

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Gregor SMONKAR

**VPLIV TOPLOTNE OBDELAVE NA MEHANSKE
LASTNOSTI JELOVINE**

DIPLOMSKI PROJEKT

Univerzitetni študij - 1. stopnja

Ljubljana, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Gregor Smonkar

**VPLIV TOPLOTNE OBDELAVE NA MEHANSKE LASTNOSTI
JELOVINE**

DIPLOMSKI PROJEKT
Univerzitetni študij - 1. stopnja

**INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON MECHANICAL
PROPERTIES OF FIR**

B. SC. THESIS
Academic Study Programmes

Ljubljana, 2016

Diplomski projekt je zaključek Univerzitetnega študija Lesarstva – 1. stopnja. Delo je bilo opravljeno na Katedri za tehnologijo lesa.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval doc. dr. Aleša Stražeta, za somentorja prof. dr. Gorazda Fajdiga in za recenzenta prof. dr. Željka Goriška.

Mentor: doc. dr. Aleš Straže

Somentor: prof. dr. Gorazd Fajdiga

Recenzent: prof. dr. Željko Gorišek.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomski projekt je rezultat lastnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svojega diplomskega projekta na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je projekt, ki sem ga oddal v elektronski obliki, identičen tiskani verziji.

Gregor Smonkar

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Du1

DK UDK 630*812.7:630*847

KG toplotna obdelava lesa/mehanske lastnosti/jelovina/modul elastičnosti

AV SMONKAR, Gregor

SA STRAŽE, Aleš (mentor) / FAJDIGA, Gorazd (somentor) / GORIŠEK Željko (recenzent)

KZ SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c.VIII/34

ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

LI 2016

IN VPLIV TOPLOTNE OBDELAVE NA MEHANSKE LASTNOSTI JELOVINE

TD Diplomski projekt (Univerzitetni študij - 1. stopnja)

OP VIII, 33 str., 5 pregl., 26 sl., 21 vir.

IJ sl

JJ sl/en

AI Raziskali smo vpliv toplotne obdelave na mehanske lastnosti jelovine. Vizualno smo izbrali 45 jelovih žaganic, nominalnih dimenzij 4000 x 120 x 45 mm, ter jih razvrstili po gostoti v 9 razredov. Žaganice smo nato toplotno obdelali v industrijskem vakuumskem postopku v podjetju Silvaprodukt pri štirih različnih končnih temperaturah toplotne obdelave (170 °C, 190 °C, 210 °C, 230 °C), po en preizkušanec iz vsakega razreda pa smo pustili za kontrolo. Mehanske lastnosti smo proučili neporušno, z metodo frekvenčnega odziva pri prečnem in vzdolžnem vzbujanju, ter z merjenjem hitrosti ultrazvoka. Z metodo končnih elementov je bil izdelan tudi numerični model odziva preizkušancev na zunanjo mehansko motnjo. Izguba mase preizkušancev je eksponentno naraščala z višanjem temperature toplotne obdelave. Modul elastičnosti se je najbolj spremenil v vzdolžni smeri lesa; pri višanju intenzivnosti toplotne obdelave je sprva naraščal, pri najvišji temperaturi pa zopet padel. Značilnega trenda spremembe togosti v prečni smeri lesa zaradi velike variabilnosti nismo potrdili. Frekvenčni odziv pri prečnem vzbujanju preizkušancev je potrdil nižanje modula elastičnosti z višanjem nihajnega načina. Z večanjem razlik med togostjo v posameznem nihajnem načinu smo pri toplotno obdelani jelovini potrdili večjo strukturno nehomogenost. Numerični model mehanskega odziva preizkušancev je pokazal primerljive rezultate realnemu odzivu preizkušancev.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Du1

DC UDC 630*812.7:630*847

CX heat treatment/mechanical properties/fir (*Abies alba* Mill.)/modul of elasticity

AU SMONKAR, Gregor

AA STRAŽE, Aleš (supervisor) / FAJDIGA, Gorazd (co-advisor) / GORIŠEK Željko (reviewer)

PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c.VIII/34

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology

PY 2016

TY INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF FIR

DT B. Sc. Thesis (Academic Study Programmes)

NO VIII, 33 p., 5 tab., 26 fig., 21 ref.

LA sl

Al sl/en

AB The effect of heat treatment on the mechanical properties of fir (*Abies alba* Mill) was researched. We selected visually 45 fir boards – samples, nominal dimensions 4000 x 120 x 45 mm, and ranked them by density in 9 classes. Samples were then heat treated in an industrial vacuum process in company Silvaproduct, with four different end temperatures (170 °C, 190 °C, 210 °C, 230 °C), a specimen from each class was left untreated as a control. The mechanical properties were studied with non – destructive methods, with a frequency response method in transverse and longitudinal direction, and by measuring the speed of ultrasound. With finite element method we made a numerical model of the response to an external mechanical disturbance. The loss of mass of the samples was increasing exponentially with increasing thermal treatment temperature. Modulus of elasticity changed the most in longitudinal direction. With increasing temperature of heat treatment the modulus of elasticity initially grew, but then at the highest temperatures dropped again. Significant trend changes of stiffness in the transverse direction of timber, was due to the high variability not confirmed. Frequency response by transverse vibrations confirmed lowering modulus of elasticity with increasing vibration modes. With increasing difference between the stiffness in each vibration mode we confirmed major structural inhomogeneity in the heat treated fir. The numerical model of the mechanical response showed comparable results to the response of real specimens.

KAZALO VSEBINE

	Str.
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO SLIK.....	VII
KAZALO PREGLEDNIC.....	VIII
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 DELOVNE HIPOTEZE	1
1.3 CILJI NALOGE:	1
2 PREGLED LITERATURE	2
2.1 LES, NJEGOVA TOGOST IN TRDNOST	2
2.2 TOPLOTNA OBDELAVA.....	4
2.2.1 Vpliv toplotne obdelave na trdnost in togost lesa.....	4
2.3 NEDESTRUKTIVNO DOLOČANJE MEHANSKIH LASTNOSTI	6
2.3.1 Ultrazvočna metoda	6
2.3.2 Vz dolžno elastično vzbujanje	7
2.3.3 Prečno elastično vzbujanje	8
2.4 NUMERIČNO MODELIRANJE.....	10
3 MATERIALI IN METODE	13
3.1 MATERIALI.....	13
3.1.1 Izbira preizkušancev	13
3.1.2 Meritve preizkušancev	13
3.2 METODE	14
3.2.1 Določanje modula elastičnosti z ultrazvokom.....	14
3.2.2 Določanje modula elastičnosti z vzdolžnim vzbujanjem.....	15
3.2.3 Določanje modula elastičnosti s prečnim vzbujanjem	17
3.2.4 Izdelava numeričnega modela	19
4 REZULTATI IN RAZPRAVA.....	21

4.1	FIZIKALNE IN MEHANSKE LASTNOSTI JELOVINE	21
4.2	POVEZANOST MERITEV ULTRAZVOČNEGA MODULA ELASTIČNOSTI Z MERITVAMI FREKVENČNEGA ODZIVA	23
4.2.1	Frekvenčni odziv v vzdolžni smeri.....	23
4.2.2	Frekvenčni odziv v prečni smeri	24
4.2.3	Strižni modul.....	25
4.2.4	Analiza strukturne nehomogenosti z določanjem modula elastičnosti v višjih modalnih načinih	26
4.3	PRIMERJAVA FREKVENČNIH ODZIVOV REALNIH PREIZKUŠANCEV Z NUMERIČNIM MODELOM	28
5	SKLEPI	30
6	VIRI	31

KAZALO SLIK

Slika 1:	Napetostna deformacijska krivulja; σ_{prop} – meja proporcionalnosti, σ_{zr} – zrušitvena napetost, W – delo do meje proporcionalnosti (Gorišek, 2009).....	2
Slika 2:	Vpliv temperature toplotne obdelave na barvo lesa (Humar, 2010).....	5
Slika 3:	Vpliv temperature toplotne obdelave na upogibno trdnost (ThermoWood Handbook, 2003).	5
Slika 4:	Shema delovanja ultrazvočnega merilca.	7
Slika 5:	Vzdolžno elastično vzbujanje (Straže, 2015).	8
Slika 6:	Oblike nihanja (Straže, 2015).	8
Slika 7:	Nihajni načini z vozli in hrbti.	9
Slika 8:	Prečno elastično vzbujanje (Straže, 2015).....	9
Slika 9:	Zvočni signal v časovnem (levo) in frekvenčnem (desno) območju.	10
Slika 10:	Princip metode končnih elementov (Ren in Ulbin, 2002).	11
Slika 11:	Potek numerične analize(Ren in Ulbin, 2002).....	12
Slika 12:	Naprava za merjenje ultrazvoka z oddajnikom in sprejemnikom.	14
Slika 13:	Elastične podpore z napeto najlonsko vrvico.	15
Slika 14:	Shema vzbujanja in zajemanja signala vzdolžnega nihanja preizkušanca.	15
Slika 15:	Postavitev mikrofona pri longitudinalnem vzbujanju.....	16
Slika 16:	Postavitev kondenzatorskega mikrofona pri merjenju prečnega nihanja.	17
Slika 17:	Izračun parametrov Y_n in X_n po Bordonne-jevi rešitvi (levo) in odvisnost modula elastičnosti od nihanjega načina (desno).	18
Slika 18:	Geometrijski model (zgoraj), numerični model (spodaj).	20
Slika 19:	Izguba mase v postopku toplotne obdelave lesa, povprečna izguba (levo) ter matematični model izgube mase (desno).....	22
Slika 20:	Specifični modul elastičnosti v longitudinalni, radialni in tangencialni smeri.	22
Slika 21:	Korelacija med E-modulom izmerjenim z metodo vzdolžnega vzbujanja in ultrazvokom.	23
Slika 22:	Module elastičnosti po Timoshenku glede na postopek toplotne obdelave.	24
Slika 23:	Strižni modul G_{LR} po postopkih toplotne obdelave.	25
Slika 24:	Sprememba modula elastičnosti z višanjem modalnega načina po postopkih toplotne obdelave.....	26
Slika 25:	Sprememba modula elastičnosti pri vzdolžnem vzbujanju pri različnih postopkih termične obdelave.	27
Slika 26:	Modalna analiza - prvih pet nihajnih načinov.	28

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Karakteristične vrednosti elastičnih in strižnih modulov (Keunecke, 2011).	3
Preglednica 2: Razmerja elastičnih in strižnih modulov (Keunecke, 2011).....	3
Preglednica 3: Splošne vrednosti elastičnega in strižnega modula ter Poissonova razmerja jelke (Bucur, 2006).	4
Preglednica 4: Spremembe fizikalnih in mehanskih lastnosti.	21
Preglednica 5: Primerjava frekvenc realnih preizkušancev z numeričnim modelom v prvih petih nihajnih načinih.	29

1 UVOD

Les spada med naravne biološke in obnovljive materiale. Energijske zahteve so v postopkih predelave in obdelave lesa mnogo manjše kot pri uporabi drugih materialov. Les ima zelo ugodno razmerje med trdnostjo in gostoto, zato se uporablja tudi v konstrukcijske namene. V takšnih primerih pa so zaradi varnosti zelo pomembne njegove mehanske lastnosti. S toplotno obdelavo lesa lahko izboljšamo njegovo odpornost proti naravnim škodljivcem in s tem podaljšamo življenjsko dobo. Vendar pa s tem vplivamo tudi na homogenost strukture lesa in posledično na mehanski odziv.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Toplotna obdelava s kemijsko in strukturno razgradnjo osnovnih lesnih komponent značilno vpliva na mehanske lastnosti lesa, zlasti na trdnost in togost. Vpliv stopnje toplotne obdelave na mehanske lastnosti lesa je slabo raziskan, še posebej v primeru rabe lesa v konstrukcijske namene. Povezanost togosti in trdnost toplotno obdelanega lesa ni preverjena, prav tako so slabo raziskane možnosti nedestruktivnega testiranja in razvrščanje toplotno obdelanega lesa po trdnosti. Neznano je tudi učinek toplotne obdelave na homogenost strukture lesa in posledično na njegov mehanski odziv.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Predpostavljamo da stopnja toplotne obdelave spreminja povezavo med trdnostjo in togostjo lesa. Višanje končne temperature toplotne obdelave lesa negativno vpliva na strukturno homogenost lesa in posledično na mehanske lastnosti lesa. Primerjava rezultatov numeričnega modela z rezultati realnih preizkušancev iz toplotno obdelanega lesa omogoča vrednotenje strukturne nehomogenosti in posredno pojasnjuje njegove trdnostne lastnosti. Domnevamo tudi, da je z nedestruktivnimi metodami mogoče toplotno obdelan les razvrščati po trdnosti.

