

ODREĐIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA SASTAVLJENOG "I" DRVENOG NOSAČA

Markas, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac
University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:916833>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied
Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO

FILIP MARKAS

**ODREĐIVANJE MEHANIČKIH
SVOJSTAVA SASTAVLJENOG „I“
DRVENOG NOSAČA**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2024. godina

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO

FILIP MARKAS

**ODREĐIVANJE MEHANIČKIH
SVOJSTAVA SASTAVLJENOG „I“
DRVENOG NOSAČA**

ZAVRŠNI RAD

Dr. Sc. Josip Hoster, prof.struč.st.

KARLOVAC, 2024. godina



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Klasa:
602-07/ __-01/ __

Ur.broj:
2133-61-04- __-01

Datum:

ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA

* Ime i prezime	Filip Markas		
OIB / JMBG	02819846107		
Adresa			
Tel. / Mob./e-mail			
Matični broj studenta	0110615015		
JMBAG	0248052928		
Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija)	<input checked="" type="checkbox"/> preddiplomski	<input type="checkbox"/> specijalistički diplomski	
Naziv studija	Stručni studij strojarstva		
Godina upisa	2015		
Datum podnošenja molbe	12.10.2023.		
Vlastoručni potpis studenta/studentice			

* Naslov teme na hrvatskom: **Određivanje mehaničkih svojstava sastavljenog „I“ drvenog nosača**

* Naslov teme na engleskom: **Determination of mechanical properties of assembled „I“ wooden beam**

Opis zadatka:

U završnom radu potrebno je opisati mehanička svojstva drva. Opisati načine spajanja piljenih sušenih drvenih poluproizvoda (daski, furnira i sl.) u „I“ oblik nosača. Opisati konstrukcijske zahtjeve na kalup (stroj) za izradu ljepljenih „I“ profila. Opisati postupak mjerenja mehaničkih svojstava ljepljenog „I“ profila.

Kao eksperimentalno – numerički dio zadatka konstruirati mjerno postolje za savijanje u 3 točke. Odrediti svojstva pri savinjanju osnovnog drveta. Odrediti čvrstoću (granicu popuštanja) ljepljenog spoja rebra i pojasnih dijelova, te čvrstoće pojasnih dijelova. Uzorak prikazati kao sklopni crtež.

Zadatak izraditi i uvezati u skladu s Pravilnikom o završnim radovima Veleučilišta u Karlovcu.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija, stručne literature i interneta. Izrada ovog završnog rada omogućila mi je produbljivanje znanja o mehaničkim svojstvima drveta i njegovoj analizi. Kroz proces istraživanja, snimanja i analiziranja njegovih svojstava, stekao sam vrijedna iskustva u primjeni i tehnologiji drveta. Ovaj rad je bio izazovno, ali istovremeno i vrlo korisno iskustvo koje će mi zasigurno biti od velike pomoći u budućim radovima u ovom području.

Zahvaljujem se svima koji su mi pomogli u izradi ovog završnog rada. Posebno se želim zahvaliti svom mentoru dr. sc. Josip Hoster, prof. struč. stud. na strpljenju, vodstvu i korisnim savjetima tijekom cijelog procesa. Također želim zahvaliti svojoj obitelji koja me uvijek podržava u mojim nastojanjima.

Karlovac, 09.03.2024

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Građa drveta.....	2
2. FIZIČKA SVOJSTVA	4
2.1. Fizička svojstva drveta	4
2.2. Poroznost drveta	4
2.3. Sušenje drveta.....	6
2.4. Težina drveta	6
2.5. Promjenjivost dimenzija	7
2.6. Trajnost drveta	9
3. MEHANIČKA SVOJSTVA.....	11
3.1. Tvrdća	11
3.2. Otpornost na trošenje	13
3.3. Čvrstoća	13
3.3.1. Čvrstoća na vlak	14
3.3.2. Čvrstoća na tlak	17
3.3.3. Čvrstoća na savijanje	20
3.3.4. Čvrstoća na smicanje	21
3.4. Elastičnost drveta.....	23
4. SPAJANJE DRVENIH NOSAČA	25
4.1. Spojevi s vijcima.....	27
4.2. Spojevi s drvenim tiplama	29
4.3. Spajanje sa čavlina.....	30
4.4. Lijepljeni spoj	30
4.4.1. Postupak spajanja lijepljenjem drvenih elemenata u jednu cijelinu.....	31
4.5. Dimenzioniranje lijepljenog drvenog nosača	34
4.5.1. Osnovna dopuštena naprezanja	34
4.5.2. Proračun deformacija.....	35
4.5.3. Dimenzioniranje poprečnih presjeka lijepljenih nosača	38
5. MJERENJE MEHANIČKIH SVOJSTVA	42
5.1. Statičko vlačno ispitivanje	42
5.1.1. Svrha ispitivanja	42
5.1.2. Mehanička svojstva određena vlačnim ispitivanjem	43
5.2. Statičko tlačno ispitivanje.....	45
5.2.1. Mehanička svojstva utvrđena tlačnim ispitivanjem.....	46

5.3.	Savojno ispitivanje.....	47
6.	EKSPERIMENTALNO – NUMERIČKI DIO.....	49
6.1.	Priprema uzoraka	49
6.2.	Oprema	51
6.3.	Rezultati ispitivanja	53
6.3.1.	Savojna čvrstoća i modul.....	53
6.3.2.	Posmična naprezanja i modul smicanja.....	60
6.3.3.	Savojna i posmična čvrstoća u spoju.....	63
6.3.4.	Dopuštena nosivost u spoju nosača	65
6.4.	Analiza rezultata	67
7.	ZAKLJUČAK.....	69

POPIS SLIKA

Slika 1. Odnosi dopuštenih naprezanja drveta i betona. [4].....	2
Slika 2. a) Presjek stabla, b) uvećani prikaz godova. [5]	3
Slika 3. Poprečni presjek stabla. [7]	3
Slika 4. Vakumske sušare za drvo. [12]	6
Slika 5. Karakteristične deformacije drveta kao posljedica različitog sakupljanja u različitim smjerovima. [14]	7
Slika 6. Dijagram vlažnosti sakupljanjem i bubrenjem. [16].....	8
Slika 7. Daska. [18].....	9
Slika 8. Greda. [19]	9
Slika 9. Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Brinelu. [25].....	11
Slika 10. Postupak ispitivanja tvrdoće metodom Janka. [26]	12
Slika 11. Čvrstoća vlakanca napregnut na vlak. [32].....	14
Slika 12. Dijagram σ - ϵ . [34].....	16
Slika 13. Promjena vlačne čvrstoće u odnosu djelovanja sile pod kutem . [36]	16
Slika 14. Čvrstoća vlakanca opterećena na tlak. [37]	17
Slika 15. Dijagram σ - ϵ na tlak. [38]	17
Slika 16. Odnos Modula elastičnosti s vlažnosti. [40]	19
Slika 17. Tlačno djelovanje sile pod kute, tlak okomit na vlakna, radijalno opterećenje, te tangencijalno. [41].....	19
Slika 18. Čvrstoća drveta na tlak okomita na vlakna (gnječenje drveta). [42]	20
Slika 19. Dijagram σ - ϵ okomita na tlak (gnječenje). [44].....	20
Slika 20. Čvrstoća drveta opterećena na savijanje. [45]	21
Slika 21. a) Radijalna ravnina b) tangencijalna ravnina okomita na vlakna. [47]	21
Slika 22. c) Tangencijalno i d) radijalno smicanje. [48]	22
Slika 23. e) Tangencijalno smicanje f) radijalno smicanje paralelno vlaknima. [49].....	22
Slika 24. Neravnomjerna raspodjela naprezanja. [50]	23
Slika 25. Spoj dva drvena elementa čavlima. [54].....	25
Slika 26. Za određivanje dopuštene nosivosti u spoju uzima se pomak spoja ($f_s \leq 1,5\text{mm}$)	26
Slika 27. Dijagram nosivosti i pomaka. [55].....	26
Slika 28. Dijagram spojnih veza nosivosti i pomaka. [56].....	27
Slika 29. Vijak za drvo. [58]	28
Slika 30. Spoj s drvenim tiplama. [63].....	29
Slika 31. Nanošenje ljepila na priključni drveni element. [67].....	31
Slika 32. Priprema drvene površine brušenjem. [68]	32
Slika 33. Nanošenje ljepila na drvo. [69]	32
Slika 34. Stezanje ljepljenog spoja. [73]	34
Slika 35. Dijagram deformacije u odnosu na iskoristivost presjeka. [79].....	37
Slika 36. Koficijenti e_1 i e_2 . [83]	40
Slika 37. Presjek "I" profila. [85]	41
Slika 38. Mjesta izrezivanja epruveta za ispitivanje mehaničkih svojstava. [86]	42
Slika 39. Statičko vlačno ispitivanje. [89].....	43
Slika 40. Dijagram naprezanje - istezanje. [90]	44
Slika 41. Konvencionalna granica razvalčenja za plastične deformacije od 0,01% do 0,2%. [91]	45
Slika 42. Tlačno ispitivanje mehaničkog svojstva. [94].....	46
Slika 43. Dijagram savijanje - nabijanje za a-sivi ljev, b-konstruktivski čelik, c-olovo. [96] .	47
Slika 44. Trotočkasto savijanje uzorka (shematski). [97]	47
Slika 45. Brusni papir P80 i P120 dimenzija 230x280 mm.	49

Slika 46. Izrezani uzorci dimenzija 1500x50x10 mm.....	49
Slika 47. Ljepilo za drvo	50
Slika 48.a) Lijepljenje, b) stezanje rebrenih i pojasnih profila.	50
Slika 49. Drveni nosači "I" profila	51
Slika 50. Priprema uzoraka za savojno ispitivanje.....	52
Slika 51. Dimenzije pojasnog, rebrenog "I" profila.	54
Slika 52. Grafički prikaz savojnog ispitivanja uzoraka.....	57
Slika 53. Savojni moduli a) uzorak 1, b) uzorak 2, c) uzorak 3.....	59
Slika 54. Statički moment dijela poprečnog presjeka u točkama.....	61
Slika 55. Prikaz odstranjenog trulog dijela ,vlažnost, te smjer i raspored vlakana nosača 1 ...	67
Slika 56. Dijagram progiba u ovisnosti sile.	68

POPIS TABLICA

Tablica 1. Faktori debljine drveta. [3].....	1
Tablica 2. Prosječna zapremnina težine drveta u kg/m^3 . [9]	5
Tablica 3. Zapremnina za suho drvo ($\leq 15\%$ vlage). [10].....	5
Tablica 4. Srednje vrijednosti koeficijenta. [17]	8
Tablica 5. Trajnost drveta za neobrađeno drvo. [21]	10
Tablica 6. Tvrdća pojedinih vrsta drveta. [28]	13
Tablica 7. Vrsta naprezanja između crnogoričnog i bijelogoričnog drveta. [31].....	14
Tablica 8. Čvrstoća na vlak pojedinih vrsta drveta. [33]	15
Tablica 9. Čvrstoća drveta na tlak // vlaknima i okomito vlaknima. [39].....	18
Tablica 10. Modul elastičnosti za pojedine vrste drveta. [53]	24
Tablica 11. Koeficijent trenja drveta. [60]	29
Tablica 12. Promjer čavla prema debljini drva. [65].....	30
Tablica 13. Potreban tlak pri lijepljenju. [72]	33
Tablica 14. Dopuštena naprezanja N/cm^2 . [75].....	35
Tablica 15. Moduli elastičnosti i smicanja za lijepljene nosače (kN/cm^2). [77]	36
Tablica 16. Koeficijent α zavisno o vlažnosti drva. [78]	36
Tablica 17. Maksimalni dopušteni % vlažnosti. [81].....	38
Tablica 19. Koeficijent $\left[\frac{30}{H} \right]^{1/9}$ poprečnog presjeka. [82]	39
Tablica 20. Očitani progibi i maksimalna sila.....	55
Tablica 21. Naprezanja i istežanja ispitnih uzoraka "I" profila.....	56
Tablica 22. Posmična naprezanja ispitnih uzoraka „I“ profila.....	62
Tablica 23. Omjeri modula smika i modula elastičnosti.....	63
Tablica 24. Savojno i posmično naprezanje u spoju nosača "I" profila.	64

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
α	%	Poroznost drveta
γ	kg/m ³	Zapremninska težina drveta
γ_s	kg/m ³	Specifična zapremninska težina
n	%	Vlažnost drveta
G_0	kg	Težina drveta prije sušenja
G	kg	Težina drveta poslije sušenja
α_t		Koeficijent skupljanja odnosno bubrenja u tangencijalnom smjeru
α_r		Koeficijent skupljanja odnosno bubrenja u radijalnom smjeru
b	mm	Širina drvenog elementa
h	mm	Visina drvenog elementa
Δw	%	Razlika vlažnosti drva
σ_{vd}	MPa	Vlačno naprezanje
σ_{td}	MPa	Tlačno naprezanje
σ_{fd}	MPa	Savojno naprezanje
$\tau_{//d}$	MPa	Tangencijalno smicanje
$\tau_{\perp d}$	MPa	Presjecanje vlakna
$\sigma_{\perp td}$	MPa	Radijalni tlak
ε	‰	Relativna deformacija
φ		Odnos djela čvrstoće s čvrstoćom loma
E	MPa	Modul elastičnosti
$\tau_{//sr}$	MPa	Srednje smično naprezanje paralelno vlaknima
A_τ	mm ²	Površina smicanja
T	N	Sila koja djeluje pri smicanju
Δ	mm	Pomak u spoju drvenog elementa
D	mm	Promjer pločice
d	mm	Promjer vijka
N_1	N	Sila koju može prenjeti jedan vijak
σ_{ad}	MPa	Dopušteno naprezanje na zatezanje za vijak
μ		Koeficijent trenja u ravini spoja
G	MPa	Modul smika drveta
σ_{rmd}	MPa	Reducirano dopušteno naprezanje
K_h		Faktor reduciranja za pravokutne profile
K_s		Faktor reduciranja za „I“ profile
t	mm	Debljina „I“ profila
h_1	mm	Visina rebrenih profila

R_e	MPa	Granica razvlačenja
F_e	N	Sila tečenja
S_0	mm ²	Ploha poprečnog presjeka
R_m	MPa	Naprezanje pri djelovanju maksimalne sile
F_m	N	Maksimalna sila
R_{et}	MPa	Granica stlačivanja
F_{et}	N	Sila tečenja pri tlaku
R_{mt}	MPa	Tlačno naprezanje pri djelovanju maksimalne sile
F_{mt}	N	Maksimalna sila pri tlačnom ispitivanju
R_{ms}	MPa	Svojno naprezanje pri djelovanju maksimalne sile
L_s	mm	Razmak između dva oslonca
W	mm ³	Moment otpora plohe poprečnog presjeka
Q	N	Poprečna sila koja djeluje na uzorak
S_y	mm ³	Statički moment presjeka
I_y	mm ⁴	Moment tromosti

**ODREĐIVANJE MEHANIČKIH SVOJTAVA SASTAVLJENOG „I“
DRVENOG NOSAČA****SAŽETAK**

U ovom radu provedena je eksperimentalna analiza određivanja mehaničkih svojstava sastavljenog drvenog nosača “I” profila. Na temelju dobivenih podataka proračunata su naprezanja prema analitičkim izrazima. Nakon prezentiranja mehaničkih svojstava drva opisani su načini spajanja piljenih, sušenih i drvenih proizvoda u “I” profil oblik nosača. Razrađeni su konstrukcijski zahtjevi za stroj za izradu “I” profila. Rad je podijeljen u uvodni, toretski i praktični dio. U uvodnom dijelu se govori općenito o drvetu kao materijalu. Teoretski dio sadrži opis svojstava drveta i postupke mjernja mehančkih svojstava sastavljenog “I” profila. U praktičnom dijelu prikazana je konstrukcija mjerenog postolja u tri točke, te svojstva pri savijanju drveta.

Ključne riječi: drvo, „I“ profil, mehanička svojstva, spajani nosači

DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF ASSEMBLED „I“ WOODEN BEAM**SUMMARY**

In this paper, an experimental analysis of determination of mechanical properties of assembled wooden “I” profile beam was carried out. Based on the obtained data, stresses were calculated according to analytical expressions. After presenting the mechanical properties of wood, the methods of joining sawn, dried and wooden products into the "I" profile shape of the beam are described. The design requirements for the machine for the production of "I" profiles have been elaborated. The paper is divided into an introductory, theoretical and practical part. The introductory part talks about wood as a material in general. The theoretical part contains a description of the properties of wood and procedures for measuring the mechanical properties of the assembled "I" profile. In the practical part, the construction of the measured stand in three points, as well as its properties when bending wood, are presented.

Key words: wood, „I“ profile, mechanical properties, assembled beams

1. UVOD

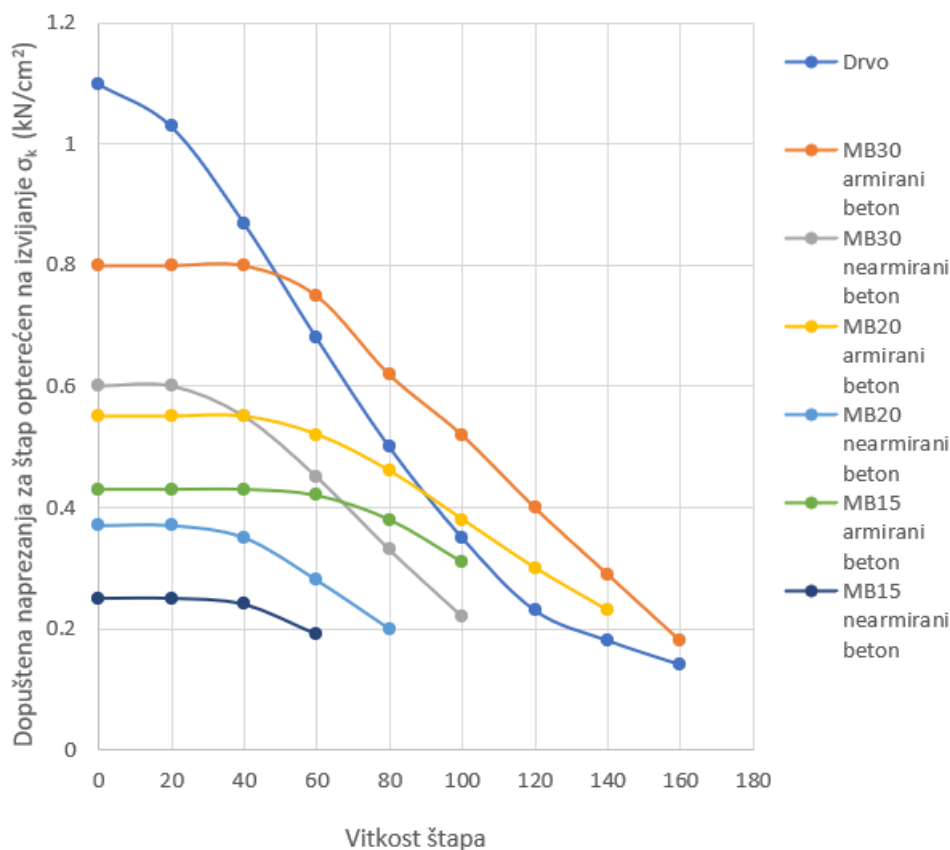
Drvo je prirodni materijal koji se dobiva od drvenastih biljaka, najčešće od debla stabla, ali također se može koristiti i drvo grana. Pored kamena, to je dugi niz godina bio osnovni materijal za građenje. Prva skrovišta i nastambe bila su napravljena od drveta. Drvo je porozan, nehomogen, anizotropan, vlaknast i higroskopan materijal sastavljen od celuloze (40-50 %), drvnih polioza (20-30%) i popratnih tvari kao što su minerali, smole itd. Svojstva drva odraz su njegovog prirodnog porijekla, tj. građe. [1]

Za drvene konstrukcije od velikog je interesa deblo drveta. Poprečni presjek debla je uglavnom krug, ili, bolje rečeno, oblik blizak krugu. Pod debljinom stabla podrazumjeva se promjer stabla. Njegova debljina zavisi od mnogih faktora koji su prikazani na tablicama ispod. [2]

Tablica 1. Faktori debljine drveta. [3]

ODNOSI IZMEĐU VISINE I GODINA STAROSTI STABLA					
Vrste drveta	Starost drveta u godinama				
	40	60	80	100	120
	Visina stabala u metrima				
Hrast	7-18	11-24	15-28	17-31	20-33
Bukva	5-17	9-24	12-30	15-35	17-38
Jela	3-13	8-25	13-28	15-32	17-34
Bor	6-18	8-22	10-26	11-29	20-31
ODNOSI IZMEĐU DEBLJINA I GODINE STAROSTI STABLA					
Vrste drveta	Starost drveta u godinama				
	40	60	80	100	120
	Debljina u centimetrima				
Hrast	6-16	13-25	20-23	27-40	32-47
Bukva	4-14	11-23	14-29	18-36	21-43
Jela	2-12	7-24	13-34	18-41	23-46
Bor	8-16	11-23	15-33	18-43	25-49

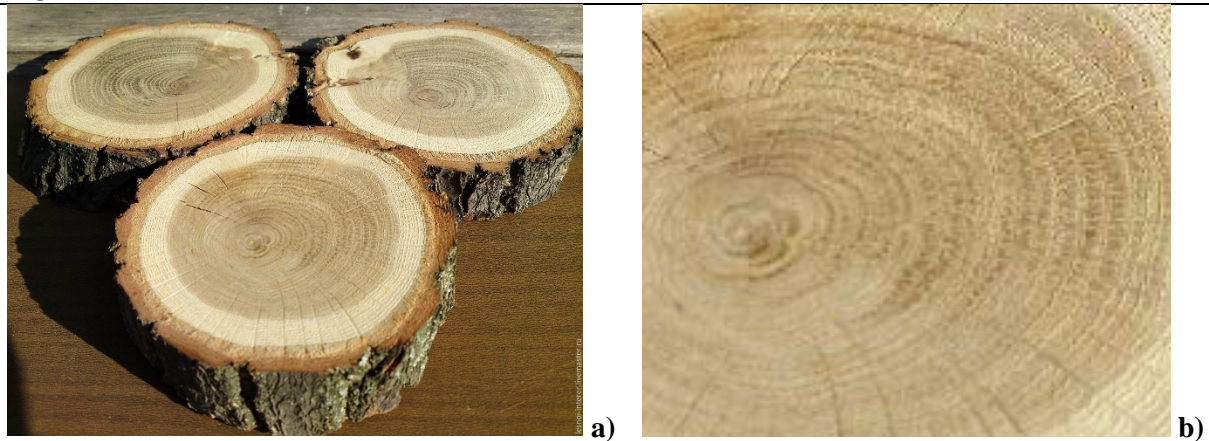
U mnogo slučajeva drvo se uspješno nosi sa betonom i čelikom. Čvrstoća drveta (1 kvalitetne klase) veća je nego čvrstoća nekih betona, pa su dozvoljena naprezanja dosta veća. Na slici 1. prikazani su odnosi dopuštenih naprezanja između drveta i betona za neke slučajeve naprezanja.



