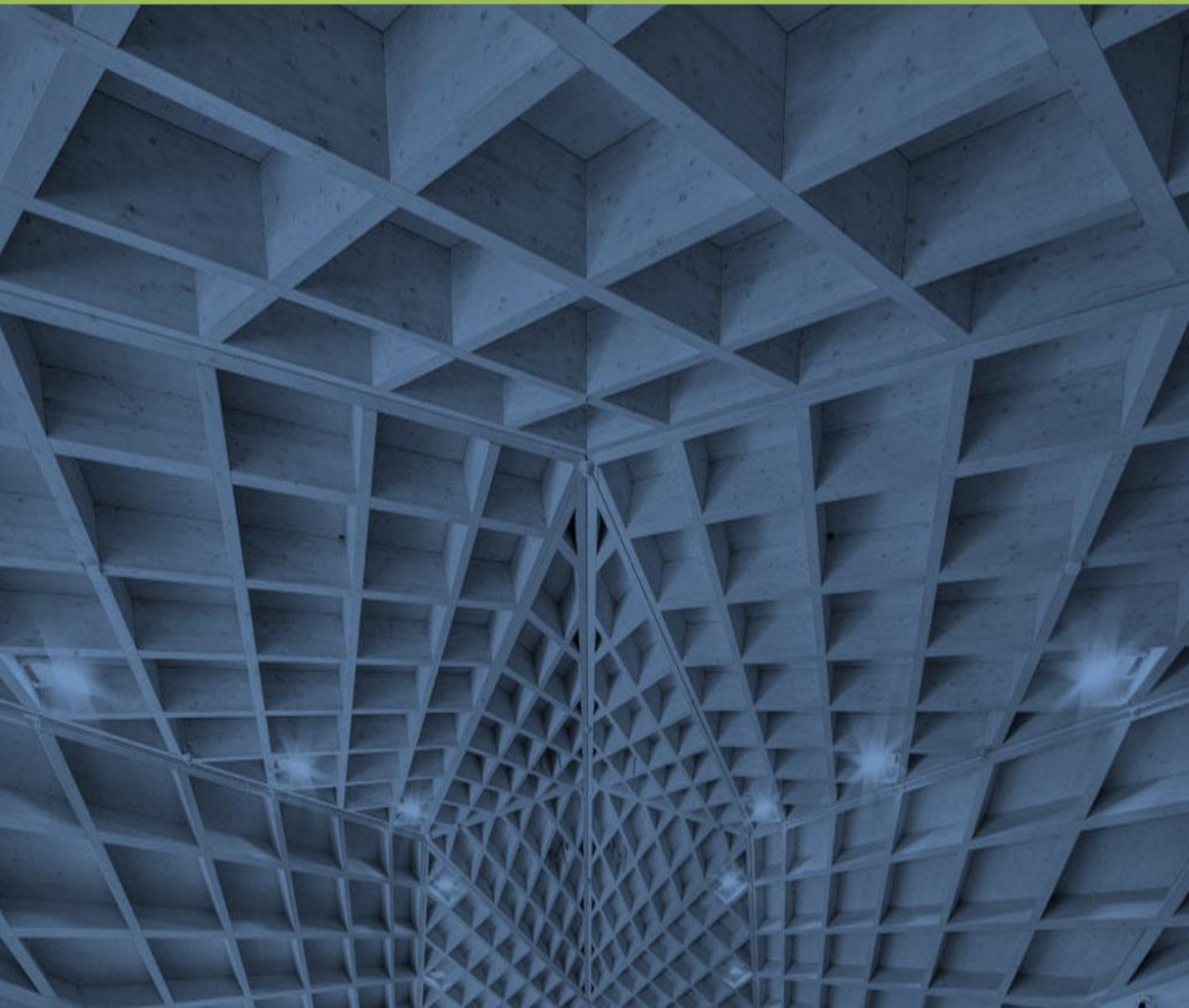


Prof. dr Ljiljana Kozarić



DRVENE KONSTRUKCIJE



Autor:
Prof. dr Ljiljana Kozarić, dipl.građ.inž.

Naslov:
DRVENE KONSTRUKCIJE

Recenzenti:
Prof. dr Žikica Tekić, dipl.inž.arh.
Dr Lenart Đerđ, dipl.građ.inž.

Odobreno za izdavanje kao univerzitetski udžbenik iz predmetne naučne oblasti odlukom Nastavno naučnog veća Građevinskog fakulteta Subotica broj 58-7/2025 od 27.08.2025. godine.

Izdavač:
Univerzitet u Novom Sadu
Građevinski fakultet Subotica
24000 Subotica, Kozaračka 2a

Glavni i odgovorni urednik:
Prof. dr Milan Trifković, dipl.geod.inž., dekan

Tiraž:
50 primeraka

Štampa/Umnožava:
Biomarket 024 d.o.o.
24000 Subotica, Maksima Gorkog 40

Mesto i godina izdanja:
Prvo izdanje, Subotica, 2025.

ISBN 978-86-82780-01-4

Zabranjeno preštampavanje, fotokopiranje i umnožavanje na elektronskom mediju.
Sva prava zadržava autor i izdavač.

CIP - Каталогизација у публикацији
Библиотеке Матице српске, Нови Сад

624.011.1(075.8)
694.1(075.8)

КОЗАРИЋ, Љиљана, 1975-

Drvene konstrukcije [Elektronski izvor] / Ljiljana Kozarić. - 1. izd. - Subotica : Građevinski fakultet, 2025 (Subotica : Biomarket). - 1 USB memorija

Dostupno i na: https://zbornik.gf.uns.ac.rs/eludzbenik/Drvene_konstrukcije.pdf. - Nasl. sa naslovnog ekrana. - Tiraž 50.
- Bibliografija.

ISBN 978-86-82780-01-4

a) Дрвене конструкције

COBISS.SR-ID 175446281

PREDGOVOR

Savremeno građevinarstvo suočava se sa brojnim izazovima, među kojima su očuvanje životne sredine, povećanje energetske efikasnosti i primena održivih materijala u projektovanju i izvođenju konstrukcija. U tom kontekstu, drvo se ponovo izdvaja kao materijal od izuzetnog značaja, zahvaljujući svojim ekološkim, estetskim i tehničkim prednostima.

Udžbenik Drvene konstrukcije nastao je s namerom da studentima Građevinskog fakulteta Subotica, kao i inženjerima i projektantima, pruži sistematizovano i sveobuhvatno znanje o svojstvima drveta, njegovim konstruktivnim mogućnostima, standardima i propisima, kao i principima projektovanja zasnovanim na savremenim evropskim normama. Poseban naglasak stavljen je na integraciju tradicionalnih znanja i iskustava sa inovativnim pristupima i tehnologijama koje oblikuju budućnost održive gradnje.

Knjiga je strukturirana tako da čitaoca postupno uvodi od osnovnih informacija o drvetu kao materijalu, preko istorijskog razvoja i specifičnih svojstava, do detaljnih metoda proračuna i projektovanja drvenih konstrukcija prema Evrokodu 5. Pored toga, obrađene su i teme koje se odnose na ekološke aspekte i perspektive razvoja u savremenom građevinarstvu, čime se pruža šira slika o ulozi drveta u budućnosti građevinske industrije.

Nadam se da će ovaj udžbenik doprineti razvoju stručnih kompetencija studenata i inženjera, kao i da će podstaći dalja istraživanja i primenu drveta u projektima različitih namena. Njegova vrednost ogleda se u tome što ne pruža samo teorijska znanja, već i praktične smernice koje mogu biti od koristi u svakodnevnom inženjerskom radu.

Autorka se zahvaljuje recenzentima na komentarima i sugestijama koji su doprineli unapređenju kvaliteta ovog udžbenika.

Subotica, 2025.

Ljiljana Kozarić

SADRŽAJ

1. UVOD U DRVENE KONSTRUKCIJE

- 1.1. Značaj i primena drvenih konstrukcija u građevinarstvu
- 1.2. Istorija i razvoj drvenih konstrukcija
- 1.3. Prednosti i mane upotrebe drveta u građevinskoj industriji
- 1.4. Ekološke prednosti drvenih konstrukcija

2. DRVO KAO GRAĐEVINSKI MATERIJAL

- 2.1. Hemijski sastav i struktura drveta
- 2.2. Vrste drveta
- 2.3. Tehnička svojstva drveta
- 2.4. Greške i zaštita drveta
- 2.5. Građevinski proizvodi od drveta

3. STANDARDI, PROPISI I NORMATIVI U DRVENIM KONSTRUKCIJAMA

- 3.1. Struktura evrokodova
- 3.2. Evrokod 0: Osnove projektovanja konstrukcija (EC0)
- 3.3. Evrokod 5: Projektovanje drvenih konstrukcija — Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade (EC5)

4. PROJEKTOVANJE DRVENIH KONSTRUKCIJA

- 4.1. Proračun poprečnih preseka izloženih savijanju
- 4.2. Proračun poprečnih preseka izloženih aksijalnim ili kombinovanim naprezanjima
- 4.3. Proračun poprečnih preseka elemenata sa promenljivom visinom ili zakrivljenim oblikom
- 4.4. Veze ostvarene metalnim spojnim sredstvima

5. DRVENE KONSTRUKCIJE U EKOLOŠKOM GRAĐEVINARSTVU

- 5.1. Održivi dizajn u drvenim konstrukcijama
- 5.2. Korišćenje recikliranog i obnovljivog drveta
- 5.3. Drvo u pasivnim i energetske efikasnim zgradama
- 5.4. Primeri uspešnih ekoloških projekata

6. BUDUĆNOST I PERSPEKTIVE DRVENIH KONSTRUKCIJA

- 6.1. Budućnost drvenih konstrukcija u građevinskoj industriji
- 6.2. Trendovi i inovacije u korišćenju drveta kao građevinskog materijala

7. LITERATURA

1. UVOD U DRVENE KONSTRUKCIJE

1.1. Značaj i primena drvenih konstrukcija u građevinarstvu

Drvene konstrukcije u građevinarstvu imaju dugu tradiciju, a njihov značaj i primena ostaju relevantni i u savremenom građevinskom sektoru. Drvo je prirodan, obnovljiv materijal koji se koristi u različitim vrstama građevinskih objekata, od stambenih do industrijskih i komercijalnih objekata. S obzirom na njegove prednosti u pogledu ekološke održivosti, estetskih vrednosti i tehničkih karakteristika, drvene konstrukcije se sve više primenjuju u modernom građevinarstvu.

