

# I DRVO KAO MATERIJAL NOSEĆIH KONSTRUKCIJA

## 1. UOPŠTE

Drvo je jedan od najstarijih materijala nosećih konstrukcija. Drvo je prirodni i organski materijal koga odlikuje: u anatomskom i fizičkom smislu nehomogenost građe i njegove strukture, a u mehaničkom smislu izražena anizotropija.

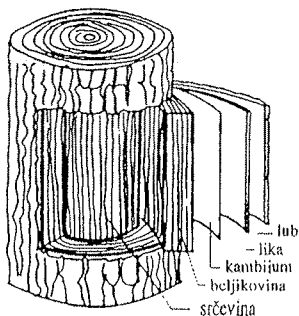
Kao prirodni i organski materijal biološkog porekla, drvo karakteriše promenljivost zapreminske mase u zavisnosti od vrste, starosti i građe drveta, a u vezi s tim i promenljivost mehaničkih karakteristika. Sadržaj vode u ćelijama drveta i greške u strukturi drveta uslovljene biološkim faktorima takođe imaju uticaja na ponašanje drveta pod dejstvom spoljnih sila.

U anatomskom smislu drvo ima veoma složenu strukturu. Mehanički elementi građe drveta su: vlakna ili vlakanca (kod lišćara) i traheide (kod četinara), a elementi koji imaju fiziološku ulogu su:

- drvni sudovi-traheje,
- sržni zraci,
- drvni parenhim i
- smoljnaci.

U procesu fiziološkog nastajanja drveta (fito-fiziološkog), vlakanca i drugi elementi strukture drveta obrazuju u toku jedne godine jako izražene koncentrične tankozidne cilindre - godove. Godovi se formiraju iz centra drveta-srca i protežu se preko srži, srčevine i beljiovine do spoljnog omotača. Mehaničke karakteristike godova razlikuju se i strukture goda u poprečnom preseku drveta. God je sastavljen od ranog, prolećnjeg i kasnog, jesenjeg drveta sa međusobno različitim anatomskim i mehaničkim svojstvima.

U mehaničkom smislu, uz zanemarenje nekih elemenata veoma složene anatomske strukture drveta, drvo se može posmatrati kao materijal sastavljen od dugačkih i šupljih ćelija vlaknaste strukture. Na Sl.I-1 predstavljeni su anatomske elementi strukture drveta i to:



Sl. I-1. Anatomske elementi strukture drveta.

- spoljni, koji imaju fiziološki zadatak-raščćenja (beljikovina i kora sa slojevima: kambijum, lika i lub), i
- unutrašnji - koji imaju mehaničku ulogu (srčevina i srž).

Zidovi traheida sastavljeni su od celuloze i lignina, a šupljine su ispunjene vazduhom i vodom. Celuloza je visokomolekularni ugljovodonik ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>, gde je n = 2500 - 3100. Drvo sadrži još i smolu, tanin i drugo.

U tehničkoj praksi, od mnogobrojnih vrsta drveta, se najčešće koriste:

- četinari - jela, smreka, bor i ariš, i
- tvrdi lišćari - hrast i bukva.

Upotreba mekih lišćara kao što su: lipa, topola, vrba, breza i dr. nije predviđena, kako našim tako i stranim, normativima. Ove vrste drveta se mogu uspešno primenjivati u građevinarstvu uz odgovarajuću redukciju elastomehaničkih karakteristika.

## 2. NEHOMOGENOST DRVETA

Veoma složena struktura drveta Sl. I-2, sa brojnim nepravilnostima, zahteva proučavanja na nivou najsitnijih submikro elemenata pa do makro elemenata. I najsitniji elementi submikrostrukture kao što su molekularni lanci celuloze i amorfnе sredine lignina su nehomogeni. Submikrostruktura podrazumeva i elemente koji čine sjedinjeni molekuli celuloze koje obrazuju fibrile veličine do  $10^{-5}$ mm. Nekoliko elemenata fibrila obrazuje mikrofibril koji je osnovni element strukture omotača cevčice.

Elementi mikrostrukture kao što su traheide, sudovi i vlakna su sasvim heterogenog sastava. Veličina tih elemenata se kreće u granicama od 0,001 pa do 0,1 mm.

Elementi makrostrukture gde spadaju godovi sa zonom ranog i kasnog drveta, sržni zraci, smolni kanali i krupniji sudovi i svi ostali elementi veći od 0.1 mm, ukazuju na potpunu nehomogenost drveta.