Slika 1. Odnosi dopuštenih naprezanja drveta i betona. [4]

1.1. Građa drveta

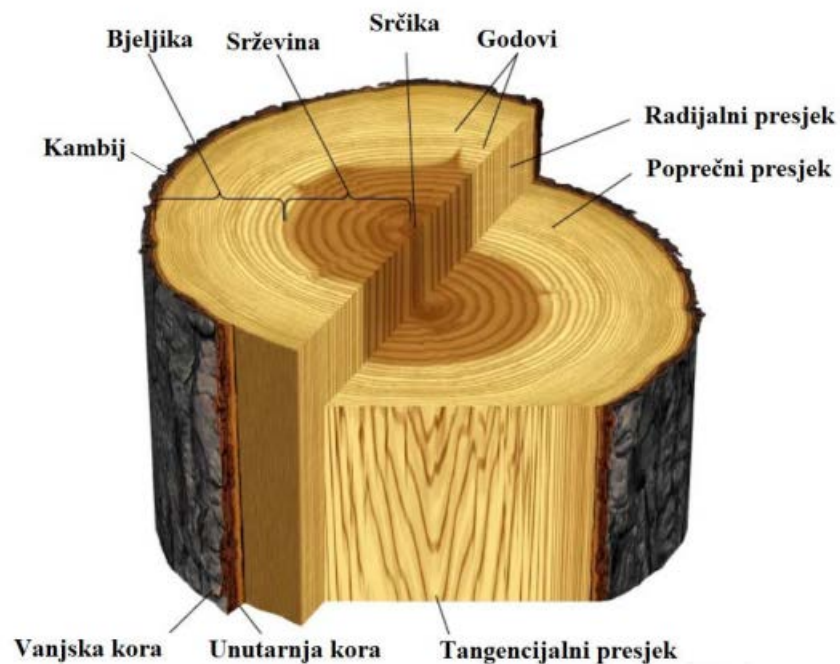
Zbog načina rasta i nastajanja, drvo je po svojoj unutrašnjoj građi slično nizu tankih i šupljih cilindara koji se nižu jedan na drugi, prirodno uvijek širi na uži. Na poprečnom presjeku drveta ti cilindri formiraju koncentrične krugove oko središta presjeka. Svaki od tih krugova nastaje godišnjim rastom drveta i naziva se god drveta.



Slika 2. a) Presjek stabla, b) uvećani prikaz godova. [5]

Na jednom poprečnom presjeku stabla koje je pravilno raslo razlikuju se:

- Srž(srce) drveta, dio drveta oko anatomske osi stabla,
- Srčevina, dio drveta gdje se već odigrao proces rasta,
- Bijelikovina, dio gdje je proces stabla još u tijeku. [6]



Slika 3. Poprečni presjek stabla. [7]

2. FIZIČKA SVOJSTVA

2.1. Fizička svojstva drveta

Fizička svojstva drveta su ona svojstva koja se javljaju kao posljedica djelovanja prirodnih sila (sila teža, kretanje vode, valova, zvuka, topline, elektriciteta i svjetla).

U fizička svojstva ubraja se:

- Poroznost drveta,
- Vlažnost drveta,
- Sušenje,
- Težina,
- Promjenjivost dimenzija,
- Trajnost. [8]

2.2. Poroznost drveta

Poroznost drveta – je osnovno fizičko svojstvo (po kome se drvo razlikuje od metala).

Pod pojmom poroznost porazumjeva se odnos između ukupne zapremine pora prema zapremnini suhog drveta izraženo u postocima (1):

$$\alpha = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} \quad (1)$$

Ovdje je γ zapremninska težina potpuno suhog drveta, a γ_s je specifična težina drveta, koja je jednaka za sve vrste stabla, a ona iznosi 1,50 ($1500 \frac{kg}{m^3}$)

Pore čine od 55% (hrast, bukva) do 75% (borovina) zapremnine drveta.

Tablica 2. Prosječna zapremina težine drveta u kg/m³. [9]

Vrsta drveta	Sirovo (30% vlage)	Sušeno (15-20% vlage)	Apsolutno suho (≤ 15% vlage)
Bor	700	520	490
Jela	1100	450	410
Smreka	730	470	430
Hrast	1010	690	650
Bukva	1070	720	690

Tablica 3. Zapremina za suho drvo (≤15% vlage). [10]

Vrsta drveta	Minimalna	srednja	Maksimalna
Smreka	300	430	640
Jela			
Bor (obični)	300	490	860
Ariš	400	650	820
Hrast	490	680	880
Bukva	390	650	930

Vlažnost drveta je neugodna pojava i vrlo je pomjenjiva, jer je drvo higroskopan materijal (svojstvo čvrstih ili tekućih tvari da upijaju ili zadržavaju vodu iz okoline).

Ono utječe na njegove mehaničke osobine. Postotak vlažnosti (n%) dobiva se iz težinskog odnosa prije sušenja (G_0) i poslije sušenja (G). (2)

$$n = \frac{G_0 - G}{G_0} * 100 \quad (2)$$

Treba razlikovati dva područja vlažnosti drveta:

- Kapilarno područje sa vlažnošću > od 30 % (to je slobodna kapilarna voda koja ispunjava šupljine drvenih stanica, odnosno prazne prostore između vlakana i ćelija,
 - Higroskopno područje sa vlažnošću do ≈ 30 % (voda koju sadrže zidovi vlakna i ćelije.
- [11]

2.3. Sušenje drveta

Sušenje drveta se može izvršiti na dva načina:

- Prirodnim putem sušenjem na zraku, uglanom drva manjih dimenzija , propisno složena izlaže se strujanjem zraka, a takav proces traje nekoliko tjedana,
- Tehničko sušenje, kade se drvo slaže u specijalne komore sušare i intezivno se izlaže usmerenom srujanju zraka određene temperature i vlažnosti.



Slika 4. Vakumske sušare za drvo. [12]

2.4. Težina drveta

Težina drveta zavisi od mnogih faktora, a na nju utječu mnogobrojni faktori kao što su :

- Vrsta,
- Starost,
- Građa drveta,
- Poroznost,
- Vlažnost,
- Lokacija drveta.

Kod razmatranja težine drveta treba razlikovati zapreminsku masu u normalnim uvjetima

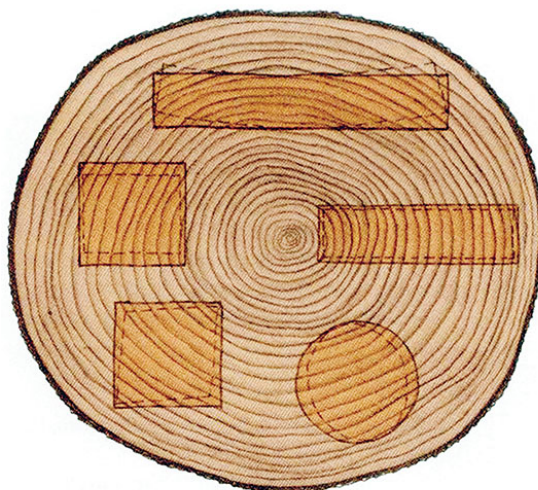
(relativna vlažnost 65% i temperatura 20°C) i za apsolutno suho drvo. [13]

2.5. Promjenjivost dimenzija

Promjenjivost dimenzija zavisi od sakupljanja i bubrenja drveta. Pod pojmom sakupljanja odnosno bubrenja drveta podrazumjevaju se promjene dimenzije, zbog variranja postotka vlažnosti. Promjena dimenzija je različita u različitim smjerovima, jer je drvo diskontinuirani, heterogeni i anizotropni materijal.

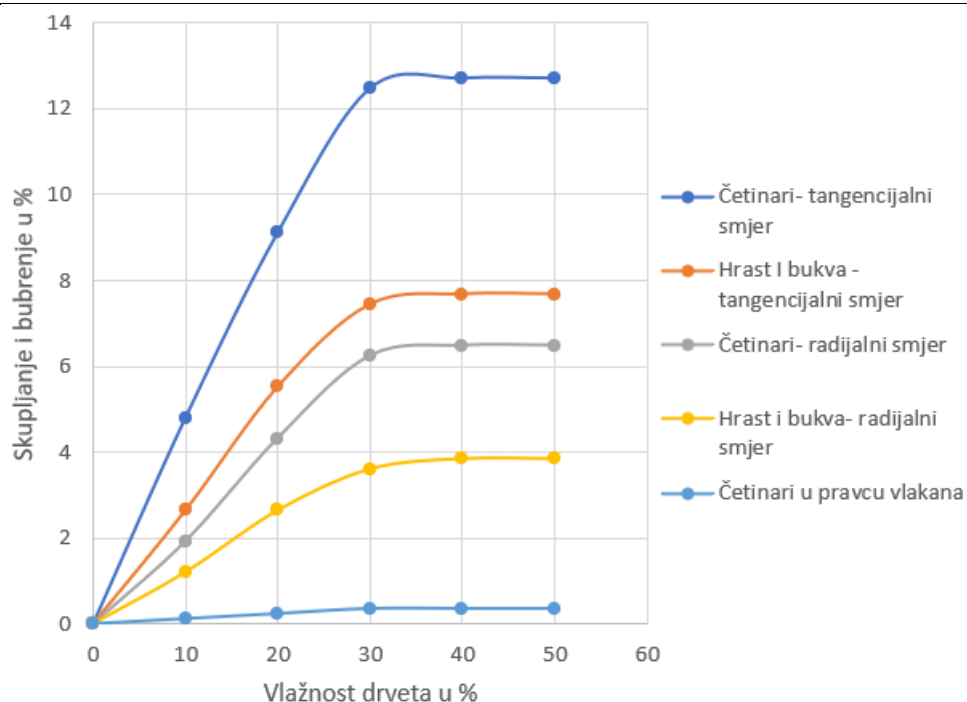
Ova sakupljanja su:

- U pravcu vlakana od 0.1 do 0.35%,
- U radijalnom pravcu 2 do 6.5%,
- U tangencijalnom pravcu 4 do 12%.



Slika 5. Karakteristične deformacije drveta kao posljedica različitog sakupljanja u različitim smjerovima. [14]

Bubrenje drveta je obrnuta pojava od sakupljanja. Mlado drvo više bubri od starijeg, a suho više od prosušenog. U higroskopskom području, sa vlažnošću drveta do 30 % postoji praktički linearna zavisnost između sakupljanja odnosno bubrenja u postotku vlažnosti što se najbolje vidi na slici 6. [15]



Slika 6. Dijagram vlažnosti sakupljanjem i bubrenjem. [16]

Srednje vrijednosti sakupljanja odnosno bubrenja u postocima pri promjeni vlažnosti za 1% može se vidjeti u sljedećoj tablici

Tablica 4. Srednje vrijednosti koeficijenata. [17]

Vrsta drveta	Tangencijalno α_t	Radijalno α_R	// vlaknima $\alpha_{//}$
Europski četinari (400 kg/m ³)	0,24	0,12	0,01
Hrast i bukva (650 kg/m ³)	0,40	0,20	0,01

Veličinu sakupljanja i bubrenja može se izračunati na osnovu danih koeficijenata sakupljanja odnosno bubrenja i dimenzija elemenata preko jednadžbi(3),(4) i (5)

Za gredu:

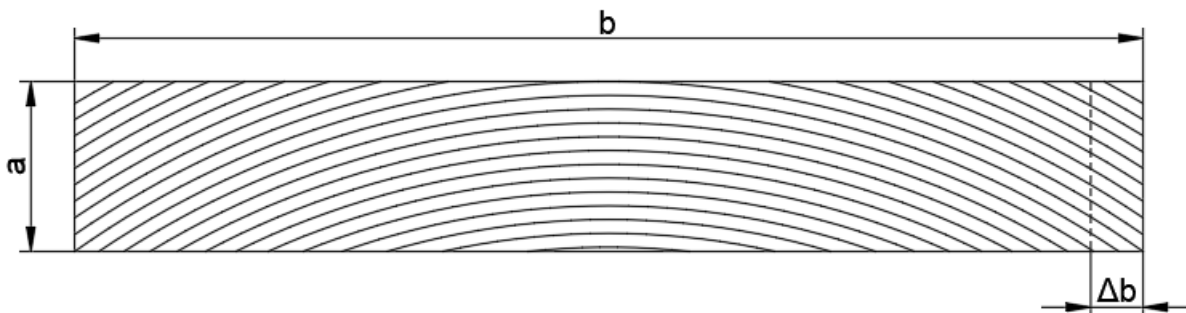
$$\Delta h = 0,5(\alpha_t + \alpha_r) * \frac{\Delta w}{100} * h \quad (3)$$

$$\Delta b = 0,5(\alpha_t + \alpha_r) * \frac{\Delta w}{100} * b \quad (4)$$

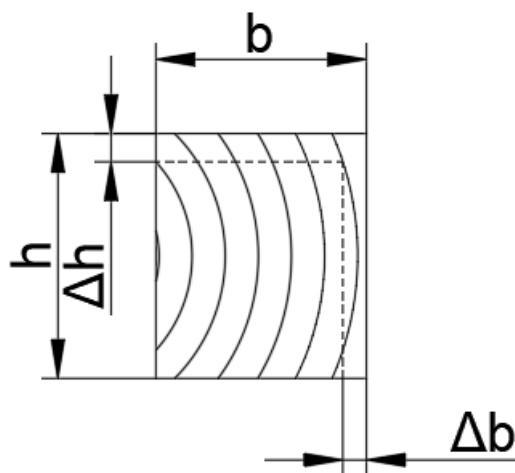
Za dasku:

$$\Delta b = \alpha_t * \frac{\Delta w}{100} * b \quad (5)$$

Gdje su α_t i α_r koeficijenti sakupljanja odnosno bubrenja; b i h su dimenzije elemenata za određenu vlažnost drveta (w%) i Δw je razlika vlažnosti za koju se traži promjena dimenzija.



Slika 7. Daska. [18]



Slika 8. Greda. [19]

2.6. Trajnost drveta

Trajnost drveta je osobina da ono može duže ili kraće vrijeme zadržati svoja prirodna svojstva, posebno svoju građu, boju, tvrdoću, i čvrstoću. Ona varira u velikim vremenskim intervalima zavisno od kvalitete i kvantitete utjecaja koja djeluje na drvo. [20]

Tablica 5. Trajnost drveta za neobrađeno drvo. [21]

Vrsta drveta		Drvo traje u godinama				
		Izloženo utjecaju zraka			U prostorijama u kojem je dobro zaštićeno od vlage	Posve potopljeno u slatku vodu
		U dodiru sa zemljom	Bez dodira sa zemljom			
			Otkriveno	Pod krovom		
1.	Hrast Kesten Brijest Bagrem Grab	8-12	60-120	200- više	Neograničeno: Dostiže do 500 godina	500, 600 i na više
2.	Jasen Breza Javor	4-6	20-60	100 i više	Neograničeno: Dostiže do 500 godina	50-100 godina
3.	Bukva Platan Topola Vrba Lipa	Manje od 4	Manje od 30	50 i više	Neograničeno: Dostiže do 500 godina	Manje od 50 godina
4.	Ariš Bor	8-12	50-100 40-80	150 i više	Neograničeno: Dostiže do 500 godina	500 godina i više
5.	Jela	< 4	30-50	50 i više	Neograničeno: Dostiže do 500 godina	Manje od 50 godina

3. MEHANIČKA SVOJSTVA

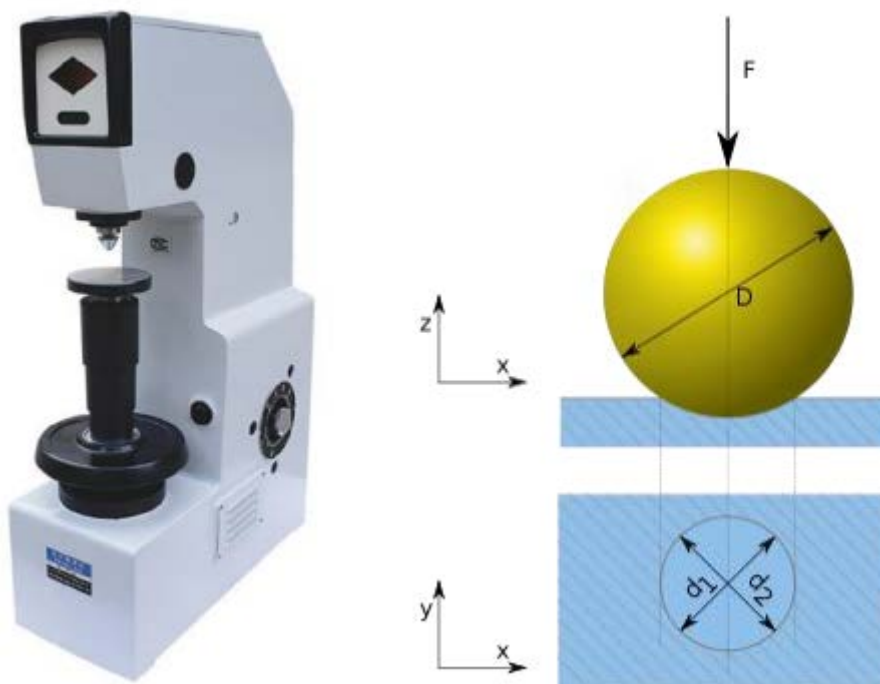
Pod pojmom mehanička svojstva drveta porazumijevamo sva ona svojstva koja su nastala pod utjecajem vanjskih sila. Pošto je drvo nehomogene građe i u potpunosti anizotropno njegova mehanička svojstva se međusobno razlikuju, kako između različitih vrsta tako i za drva iste vrste. [22]

3.1. Tvrdoća

Tvrdoća je sposobnost da se drvo suprotstavlja prodiranju nekog drugog tijela u njegovu masu. Tvrdoća ovisi o vrsti drveta, građi, kemijskom sastavu, vlažnosti, sadržaja smole u drvetu, mjestu lokacije u kojem se uzeo uzorak. Tvrdoća drveta je različita u različitim smjerovima: uzdužnom, radijalnom i tangencijalnom smjeru. Za ispitivanje tvrdoće koriste se nekoliko metoda, a najpoznatije su:

- Ispitivanje tvrdoće drva po Brinellu,
- Ispitivanje tvrdoće po Janki.

Kod Brinellove metode penetrator je kuglica od kaljena čelika promjera D koja se utiskuje silom F u površinske slojeve materijala. Tako u ispitivanom materijalu nastaje otisak u obliku kugline kalote promjera baze d i dubine h . [23] [24]



Slika 9. Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Brinellu. [25]

Za mjerenje tvrdoće drveta koristi se kugla promjera 10 mm. Sila kojom se utiskuje za mekše vrste drva iznosi 500 N, a za tvrde 1000 N. Vrijeme do postizanja konstantnog opterećenja iznosi 15 sekundi, a vrijeme konstantnog opterećenja iznosi 30 sekundi.

$$HB = \frac{2 * F}{\pi * D * (D - \sqrt{D^2 - d_s^2})} \quad (6)$$

Postupak ispitivanja po Janki metodi sastoji se u određivanju sile koja je potrebna da se čelična kuglica promjera 11,284 mm utisne u drvo do polovine svog promjera (5,642 mm).



Slika 10. Postupak ispitivanja tvrdoće metodom Janka. [26]

Na taj se način ostvaruje otisak na površini drva od 1 cm². Konstantna brzina utiskivanja kuglice može iznositi od 3 do 6 mm/min. Ispitivanja se vrše na uzorcima 50x50x30 mm. [27]

$$Hj = K * P \quad (7)$$

Tablica 6. Tvrdoća pojedinih vrsta drveta. [28]

VRSTA DRVETA	TVRDOĆA ($\frac{kg}{dm^2}$)
BAGREM	810
CRNI BOR	345
OBIČNI BOR	300
BOROVAC	200
BRIJEST	640
BREZA	-
BUKVA	780
DUGLAZIJA	300
GRAB	890
GVAJAK	1590
KARIJA	840
HRAST	650
JASEN	760
JAVOR	670
JELA	340
OBIČNI ORAH	700

3.2. Otpornost na trošenje

Otpornost na trošenje je sposobnost drveta da se ono suprostavlja narušavanju svoje površine pod utjecajem vanjskih sila (posebno onih koji izazivaju trenje, trošenje). Ono je direktno povezano s tvrdoćom. Isto tako otpornost zavisi od građe drveta, rasporeda i veličina pora. [29]

3.3. Čvrstoća

Čvrstoća drveta je mehaničko svojstvo od velike važnosti u drvenim konstrukcijama. Na njoj se zasnivaju primjene i svrsihodne upotrebe drveta. Čvrstoća predstavlja najbolje mjerilo trajnosti drveta.

Na čvrstoću drveta utječu mnogobrojni faktori:

- Vrsta drveta,
- Zapremninska težina,
- Građa drveta,
- Kemijski sastav,

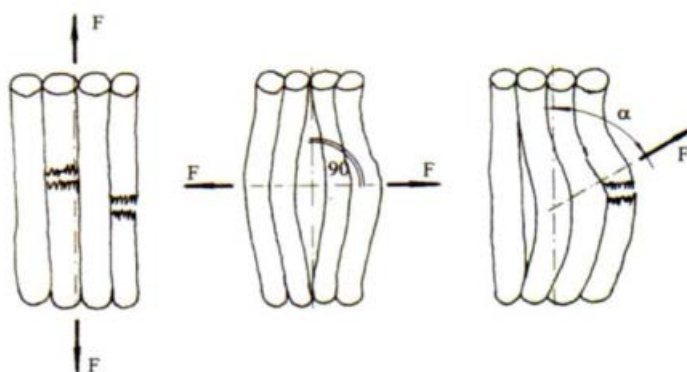
- Postotak vlažnosti ,
- Obrada drveta,
- Način spajanja elemenata. [30]

Tablica 7. Vrsta naprezanja između crnogoričnog i bijelogoričnog drveta. [31]

Vrsta naprezanja	Oznaka	Crnogorično ($\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$)	Bjelogorično ($\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$)
<i>Vlačno naprezanje</i>	σ_{vd}	80	95
<i>Tlačno naprezanje</i>	σ_{td}	90	100
<i>Svojno naprezanje</i>	σ_{fd}	100	120
<i>Tangencijalno smicanje</i>	$\tau_{//d}$	10	12
<i>Presjecanje vlakna</i>	$\tau_{\perp d}$	30	35
<i>Radijalni tlak</i>	$\sigma_{\perp td}$	20	30

3.3.1. Čvrstoća na vlak

Kada vlačna sila djeluje paralelno vlaknima koristi se čvrstoća drveta na vlak. Dakle, vlačna sila se direktno prenosi preko vlakna.



