in bukovega lesa za vodoodporne izdelke E-1 emisijskega razreda.

Po dostavi furnirja na Oddelek za lesarstvo smo furnir vizualno ločili po kvaliteti. Sledilo je krojenje furnirja na mere 600×600 mm in z vzdolžno usmeritvijo pod različnimi koti. Nato smo krojen furnir zložili v zložaje po 3, 7 in 11 listov. V preglednici 3 je izmerjena vlažnost vzorcev furnirja pred izdelavo plošč.

Preglednica 3: Vlažnost furnirja pred izdelavo plošč.

vzorec	m_v [g]	m_0 [g]	u [%]
1	26,270	24,591	6,828
2	20,210	19,004	6,346
3	18,940	17,686	7,090
4	19,643	18,390	6,813
povprečje			6,769

Lepilo smo pripravili tako, da smo lepilu Meldur H97 dodali 1% katalizatorja NH_4Cl in 5% polnila (ržene moke), ki je potrebno za zvišanje viskoznosti. Vse skupaj smo z električnim mešalcem mešali pribl. 15 min. Nanos lepila (količina) na furnir je bil 180 g/m^2 . Po nanosu lepila na liste furnirja je odprti čas lepila 15 - 30 minut, zato je bilo pri 11-slojnih ploščah potrebno postopek nanosa izvesti hitreje. V stiskalnici smo plošče stiskali pod pritiskom $1,6 \text{ N/mm}^2$ in pri temperaturi 130°C , kot je navedeno v tehničnih navodilih za lepilo. Odvisno od debeline (št. slojev) smo plošče v stiskalnici stiskali 7, 10 in 13 min. (3, 7 in 11 slojne plošče).

Po stiskanju smo plošče nalagali eno na drugo in jih obtežili. Drug dan smo jih zložili v skladovnico z letvicami in jih teden dni pustili kondicionirati.

Za potrebe računalniške simulacije - analize trdnosti 3D CAD modelov, smo uporabili program Solidworks z modulom Simulation. Za ta program obstaja velika podpora za uporabo programa tako s strani programske hiše, ki ga trži, kot spletne skupnosti s tega področja.

3.2 TEORIJA IZVEDBE EKSPERIMENTA

Eksperimentalni del diplomske naloge je bil razdeljen na dva dela:

- mehanski preizkus - testiranje vzorcev bukove furnirne plošče na preizkuševalni napravi
- računalniška simulacija - trdnostna analiza 3D CAD modelov dimenzij in mehanskih lastnosti enakih kot v mehanskem preizkusu

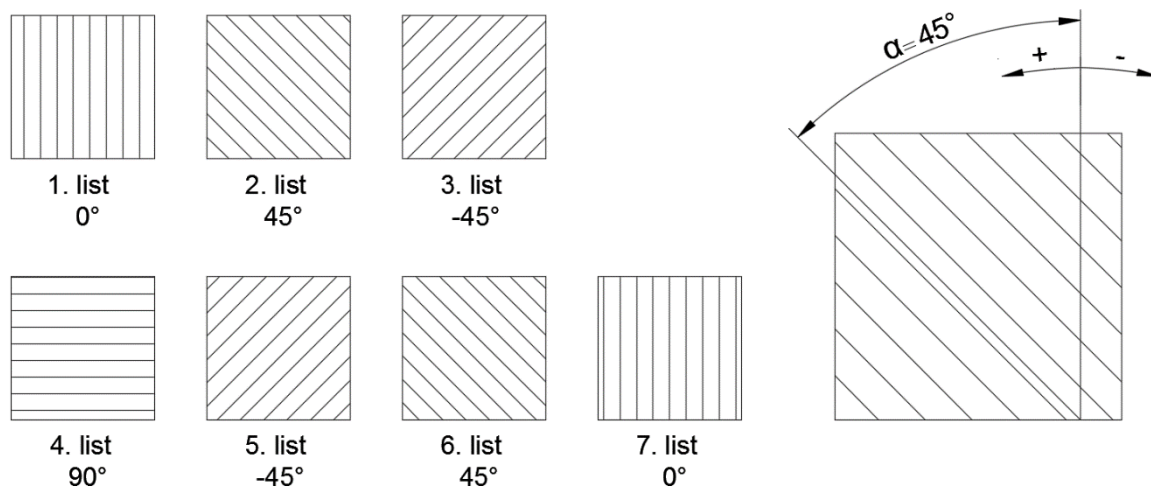
3.2.1 Mehanski preizkus

Mehanski preizkus je obsegal testiranje vzorcev bukove furnirne plošče. Vzorce smo izrezali iz prej izdelanih bukovih furnirnih plošč. Naredili smo 8 plošč v treh različnih debelinah - 1×3-slojna, 3×7-slojna in 4×11-slojna (slika 18). Tipi izdelanih plošč so prikazani v preglednici 4.

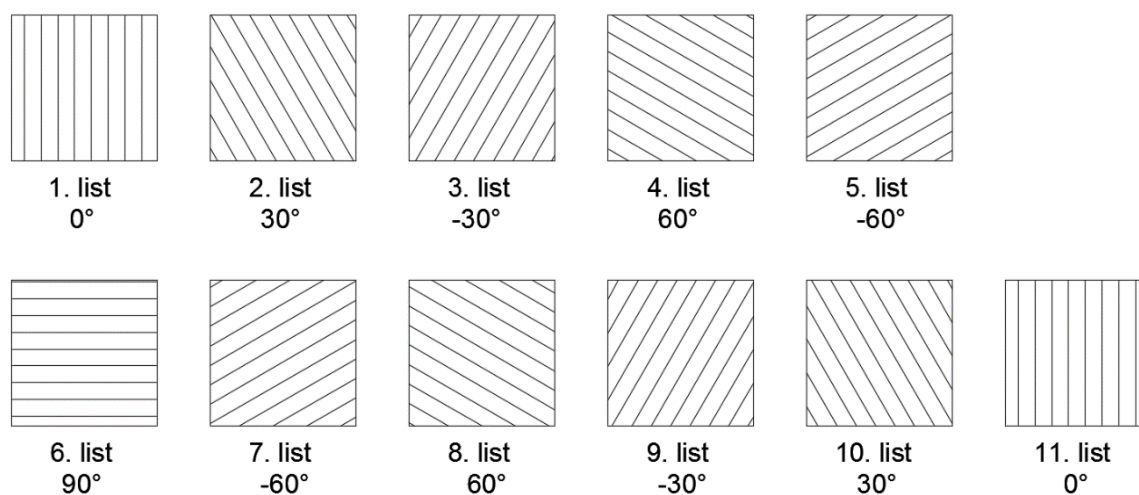
Preglednica 4: Tipi izdelanih furnirnih plošč. (P-pravokotna, K-kotna)

plošča	število plošč	oznaka	usmeritev slojev (kot v stopinjah)
3-slojna	1	3P	0 90 0
7-slojna	1	7P	0 90 0 90 0 90 0
7-slojna	2	7K	0 45 -45 90 -45 45 0
11-slojna	2	11P	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0
11-slojna	2	11K	0 30 -30 60 -60 90 -60 60 -30 30 0

Na slikah 15 in 16 je grafično prikazana usmeritev posameznih listov furnirja pri 7K in 11K ploščah.



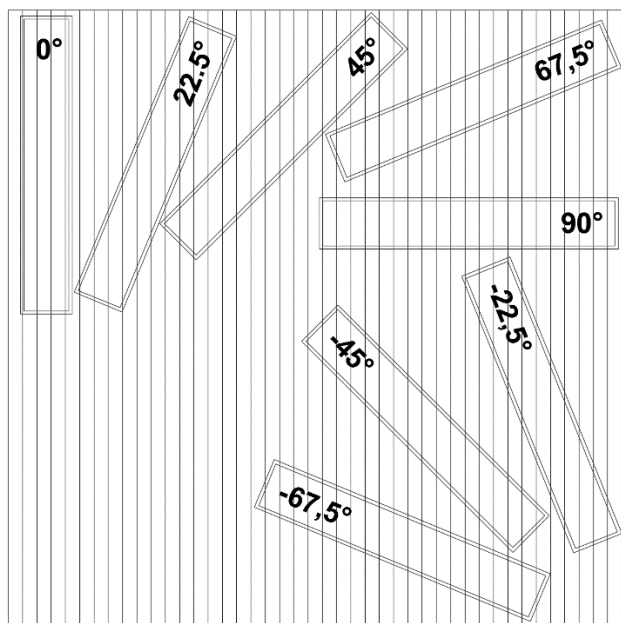
Slika 15: Usmeritev listov furnirja pri 7K furnirnih ploščah. Kot α je usmerjenost lista furnirja glede na vzdolžno os furnirne plošče.