Značaj drvenih konstrukcija

- **Ekološka održivost:** Drvo je obnovljiv resurs i tokom svog rasta apsorbira ugljen-dioksid, čime doprinosi smanjenju efekta staklene bašte. Upotrebom drvenih materijala smanjuje se emisija ugljen-dioksida u atmosferu u poređenju sa betonima i čelikom, koji imaju veći energetski otisak. U procesu proizvodnje drvenih materijala potrebna je manja količina energije, što doprinosi smanjenju negativnog uticaja na životnu sredinu.
- **Dobar termoizolator:** Drvo je prirodni izolator, koji pomaže u očuvanju temperature u unutrašnjosti objekta, smanjuje potrebe za dodatnim grejanjem ili hlađenjem, i time doprinosi uštedi energije i nižim troškovima. Drvene kuće često imaju bolje energetske karakteristike u poređenju sa tradicionalnim zidanim ili betonskim objektima.
- **Estetske vrednosti:** Drvo kao građevinski materijal ima jedinstvenu estetiku koja doprinosi prijatnom i toplom ambijentu. Njegova tekstura i prirodne boje čine ga izuzetno privlačnim za arhitekte i dizajnere. Drvo se lako uklapa u različite arhitektonske stilove, od rustičnih do modernih, a njegov prirodni izgled može biti dodatno naglašen različitim završnim obradama, bojama ili lakovima. Osim estetskih prednosti, drvo ima i pozitivan psihološki efekat na korisnike prostora, pružajući osećaj udobnosti i povezanosti sa prirodom.
- **Fleksibilnost u dizajnu:** Drvo je lako obradivo i oblikovano, što omogućava dizajnerima da prave različite oblike i arhitektonske elemente, od jednostavnih kuća do složenih objekata. Bez obzira na to da li se radi o tradicionalnim kućama, modernim zgradama ili kompleksnim konstrukcijama poput mostova i velikih hala, drvo pruža neograničene mogućnosti dizajna. Ova fleksibilnost olakšava prilagođavanje drvenih elemenata specifičnim zahtevima projekta.
- **Brzina izgradnje:** S obzirom na to da se drveni elementi mogu proizvoditi u fabrikama i prevoziti na gradilište, proces gradnje sa drvenim konstrukcijama može biti brži nego kod tradicionalnih betonskih i čeličnih konstrukcija. Drveni elementi se često proizvode u kontrolisanim fabričkim uslovima, što omogućava visoku preciznost i efikasnost. Nakon proizvodnje, elementi se transportuju na gradilište, gde se brzo montiraju. Ovaj proces smanjuje vreme izgradnje u poređenju sa tradicionalnim metodama koje zahtevaju duži rad na licu mesta, poput izlivanja betona. Osim toga, smanjena količina radova koji zahtevaju sušenje materijala dodatno ubrzavaju proces, što je posebno korisno kod projekata sa kratkim rokovima. Brza gradnja ne samo da štedi vreme, već i smanjuje troškove rada i minimizira uticaj na okolinu tokom same izgradnje.

Primena drvenih konstrukcija

- **Stambene zgrade:** Drvene konstrukcije imaju dugu tradiciju u izgradnji kuća, vikendica i drugih stambenih objekata, što ih čini jednim od najstarijih materijala u građevinskoj industriji. U savremenoj gradnji, drvo se sve više koristi zbog svojih brojnih prednosti, poput brze izgradnje, energetske efikasnosti i ekološkog aspekta. Ovaj materijal je naročito popularan u zemljama sa razvijenom tradicijom korišćenja drveta, poput Švedske, Kanade i Nemačke, gde se u velikoj meri primenjuju savremeni sistemi drvenih panela i prefabrikovanih modula. Ovi inovativni pristupi omogućavaju brzo postavljanje stambenih objekata koji su energetski efikasni, sa odličnim svojstvima termoizolacije, čime se značajno smanjuje potrošnja energije za grejanje i hlađenje. Pored toga, drvo kao obnovljiv resurs ima minimalan negativan uticaj na životnu sredinu, čineći ove objekte održivim i ekološki prihvatljivim rešenjima za savremenu gradnju.
- **Komercijalni objekti:** Upotreba drvenih konstrukcija u komercijalnoj gradnji postaje sve zastupljenija, obuhvatajući širok spektar objekata kao što su restorani, kancelarije, prodavnice, hoteli i druge javne zgrade. Osim toga, drvo se koristi i za izgradnju manjih objekata kao što su prodajni kiosci, štandovi i mobilne prodavnice. Zbog svoje estetske privlačnosti i ekoloških prednosti, drvo je sve češći izbor u dizajnu objekata koji teže održivosti. Drvene konstrukcije pružaju visoke performanse u pogledu termoizolacije, što doprinosi energetskej efikasnosti objekta. Pored toga, drvo doprinosi stvaranju prijatnog unutrašnjeg ambijenta, pružajući toplotu i prirodnu lepotu prostora, što je veoma cenjeno u savremenim komercijalnim objektima.
- **Mostovi i infrastrukturni objekti:** Drvene konstrukcije sve više nalaze primenu u infrastrukturi, uključujući mostove, pešačke staze, kao i različite manje objekte u parkovima i prirodnim rezervatima. Moderni tretmani drveta, kao i upotreba naprednih materijala, omogućavaju njegovu upotrebu u zahtevnijim infrastrukturnim projektima, čineći ga konkurentnim u odnosu na druge građevinske materijale. Drvo ne samo da doprinosi estetskoj vrednosti objekata, već se odlikuje i brojnim prednostima kao što su brzina izgradnje, smanjena potrošnja energije u proizvodnji i transportu, te manji ekološki otisak. Korišćenje drvenih konstrukcija u ovim projektima takođe pomaže u očuvanju prirodnog okruženja, budući da se drvo kao obnovljivi resurs manje negativno odražava na ekosistem u poređenju sa tradicionalnim materijalima poput betona ili čelika.
- **Prefabrikovani objekti:** Korišćenje prefabrikovanih drvenih panela i sistema omogućava značajno ubrzanje i unapređenje efikasnosti procesa izgradnje. Prefabrikovani drveni elementi, koji se proizvode u kontrolisanim uslovima fabrike, mogu se koristiti za izgradnju modularnih stambenih jedinica, vikend kuća, kancelarijskih objekata, ali i različitih komercijalnih i industrijskih objekata. Ovaj pristup ne samo da smanjuje potrebu za velikim brojem radnika na gradilištu, već i doprinosi većoj preciznosti u montaži, što omogućava visok kvalitet završnih radova. Takođe, prefabrikacija smanjuje količinu građevinskog otpada, jer se svi elementi proizvode sa minimalnim odmeravanjem i optimizacijom materijala, što čini ceo proces ekološki prihvatljivijim. U kombinaciji sa bržim vremenskim okvirima za izgradnju, ovo predstavlja održiv i ekonomičan način gradnje.
- **Lepljeni lamelirani drveni nosači (GLT):** Lepljeni lamelirani drveni nosači (GLT) predstavljaju naprednu tehnologiju u građevinskoj industriji, sve više korišćenu za izgradnju velikih objekata, kao što su industrijske hale, sportski objekti, kulturni centri i druge prostrane građevine. Ovi nosači se prave spajanjem više slojeva drvenih lamela

lepljenjem, što im omogućava izuzetnu čvrstoću, stabilnost i otpornost na promene temperature i vlažnosti. Zbog svoje visoke čvrstoće i sposobnosti da podnose velike opterećenja, GLT nosači omogućavaju veće rasponske mogućnosti i slobodne prostore u odnosu na tradicionalno drvo. Time se otvaraju nove mogućnosti za dizajn objekata sa manjim brojem stubova i većom fleksibilnošću u unutrašnjem prostoru. Ovi materijali se takođe koriste u konstrukcijama koje zahtevaju visoku dimenzionalnu stabilnost, smanjujući potrebu za dodatnim ojačanjima i omogućavajući bržu i efikasniju izgradnju. GLT je ekološki prihvatljiv materijal, jer se koristi obnovljiv resurs, a proizvodnja ovog materijala generiše manje emisije ugljen-dioksida u poređenju sa drugim građevinskim materijalima.

- **Zeleni krovovi i fasade:** Drvo je sve popularniji materijal u izradi ekoloških krovova i fasada, zbog svojih izuzetnih svojstava i održivosti. Korišćenjem drvenih panela i modula, moguće je postaviti zelene fasade i krovove prekrivene biljkama, što doprinosi poboljšanju energetske efikasnosti objekta. Ovi sistemi omogućavaju bolje zadržavanje toplote zimi i prirodnu hladovinu ljeti, smanjujući potrebu za veštačkim grejanjem i hlađenjem. Osim toga, drvo doprinosi estetici prostora, stvarajući prirodan i harmoničan izgled koji se uklapa u okolinu, dok istovremeno pomaže u smanjenju emisije ugljen-dioksida i povećava biološku raznovrsnost u urbanim sredinama. Zeleni krovovi i fasade takođe pružaju dodatnu izolaciju, apsorbuju kišnicu, smanjuju urbana toplotna ostrva i pozitivno utiču na mikroklimu, čineći gradove ekološki prihvatljivijima i prijatnijima za život.

Prednosti i izazovi

Prednosti

- **Ekološka prihvatljivost:** Drvo je obnovljiv resurs koji ima manji ugljeni otisak u odnosu na druge građevinske materijale poput betona i čelika.
- **Smanjeni troškovi energije u izgradnji i održavanju:** Drvo ima prirodne termalne izolacione karakteristike koje mogu smanjiti troškove grejanja i hlađenja.
- **Estetska vrednost i toplina prostora:** Drvo pruža prirodan, toplinski izgled koji doprinosi ugodnoj atmosferi i vizuelnoj privlačnosti prostora.
- **Brzina izgradnje i fleksibilnost dizajna:** Drvene konstrukcije mogu biti lakše i brže za postavljanje u poređenju sa betonskim i čeličnim okvirima, što skraćuje vreme gradnje.
- **Održivi materijal:** Drvo je biorazgradivo i može se reciklirati, čineći ga održivim izborom za dugoročne građevinske projekte.