Slika 11. Čvrstoća vlakanca napregnut na vlak. [32]

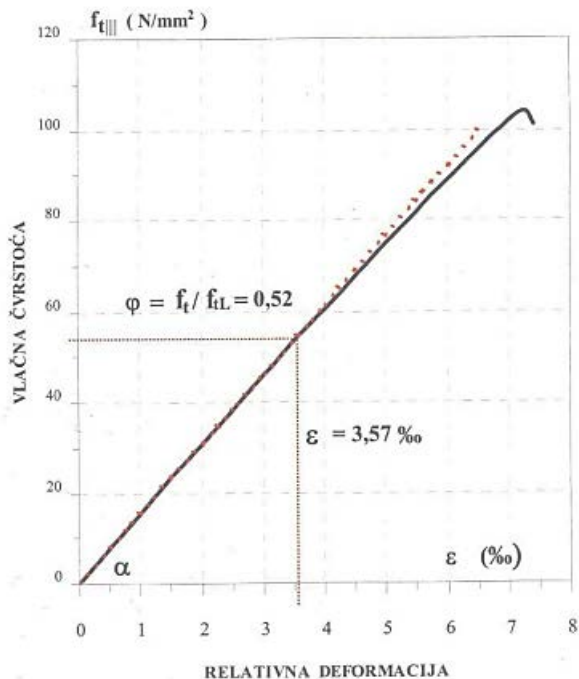
Iz tog razloga nepravilnosti građe drveta, posebno kvrgavost mogu uvelike umanjiti čvrstoću drveta na vlak paralelno s vlaknima (čak za 50- 85%).

Tablica 8. Čvrstoća na vlak pojedinih vrsta drveta. [33]

Vrsta drveta	Zapremninska težina kod 15% vlage- t/m^3	Naprezanja pri lomu		Naziv drveta
		Aksijalni kN/cm^2	Radijalni kN/cm^2	
Jela Omorika Smreka Neke vrste borova	0,4-0,50	9-12	150-200	Lagani četinari
Bor Ariš	0,50-0,70	10-15	200-300	Poluteški četinari
Topola Vrba Lipa Breza	0,45-0,65	8-10	200-250	Vrlo lagani i lagani listari
Hrast Bukva Jasen Brijest	0,65-0,80	10-15	250-350	Poluteški listari
Bagrem Voćke Šimšir Tvrda egzoična drva	0,8-1	12-18	350-600	Teški listari

Elastičnost drveta na vlak paralelno s vlaknima može se vidjeti na σ - ε dijagramu. Ovaj dijagram se dobije tako da se na apcisu nanose relativne deformacije u %

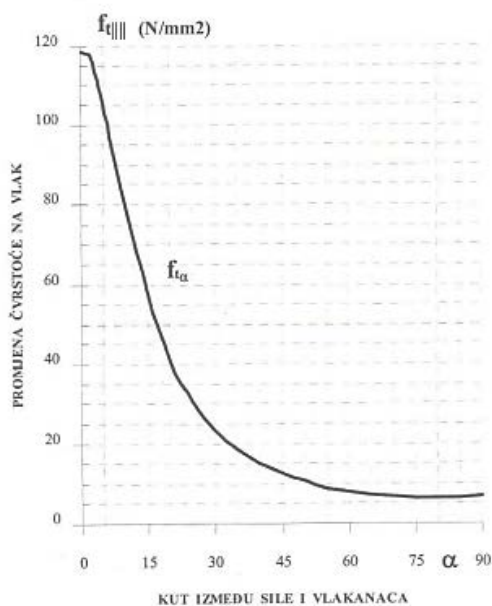
($\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$), a na ordinatu odnos (φ) čvrstoće na vlak izražen u djelovima čvrstoće do loma ($\varphi = \frac{\sigma}{\sigma_l}$). Iz slike se vidi da je od 0 do točke A ($\varphi=0,5$ i $\varepsilon=3,57\%$) linija ravna. Točka A se naziva granica proporcionalnosti. Poslije te točke linija postaje zaobljena odnosno odstupa od ravne linije. Lom materijala nastupa odmah, bez prethodno većih deformacija, a uzrok tome je drvo kao tvar.



Slika 12. Dijagram σ-ε. [34]

Ukoliko vlačna sila djeluje okomito na vlakna koristi se čvrstoća na vlak okomita na vlakna. Zbog prirode i anizotropije materijala granična čvrstoća materijala na tlak koja su okomita na vlakna mogu biti od 20 do 25 puta manja nego, vlačna čvrstoća koja je paralelna na vlakna. Takva čvrstoća se još naziva i radijalna čvrstoća na vlak.

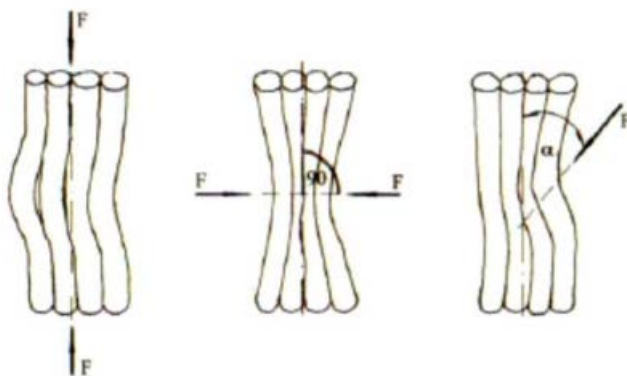
U slučaju da vlačna sila djeluje pod nekim kutom, njezina čvrstoća se počinje mjenjati pri malim promjenama kuta djelovanja sile kako je prikazano na slici 11. [35]



Slika 13. Promjena vlačne čvrstoće u odnosu djelovanja sile pod kutem . [36]

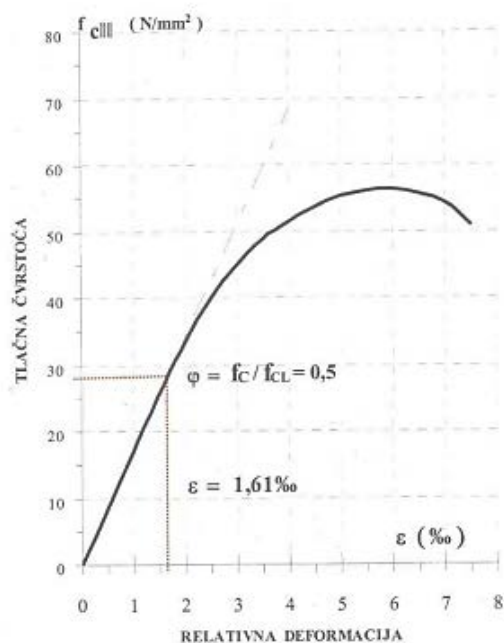
3.3.2. Čvrstoća na tlak

U slučaju kada je drvo izloženo tlačnoj sili paralelno vlaknima koristi se čvrstoća drveta na tlak paralelno vlaknima.



Slika 14. Čvrstoća vlakanca opterećena na tlak. [37]

Elastična svojstva drveta na tlak paralelna s vlaknima slična su kao i vlačno naprezanje paralelno vlaknima. Od granice proporcionalnosti pa sve do loma krivulja je izraženija nego u prethodnom slučaju. Drugim riječima, pred lom materijala javljaju se veće deformacije.



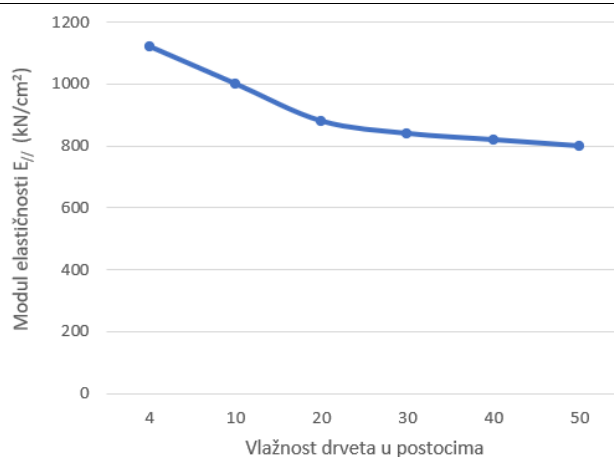
Slika 15. Dijagram σ - ε na tlak. [38]

Eksperimentalnim ispitivanjima se pokazalo da je granična čvrstoća na tlak // na vlakna i od 2 do 2,5 puta manja od čvrstoće na vlak // vlaknima.

Tablica 9. Čvrstoća drveta na tlak // vlaknima i okomito vlaknima. [39]

Vrsta drveta	// vlaknima $\sigma_{c//}$ N/cm^2	\perp na vlakna $\sigma_{c\perp}$ N/cm^2	Naziv drveta
Jela Omorika Smreka	3000-4500	600	Lagani četinari
Bor	3500-5000	750	Poluteški četinari
Ariš	4000-5500	1000	Teški četinari
Topola Vrba	2500-3500	900	Vrlo lagani listari
Lipa Breza Javor Bukva Hrast (meki) Orah	3500-5000	1100	Lagani listari
Hrast Bukva Jasen Brijest Bagrem	5000-7000	1300	Poluteški listari
Grab Šimšir Hrast Oskoruša	6000-8000	1500-2500	Teški listari

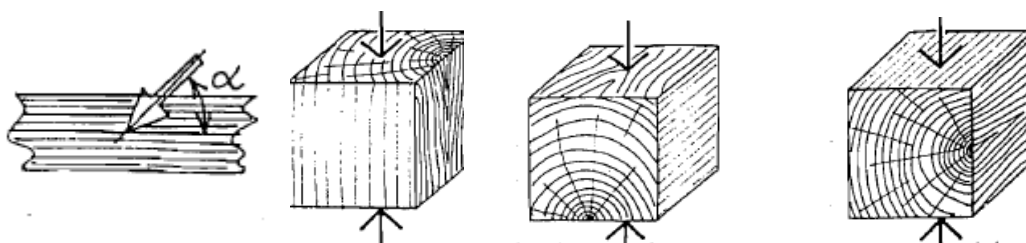
Modul elastičnosti prilikom vlačnim i tlačnim napreznjima // vlaknima ima praktički istu vrijednost sve dok su napreznja ispod granice proporcionalnosti. No, zbog drveta kao materijala vrijednosti modula elastičnosti čak i za istu vrstu mnogo variraju. Tako npr. za četničare $E_{par} = 600 - 1600 \frac{kN}{cm^2}$, a za hrast i bukvu od $800 - 2200 \frac{kN}{cm^2}$. Isto tako vlažnost ima veliki utjecaj na modul elastičnosti drveta kako je prikazano na slici.



Slika 16. Odnos Modula elastičnosti s vlažnosti. [40]

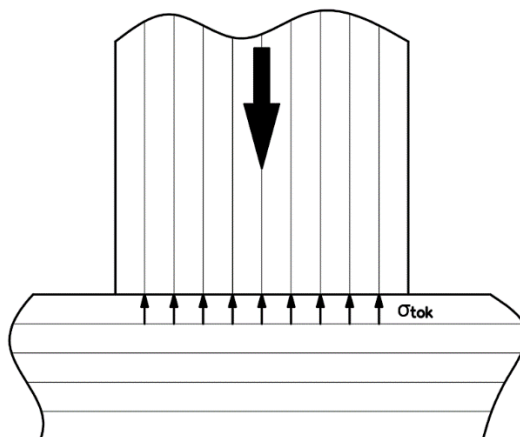
Kada djelujemo tlačnom silom pod nekim kutom na pravac vlakana korisiti se čvrstoća na tlak kosa na pravac vlakana $\alpha = \alpha \neq 0$. U slučaju da je $\alpha=90^\circ$ ($\pi/2$) takva se čvrstoća naziva čvrstoća na tlak okomita vlaknima. Zavisno od odnosa tlačne sile prema prednjoj strukturi drveta razlikujemo:

- Radijalni tlak okomit na vlakna, kada sila djeluje u smjeru promjera,
- Tangencijalni tlak okomit na vlakna kada sile djeluju u smjeru tangente poprečnog presjeka.



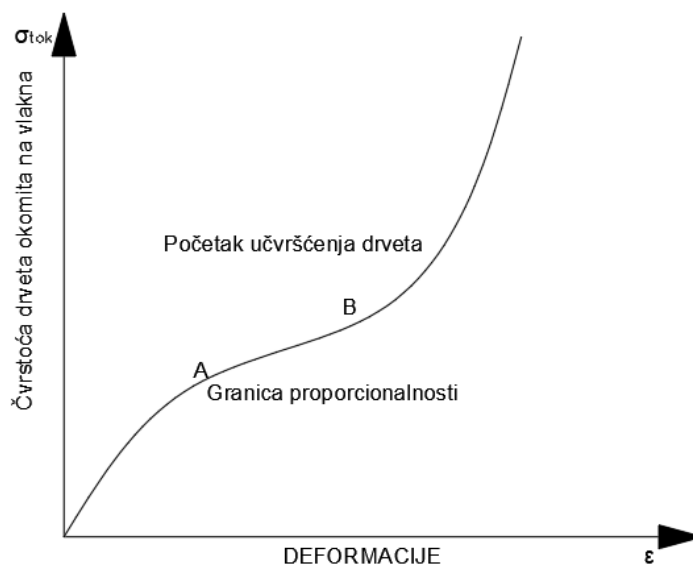
Slika 17. Tlačno djelovanje sile pod kute, tlak okomit na vlakna, radijalno opterećenje, te tangencijalno. [41]

U inženjerskoj praksi obje čvrstoće poznate su pod imenom čvrstoća drveta na tlak okomita na vlakna. U takvim slučajevima javlja se gnječenje drveta. Kod takvog opterećenja javljaju se najveće deformacije. One su osim opterećenja posljedica specifične građe drveta i veze vlakana u uzdužnom smjeru.



Slika 18. Čvrstoća drveta na tlak okomita na vlakna (gnječenje drveta). [42]

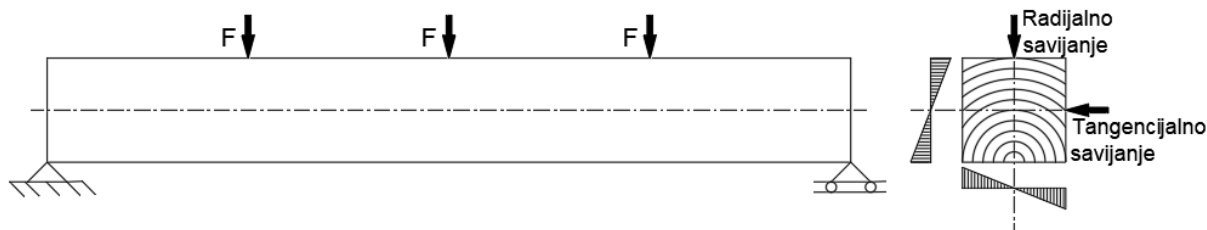
Čvrstoća drveta okomita na vlakna je mala. Takava čvrstoća je karakteristična po tome što poslije loma, poslije zbijanja građe drveta dolazi do povećanja čvrstoće drveta na tlak okomit na vlakna. Ovo se najbolje vidi na donjem dijagramu. [43]



Slika 19. Dijagram σ - ϵ okomita na tlak (gnječenje). [44]

3.3.3. Čvrstoća na savijanje

Kada opteretimo uzorak kako je prikazano na donjoj slici onda govorio o čvrstoći drveta na savijanje (σ_m).



Slika 20. Čvrstoća drveta opterećena na savijanje. [45]

Osim vrste i građe drveta na čvrstoću na savijanje utječe i vlažnost. Djelovanje vlažnosti nije toliko izraženo kao kod čvrstoće drveta na tlak ili na zatezanje. Obično se uzima u prosjeku da jedan posto vlažnosti smanjuje čvrstoću na savijanje za oko 15%. Razlikujemo tangencijalno i radijalno savijanje drveta. Ono zavisi od njegovog poprečnog presjeka. Tangencijalno opterećenje je u slučaju kada se nosač opterećuje u smjeru tangente, tj. kada je ono paralelno s godovima tangente, a radijalno opterećenje se poklapa s promjerom, kada djeluje okomito na god.

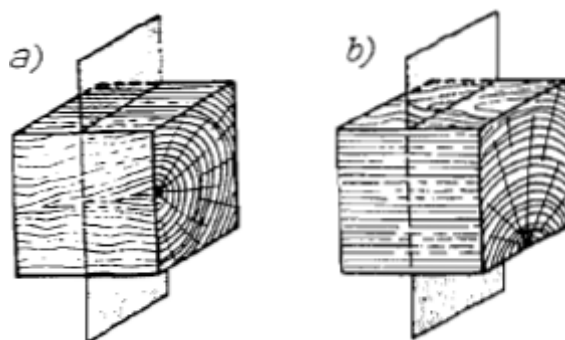
U slučaju tangencijalnog savijanja na uzorke, maksimalna naprezanja se javljaju na krajevima, gdje se naizmjenično smjenjuju zbijena vlakna, odnosno veća i manja gustoća drveta. Kada dolazi do radijalnog savijanja maksimalna naprezanja se nalaze u ravnini goda, a tu je drvo gušće i zbijenije. Zbog toga je radijalno savijanje drveta veće. [46]

3.3.4. Čvrstoća na smicanje

Čvrstoća na smicanje javlja se u onim slučajevima kada se drvo smiče po određenoj ravnini po simčućoj površini (uslijed utjecaja smičućih sila).

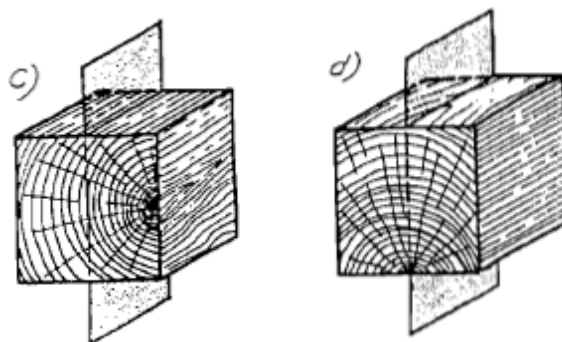
Zavisno o smicajućoj ravnini u odnosu na građu drveta, u odnosu na pravac vlakana, razlikujemo više vrsta smicanja:

- Presjecanje vlakana kada je ravnina smicanja okomita na vlakna,



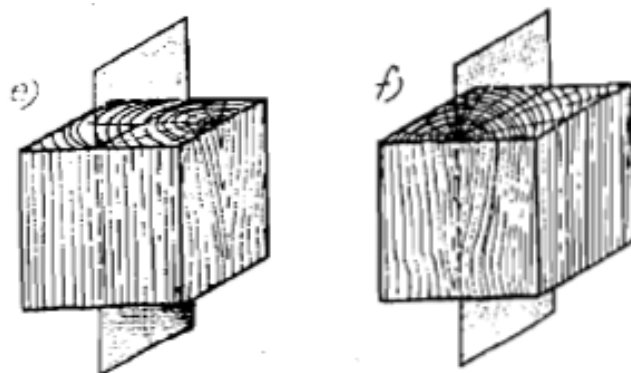
Slika 21. a) Radijalna ravnina b) tangencijalna ravnina okomita na vlakna. [47]

- Tangencijalno i radijalno smicanje pod kutom prema pravcu vlakana, kada je ravnina smicanja u pravcu promjera, odnosno u pravcu tangente,



Slika 22. c) Tangencijalno i d) radijalno smicanje. [48]

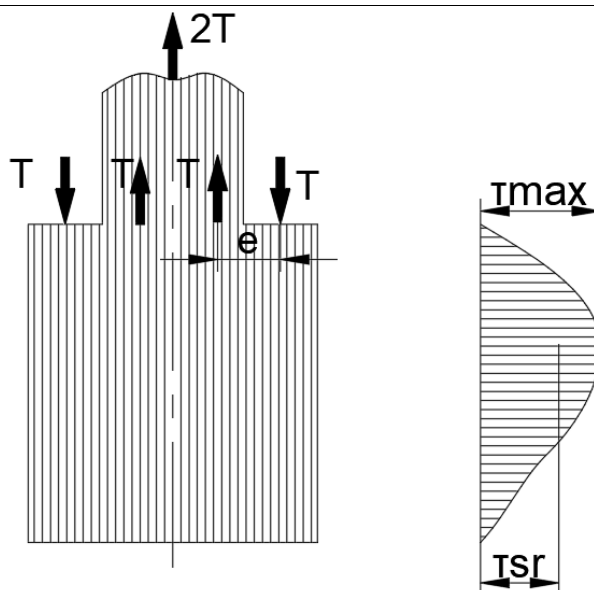
- Smicanje paralelno vlaknima- kada je površina smicanja paralelna vlaknima i smicanje se vrši u pravcu vlakana. Ova čvrstoća drveta se najviše koristi u praksi.



Slika 23. e) Tangencijalno smicanje f) radijalno smicanje paralelno vlaknima. [49]

Granična vrijednost čvrstoće drveta na smicanje određuje se ispitivanjem standardnih uzoraka do njegovog loma. Čvrstoća smicanja paralelna sa njegovim vlaknima i to tangencijalno smicanje nešto je veća nego smicanje u radijalnom pravcu. To je iz razloga jer se veza građe drveta u radijalnom smjeru lakše narušava, te veza između vlakana, nego što je slučaj kod smicanja u tangencijalnom smjeru. Tako u pojedinim slučajevima tangencijalno smicanje paralelno na vlakna može biti veće i do 35 % od radijalnog smicanja.

Kako su dosadašnja laboratorijska ispitivanja pokazala raspored naprezanja na smicanje paralelno vlaknima (τ_{par}) po površini smicanja (A_τ) vrlo je neravnomjeran.



Slika 24. Neravnomjerna raspodjela naprezanja. [50]

Veličina naprezanja smicanja određuje se preko izraza (8)

$$\tau_{//sr} = \frac{T}{A_{\tau}} \quad (8)$$

Gdje je $\tau_{//sr}$ srednje naprezanje na smicanje paralelno vlaknima. Međutim, redovan je slučaj da je $\tau_{//sr} < \tau_{max}$. Srednja vrijednost smicajućih naprezanja opada sa dužinom ravnine smicanja, te zavisi od odnosa dužine smicanja prema ekscentricitetu (e) sile T . [51]

3.4. Elastičnost drveta

Elastičnost drveta zavisi o vrsti drveta, zapremnini težine, građi drveta, pravcu vlakana i temperaturi. Veća je elastičnost kod drveta sa pravilnim godovima i sa pravilnim oblicima vlakana. Suho drvo je elastičnije od vlažnog, a mlado drvo je elastičnije od starog uz isti postotak vlažnosti.