U zavisnostima od veličine posmatrane zapremine drveta, nehomogenost je svrstana u četiri vrste. Nehomogenost koja se sreće kod "čistog drveta" - bez čvorova, pukotina, kovrdža, smolnih kanala, radijalnih i tangencijalnih nagiba vlakana, na makrozapremini od oko  $1 \text{ cm}^3$  naziva se nehomogenost I vrste.

Ako su na makrozapremini od  $1 \text{ cm}^3$  čistog drveta prisutne mikropukotine, neodređena orijentacija godova u odnosu na konturu preseka i ako su prisutni smolni kanali onda je to nehomogenost II vrste.

U nehomogenost III vrste spadaju elementi kao što su sudovi i smolni kanali koji su veći od elemenata regularne mikrostrukture (traheide i vlakna libroforme) posmatrani na zapremini od  $1 \text{ mm}^3$ .

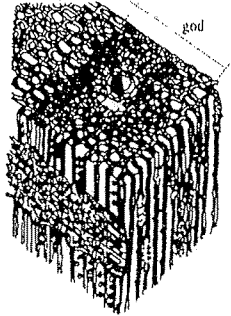
U nehomogenost IV vrste spadaju elementi na submikrozapremini od  $10^{-7} \text{ mm}^3$  kao što su kapilari i pore u zidićima, nagnutost fibrila, zaposednutost kapilara vodom i slično.

Mehanička svojstva drveta bitno zavise od veličine zapremine posmatranog uzorka, odnosno od "vrste" nehomogenosti. Prema ispitivanjima R. Marka, nosivost celuloze pri naprezanju na pritisak u pravcu vlakana (traheida) iznosi  $10^6 \text{ N/cm}^2$ , a modul elastičnosti

omotača traheida, prema podacima F. Kollmann-a iznosi  $1.16 \times 10^6 \text{ N/cm}^2$  do  $4.46 \times 10^6 \text{ N/cm}^2$ .

Nosivost omotača traheida u zoni ranog i kasnog drveta se međusobno razlikuju. Nosivost omotača traheida u zoni kasnog drveta iznosi  $6990 \text{ N/cm}^2$ , a u zoni ranog drveta  $3500 \text{ N/cm}^2$ , prema istraživanjima F. Kollmann-a.

Nosivost drvenih elemenata na nivou makrostrukture bitno se razlikuju od napred iznetih podataka. Za inženjerske drvene konstrukcije posebni značaj imaju mehaničke karakteristike drveta na nivou makro zapremine, dobijene standardnim ispitivanjima uzoraka "realne" zapremine.



Sl. I-2. Struktura drveta (jele).

### 3. ANIZITROPIJA DRVETA

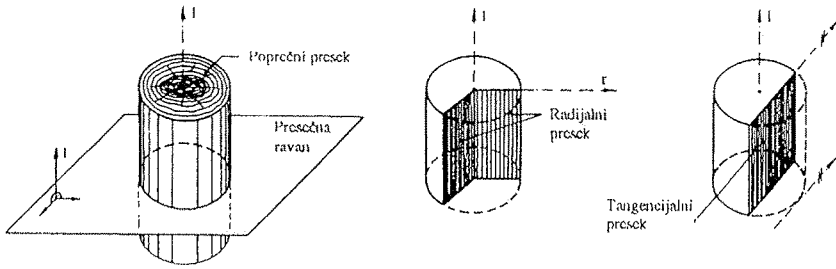
Pored prisutne nehomogenosti drvo ima i svojstvo anizotropije, kao posledicu različitog ponašanja drveta u različitim pravcima naprežanja.

U poprečnom preseku oblice drveta (bez kore) jasno su izraženi godovi u vidu koncentričnih krugova. Mehaničke karakteristike godova zavise od njegovog položaja u poprečnom preseku oblice. Veoma složena struktura goda i prisustvo ranog i kasnog drveta u jednom godu ukazuje na bitne razlike mehaničkih i anatomskih karakteristika pojedinih slojeva. Prisustvo ostalih elemenata strukture drveta i nepravilnosti uslovljene biološkim nastajanjem drveta ukazuje na veoma složen računski model drveta.

U aktuelnoj inženjerskoj praksi računski model se definiše na dovoljno velikoj makro zapremini drveta čija svojstva pod dejstvom spoljnih sila odražavaju svojstva zajedničkog dejstva svih elemenata strukture drveta.

Kod oblog drveta, bez kore, sa pravilnom konturom preseka i pravilnim rasporedom elemenata makrostrukture, jasno je izražena cilindrična anizotropija. Mehaničke karakteristike drveta u glavnim pravcima anizotropije (podužni ili longitudinalni, radijalni i tangencijalni) su različiti. Na Sl. I-3 prikazane su ose  $l$ ,  $r$  i  $t$  koje definišu glavne pravce anizotropije.