1.3 CILJI NALOGE:

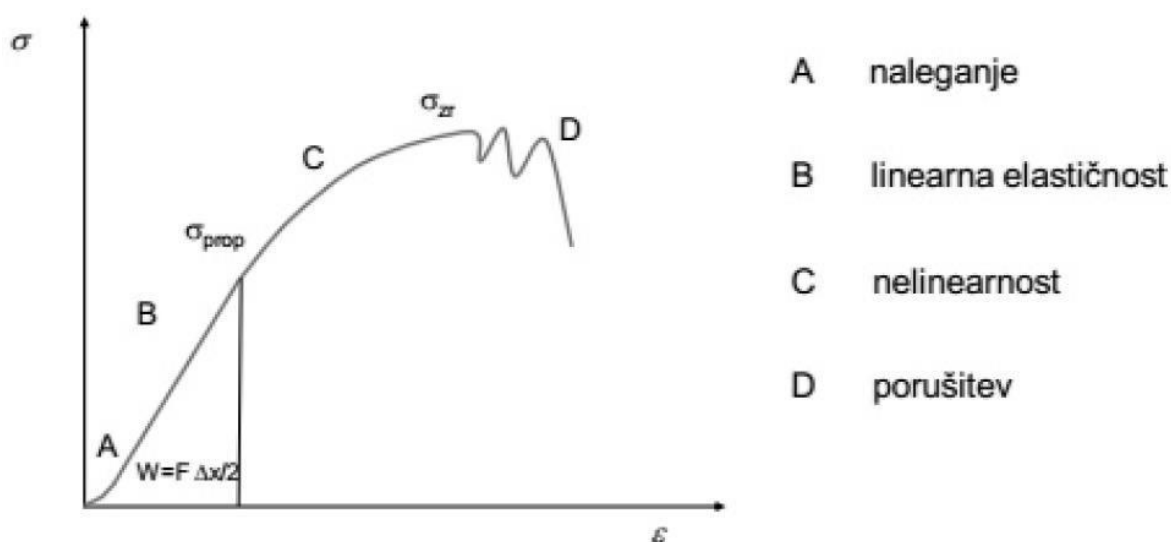
Raziskali bomo mehanske lastnosti jelovega konstrukcijskega lesa, večjega gostotnega razpona, ki ga bomo toplotno obdelali v industrijskem vakuumskem postopku. Mehanske lastnosti lesa, pred in po toplotni obdelavi, bomo preučevali neporušno. Izdelan bo numerični model za simulacijo izbranega mehanskega preskusa. Narejena bo primerjava in ovrednotenje rezultatov mehanskih preskusov in numeričnih simulacij.

2 PREGLED LITERATURE

2.1 LES, NJEGOVA TOGOST IN TRDNOST

Les je eden izmed prvih materialov, ki jih je človek v preteklosti uporabljal v konstrukcijske namene. Les ima tudi danes kot konstrukcijski material številne prednosti pred drugimi inženirskimi gradivi. Poleg ugodnega razmerja med trdnostjo in gostoto je les naraven in okolju prijazen material, za njegovo predelavo pa je potrebno zelo malo energije, nekatere neugodne lastnosti pa lahko izboljšamo z različnimi toplotnimi, kemičnimi in mehanskimi postopki.

Uporaba lesa je, zaradi njegovih številnih prednosti, v konstrukcijske namene velika. Les je namreč lahko obremenjen z natezno, tlačno, strižno, upogibno, torzijsko obremenitvijo ali pa s kombinacijo le teh. Glede na časovno spremenljivost pa so lahko obremenitve statične oziroma dinamične. Zelo pomembno je, da je pri uporabi lesa v konstrukcijah poskrbljeno za varnost. Obremenitve, ki nastajajo med uporabo, ne smejo povzročiti porušnih deformacij, te se morajo gibati v elastičnem območju. Manjši kot ima material modul elastičnosti, bolj je prožen oz. elastičen. Z večanjem modula elastičnosti pa se večja togost materiala. Modul elastičnosti izkazuje hipotetično napetost, pri kateri bi se material podaljšal za svojo osnovno dolžino (Gorišek, 2012). V napetostnem deformacijskem diagramu je modul elastičnosti definiran z naklonom napetostno – deformacijske krivulje v linearnem – elastičnem območju. Z večanjem deformacije se nad linearnim območjem začne nelinearno območje oz. območje plastične deformacije, kjer deformacije postanejo ireverzibilne. Mejo med elastičnim in plastičnim območjem imenujemo meja proporcionalnosti (slika 1). Največja možna obremenitev, ki jo material še premore, je porušna napetost. V tem trenutku se začne porušitev, ki je pri nekaterih materialih zelo hitra, pri drugih pa nastopi do končnega porušanja še več delnih porušitev (Gorišek, 2009)



Slika 1: Napetostna deformacijska krivulja; σ_{prop} – meja proporcionalnosti, σ_{zr} – zrušitvena napetost, W – delo do meje proporcionalnosti (Gorišek, 2009).

Na elastične lastnosti lesa in njegovo togost vpliva veliko dejavnikov. Eden izmed njih je gostota lesa. Z višanjem relativne gostote lesa se linearno povečuje modul elastičnosti, les postaja bolj tog. Seveda ni niti presenetljivo, da tudi prisotnost grč zmanjša togost lesa, vpliv pa je težko kvantitativno določiti, saj so parametri odvisni od njihovega števila, velikosti, oblike, stanja, lege in usmerjenosti (Gorišek, 2009).

Jelka (*Abies alba* Mill) ima svetel rumeno – bel les. Jedrovina je neobarvana in se barvno ne loči od beljave. Les jelke ne vsebuje smolnih kanalov. Srednja gostota jelovega lesa v absolutnem suhem stanju (r_0) znaša 410 kg/m^3 , gostota zračno suhega lesa (r_{15}) pa 450 kg/m^3 . Jelovino torej uvrščamo med lesne vrste s srednjo gostoto. Tlačna trdnost vzporedno z aksialnimi elementi znaša 40 MPa , upogibna trdnost vzporedno z aksialnimi elementi je v razponu od 62 do 68 MPa . Porušitvena trdnost za gradbeni les pa je od $2,5$ do $3,5$ – kratne dopustne obremenitve pri statičnem obremenjevanju. Jelovina se zmerno krči ima po sušenju dobro dimenzijsko stabilnost (Čufar, 2009).

Les jelke je bil skozi čas v Sloveniji zelo pomemben gradbeno konstrukcijski material, danes pa je, v primerjavi z smrekovino, manj priljubljen in posledično tudi manj uporabljen. Jelovina ima s smrekovino podobne tehnološke lastnosti, zato jo pogosto uporabljamo skupaj. Pri tem so prednosti jelovine, da se ne smoli, ter da je odporna proti kislinam in bazam. Jelovina ima relativno dobre mehanske lastnosti, spada med vrste s srednjo gostoto in se uporablja v številne namene.

V preglednici 1 so prikazane karakteristične vrednosti elastičnih in strižnih modulov izmerjene z ultrazvokom, v preglednici 2 najdemo razmerja elastičnih in strižnih modulov, v preglednici 3 pa so zapisana Poissonova razmerja v vseh anatomskih smereh.

Preglednica 1: Karakteristične vrednosti elastičnih in strižnih modulov (Keunecke, 2011).

		Gostota	Modul elastičnosti E			Strižni modul G		
		ρ (kg/m^3)	E_L (m s^{-1})	E_R (m s^{-1})	E_T (m s^{-1})	G_{LR} (m s^{-1})	G_{LT} (m s^{-1})	G_{RT} (m s^{-1})
Jelka	$\bar{x}$	429	18900	2340	1390	761	658	388
	KV (%)	8,2	7,5	4,4	13,1	10,5	8,5	8,7

Opomba: $\bar{x}$ = aritmetična sredina; KV = koeficient variacije; L, R, T = longitudinalno, radialno, tangencialno.

Preglednica 2: Razmerja elastičnih in strižnih modulov (Keunecke, 2011).

		Razmerja modulov elastičnosti E			Razmerja strižnih modulov G		
		E_L/E_R	E_L/E_T	E_R/E_T	G_{LR}/G_{LT}	G_{LR}/G_{RT}	G_{LT}/G_{RT}
Jelka		8,1	13,6	1,7	1,2	2	1,7

Preglednica 3: Splošne vrednosti elastičnega in strižnega modula ter Poissonova razmerja jelke (Bucur, 2006).

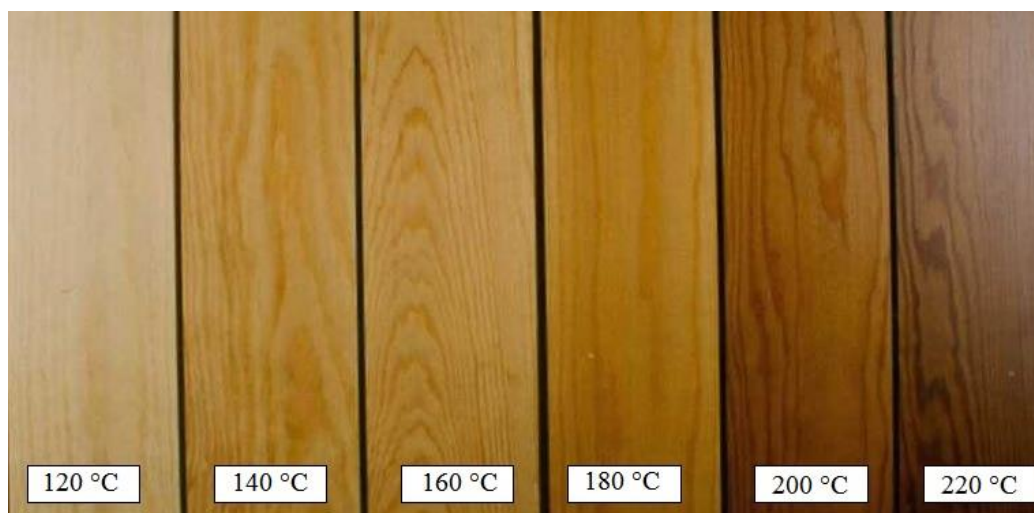
	Gostota	Modul elastičnosti			Strižni modul		
	(kg/m ³)	(10 ⁸ N/m ²)			(10 ⁸ N/m ²)		
	ρ	E_L	E_R	E_T	G_{RT}	G_{LT}	G_{LR}
Jelka	450	127	9,3	4,8	1,4	7,5	9,3
Poissonova razmerja							
	ν_{LR}	ν_{RL}	ν_{LT}	ν_{TL}	ν_{RT}	ν_{TR}	
Jelka	0,45	0,03	0,5	0,02	0,6	0,35	

2.2 TOPLOTNA OBDELAVA

Čeprav se lahko les uporablja za različne namene, zaradi njegovih številnih dobrih lastnosti (razmerje med trdnostjo in gostoto, estetski izgled, ipd.) ima še vedno nekaj pomankljivosti. Dimenzijske spremembe, ki nastanejo zaradi klimatskih sprememb, dovzetnosti za biološke okužbe in spremembe izgleda ob izpostavitvi vremenskim vplivom še vedno zmanjšujejo njegovo uporabo. Les jelovine je neodporen proti škodljivcem in je na petstopenjski lestvici uvrščen v 4 razred - neodporen les (SIST EN 350-2 1994). Toplotna obdelava lesa je že dolgo priznan postopek s katerim izboljšamo dimenzijsko stabilnost in povečamo odpornost razkroja lesa. Pri toplotni obdelavi les segrevamo v odsotnosti zraka pri temperaturi od 180 °C do 260 °C, pri temperaturah nižjih od 140 °C so spremembe materialnih lastnosti zelo majhne, pri višjih temperaturah pa prihaja do nesprejemljivih degradacij lesa (Hill, 2006).

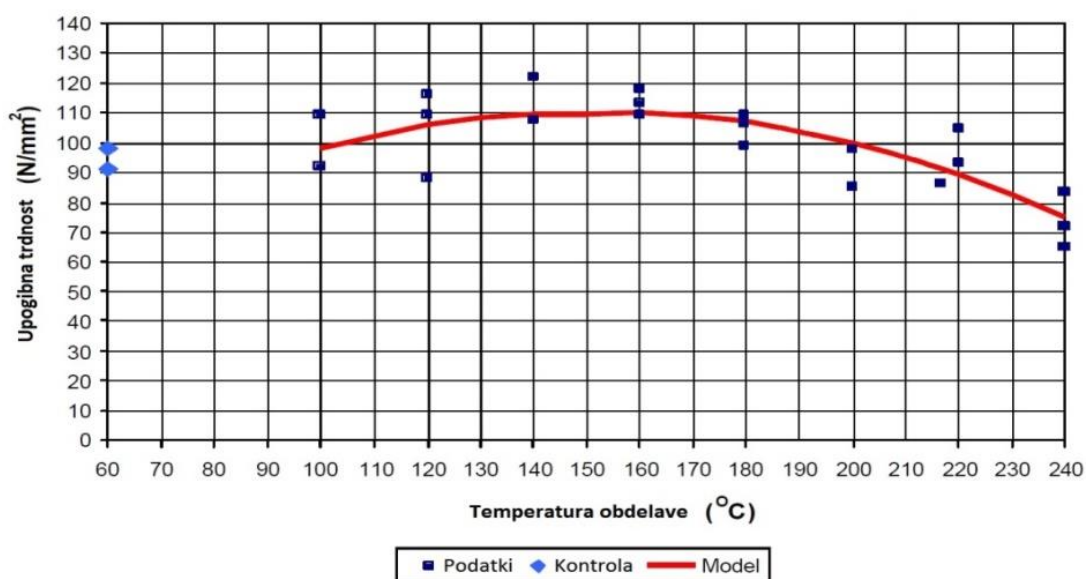
2.2.1 Vpliv toplotne obdelave na trdnost in togost lesa

Že od nekdaj je bilo poznano, da obžiganje površine lesa z ognjem izboljšuje odpornost lesa. Proučevanje vpliva toplotne obdelave lesa se je začelo že v 30. letih prejšnjega stoletja. Segrevanje lesa trajno spremeni številne kemijske in fizikalne lastnosti. Spremembo v glavnem povzroči toplotna degradacija hemiceluloz. Zelene spremembe se začnejo pojavljati že pri temperaturi okrog 150 °C in se nadaljujejo z višanjem temperature. Kot rezultat se krčenje in nabrekanje zaradi sušenja ali navlaževanja zmanjša, izboljša se biološka trajnost, les potemni (slika 2), številni ekstraktivi se izločijo, les postane lažji, ravnovesna vlažnost se zniža, zmanjša se pH, toplotnoizolacijske lastnosti se izboljšajo. Izločanje ekstraktivov bi lahko imelo tudi negativni efekt – zmanjšanje trajnosti.



Slika 2: Vpliv temperature toplotne obdelave na barvo lesa (Humar, 2010).

Spremenijo pa se tudi trdnostne lastnosti (slika 3) in togost. Vendar razpad hemiceluloznih verig ne poslabša trdnosti, kot pa bi jo razpad celuloznih verig. Namesto tega razpad hemiceluloznih verig izboljša stisljivost lesa in zmanjša številne napetosti v lesu (ThermoWood Handbook, 2003).