Modul elastičnosti je različit u različitim smjerovima (E_1 = za aksijalna naprezanja; E_2 = za radijalna naprezanja; E_3 =za tangencijalna naprezanja). Također treba razlikovati modul elastičnosti paralelan vlaknima i modul elastičnosti okomit na vlakna. [52]

Tablica 10. Modul elastičnosti za pojedine vrste drveta. [53]

Vrsta drveta	Zapremninska težina (t/m ³)	Srednja vrijednost modula elastičnosti u kN/cm ²					
		// vlaknima			⊥ vlaknima		
		$E_1^{//}$	$E_2^{//}$	$E_3^{//}$	E_1^{\perp}	E_2^{\perp}	E_3^{\perp}
Lagani četinari (Jela)	0,4-0,5	1000- 1400	75- 100	40- 50	10	70	70
Poluteški četinari (Bor)	0,5-0,65	1200- 1600	110- 130	60- 80	10	80	100- 120
Lagani listari (Topola, Vrba, Lipa)	0,5-0,65	900- 1200	110- 120	60- 80	10	80	110- 120
Poluteški i teški listari (Hrast, Bukva, Bagrem, Jasen, Javor)	0,65-1	1300- 1800	150- 200	80- 120	40- 50	80- 100	120- 150

4. SPAJANJE DRVENIH NOSAČA

Najjednostavniji način spajanja drvenih nosača je preklopni spoj, kada se dva materijala preklope jedan preko drugog, a spoj se učvrsti čavlima, drvenim tiplama, vijcima, ljepilom. Spojne veze u drvenim konstrukcijama imaju zadatak da spoje dva ili više elemenata u jednu cijelinu, te tako onemogućuje međusobno pomicanje elemenata od drveta koji čine tu cijelinu. Za razliku od čeličnih konstrukcija, te konstrukcija od armiranog betona i njima slične konstrukcije, gdje se računa sa krutim praktički nepromjenjivim vezama u čvorovima, kod drvenih konstrukcija su zbog prirode materijala prisutni određeni pomaci u čvorovima i vezama na mjestima gdje se drveni elementi spajaju.

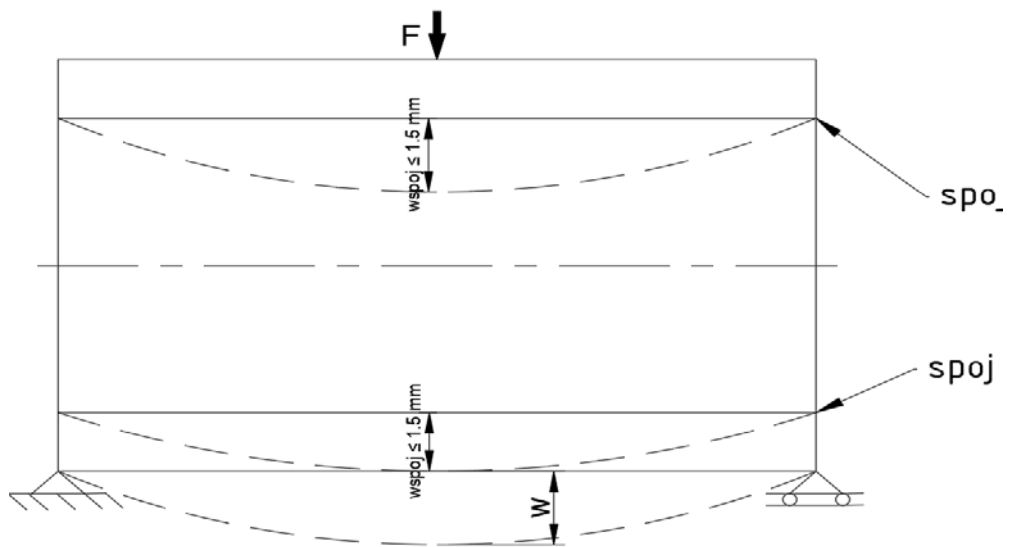


Slika 25. Spoj dva drvena elementa čavlima. [54]

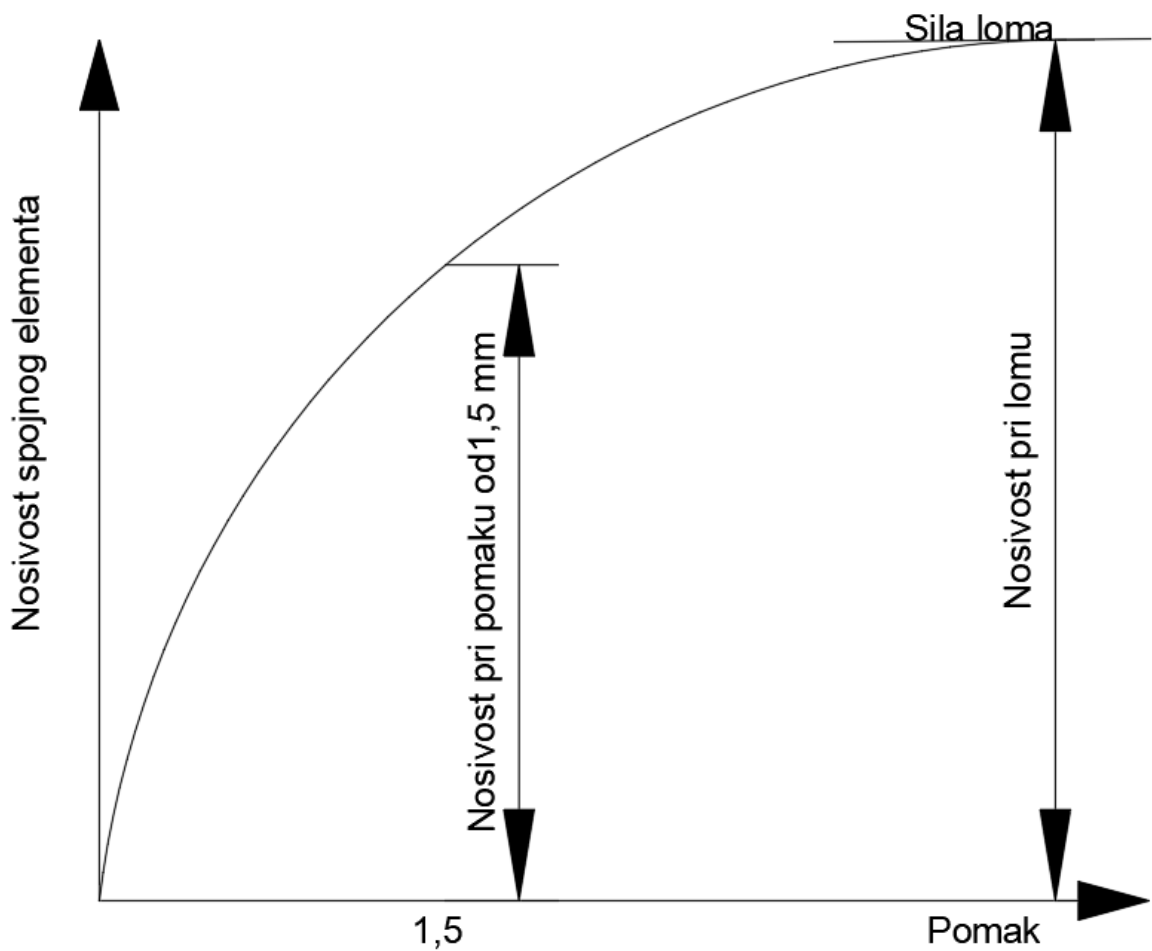
Proračun spojnih veza se vrši prema silama koje djeluju na njih, a pod pretpostavkom da su veze kruto izvedene, te da u spoju ne postoje pomaci. Pri tome i takvom proračunu pod pojmom nosivosti spoja porazumjeva se njegova nosivost u spojnoj ravni (u N ili kN) i s njom se ulazi u proračun. Nosivost spoja može se odrediti na dva načina:

- Teorijskim razmatranjem- spojna veza se analizira kao određena cijelina i preko dopuštenih naprezanja dolazi se do njegove nosivosti,
- Eksperimentalnim ispitivanjima- uzorak se ispituje do njegovog loma bilo spojene veze ili drvenog elementa.

Dopuštena nosivost uzima se $\frac{1}{2,75}$ nosivosti pri lomu, a pod uvjetom da nije prekoračen dopušteni pomak priključnih elemenata. Kao dopušteni pomak u jednoj vezi usvojena je veličina $\Delta = 1,50$ mm.

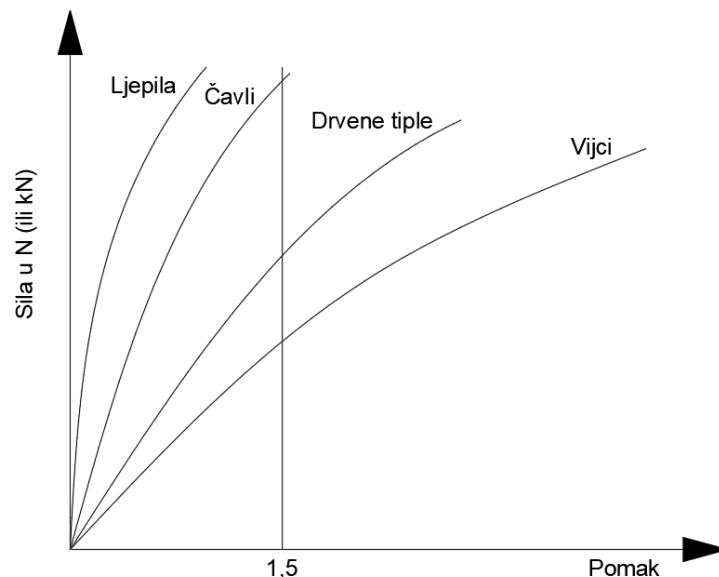


Slika 26. Za određivanje dopuštene nosivosti u spoju uzima se pomak spoja ($f_s \leq 1,5 \text{ mm}$)



Slika 27. Dijagram nosivosti i pomaka. [55]

Drugim riječima postoje dve dopuštene nosivosti spojne veze. Jedna je kad je dopuštena nosivost $\frac{1}{2,75}$ dio nosivosti pri lomu (bilo spoje veze ili drvenog elementa), i druga kada je nosivost spojne veze njegova nosivost pri pomaku od 1,50 mm. Od ove dvije nosivosti mjerodavna je manja. U drvenim konstrukcijama od posebne su važnosti u kakvom su odnosu nosivost različitih spojnih veza i njihovi pomaci.

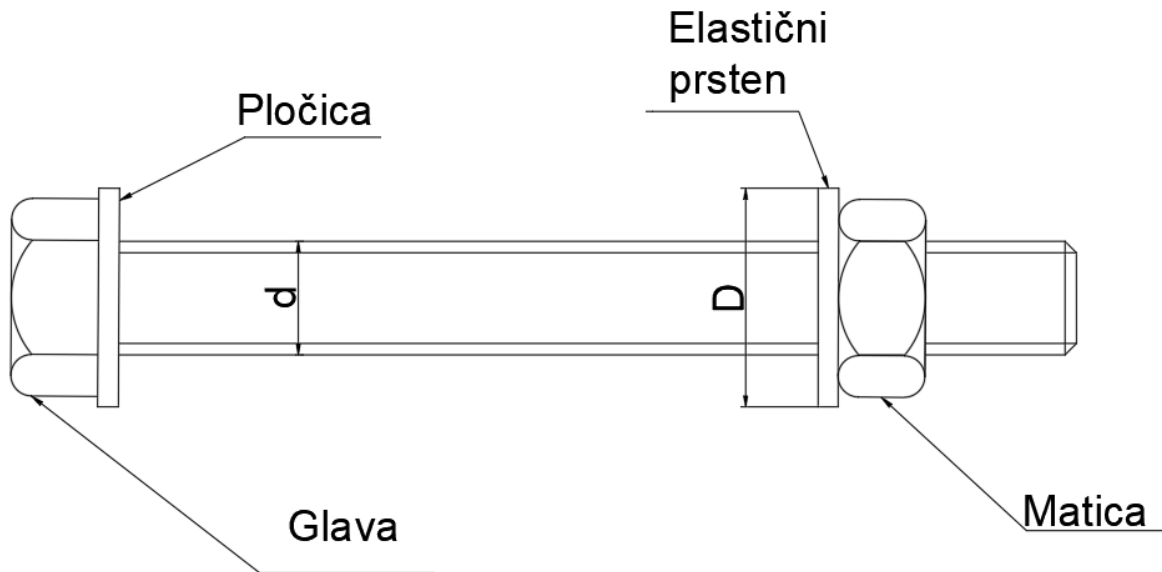


Slika 28. Dijagram spojnih veza nosivosti i pomaka. [56]

Od svi spojnih veza ljepila se smatraju kao kruto- nepromjenjiva spojna sredstva, a sva ostala se tretiraju kao promjenjiva. Kod promjenjivih tzv. mehaničkih spojnih veza u spojnim ravninama nastaju pomaci uslijed utjecaja smicajućih sila. Ovi pomaci su posljedica deformacija priključnih drvenih elemenata, odnosno deformacija uslijed savijanja štapičastih spojnih sredstava (čavli, vijci, drvene tiple). Kod lijepljenih veza, koje silu prenose paralelno vlaknima, deformacija sloja lijepila u spoju je neznatna, tako da se takav spoj može smatrati apsolutno krutim. [57]

4.1. Spojevi s vijcima

Vijci se koriste u izradi drvenih konstrukcija često kao spojno sredstvo. Oni moraju imati posebne podložne pločice, znatno veće nego pločice koje se koriste u čeličnim konstrukcijama; te pločice moraju imati najmanji promjer $3,5d$, ako su okrugle, ili isto toliku dužinu stranice, ako su kvadratnog oblika.



Slika 29. Vijak za drvo. [58]

Najmanja debljina pločice je 4 mm, odnosno oko 1/10 njene stranice. Uz to se preporuča ispod matice elastični prsten, koji će i pri isušivanju drveta održavati vijak napetim. Nosivost vijka na pritezanje ostvajuje se aktiviranjem trenja u ravini spajanja, između spojenih elemenata. Veze u takvim vijcima koriste se samo u slučajevima kada dođe do trenja u ravnini spoja.

Nosivost jednog takvog vijka data je izrazom (9):

$$N_1 = \frac{d_k^2 \pi}{4} * \sigma_{ad} * \mu \quad (9)$$

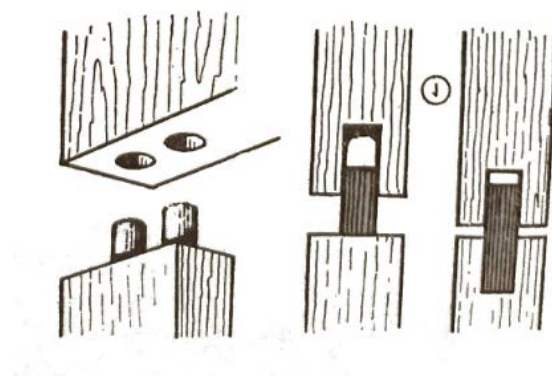
N_1 je sila koju može prenjeti jedan vijak; $\frac{d_k^2 \pi}{4}$ površina jezgre vijka; σ_{ad} dopušteno naprezanje na zatezanje za vijak (čelik); i μ koeficijent trenja u ravnini spoja koji zavisi od vrste drveta, vlažnosti i kvalitete obrade površine priključnih elemenata. [59]

Tablica 11. Koeficijent trenja drveta. [60]

Pravac trenja	Način obrada dodirnih površina	% vlažnosti drveta	Srednji koeficijent trenja
// sa vlaknima	Nehoblano	15% vlažnosti	0,78
		15% navlažen spoj 22% do 25%	0,71 0,52
	Hoblano	15%	0,53
		22% do 25%	0,39
⊥ na pravac vlakna	Nehoblano	15% vlažnosti	0,71
		15% navlažen spoj ~ 24%	0,60 0,56
	Hoblano	15% vlažnosti	0,55
		15% navlažen spoj ~ 24%	0,59 0,38
Mekano drvo sušeno na zraku	0,26		

4.2. Spojevi s drvenim tiplama

Spoj sa drvenim tiplama izvodi se pomoću okruglih ili četvrtastih tipli. Ovakvi spojevi se mogu vidjeti kod stolova i stolica. Ugrađivanjem tipli sprečava se pomicanje u vezi, odnosno vrši se spajanje elemenata. Za okrugle drvene tiple koje se izrađuju na stroju sa jednim djelom spoja, a u drugom se buše provrti. Postoji mogućnost da se u oba djela spoja buše provrti, a tiple se izrađuju od tvrdog drveta. Važno je da u spoju budu dvije tiple i da provrti budu dublji nego što je dužina tipli. U protivnom ona naliže na dno provrta i spoj se ne može stegnuti. [61] [62]



Slika 30. Spoj s drvenim tiplama. [63]

4.3. Spajanje sa čavlima

Čavli su općenito poznati spoj za drvene elemente. To su glatki žičani komadi čelika koji su sa jedne strane zašiljeni, a na drugoj imaju glavu. Izrađuju se od Thomasovog čelika sa čvrstoćom na kidanje od 600 do 850 Mpa. Kao nosivi spoj s čavlima smatra se veza u kojoj postoje najmanje četiri čavla napregnuta na odrez u jednoj ravnini. Čavli u spoju mogu biti jednorezni ili višerezni, prema tome koliko slojeva oni prolaze, koliko duboko prodiru u krajnji dio i koji elementi čine pojedini štap u čvoru. Kako ne došlo do cijepanja drva pri zabijanju čavla treba odabrati promjer čavla prema debljini drva. Pri zabijanju u drvo vlakna se razmiču, potiskuju u stranu. [64]

Tablica 12. Promjer čavla prema debljini drva. [65]

Debljina drvenog elementa <i>mm</i>	Dopušteni promjer čavla <i>mm</i>				
10				20	22
12			20	22	25
15		20	22	25	28
18,20	22	25	28	31	34
24,25	28	31	34	38	42
28,33	31	34	38	42	46
38,40	38	42	46	50	55
48,50	46	50	55	60	65
60	50	55	60	65	70
70	60	65	70	75	80
80	65	70	75	80	90
90	70	75	80	90	(100)
100		75	80	90	(100)
110			80	90	(100)

4.4. Lijepljeni spoj

Pod lijepljenjem se podrazumjeva međusobno spajanje dijelova prijanjanjem s pomoću ljepila. To su sredstva koja imaju sposobnost mjenjanja stanja lijepljivosti u čvrtsto stanje, u stanje

monolitiziranja spojnih elemenata. Monolitiziranje se izvodi prijanjanjem (adhezijom) ljepila na dodirne površine drveta pri čemu kohezija ostaje nepromjenjena.

Ljepila kao sredstva spajanja moraju zadovoljiti slijedeće zahtjeve:

- Moraju imati zadovoljavajuću čvrstoću kroz vrijeme,
- Čvrstoća spoja treba biti veća ili jednaka čvrstoći drveta na smicanje paralelna ili okomita na vlakna,
- Otporna na organske i anorganske tvari,
- Otporna na kemijske utjecaje,
- Vatrootporna,
- Stvrđavanje na temperaturama do 25°C. [66]



Slika 31. Nanošenje ljepila na priključni drveni element. [67]

4.4.1. Postupak spajanja ljepljnjem drvenih elemenata u jednu cijelinu

Prije nanošnja ljepila na drvo sve predkontaktne površine moraju biti brušene brusnim papirom od najmanje 300 grita, kako bi se uklonili sitni ostaci koji ometaju apsorpciju ljepila. Važno je zapamtiti da je očišćena površina pogodna za lijepljenje samo određeno vrijeme (s vremenom gonji sloj drva oksidira). Odmašćivanje nije potrebno kada se koriste ljepila koje se nanosi vodom. Međutim, pri lijepljenju ljepila s epoksidnom smolom ili poliuretanskim vrućim ljepilom

poželjno je s površine koncentriranim tehničkim acetonom ukloniti ostatke drvenih smola i prirodnih emisija.



Slika 32. Priprema drvene površine brušenjem. [68]

Ljepilo se nanosi na površine koje treba spojiti što je moguće ravnomjernije. Debljina sloja treba biti što manja, ali ipak dovoljna da nadoknadi zakrivljenost. Prikladno je nanijeti ljepilo na ravne i glatke površine malom fleksibilnom lopaticom, koja se može koristiti kao obična plastična kartica. U utorima i malim provrtima, kao i na šiljcima i naborima, ljepilo se nanosi četkom sa sintetičkim čekinjama. Gotovo sve vrste ljepila zahtijevaju stvrdnjavanje nakon nanošenja na otvorenom. Nakon dodira s kisikom, ljepilo prolazi primarno stvrdnjavanje, što ubrzava proces sušenja sastavljenih djelova. Za ljepila an bazi PVA vrijeme izlaganja može biti do 20-30 minuta, a za prirodna do nekoliko sati.