Slika 16: Usmeritev listov furnirja pri 11K furnirnih ploščah. Kot α je usmerjenost lista furnirja glede na vzdolžno os furnirne plošče.

Iz vseh plošč smo izrezali 67 vzorcev. Vzorce iz plošč 7K in 11K smo izrezali pod koti v razmiku $22,5^\circ$ in sicer: 0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$, 90° , $-22,5^\circ$, -45° in $-67,5^\circ$. Vzorce iz plošč 3P,

7P in 11P pa zaradi večje simetrije samo pod koti: 0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ in 90° . Tako smo dobili vzorce z longitudinalno usmeritvijo prvega sloja furnirja pod različnimi koti glede na vzdolžno os vzorcev. Skica načina izreza vzorcev iz plošč 7K in 11K je prikazana na sliki 17.



Slika 17: Skica načina izreza vzorcev iz plošč 7K in 11K. Za vsak vzorec je označen kot, pod katerim je longitudinalna usmerjenost prvega sloja glede na vzdolžno os vzorca.



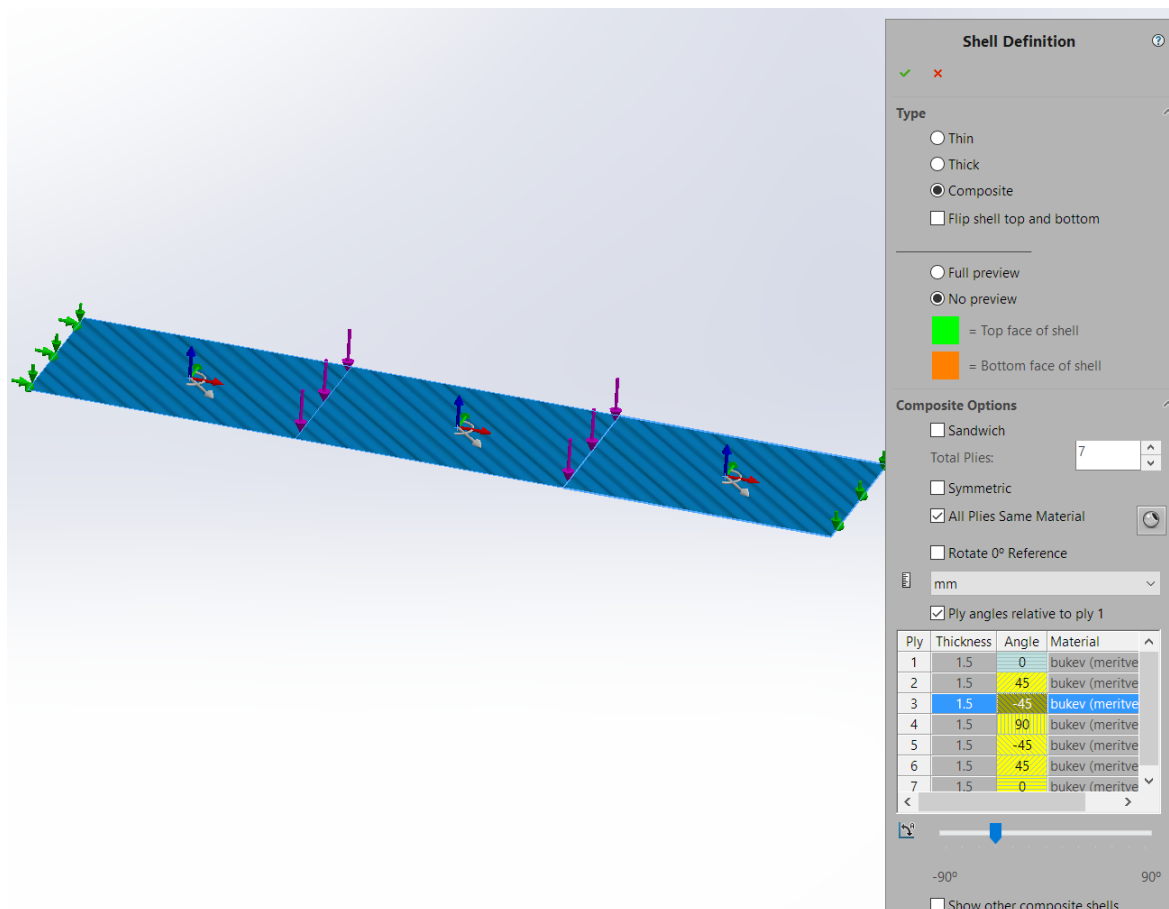
Slika 18: Izdelane furnirne plošče (550×550 mm), pripravljene za razrez vzorcev.

Preizkus je bil upogibni 4-točkovni. S preizkusom je bila izmerjena upogibna porušna trdnost vzorca oz. maksimalna obremenitev, pri kateri je prišlo do porušitve (F_{max}).

Mehanski preizkus je obsegal še določitev elastičnega modula bukve, za definiranje materialnih lastnosti v simulaciji s programom Solidworks. Izdelali smo bukovo furnirno ploščo z vsem listi furnirja usmerjenimi longitudinalno. Izrezali smo longitudinalne vzorce za upogibni preizkus v longitudinalni smeri in prečne vzorce za preizkus v prečni (tangencialni) smeri. Modul elastičnosti v longitudinalni smeri in modul elastičnosti v tangencialni smeri smo izračunali po standardu EN 408, iz enačbe (22). Praktično delo je vsebovalo še natezni in tlačni preizkus epruvet bukovega furnirja za določitev natezne in tlačne trdnosti furnirja, uporabljenega za izdelavo testnih plošč in prav tako za uporabo teh podatkov v simulaciji.

3.2.2 Računalniška simulacija

Računalniško simulacijo smo izvedli s programom Solidworks Simulation. Uporabili smo funkcijo 'kompozitna lupina' (composite shell), ki omogoča definiranje analiziranega elementa kot ene površine z več plastmi ortotropnih materialov. V vseh plasteh smo uporabili enak material tipa 'linearen elastičen ortotropen' (linear elastic orthotropic) - v preglednici 5 so prikazane vrednosti mehanskih lastnosti, potrebne za definiranje takega materiala. Za vsako plast »kompozitne lupine« smo določili še longitudinalno usmeritev materiala plasti, kar je potrebno pri simulaciji kompozitnega materiala kot je furnirna plošča z različno usmerjenimi plastmi. Na sliki 19 je prikazana tretja plast furnirja sedem plastne kompozitne lupine. Na plasti se vidi usmerjenost vlaken pod kotom -45° .



Slika 19. Izrezek iz programa Solidworks. Prikazana je tretja plast furnirja.

Rezultat simulacije je bila sila, pri kateri je prišlo do loma analiziranega kompozitnega elementa. Lom je bil definiran kot stopnja obremenitve elementa, kjer je bil rezultat simulacije, »varnostni faktor« FOS enak 1. Za izračun varnostnega faktorja FOS v programu Solidworks je bil določen Tsai-Wu porušitveni kriterij.

Preglednica 5: Mehanske lastnosti lesa bukve, uporabljene v računalniški simulaciji.

simbol	mehanska lastnost lesa	lastnost ortotropnega materiala v programu SolidWorks	vrednost	enota
E_L	elastični modul v longitudinalni smeri	elastic modulus in X	15.723	N/mm ²
E_T	elastični modul v tangencialni smeri	elastic modulus in Y	1.064	N/mm ²
E_R	elastični modul v radialni smeri	elastic modulus in Z	1.968	N/mm ²
μ_{LT}	poissonov količnik LT	poisson's ratio in XY	0,440	-
μ_{TR}	poissonov količnik TR	poisson's ratio in YZ	0,360	-
μ_{LR}	poissonov količnik LR	poisson's ratio in XZ	0,371	-
G_{LT}	strižni modul LT	shear modulus in XY	1.060	N/mm ²
G_{TR}	strižni modul TR	shear modulus in YZ	460	N/mm ²
G_{LR}	strižni modul LR	shear modulus in XZ	1.610	N/mm ²
ρ	gostota	mass density	740	kg/m ³
σ_{NL}	natezna trdnost v longitudinalni smeri	tensile strength in X	98	N/mm ²
σ_{NT}	natezna trdnost v tangencialni smeri	tensile strength in Y	9	N/mm ²
σ_{TL}	tlačna trdnost v longitudinalni smeri	compressive strength in X	74	N/mm ²
σ_{TT}	tlačna trdnost v tangencialni smeri	compressive strength in Y	15	N/mm ²
τ_{LT}	strižna trdnost LT	shear strength in XY	8	N/mm ²
σ_{el}	meja elastičnosti	yield strength	60	N/mm ²

Vrednosti v preglednici 5, za poissonova razmerja, strižne module, strižno trdnost in natezno trdnost v tangencialni smeri, smo vzeli iz Kretschmann (2010) in Wagenfür (2007). Ostale lastnosti smo dobili s testiranjem materiala, kar je obrazloženo v nadaljnjem delu diplomske naloge.