Izazovi

- **Potreba za zaštitom od insekata, vlage i vatre:** Drvo je podložno napadu insekata, vlage koja može dovesti do truljenja, i požarima, što zahteva odgovarajuću zaštitu i tretmane.
- **Manja nosivost u odnosu na beton i čelik:** Iako je drvo lagano i fleksibilno, njegova nosivost je niža u poređenju s betonom i čelikom, što može biti ograničavajući faktor u visokim građevinskim objektima.
- **Problemi u transportu i skladištenju:** Zbog veličine i osetljivosti na vlagu, drvo zahteva specifične uslove za transport i skladištenje, što može povećati troškove.
- **Održavanje i zaštita od truljenja:** Iako je drvo dugotrajan materijal, potrebno je redovno održavanje (premazivanje, tretman zaštitom od gljivica, plesni i truljenja) kako bi se produžila njegova trajnost.

- **Osetljivost na promene u vlažnosti i temperaturi:** Drvo može reagovati na promene vlažnosti i temperature, što može izazvati promene u dimenzijama, savijanje ili pucanje, ukoliko nije adekvatno tretirano ili projektovano.

Drvene konstrukcije imaju značajnu ulogu u savremenom građevinarstvu zbog svoje ekološke prihvatljivosti, energetske efikasnosti i estetskih prednosti. Iako postoje izazovi u vezi sa održavanjem i zaštitom drvenih objekata, napredak u tehnologiji obrade drva i zaštiti drvenih materijala omogućava uspešnu primenu u širokom spektru građevinskih objekata. Drvene konstrukcije ne samo da doprinose smanjenju negativnog uticaja na životnu sredinu, već omogućavaju i brzu i efikasnu izgradnju visokokvalitetnih objekata.

1.2. Istorija i razvoj drvenih konstrukcija

Istorija i razvoj drvenih konstrukcija su usko povezani sa razvojem civilizacije, jer je drvo od davnina bilo osnovni građevinski materijal. Drvene konstrukcije su korišćene za izgradnju stambenih objekata, mostova, crkava, kao i mnogih drugih vrsta građevina. Drvo je tokom vekova bilo osnovni materijal za gradnju zbog svojih specifičnih karakteristika kao što su lakoća obrade, dostupnost i čvrstoća. Razvoj drvenih konstrukcija može se pratiti kroz nekoliko ključnih perioda i inovacija, koji su oblikovali način na koji se koristi drvo u građevinskoj industriji.

Praistorija i Antika

Drvo je korišćeno za gradnju već u praistoriji. Prvi primeri drvenih konstrukcija su bili jednostavni objekti, poput koliba i skloništa, koja su gradili ljudi u kamenom dobu. Takve konstrukcije su bile vrlo jednostavne i zasnivale su se na osnovnim tehnikama povezivanja drvenih elemenata. Koristilo se u svom prirodnom obliku – drvo je bilo isečeno, oblikovano i povezivano vezivnim materijalima kao što su lanci, užad i kamen.

- **Egipat i Mesopotamija:** U starom Egiptu i Mesopotamiji, dve od najstarijih i najuticajnijih civilizacija u istoriji, drvo nije bilo primarni građevinski materijal, ali se koristilo u različite svrhe u građevinskoj industriji, i to uglavnom za manja arhitektonska rešenja, nameštaj i specijalizovane elemente. Iako su ove civilizacije bile poznate po monumentalnim građevinama od kamena, kao što su piramide u Egiptu ili zigurati u Mesopotamiji, drvo je igralo važnu, ali ograničenu ulogu.

U Egiptu, drvo je bilo relativno redak materijal zbog pustinjske klime i geografskih uslova, ali su ga koristili u izradi nameštaja, vrata i prozora, stubova i nadstrešnica. Drvo je bilo neophodno za izradu nameštaja, kao što su kreveti, stolice, stolići, kao i bogato ukrašeni sarkofazi. Egipatski nameštaj bio je vrlo sofisticiran, često ukrašen pozlatama i drvenim rezbarijama. Drvo je korišćeno i za izradu vrata, okvira prozora, kao i drugih manjih delova arhitekture. Ponekad je bilo korišćeno u kombinaciji sa kamenim okvirima, posebno u većim građevinama. Drveni stubovi su povremeno korišćeni u unutrašnjim prostorijama palata i hramova, kao i za izradu određenih nadstrešnica. Ipak, njihova upotreba bila je ograničena u poređenju sa kamenim stupovima, koji su dominirali u egipatskoj arhitekturi.

Mesopotamija, kao dom prvim civilizacijama poput Sumerana, Akadijana, Babilonaca i Asiraca, imala je sličnu situaciju u vezi s upotrebom drveta kao građevinskog materijala. Drvo je bilo teško dostupno zbog geografskih i klimatskih uslova, ali se koristilo u izgradnji

templata i zigurata, brodova, kao i za izradu nameštaja i alata. Iako su templari i zigurati uglavnom bili građeni od opeke i kamena, drvo je povremeno korišćeno za izradu krovnih konstrukcija, vrata, stepeništa i manjih dekorativnih elemenata. Ipak, najslavniji građevinski poduhvati u Mesopotamiji nisu uključivali drvo kao glavni materijal. Zbog rečnih tokova, posebno reke Eufrat i Tigris, drvo je bilo neophodno za izradu brodova i čamaca. Drveni brodovi su omogućili transport ljudi, dobara, pa čak i za gradnju rečnih pristaništa. Poput Egipta, Mesopotamija je koristila drvo za izradu nameštaja, vrata, ali i za svakodnevne predmete kao što su alati i oruđe. Drveni predmeti su bili bogato ukrašeni i često su se koristile bogate vrste drveta, kao što je kedar, koji se donosio iz dalekih područja.

- **Grčka i Rim:** U antici, posebno u staroj Grčkoj i Rimu, drvo je bilo ključni materijal u svakodnevnoj izgradnji, iako je i dalje bilo podređeno kamenu i drugim materijalima kada su u pitanju monumentalne građevine.

U staroj Grčkoj, drvo je bilo široko korišćeno u različite građevinske svrhe, i to naročito u kontekstu manjih objekata i specifičnih konstrukcija. Jedno od najpoznatijih mesta gde je drvo bilo korišćeno u antici jeste pozorište. Drvene konstrukcije su omogućile izradu pozorišnih scena, ali i sedenja za gledaoce u ranijim fazama razvoja grčkog pozorišta. Drveni okviri su korišćeni za izradu scene i drugih komponenata koje su se lako mogle prilagoditi za različite predstave. Drvo je bilo ključni materijal za izradu grčkih brodova, od kojih su najpoznatiji bili triremi – ratni brodovi sa tri reda vesala. Tehnike brodogradnje u Grčkoj bile su vrlo napredne, a brodovi su igrali centralnu ulogu u grčkoj pomorskoj moći. Za stambene objekte i hramove, drvo je povremeno korišćeno, ali je kameni materijal bio dominantan u velikim javnim i verskim objektima. Drveni krovovi i vrata su se koristili u manjem obimu.

Rimljani su unapredili tehnike obrade drva i uveli mnoge inovacije u drvenoj konstrukciji, čineći ga bitnim materijalom u svom inženjerskom nasleđu. Rimljani su koristili drvo za mnoge aspekte svoje infrastrukture, uključujući drvene stubove, pregrade, krovne konstrukcije i druge elemente. Rimska arhitektura bila je specijalizovana za korišćenje kamena i opeke, ali je drvo i dalje bilo važno za detalje. Rimljani su razvili napredne tehnike obrade i povezivanja drvenih elemenata. Npr., drvene konstrukcije za mostove su postale vrlo sofisticirane, omogućavajući izgradnju mostova velikih raspona. Rimljani su koristili drvene noseće grede kao osnovu za velike građevinske projekte, dok su istovremeno u velikoj meri koristili drvo i za pomoćne konstrukcije u vojnim kampovima. Kao i Grci, Rimljani su bili majstori brodogradnje, koristeći drvo za izradu svojih brodova. Rimski brodovi, poput galija, imali su napredne tehniku spajanja drvenih ploča i razvijali su različite vrste brodova za prevoz ljudi i robe, kao i za ratne svrhe. U arhitekturi, drvo se često koristilo za izradu vrata, prozora, ali i nameštaja u luksuznim privatnim vilama. Rimske vile bile su opremljene bogato ukrašenim drvenim predmetima, uključujući nameštaj i ukrasne elemente.

Srednji vek

U srednjem veku drvo je bilo ključni građevinski materijal u mnogim delovima Evrope, posebno u Severnoj Evropi, gde su obilne šume obezbeđivale izdašne zalihe. Njegova dostupnost, lakoća obrade i dugotrajnost u kombinaciji s pažljivom negom i tehnikama zaštite omogućili su drvenim konstrukcijama da opstanu vekovima.

- **Drvene crkve i manastiri:** Jedan od najspektakularnijih primera srednjovekovnog korišćenja drveta u arhitekturi su skandinavske "stugaste crkve" (stavkirke). Ove crkve, podignute između 11. i 13. veka, ističu se složenim drvenim okvirima, krovovima i dekorativnim rezbarijama. Njihov stil se temelji na veštini lokalnih zanatlija da spoje funkcionalnost i umetnički izraz. Posebno upečatljiv primer je i Kaupanger stave church u Norveškoj, koja je deo UNESCO-ove svetske baštine, Slika 1.1. Ove crkve bile su konstruisane od masivnog drveta, a njihov dizajn uključuje elemente nordijske mitologije i hrišćanske simbolike. Krovovi su često ukrašeni rezbarijama u obliku zmajeva, čime su služili i kao duhovna i kulturna središta zajednica. Manastiri u Evropi, posebno u oblastima gde su monasi širili pismenost i obrazovanje, često su koristili drvo za svoje osnovne strukture. Drvene krovne konstrukcije bile su posebno važan element koji je omogućavao izgradnju velikih dvorana za okupljanje.