Slika 33. Nanošenje ljepila na drvo. [69]

Poslije nanošenja ljepila potrebno je pomoću stezaljki i zaustavljača čvrsto pričvršćavanje lijepljenih spojeva. Kako ljepilo postaje sve viskoznije, tlak stezaljki pomaže razbiti sastav, koji

se još nije postavio duboko u pore, što povećava snagu ljepljive linije. Za lijepljenje ravnih dijelova može se koristiti veći broj stezaljki od pritsne sile od 70-100 N. Kako bi spoj bio što kvalitetniji, tlak između spoja i stezaljki mora biti što ravnomjerniji. Takvo naprezanje treba biti u području od 345 – 1034 kPa (0,345 MPa do 1,034 MPa) i sušenje traje oko 24 sata, a stezanje oko sat vremena. U donjoj tablici su dani podaci za određene vrste drveta za spajanje s različitim materijalima. [70] [71]

Tablica 13. Potreban tlak pri lijepljenju. [72]

Vrsta drveta	Stezanje	Sušenje	Naprezanje
Tvrđi bijeli javor	60 min	24 sata	17.2±2.4 N/mm ²
Iverica u kombinaciji s neobrađenim mramorom	1 kg stezanja za 24 sata	7 dana	5.5±1.4 N/mm ²
Iverica s obrađenim mramorom	1 kg stezanja za 24 sata	7 dana	4.6±0.7 N/mm ²
Bor s neobrađenim granitom	1 kg stezanja za 24 sata	7 dana	6.3±1.4 N/mm ²
Bor u kombinaciji sa staklom	1 kg stezanja za 24 sata	7 dana	16.9±5.2 N/mm ²
Javor u kombinaciji s aluminijem (pjeskaren)	1 kg stezanja za 24 sata	7 dana	19.1±2.7 N/mm ²
Bor u kombinaciji s plasticiranim laminatom	1 kg stezanja za 24 sata	7 dana	5.9±0.7 N/mm ²



Slika 34. Stezanje ljepljenog spoja. [73]

4.5. Dimenzioniranje lijepljenog drvenog nosača

Lijepljeni nosači su konstrukcijski elementi sastavljeni od najmanje 2 daske najviše kvalitete. Ovako oblikovani nosači smatraju se kao homogeni presjeci određene geometrije prema načelima i principima o otpornosti materijala. Kako je već poznato otpornost materijala je zasnovana na kontinuiranom, homogenom i izotropnom materijalu. Međutim, drvo se kao materijal ponaša diskontinuirano, heterogeno i anizotropsko, stoga u proračunu moramo uzeti i takvo ponašanje u obzir. Prilikom proračuna zasnovanog na dopuštenim naprezanjima uz podjelu opterećenja na osnovna, dopunska i naročita, te karakteristike lijepljenog drveta od velikog su značaja u proračunu:

- Osnovna dopuštena naprezanja prilikom određivanja potrebnih dimenzija presjeka ili provjera naprezanja u već usvojenim ili predodređenim konturama presjeka,
- Modul elastičnosti i modul smika prilikom proračuna deformacija, koji zavisi od vlažnosti drveta i trajanju opterećenja. [74]

4.5.1. Osnovna dopuštena naprezanja

Osnovna dopuštena naprezanja lijepljenih konstrukcija su ona naprezanja koja su dopuštena za osnovnu grupu opterećenja (npr. vertikalna opterećenja, stalna opterećenja, pokretna opterećenja uključujući , horizontalna opterećenja).

Tablica 14. Dopusštena naprezanja N/cm². [75]

Vrsta naprezanja	Oznake	Jela, Bor Smreka		Hrast Bukva	
		1.Klasa	2.Klasa	1.Klasa	2.Klasa
Savijanje	σ_{md}	1400	1100	1620	1370
Vlak	$\sigma_{t//d}$	1050	850	1800	1080
Tlak	$\sigma_{c//d}$	1100	850	1500	1200
Tlak okomito na vlakna	$\sigma_{c\perp d}$	200	200	490	430
Smicanje	$\tau_{//d}$	90	90	150	150
Smicanje od poprečne sile	$\tau_{m//d}$	120	120	130	110

Za slučaj zajedničkog djelovanja osnovnog i dopunskog opterećenja dopušta se povećanje osnovnih dopuštenih naprezanja za 15%. Ukoliko imamo slučaj djelovanja osnovnog, dopunskog i naročitog opterećenja povećavaju se osnovna dopuštena naprezanja za 50%. [76]

4.5.2. Proračun deformacija

Proračun deformacija lijepljenih nosača zavisi o trajanju opterećenja i vlažnosti drveta, a može biti sprovedena:

- Za ukupno najnepovoljnije opterećenje i za vlažnost drveta $\leq 15\%$ koriste se osnovne vrijednosti modula elastičnosti, odnosno modula smika. Ukoliko je vlažnost drveta $>$ od 15% proračun se sprovodi sa reduktivnim računskim modulima

$$E_R = \alpha * E \quad (10)$$

$$G_R = \alpha * G \quad (11)$$

E i G su vrijednosti osnovnih modula elastičnosti, tj. smicanja, a koeficijent α zavisen je od vlažnosti drveta.(10)(11)

Tablica 15. Moduli elastičnosti i smicanja za lijepljene nosače (kN/cm²). [77]

Vrsta drveta	Modul elastičnosti		Modul smika G
	E _{//vlaknima}	E _{⊥vlaknima}	
Četinari	1100	30	50

Tablica 16. Koeficijent α zavisno o vlažnosti drva. [78]

α	Relativna vlažnost	
	15-18%	18-22%
	0,85	0,75

- Uzimajući u obzir vrijeme trajanja opterećenja postoje kratkotrajna u trajnju minimalno od 3 mjeseca. Veličina progiba (f_0) računa se sa osnovnim vrijednostima modula nezavisno od % vlažnosti drveta. U suprotnom za dugoročna opterećenja, koja traju duže od tri mjeseca progib (f_t) se računa s modulima prema izrazu (12)(13)

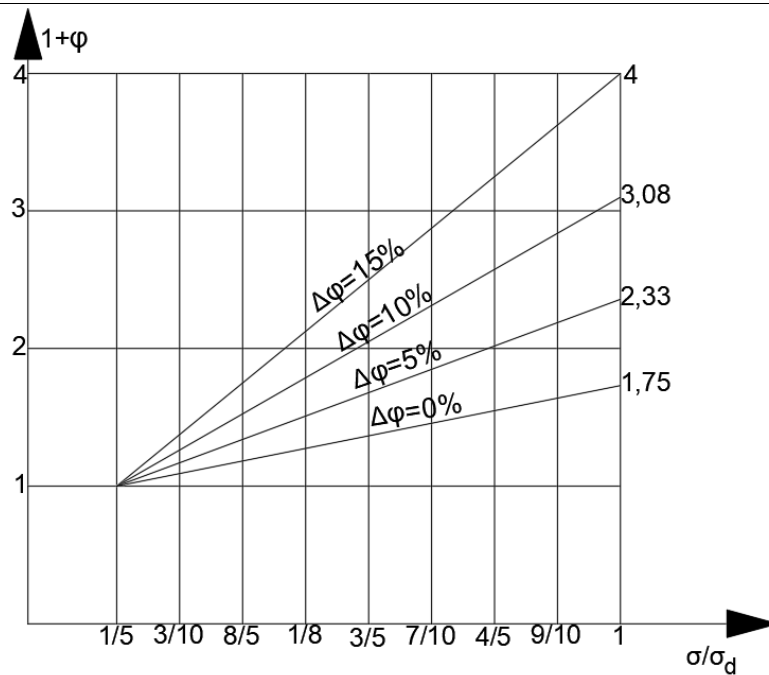
$$E_\varphi = \frac{E}{1 + \varphi} \quad (12)$$

$$G_\varphi = \frac{G}{1 + \varphi} \quad (13)$$

Ukupna deformacija (f) se dobiva superpozicijom progiba kratkotrajnog opterećenja (f_0) i progiba dugotrajnog opterećenja (f_t), odnosno (14)

$$f = f_0 + f_t \quad (14)$$

U gornjim izrazima E i G su osnovne vrijednosti, a $1+\varphi$ je koeficijent tečenja drva koji zavisi od iskorištenosti presjeka ($\frac{\sigma_{stv}}{\sigma_{dop}}$) i povećanog postotka vlažnosti $\Delta\Phi$ (u odnosu na laboratorijsku vlažnost $\Phi=15\%$).



Slika 35. Dijagram deformacije u odnosu na iskoristivost presjeka. [79]

Veličina $1+\varphi$ u zavisnosti od $\Delta\Phi$ i stupnja iskoristivosti presjeka može se izračunati iz izraza (15)

$$\varepsilon_t = 1 + \varphi = 1 + \left(\frac{\Phi + \Delta\Phi}{12} \right) * \left(\frac{\Delta\Phi + 15}{20} \right) * \left(\frac{\sigma_{stv}}{\sigma_{dop}} - 0,2 \right) \quad (15)$$

Prilikom projektiranja lijepljenih drvenih nosača, ovisno u kojem se ambijentu nalaze, uzimaju se sljedeće vlažnosti:

- 6-12 % u dobro zagrijanim prostorima,
- 9-15 % u zatvorenim nezagrijanim prostorijama,
- 15-18 % u djelomično zatvorenim prostorima,
- 18-22 % u potpuno otvorenim prostorima. [80]

Tablica 17. Maksimalni dopušteni % vlažnosti. [81]

Elementi	Maksimalni % vlage u eksploataciji	Maksimalni dopušteni % vlage za vrijeme građenja
Okviri i obloge zatvorenih objekata visokogradnje (nisu montažna)	18%	22%
Montažne konstrukcije		
a) zatvoreno	6-15%	15%
b) poluzatvoreno	15-18%	18%
c) otvoreno	18-22%	22%
Drvene zgrade	15%	18%
Elementi krovnih konstrukcija	18%	22%
Grede u međukatnim konstrukcijama	18%	22%
Ostali objekti	22%	25%

4.5.3. Dimenzioniranje poprečnih presjeka lijepljenih nosača

Dimenzije poprečnih presjeka (b/H) kreću se u granicama $H_{max} \leq 220 \text{ cm}$ i $b_{max} \leq 30 \text{ cm}$. Prema tome odnos $\frac{H}{b} \leq \sim 10$; obično je $4 < \frac{H}{b} < 10$. Po pravilu proračun ovakvih nosača uz primjenu poznatih pravila o otpornosti materijala vrijedi da je:

- $\sigma_{max} \leq \sigma_{md}$,
- $\tau_{max//} \leq \tau_{md//}$,
- $f_{max} \leq f_{dop}$.

Stabilnost lijepljenih nosača opterećenih na savijanje zavisi od odnosa širine prema visini poprečnog presjeka (H/b). Istraživanja su pokazala znatno smanjenje otpornosti nosača od 30 do 60 cm; za visine od 60 do 100 cm umanjene otpornosti je puno manje, a za nosače koji su viši od 100 cm otpornost nije konstantna na savijanje.

Tablica 18. Koefficient $\left[\frac{30}{H}\right]^{1/9}$ poprečnog presjeka. [82]

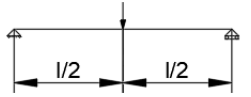

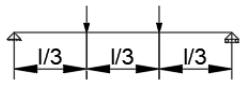
H	$(30/H)^{1/9}$	H	$(30/H)^{1/9}$	H	$(30/H)^{1/9}$	H	$(30/H)^{1/9}$
30	1	73	0.9059	116	0.8604	159	0.8308
31	0.9964	74	0.9045	117	0.8596	160	0.8302
32	0.9929	75	0.9032	118	0.8588	161	0.8297
33	0.9895	76	0.9019	119	0.858	162	0.8291
34	0.9862	77	0.9006	120	0.8572	163	0.8285
35	0.983	78	0.8993	121	0.8564	164	0.828
36	0.9799	79	0.898	122	0.8556	165	0.8274
37	0.977	80	0.8967	123	0.8548	166	0.8268
38	0.9741	81	0.8955	124	0.8541	167	0.8263
39	0.9713	82	0.8943	125	0.8533	168	0.8257
40	0.9685	83	0.8931	126	0.8525	169	0.8252
41	0.9659	84	0.8919	127	0.8517	170	0.8247
42	0.9633	85	0.8907	128	0.8509	171	0.8241
43	0.9608	86	0.8896	129	0.8501	172	0.8236
44	0.9583	87	0.8884	130	0.8496	173	0.8231
45	0.9559	88	0.8873	131	0.8489	174	0.8225
46	0.9536	89	0.8862	132	0.8482	175	0.822
47	0.9513	90	0.8851	133	0.8475	176	0.8215
48	0.9491	91	0.884	134	0.8467	177	0.821
49	0.9469	92	0.8829	135	0.846	178	0.8205
50	0.9448	93	0.8819	136	0.8454	179	0.8199
51	0.9427	94	0.8808	137	0.8447	180	0.8194
52	0.9407	95	0.8798	138	0.844	181	0.8189
53	0.9387	96	0.8788	139	0.8433	182	0.8184
54	0.9368	97	0.8778	140	0.8426	183	0.8179
55	0.9349	98	0.8768	141	0.8419	184	0.8174
56	0.933	99	0.8758	142	0.8412	185	0.8169
57	0.9312	100	0.8748	143	0.8406	186	0.8165
58	0.9294	101	0.8738	144	0.84	187	0.816
59	0.9276	102	0.8729	145	0.8394	188	0.8155
60	0.9259	103	0.8719	146	0.8388	189	0.815
61	0.9242	104	0.871	147	0.8382	190	0.8145
62	0.9225	105	0.8701	148	0.8376	191	0.814
63	0.9209	106	0.8691	149	0.8368	192	0.8136
64	0.9193	107	0.8682	150	0.8362	193	0.8131
65	0.9177	108	0.8673	151	0.8356	194	0.8126
66	0.9161	109	0.8664	152	0.835	195	0.8121
67	0.9146	110	0.8655	153	0.8344	196	0.8117
68	0.9131	111	0.8647	154	0.8338	197	0.8113
69	0.9116	112	0.8638	155	0.8332	198	0.8108
70	0.9102	113	0.8629	156	0.8326	199	0.8104
71	0.9087	114	0.8621	157	0.832	200	0.8099
72	0.9073	115	0.8613	158	0.8314		

Po prijedlogu „Propisa za drvene konstrukcije“ vrijedi da jednostavne grede dužine l , za visine $H > 30$ cm treba dimenzionirati sa faktorom reduciranja dopuštenih naprežanja (16).

$$\sigma_{rmd} = \sigma_{md} * K_h \quad (16)$$

Faktor reduciranja se izražava preko izraza(17):

$$K_h = \left(\frac{30}{H}\right)^{\frac{1}{9}} * (1 + e_1 + e_2) \quad (17)$$

Vrsta opterećenja	e_1	Odnos l:H	e_2
	0,078	7	0,063
	0	14	0,023
	-0,032	21	0
		28	-0,016
		35	-0,028

Slika 36. Koficijenti e_1 i e_2 . [83]

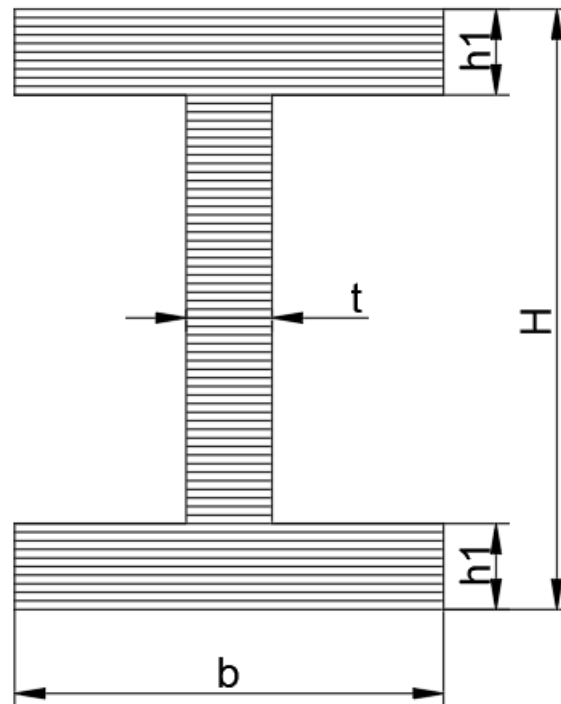
Naprežanja na smicanje ($\tau_{md//}$) provjeravaju se prema maksimalnoj poprečnoj sili u nosaču (T_{max}), prema izrazu za provakutan presjek.(18)

$$\tau_{m//} = \frac{3}{2} * \frac{T_{max}}{b * H} \quad (18)$$

Eksperimentalna ispitivanja su pokazala, da presjeci u blizini oslonaca mogu izdržati mnogo veća naprežanja na smicanje u odnosu na naprežanje gdje maksimalna sila djeluje u nosaču. Za lijepljene nosače „I“ profila osnovna dopuštena naprežanja se trebaju smanjiti za faktor K_s koji se dobije izrazom (19)(20) [84]:

$$K_s = 0,58 + 0,42 * \left[\frac{c * (b - t)}{b} + \frac{t}{b} \right] \quad (19)$$

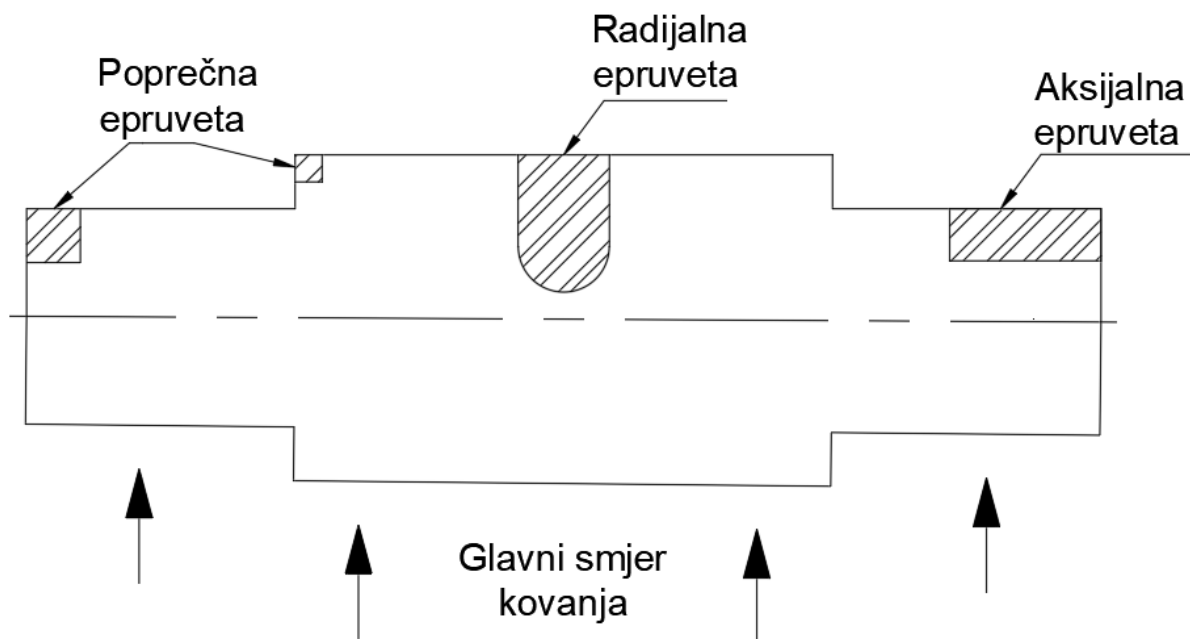
$$c = \frac{h_1}{H} \quad (20)$$



Slika 37. Presjek "I" profila. [85]

5. MJERENJE MEHANIČKIH SVOJSTVA

Ispitivanje mehaničkih svojstava većinom se provodi na uzorcima normiranog oblika i dimenzija (epruvetama). Mjesto uzimanja uzorka – smjer izrezivanja epruvete – utječe na veličinu mehaničkog svojstva kod svih anizotropnih materijala.



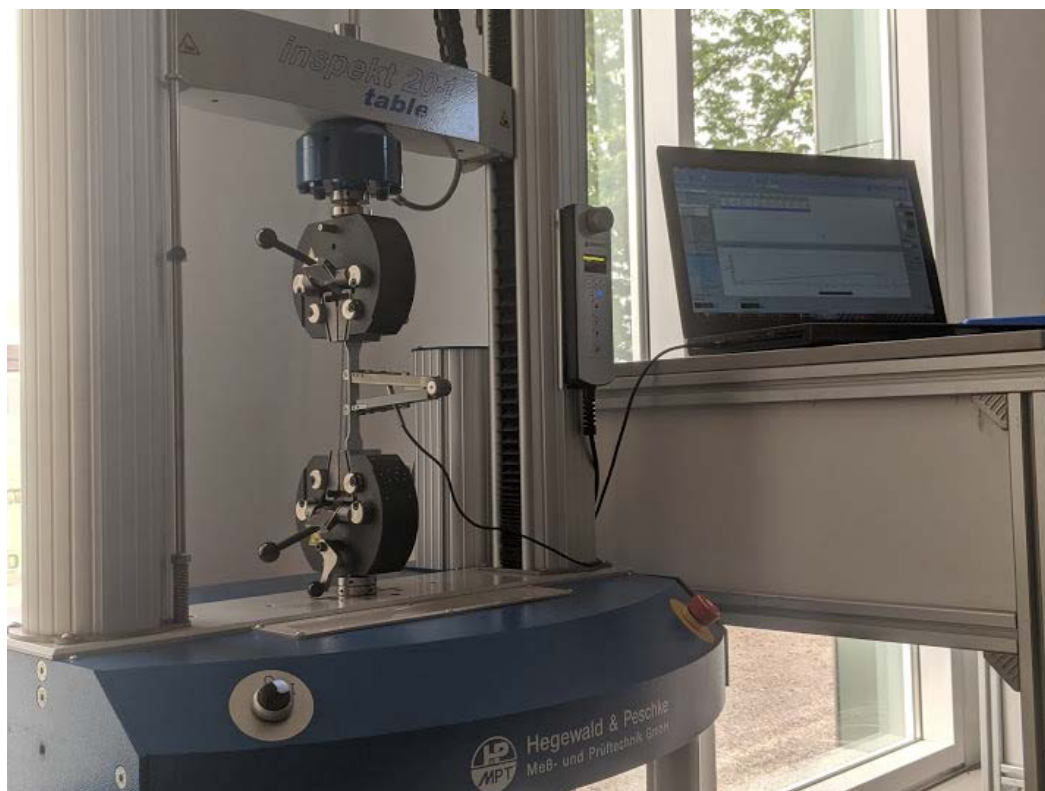
Slika 38. Mjesta izrezivanja epruveta za ispitivanje mehaničkih svojstava. [86]

Broj epruveta potrebnih za utvrđivanje nekog mehaničkog svojstva ovisi, s jedne strane, o nehomogenostima prisutnima u materijalu kao posljedica preradbe, a s druge strane o načinu ispitivanja mehaničkog svojstva. Prilikom ispitivanja statičkim opterećenim uzorkom uobičajeno je iskazivati vrijednosti mehaničkog svojstva kao aritmetičku sredinu rezultata mjerenja. [87]

5.1. Statičko vlačno ispitivanje

5.1.1. Svrha ispitivanja

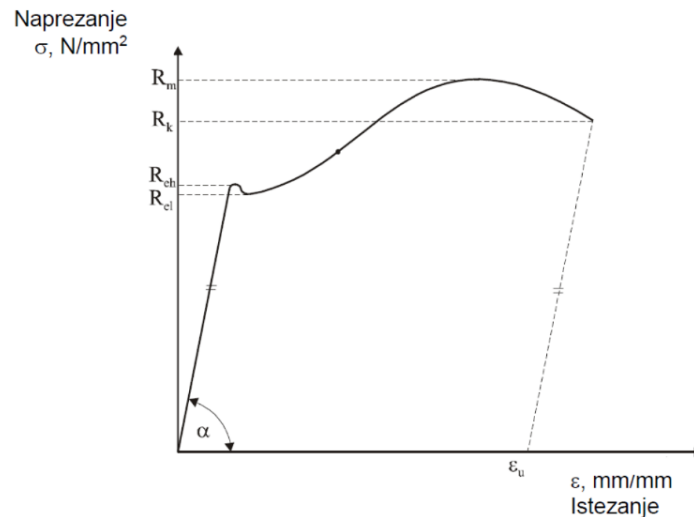
Statičkim vlačnim ispitivanjem utvrđuju se osnovna mehanička svojstva, koja karakteriziraju ponašanje materijala u uvjetima normalnog jednoosnog vlačnog statičnog naprezanja. Stoga pri statičkom vlačnom ispitivanju prirast sile mora biti takav da prirast proizvedenog naprezanja bude $\leq 10 \frac{N}{mm^2}$ u sekundi. [88]



Slika 39. Statičko vlačno ispitivanje. [89]

5.1.2. Mehanička svojstva određena vlačnim ispitivanjem

Ovim ispitivanjem se utvrđuju mehanička svojstva, koja karakteriziraju otpornost materijala, te ona koja karakteriziraju njihovu deformabilnost i označuju karakteristične točke kao što je prikazano na dijagramu naprezanje – istezanje.