4 REZULTATI

4.1 MEHANSKI PREIZKUS

4.1.2 Meritve lastnosti materiala

Za definiranje materiala v simulaciji z metodo končnih elementov smo izmerili lastnosti uporabljenega lesa bukve. Izmerili smo natezno trdnost, tlačno trdnost in modul elastičnosti v longitudinalni in tangencialni smeri.

Rezultati nateznega preizkusa listov furnirja longitudinalno (vzdolžno) so prikazani v preglednici 6. Povprečje natezne trdnosti longitudinalno je bilo 98,1 N/mm² in to vrednost smo vzeli kot lastnost materiala v simulaciji z metodo končnih elementov.

Rezultati nateznega preizkusa prečno so prikazani v drugem delu preglednice 6. Povprečna vrednost teh meritev je bila 1,70 N/mm², kar je bila verjetno posledica tehnologije luščenja furnirja, kjer se furnir v tangencialni smeri precej deformira, s tem pa pride do lokalnih porušitev tkiva.

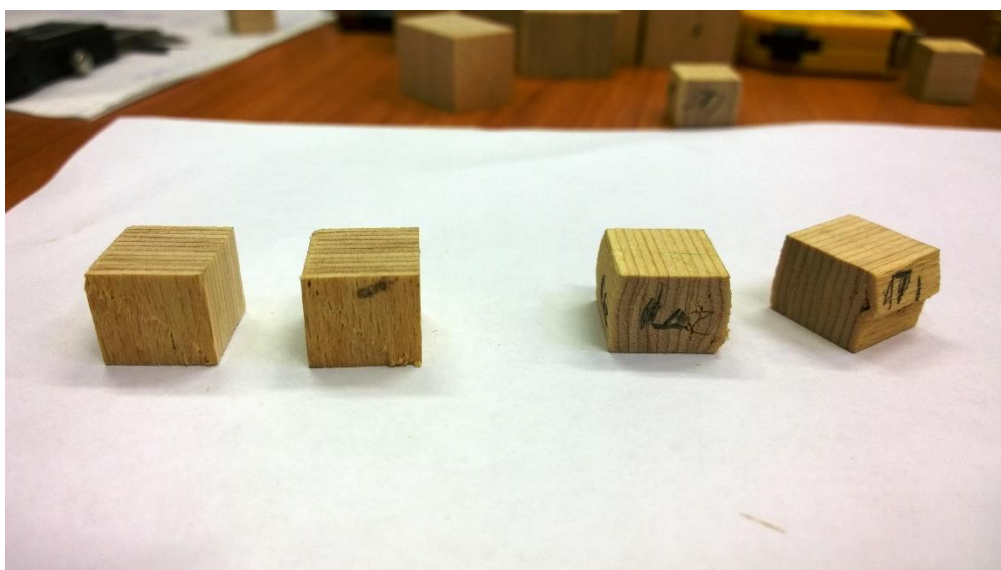
Preglednica 6: Rezultati meritev nateznega preizkusa vzorcev furnirja v longitudinalni in tangencialni smeri.

longitudinalno		tangencialno	
natezna sila [N]	natezna trdnost [N/mm ²]	natezna sila [N]	natezna trdnost [N/mm ²]
4035	89,7	97	2,16
5165	114,8	82	1,82
4278	95,1	86	1,91
4223	93,8	86	1,91
4516	100,4	47	1,04
4535	100,8	52	1,16
4852	107,8	84	1,87
4317	95,9	povprečje	1,70
3294	73,2		
4457	99,0		
3686	81,9		
4569	101,5		
5488	122,0		
povprečje	98,1		

Na sliki 20 je izvedba nateznega preizkusa na merilnem stroju.



Slika 20: Natezni preizkus lista furnirja na merilnem stroju.



Slika 21: Porušeni vzorci iz tlačnega preizkusa. Levo vzorca iz tlačnega preizkusa v longitudinalni smeri, desno vzorca porušena v tangencialni smeri.

Na sliki 21 so vzorci tlačnega preizkusa po porušitvi na merilnem stroju.

Rezultati tlačnega preizkusa vzorcev vezane plošče dimenzij 16,08×16,08 mm longitudinalno (vzdolžno) so prikazani v preglednici 7. Povprečje tlačne trdnosti longitudinalno je bilo 74,1 N/mm² in to vrednost smo vzeli kot lastnost materiala v simulaciji z metodo končnih elementov.

Rezultati tlačnega preizkusa prečno so prikazani v drugem delu preglednice 7. Povprečna vrednost teh meritev je bila 14,7 N/mm² in to vrednost smo vzeli kot lastnost materiala v simulaciji z metodo končnih elementov.

Preglednica 7: Rezultati meritev tlačnega preizkusa vzorcev furnirja v longitudinalni in tangencialni smeri.

longitudinalno			tangencialno		
natezna sila [N]	mere vzorca [mm]	tlačna trdnost [N/mm ²]	natezna sila [N]	mere vzorca [mm]	tlačna trdnost [N/mm ²]
19741	16,08×16,08	76,3	3600	16,08×16,08	13,9
18804	16,08×16,08	72,7	3700	16,08×16,08	14,3
19741	16,08×16,08	76,3	3800	16,08×16,08	14,7
50342	32,10×21,80	71,9	3900	16,08×16,08	15,1
51064	32,10×21,80	73,0	4000	16,08×16,08	15,5
povprečje		74,1	povprečje		14,7

Modul elastičnosti smo izmerili iz vzorcev furnirne plošče, katere listi furnirja so bili vsi usmerjeni v isto smer. Rezultat meritev je bila odvisnost deformacije od obremenitve. Elastični modul smo izračunali iz enačbe (22) iz standarda EN 408. Preizkuse smo naredili za longitudinalno in tangencialno smer. Rezultati so prikazani v preglednici 8. Povprečne vrednosti elastičnih modulov smo vzeli kot lastnost materiala v simulaciji z metodo končnih elementov.

Preglednica 8: Elastični moduli v simulaciji uporabljenega materiala bukve v longitudinalni in tangencialni smeri.

vzorec št.	$E_{m,g}$	$E_{m,g}$
	longitudinalno	tangencialno
	N/mm ²	N/mm ²
1	15632	1051
2	15790	1064
3	15747	1077
povprečje	15723	1064

4.1.3 Meritve trdnosti kompozitnih elementov

Po postopku iz standarda EN 408 smo merili upogibno trdnost vzorcev bukove furnirne plošče. V preglednici 4 so prikazani tipi plošč iz katerih so bili izrezani vzorci. Vzorce smo obremenjevali s hitrostjo obremenjevanja 10 mm/min. Na sliki 22 je vzorec ob obremenitvi v preizkuševalni napravi. Na sliki 23 je porušen vzorec iz upogibnega testa. Vzorec je z 45° kotom prvega sloja, kar se vidi po smeri porušitve prvega sloja.