Primena cilindrične anizotropije je moguća samo kod oblog drveta sa pravilnom konturom i pravilnim rasporedom elemenata makrostrukture gde je jasno određen radijalni i tangencijalni pravac.



Sl. I-3. Model cilindrične anizotropije.

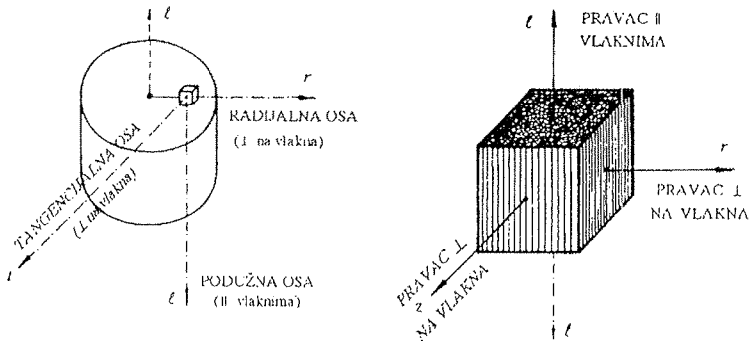
Obradom drveta, rezanjem, dobijaju se elementi sa različitim orijentacijem godova i drugih elemenata makrostrukture, pa je, generalno, otežano definisanje radijalnog i tangencijalnog pravca anizotropije. Pri naprezanju sile imaju slučajnu orijentaciju u odnosu na elemente makrostrukture. Imajući u vidu da se mehaničke karakteristike drveta pri naprezanju u podužnom pravcu bitno razlikuju od karakteristika za tangencijalni i radijalni pravac, to se za potrebe inženjerskih proračuna može usvojiti model ortogonalne anizotropije. Ovaj model podrazumeva dva glavna pravca anizotropije i to: podužni || (paralelni) poprečni ⊥ (upravni). Na Sl. I-4 predstavljen je model ortogonalne anizotropije, sa podužnom osom || vlaknima i poprečnim osama ⊥ na vlakna.

Ponašanje deformibilnog tela pod dejstvom spoljnih sila može se definisati linearnim vezama napona i deformacija. Kako su mehanička svojstva izotropnog tela jednaka u svim ortogonalnim pravcima x, y i z to su moduli elastičnosti za pojedine pravce naprezanja međusobno jednaki, odnosno

$$E_x = E_y = E_z = E = \text{const.}$$

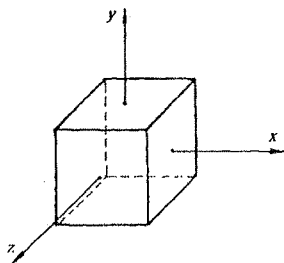
i modul klizanja

$$G_{yz} = G_{zx} = G_{xy} = G = \text{const.}$$



Sl. I-4. Model ortogonalne anizotropije.

Na Sl. I-5 dat je model izotropnog tela.



$$E_x = E_y = E_z = E;$$

$$G_{yz} = G_{zx} = G_{xy} = G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

- važi samo za izotropno telo

Sl. I-5. Model izotropnog tela.

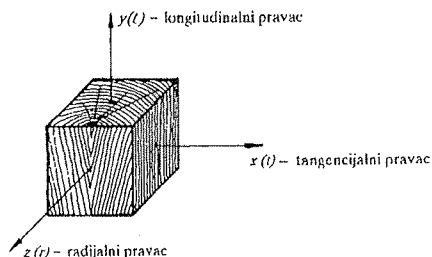
Za izotropno telo linearna veza deformacija ( $\epsilon$  - dilatacija i  $\gamma$  - klizanje) i napona ( $\sigma$  - normalni napon i  $\tau$  - tangencijalni napon) mogu se predstaviti u matricnom obliku:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\mu/E & -\mu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\mu/E & 1/E & -\mu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\mu/E & -\mu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} *$$

Kod cilindrično anizotropnog tela mehanička svojstva se razlikuju u ortogonalnim pravcima i to:

- osa x odgovara tangencijalnom pravcu t,
- osa y odgovara podužnom pravcu l, i
- osa z odgovara radijalnom pravcu r.

Moduli elastičnosti i moduli klizanja, za posmatrane ose (Sl. I-6.) međusobno se razlikuju.



$$E_x \neq E_y \neq E_z \quad ; \quad G_{yz} \neq G_{zx} \neq G_{xy}$$

Sl. I-6. Glavni pravci cilindrične anizotropije.