Slika 3: Vpliv temperature toplotne obdelave na upogibno trdnost (ThermoWood Handbook, 2003).

Toplotno obdelan les ima nižjo gostoto od neobdelanega lesa. To je predvsem zaradi spremembe mase med obdelavo, ko se les delno razgradi. Gostota se z višanjem temperature obdelave znižuje. Trdnost lesa je močno povezana z gostoto in se z nižanjem gostote zmanjšuje. Zato ima toplotno obdelan les nižjo trdnost, lahko pa razmerje med trdnostjo in gostoto ostane nespremenjeno. Trdnost lesa je zelo odvisna tudi od vlažnosti (ThermoWood Handbook, 2003).

Številne študije so pokazale manjše povečanje modula elastičnosti lesa pri kratkotrajni toplotni obdelavi. Modul elastičnosti pa se nato pri daljši toplotni obdelavi in pri višjih temperaturah začne manjšati. Togost obdelanega lesa ostane nespremenjena dokler izguba mase ne doseže 3%, nato pa se začne manjšati (Borrega in Kärenlampi, 2008). Modul elastičnosti pa se znatno zmanjša, ko izguba mase, zaradi toplotne obdelave, preseže 8 % (Rusche, 1973). Za razliko od modula elastičnosti, se strižni modul pri kratkotrajni toplotni obdelavi ne poveča, saj je strižni modul dejanska primerjalna napetost v vlaknih na mestu okvare in je kot taka povezana s končno upogibno trdnostjo lesa.

Poslabšanje mehanskih lastnosti, skupaj z izgubo mase, omejuje uporabo toplotno obdelanega lesa v konstrukcijske namene. Med toplotno obdelavo se lahko gostota zmanjša tudi do 15%, njegova upogibna trdnost pa do 25%. Zaradi tega je potrebna posebna previdnost pri uporabi toplotno obdelanega lesa za gradnjo konstrukcij kjer se pričakuje velike obremenitve. Glede požarne varnosti ima toplotno obdelan les krajši čas vžiga, vendar pa pri gorenju dosega nižjo temperaturo in manjše emisije dima kot pa neobdelan les (ThermoWood Handbook, 2003).

Toplotna obdelava lesa je že dolgo znan proces, vendar je postal bolj zanimiv šele v zadnjem desetletju, predvsem v Evropi, kar vodi k intenzivni industrijski proizvodnji in prodaji. Kot rezultat se toplotno obdelan les vedno bolj uporablja kot alternativa lesenega materiala za posebne namene. Kakorkoli, toplotna modifikacija lesa vodi k strukturnimi in kemijskimi spremembami, ki lahko bistveno spremenijo lastnosti materiala v primerjavi z neobdelanim lesom. Toplotno obdelan les se zato v velikih pogledih obravnava kot ločen razred lesa z značilnimi lastnostmi (Arnold, 2010).

2.3 NEDESTRUKTIVNO DOLOČANJE MEHANSKIH LASTNOSTI

Kadar želimo les uporabiti v konstrukcijske namene, je za vse proizvajalce in uporabnike nujno, da meritve izvajamo tako, da lesa ne poškodujemo. V preteklosti so za oceno mehanskih lastnosti uporabljali samo vizualno določljive parametre, kot so grče, širina letnic in potek vlaken, nato pa so v 60. letih prejšnjega stoletja raziskovalci začeli določevati mehanske lastnosti z nedestruktivnimi metodami (Srpčič in sod. 2010), te so še posebej primerne za razvrščanje toplotno obdelanega lesa. Nedestruktivne oz. neporušne metode nam omogočajo določiti relevantne lastnosti materiala brez, da bi na preizkušeni material kakor koli vplivali oz. ne da bi s postopkom merjenja vplivali na končno uporabnost materiala (Ross in Pellerin, 1994).

2.3.1 Ultrazvočna metoda

Ena izmed najbolj razširjenih metod določevanja mehanskih lastnosti z nedestruktivno metodo je ultrazvočna metoda. Z ultrazvočno metodo merimo hitrost širjenja ultrazvočnega valovanja. Hitrost potovanja valov oziroma zvoka je sorazmerna z gostoto medija. Tako hitrost zvoka v zraku znaša okoli 340 m/s, v lesu pa od 3300 do 3900 m/s (Plos, 2012).

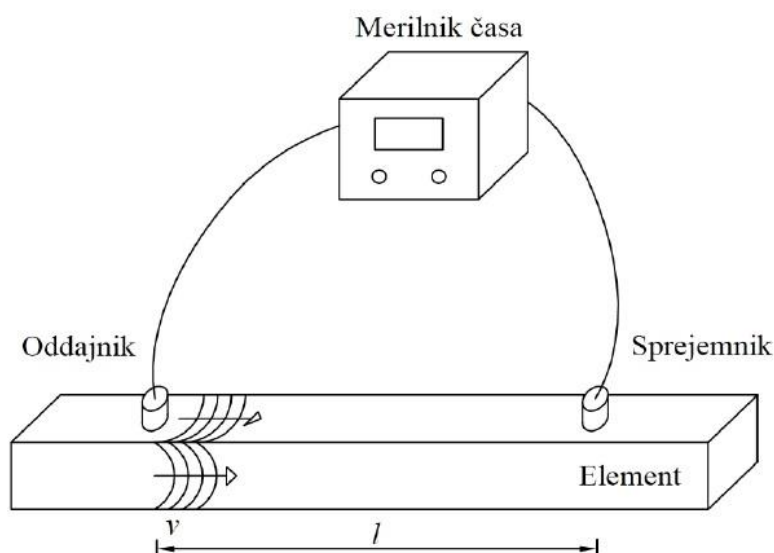
Ultrazvočni merilnik deluje na principu merjenja časa preleta od oddajnika do sprejemnika. S poznavanjem njune oddaljenosti oziroma dolžine preizkušanca l , lahko izračunamo hitrost ter dinamični modul elastičnosti:

$$E = v^2 \times \rho \quad \dots(1)$$

Kjer je:

E modul elastičnosti [N/mm^2],
 v hitrost valovanja [m/s] in
 ρ gostota lesa [kg/m^3], ki jo dobimo z merjenjem dimenzij preizkušanca in tehtanjem.

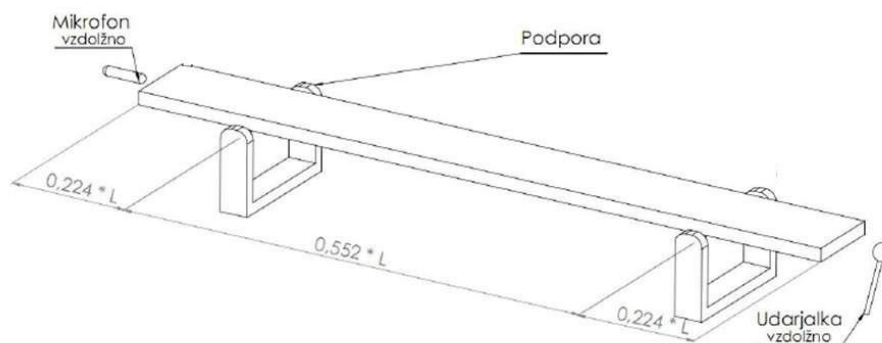
Prednost merjenja z ultrazvočnimi napravami je, da meritve ni potrebno opraviti na celotni dolžini preizkušancev, temveč lahko merimo samo posamezne odseke (slika 4).



Slika 4: Shema delovanja ultrazvočnega merilca.

2.3.2 Vzdolžno elastično vzbujanje

Vzdolžno elastično vzbujanje je naslednja nedestruktivna metoda določanja mehanskih lastnosti lesa. Pri tej metodi imamo preizkušaneec prosto vpet na elastičnih podporah (slika 5). Mehansko elastično vzbujanje se izvaja z impulzivnim udarjanjem s kladivcem. Na čelu preizkušanca ustvarimo zvočni val, ki potuje po celotni dolžini preizkušanca. Preizkušaneec začne v vzdolžni smeri nihati s svojo lastno frekvenco, ki jo izmerimo z mikrofonom, postavljenim na nasprotnem čelu preizkušanca.



Slika 5: Vzdolžno elastično vzbujanje (Straže, 2015).

Hitrost valovanja lahko določimo tudi s pomočjo valovne dolžine in frekvence nihanja, saj je v prvem nihajnem načinu valovna dolžina enaka dvojni dolžini preizkušanca (Straže, 2015):

$$v = \lambda_n \times f_n = \frac{2 \times L}{n} \times f_n [m/s] \quad \dots(2)$$

Hitrost zvočnega nihanja (v) je pri lesu odvisna od modula elastičnosti in gostote lesa (Straže, 2015):

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} [m/s] \quad \dots(3)$$

2.3.3 Prečno elastično vzbujanje

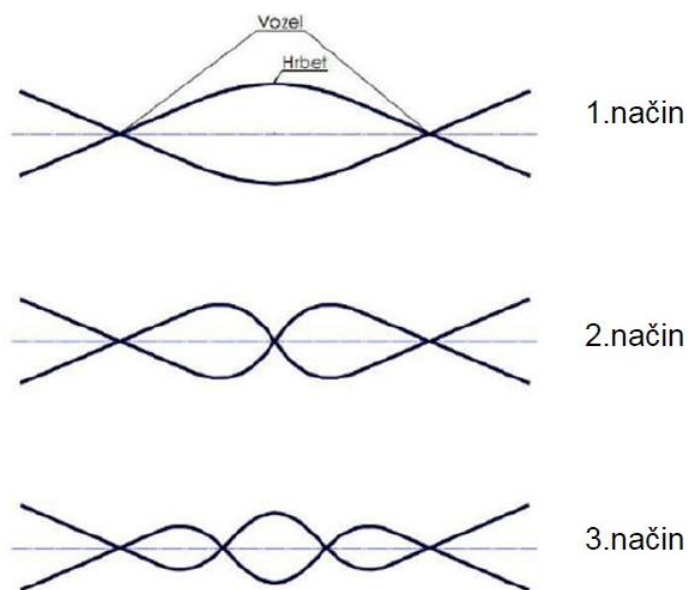
Prečno elastično vzbujanje je bila kot nedestruktivna metoda za določanje modula elastičnosti pri lesu ali lesnih kompozitih prvič preučena v začetku 60-let prejšnjega stoletja (Ross, 2008). Od takrat se je nedestruktivnim metodam posvečalo veliko pozornosti še posebej pri razvrščanju konstrukcijskega lesa (Divos in Tanaka, 2005).

S prečnim elastičnim vzbujanjem lahko vzbudimo več sočasnih načinov nihanja (slika 6). Običajno so nihanja harmonične in sinusne oblike.



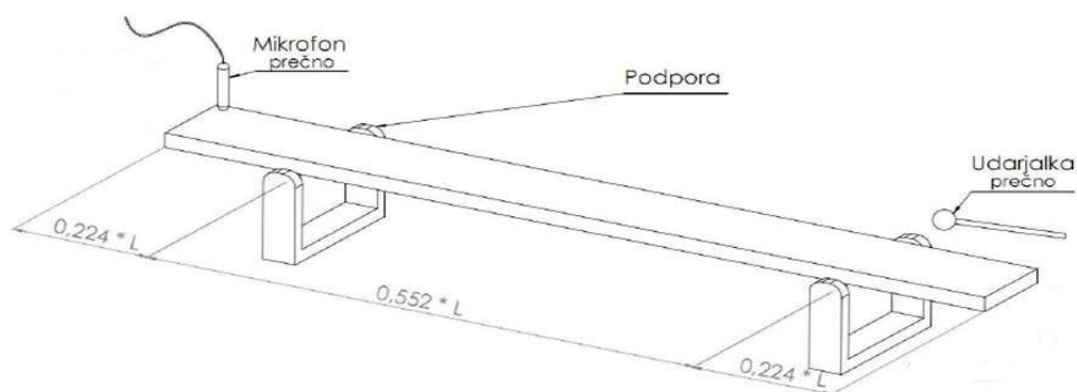
Slika 6: Oblike nihanja (Straže, 2015).

Nihanja se v prečni smeri superponirajo, s tem nastaja stoječe valovanje. V preizkušancu se pojavijo vozli, točke, kjer preizkušanec miruje in hrbti t.i. točke kjer je amplituda največja (slika 7).



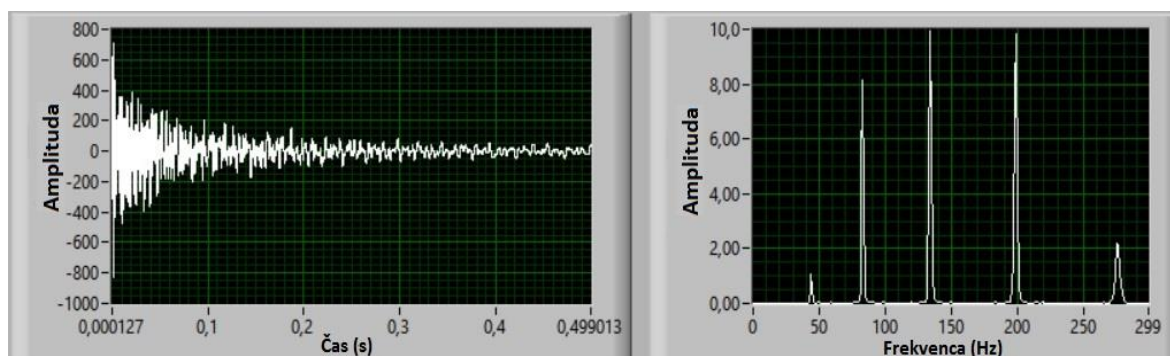
Slika 7: Nihajni načini z vozli in hrbti.