Slika 1.1. Kaupanger stave church u Norveškoj [1]

- **Drveni mostovi i kule:** Drveni mostovi iz srednjeg veka igrali su ključnu ulogu u povezivanju zajednica i unapređivanju trgovine. Ovi mostovi su često bili privremeni, ali su neki postali trajne strukture zahvaljujući inovativnim tehnikama gradnje. Na primer, Kapelbrücke u Lucernu, Švajcarska, podignut u 14. veku, danas se smatra jednim od najstarijih drvenih mostova u Evropi. Njegova konstrukcija obuhvatala je krov od drveta koji je štitio most od vremenskih nepogoda, produžavajući njegov vek trajanja. U Aziji, kineski majstori gradili su mostove koristeći složene tehnike spojeva bez upotrebe eksera. Jedan primer je Hongju most u Fujijanu, poznat po svojoj otpornosti na poplave. Ovi mostovi nisu bili samo funkcionalni, već su često bili bogato ukrašeni, postajući estetski simboli zajednica i lokalne kulture. Drvene kule, poput stražarskih tornjeva i utvrđenja, bile su ključni elementi srednjovekovne vojne arhitekture. Njihova gradnja omogućavala je brzo podizanje odbrambenih struktura, posebno tokom opsada. Ove kule često su bile delimično izrađene od drveta i dodatno obložene zemljom, kamenom ili metalnim pločama radi veće otpornosti na vatru i napade i često su bile kombinovane s palisadama i koristile su se kao stražarske tačke u ruralnim oblastima.

Renesansa i Barok

Tokom perioda renesanse i baroka, drvo je ostalo važan građevinski materijal, ali je njegova primarna uloga evoluirala. Dok su kamene i ciglene strukture postajale dominantne u konstrukciji velikih zgrada, drvo je preuzelo ključnu ulogu u krovnim konstrukcijama, unutrašnjim dekoracijama i elementima koji su naglašavali raskoš i umetničku preciznost arhitekture tog vremena.

- **Krovne konstrukcije:** U renesansi, arhitektonska znanja iz antičkog doba ponovo su bila u fokusu, što je podstaklo inovacije u projektovanju krovova. Drvo je korišćeno za izradu velikih, samonosivih krovnih konstrukcija koje su omogućavale stvaranje prostranih enterijera bez dodatnih potpornih stubova. Ovo je bilo ključno za crkve, palate i velike javne zgrade. U periodu baroka, drvene krovne konstrukcije postale su još složenije. Osmišljeni su inovativni spojevi i tehničke tehnike za stvaranje višeslojnih, zakrivljenih konstrukcija koje su pratili grandiozne, talasaste oblike fasada i kupola. Primeri uključuju upotrebu drvenih skeletnih sistema i lukova koji su bili obloženi štukaturama ili freskama, čime su postajali deo umetničkog izraza. Tokom ovog perioda, razvijene su i konstrukcije složenih drvenih svodova, koji su omogućavali pokrivanje velikih prostora, poput dvorana ili koncertnih sala, bez narušavanja akustike i vizuelnog efekta. Krovovi su često uključivali detaljno izrezbarene drvene elemente koji su dodatno naglašavali umetničku dimenziju građevine.
- **Dekorativna uloga drveta:** Renesansa je donela povratak detaljnoj obradi drveta u unutrašnjem prostoru. Majstori su koristili tehnike rezbarenja, intarzije i pozlate kako bi stvorili bogate dekorativne elemente, poput plafonskih greda, nameštaja, obloga zidova i oltara. Venecijanska arhitektura, na primer, obiluje raskošno ukrašenim drvenim stropovima sa slikama umetnika tog perioda. Renesansni stropovi, poput onih u Palati Medici Ricardi u Firenci, Slika 1.2., svedoče o bogatstvu i tehničkoj inovaciji u upotrebi drveta. U baroku, drvo je korišćeno za naglašavanje dramatike prostora. Dekorativne elemente, poput balustrada, stepeništa i ukrasnih panela, često su činili složeni motivi sa cvetnim uzorcima, vijugama i religioznim simbolima. Čak i kada je drvo služilo kao osnovni materijal, često je bilo prekriveno slojem boje ili zlatnih listića kako bi izgledalo luksuznije.



Slika 1.2. Palata Medici Ricardi u Firenci [2]

Industrijska revolucija (18. i 19. vek)

Period industrijalizacije doneo je radikalne promene u svim sferama ljudskog života, uključujući i građevinarstvo. Drvene konstrukcije su se našle na prekretnici: dok su na nekim mestima gubile značaj u korist modernijih materijala poput čelika i betona, njihova uloga u određenim oblastima građevinarstva postajala je još izraženija. Ovaj period obeležili su inovacije u obradi drveta, nove tehnologije i promene u urbanom i infrastrukturnom planiranju.

- **Tehnološki napredak:** Jedan od ključnih faktora koji je oblikovao upotrebu drvenih konstrukcija tokom industrijske revolucije bio je razvoj mašina za obradu drveta. Parne i kasnije električne mašine omogućile su bržu, precizniju i standardizovanu proizvodnju drvenih elemenata. Ove inovacije donele su efikasnost u proizvodnji. Obrada drveta postala je manje zavisna od ručnog rada, što je omogućilo masovnu proizvodnju drvenih panela, greda i drugih konstrukcijskih elemenata. Standardizacija dimenzija i kvaliteta elemenata omogućila je lakše projektovanje i izradu složenih struktura, kao što su industrijske hale, skladišta i poljoprivredne zgrade. Industrijski procesi smanjili su troškove proizvodnje i gradnje, što je drvo učinilo pristupačnijim materijalom za široku upotrebu. Uvođenje modularnih konstrukcija i unapređenih spojeva značajno je ubrzalo montažu drvenih objekata. Na primer, montažne kuće, popularne u Sjedinjenim Američkim Državama tokom ovog perioda, često su bile izrađene od standardizovanih drvenih panela.
- **Drveni mostovi:** S razvojem saobraćajne infrastrukture i širenjem železničke mreže, drvo je postalo ključni materijal za izgradnju mostova, posebno u područjima gde je čelik još bio skup ili nedostupan. Tokom prve polovine 19. veka, drveni mostovi bili su osnovni tip konstrukcija za prelazak preko reka, dolina i kanjona. Upotreba drvenih nosača u kombinaciji s rešetkastim konstrukcijama omogućila je gradnju mostova s velikim rasponima i značajnom nosivošću. Primeri ovakvih mostova su konstrukcije u Severnoj Americi, gde su obilni šumski resursi omogućili gradnju brze železničke infrastrukture. Drvo je korišćeno i za drumsku infrastrukturu, posebno u ruralnim područjima. Jednostavni mostovi sa stubovima i gredama često su postavljani u kratkom vremenskom roku, omogućavajući pristup udaljenim delovima teritorije.

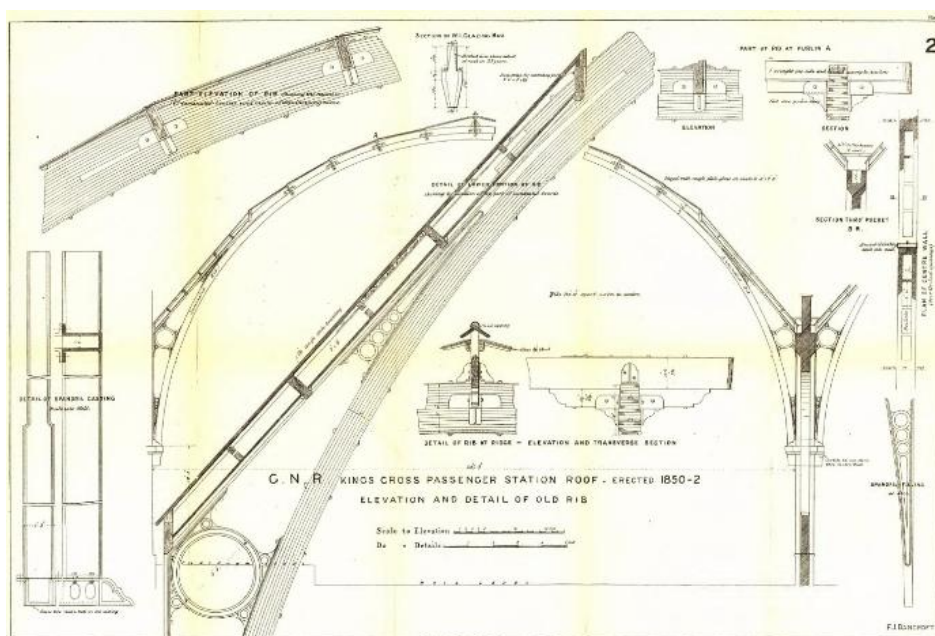
Modernizam i savremena gradnja (20. vek)

U 20. veku drvo je prošlo kroz značajne promene u upotrebi i percepciji u arhitekturi i građevinarstvu. Razvoj industrijskih procesa, novih materijala i tehnoloških rešenja otvorio je nove mogućnosti za primenu drveta, dok su modernističke ideje i pristupi redefinisali njegovu ulogu u savremenom građevinarstvu.

- **Moderna arhitektura i inženjering:** Razvojem modernizma, arhitekta su počele da istražuju potencijale kombinacije tradicije i inovacije u građevinarstvu. Iako su beton, čelik i staklo postali dominantni materijali u urbanim sredinama, drvo je zadržalo svoje mesto u projektima koji su zahtevali prirodan izgled, toplinu i ekološku integraciju. Tehnološki napredak u obradi drveta, poput mašinske obrade, hemijske zaštite od vlage i insekata, kao i termičke modifikacije, učinio je drvo otpornijim na spoljašnje uslove i produžio njegov vek trajanja. Ove inovacije omogućile su primenu drveta u projektima gde to ranije nije bilo razmatrano, uključujući mostove, sportske dvorane i velike javne objekte. Primeri

uspešne integracije drveta u modernističku arhitekturu uključuju radove skandinavskih arhitekata, poput Alvara Alta, koji su kombinovali drvo sa staklom i betonom kako bi kreirali tople, harmonične i funkcionalne prostore. Njegov Paimio sanatorijum i mnogi drugi radovi predstavljaju vrhunac modernističkog pristupa drvetu.