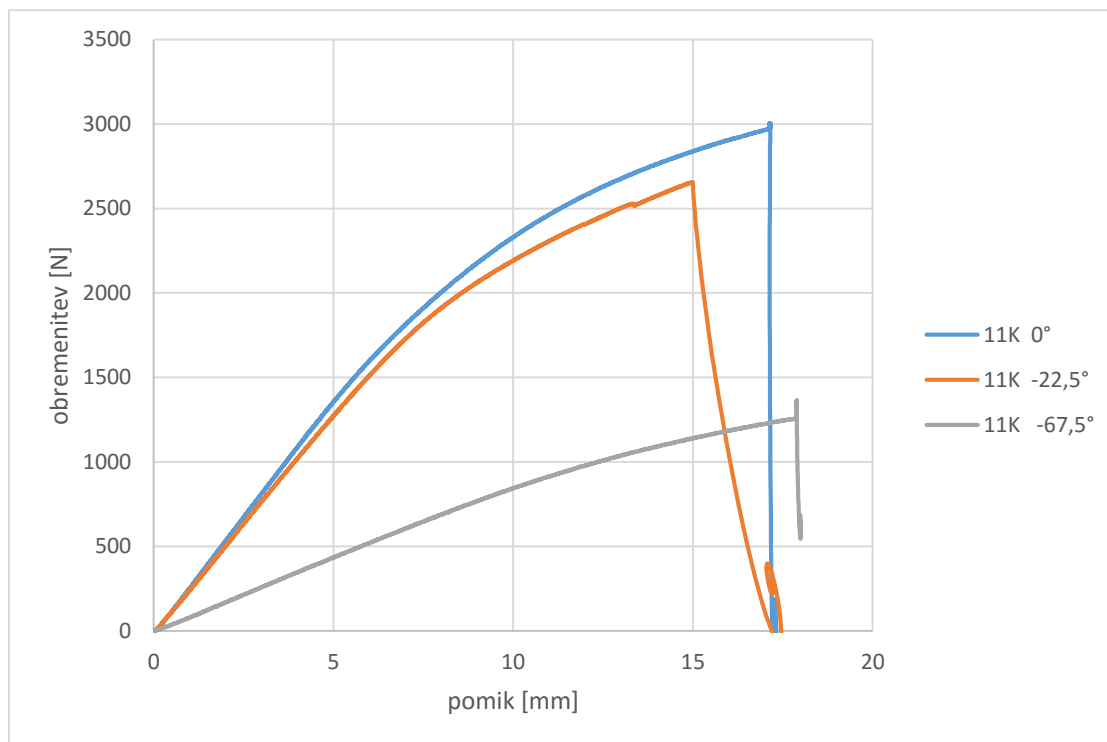


Slika 22: Vzorec na upogibnem testu v preizkuševalni napravi.



Slika 23: Porušen vzorec iz upogibnega testa.

Na sliki 24 je prikazan graf napetost-deformacija, kot rezultat upogibnega testa. Vsi trije vzorci so s plošče 11K, s tremi različnimi koti izreza (0° , $-22,5^\circ$ in $-67,5^\circ$). Na sliki se vidi maksimalna sila obremenitve in naklon linearnega dela krivulje (elastični modul).

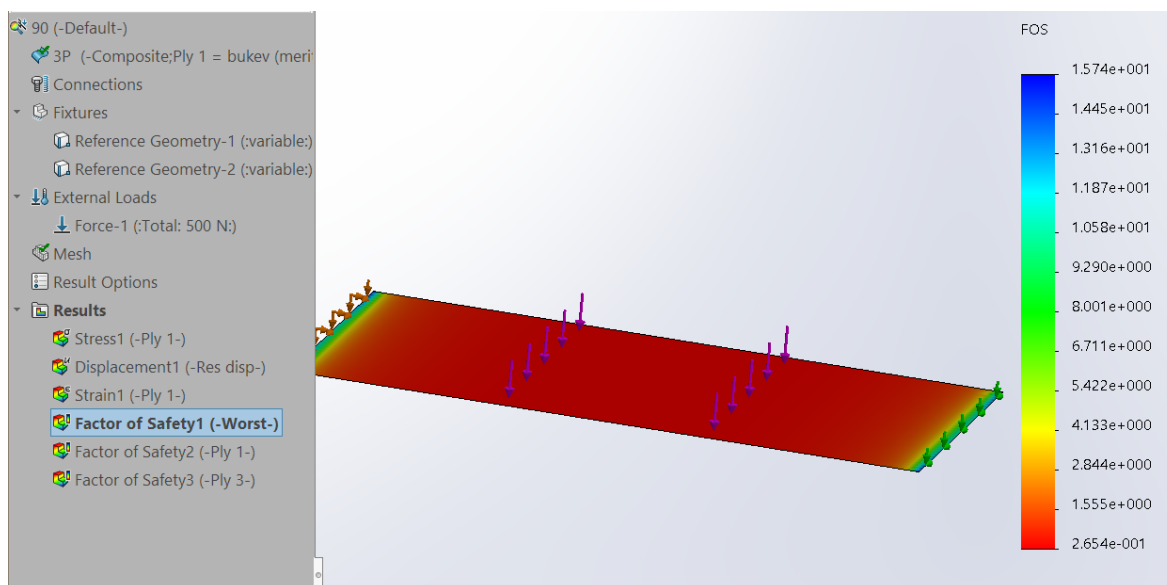


Slika 24: Razmerje napetost-deformacija kot rezultat upogibnega preizkusa.

4.2 NUMERIČNA ANALIZA TRDNOSTI KOMPOZITNIH ELEMENTOV

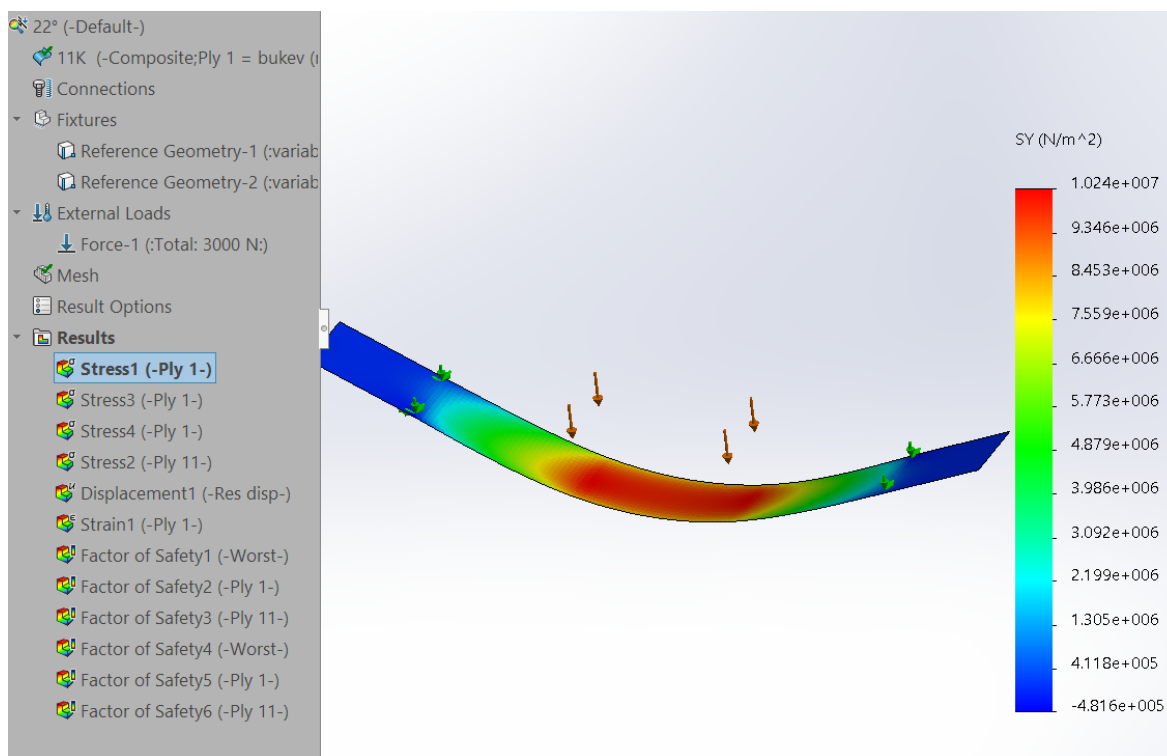
S programom Solidworks Simulation smo izvedli linearno statično analizo trdnosti CAD modelov, geometrično enakih kot so bili vzorci za mehanski preizkus. V pred-procesor fazi simulacije smo v program vnesli vrednosti mehanskih lastnosti lesa bukve. Uporabljene vrednosti so navedene v preglednici 5. Določiti je bilo treba še debelino posameznih slojev (1,5 mm) in longitudinalno usmeritev vsakega sloja posebej. Rezultat analize je bil velikost in porazdelitev napetosti, deformacija, pomiki in varnostni faktor - FOS (factor of safety).

Na sliki 25 je prikazan izračun najmanjše vrednosti FOS izmed vseh slojev, ki v tem primeru znaša 0,2654 in velja za spodnji sloj furnirne plošče. FOS je bil izračunan ob obremenitvi modela 3-slojne plošče s 500 N. Izračun pomeni, da do porušitve pride že pri obremenitvi s $500 \text{ N} \times 0,2654 = 128 \text{ N}$.