Pri prečnem vzbujujanju preizkušanec postavimo na dve elastični podpori, ki sta postavljeni na $0,224$ dolžine od konca preizkušanca, na t.i. vozliščih (slika 8). Na koncu preizkušanca s kladivcem izvedemo impulzni udarec in tako povzročimo prečno nihanje. Na drugem koncu preizkušanca, kjer je amplituda največja, pa izmerimo lastno frekvenco nihanja s kondenzatorskim mikrofonom.



Slika 8: Prečno elastično vzbujujanje (Straže, 2015).

Zvočni signal, ki ga s takšnim postopkom posnamemo v določenem časovnem območju je razviden na sliki 9 levo. Ko telo začne nihati z lastno frekvenco pride do pojava resonance, kjer so amplitude nihanja največje. Na sliki 9 desno se vidi zvočni signal v frekvenčnem območju s prvimi petimi nihajnimi načini. Prvi nihajni način ima najnižjo lastno frekvenco, nato pa se z vsakim naslednjim nihajnim oz. modalnim načinom lastna frekvenca povečuje.



Slika 9: Zvočni signal v časovnem (levo) in frekvenčnem (desno) območju.

Za analizo prečnega nihanja preizkušancev se najpogosteje uporablja Timoshenkova teorija (1921), ki nihanje prosto vpetega preizkušanca splošno zapiše z enačbo (4)

$$E_X I_{GZ} \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \rho I_{GZ} \left(1 + \frac{E_X}{K G_{XY}} \right) \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho^2 I_{GZ}}{K G_{XY}} \frac{\partial^4 v}{\partial t^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad \dots(4)$$

Kjer je:

E_X	modul elastičnosti [Pa],
I_{GZ}	vztrajnostni moment prereza [m ⁴],
x	razdalja v vzdolžni smeri preizkušanca [m],
v	amplituda nihanja [m],
ρ	gostota [kg/m ³],
K	geometrijska konstanta ($K = 5/6 \dots$ za pravokotne prereze),
G_{XY}	strižni modul [Pa],
t	čas [s] in
A	prečni prerez [m ²].

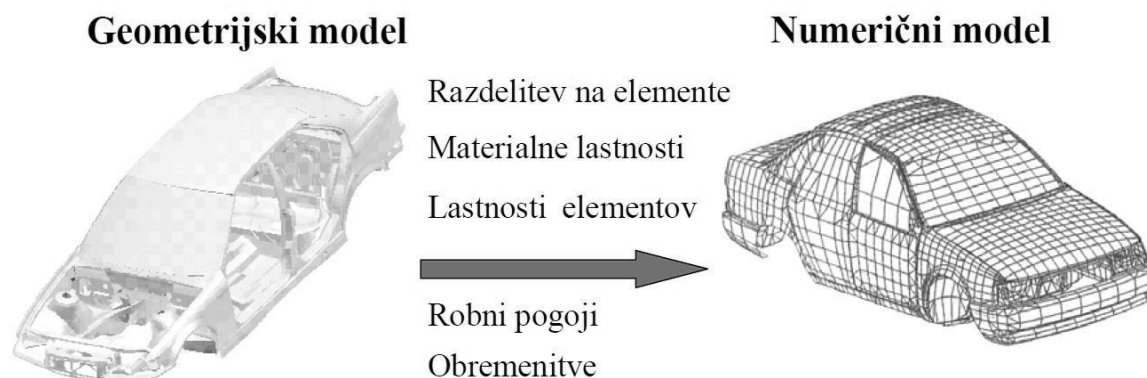
2.4 NUMERIČNO MODELIRANJE

Lesu s toplotno obdelavo spremenimo številne mehanske lastnosti, ki jih moramo znati določiti. Lastnosti in obnašanje materiala je še posebej pomembno pri nosilnih konstrukcijah. Obstaja veliko praktično tehničnih problemov za katere ni mogoče dobiti natančne rešitve. To nezmožnost pridobivanja natančne rešitve je mogoče pripisati bodisi kompleksni naravi, ki ureja diferencialne enačbe ali pa težavam, ki izhajajo iz postavljanja meja in začetnih pogojev. Da rešimo takšne težave, uporabimo numerične približke. (Tankut in Zor, 2014)

Z naprednimi metodami, kot je metoda končnih elementov, lahko preizkušance izpostavimo različnim obremenitvam, kot so tlak, strig, nateg, upogib, lastno nihanje, itd. in preverimo njihov odziv brez, da bi jih pri tem poškodovali.

Metoda končnih elementov je numerična metoda, ki temelji na razdelitvi (mreženju, diskretizaciji) obravnavane zvezne domene na določeno število medsebojno povezanih pod-domen enostavnih geometrijskih oblik, ki jih imenujemo končni elementi. Mreža

končnih elementov je medsebojno povezana v karakterističnih točkah oziroma vozliščih, v katerih vrednotimo končno število računsko določljivih neznanih osnovnih spremenljivk. S pomočjo interpolacijskih funkcij predpostavimo variacijo osnovnih spremenljivk znotraj končnih elementov v odvisnosti od njihovih vozliščnih vrednosti (slika 10, Ren in Ulbin, 2002).

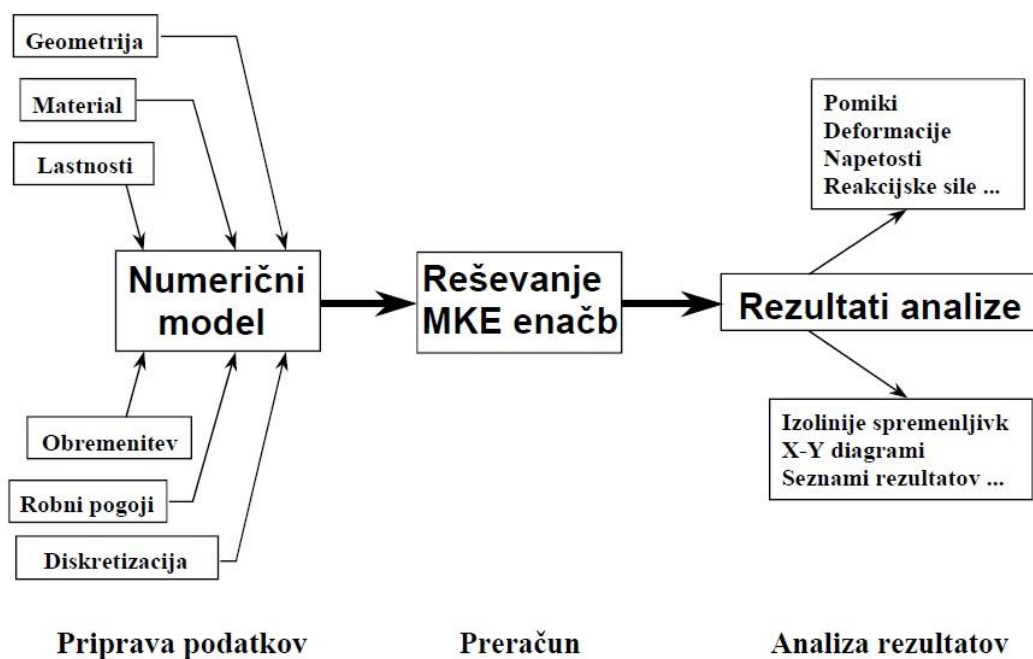


Slika 10: Princip metode končnih elementov (Ren in Ulbin, 2002).

V splošnem lahko potek analize po metodi končnih elementov razdelimo na posamezne korake (slika 11):

- geometrijsko modeliranje problema,
- vnos materialnih lastnosti,
- izbira primernih končnih elementov in vnos fizikalnih lastnosti posameznih delov strukture
- mreženje (diskretizacija) strukture s končnimi elementi,
- vnos robnih pogojev obremenitve strukture,
- preverjanje ustreznosti numeričnega modela,
- analiza po metodi končnih elementov,
- prikaz in analiza rezultatov (Ren in Ulbin, 2002).

Kot je razvidno iz slike 11, je potek numerične analize sestavljen iz treh delov: priprava podatkov oziroma izdelava numeričnega modela, preračun po metodi končnih elementov oz. analiza modela in analize rezultatov.



Slika 11: Potek numerične analize(Ren in Ulbin, 2002).

Simulacije pri katerih se telesa gibljejo in deformirajo zelo hitro imenujemo dinamične simulacije. Poseben primer dinamične simulacije je simulacija prostih vibracij, kjer proučujemo vibracije modela brez, da bi ga obremenili. Takšen način simuliranja imenujemo modalna analiza. Namen modalne analize je, da najdemo lastne frekvence in modelu določimo načine nihanja. Vsak opazovan sistem ima neskončno lastnih frekvenc in načinov nihanja, t.i. modalnih načinov.

3 MATERIALI IN METODE

3.1 MATERIALI

3.1.1 Izbira preizkušancev

Vpliv toplotne obdelave na mehanske lastnosti smo ugotavljali na lesu jelovine (*Abies alba* Mill), ki se poleg smrekovine, ki ima podobne mehanske lastnosti, uporablja v konstrukcijske namene. Izbrali smo 45 radialno usmerjenih desk z vzdolžnim potekom vlaken. Deske so bile nominalnega prečnega prereza 120 x 45 mm z dolžinami med 3 in 4 metri. Deske smo izbirali vizualno, s čim bolj homogeno rastjo in čim manjšimi napakami, kot so grče in druge rastne posebnosti. Po pet desk smo razdelili v devet razredov (od 1 do 9) po gostoti in jih smiselno označili. Nato smo jih poslali v podjetje Silvaproduct d.o.o. na toplotno obdelavo. Deske smo toplotno obdelali v industrijskem vakuumskem postopku pri različni končni temperaturi. Iz vsakega razreda je bila po ena deska toplotno obdelana pri temperaturi 170 °C, 190 °C, 210 °C in 230 °C, po eno desko pa smo pustili za kontrolo. Toplotne obdelave smo označili z vrednostmi od 0 do 4, kjer so:

- z 0 označene deske toplotne obdelave z maksimalno temperaturo 210 °C,
- z 1 označene kontrolne deske,
- z 2 označene deske toplotne obdelave z maksimalno temperaturo 170 °C,
- s 3 označene deske toplotne obdelave z maksimalno temperaturo 190 °C in
- s 4 označen deske toplotne obdelave z maksimalno temperaturo 230 °C.

Deske smo nato en mesec pustili v laboratoriju, da so se uravnovesile na notranje klimatske pogoje.

3.1.2 Meritve preizkušancev

Preizkušancem smo pred testiranjem mehanskih lastnosti določili:

- dimenzije v longitudinalni smeri na 1 mm natančno,
- dimenzije v radialni in tangencialni smeri na 0,01 mm natančno (dimenzije smo izmerili na treh mestih, v izračunih, ki sledijo smo uporabili povprečne vrednosti),
- vlažnost,
- maso na 0,01 kg natančno in jim izračunali gostoto.

Izračun gostote:

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad \dots(5)$$

Kjer je:

ρ_u gostota preizkušanca pri določeni vlažnosti [$\frac{kg}{m^3}$],
 m_u masa preizkušanca pri določeni vlažnosti [kg] in
 V_u prostornina preizkušanca pri določeni vlažnosti [m^3].

3.2 METODE

3.2.1 Določanje modula elastičnosti z ultrazvokom

Modul elastičnosti desk smo določili z ultrazvočno metodo (slika 12), ki je zelo podobna dinamični metodi, le da ta poteka pri višjih frekvencah. Preizkušance smo postavili na dve podpori iz stiropora, s tem smo zagotovili da signal potuje samo po preizkušancih. Hitrost preleta ultrazvoka smo merili v vseh treh smereh preizkušancev, ki so ob pravilni orientaciji preizkušancev bile tudi ekvivalentne posameznim anatomskim smerem (L – vzdolžno, R – radialno, po širini preizkušancev, T – tangencialno, po debelini preizkušancev). Merjenje v radialni in tangencialni smeri je potekalo tako, da smo na eno stran deske postavili oddajnik na nasprotno stran pa sprejemnik. Oddajnik je impulzno pošiljal ultrazvočni signal ($f = 54 \text{ kHz}$) skozi preizkušanec, sprejemnik pa je ta signal sprejel. Oddajnik in sprejemnik sta bila povezana z instrumentom z merilnikom časa (Proceq PL-200), ki je meril čas preleta. Iz izmerjenih podatkov smo lahko izračunali hitrost preleta ultrazvoka po naslednji enačbi:

$$v = \frac{s}{t} \quad \dots(6)$$

Kjer je:

- v hitrost preleta signala (v radialni, tangencialni oz. longitudinalni smeri) [m/s],
- s radialna, tangencialna oziroma longitudinalna dimenzija preizkušanca [m] in
- t čas preleta [s].

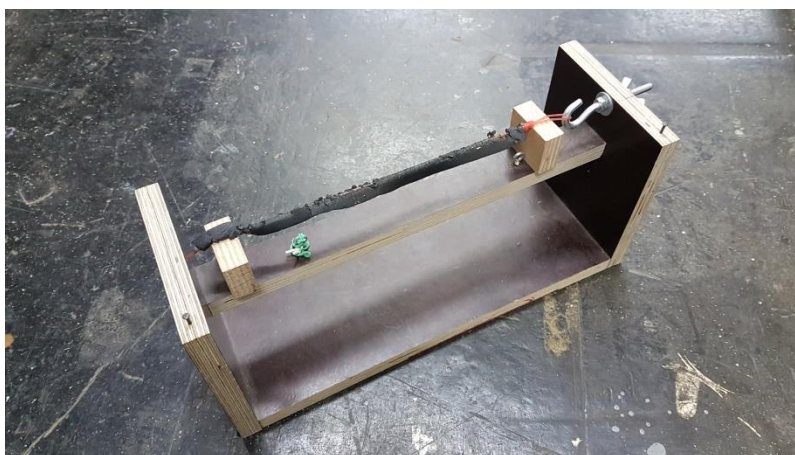
V longitudinalni smeri smo zaradi omejitev, merili hitrost preleta na razdalji 1,5 metra. Modul elastičnosti pa smo izračunali po enačbi 1.