Slika 40. Dijagram naprezanje - istezanje. [90]

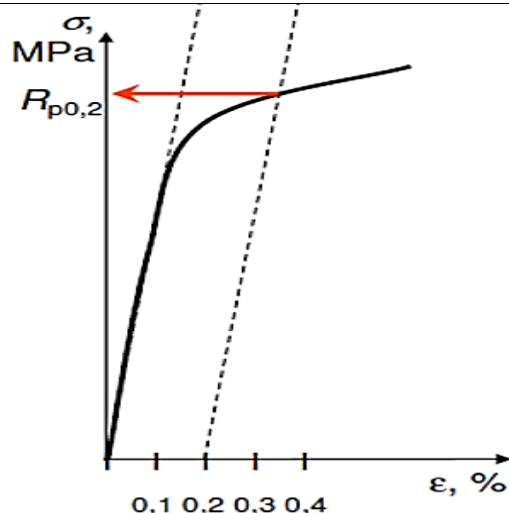
Granica razvlačenja R_e utvrđuje se izrazom (21) :

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \quad (21)$$

gdje je F_e sila tečenja, a S_0 ploha početnog presjeka. R_e se definira kao naprezanje pri kojem se uzorak počinje produljivati, te označuje ono naprezanje koje odvaja područje elastičnosti od područja plastičnosti. Granicu razvlačenja karakteriziraju dvije vrijednosti:

- R_{eh} - gornja granica razvlačenja,
- R_{el} - donja granica razvlačenja.

Granica razvlačenja označuje ono naprezanje prema kojem se uz odabrani stupanj sigurnosti utvrđuje dopušteno naprezanje pri radu strojnih djelova i uređaja. Kod materijala koji posjeduju kontinuirani prelazak iz elastičnog u plastično područje deformacija utvrđuje se konvencionalna granica razvlačenja. To je ono naprezanje koje će nakon rasterećenja u materijalu ostvariti određenu plastičnu deformaciju.



Slika 41. Konvencionalna granica razvlačenja za plastične deformacije od 0,01% do 0,2%. [91]

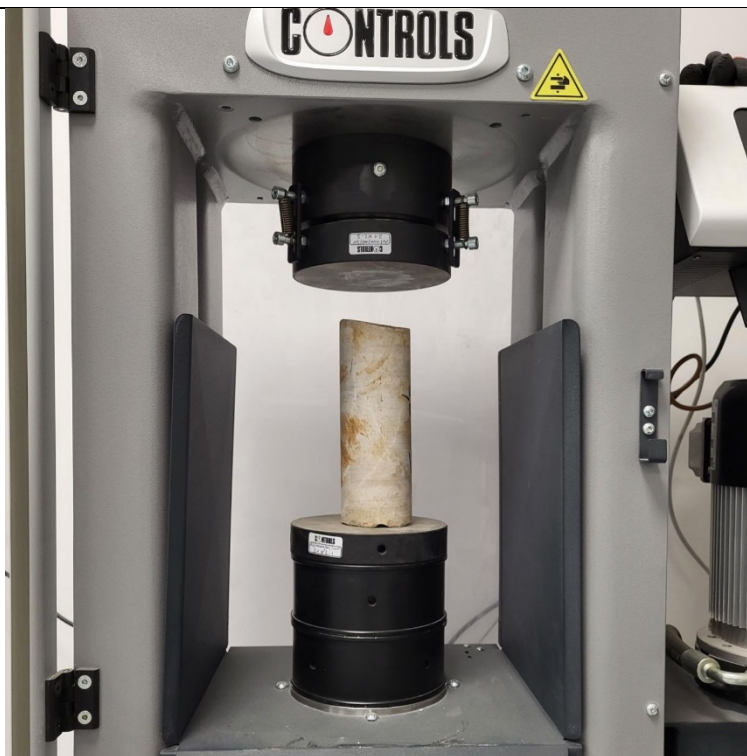
Kod konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,01}$ ostaje u materijalu nakon rasterećenja plastična deformacija od 0,01 % , dok je kod konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ plastična deformacija do dvadeset puta veća tj. 0,2 %. Vlačna ili rastezna čvrstoća R_m jednaka je omjeru maksimalne sile F_m i plohe poprečnog presjeka S_0 (22):

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (22)$$

Veličinu R_m pogrešno je nazvati maksimalnim naprežanjem, to je naprežanje pri djelovanju maksimalne sile. Vlačna čvrstoća R_m je osnovno mehaničko svojstvo na temelju kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti. [92]

5.2. Statičko tlačno ispitivanje

Statičkim tlačnim ispitivanjem utvrđuju se mehanička svojstva materijala pod djelovanjem normalnog jednoosnog tlačnog naprežanja, dakle pri obrnutom smjeru naprežanja nego kod vlačnog ispitivanja. Ovo se ispitivanje najčešće provodi na materijalima u građevinarstvu (beton, cigla, drvo, kamen, keramika). [93]



Slika 42. Tlačno ispitivanje mehaničkog svojstva. [94]

5.2.1. Mehanička svojstva utvrđena tlačnim ispitivanjem

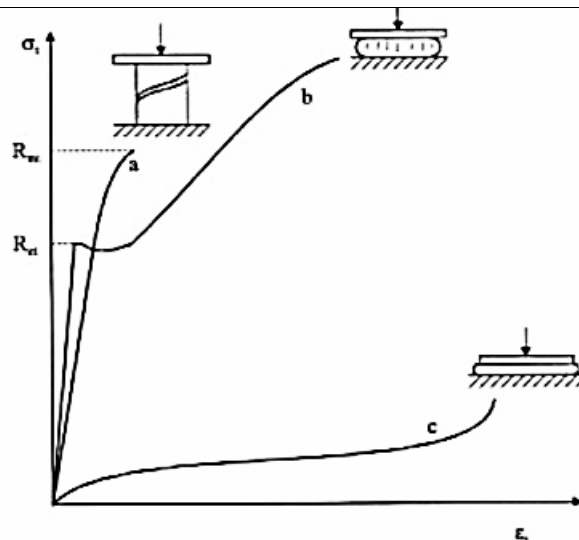
Ispitivanjem žilavih materijala utvrđuje se granica stlačivanja (23):

$$R_{et} = \frac{F_{et}}{S_0}, \quad (23)$$

gdje je F_{et} sila tečenja, a S_0 ploha početnog poprečnog presjeka uzorka. Granica stlačivanja je po iznosu i definiciji jednaka granici razvlačenja u statičkom vlačnom ispitivanju. Kod žilavih materijala bez izražene granice tečenja utvrđuju se anlogno vlačnom ispitivanju, konvencionalne granice stlačivanja $R_{pt0,01}$ i $R_{pt0,2}$. Kod krhkih materijala ovim se ispitivanjem utvrđuje tlačna čvrstoća prema izrazu (24):

$$R_{mt} = \frac{F_{mt}}{S_0}, \quad (24)$$

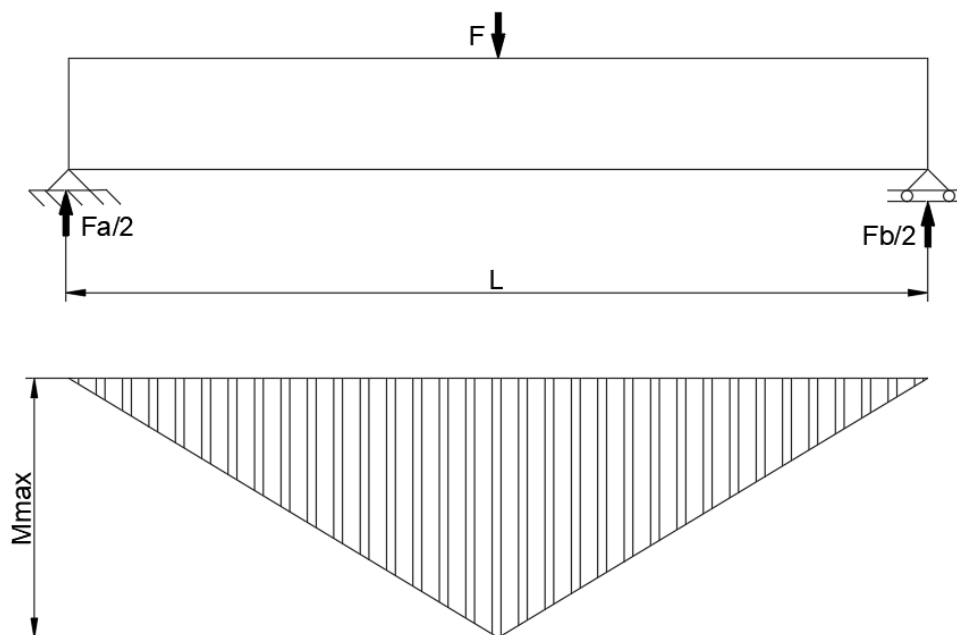
gdje je F_{mt} maksimalna sila odnosno sila kod koje je došlo do loma uzorka, S_0 je ploha početnog poprečnog presjeka uzorka. [95]



Slika 43. Dijagram savijanje - nabijanje za a-sivi ljev, b-konstrukcijski čelik, c-olovo. [96]

5.3. Savojno ispitivanje

Savojnim ispitivanjem se utvrđuju mehanička svojstva prije svega krhkih materijala, npr. sivi ljev, alatni čelik, beton, drvo, keramika u uvjetima savojnog naprezanja. Kod žilavih materijala savojno se ispitivanje provodi radi utvrđivanja tehnoloških svojstava materijala.



Slika 44. Trotočkasto savijanje uzorka(shematski). [97]

Ovim ispitivanjem kod krhkih materijala utvrđuje se čvrstoća koja se izračunava sljedećim izrazom (25):

$$R_{ms} = \frac{F_m * L_s}{4 * W}, \tag{25}$$

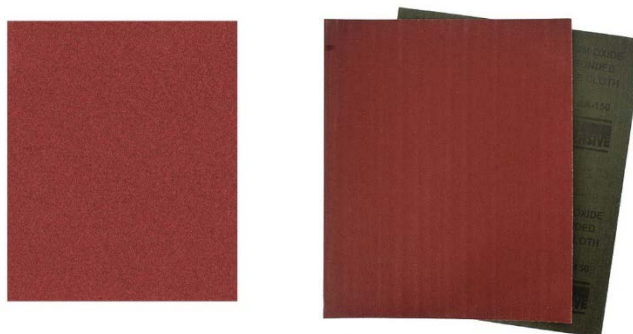
gdje je F_m maksimalna sila, kojom se uzorak opterećuje dok nije došlo do loma, L_s je razmak između dva oslonca, a W moment otpora plohe poprečnog presjeka. Kod općih konstrukcijskih čelika utvrđuje se i savojna granica razvlačenja, prema izrazu identičnom (25), samo što se umjesto F_m uvrštava F_e tj. sila tečenja. [98]

6. EKSPERIMENTALNO – NUMERIČKI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada izrađen je lijepljeni drveni nosač „I“ profila. Materijal nosača ispitan je na savojno opterećenje, a ispitani su čvrstoća i modul pri savojnom opterećenju za različite smjerove vlakana u nosaču. Eksperimentalno – numerički dio sastoji se od pripreme drvenih nosača, samog ispitivanja, te obrade rezultata.

6.1. Priprema uzoraka

Uzorci su pripremljeni iz velikog komada jele pravokutnog oblika. Sve letvice su izrezane u longitudinalnom smjeru. Svi uzorci su ručno brušeni i dovedeni do željenih dimenzija. Prvo je korišten brusni papir granulacije P 80, a za finiju površinsku obradu drveta papir P 120, kako bi se uklonile sve greške kao što su kvрге, trulež, te rupice drveta koja su uzrokovana insektima.



Slika 45. Brusni papir P80 i P120 dimenzija 230x280 mm.

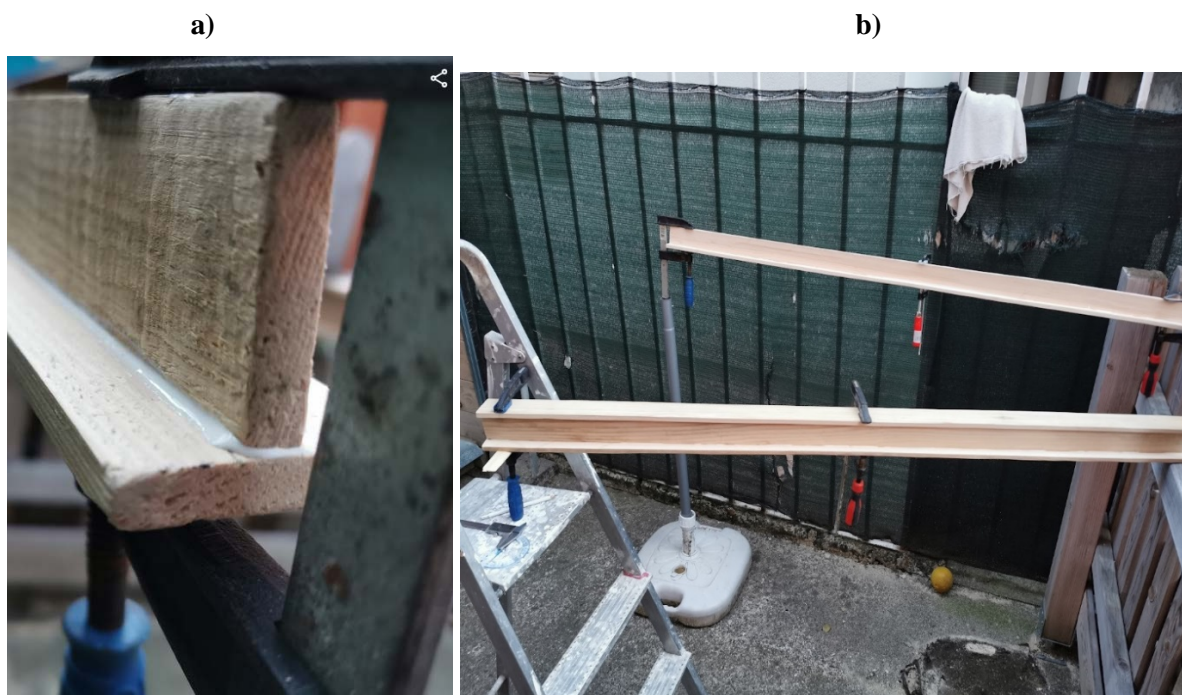


Slika 46. Izrezani uzorci dimenzija 1500x50x10 mm.

Nakon rezanja slijedilo je spajanje rebrenih profila s pojasnim profilom ljepljom. Ljepilo se nanosilo ravnomjerno četkicom sa sintetičkim vlaknima (kistom) širine 10 mm koliko iznosi visina jedne letvice. Prvo je ljepljen donji rebreni profil s pojasnim profilom, te je stegnut sa stegačima na krajevima i sredini, a nakon toga je spojeno gornje rebro s pojasnim profilom i dobiven drveni nosač „I“ profila dimenzija 70x50 mm.



Slika 47. Ljepilo za drvo



Slika 48.a) Lijepljenje, b) stezanje rebrenih i pojasnih profila.



Slika 49. Drveni nosači "I" profila

6.2. Oprema

Svojno ispitivanje je provedeno na hidrauličnoj preši nosivosti 600 kN mjerne doze DSCC-10 kN (OM 3595) u laboratoriju za materijale i konstrukcije koji se nalazi u I.G.H institutu u Zagrebu. Uzorci na kojima je izvedeno ispitivanje imaju dimenzije „I“ profila širine 50 mm, visine 70 mm i debljine 10 mm. Nosač je bio oslonjen na dva valjkasta oslonca na njegovim krajevima, a žig je bio kvadratnog i pravokutnog oblika opterećen silom F . Provedena su ispitivanja na tri uzorka drvenog nosača jele označena brojevima od 1- 3.



Slika 50. Priprema uzoraka za savojno ispitivanje.

Zbog primjenjene sile javlja se progib, te se tijekom ispitivanja bilježi sila i progib koji ispitni uzorak ostvari uslijed djelovanje sile. Raspon sile varira od 0 N do 2786,528 N.

6.3. Rezultati ispitivanja

6.3.1. Savojna čvrstoća i modul

Za izračun vrijednosti naprezanja kod savojnog ispitivanja koristi se izraz (26):

$$\sigma_f = \frac{F * L}{4 * W_y} \quad (26)$$

Jednadžba za izračun momenta otpora glasi (27):

$$W_y = \frac{I_y}{z_{max}} \quad (27)$$

Dok se za izraz moment tromosti „I“ profila koristi (28):

$$I_y = \frac{b * h^3}{12} + A * z^2 \quad (28)$$

Ukupna deformacija drvenih nosača sastoji se od elastičnih deformacija i deformacija nastala uslijed drvenih tečenja koristi se izraz (29), (30), (31):

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{el} + \varepsilon_t \quad (29)$$

$$\varepsilon_{el} = \frac{6 * f * h}{L^2} \quad (30)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{el} * \varphi \quad (31)$$

Iz gornjih izraza se dobije izraz (32):

$$\varepsilon_f = \frac{6 * f * h}{L^2} * (1 + \varphi) \quad (32)$$

Gdje je:

W_y - moment otpora, mm³

I_y - moment tromosti, mm⁴

z_{max} - najveća udaljenost od težišta profila, mm

b - širina profila, mm

h - visina profila, mm

A - površina profila, mm²

L - udaljenost između dva oslonaca, mm

σ_f – naprezanje usljed savojnog opterećenja, N/mm²

f - progib ispitnog uzorka, mm

F - sila, N

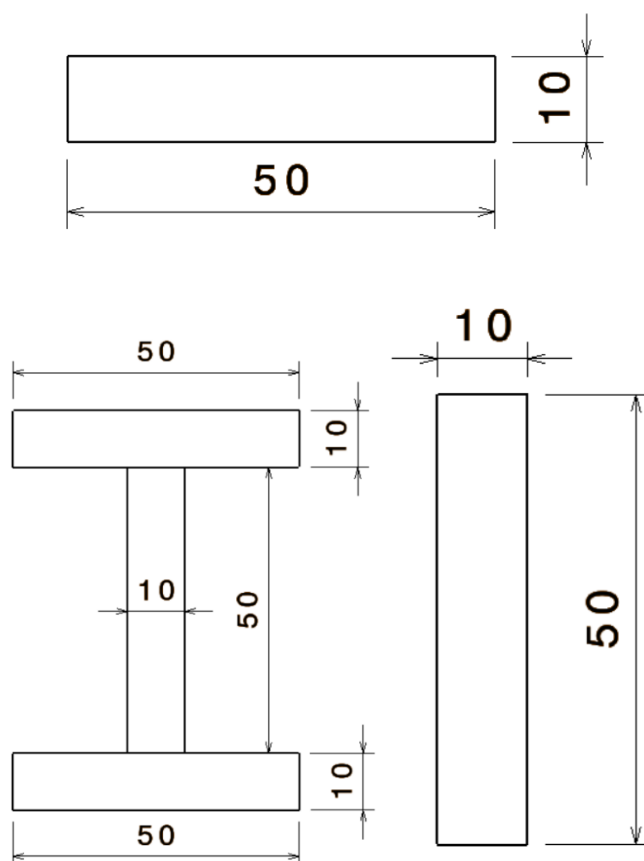
ε_f – istežanje nastalo uslijed savojnog opterećenja,

z – udaljenost od težišta,

ε_t – istežanje nastalo uslijed tečenja drveta,

$1 + \varphi$ - koeficijent tečenja drveta (13) u ovisnosti o vlažnosti.

Drveni nosač „I“ profila sastoji se od tri pravokutna profila. Dva profila su dimenzije 50x10 mm, a rebereni profil je 10x50mm.



Slika 51. Dimenzije pojasnog, rebrenog "I" profila.