- **Lepljeni lamelirani drveni nosači:** Jedan od najvećih doprinosa tehnologiji obrade drveta u 20. veku bio je razvoj inženjerskog drveta, naročito lepljeno lameliranih drvenih nosača poznatih kao glulam GLT (engl. glued laminated timber). Ovaj materijal je omogućio izradu velikih nosivih elemenata, poput greda i stubova, koji su lakši i ekološki prihvatljiviji od čelika, ali podjednako snažni. Pored glulama, proizvodi poput medijapan ploča MDF (engl. medium-density fibreboard) i OSB ploča (engl. oriented strand board), pružili su nova rešenja za konstrukciju i završnu obradu zgrada. Ovi materijali su široko primenjivani u industrijskoj i komercijalnoj gradnji zbog svoje pristupačnosti, lakoće transporta i fleksibilnosti u dizajnu. Veliki sportski stadioni, koncertne hale i mostovi izgrađeni uz primenu lepljenog lameliranog drveta, poput King's Cross železničke stanice u Londonu, Slika 1.3., ili mostova u Švajcarskoj, pokazali su da drvo može izdržati velika opterećenja i pružiti vizuelnu eleganciju.



Slika 1.3. King's Cross železnička stanica u Londonu [3]

- **Održiva gradnja:** Krajem 20. veka, globalna svest o klimatskim promenama i potrebi za očuvanjem prirodnih resursa značajno je uticala na ponovni rast interesovanja za drvo kao građevinski materijal. Drvo je postalo ključni element u održivoj gradnji, zahvaljujući svojim jedinstvenim ekološkim svojstvima. Kao prirodni materijal, drvo je obnovljivo, pod uslovom da se šumama pravilno upravlja. Proizvodnja drveta zahteva manje energije u poređenju sa čelikom i betonom, čime se smanjuje emisija ugljen-dioksida. Drvo ima odlična izolaciona svojstva, što doprinosi energetskej efikasnosti objekata. Posebno značajan bio je porast upotrebe drvenih panela i modularnih konstrukcija u rezidencijalnoj i javnoj gradnji, što je otvorilo vrata za veće i složenije drvene objekte. Jedan od pionira ove filozofije bio je arhitekta Glen Murcutt, čije su jednostavne, energetskej efikasne kuće postale simbol održive gradnje.

Savremeni trendovi

U savremenoj arhitekturi, drvo doživljava povratak kao ključni građevinski materijal, zahvaljujući napretku u tehnološkim inovacijama, ekološkim standardima i promeni estetskih vrednosti. Njegova primena u modernim projektima pokazuje da se može koristiti ne samo za male objekte, već i za složene i zahtevne građevine, uključujući visokogradnju i održivu gradnju.

- **Stambene zgrade i visokogradnja:** Jedan od najzbudljivijih trendova u savremenoj arhitekturi je primena drveta u visokogradnji. Drvo, uz pomoć savremenih tehnologija, postaje konkurentan materijal u izgradnji višespratnih zgrada, pa čak i nebodera. Centralnu ulogu u ovom procesu ima CLT (Cross Laminated Timber), materijal koji se proizvodi lepljenjem slojeva drvenih panela pod pravim uglovima, čime se postiže izuzetna čvrstoća i otpornost. CLT omogućava gradnju višespratnih objekata, istovremeno smanjujući težinu konstrukcije u poređenju s betonom ili čelikom. Primere ovakvih građevina nalazimo širom sveta. Mjøstårnet, 85,4 metara visok drveni neboder u Norveškoj, trenutno drži rekord kao najviša drvena zgrada na svetu. Brock Commons Tallwood House u Kanadi, Slika 1.4., visoka 18 spratova, primer je kako drvo može biti efikasan i estetski atraktivan materijal za stambene objekte. Ove zgrade ne koriste samo drvo, često su kombinovane sa čelikom i betonom za dodatnu čvrstoću i otpornost na seizmičke aktivnosti. Takve mešovite konstrukcije spajaju najbolje osobine svih materijala, dok istovremeno smanjuju ekološki otisak.



Slika 1.4. Brock Commons Tallwood House u Kanadi [4]

- **Inovativni materijali i tehnologije:** Napredne tehnologije omogućavaju razvoj novih oblika i primenu drveta u građevinarstvu. Nove tehnologije omogućavaju stvaranje drveta koje propušta svetlost takozvano transparentno drvo, što ga čini atraktivnim materijalom za energetske fasade i prozore. Ovaj materijal kombinuje estetiku i

funkcionalnost, poboljšavajući prirodno osvetljenje i izolaciju. Razvijaju se premazi koji ne samo da produžavaju vek drveta već su i u potpunosti razgradivi, čime se minimizira negativan uticaj na životnu sredinu. Korišćenjem senzora unutar drvenih konstrukcija, inženjeri mogu pratiti stanje građevine u realnom vremenu – od vlage do statičke stabilnosti, čime se povećava sigurnost objekata.

Uloga drvenih konstrukcija tokom istorije daleko prevazilazi samo njihovu funkcionalnost – one su bile svedoci života zajednica, religije i kulture, ostavljajući neizbrisiv trag u istoriji arhitekture. Drvene konstrukcije su kroz istoriju evoluirale od jednostavnih skloništa i kuća do sofisticiranih, modernih zgrada koje koriste najnovije tehnologije. Iako je drvo u mnogim periodima istorije bilo zamenjeno težim materijalima poput betona i čelika, poslednjih decenija drvo ponovo postaje omiljeni materijal u građevinskoj industriji zbog svojih ekoloških i estetskih svojstava. Drvene konstrukcije nisu samo ekološki prihvatljive, već i pružaju visok nivo komfora i dugotrajan je materijal, koji se može reciklirati i obnoviti.

1.3. Prednosti i mane upotrebe drveta u građevinskoj industriji

Drvo je jedan od najstarijih i najcenjenijih građevinskih materijala, koji se i dalje koristi u različitim oblicima za gradnju stambenih, komercijalnih i industrijskih objekata. Zbog svojih brojnih prednosti, drvo je posebno atraktivan materijal, ali njegova upotreba takođe nosi određene izazove. U nastavku su prikazane ključne prednosti i mane korišćenja drveta u građevinskoj industriji.

Prednosti upotrebe drveta u građevinskoj industriji:

- **Ekološki prihvatljivo:**
 - Drvo je obnovljiv resurs, posebno ako se koristi iz održivih šuma i pridržava se principa odgovorne seče.
 - Drvo je biološki razgradivo, što znači da se može reciklirati ili koristiti za kompostiranje, smanjujući tako otpad.
 - Drvo apsorbuje ugljen-dioksid tokom svog rasta, što može doprineti smanjenju emisije gasova sa efektom staklene bašte.
- **Lagana težina i lakoća obrade:**
 - Drvo je lakše u odnosu na mnoge druge građevinske materijale poput betona i čelika, što olakšava transport, montažu i obrtnost na gradilištu.
 - Iako se obrađuje, reže, oblikuje i spaja, što omogućava bržu i jednostavniju izgradnju.
- **Izuzetne termoizolacione karakteristike:**
 - Drvo ima prirodne termoizolacione sposobnosti, što znači da može doprineti energetske efikasnosti zgrada, smanjujući potrebe za grejanjem i hlađenjem.
- **Estetska vrednost:**
 - Drvo ima prirodan, estetski prijatan izgled koji može doprineti toplini i karakteru prostora. Može se koristiti za završne obrade, fasade i enterijere.
- **Održavanje i dugovečnost:**
 - Uz odgovarajuće tretmane, drvo može biti vrlo dugotrajno. Moderni tretmani i zaštitni premazi mogu sprečiti truljenje i napad insekata.

Mane upotrebe drveta u građevinskoj industriji:

- **Povremena nestabilnost i sklonost promenama oblika:**
 - Drvo je prirodni materijal koji može reagovati na promene vlažnosti i temperature, što može dovesti do uvijanja, savijanja, pucanja ili skupljanja. Ove promene mogu negativno uticati na stabilnost građevinskih objekata.
- **Rizik od požara:**
 - Drvo je zapaljivo i može predstavljati sigurnosni rizik, naročito u velikim zgradama. Međutim, postoje tretmani koji mogu povećati otpornost drveta na vatru, ali to često podiže cenu izgradnje.
- **Osetljivost na insekte i gljivice:**
 - Drvo može biti podložna napadima insekata poput termita, kao i gljivama koje mogu uzrokovati truljenje. To zahteva dodatnu zaštitu i održavanje.
- **Cena i dostupnost:**
 - U nekim regionima, kvalitetno drvo može biti skupo, posebno ako se uzmu u obzir troškovi seče, obrade i transporta. Takođe, u određenim regijama može biti teško nabaviti odgovarajući kvalitet drveta.
- **Ograničenja u velikim strukturalnim projektima:**
 - Iako je drvo izuzetno otporno na pritisak, njegova čvrstoća u odnosu na druge materijale poput čelika i betona može biti ograničena. Stoga se obično koristi u manjim i lakšim konstrukcijama, dok za veće projekte, poput visokih zgrada, često nisu dovoljni samo drveni elementi.

Upotreba drveta u građevinskoj industriji pruža mnoge ekološke, estetske i praktične prednosti, ali takođe nosi i određene izazove u pogledu stabilnosti, trajnosti i sigurnosti. Odluka o upotrebi drveta kao glavnog građevinskog materijala zavisi od specifičnih potreba projekta, dostupnosti resursa i klimatskih uslova, kao i od potrebnih zaštitnih mera kako bi se produžila njegova upotrebna vrednost.

1.4. Ekološke prednosti drvenih konstrukcija

Upotreba drvenih konstrukcija postaje sve popularnija, ne samo zbog estetskih i tehničkih svojstava drva, već i zbog njegovih značajnih ekoloških prednosti. Drvo kao građevinski materijal ima niz prednosti koje doprinose smanjenju negativnog uticaja na životnu sredinu i pomažu u održivoj gradnji. Evo nekoliko ključnih ekoloških aspekata:

- **Obnovljivost resursa**

Drvo je prirodni obnovljiv resurs. Za razliku od fosilnih goriva i mnogih drugih građevinskih materijala, drvo se može obnoviti putem odgovorne šumske industrije. Ako se šume upravljaju održivo, seča drveća ne ugrožava ekosisteme i omogućava stalnu obnovu šumskih resursa. Ovaj aspekt čini drvo održivim izborom za dugoročne građevinske projekte.