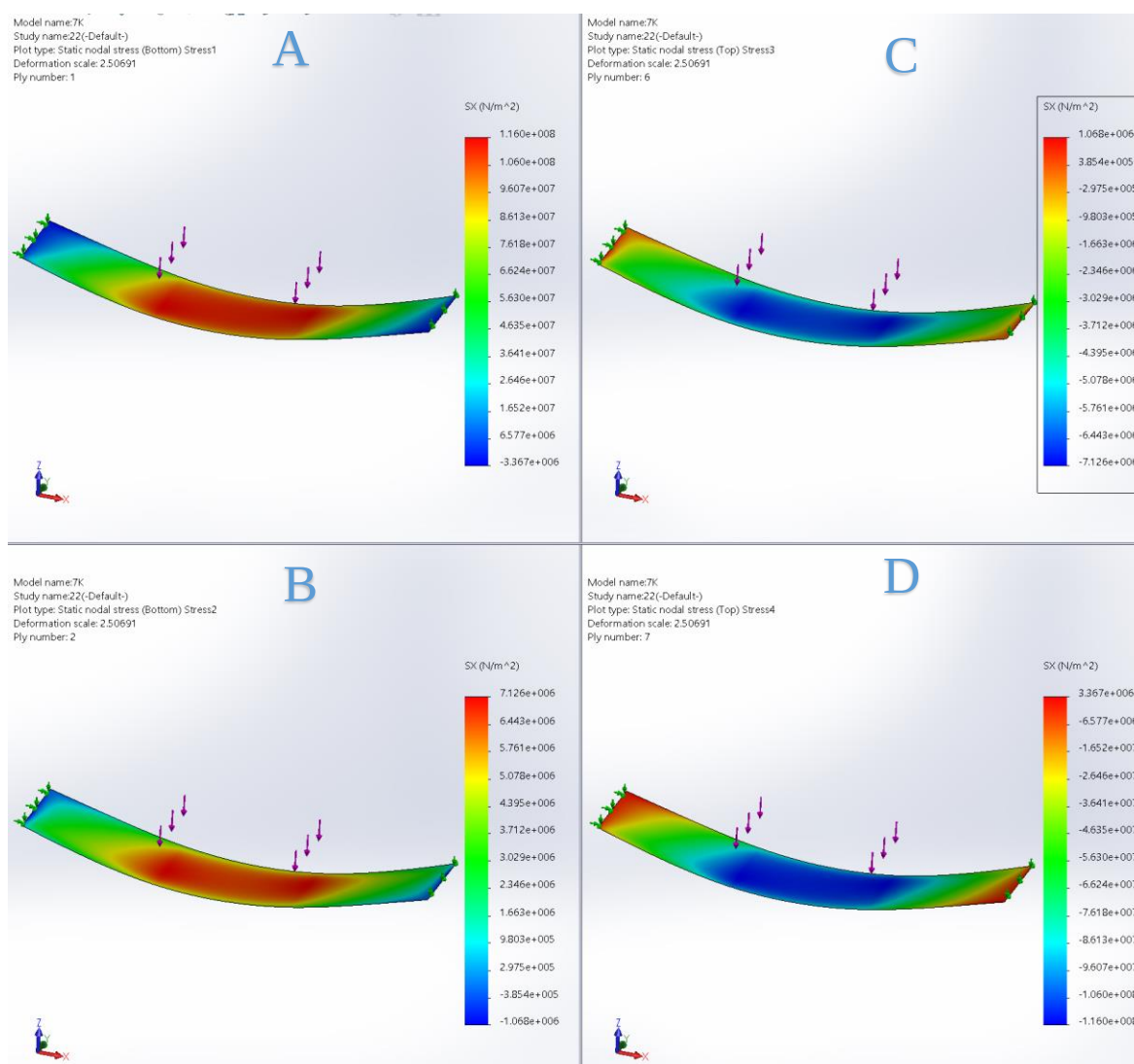


Slika 25: Izrezek iz programa Solidworks Simulation. Prikazan je rezultat izračuna FOS (factor of safety).

Na sliki 26 je prikazan pomik (upogib) 11-slojnega modela furnirne plošče (oznaka 11K) in z longitudinalno usmeritvijo prvega sloja vzorca pod kotom $22,5^\circ$. Iz slike je razvidna velikost in porazdelitev prečnih napetosti σ_y (SY) v N/m^2 (Pascalih) v prvem (spodnjem) sloju.

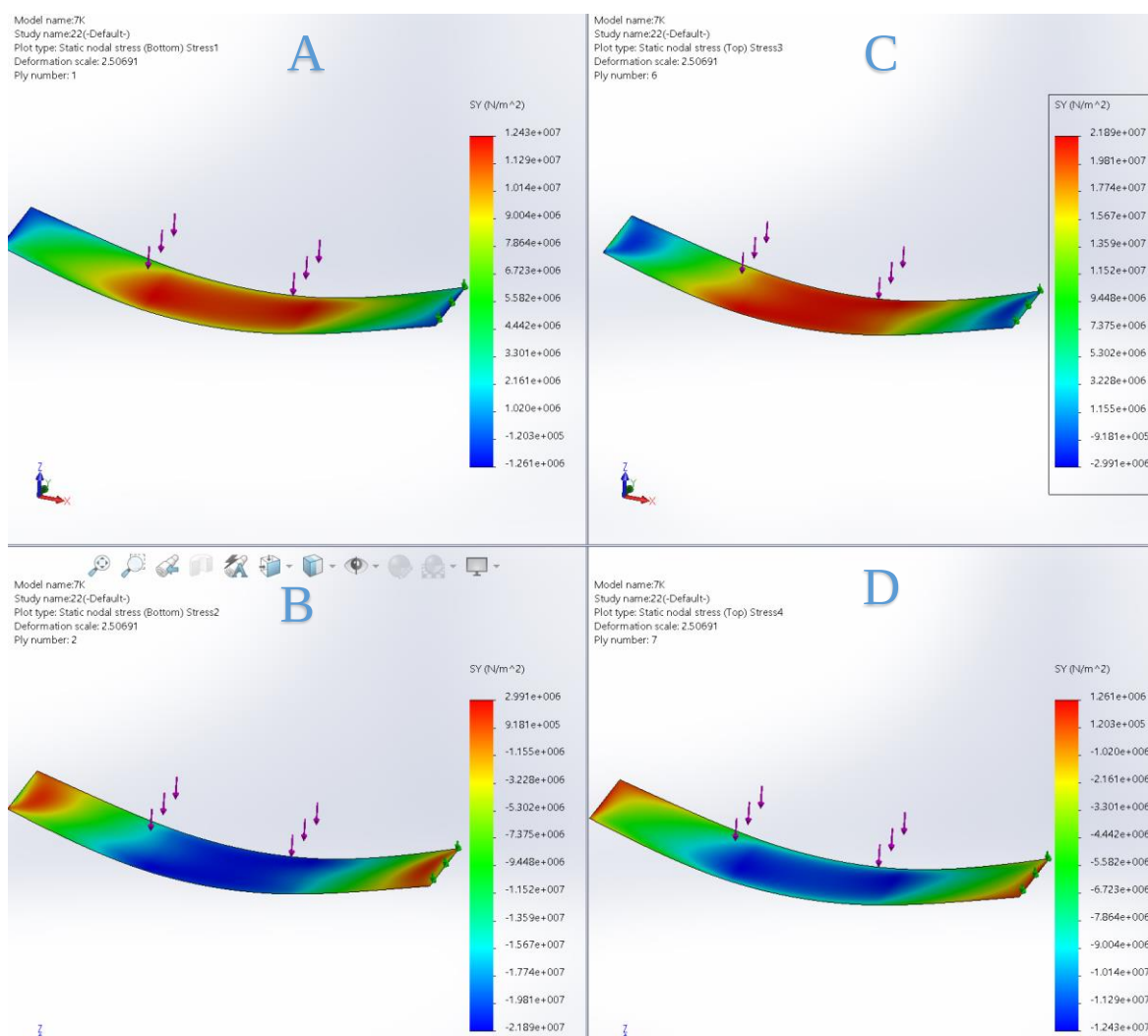


Slika 26: Izrezek iz programa Solidworks Simulation. Prikazana je porazdelitev nateznih napetosti v spodnjem sloju furnirne plošče.



Slika 27: Izrezek iz programa Solidworks Simulation. Prikazana je porazdelitev vzdolžnih napetosti (x os).
Vzorec 7K.22,5°. a) prvi-spodnji sloj, b) drugi sloj, c) šesti sloj, d) sedmi sloj.

Na slikah 27 in 28 sta izrezka iz programa Solidworks Simulation, kjer je prikazana porazdelitev napetosti v posameznih slojih vzorcev iz plošče z oznako 7K in vzorci s prvim slojem furnirja pod kotom 22,5°. Na sliki 27 je primerjava narejena za napetosti v longitudinalni smeri vzorca (x os), na sliki 28 pa za napetosti v prečni smeri (y os). Na sliki 27a je 1. (spodnji) sloj vzorca z nateznimi napetostmi, 27b je 2. sloj, prav tako z nateznimi napetostmi, vendar manjše velikosti. 27d je 7. (zgornji) sloj s tlačnimi napetostmi in 27c je 6. sloj prav tako s tlačnimi napetostmi, vendar manjše velikosti.