Slika 12: Naprava za merjenje ultrazvoka z oddajnikom in sprejemnikom.

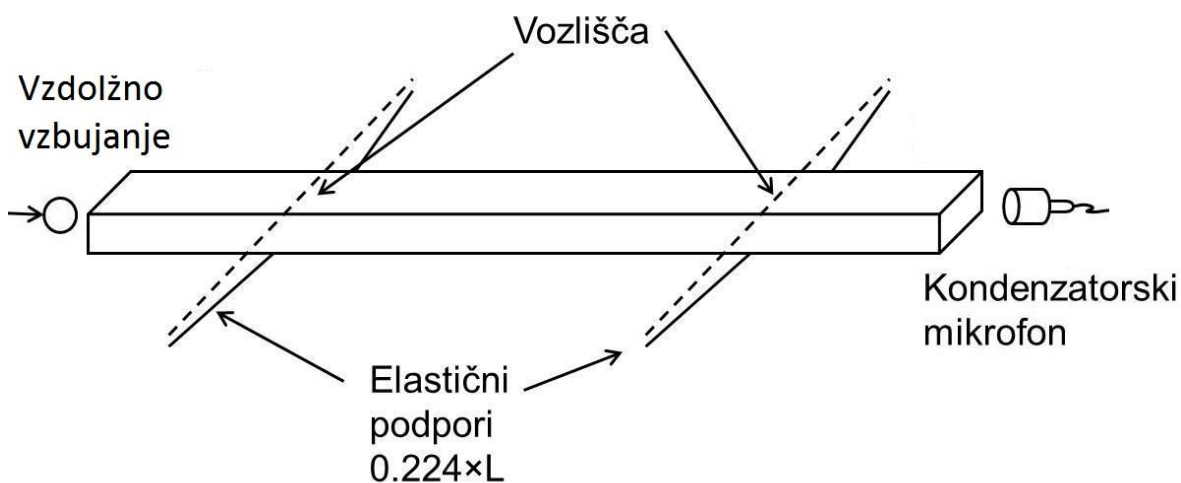
3.2.2 Določanje modula elastičnosti z vzdolžnim vzbujanjem

Najprej smo deske z dinamično metodo vzbujali longitudinalni smeri. Deske so bile postavljene na dvoje elastičnih podpor z napeto najlonsko vrvico (slika 13).



Slika 13: Elastične podpore z napeto najlonsko vrvico.

Podpore so bile postavljene na $0,224$ dolžine od konca preizkušanca, na t.i. vozliščih stoječih valov (slika 14). Mehansko elastično vzbujanje preizkušancev smo izvajali z impulzivnim udarjanjem s kladivcem. Za uspešne meritve so morali biti vsi udarci natančno in čim bolj enakomerno izvedeni.



Slika 14: Shema vzbujanja in zajemanja signala vzdolžnega nihanja preizkušanca.

Za zbiranje podatkov (zvočnega signala) smo uporabili modul za zajemanje zvočnega signala in kondenzatorski mikrofonski, ki smo ga postavili na eno čelo desk (slika 15), po drugem čelu pa smo izvajali impulzivno udarjanje s kladivcem.



Slika 15: Postavitev mikrofona pri longitudinalnem vzbujanju.

Podatke smo zajeli s programsko opremo NI LabVIEW. Iz izmerjenih signalov smo razbrali lastno frekvenco, ki smo jo potrebovali pri izračunu modula elastičnosti. Iz lastne frekvence in dolžine deske smo izračunali hitrost širjenja zvoka v longitudinalni smeri po enačbi:

$$v = \frac{2 \times L}{n} \times f_L \quad \dots(7)$$

Kjer je:

v hitrost valovanja [m/s],
 L dolžina deske [m],
 n nihajni način in
 f_L lastna frekvenca [s^{-1}].

Iz dobljenih hitrosti smo nato izračunali še module elastičnosti za tri do pet nihajnih načinov, kolikor so nam dopuščali izmerjeni signali.

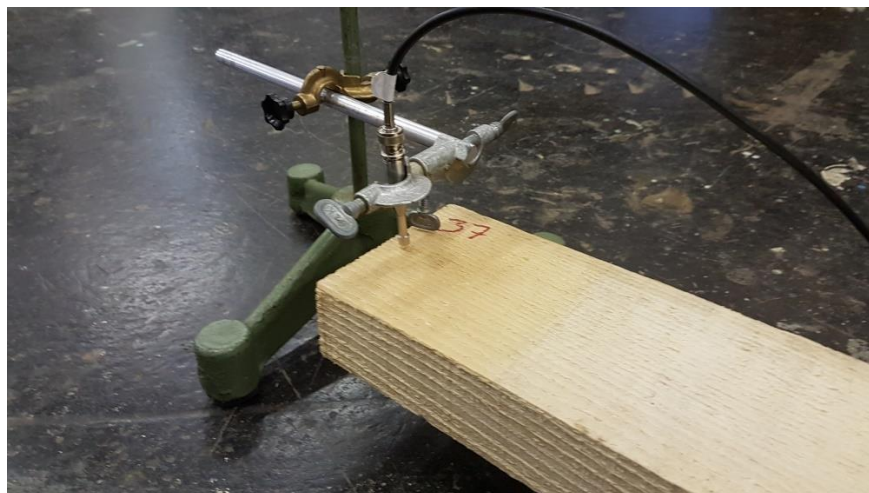
$$E = v^2 \times \rho \quad \dots(8)$$

Kjer je:

E modul elastičnosti [N/mm^2],
 v hitrost valovanja [m/s] in
 ρ gostota [kg/m^3].

3.2.3 Določanje modula elastičnosti s prečnim vzbujanjem

Po končanem vzdolžnem vzbujanju smo deske vzbujali še v prečni smeri. Uporabljena je bila enaka oprema za zaznavanje frekvenčnih signalov kot pri vzdolžnem vzbujanju le, da smo mikrofona postavili na tangencialno površino deske (slika 16) in mehansko elastično vzbujanje izvajali v prečni smeri.



Slika 16: Postavitev kondenzatorskega mikrofona pri merjenju prečnega nihanja.

Podatke smo prav tako zajeli s programsko opremo NI LabVIEW. Izmerjene signale pa smo analizirali v frekvenčnem območju in s hitro Fourier-jevo transformacijo določili lastne frekvence v prvih petih nihajnih načinih (slika 9).

Za izračun Youngov-ega modula elastičnosti in strižnega modula iz enačbe 4 smo uporabili Bordonn-ejevo rešitev (Brancheriau in Bailleres 2002), ki pri nihanju preizkušanca upošteva tudi vpliv strižnih napetosti ne upošteva pa učinka podpor (enačba 9) (Brancheriau in Bailleres, 2002; Hein in sod., 2010)

$$\frac{E_X}{\rho} - \frac{E_X}{KG_{XY}} \left[QF_2(k) 4\pi^2 \frac{AL^4}{I_{Gz}} \frac{f_n^2}{P_n} \right] = 4\pi^2 \frac{AL^4}{I_{Gz}} \frac{f_n^2}{P_n} [1 + QF_1(k)] \quad \dots(9)$$

Kjer je:

f_i frekvenca nihanja preizkušanca v i-tem nihajnem načinu

P_n parameter za rešitev Bernoulli-jeve konstante (k), odvisne od nihajnega načina (n)

V prejšnji enačbi (En. 9) parametre Q, F_1 , F_2 , m in Θ izračunamo na osnovi posameznega modalnega načina (n):

$$Q = \frac{I_{Gz}}{AL^2} \quad \dots(10)$$

$$F_1(k) = \theta^2(k) + 6\theta(k) \quad \dots (11)$$

$$F_2(k) = \theta^2(k) - 2\theta(k) \quad \dots(12)$$

$$\theta(k) = k \frac{\tan(k) \tanh(k)}{\tan(k) - \tanh(k)} \quad \dots(13)$$

$$k_n = \sqrt[4]{P_n} = (2n + 1) \frac{\pi}{2}, n \in N \quad \dots(14)$$

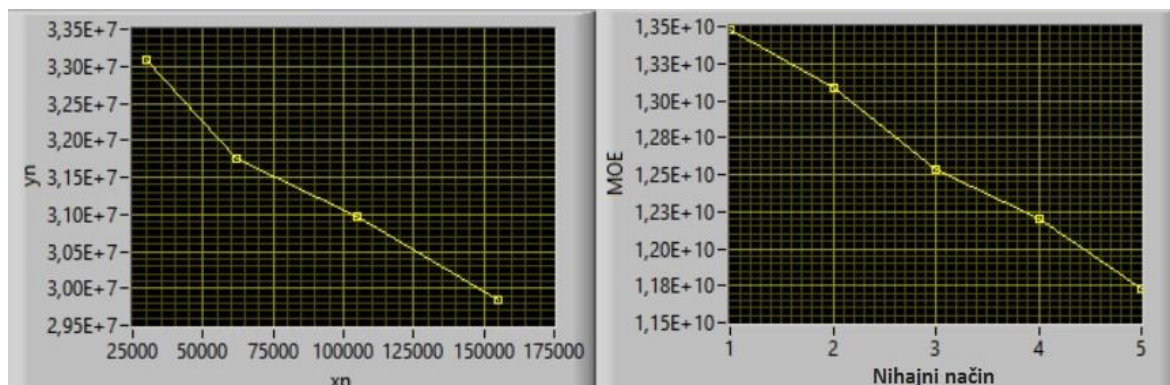
Parametri Q , F_1 , F_2 , m in Θ omogočajo prilagajanje linearnega regresijskega modela ($Y_n = a + b \times X_n$) k osnovni enačbi 9, kjer za posamezen nihajni način računamo X_n in Y_n vrednost (En. 15 in En. 16). Z izračunano začetno vrednostjo (a) lahko izračunamo modul elastičnosti po Timoshenkovem modulu (E_X) (En. 9, En. 17), iz naklona modelne premice (b) pa lahko izračunamo še strižni modul (G_{XY}) (En. 18, Sl. 17).

$$X_n = \left[Q F_2(k) 4\pi^2 \frac{AL^4 f_n^2}{I_{Gz} P_n} \right] \quad \dots(15)$$

$$Y_n = 4\pi^2 \frac{AL^4 f_n^2}{I_{Gz} P_n} [1 + Q F_1(k)] \quad \dots(16)$$

$$E_X = a \times \rho \quad \dots(17)$$

$$G_{XY} = \frac{E_X}{K \times b} \quad \dots(18)$$



Slika 17: Izračun parametrov Y_n in X_n po Bordonne-jevi rešitvi (levo) in odvisnost modula elastičnosti od nihanega načina (desno).

Modul elastičnosti po Timoshenku (E_X) dosega višjo vrednost, kot pa modul elastičnosti izračunan po preprostejši Bernoulli-jevi rešitvi (E_B). Bernoulli-jeva rešitev je sicer osnova za izračun modula elastičnosti pri prečnem nihanju preizkušanca (En. 19). Enačba se uporablja za osnovni, kot tudi za višje nihajne (modalne) načine, kjer pa se izračunane vrednosti modula elastičnosti v teoriji znižujejo (slika 17).

$$E_B = \frac{4 \times \pi^2 \times L^4 \times \rho \times f_n^2 \times A}{I \times k_i^4} \quad \dots(19)$$

Kjer je:

L dolžina preizkušanca [m],

f_n frekvenca nihanja, pri n-tem nihajnem načinu,
 ρ_u gostota [kg/m^3],
 A prečni prerez preizkušanca [m^2],
 I vztrajnostni moment prereza [m^4] in
 k_i korekcijski koeficient, za n-ti nihajni način.

Nato smo izračunali odklon modula elastičnosti v višjih nihajnih načinih po naslednjih enačbah:

$$\Delta E_i = E_{n+1} - E_n \quad \dots(20)$$

$$\Delta \bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta E_i \quad \dots(21)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta E_i - \Delta \bar{E})^2}{n}} \quad \dots(22)$$

$$q = \frac{\sigma}{|\Delta \bar{E}|} \times 100\% \quad \dots(23)$$

Kjer je:

ΔE_i sprememba modula elastičnosti [N/mm^2],
 E_n modul elastičnosti v n – tem nihajnem načinu [N/mm^2],
 $\Delta \bar{E}$ povprečna sprememba modula elastičnosti [N/mm^2],
 σ standardni odklon in
 q koeficient variacije odklona modula elastičnosti [%].