Iz izraza (28) dobva se moment tromosti za „I“ profil:

$$I_y = 2 * \left(\frac{50 * 10^3}{12} + 50 * 10 * 30^2 \right) + \frac{10 * 50^3}{12} + 10 * 50 * 0^2 = 1012500,01 \text{ mm}^4$$

Dok se moment otpora dobiva iz izraza (27):

$$W_y = \frac{1012500,01}{35} = 28928,57 \text{ mm}^3$$

U tablici 19. prikazani su progibi u ovisnosti o opterećenju i maksimalna sila za sva tri lijepljena ispitna uzorka

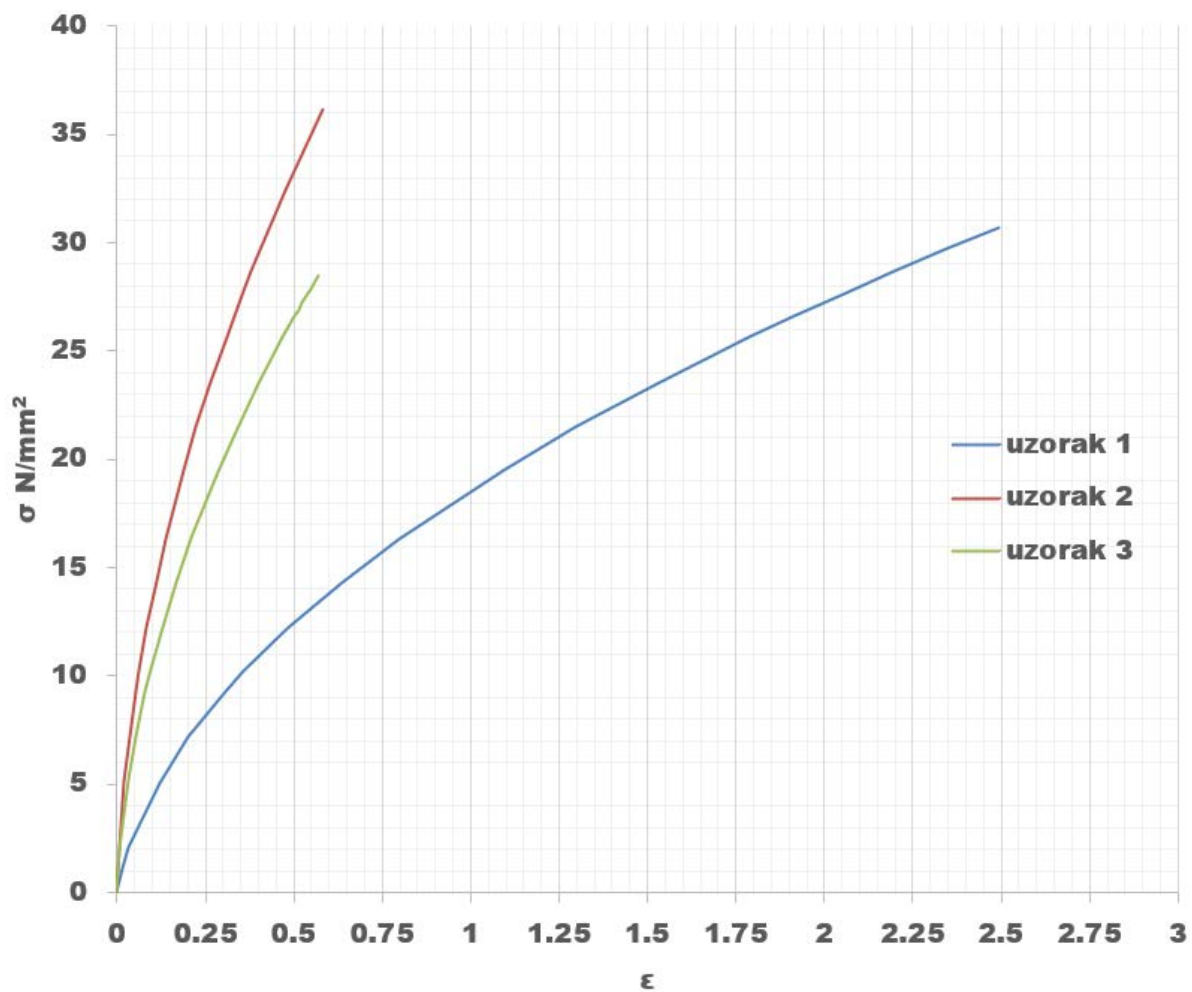
Tablica 19. Očitani progibi i maksimalna sila.

$F(\text{N})$	$f_1(\text{mm})$	$f_2(\text{mm})$	$f_3(\text{mm})$
0	0	0	0
80	0,54	0,085	0,13
158	1,05	0,17	0,26
395	2,52	0,44	0,67
553	3,55	0,62	0,93
711	4,57	0,79	1,21
790	5,14	0,88	1,34
947	6,06	1,05	1,59
1105	7,1	1,23	1,86
1263	8,11	1,4	2,13
1500	9,62	1,67	2,53
1658	10,66	1,84	2,8
1816	11,7	2,02	3,05
1974	12,67	2,19	3,33
2053	13,2	2,29	3,45
2132	13,72	2,37	3,59
2211	14,22	2,46	-
2290	14,74	2,54	-
F_{max}	15,23	3,14	3,72

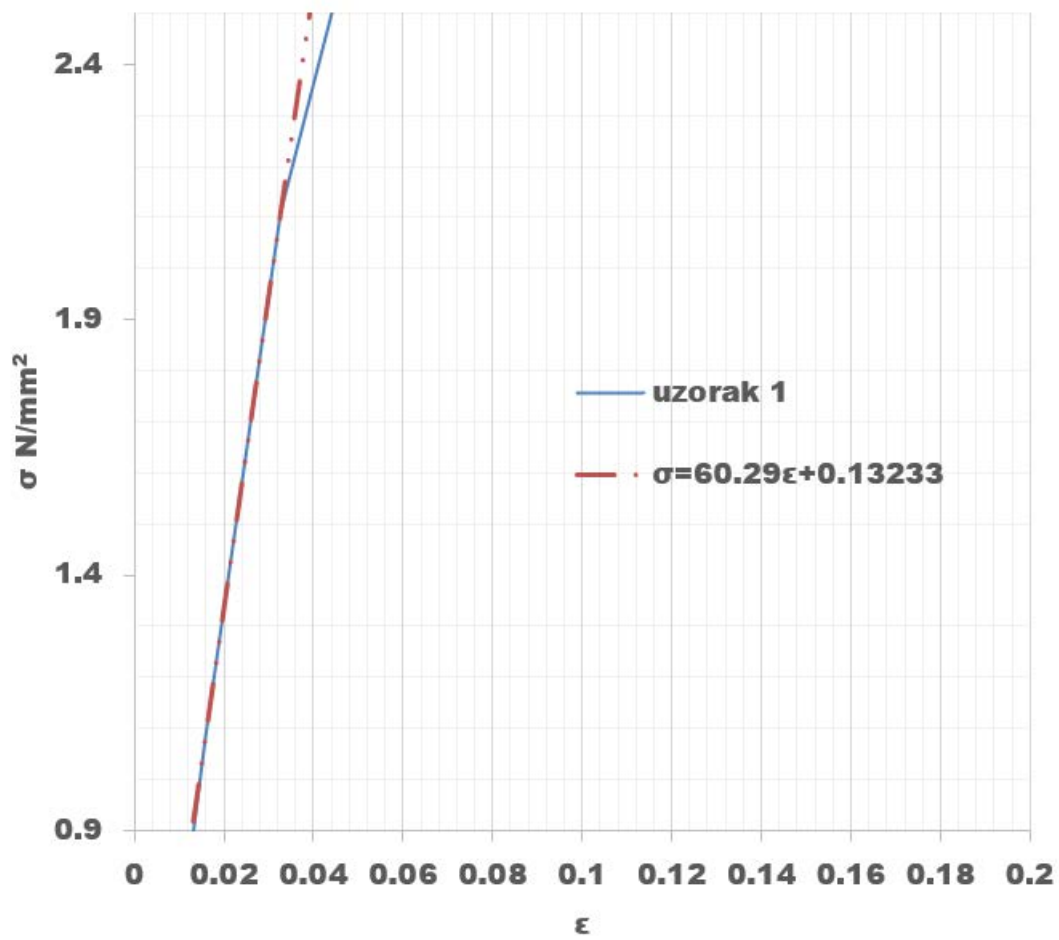
Koristeći jednadžbe (26), (27) i (32) izračunata su naprezanja i istežanja koja su dana u tablici 20. pomoću koje je konstruiran graf na slici (49).

Tablica 20. Naprezanja i istežanja ispitnih uzoraka "I" profila.

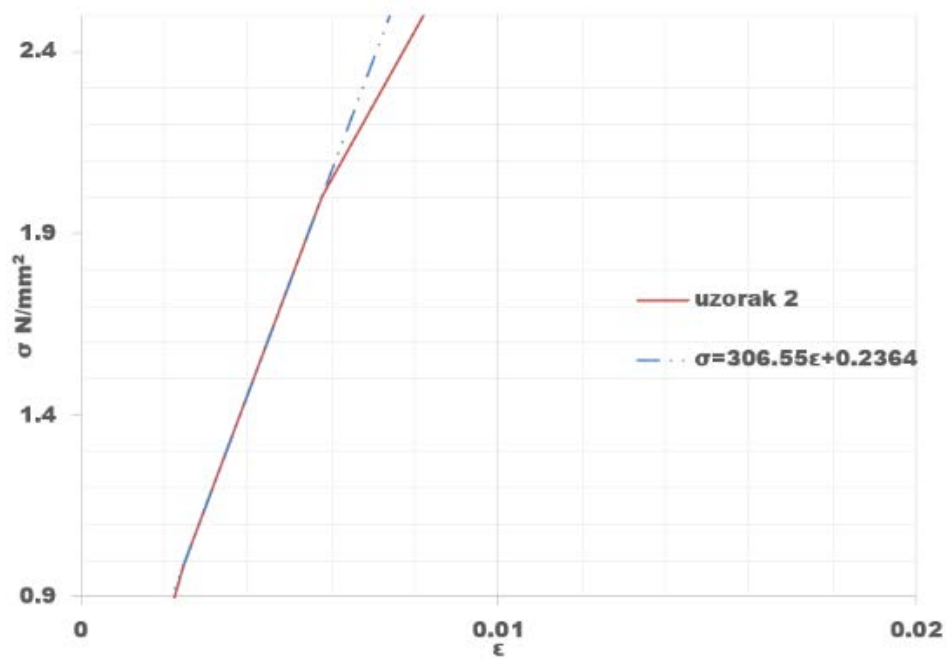
$F(N)$	σ_1	ε_1	σ_2	ε_2	σ_3	ε_3
0	0	0	0	0	0	0
80	1,081539	0,015744	0,988672	0,002454	1,021509	0,003859
158	2,110472	0,03281	2,002119	0,00576	2,009236	0,008759
395	5,074896	0,119463	5,148104	0,021113	5,168392	0,03215
553	7,159107	0,202088	7,175176	0,035086	7,193685	0,053332
711	9,209942	0,302466	9,255382	0,052751	9,275582	0,080143
790	10,20853	0,358191	10,25833	0,062471	10,30888	0,095347
947	12,22225	0,48421	12,24864	0,084079	12,25247	0,127353
1105	14,3207	0,634942	14,3794	0,110629	14,33116	0,16651
1263	16,3411	0,798786	16,31053	0,137744	16,37763	0,210033
1500	19,50942	1,0927	19,47165	0,188394	19,44984	0,284636
1658	21,4806	1,298348	21,47184	0,22446	21,45484	0,339322
1816	23,50331	1,527544	23,57216	0,265684	23,51626	0,400485
1974	25,61912	1,786984	25,62157	0,309217	25,62513	0,468236
2053	26,61307	1,915816	26,62808	0,331795	26,6003	0,503303
2132	27,66194	2,056585	27,60512	0,354465	27,66964	0,538923
2211	28,66854	2,196335	28,70036	0,380762	-	-
2290	29,71954	2,347114	29,65017	0,404322	-	-
F_{\max}	30,70246	2,492623	36,12166	0,583542	28,47848	0,568248



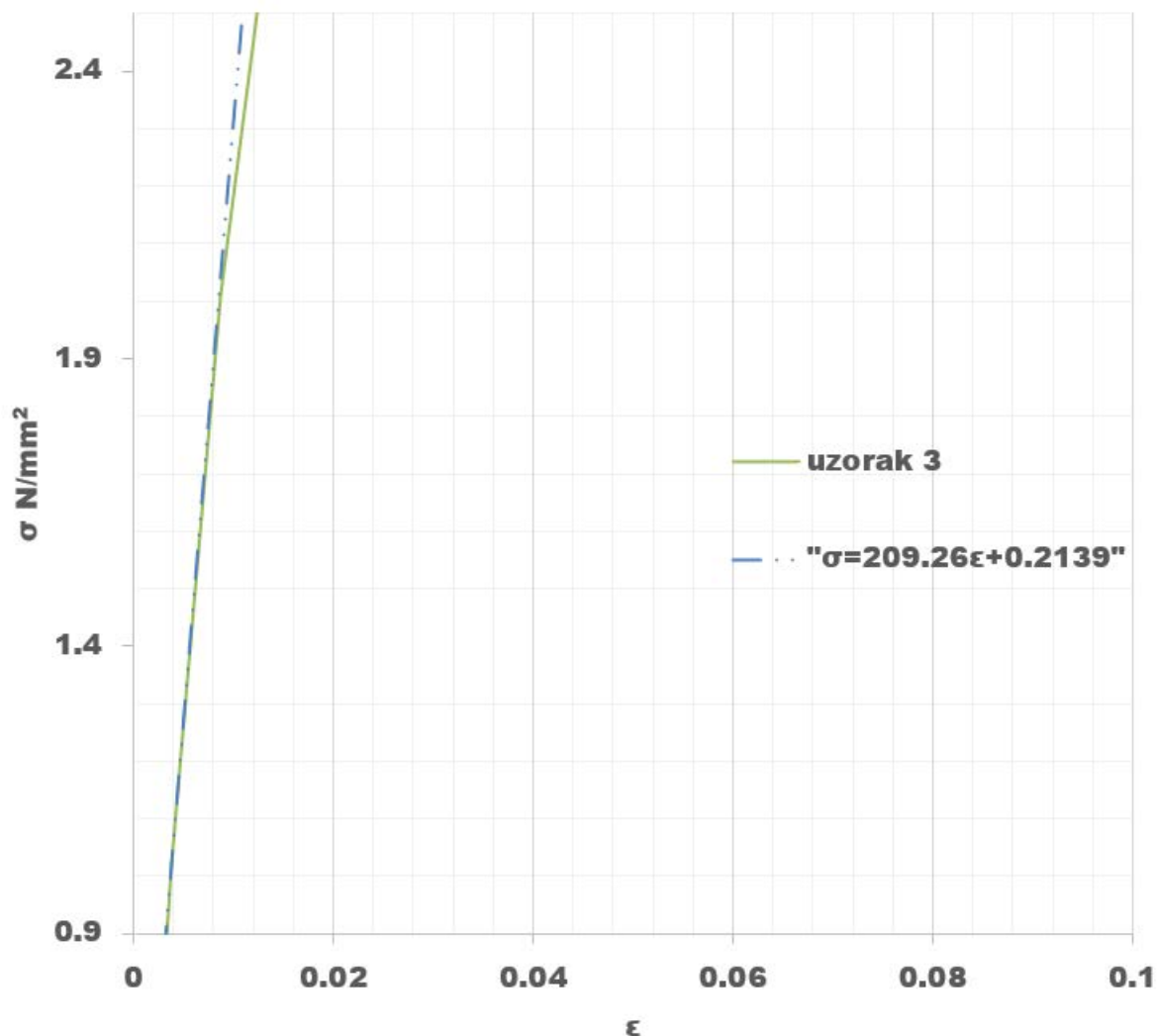
Slika 52. Grafički prikaz savojnog ispitivanja uzoraka.



a)



b)



c)

Slika 53. Savojni moduli a) uzorak 1, b) uzorak 2, c) uzorak 3

Iz jednadžbe pravaca sa slike 50 očitani su savojni moduli:

$$E_{1s} = 60,29 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$E_{2s} = 306,55 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$E_{3s} = 209,26 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti računa se prema izrazu (33):

$$E = \sqrt{\frac{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_n^2}{n - 1}} \quad (33)$$

gdje je n broj uzoraka. Koristeći izraz (28) dobivena je srednja vrijednost savojnog modula za uzorke, $E_{s,s} = 265,89 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$.

Pomoću izraza (24) izračunava se čvrstoća ispitanih uzoraka:

$$R_{m1,s} = 30,70246 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R_{m2,s} = 36,12166 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R_{m3,s} = 28,47848 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Srednja vrijednost savojne čvrstoće računa se prema izrazu (34):

$$R_m = \frac{R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + \dots + R_{mn}}{n} \quad (34)$$

$$R_{ms,s} = 31,78 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

6.3.2. Posmična naprezanja i modul smicanja

Posmično naprezanje se računa prema datom izrazu (35):

$$\tau_{//} = \frac{Q * S_y}{b * I_y} \quad (35)$$

Jednadžba za statički moment dijela presjeka računa se prema (36):

$$S_y = A_t * z_t \quad (36)$$

Gdje je:

$\tau_{//}$ - posmično naprezanje paralelno vlaknima,

Q - poprečna sila koja opterećuje uzorak,

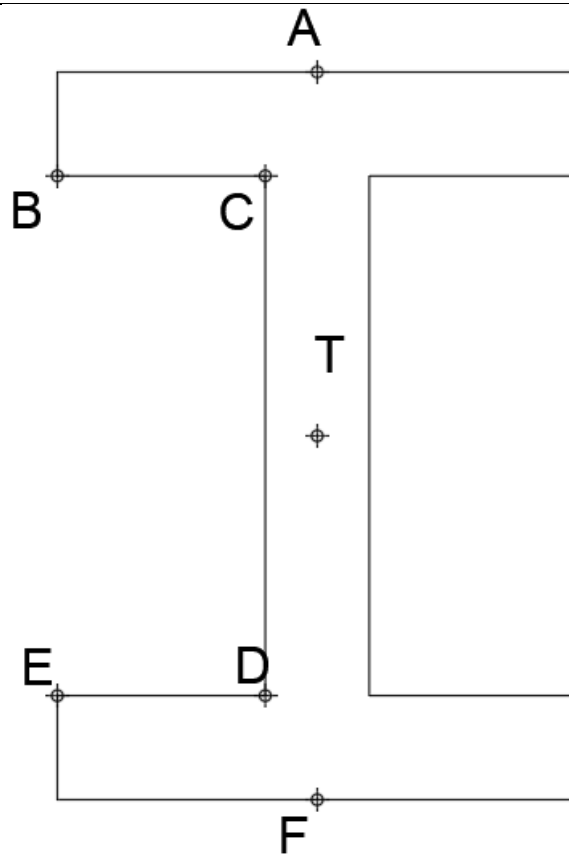
b – širina uzorka,

I_y - moment tromosti,

S_y - statički moment presjeka,

A_t - površina djela presjeka,

z_t - visina dijela presjeka.



Slika 54. Statički moment dijela poprečnog presjeka u točkama.

$$S_{y,A} = S_{y,F} = 0$$

$$S_{y,B} = S_{y,C} = 50 * 10 * (35 - 5) = 15000 \text{ mm}^3$$

$$S_{y,T} = S_{y,C} + 10 * \frac{25}{2} = 18125 \text{ mm}^3$$

$$S_{y,D} = S_{y,E} = 50 * 10 * (35 - 5) = 15000 \text{ mm}^3$$

Prema jednadžbi (35) izračunata su posmična naprezanja za sva tri drvena nosača, koja su dana u donjoj tablici.

Tablica 21. Posmična naprezanja ispitnih uzoraka „I“ profila

F (N)	τ_1	τ_2	τ_3
0	0	0	0
80	0,149355	0,136531	0,141066
158	0,291446	0,276483	0,277466
395	0,700819	0,710929	0,71373
553	0,988639	0,990858	0,993414
711	1,271849	1,278124	1,280914
790	1,409749	1,416626	1,423607
947	1,687834	1,691479	1,692007
1105	1,97762	1,985727	1,979065
1263	2,256628	2,252406	2,261673
1500	2,694158	2,688942	2,68593
1658	2,966369	2,965159	2,962811
1816	3,245696	3,255203	3,247484
1974	3,537878	3,538217	3,538708
2053	3,675139	3,67721	3,673375
2132	3,819983	3,812136	3,821046
2211	3,958989	3,963383	-
2290	4,104127	4,094548	-
Fmax	4,239864	4,988229	3,932742

Srednja vrijednost posmične čvrstoće računa se prema izrazu (37):

$$\tau_m = \frac{\tau_{m1} + \tau_{m2} + \tau_{m3} + \dots + \tau_{mn}}{n} \quad (37)$$

$$\tau_{ms,s} = 4,38695 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Modul smika nam govori kolika je otpornost prema naprezanju. U tablici ispod dani su omjeri modula smika i modula elastičnosti za određene vrste drveta.

Tablica 22. Omjeri modula smika i modula elastičnosti.

Vrsta drveta	G_s/E_s
Bor bijeli	0,052
Bor crveni	0,096
Hrast, bijeli	0,086
Hrast, crveni	0,089
Jela	0,069

Prema tablici 23. odabire se omjer modula smika i modula elastičnosti za jelu koji iznosi 0,069, pa izraz za smik savijanja za jelu glasi (38):

$$G_{ns} = 0,069 * E_{ns} \quad (38)$$

$$G_{1s} = 0,069 * 60,29 = 4,16 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$G_{2s} = 0,069 * 306,55 = 21,15 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$G_{3s} = 0,069 * 209,26 = 14,43 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Srednja vrijednost savojnog modula smika računa se prema jednadžbi (39):

$$G = \sqrt{\frac{G_1^2 + G_2^2 + G_3^2 + \dots + G_n^2}{n - 1}} \quad (39)$$

$$G = 15,48 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

6.3.3. Savojna i posmična čvrstoća u spoju

Izračun savojnog naprezanja izražava se prema jednadžbi (40):

$$\sigma_{f, spoj} = \frac{F * L}{4 * W_{y, spoj}} \quad (40)$$

$$W_{y, spoj} = \frac{I_y}{y_{spoj}} \quad (41)$$

$$\tau_{//,spoj} = \frac{Q * S_{y,spoj}}{b * I_y} \quad (42)$$

Moment tromosti u spoju se izračunava prema izrazu (28), te on iznosi $I_y = 1012500,01 \text{mm}^4$.

Dok moment otpora iznosi:

$$W_{y,spoj} = \frac{1012500,01}{10} = 101250,001 \text{mm}^3$$

Statički moment presjeka spoja iznosi:

$$S_{y,spoj} = S_{y,D} = 15000 \text{mm}^3$$

Koristeći jednadžbe (40) i (42) izračunata su savojna i posmična naprezanja koja su dana u donjoj tablici.

Tablica 23. Savojno i posmično naprezanje u spoju nosača "I" profila.