- **Nizak ugljenični otisak**

Korišćenje drvenih materijala u građevinskoj industriji značajno smanjuje emisiju ugljen-dioksida u atmosferu. Drvo je prirodni skladišni rezervoar ugljen-dioksida (CO₂), jer tokom svog rasta apsorbira velike količine CO₂ iz atmosfere. Kada se drvo koristi za gradnju, emisija ugljen-

dioksida je niža nego kod betona, čelika i drugih tradicionalnih materijala, koji zahtevaju veliku količinu energije u proizvodnji.

- **Energetska efikasnost**

Drvo je odličan izolator, što znači da može poboljšati energetske efikasnosti objekta. Drvene konstrukcije često pružaju bolju termoizolaciju u poređenju sa betonskim ili čeličnim strukturama, što može smanjiti potrebu za grejanjem i hlađenjem. To rezultira manjom potrošnjom energije i smanjenjem emisije štetnih gasova, čime se doprinosi očuvanju resursa i smanjenju negativnog uticaja na životnu sredinu.

- **Niži energetske troškovi proizvodnje**

Proizvodnja drvenih konstrukcija zahteva manje energije nego proizvodnja betona, čelika i drugih materijala. Beton i čelik se prerađuju na visokim temperaturama, dok drvo, kao prirodni materijal, zahteva minimalnu obradu. Ovaj proces nije samo energetski efikasan, već i manje zahteva u pogledu emisije štetnih gasova tokom proizvodnje.

- **Biorazgradivost i reciklabilnost**

Jedna od ključnih ekoloških prednosti drvenih konstrukcija je i mogućnost reciklaže i biorazgradivosti. Drvo se može reciklirati, a u slučaju da se više ne koristi, razgrađuje se u prirodi bez štetnog uticaja na okolinu. Ovaj ciklus omogućava da se materijal vrati u ekosistem, čime se smanjuje količina otpada i doprinosi održivosti.

- **Smanjenje upotrebe toksina**

U poređenju sa sintetičkim materijalima, drvo je prirodan i neotrovni materijal. Nema hemijskih zagađivača ili otrovnih supstanci koje bi se mogle osloboditi u okolinu tokom proizvodnje, upotrebe ili deponovanja. Takođe, u poređenju s nekim plastičnim ili metalnim materijalima, drvo ne emituje štetne gasove poput formaldehida ili teških metala.

- **Ugljenični krediti**

Drvene konstrukcije mogu igrati značajnu ulogu u smanjenju ugljeničnih emisija kroz sistem ugljeničnih kredita. S obzirom na to da drvo skladišti CO₂, upotreba drvenih materijala u građevinskoj industriji može se smatrati "ugljeničnim kreditom", čime se direktno doprinosi smanjenju globalnog zagrevanja.

- **Manji uticaj na krajolik**

Za razliku od velikih građevinskih objekata koji često uključuju izgradnju masivnih betonskih i čeličnih konstrukcija koje mogu izazvati trajne promene u krajoliku, drvene konstrukcije imaju manji uticaj na okolinu i mogu se lakše integrisati u prirodni prostor.

Korišćenje drvenih konstrukcija predstavlja značajan korak ka održivoj i ekološki odgovornoj gradnji. Drvo nudi brojne ekološke prednosti koje doprinose smanjenju emisije ugljen-dioksida, energetske efikasnosti, obnovljivosti i smanjenju otpada. Uzimajući u obzir ove prednosti, jasno je da drvene konstrukcije imaju ključnu ulogu u budućnosti održive gradnje i zaštite životne sredine.

2. DRVO KAO GRAĐEVINSKI MATERIJAL

2.1. Hemijski sastav i struktura drveta

Drvo je prirodni materijal koji se koristi u građevinskoj industriji već hiljadama godina. Kao građevinski materijal, drvo nudi jedinstvene prednosti, ali takođe ima i određena ograničenja koja se moraju razumeti kako bi se optimiziralo njegovo korišćenje. Razumevanje sastava i strukture drveta ključno je za pravilnu primenu u građevinskim projektima. Drvo ima niz prirodnih karakteristika koje ga čine idealnim građevinskim materijalom. Ovo uključuje visok odnos nosivosti prema težini, impresivnu trajnost i performanse, kao i dobra izolaciona svojstva protiv toplote i zvuka. Takođe, drvo poseduje prirodne karakteristike kao što su šare, boje i dostupnost u mnogim vrstama, veličinama i oblicima, što ga čini veoma svestranim i estetski privlačnim materijalom. Lako se oblikuje i spaja pomoću eksera, šrafova, zavrtnja ili lepkova.

Ograničenja u maksimalnim dimenzijama poprečnog preseka i dužinama sečenih komada drveta, usled dostupnih veličina trupaca i prirodnih nedostataka, prevaziđena su razvojem kompozitnih i inženjerskih drvenih proizvoda. Savremene tehnike lepljenja omogućile su izradu drvenih elemenata i sistema visokog kvaliteta u bilo kojem obliku, veličini i formi, ograničene samo mogućnostima proizvodnje i/ili transporta.

Drvene konstrukcije mogu biti veoma trajne kada su pravilno tretirane, projektovane i izvedene. To se vidi u mnogim istorijskim građevinama širom sveta. Drvene strukture lako se mogu preoblikovati ili izmeniti, a ako su oštećene, mogu se popraviti. Opsežna istraživanja u poslednjim decenijama rezultovala su sveobuhvatnim informacijama o svojstvima drveta i njegovim inženjerskim proizvodima, kao i njihovom uticaju na konstrukciono projektovanje i performanse u eksploataciji.

Hemijski sastav drveta

Hemijski sastav drveta je vrlo kompleksan, jer drvo sadrži brojna hemijska jedinjenja koja se razlikuju zavisno o vrsti drveta, uslovima rasta, starosti drveta i drugim faktorima. Glavni sastojci drveta su celuloza, hemiceluloza, lignin, te različite vrste smola, šećera, proteina i minerala. Prosečan elementarni sastav drveta je: ugljenik oko 50% (49,5%), kiseonik 43,45%, vodonik 6% i azot oko 0,2-0,4%. Glavna jedinjenja koja drvo sadrži u sebi jesu: celuloza (40-50%), hemiceluloza (24-33%), lignin (20-35%), kao i prateći elementi kao što su šećer, smola, tanin, boje, voskovi, eterična ulja, masti i minerali (pepeo). Kako postoje različite vrste drveta tako i njihov sastav nije isti, Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Prosečan hemijski sastav drveta

	Četinari	Lišćari
Celuloza	48-56%	46-48%
Hemiceluloza	23-26%	26-35%
Lignin	26-30%	19-28%

Celuloza je visokomolekularno jedinjenje iz grupe ugljenih hidrata, polisaharida, sastavljen od linearno povezanih jedinica D-glukoze. Ne rastvara se u vodi i nema ukusa. Celuloza se sastoji od vlakana koji su debljine 200 nm i daju drvetu visoku mehaničku čvrstoću i čini ga sposobnim za nošenje opterećenja. Hidrolizom sa koncentrovanom sumpornom kiselinom razlaže se do glukoze. Na tome se zasniva mogućnost dobijanja šećera iz drveta i drugih celuloznih materijala, kao i mogućnost korišćenja različitih biljnih otpada kako bi se dobio špiritus i kvasac. Celuloza je glavni sastojak drveta i biljnih vlakana. U gotovom čistom stanju nalazi se u pamuku i to čak 98%, dok ga u drvetu u zavisnosti od vrste ima od 40-50%.

Hemiceluloza je polisaharidno jedinjenje, po hemijskom sastavu dosta slična celulozi, ali znatno manje stabilna. Hemiceluloza predstavlja heteropolimerne molekule sačinjene od pentoza (ksiloze i arabinoze) i heksoza (glukoze, galaktoze i manoze). One obuhvataju različite polisaharide sa razgranatim molekulima, za razliku od celuloze. Rastvara se u jakim bazama i nekim drugim hemijskim sredstvima. Po sastavu se deli na poliheksoze i polipentoze. Hemiceluloza pomaže u međusobnom povezivanju celuloznih vlakana i lignina, čime omogućava fleksibilnost i elastičnost.

Lignin je svetložuta ili mrka materija, kojom su obložena celulozna vlakna drveta. Može se rastvoriti u alkalijama i kiselinama i tako odvojiti od celuloze. Lignin predstavlja amorfna polifunkcionalna makromolekulska jedinjenja aromatske prirode koja su izgrađena od fenilpropanskih jedinica. Termin lignin potiče od latinskog naziva drveta – lignum. On sadrži veliku količinu metoksilnih grupa od kojih se formira metanol i metil – sumporna jedinjenja neprijatnog mirisa pri sulfatnom kuvanju drveta. To je složen polimerni spoj koji se sastoji od fenilpropanidnih jedinica i ima ključnu ulogu u strukturi drveta. U hemijskom aspektu, razlika između mekog i tvrdog drveta ogleda se u sastavu njegovog sastojka lignina. Lignin u tvrdom drvetu uglavnom je izveden iz sinapil- i koniferil-alkohola. Lignin u mekom drvetu je pretežno izveden iz koniferil-alkohola. Lignin pruža čvrstoću, elastičnost i otpornost na truljenje. Takođe je odgovoran za vodoodbojnost drveta jer deluje kao barijera koja smanjuje prodiranje vode.

Smole i eterična jedinjenja su različite vrste organskih materija koje se nalaze u drvnim tkivima, a najviše u drvetu koja su sklona proizvodnji smola, poput bora, jele i drugih četinara. Smole sadrže terpene, resine i druga eterična jedinjenja.

Šećeri čine manji postotak drveta (oko 1–3%) i prisutni su u obliku monosaharida i disaharida. Glavni šećeri su glukoza, fruktoza i saharoza. Šećeri su jednostavni ugljikohidrati koji se sastoje od molekula ugljenika, vodonika i kiseonika. Šećeri su važni za energiju i metabolizam biljke tokom rasta, a takođe služe kao hranjivi materijali u drvenim strukturama.

Proteini su takođe prisutni u malim količinama (oko 1–3%), a najviše se nalaze u staničnim membranama i drvenim vlaknima. Oni su povezani sa staničnom funkcijom i metabolizmom. Proteini su složena jedinjenja sastavljena od aminokiselina. Proteini podržavaju biološke procese u drvetu i ključni su za rast i obnovu.