Slika 28: Izresek iz programa Solidworks Simulation. Prikazana je porazdelitev prečnih napetosti (y os).
Vzorec 7K.22,5°. a) prvi-spoondnji sloj, b) drugi sloj, c) šesti sloj, d) sedmi sloj.

V preglednici 9 so prikazani rezultati mehanskega preizkusa (4-točkovni upogibni test) in rezultati računalniške simulacije z enakimi osnovnimi parametri kompozitnega elementa (geometrija, lastnosti materiala in usmeritev posameznih slojev).

Primer oznake furnirnih plošč:

- 3P - 3-slojna plošča s pravokotno usmeritvijo slojev (P)
- 7K - 7-slojna plošča z usmeritvijo slojev pod različnimi koti (K)

Podrobna razporeditev posameznih slojev je prikazana v preglednici 4.

Vzorci iz furnirnih plošč so bili izrezani pod različnimi koti, kar je razvidno iz oznake vzorcev. Navedeni kot pomeni longitudinalno usmeritev prvega sloja (furnirja) glede na vzdolžno os vzorca (slika 17). Iz 3-slojne plošče so bili izrezani po trije vzorci z enako usmeritvijo prvega sloja, iz 7 in 11 slojnih plošč pa po dva vzorca.

Preglednica 9a: Primerjava upogibne trdnosti izmerjene v eksperimentalnem preizkusu in upogibne trdnosti izračunane v numerični analizi (z metodo končnih elementov). Za vzorce iz plošč 3P, 7P in 11P.

oznaka plošče	dimenzija vzorca	gostota plošče	vzorec	masa vzorca	$F_{\max}^e$	$F_{\max}^n$	$F_{\max}^{ns}$ spodnji sloj	$F_{\max}^{nz}$ zgornji sloj	$F_{\max}^n/F_{\max}^e$
	mm	kg/m ³		g	N	N	N	N	-
3P	110×40 d=4,4	696	0° - 1	14,8	1116	735	943	735	0,67
			0° - 2	-	1029				
			0° - 3	15,3	1126				
			22,5° - 1	14,6	851	283	283	291	0,33
			22,5° - 2	14,8	843				
			22,5° - 3	15,2	871				
			45° - 1	14,6	436	143	143	153	0,33
			45° - 2	15,2	418				
			45° - 3	14,7	431				
			67,5° - 1	14,3	258	116	116	158	0,44
			67,5° - 2	14,5	251				
			67,5° - 3	15,3	291				
			90° - 1	13,8	210	133	133	221	0,59
			90° - 2	13,8	216				
			90° - 3	14,9	253				
7P	260×40 d=10,0	749	0° - 1	81,5	2001	1483	1824	1483	0,72
			0° - 2	83,1	2126				
			22,5° - 1	80,8	1620	646	671	646	0,39
			22,5° - 2	84,2	1735				
			45° - 1	83,3	964	387	387	400	0,40
			45° - 2	84,2	976				
			67,5° - 1	81,7	1092	519	519	612	0,47
			67,5° - 2	82,3	1129				
			90° - 1	82,9	1305	970	1100	1833	0,78
			90° - 2	82,7	1191				
11P	400×40 d=15,7	764	0° - 1	196,9	2861	2135	2616	2135	0,72
			0° - 2	199,3	3066				
			22,5° - 1	195,6	2250	973	1019	973	0,44
			22,5° - 2	197,0	2189				
			45° - 1	198,6	1470	608	608	622	0,42
			45° - 2	200,3	1453				
			67,5° - 1	196,8	1936	869	869	996	0,46
			67,5° - 2	199,7	1852				
			90° - 1	193,7	2017	1622	2104	3510	0,81
			90° - 2	190,6	1968				

Preglednica 9b: Primerjava upogibne trdnosti izmerjene v eksperimentalnem preizkusu in upogibne trdnosti izračunane v numerični analizi (z metodo končnih elementov). Za vzorce iz plošč 7K in 11K.

oznaka plošče	dimenzija vzorca	gostota plošče	vzorec	masa vzorca	F_{max}^e	F_{max}^n	F_{max}^{ns} spodnji sloj	F_{max}^{nz} zgornji sloj	F_{max}^n/F_{max}^e
	mm	kg/m ³		g	N	N	N	N	-
7K	260×40 d=10,0	740	0° - 1	80,7	2093	1244	1673	1244	0,60
			0° - 2	81,4	2020				
			22,5° - 1	84,0	1809	837	837	857	0,48
			22,5° - 2	82,0	1644				
			45° - 1	83,6	1216	491	491	561	0,41
			45° - 2	82,2	1178				
			67,5° - 1	81,3	768	364	364	497	0,47
			67,5° - 2	82,0	796				
			90° - 1	79,9	842	442	442	708	0,52
			90° - 2	84,4	871				
			-22,5° - 1	82,1	2055	989	1149	989	0,49
			-22,5° - 2	82,1	1958				
			-45° - 1	81,8	1498	837	837	905	0,55
			-45° - 2	82,5	1550				
			-67,5° - 1	80,2	1019	666	666	963	0,65
			-67,5° - 2	82,2	1021				
11K	400×40 d=15,5	747	0° - 1	192,5	3003	1863	2546	1863	0,61
			0° - 2	193,8	3121				
			22,5° - 1	189,4	-	1450	1493	1450	0,66
			22,5° - 2	189,2	2184				
			45° - 1	191,6	1557	916	916	1054	0,57
			45° - 2	190,1	1634				
			67,5° - 1	188,1	1209	670	670	938	0,55
			67,5° - 2	188,9	1235				
			-22,5° - 1	190,8	2672	1692	1934	1692	0,64
			-22,5° - 2	194,6	2656				
			-45° - 1	193,0	2007	1319	1319	1478	0,67
			-45° - 2	189,7	1923				
			-67,5° - 1	193,4	1363	912	943	1370	0,67
			-67,5° - 2	191,8	1350				
			90° - 1	191,2	1188	697	697	1145	0,58
			90° - 2	191,0	1212				

F_{max}^e - maksimalna obremenitev pridobljena z eksperimentalnim (e) (mehanskim) preizkusom.

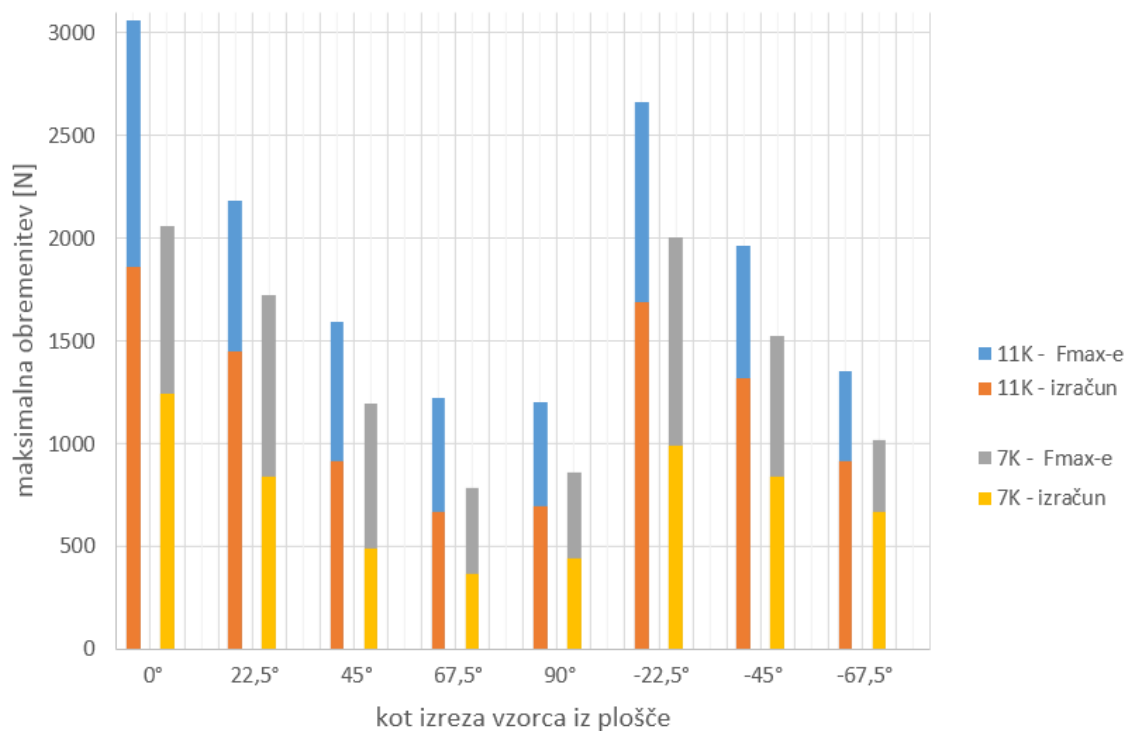
F_{max}^n - maksimalna obremenitev modela vzorca, pridobljena z numerično (n) analizo (metoda končnih elementov).