Linearne veze napona i deformacija cilindrično anizotropnog tela mogu se definisati u matičnom obliku

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & -1/E_y & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & -1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{zx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

Konstante  $S_{12}$ ,  $S_{13}$  i  $S_{23}$  ili u opštem slučaju  $S_{ij}$ , za glavne ose anizotropije dobijene su u oblasti elastičnih deformacija eksperimentalnim putem. Konstante  $S_{11}$  odgovaraju vrednosti  $1/E_x$ ,  $S_{22} = 1/E_y$  i  $S_{33} = 1/E_z$ ,  $S_{44} = 1/G_{yz}$ ,  $S_{55} = 1/G_{zx}$  i  $S_{66} = 1/G_{xy}$ .

Vrednosti konstanti, za neke vrste drveta, date su u tabeli I-1.

Tabela I - 1

VRSTA DRVETA	$S_{11}$	$S_{44}$	$-S_{12}^{xy}$	$E_x = 1/S_{11}$	$G_{yz} = 1/S_{44}$	$\frac{E_z}{G_{yz}}$	$\frac{E_x}{G_{yz}}$	I Z V O R
	$S_{22}$	$S_{55}$	$-S_{13}$	$E_y = 1/S_{22}$	$G_{zx} = 1/S_{55}$			
	$S_{33}$	$S_{66}$	$-S_{23}$	$E_z = 1/S_{33}$	$G_{xy} = 1/S_{66}$	-	-	*
	cm <sup>2</sup> /daN	cm <sup>2</sup> /daN	cm <sup>2</sup> /daN	daN /cm <sup>2</sup>	daN /cm <sup>2</sup>	-	-	*
HRAST	0.0001015	0.0000087	0.0000760	9900	13200	4.4	7.4	[1]
	0.0000172	0.0002500	0.0000300	58100	4000			[2]
	0.0000457	0.0001280	0.0000055	21900	7800			
BUKVA	0.0000862	0.0000610	0.0000037	11600	16400	8.5	13.0	[1]
	0.00000714	0.0002150	0.0000310	140100	4700			[2]
	0.0000438	0.0000929	0.0000032	22800	10800			
JASEN	0.0001220	0.0000731	0.0000032	8200	13700	11.8	17.7	[1]
	0.00000621	0.0003630	0.0000450	161000	2800			[2]
	0.0000651	0.0001100	0.0000029	15400	9100			
BREZA	0.0001590	0.0000836	0.0000026	6300	12000	13.9	17.9	[1]
	0.00000600	0.0005270	0.0000640	166700	1900			[2]
	0.0000888	0.0001080	0.0000029	11300	9300			
BOR	0.0001720	0.0000563	0.0000027	5800	17800	9.3	24.4	[1]
	0.00000602	0.0014800	0.0000540	166100	700			[2]
	0.0000890	0.0001460	0.0000028	11200	6800			
JELA Douglasie	0.0001260	0.0001110	0.00000279	8000	9000	17.8	17.8	[3]
	0.00000625	0.0011100	0.0000427	160000	900			
	0.0000994	0.0001110	0.0000019	10100	9000			
SMREKA	0.0002500	0.0001590	0.0000033	4000	6300	25.8	20.8	[1]
	0.00000616	0.0027000	0.0000600	162300	400			[2]
	0.0001430	0.0001290	0.0000027	7000	7800			

- [1] H. Hörig
- [2] J. Stamer
- [3] Doyle, Drow, Mc Burney

Za ortogonalno anizotropno telo moduli elastičnosti biće:

$$\begin{aligned} E_y = E_{||} & \quad i & \quad E_x = E_y = E_{\perp} & \quad i \\ G_{xz} = G_{||} & \quad i & \quad G_{yz} = G_{xy} = G_{\perp} \end{aligned}$$

Linearna veza napona i dilatacija, sa novim modulima, može se predstaviti u matričnom obliku

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{\perp} \\ \varepsilon_{\parallel} \\ \varepsilon_{\perp} \\ \gamma_{\parallel} \\ \gamma_{\perp} \\ \gamma_{\parallel} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_{\perp} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & -1/E_{\parallel} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & -1/E_{\perp} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{\parallel} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{\parallel} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{\perp} \\ \sigma_{\parallel} \\ \sigma_{\perp} \\ \tau_{\parallel} \\ \tau_{\perp} \\ \tau_{\parallel} \end{bmatrix}$$