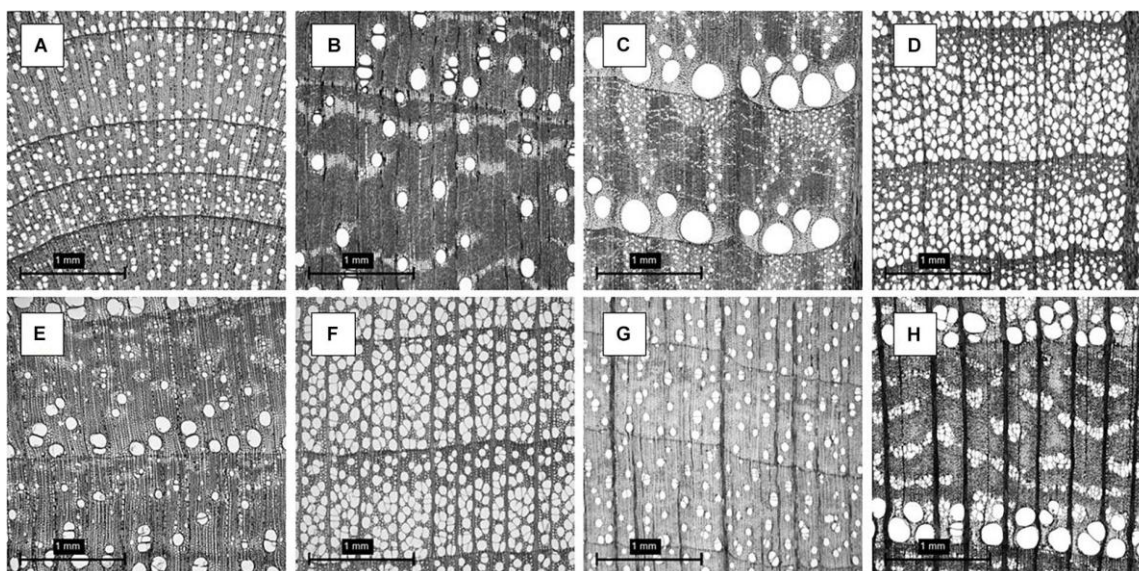
Drvo takođe sadrži male količine minerala, uključujući kalcijum, magnezijum, kalijum, fosfor i druge elemente u tragovima poput gvožđa, mangana i bakra. Minerali su prisutni u obliku soli, oksida i drugih oblika anorganskih jedinjenja. Minerali su bitni za biološke procese drveća i pomažu u rastu. Količina pepela koja se nalazi u drvetu kreće se od 0,2 - 1,7%. Najviše se nalazi u kori, zatim u listovima dok se najmanje nalazi u stablu. Takođe, što se tiče količine pepela veća količina se nalazi u mladom drvetu za razliku od starog.

Iako nije organski sastojak, voda čini značajan udeo u masi živog drveta, koji može varirati od 50% do 60%, zavisno o uslovima okoline. Kada drvo postane suvo, voda čini manje od 10% mase. Voda je potrebna za transport hranjivih materija i održavanje bioloških funkcija.

Struktura drveta

Mikrostruktura drveta je izuzetno složena i specifična za svaku vrstu drveta. Osnovni element strukture tkiva drveta jeste ćelija, koja se razlikuje u zavisnosti od toga da li je živa ili mrtva. Ove ćelije obavljaju ključne funkcije u životnom ciklusu drveta, kao što su transport hranljivih materija, skladištenje energije, i pružanje strukturalne podrške. Da bismo razumeli mikrostrukturu drveta, potrebno je detaljnije proučiti unutrašnju građu i funkcije ćelija.

Svaka ćelija drveta se sastoji od nekoliko osnovnih delova: membrane, protoplazme (koja uključuje citoplazmu i jedro), ćelijskog zida i vakuole, Slika 2.1. Žive ćelije u drvetu, kao što su ćelije floema i kambijuma, imaju sve ove delove, dok mrtve ćelije, poput trahieda i vodovodnih cevčica ksilema, gube protoplazmu, ali zadržavaju ćelijski zid. Membrana ćelije je tanak sloj koji okružuje citoplazmu. U živim ćelijama, membrana je odgovorna za kontrolisanje razmene materija između unutrašnjosti ćelije i spoljnog okruženja. Sastoji se od dvosloja lipida i proteina, a u njenoj strukturi prisutni su i polisaharidi poput celuloze, koji doprinosi mehaničkoj čvrstini ćelije. Protoplazma se nalazi unutar ćelijske membrane i uključuje sve tečne supstance u ćeliji, kao što su voda, rastvorene hranljive materije, proteini, enzimi, kao i jedro koje kontroliše ćelijske funkcije. Ćelijski zid drveta je izgrađen od celuloze, hemijske supstance koja čini osnovu drvenih vlakana. U njemu se nalaze i drugi polisaharidi, kao što su hemiceluloza i lignin, koji pružaju dodatnu čvrstinu i stabilnost. Jedan od ključnih faktora u strukturi ćelijskog zida drveta su mikrofibrile – snopovi celuloznih vlakana koji čine osnovnu mrežu ćelijskog zida. Mikrofibrile su mikroskopski snopovi polisaharida koji imaju oblik dugačkih niti, čiji poprečni presek obično iznosi između 5 i 10 mikrometara. Ove mikrofibrile se prepliću u složenoj mreži, što omogućava čvrstoću i elastičnost ćelijskog zida. Mikrostruktura mikrofibrila je posebno važna za funkciju drveta jer omogućava transport vode, kao i zaštitu od patogena i oštećenja. U ćelijama ksilema (drvenog tkiva) mikrofibrile su postavljene tako da omogućavaju efikasan transport vode i minerala od korena do lista, dok su u ćelijama floema orijentisane tako da optimizuju transport organskih materija, kao što su šećeri i hranljive materije.

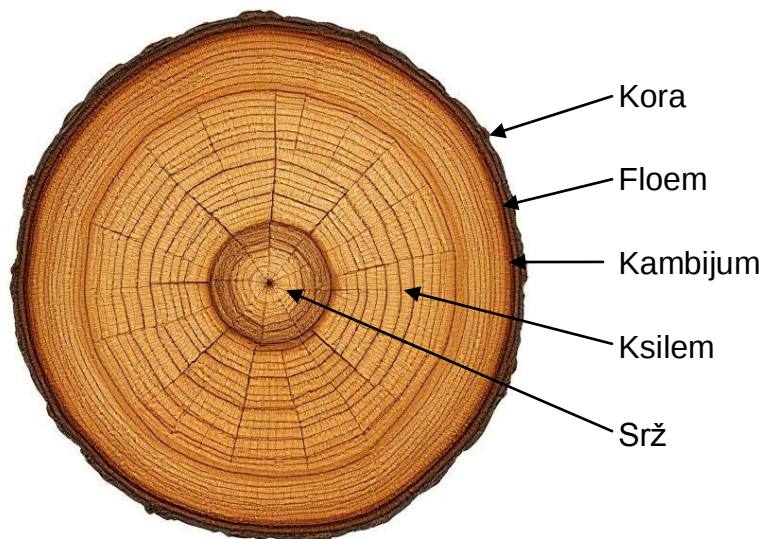


Slika 2.1. Mikroskopski prikaz drveta (A) Betulaceae - *Alnus firma*; (B) Cannabaceae - *Aphananthe aspera*; (C) Fagaceae - *Quercus crispula*; (D) Fagaceae - *Fagus japonica*; (E) Lauraceae - *Sassafras tzumu*; (F) Magnoliaceae - *Liriodendron tulipifera*; (G) Sapindaceae - *Acer distylum*; (H) Ulmaceae - *Ulmus laciniata* [5]

Kada ćelije drveta, kao što su trahiede, postanu mrtve (posebno u ksilemu), one gube protoplazmu, ali njihov ćelijski zid ostaje očuvan. Ove mrtve ćelije formiraju šupljine ili pore koje se pune vazduhom, vodom ili rastvorima hranljivih materija, zavisno od funkcije ćelije. Ove pore, odnosno šupljine u mrtvim ćelijama, mogu biti vrlo specifične. Na primer, traheidne ćelije imaju pore koje omogućavaju vertikalni transport vode, dok vazdušne šupljine mogu biti prisutne u srži stabla, koja je mesto za skladištenje hranljivih materija i za disanje drveta.

Struktura ćelija drveta nije univerzalna; ona je prilagođena potrebama različitih vrsta. Na primer, u drveću koje raste u sušnim područjima, ćelije mogu biti deblje i otporne na gubitak vode, dok će u drveću koje raste u područjima sa višim nivoima vlage, ćelije biti tanje i sa većim kapacitetom za apsorpciju vode. Ova prilagođavanja omogućavaju drveću da opstane u različitim ekološkim uslovima.

Makrostruktura drveta obuhvata sve one delove drveta koji se mogu videti golim okom, a najbolje se može shvatiti razmatranjem poprečnog preseka debla drveta. Svaki sloj i element poprečnog preseka drveta ima specifičnu funkciju koja doprinosi njegovom rastu, stabilnosti i preživljavanju. U poprečnom preseku debla, može se lako uočiti pet osnovnih strukturnih elemenata: kora, floem, kambijum, ksilem i srž, Slika 2.2. Svaki od njih ima ključnu ulogu u životnom ciklusu drveta, a funkcionalno su povezani.



Slika 2.2. Poprečni presek debla drveta

- **Kora** – spoljni sloj drveta, prvenstveno odgovoran za zaštitu unutrašnjih struktura od spoljnih faktora. Kora štiti drvo od oštećenja uzrokovanih vremenskim nepogodama (kao što su mraz, suša, prekomerna kiša), kao i od napada insekata i mikroorganizama. Sastoji se od dva glavna sloja. Periderm (ili vanjska kora), koji se sastoji od mrtvih ćelija i služi kao barijera protiv oštećenja. On se često ljušti i obnavlja tokom rasta drveta. Korteks (ili unutrašnja kora) koji sadrži žive ćelije, od kojih neke imaju funkciju skladištenja hranljivih materija, dok druge omogućavaju transport hranljivih materija ka unutrašnjim delovima drveta. Kora je, dakle, složen organ koji štiti drvo, ali i učestvuje u njegovoj ishrani i transportu.
- **Floem** – deo drveta odgovoran za prenos hranljivih materija koje drvo dobija kroz fotosintezu u svojim listovima. On prenosi organske materije (pretežno šećere) od lišća ka

korenu i drugim delovima drveta koji ne mogu direktno proizvoditi hranu. Floem se nalazi ispod kore i ima ključnu ulogu u održavanju života drveta jer omogućava distribuciju energije koju biljka proizvodi. Floem se sastoji od nekoliko vrsta ćelija. Cevaste ćelije omogućavaju transport organske materije. Prateće ćelije pomažu u regulaciji funkcija cevastih ćelija i parenhimatske ćelije koje obavljaju skladištenje hranljivih materija. Bez pravilnog funkcionisanja floema, drvo ne bi moglo efikasno transportovati energiju potrebnu za rast i razvoj.