F_{max}^n/F_{max}^e - razmerje med maksimalno obremenitvijo pridobljeno z mehanskim preizkusom in maksimalno obremenitvijo pridobljeno z numerično analizo.

F_{max}^{ns} - maksimalna obremenitev spodnjega (s) sloja vzorca furnirne plošče (numerična analiza).

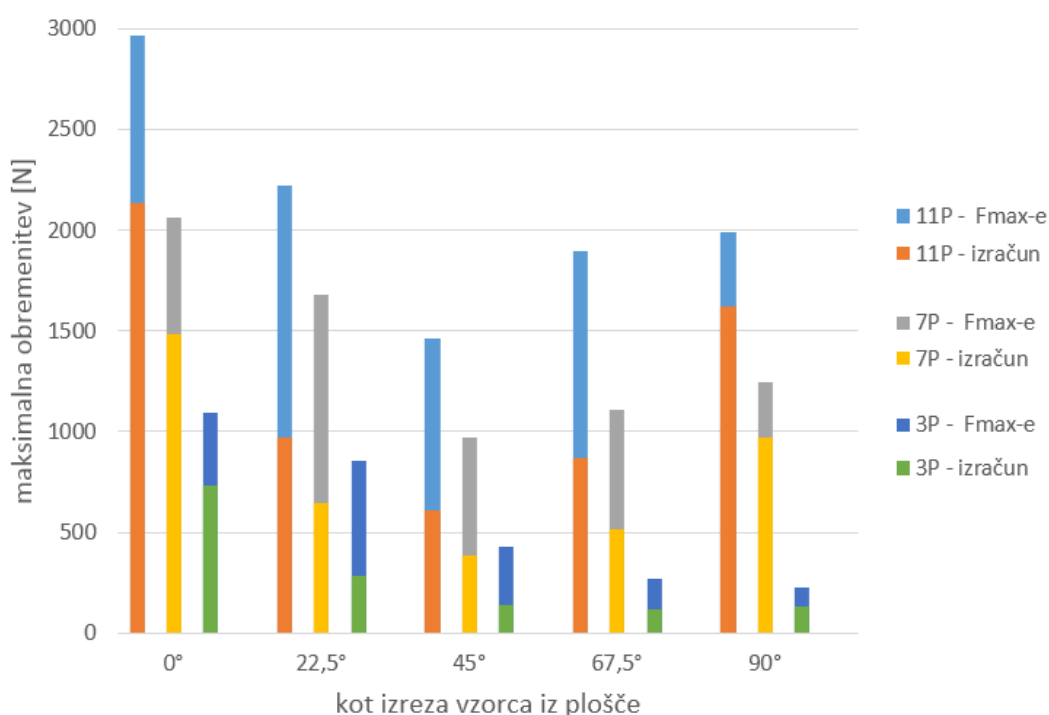
F_{max}^{nz} - maksimalna obremenitev zgornjega (z) sloja vzorca furnirne plošče (numerična analiza).

Na sliki 29 je v grafu prikazan delež v numerični metodi (FEM simulacija) izračunane maksimalne sile pred porušitvijo, v stolpcu s štiri točkovnim upogibnim testom izmerjeno porušno silo. Graf prikazuje vzorce iz plošč 11K in 7K. Prikazano je za različne kote izreza vzorcev iz izdelanih plošč oz. z različno longitudinalno usmeritvijo vlaken prvega sloja furnirja glede na vzdolžno os vzorca. Iz grafa se vidi, da je delež v numerični metodi izračunane maksimalne sile v povprečju približno polovica v mehanskem preizkusu izmerjene porušne sile.



Slika 29: Graf prikazuje delež izračunane maksimalne sile, v stolpcu izmerjene (Fmax-e) porušne sile. Graf prikazuje vzorce iz plošč 11K in 7K.

Na sliki 30 je v grafu prikazan delež v numerični metodi (FEM simulacija) izračunane maksimalne sile pred porušitvijo, v stolpcu s štiri točkovnim upogibnim testom izmerjeno porušno silo. Graf prikazuje vzorce iz plošč 11P, 7P in 3P. Prikazano je za različne kote izreza vzorcev iz izdelanih plošč oz. z različno longitudinalno usmeritvijo vlaken prvega sloja furnirja glede na vzdolžno os vzorca. Iz grafa se vidi, da je delež v numerični metodi izračunane maksimalne sile v povprečju približno polovica v mehanskem preizkusu izmerjene porušne sile. Kot izreza vzorcev iz plošč ima velik vpliv na porušno trdnost, vendar je delež izračunane maksimalne sile dokaj konstanten neglede na kot izreza vzorcev.



Slika 30: Graf prikazuje delež izračunane maksimalne sile, v stolpcu izmerjene porušne sile. Graf prikazuje vzorce iz plošč 11P, 7P in 3P.

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

Maksimalna obremenitev (F_{max}^e), pridobljena z mehanskim preizkusom, je referenca za primerjavo vrednosti maksimalne obremenitve izračunane z računalniško simulacijo (numerično analizo). Po zakonih iz elastomehanike nastane pri upogibni obremenitvi največja napetost na izbočenem zunanjem sloju (natezna) in na vbočenem (tlačna) zunanjem sloju obremenjenega telesa. Obe napetosti sta po velikosti enaki, vendar z drugačnim predznakom (+ natezna, - tlačna). Ker je natezna trdnost uporabljenega lesa (furnirja) bukve v longitudinalni smeri približno za tretjino večja kot tlačna, bi morala porušitev najprej nastopiti na tlačni strani obremenjenega telesa. To je ponavadi res v primeru svežega (vlažnega) lesa. V primeru posušenega lesa pa do prve vidne porušitve ponavadi pride na natezni strani. Na manjšem območju pride do pretrganja vlaken. Pred tem se vlakna na tlačni strani tlačno porušijo na bolj širokem območju, vendar porušitev ni vidna. V mehanskem upogibnem preizkusu smo opazili porušitev na natezni strani kot pretrganje vlaken. V numerični analizi pa rezultat sovпада s teorijo, torej do porušitve pride na tlačni strani in zato je rezultat (F_{max}^n) enak izračunani maksimalni obremenitvi v zgornjem sloju (F_{max}^{nz}), trdnost spodnjega sloja (F_{max}^{ns}) pa je večja. To velja v primeru vzorcev z usmeritvijo zunanjih slojev 0° . V primeru vzorcev z usmeritvijo zunanjih slojev 90° pa do porušitve (v numerični analizi) pride na spodnjem (nateznem) sloju, ker je v tangencialni smeri tlačna trdnost uporabljenega lesa (obratno kot v longitudinalni smeri) za dve tretjini večja kot natezna. V nekaterih primerih pa pride do analitično izračunane porušitve v drugem sloju analiziranega elementa in ne v zunanjem zgornjem ali spodnjem.

Namen te naloge je primerjava eksperimentalno določene maksimalne obremenitve (mehanski preizkus) z izračunano (računalniška simulacija) maksimalno obremenitvijo. V povprečju je z numerično metodo izračunana maksimalna obremenitev 55% maksimalne obremenitve izmerjene z mehanskim preizkusom (F_{max}^n/F_{max}^e). Razlog lahko pripišemo načinu loma kompozita, kjer kot smo že napisali, pride najprej do tlačnih porušitev tkiva na zgornji strani vzorca nato pa še porušitev na nateg na spodnji strani vzorca. Izračun faktorja varnosti pa temelji na prvi porušitvi tkiva, kar sovпада z našo tlačno porušitvijo vzorca na gornji strani. Navkljub tlačni porušitvi tkiva na gornji strani vzorca, pa se je pri upogibnem testu deformacija in sila še vedno povečevala, vse dokler ni prišlo do porušitve na spodnji strani vzorca. Večje ujemanje eksperimentalnih meritev z izračunom bi tako dobili, če bi upoštevali maksimalno silo na spodnji natezni strani vzorca.

Ujemanje rezultatov simulacije z eksperimentalnimi bi lahko bistveno izboljšali tudi z upoštevanjem nelinearnosti mehanskih lastnosti materiala, kjer pa bi morali za vsako lastnost materiala poznati krivuljo napetosti in deformacije.