Poasonov koeficijent može se sračunati iz relacije

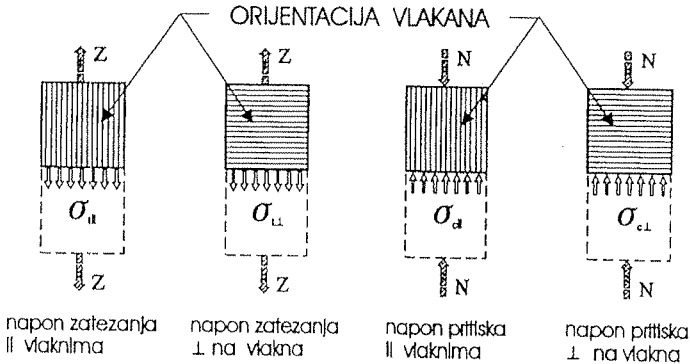
$$\mu_k = \frac{1}{m_k} = -\frac{S_{12} + S_{13} + S_{23}}{S_{11} + S_{22} + S_{33}} \leq \frac{1}{2}$$

#### 4. OZNAKE NAPREZANJA U PRAVCIMA

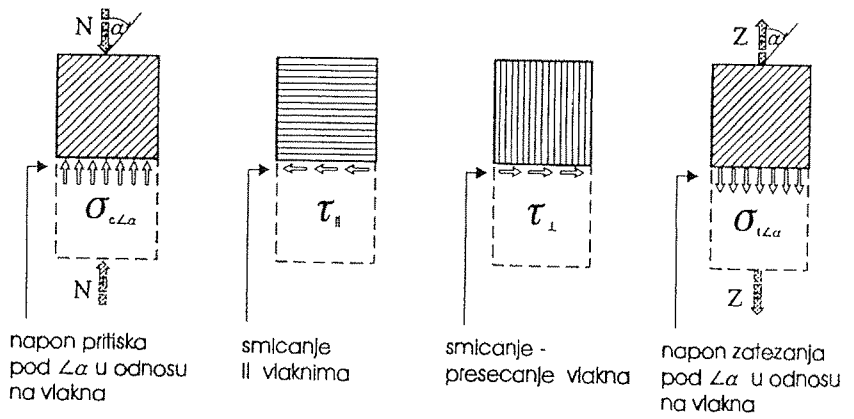
U inženjerskoj praksi drvenih konstrukcija, pri proračunu napona i pomeranja, razlikuju se dva ortogonalno anizotropna pravca:

- podužni ili pravac paralelan vlaknima sa oznakom ||, i
- pravac poprečni ili upravan na vlakna sa oznakom  $\perp$ .

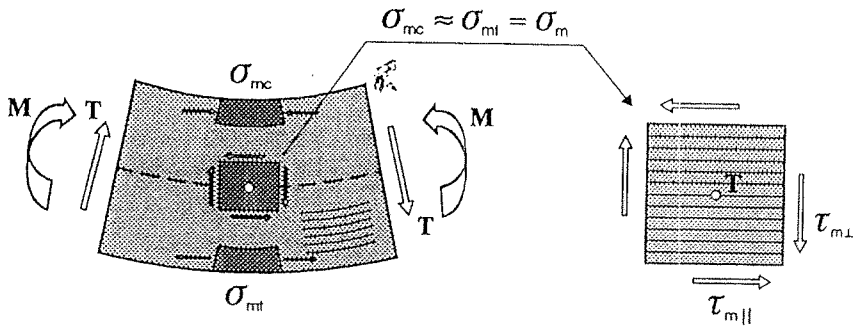
Prema vrsti napreznja i položajem vlakna u odnosu na pravac napreznja razlikuju se sledeće vrste napreznja (Sl.I - 7, 8, 9, 10).



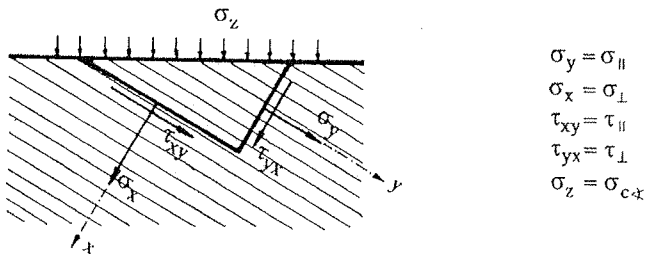
Sl. I-7. Vrste napreznja u odnosu na pravce anizotropije (|| i  $\perp$ ).



Sl. I-8. Naprezanja  $\perp$  (upravno) || (paralelno) i koso (pod uglom).



Sl. I-9. Naponi savijanja: normalni i tangencijalni naponi.



Sl. I-10. Složeno naponsko stanje.