F (N)	σ_1	σ_2	σ_3	τ_1	τ_2	τ_3
0	0	0	0	0	0	0
80	0,309011	0,282478	0,29186	0,123604	0,112991	0,1165744
158	0,602992	0,572034	0,574067	0,241197	0,228814	0,229627
395	1,44997	1,470887	1,476684	0,579988	0,588355	0,590673
553	2,045459	2,05005	2,055339	0,818184	0,82002	0,822135
711	2,631412	2,644395	2,650166	1,052565	1,057758	1,060066
790	2,916722	2,930951	2,945393	1,166689	1,17238	1,178157
947	3,492071	3,499612	3,500704	1,396828	1,399845	1,400282
1105	4,091628	4,1084	4,094617	1,636651	1,64336	1,637847
1263	4,668885	4,660151	4,679324	1,867554	1,86406	1,871729
1500	5,57412	5,563327	5,557096	2,229648	2,225331	2,222838
1658	6,137315	6,134811	6,129953	2,454926	2,453924	2,451981
1816	6,715232	6,734903	6,718932	2,686093	2,693961	2,687573
1974	7,319748	7,320449	7,321465	2,927899	2,928179	2,928586
2053	7,603735	7,608021	7,600087	3,041494	3,043209	3,040035
2132	7,903413	7,887177	7,905613	3,161365	3,154871	3,162245
2211	8,191011	8,200103	-	3,276404	3,280041	-
2290	8,491298	8,471478	-	3,396519	3,388591	-
Fmax	8,772133	10,32047	8,136708	3,508853	4,128189	3,254683

Prema izrazu (40) računa se savojna čvrstoća spoja nosača:

$$R_{m1,spoja} = 8,772133 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$R_{m2,spoja} = 10,32047 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$R_{m3,spoja} = 8,136708 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Srednja vrijednost savojne čvrstoće izražava se prema jednadžbi (43):

$$R_{m,spoja} = \frac{R_{m1,spoja} + R_{m2,spoja} + R_{m3,spoja} + \dots + R_{mn,spoja}}{n} \quad (43)$$

$$R_{m,spoja} = 9,076 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Posmično naprezanje drvenih nosača u spoju je dano prema jednadžbi (42):

$$\tau_{m1,spoja} = 3,508853 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{m2,spoja} = 4,128189 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{m3,spoja} = 3,254683 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Srednja vrijednost posmične čvrstoće dobije se iz izraza (44):

$$\tau_{m,spoja} = \frac{\tau_{m1,spoja} + \tau_{m2,spoja} + \tau_{m3,spoja} + \dots + \tau_{mn,spoja}}{n} \quad (44)$$

$$\tau_{m,spoja} = 3,631 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

6.3.4. Dopuštena nosivost u spoju nosača

Kod ispitivanja nosača do loma, za dopuštenu nosivost uzima se $\frac{1}{2,75}$ * nosivost loma pod uvjetom da nije prekoračen dopušteni pomak u spoju od 1,5 mm. (45)(46)

$$\sigma_{spoj,dop} = \frac{1}{2,75} * R_{mn} \quad (45)$$

$$\tau_{spoj,dop} = \frac{1}{2,75} * \tau_{mn} \quad (46)$$

$$\sigma_{spoj,dop1(\Delta x=0,71mm)} = \frac{1}{2,75} * 8,772133 = 3,18986 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{spoj,dop2(\Delta x=1,01mm)} = \frac{1}{2,75} * 10,32047 = 3,75289 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{spoj,dop3(\Delta x=0,73mm)} = \frac{1}{2,75} * 8,136708 = 2,95881 \frac{N}{mm^2}$$

Srednja vrijednost dopuštenog naprezanja u spoju izražava se jednadžbom (47):

$$\sigma_{dop,spoja} = \frac{\sigma_{dop,spoj1} + \sigma_{dop,spoj2} + \sigma_{dop,spoj3} + \dots + \sigma_{dop,spojmn}}{n} \quad (47)$$

$$\sigma_{dop,spoja} = \frac{3,18986 + 3,75289 + 2,95881}{3} = 3,30052 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{spoj,dop1(\Delta x=0,71mm)} = \frac{1}{2,75} * 3,508853 = 1,27594 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{spoj,dop2(\Delta x=1,01mm)} = \frac{1}{2,75} * 4,128189 = 1,50116 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{spoj,dop3(\Delta x=0,73mm)} = \frac{1}{2,75} * 3,254683 = 1,18352 \frac{N}{mm^2}$$

Srednja vrijednost dopuštenog posmičnog naprezanja u spoju dobija se izrazom (48):

$$\tau_{dop,spoja} = \frac{\tau_{dop,spoj1} + \tau_{dop,spoj2} + \tau_{dop,spoj3} + \dots + \tau_{dop,spojmn}}{n} \quad (48)$$

$$\tau_{dop,spoja} = \frac{1,27594 + 1,50116 + 1,18352}{3} = 1,32021 \frac{N}{mm^2}$$

Pošto lijepljeni nosači imaju poprečni oblik „I“ profila, sva dopuštena naprezanja se trebaju reducirati K_s faktorom koji se izražava jednadžbom (19)(20):

$$c = \frac{h_1}{H} = \frac{10}{70} = 0,14286$$

$$K_s = 0,58 + 0,42 * \left[\frac{c * (b - t)}{b} + \frac{t}{b} \right] = 0,58 + 0,42 * \left[\frac{0,14286 * (50 - 10)}{50} + \frac{10}{50} \right] = 0,712$$

$$\sigma_{dop,spoja,red} = \sigma_{dop,spoja} * K_s = 3,30052 * 0,712 = 2,34997 \frac{N}{mm^2}$$

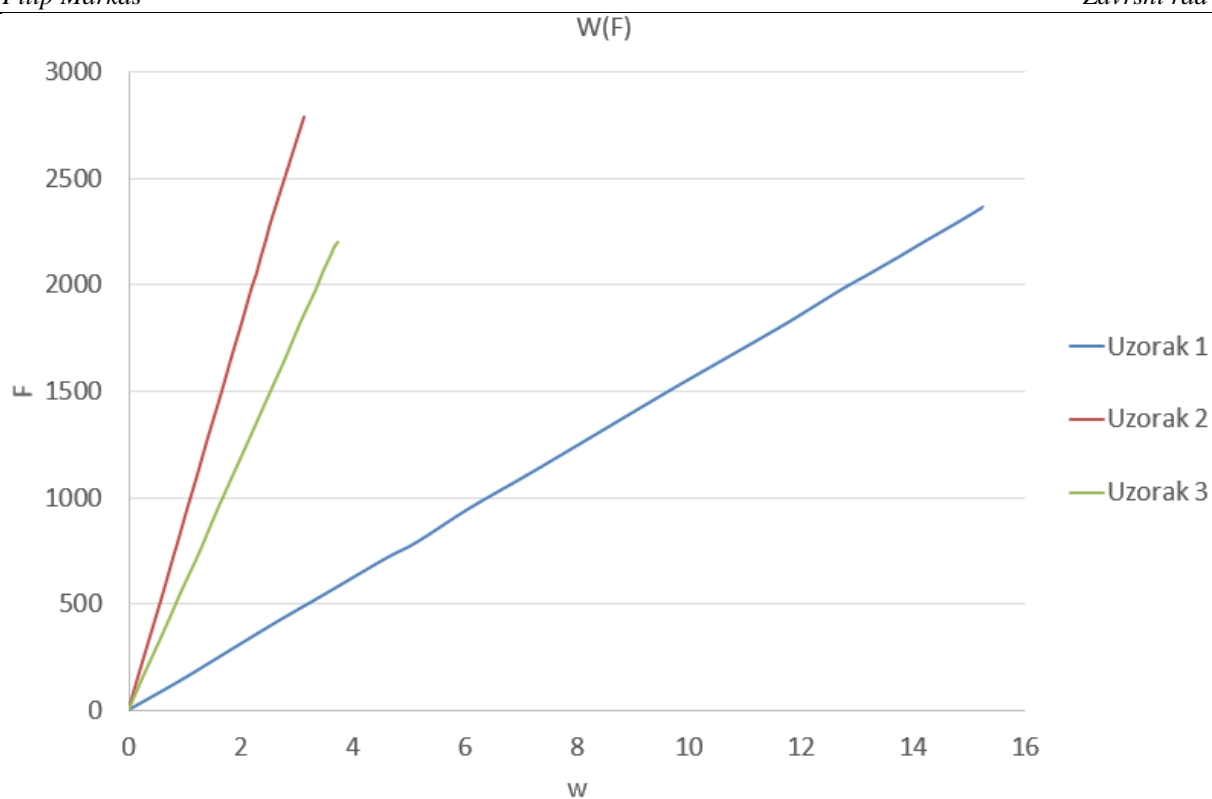
$$\tau_{dop,spoja,red} = \tau_{dop,spoja} * K_s = 1,32021 * 0,712 = 0,93998 \frac{N}{mm^2}$$

6.4. Analiza rezultata

Ispitivanjem tri nosača dobivene su vrijednosti progiba, savojnog i posmičnog naprezanja, modul smika i elastičnosti, te savojna i smična naprezanja u spoju. Analizirajući dobivene podatke pri određenom opterećenju dobiveni su maksimalni progibi na način da se vrijednosti kreću od najnižeg opterećenja do najvećeg, koje su prikazani u tablici 20. Proučavajući tablicu za sva tri nosača prvi značajno odstupa od ostalih. Razlozi su što se na njegovom gornjem pojasnom profilu nalazio truli dio, te ga je trebalo ukloniti, što je uvelike oslabilo njegovu strukturu vlakana. Nadalje, vlažnost nosača, pošto se nalazio na otvorenom prostoru, te nagle oscilacije temperature zraka su također uvjetovali odstupanja pri ispitivanjima navedenih svojstava. Na slici 55 su prikazani razlozi odstupnja nosača 1, a na slici 56 je prikazan dijagram progiba za sva tri nosača.



Slika 55. Prikaz odstranjenog trulog dijela ,vlažnost, te smjer i raspored vlakana nosača 1



Slika 56. Dijagram progiba u ovisnosti sile.

Ispitivanjem savojnog i posmičnog naprezanja drvenih nosača „I“ profila dobiveni su očekivani rezultati u spoju i samim nosačima. Dok kod modula smicanja i elastičnosti dolazi do odstupanja prvog nosača od druga dva, zbog vanjskih utjecaja na materijal (vlažnost zraka, temperatura), ponašanje drva kao heterogenog materijala, te utjecaj vlakana na strukturu nosača (smjer, njegova gustoća i položaj). Modul elastičnosti za nosače je grafički prikazan na slikama 52 i 53, dok je modul smika određen jednadžbom (38).

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu su opisana fizička i mehanička svojstva drveta i objašnjeni su najčešći načini spajanja drvenih elemenata. Također su objašnjeni i procesi mjerenja drvenih uzoraka.

Opisane su tehničke karakteristike drveta, te proces pripreme drvenih elemenata za dobivanje višeslojnog lijepljenog nosača.

Svi procesi su detaljno opisani i uz svaki su priložene: slika, tablica i dijagram da bi vizualno bilo objašnjeno što je napisano.

Prema izvršenim ispitivanjima i dobivenim rezultatima možemo zaključiti, da se nosači različito ponašaju ovisno o količini vlage, smjeru njegovih vlakana, utjecaju insekata, te zbog toga dobivamo različite rezultate za istu vrstu drva. Uzorci su oslabili pri naprezanju od 2 MPa u odnosu na vlačnu čvrstoću, koja za jelovo drvo iznosi 10,5 MPa. Kod prvog i drugog uzorka došlo je do pomaka u lijepljenom spoju cijelom dužinom nosača, te su vlakna počela pucati na pojasnim profilima, dok je kod trećeg uzorka došlo do pucanja vlakana pojasnih profila, te iskrivljenja rebrenog profila.

Višeslojno lijepljeno drvo ima široku primjenu u građevinarstvu i zbog svojih mnogobrojnih prednosti ima veliku ulogu u njemu.

LITERATURA

- [1] N. Krstić, “Core,” Rujan 2018. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/197819223.pdf>. [Accessed 25 04 2024].
- [2] M. Gojković, “Tehnologija drveta,” in *Drvene konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 9.
- [3] M. Gojković, “Tehnologija drveta,” in *Drvene konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 10.
- [4] M. Gojković, “Uvod,” in *Drvene konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 6.
- [5] chinawebteam, “iBuilder,” [Online]. Available: <https://ibuilder-zhcn.techinfus.com/drevesina/zabolon/>.
- [6] M. Gojković, “Građa drveta,” in *Drvene konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, pp. 10-11.
- [7] S. Jakopc, “Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsku,” 1 12 2022. [Online]. Available: <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A8722/datastream/PDF/view>. [Accessed 10 03 2023].
- [8] M. Gojković, “Fizička svojstva drveta,” in *Drvene konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, pp. 16-17.
- [9] M. Gojković, “Fizička svojstva,” in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 17.
- [10] M. Gojković, “Fizička svojstva drveta,” in *Drvene konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 17.
- [11] M. Gojković, “Fizička svojstva,” in *Drvene konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 16.
- [12] Arbos, “Njuškalo,” Arbos, 28 10 2022. [Online]. Available: <https://www.njuskalo.hr/strojevi-obrada-drva/vakumska-susara-drvo-kapaciteta-5-m3-oglas-19076721>. [Accessed 25 04 2024].
- [13] M. Gojković, “Fizička svojstva,” in *Drvene konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 17.
- [14] E. Blagojević, “Drvotehnika.info,” Drvotehnika, 01 2018. [Online]. Available: <https://drvotehnika.info/clanci/spojevi-masivnog-drveta-anizotropija-drveta-i-modeli-spajanja>. [Accessed 01 05 2024].
- [15] M. Gojković, “Fizička svojstva,” in *Drvene konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, pp. 18-19.
- [16] M. Gojković, “Fizička svojstva,” in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 19.
- [17] M. Gojković, “Fizička svojstva,” in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 20.
- [18] M. Gojković, “Fizička svojstva,” in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 19.
- [19] M. Gojković, “Fizička svojstva,” in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 19.

- [20] M. Gojković, "Fizička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, pp. 21-22.
- [21] M. Gojković, "Fizička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 22.
- [22] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 22.
- [23] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 22.
- [24] I. Lacković, "repozitorij.sumfak.unizg.hr," 2016. [Online]. Available: <https://repozitorij.sumfak.unizg.hr/islandora/object/sumfak%3A663/datastream/PDF/view>. [Accessed 05 05 2024].
- [25] I. Lacković, "repozitorij.sumfak.unizg.hr," 2016. [Online]. Available: <https://repozitorij.sumfak.unizg.hr/islandora/object/sumfak%3A663/datastream/PDF/view>. [Accessed 05 05 2024].
- [26] Ž. Gorišek, "korak.com.hr," Korak u prostor, 30 12 2007. [Online]. Available: <https://korak.com.hr/korak-020-prosinac-2007-tvrdoca-drva/>. [Accessed 05 05 2024].
- [27] I. Lacković, "repozitorij.sumfak.unizg.hr," 2016. [Online]. Available: <https://repozitorij.sumfak.unizg.hr/islandora/object/sumfak%3A663/datastream/PDF/view>. [Accessed 05 05 2024].
- [28] "Vojna enciklopedija," in *Drvo*, Beograd, Redakcija Vojne enciklopedije, 1970, p. 558.
- [29] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 23.
- [30] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 23.
- [31] Đ. Peulić, "Webgradnja.hr," 2004. [Online]. Available: <https://webgradnja.hr/clanci/vaznija-svojstva-drveta/3446>. [Accessed 07 05 2024].
- [32] I. Volarić, "proentaris.hr," 01 2017. [Online]. Available: <https://www.proentaris.hr/static/files/Svojstva%20drva.pdf>. [Accessed 07 05 2024].
- [33] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 27.
- [34] I. Volarić, "proentaris.hr," 01 2017. [Online]. Available: <https://www.proentaris.hr/static/files/Svojstva%20drva.pdf>. [Accessed 07 05 2024].
- [35] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, pp. 27-28.
- [36] I. Volarić, "proentaris.hr," 01 2017. [Online]. Available: <https://www.proentaris.hr/static/files/Svojstva%20drva.pdf>. [Accessed 07 05 2024].
- [37] I. Volarić, "proentaris.hr," 01 2017. [Online]. Available: <https://www.proentaris.hr/static/files/Svojstva%20drva.pdf>. [Accessed 07 05 2024].
- [38] I. Volarić, "proentaris.hr," 01 2017. [Online]. Available: <https://www.proentaris.hr/static/files/Svojstva%20drva.pdf>. [Accessed 07 05 2024].
- [39] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 29.
- [40] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 29.

- [41] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 30.
- [42] M. Gojković, "Mehanička Svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 30.
- [43] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, pp. 28-31.
- [44] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 31.
- [45] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 32.
- [46] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 32.
- [47] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 34.
- [48] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 34.
- [49] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 34.
- [50] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 35.
- [51] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, pp. 33-35.
- [52] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 37.
- [53] M. Gojković, "Mehanička svojstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 38.
- [54] S. Kusić, "savokusic.com," 12 03 2018. [Online]. Available: <https://www.savokusic.com/bs/blog/basta-kuca-stan/stolar-u-ku%C4%87i/tehnika-spajanja-drвета>. [Accessed 05 09 2024].
- [55] M. Gojković, "Spojna sredstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 140.
- [56] M. Gojković, "Spojna sredstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 140.
- [57] M. Gojković, "Spojna sredstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, pp. 139-141.
- [58] M. Gojković, "Spojna sredstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 144.
- [59] M. Gojković, "Spojna sredstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, pp. 143-145.
- [60] M. Gojković, "Spojna sredstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 145.
- [61] M. Gojković, "Spojna sredstva," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 168.

- [62] S. Kusić, “savokusic.com,” 12 03 2018. [Online]. Available: <https://www.savokusic.com/bs/blog/basta-kuca-stan/stolar-u-ku%C4%87i/tehnika-spajanja-drвета>. [Accessed 09 05 2024].
- [63] S. Kusić, “savokusic.com,” 12 03 2018. [Online]. Available: <https://www.savokusic.com/bs/blog/basta-kuca-stan/stolar-u-ku%C4%87i/tehnika-spajanja-drвета>. [Accessed 09 05 2024].
- [64] M. Gojković, “Spojna sredstva,” in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 154.
- [65] K. Tonković, Z. Lončarić, “tehnika.lzmk.hr,” 02 04 2013. [Online]. Available: https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/drvene_konstrukcije.pdf. [Accessed 09 05 2024].
- [66] M. Gojković, “Laminirane ljepljene konstrukcije,” in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 312.
- [67] V. dom, “nastava.info,” Vaš dom, 15 09 2020. [Online]. Available: <https://nastava.info/zgrada/renoviranje-i-dorada/kako-zalijepiti-drvo-i-koje-ljepilo-je-bolje.html>. [Accessed 11 05 2024].
- [68] V. dom, “nastava.info,” Vaš dom, 15 09 2020. [Online]. Available: <https://nastava.info/zgrada/renoviranje-i-dorada/kako-zalijepiti-drvo-i-koje-ljepilo-je-bolje.html>. [Accessed 11 05 2024].
- [69] V. dom, “nastava.info,” Vaš dom, 05 09 2020. [Online]. Available: <https://nastava.info/zgrada/renoviranje-i-dorada/kako-zalijepiti-drvo-i-koje-ljepilo-je-bolje.html>. [Accessed 11 05 2024].
- [70] V. dom, “nastava.info,” Vaš dom, 15 09 2020. [Online]. Available: <https://nastava.info/zgrada/renoviranje-i-dorada/kako-zalijepiti-drvo-i-koje-ljepilo-je-bolje.html>. [Accessed 11 05 2024].
- [71] H. C. Coporation, “henkel.com,” 30 04 2014. [Online]. Available: www.henkel.com. [Accessed 11 05 2024].
- [72] H. C. Corporation, “henkel.com,” 30 04 2014. [Online]. Available: www.henkel.com. [Accessed 11 05 2024].
- [73] V. dom, “nastava.info,” Vaš dom, 05 09 2015. [Online]. Available: <https://nastava.info/zgrada/renoviranje-i-dorada/kako-zalijepiti-drvo-i-koje-ljepilo-je-bolje.html>. [Accessed 11 05 2024].
- [74] M. Gojković, “Laminirane ljepljene konstrukcije,” in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, pp. 337-338.
- [75] M. Gojković, “Laminirane ljepljene konstrukcije,” in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 338.
- [76] M. Gojković, “Laminirane ljepljene konstrukcije,” in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, pp. 338-339.
- [77] M. Gojković, “Laminarne ljepljene konstrukcije,” in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 340.
- [78] M. Gojković, “Laminirane ljepljene konstrukcije,” in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 340.
- [79] M. Gojković, “Laminirane ljepljene konstrukcije,” in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 341.
- [80] M. Gojković, “Laminirane ljepljene konstrukcije,” in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, pp. 340-342.

- [81] M. Gojković, "Laminirane ljepljene konstrukcije," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 342.
- [82] M. Gojković, "Laminirane ljepljene konstrukcije," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 344.
- [83] M. Gojković, "Laminirane ljepljene konstrukcije," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 345.
- [84] M. Gojković, "Laminirane drvene konstrukcije," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, pp. 343-346.
- [85] M. Gojković, "Laminirane ljepljene konstrukcije," in *Drvene Konstrukcije*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu, 1983, p. 346.
- [86] M. Franz, "Ispitivanje mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala," in *Inžinjerski priručnik IP4*, Zagreb, Školska knjiga, 1988, p. 279.
- [87] M. Franz, "Ispitivanje mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala," in *Inžinjerski priručnik IP4*, Zagreb, Školska knjiga, 1988, pp. 279-280.
- [88] M. Franz, "Ispitivanje mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala," in *Inžinjerski priručnik IP4*, Zagreb, Školska knjiga, 1988, p. 280.
- [89] Topomatika, "ispitivanje.com," Topomatika, 2023. [Online]. Available: <https://www.ispitivanje.com/usluga-mehanickog-ispitivanja-materijala-i-komponenti/>. [Accessed 20 05 2024].
- [90] M. Franz, "Ispitivanje mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala," in *Inžinjerski priručnik IP4*, Zagreb, Školska knjiga, 1988, p. 281.
- [91] L. Pomenić, 28 03 2017. [Online]. Available: <file:///C:/Users/filip/Documents/4%20Stati%C4%8Dki%20vla%C4%8Dni%20pokus.pdf>. [Accessed 20 05 2024].
- [92] M. Franz, "Ispitivanje mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala," in *Inžinjerski priručnik IP4*, Zagreb, Školska knjiga, 1988, p. 281.
- [93] M. Franz, "Ispitivanje mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala," in *Inžinjerski priručnik IP4*, Zagreb, Školska knjiga, 1988, p. 282.
- [94] Topomatika, "ispitivanje.com," Topomatika, [Online]. Available: <https://www.ispitivanje.com/usluga-mehanickog-ispitivanja-materijala-i-komponenti/>. [Accessed 20 05 2024].
- [95] M. Franz, "Ispitivanje mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala," in *Inžinjerski priručnik*, Zagreb, Školska knjiga, 1988, pp. 282-283.
- [96] M. Franz, "Ispitivanje mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala," in *Inžinjerski priručnik IP4*, Zagreb, Školska knjiga, 1988, p. 283.
- [97] M. Franz, "Ispitivanje mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala," in *Inžinjerski priručnik IP4*, Zagreb, Školska knjiga, 1988, p. 283.
- [98] M. Franz, "Ispitivanje mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala," in *Inžinjerski priručnik IP4*, Zagreb, Školska knjiga, 1988, pp. 282-283.

PRILOZI

I. CD-R disc