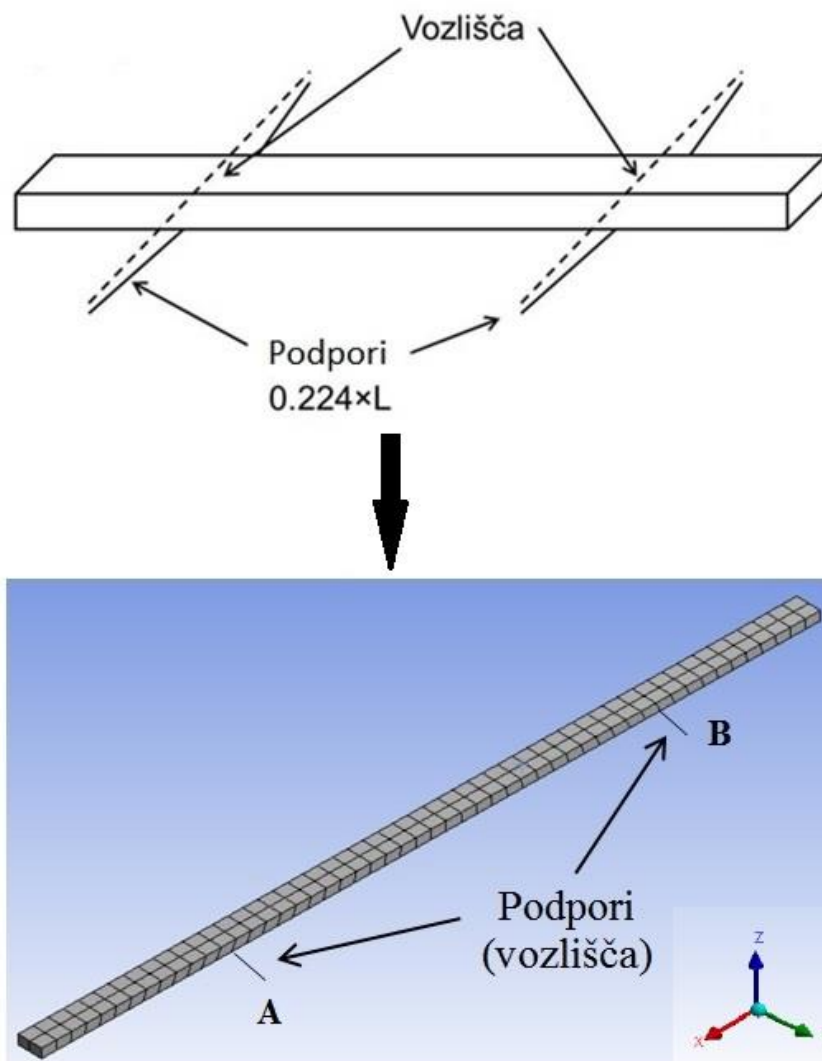
3.2.4 Izdelava numeričnega modela

Izdelali smo numerični model za nekaj tipičnih desk. Iz vsakega razreda toplotne obdelave smo izbrali po dve gostejši deski, z namenom, da se znebimo morebitnih vplivov anomalij, ki jih pogosto najdemo v bližini stržena (juvenilnega lesa). Za te deske smo podatke o modulu elastičnosti v vseh treh smereh in strižni modul v longitudinalno radialni smeri (G_{LR}) pridobili iz nedestruktivnih testov. Poissonova razmerja pa smo prevzeli iz literature in sicer: $\nu_{LR} = 0,45$, $\nu_{RT} = 0,5$, $\nu_{LT} = 0,6$ (Bucur, 2006); ostala dva strižna modula pa smo izračunali iz razmerja $G_{LR} : G_{RT} = 1,2$ in $G_{LR} : G_{LT} = 2$ (Keunecke, 2011).

Najprej smo izrisali modele izbranih desk ter vnesli robne pogoje vpetja deske z ustreznimi omejitvami prostorskih stopenj. Naša robna pogoja sta bile dve prečni podpori (slika 18) postavljeni na razdalji 0,224 dolžine deske od konca preizkušanca na t.i. vozliščih.

Omejitev prostorskih stopenj:

-vozlišče A in B nepomično v radialni smeri (smer y), slika 18.



Slika 18: Geometrijski model (zgoraj), numerični model (spodaj).

Nato smo izvedli mreženje modela z enakomerno razporejenimi elementi (kvadrati velikosti 20 x 20 mm - slika 18 spodaj) vzdolž njegove dolžine. Za določitev lastnih frekvenc smo uporabili modalno analizo.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1 FIZIKALNE IN MEHANSKE LASTNOSTI JELOVINE

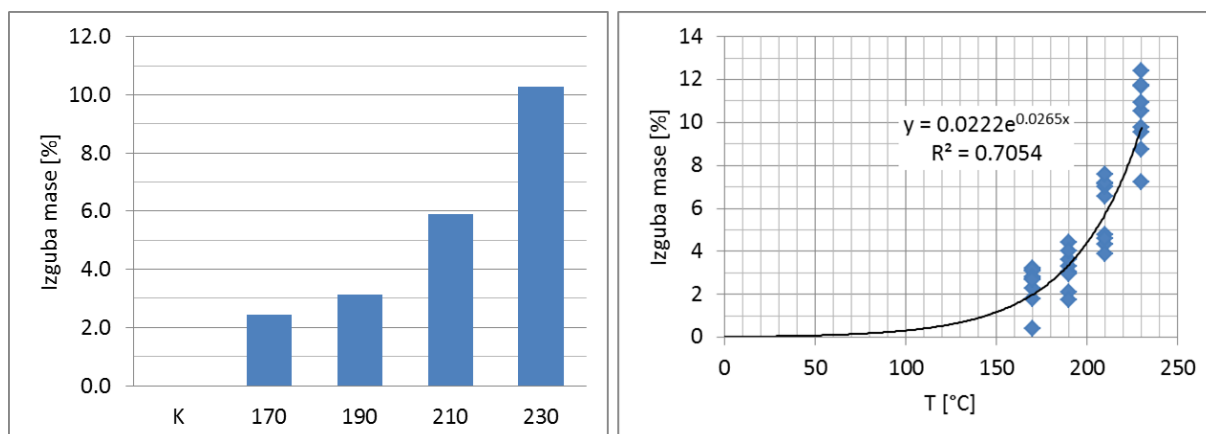
Z višanjem temperature toplotne obdelave se je delež izgube mase in gostote lesa povečeval (pregl. 4). Pri postopku s temperaturo 230 °C se je masa v povprečju zmanjšala za 10,3 % (slika 19). Ob konstantnem času glavne faze industrijskega vakuumskega postopka toplotne obdelave lesa smo privzeli, da je maso in gostoto preizkušancev mogoče obravnavati kot sistem 1. reda. Pri tem se izkaže značilnost eksponentnega modela izgube mase preizkušancev od uporabljene temperature v postopku toplotne obdelave jelovine.

Preglednica 4: Spremembe fizikalnih in mehanskih lastnosti.

	Kontrola	170 °C	190 °C	210 °C	230 °C
ρ [kg/m³]	425	415	415	397	394
KV [%]	6.4	6.7	7.3	6.5	8.4
v_L [m/s]	4991	5424	5365	5390	5161
KV [%]	6.8	6.3	4.1	8.9	6.5
v_R [m/s]	1399	1610	1473	1609	1414
KV [%]	22.8	21.1	21.7	18.8	28.5
v_T [m/s]	1079	1090	1002	1099	1113
KV [%]	14.8	10.7	12.0	13.1	16.6
E_L [GPa]	10.6	12.2	12.0	11.6	10.6
KV [%]	15.5	10.5	11.7	16.3	18.8
E_R [GPa]	0.88	1.13	0.93	1.05	0.86
KV [%]	50.3	44.3	40.1	32.9	62.8
E_T [GPa]	0.51	0.50	0.42	0.49	0.50
KV [%]	35.8	22.8	28.0	26.3	37.9

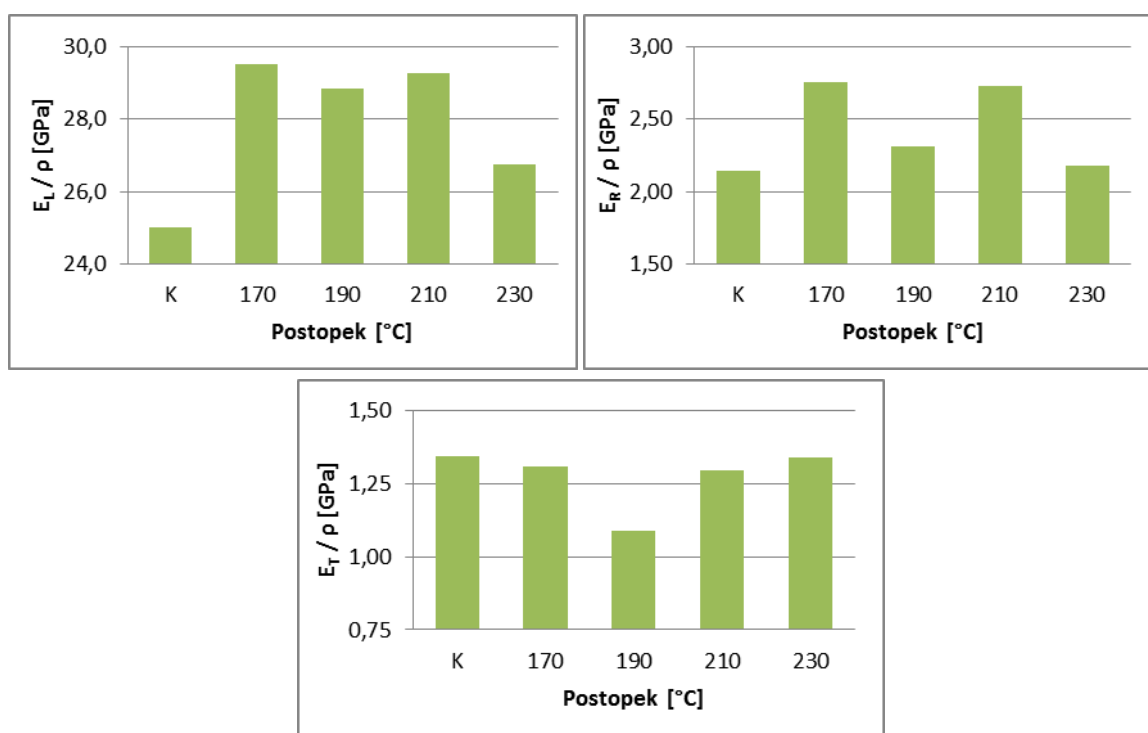
Opomba: ρ = gostota; v = hitrost zvoka; E = modul elastičnosti; L, R, T = longitudinalno, radialno, tangencialno; KV = koeficient variacije.

Glede na spremembe hitrosti zvoka se je spreminjal tudi modul elastičnosti (enačba 1). Iz meritev z ultrazvočnim merilnikom je razvidno, da prihaja, s povečanjem končne temperature toplotne obdelave, do najbolj izrazitih sprememb modula elastičnosti v smeri vlaken, v t.i. longitudinalni smeri. Modul elastičnosti se pri temperaturi toplotne obdelave 170 °C naglo poveča, nato pa z višanjem temperature toplotne obdelave začne upadati (pregl. 4). V radialni smeri lahko opazimo trend povečevanja modula elastičnosti glede na kontrolno meritev, vendar so meritve zelo variabilne. V tangencialni smeri pa so učinki toplotne obdelave na modul elastičnosti zanemarljivi. Pri merjenju hitrosti zvoka in elastičnih modulov z ultrazvokom smo bili omejeni lokalno na 1,5 metra dolžine deske. Zato rezultati ne zajemamo rastnih posebnosti in anomalij, ki so bile prisotne na ne izmerjeni dolžini deske, te bi lahko vplivale na togost deske.



Slika 19: Izguba mase v postopku toplotne obdelave lesa, povprečna izguba (levo) ter matematični model izgube mase (desno).

Zaradi izgube mase se je povečal tudi specifični modul elastičnosti. Povečanje specifičnega modula elastičnosti pomeni, da se je masa lesa neškodljivo zmanjšala na račun togosti (in obratno) (slika 20). Specifični modul elastičnosti se je najbolj povečal v vzdolžni smeri, najnižja stopnja toplotne obdelave je povzročila močno povečanje specifičnega modula. V radialni smeri lahko opazimo trend povečevanja specifičnega modula elastičnosti glede na kontrolno meritev, vendar so meritve zelo variabilne. V tangencialni smeri pa so spremembe specifičnega modula zanemarljivi.

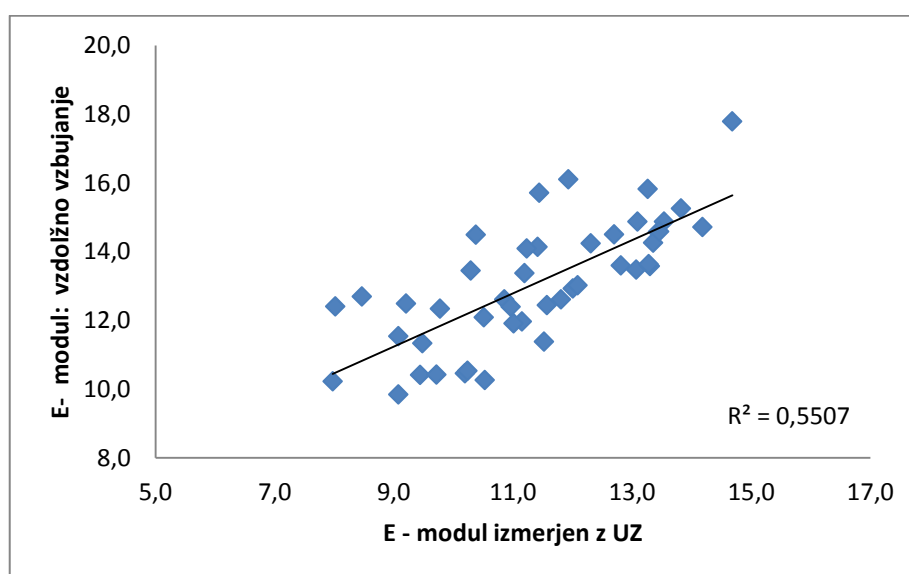


Slika 20: Specifični modul elastičnosti v longitudinalni, radialni in tangencialni smeri.

4.2 POVEZANOST MERITEV ULTRAZVOČNEGA MODULA ELASTIČNOSTI Z MERITVAMI FREKVENČNEGA ODZIVA

4.2.1 Frekvenčni odziv v vzdolžni smeri

Metoda vzdolžnega vzbujanja nam je, za razliko od ultrazvoka, omogočila merjenje togosti po celotni deski. Na sliki 21 je razvidna korelacija med elastičnim modulom izmerjenim z metodo vzdolžnega vzbujanja in ultrazvokom. Korelacija med obema moduloma je dobra – gre za dva dinamična modula, izmerjena v vzdolžni smeri elementa z različnim načinom vzbujanja. Malce višje vrednosti smo izmerili z metodo vzdolžnega vzbujanja. Manjše razlike so nastale predvsem zato, ker smo pri merjenju z ultrazvokom bili omejeni lokalno na dolžino 1,5 metra.