Drugi razlog pa je tudi ta, da je imel furnir variabilne mehanske lastnosti po preseku, kar se je lepo videlo na nateznem preizkusu. Tu se je vzorec v določenih primerih lokalno porušil že pred maksimalno obremenitvijo, kar pomeni, da je bil presek vzorca zmanjšan zaradi predhodnih delnih lokalnih porušitev. Ker pa smo v izračunu za natezno trdnost upoštevali začetni presek vzorca, dejansko pa je bil manjši, so bile tudi dejanske natezne trdnosti večje od izračunanih kar zopet govori v prid večjim izmerjenim vrednostim od teoretično izračunanih.

Dodatni razlog odstopanja izmerjenih in izračunanih vrednosti je tudi verjetno pomanjkanje celotnih dejanskih lastnosti materiala. Določene mehanske lastnosti smo izmerili, preostale pa vzeli iz literature za masivno bukovino. Ker pa je lahko že pri masivi odstopanje lastnosti od povprečne vrednosti zelo veliko, je to odstopanje pri furnirju zaradi tehnologije izdelave furnirja še toliko večje.

Za izračun smo v simulaciji uporabili Tsai-Wu kriterij porušitve. Rezultati izračuna s pomočjo drugih kriterijev (Tsai-Hill, max. stress criterion) se od Tsai-Wu rezultatov razlikujejo približno za 10%.

5.2 SKLEPI

Rezultati računalniške simulacije so v povprečju 55% vrednosti dobljenih z mehanskim preizkusom. Največji odstotek izračunane maksimalne obremenitve je bil 81% vrednosti dobljene z mehanskim preizkusom. Ker v računalniški simulaciji izračunana maksimalna obremenitev ni nikoli presegla vrednosti iz mehanskega testa, lahko ugotovimo, da je računalniška simulacija varna in primerna metoda za uporabo v konstruiranju s kompozitnim lesom. Vendar bi se lahko, zaradi usmerjenosti v čimvečji izkoristek materiala in optimizacijo konstrukcij, program za računalniško simulacijo še bolj optimiziral z uporabo ustrežnejših porušitvenih kriterijev. Pomembna pa je tudi natančnejša določitev vrednosti mehanskih lastnosti materiala, ki se jih uporabi v računalniški simulaciji.

6 POVZETEK

V diplomski nalogi je obravnavano področje numerične analize ploščnega kompozitnega elementa. Narejena je bila primerjava med rezultati mehanskega preizkusa upogibne trdnosti vzorcev kompozitnega lesa z rezultati računalniške simulacije upogibne trdnosti enakih vzorcev. Primerjava je bila narejena za ugotovitev primernosti CAE orodja za uporabo v konstruiranju s kompozitnim lesom.

Kot kompozitni element je bil vzet vezan les iz slojev bukovega furnirja debeline 1,5 mm. Narejene so bile tri debeline vezanih plošč: 3, 7 in 11 slojna. Za ugotovitev vpliva smeri posameznih slojev na rezultat analize smo posamezne sloje v vezanih ploščah zložili pod različnimi koti. Za referenco numerični analizi smo vzorce iz vezanih plošč testirali z upogibnim testom in kot rezultat dobili maksimalno silo obremenitve pred porušitvijo. Numerično analizo smo izvedli s programom Solidworks Simulation z metodo končnih elementov (FEM). Vzorce v simulaciji smo modelirali kot linearno elastičen ortotropen element z različno usmerjenimi posameznimi sloji modela (composite shell).

Rezultate iz numerične analize smo primerjali z rezultati eksperimentalnega testiranja s štiritočkovnim upogibnim testom. V povprečju je bil rezultat numerične analize 55% rezultata eksperimentalnega preizkusa. Glede na vzorce z različno usmerjenimi sloji furnirja in številom slojev ni bilo velikega odstopanja od tega rezultata. Za boljše ujemanje rezultata numerične analize z eksperimentalnimi preizkusi bi bilo potrebno izvesti nelinearno analizo in bolj natančno ugotoviti vrednosti mehanskih lastnosti materiala.

7 VIRI IN LITERATURA

7.1 PISNI VIRI

- Ansell M. P. 2015. Wood Composites. Woodhead Publishing: 444 str.
- Aicher S., Klöck W. 2001. Linear versus quadratic failure criteria for inplane loaded wood based panels. Otto-Graf-Journal, vol. 12: 187-200
- Cabrero J. M., Gebremedhin K. G. 2010. Evaluation of failure criteria in wood members. World Conference in Timber Engineering 2010 (WCTE 2010). 20.-24. junij 2010. Riva del Garda (Italija)
- EN 310. Wood based panels - Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. 1993: 7 str.
- EN 408. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. 2003: 31 str.
- EN 789. Timber structures - Test methods - Determination of mechanical properties of wood based panels. 2004: 32 str.
- Fun T. S., Jumaat M. Z. 2013. Comparison of Eurocodes EN310 and EN789 in determining the bending strength and modulus of elasticity of Red Seraya plywood panel. World Academy of Science, Engineering and Technology, International journal of civil, environmental, structural, construction and architectural engineering, vol. 6, 2: 159-163
- Knorz M., Kuilen J. W. van de 2012. Development of a high-capacity engineered wood product - lvl made of european beech (*Fagus sylvatica* L.). 12th World Conference on Timber Engineering. Auckland, New Zealand, 16.-19. 2012. Pierre Quenneville: 487-495
- Kretschmann D. E. 2010. Woodhandbook, Chapter 5, Mechanical properties of wood. Forest Products Laboratory: 508 str.
- Oñate E. 2013. Structural Analysis with the Finite Element Method: Linear Statics: Volume 2: Beams, Plates and Shells. 1. izdaja. Barcelona, Springer-Verlag: 864 str.
- Record S. J. 1914. The mechanical properties of wood. New York, J. Wiley & sons, inc.: 191 str.
- Šernek M. 2008. Konstrukcijski kompozitni les - Structural composite timber. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Thoemen H., Irle M., Šernek M. 2010. Wood-based panels, an introduction for specialists.
Brunel University Press: 283 str.

Torelli N. 2002. Ortotropna elastičnost lesa - Orthotropic elasticity of wood. Revija Les:
54, 11: 364-369

Wagenfür R. 2007. Holzatlas, mit zahlreichen Abbildungen. 6. izdaja. Leipzig,
Fachbuchverlag: 816 str.

Wang A. S. D. 1999. Micromechanics analysis of composite materials. Micromechanics of
composite materials and structures. 361: 81-130

7.2 ELEKTRONSKI VIRI

CAD/CAM/CAE tehnologija

http://cadcam.spts.si/?page_id=51

Cauchy stress tenzor

https://en.wikipedia.org/wiki/Cauchy_stress_tensor

e-Katalog SIST

<http://members.sist.si/norm/default.aspx>

Natezni preizkus

https://sl.wikipedia.org/wiki/Natezni_preizkus

Solidworks Help

http://help.solidworks.com/2016/English/SolidWorks/sldworks/c_introduction_toplevel_topic.htm

Solidworks Tech Blog

<http://blogs.solidworks.com/tech/2015/03/shells-in-solidworks-simulation-2015-part-2-alignment-and-offset.html>

Standardizacija v Evropi

http://europa.eu/youreurope/business/product/standardisation-in-europe/index_sl.htm

ZAHVALA

Mentorju, doc. dr. Miranu Merharju, bi se iskreno zahvalil za vso pomoč, zasnovo in strokovno znanje za izvedbo te diplomske naloge. Najlepša hvala za vse nasvete pri pisanju in oblikovanju.

Viš. pred. mag. Bogdanu Šegi bi se rad zahvalil za pomoč pri izvedbi lepljenja furnirnih plošč in strokovne nasvete.

Najlepša hvala tudi recenzentu, prof. dr. Milanu Šerneku za recenzijo diplomske naloge in vse opombe.

Rad bi se tudi zahvalil doc. dr. Dominiki Gornik Bučar za vse nasvete glede pisanja diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi vsem ostalim zaposlenim na Oddelku za lesarstvo.

Zahvaljujem se tudi podjetju Melamin Kočevje za donacijo lepila za izvedbo eksperimentalnega dela diplomske naloge in podjetju Lesma iz Pivke za dobavo furnirja po naročilu.

Velika zahvala gre tudi staršem in sestri, ki so mi bili v času študija v veliko oporo ter me podpirali in bodrili v času nastajanja diplomske naloge.

Na koncu pa bi se rad zahvalil še vsem ostalim, ki so mi v času študija in izdelave diplomske naloge tako ali drugače pomagali.