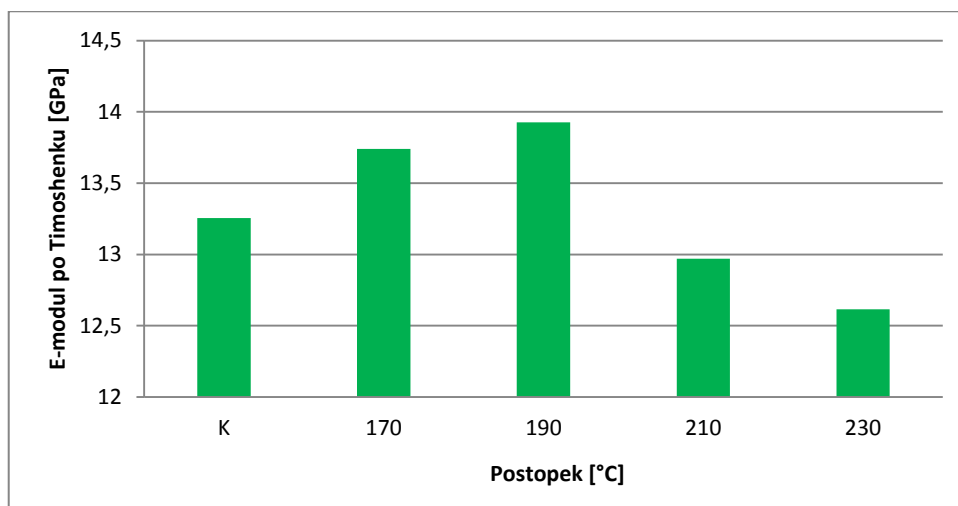


Slika 21: Korelacija med E-modulom izmerjenim z metodo vzdolžnega vzbujanja in ultrazvokom.

Zato lahko iz povezave sklepamo, da je meritev z ultrazvokom povsem zadostovala. Čeprav je bila meritev izvedena na dolžini manjši kot je polovica dolžine deske, ne prihaja do večjih odstopanj v primerjavi z meritvami na celotni dolžini deske.

4.2.2 Frekvenčni odziv v prečni smeri

Rezultati nakazujejo (slika 22), da se prečni dinamični modul elastičnosti (izračunan po Timoshenkovi teoriji) spreminja nelinearno. Modul elastičnosti začetno raste, ko pa toplotna obdelava postane intenzivnejša (nad 190°C), pa smo izmerili zniževanje modula. Pri intenzivnejši toplotni obdelavi modul elastičnosti pade pod kontrolne vrednosti. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi drugi raziskovalci (Arnold, 2010). Značilnega trenda spremembe togosti v prečni smeri lesa zaradi velike variabilnosti ne moremo potrditi.

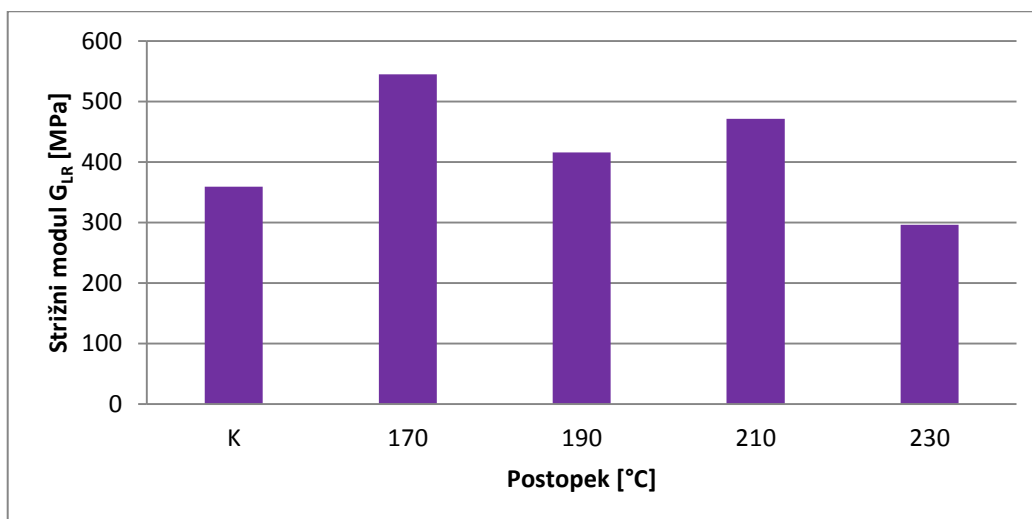


Slika 22: Module elastičnosti po Timoshenku glede na postopek toplotne obdelave.

Zmanjšanje modula bi bilo mogoče pojasniti z mikrostrukturnimi porušitvami, ki bi utegnile nastajati pri intenzivni toplotni obdelavi, t.j. pri najvišjih uporabljenih temperaturah. Upogibne lastnosti so zelo občutljive na spremembe v celični steni. Prevladujoča razgradnja hemiceluloz v celični steni zaradi termične obdelave vodi k oslabitvi matrice, posledice pa se kažejo v zmanjšanju številnih mehanskih lastnosti. Vendar je to poslabšanje pomembno samo nad kritičnimi strižnimi napetostmi, zato je vpliv na modul elastičnosti večinoma manjši kot na strižni modul.

4.2.3 Strižni modul

Izkazalo se je, da se s toplotno obdelavo najprej strižni modul rahlo poveča, pri višjih temperaturah obdelave pa se postopoma znižuje (slika 23). Do povečanja je prišlo v treh od štirih primerov, če jih primerjamo s kontrolnimi preizkušanci. Strižni modul se je najbolj povečal pri toplotni obdelavi pri 170 °C iz 360 MPa na 545 MPa, pri višji stopnjah toplotne obdelave smo izmerili malce nižje vrednosti. Pri najvišji stopnji toplotne obdelave pa se je modul zmanjšal pod vrednost, ki so jo imeli kontrolni preizkušanci.

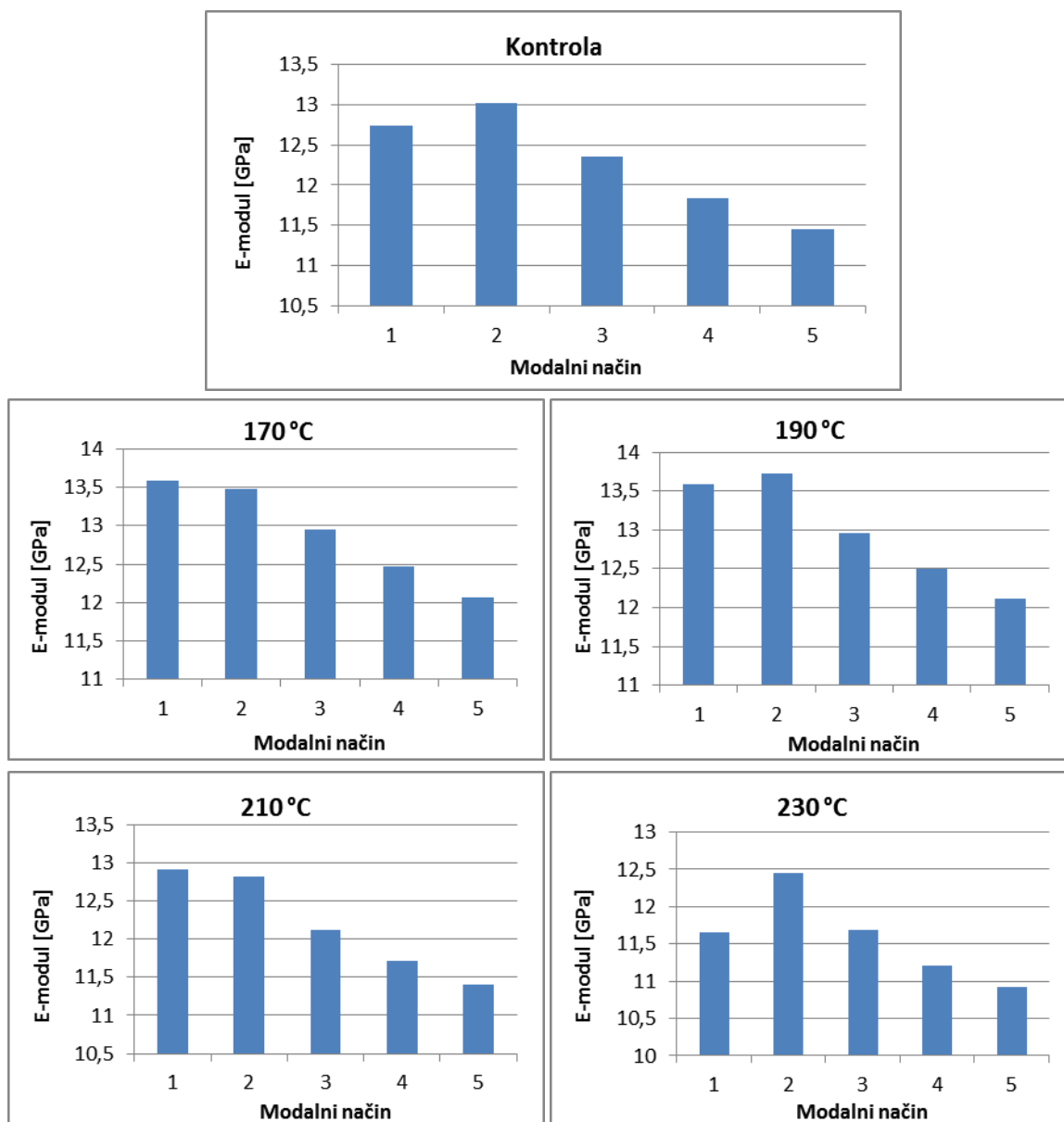


Slika 23: Strižni modul G_{LR} po postopkih toplotne obdelave.

Iz rezultatov sklepamo, da se upogibna trdnost pri nižjih temperaturah toplotne obdelave poveča, pri najvišji stopnji toplotne obdelave (230 °C) pa je pričakovati nižjo trdnost jelovine. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi drugi raziskovalci (Arnold, 2010), ki so z meritvami potrdili, da se upogibna trdnost pri standardnih (suhih) pogojih s toplotno obdelavo zmanjša, togost pa je nagnjena k manjšem povečanju. S toplotno obdelavo se spremeni tudi razmerje med togostjo in trdnostjo.

4.2.4 Analiza strukturne nehomogenosti z določanjem modula elastičnosti v višjih modalnih načinih

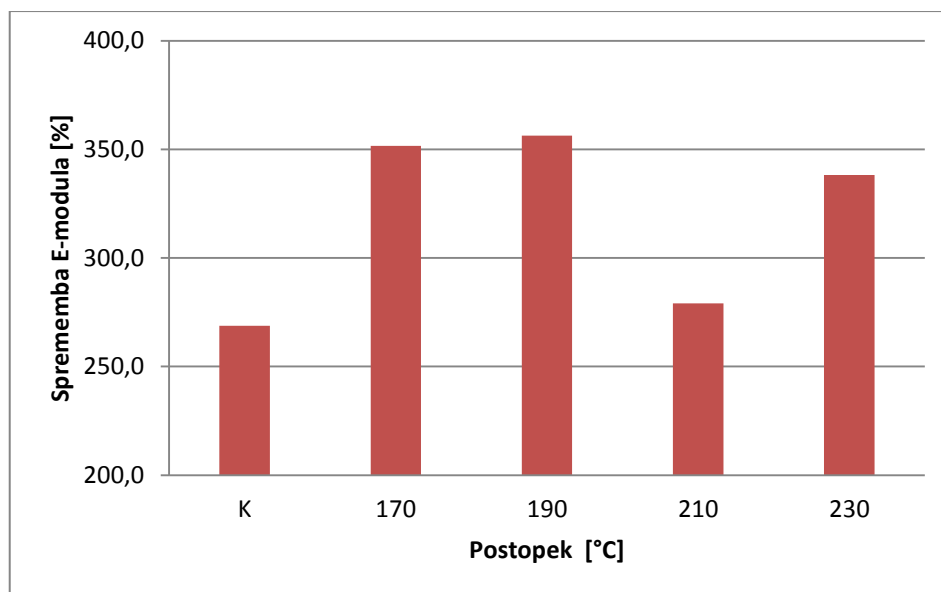
Z Bernoulli-jevo rešitvijo smo dobili elastične module za osnovne kot tudi za višje modalne načine. Frekvenčni odziv pri prečnem vzbujujanju preizkušancev je potrdil nižanje modula elastičnosti z višanjem nihajnega načina (slika 24). Osnovni razlog za zmanjševanje modula elastičnosti z višanjem modalnega načina najdemo v višanju strižnih napetosti in s tem strižni modul vpliva na izračunane vrednosti modula elastičnosti.



Slika 24: Sprememba modula elastičnosti z višanjem modalnega načina po postopkih toplotne obdelave.

Pri vzdolžnem vzbujujanju se je strukturna homogenost, ki smo jo merili kot spremembo modula elastičnosti, v vseh štirih postopkih toplotne obdelave povečala (slika 25). Kar

potrjuje našo hipotezo, da višanje končne temperature toplotne obdelave lesa negativno vpliva na strukturno homogenost in posledično na mehanske lastnosti lesa.

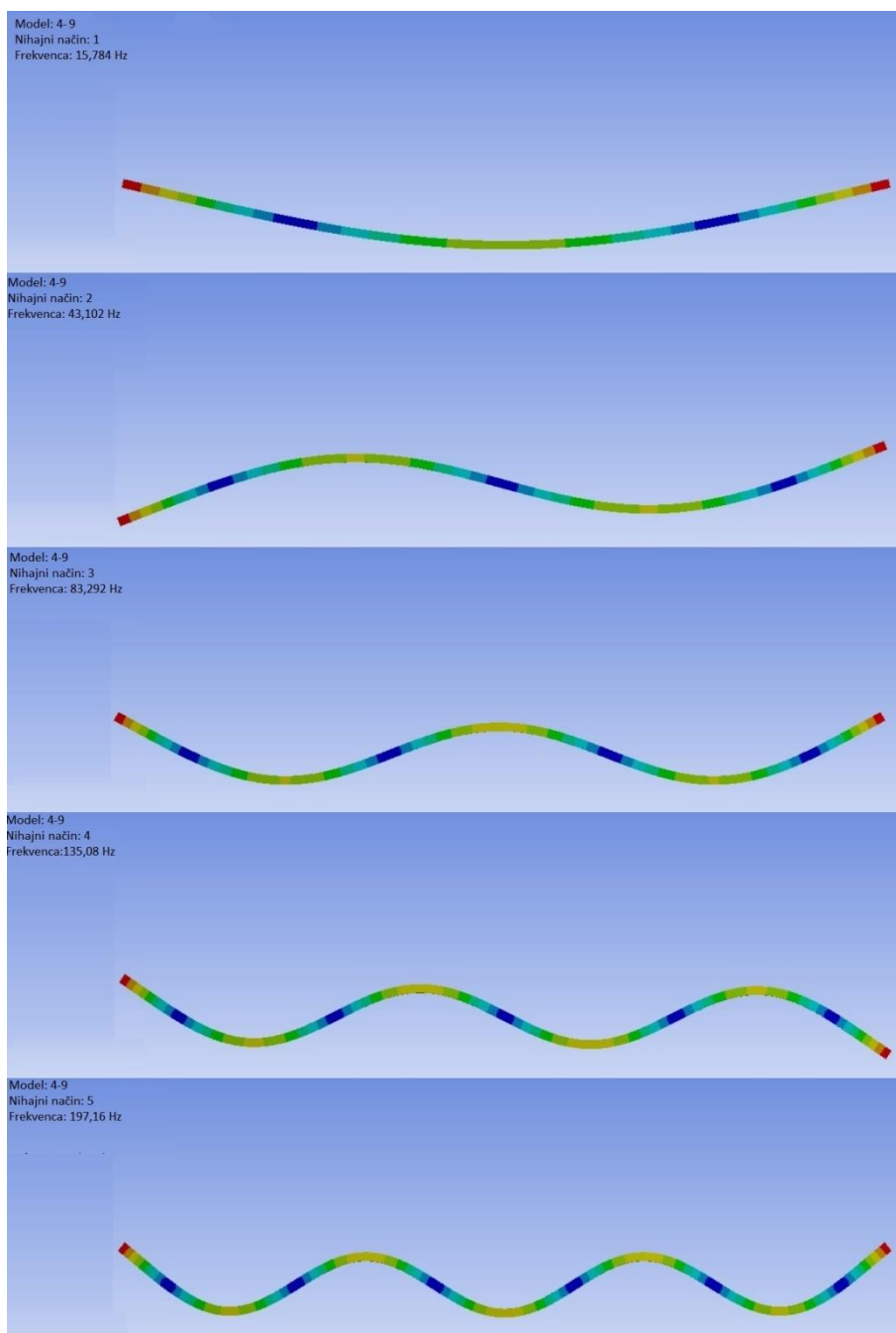


Slika 25: Sprememba modula elastičnosti pri vzdolžnem vzbujanju pri različnih postopkih termične obdelave.

Strukturna nehomogenost se je s toplotno obdelavo povečala, vendar z večanjem temperature toplotne obdelave nehomogenost ne narašča. Večje razlike so bile opazne že pri nižjih stopnjah toplotne obdelave. Iz rezultatov domnevamo, da se lokalno na posameznih preizkušancih pojavljajo večje razlike v togosti kadar so bili preizkušanci izpostavljeni postopku toplotne obdelave. S tem domnevamo, da obstaja večja verjetnost lokalno mehansko šibkih mest pri preizkušancih, ki so bili toplotno obdelani.

4.3 PRIMERJAVA FREKVENČNIH ODZIVOV REALNIH PREIZKUŠANCEV Z NUMERIČNIM MODELOM

Z uporabo modalne analize smo simulirali prosto nihanje desk z lastno frekvenco v prvih petih nihajnih načinih.



Slika 26: Modalna analiza - prvih pet nihajnih načinov.

Na sliki 26 je razviden odziv tipičnega modela preizkušanca v prvih petih nihajnih načinih. Ko telo začne nihati z lastno frekvenco, pride do pojava resonance, kjer so amplitude nihanja največje.

Pri primerjavi frekvenčnega odziva realnih preizkušancev z numeričnim modelom smo dobili podobne vrednosti (pregl. 5). Izpostaviti je treba, da smo pri izdelavi numeričnega modela poenostavili podpore. Pri merjenju frekvenčnega odziva realnih preizkušancev so bile deske namreč podprte z napeto najlonsko vrstico okroglega preseka. V numeričnem modelu pa smo deske podprli z linijsko podporo. Prav tako smo v numeričnem modelu zanemarili vpliv dušenja zvoka in morebitnega prenosa vibracij iz okolice preko podpor ali preko medija, t.j. z zvočnim tlakom. Težave smo imeli tudi pri vnašanju materialnih konstant, ker so nam manjkale oz. jih nismo mogli izmeriti. Vrednosti Poissonovega razmerja v vseh treh smereh, ter vrednosti strižnega modula v radialno – tangencialni (RT) in longitudinalno – tangencialni smeri (LT), smo namreč privzeli iz literature. Vse te poenostavitve so vplivale na manjša odstopanja odziva numeričnega modela od realnega preizkušanca, ki so razvidna v preglednici 5.

Preglednica 5: Primerjava frekvenc realnih preizkušancev z numeričnim modelom v prvih petih nihajnih načinih.

Oznaka deske	[Hz]		[Hz]		[Hz]		[Hz]		[Hz]		Odstopanje (%)
	f_{1R}	f_{1M}	f_{2R}	f_{2M}	f_{3R}	f_{3M}	f_{4R}	f_{4M}	f_{5R}	f_{5M}	
1-5	17	13	46	37	88	71	142	116	209	169	19
1-9	17	15	48	41	91	80	148	130	218	189	12
2-8	17	14	47	39	90	76	146	124	215	181	16
2-9	17	15	48	41	91	78	148	127	218	186	14
3-8	17	16	48	44	91	86	148	139	219	203	6
3-9	18	16	47	42	89	81	143	131	211	190	10
0-7	17	17	49	47	94	90	153	146	225	212	4
0-9	16	13	45	35	84	67	137	109	200	159	21
4-8	16	16	46	43	86	83	140	134	207	194	4
4-9	17	16	48	43	93	83	149	135	220	197	10
									Povprečno odstopanje (%)		12

Najmanjše odstopanje med realnim in numeričnim modelom je znašalo 4 %. To odstopanje smo izmerili pri dveh deskah, ki sta bile obdelane z višjo temperaturo toplotne obdelave. Prav tako je bilo pri deski, ki je bila izpostavljena višji stopnji toplotne obdelave, izmerjeno največje odstopanje, to je znašalo 21 %. Povprečno odstopanje pa je znašalo 12 %, kar, glede na vse poenostavitve, ni veliko. Numerični model mehanskega odziva preizkušancev je pokazal primerljive rezultate realnemu odzivu preizkušancev.

V bodoče bi bilo smiselno pridobiti vse materialne konstante za posamično desko na njeni celotni dolžini, ter določiti še preostale potrebne parametre, t.j. strižne module v TL- in RT-ravnini ter manjkajoča Poissonova razmerja. S temi meritvami bi se numerični model še bolj približal odzivu realnega preizkušanca.

5 SKLEPI

Izguba mase preizkušancev je eksponentno naraščala z višanjem temperature toplotne obdelave. Modul elastičnosti se je najbolj spremenil v vzdolžni smeri lesa. Pri višanju intenzivnosti toplotne obdelave je sprva naraščal, pri najvišji temperature pa zopet padel. Zaradi izgube mase se je povečal tudi specifični modul elastičnosti. Do povečanja specifičnega modula elastičnosti prišlo, zaradi neškodljivega zmanjšanja mase na račun togosti (in obratno).

Značilno korelacijo smo potrdili med modulom elastičnosti izmerjenim z metodo vzdolžnega vzbujanja in ultrazvočno metodo. Iz tega sklepamo, da sta metodi primerljivi in bi bilo mogoče uporabljati tudi le eno od obeh. Čeprav je bila meritev ultrazvoka izvedena na manj kot polovici dolžine deske, ne prihaja do večjih odstopanj v primerjavi z meritvami na celotni dolžini deske. K temu je pozitivno prispevalo skrbno vzorčenje lesa in izbira izključno žaganic najvišje kakovosti.

Prečni dinamični modul elastičnosti (izračunan po Timoshenkovi teoriji) se z višanjem temperature toplotne obdelave spreminja nelinearno. Modul elastičnosti najprej raste, ko pa toplotna obdelava postane intenzivnejša, pa začne padati, zato značilnega trenda spremembe togosti v prečni smeri lesa zaradi velike variabilnosti ne moremo potrditi. Zmanjšanje modula bi bilo mogoče pojasniti z mikrostrukturnimi porušitvami, ki bi utegnile nastajati pri intenzivni toplotni obdelavi, t.j. pri najvišjih uporabljenih temperaturah.

Izkazalo se je, da se s toplotno obdelavo strižni modul najprej rahlo poveča, pri višjih temperaturah pa se postopoma zniža ter doseže manjšo vrednost, kot so jo imeli kontrolni vzorci. Iz tega domnevamo, da se upogibna trdnost pri nižjih temperaturah toplotne obdelave poveča, pri najvišji stopnji toplotne obdelave pa je pričakovati nižjo trdnost jelovine. S toplotno obdelavo se spremeni tudi razmerje med trdnostjo in togostjo lesa.

Pri toplotni obdelavi prihaja do sprememb homogenosti strukture lesa, ki pa se z višanjem končne temperature toplotne obdelave ne spreminja bistveno. Večje razlike so opazne že pri nižjih stopnjah toplotne obdelave. Toplotna obdelava lesa negativno vpliva na strukturno homogenost in posledično na mehanske lastnosti, saj lahko lokalno poveča verjetnost nastanka šibkih mest.

Numerične metode so zelo uporabno orodje v primerih, ko imamo opravka s kompleksnimi geometrijami, materiali in obremenitvami, kjer je težko dobiti analitično rešitev. Rezultati numeričnega modela so močno odvisni od predpisanih robnih pogojev, ki morajo čim bolj realno popisati dejansko stanje. V kolikor vseh robnih pogojev ne poznamo (geometrija, materialne konstante,...) in jih privzamemo iz literature, prihaja do značilnih odstopanj odziva modela, ki v tem primeru služi le za grobo oceno obnašanja realnega preizkušanca.

6 VIRI

- Arnold M. 2010. Effect of moisture on the bending properties of thermally modified beech and spruce. *Journal of Materials Science*, 45: 669–680
- Borrega M., Kärenlampi P. P. 2008. Mechanical behaviour of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 66: 63-69
- Brancheriau L., Baillères H. 2002. Natural vibration analysis of clear wooden beams: A theoretical review. *Wood Science and Technology*, 36: 347-365
- Bucur V. 2006. *Acoustics of wood*. Berlin, Springer Verlag: 393 str.
- Čufar K. 2009. Les jelke kot material in tkivo dreves. *Zbornih gozdarstva in lesarstva*, 89: 55-66
- Gorišek Ž. 2009. Les: zgradba in lastnosti: njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.
- Gorišek Ž. 2012. Mehanske lastnosti lesa: Napetost in deformacija. Gradivo s predavanj – Tehnologija lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo. http://les.bf.uni-lj.si/uploads/media/09_Mehanske_lastnosti_lesa_02.pdf (6.7.2016)
- Hein P.R.G., Lima J.T., Gril J., Rosado A.M., Brancheriau L. 2010. Resonance of scantlings indicates the stiffness even of small specimens of Eucalyptus from plantations. *Wood Science and Technology*, 46: 621-635
- Hill C. A. S. 2006. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. Bangor, University of Wales, School of Agricultural and Forest sciences: 19-22, 99-118
- Humar M. 2010. Modifikacija lesa. Gradivo iz predavanj – Zaščita lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 38
- Keunecke D., Merz T., Sonderegger W., Schnider T., Niemz P. 2011. Stiffness moduli of various softwood and hardwood species determined with ultrasound. *Wood Material Science and Engineering*, 6, 3: 91-94
- Plos M. 2012. Razvrščanje konstrukcijskega lesa v različne kombinacije trdnostnih razredov. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 8-10
- Ren Z., Ulbin M. 2002. *MKE Praktikum za NASTRAN*. Navodila za vaje. Maribor, Fakulteta za strojništvo: 197 str.

- Ross R.J. 2008. Transverse Vibration Techniques – Logs to Structural Systems. USA, Minnesota, Duluth, 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood: 13-15
- Ross R.J., Pellerin R.F. 1994. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review. <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr70.pdf> (4.7.2016)
- Rusche H. 1973. Thermal degradation of wood at temperatures up to 200 deg. C. Part I. Strength properties of wood after heat treatment. Holz als Roh- und Werkstoff, 31, 7: 273-281
- SIST EN 350-2 (1994). Durability of wood and wood-based products – Natural durability of solid wood – Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe.
- Srpčič J., Plos M., Pazlar T., Turk G. 2010. Indikativne lastnosti za razvrščanje žaganega konstrukcijskega lesa po trdnosti. Les, 62: 490-496
- Straže A. 2015. Karakterizacija fizikalnih lastnosti lesa z nedestruktivnimi metodami: Gradivo za predavanja. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 9-14
- Tankut N., Zor M. 2014. Finite Element Analysis of Wood Materials. Drvna industrija, 65, 2: 159-171
- ThermoWood Handbook. 2003 Helsinki, Finnish Thermowood Association: 2-8

ZAHVALA

Zahvaljujem se doc. dr. Alešu Stražetu za mentorstvo pri izdelavi diplomskega projekta, za njegovo pomoč in podporo pri izvedbi meritev ter za številne nasvete pri pisanju diplomske naloge.

Zahvaljujem se somentorju prof. dr. Gorazdu Fajdigi za njegovo pomoč in koristne nasvete.

Prav tako se zahvaljujem prof. dr. Željko Gorišku za recenzijo diplomskega projekta.