- **Kambijum** – vrlo tanak sloj ćelija smešten između floema i ksilema. Ovaj sloj je ključan za sekundarni rast drveta, jer omogućava povećanje prečnika stabla. Kambijum se sastoji od meristemskih ćelija, koje se brzo dele i stvaraju nove slojeve floema (prema spolja) i ksilema (prema unutra). Kambijum omogućava stablu da raste u širinu, što je od esencijalne važnosti za stabilnost drveta i njegovu sposobnost da podnese težinu krošnje. Svake godine, kambijum proizvodi nove slojeve, što rezultira godišnjim prstenovima koji su često vidljivi na preseku stabla. Broj prstenova može se koristiti za određivanje starosti drveta.
- **Ksilem** – unutrašnji deo drveta koji je odgovoran za transport vode i minerala iz korena prema listovima i ostalim delovima drveta. Osim toga, ksilem je ključan za mehaničku podršku stablu, jer njegove ćelije čine drvo koje daje čvrstoću i stabilnost. Ksilem se sastoji od nekoliko vrsta ćelija, među kojima su: traheide i traheje – ćelije koje su odgovorne za transport vode, fibrilna vlakna – ćelije koja pružaju čvrstoću stablu i parenhimske ćelije – ćelije koje mogu skladištiti vodu i hranjive materije. Drvo (ksilem) ima dve osnovne funkcije: transport vode i pružanje strukturalne čvrstoće. Kroz ksilem, drvo iz korena dobija sve neophodne minerale i vodu potrebnu za fotosintezu i rast.
- **Srž** – centralni deo stabla koji se obično nalazi u sredini debla. Iako srž može biti kompaktnija ili šuplja, u većini slučajeva sadrži mrtve ćelije koje su prvobitno bile aktivne u transportu vode, ali su vremenom izgubile svoju funkciju. Srž često služi kao skladište hranljivih materija i može imati značajnu ulogu u preživljavanju drveta tokom perioda suše ili kada je drvo pod stresom. U nekim vrstama drveta, srž može biti ispunjena vazduhom (u slučaju šupljih stabala), što omogućava lakši transport gasova i može pružiti određenu otpornost na jake vetrove.

2.2. Vrste drveta

Drvo je jedno od najstarijih materijala koji se koristi u građevinarstvu. Zahvaljujući svojim izuzetnim mehaničkim osobinama, lakoći obrade i obnovljivosti, drvo ostaje nezaobilazan materijal u mnogim građevinskim sektorima. Drvo se koristi za izradu nosivih konstrukcija, krovnih sistema, podnih obloga, fasadnih panela, ali i kao materijal za završne radove u enterijerima. U građevinskim konstrukcijama, ne koristi se svaka vrsta drveta, već se bira na osnovu svojih mehaničkih karakteristika, otpornosti na spoljne uticaje, lakoće obrade i ekonomskih faktora.

Drvo koje se koristi u građevinskim konstrukcijama može biti podeljeno u dve osnovne kategorije: listopadno drvo (hrast, bukva, orah i drugi) i četinarsko drvo (bor, smreka, ariš, jela i drugi). Svaka od ovih kategorija ima specifične osobine koje ih čine pogodnim za određene primene u građevinskim objektima. Pravilnim izborom vrste drveta mogu se postići optimalne performanse građevinske konstrukcije u pogledu trajnosti, stabilnosti i estetike.

Listopadno drvo je obično gušće i teže, što mu daje veću čvrstoću i otpornost na habanje, pa se često koristi za izradu nosivih elemenata i podnih obloga. S druge strane, četinarsko drvo je lakše, fleksibilnije i jednostavnije za obradu, zbog čega je idealno za krovne konstrukcije, ramove i druge delove gde je važna kombinacija čvrstoće i male težine.

Listopadno drvo potiče od drveća koje gubi lišće svake godine i obuhvata vrste kao što su hrast, bukva, orah, javor i drugi. Drvo ovih biljaka obično ima čvršće vlakno i koristi se za gradnju objekata koji zahtevaju veću čvrstoću, otpornost na habanje i estetske osobine. Listopadno drvo je obično skuplje od četinarskog drveća, ali se koristi u ključnim delovima objekta gde su potrebne superiorne mehaničke osobine.

- Hrast (*Quercus robur*, *Quercus petraea*)
Hrastovo drvo je jedno od najcenjenijih i najtrajnijih vrsta drveća u građevinskoj industriji. Poznato je po svojoj izuzetnoj čvrstoći pri pritisku u svim pravcima, dugovečnosti i otpornosti na vlagu. Hrast se koristi za izradu greda, podnih obloga, vrata, prozora, nameštaja, ali i za izradu konstrukcija koje su izložene teškim uslovima u hidrogradnji i za izradu železničkih pragova. Osnovne prednosti su čvrstoća, otpornost na vlagu, dug vek trajanja, estetski prijatno drvo sa karakterističnim godovima.
- Bukva (*Fagus sylvatica*)
Bukva je jedno od najpopularnijih listopadnih drveća koje se koristi u građevinskoj industriji i zauzima preko 50% naših šuma. Visina stabla dostiže i do 40 m, a prečnik debla je oko 0.5 m. U poprečnom preseku je beličasta, a kada se osuši dobija svetlo žućkastu ili bleđu mrku boju. Spada u vrlo tvrdo drvo, ima veliku zapreminsku masu, lako se obrađuje u svim pravcima. Postojano je u vodi. Koristi se za izradu parketa i stepenišnih gazišta. U stolarstvu parena bukva se koristi za izradu nameštaja.
- Orah (*Juglans regia*)
Orah je cenjen zbog svoje izuzetne lepote i čvrstoće, a njegova boja i tekstura ga čine popularnim u izradi luksuznog nameštaja. Iako nije najčešće korišćeno drvo za nosive konstrukcije, koristi se za estetske primene u enterijerima.

Četinarsko drvo, poznato i kao čempresno drvo, dolazi od drveća koje ima igličasto lišće i koje je zimzeleno. Ove vrste drveća obuhvataju bor, smreku, ariš i druge. Četinarsko drvo je obično lakše, jeftinije i brže raste, ali je manje otporno na vlagu i teže podnosi mehaničke napore u odnosu na listopadno drvo. Ipak, zbog svojih mehaničkih svojstava i cene, četinarsko drvo je vrlo popularno u građevinskoj industriji, posebno u proizvodnji konstrukcija i drvenih panela.

- Bor (*Pinus spp.*)
Borovo drvo je jedno od najkorišćenijih vrsta u građevinarstvu i najrasprostranjeniji četinar na našim prostorima. Stablo je vrlo pravo do 40m visine. Boja je bleđa žućkasta ili crvenkasta. Ima dosta smolnih kanala što doprinosi trajnosti. Ovo drvo je lagano, lako za obradu i relativno je jeftino. Zbog svoje svestranosti, bor se koristi u mnogim različitim aplikacijama, od krovnih sistema, preko podnih obloga do nosivih greda.
- Smreka (*Picea abies*)
Smreka je popularno drvo zbog svoje svestranosti i niske cene. Raste u predelima iznad 1000 m nadmorske visine, a stablo dostiže visinu do 50 m. Stablo je sastavljeno od dugih vlakana, elastično, čvrsto i dugotrajno. Ne koristi se u konstrukcijama izloženim vlazi. Primenjuje se za izradu krovnih i međuspratnih konstrukcija i stolariju. Takođe se koristi za proizvodnju ploča, panela i drvenih konstrukcija u unutrašnjim prostorima.

- Ariš (*Larix decidua*)

Ariš je vrsta četinarskog drveta koje se odlikuje velikom otpornošću na vlagu i visokom čvrstoćom. Drvo je elastično i dugotrajno, više cenjeno od borovine. Upotrebljava se za sve vrste radova, izradu visokih stubova, glavnih mostovskih nosača, nosača za međuspratne konstrukcije, za izradu građevinske stolarije, furnira i nameštaja.

Za optimalnu primenu drveta u građevinskim konstrukcijama, kao i za tačan proračun nosivosti drvenih elemenata, ključno je koristiti realne vrednosti čvrstoće izabranog komada drveta, a ne samo prosečne vrednosti čvrstoće vrste kojoj drvo pripada. Da bi se postigao ovaj nivo tačnosti, neophodno je klasirati drvo prema njegovim stvarnim karakteristikama, čime se omogućava bolja prediktivnost njegovih mehaničkih svojstava u stvarnim uslovima upotrebe. Klasiranje drveta omogućava da se precizno odredi nosivost svakog elementa konstrukcije i da se obezbedi da oni mogu prihvatiti predviđena opterećenja.

Postoje dva osnovna sistema klasiranja drveta:

1. **Vizuelno klasiranje**

Vizuelno klasiranje temelji se na pažljivom pregledu drveta kako bi se identifikovali svi defekti koji mogu uticati na njegove mehaničke osobine, kao što su pukotine, čvorovi ili promene u strukturi vlakana. Tokom ovog procesa, drvo se upoređuje sa standardima koji definišu prihvatljive granice za defekte. Klasifikacija se vrši tako da se osigura da komadi drveta ne sadrže defekte koji bi mogli značajno smanjiti nosivost ili stabilnost konstrukcije. Ovaj metod je jednostavan i efikasan, ali zahteva iskustvo i stručnost osoba koje vrše klasiranje.

2. **Mašinsko klasiranje**

Mašinsko klasiranje koristi tehnologiju za nedestruktivno ispitivanje drvenih komada. Ovi komadi se propuštaju kroz specijalizovane mašine koje mere različite parametre kao što su brzina zvuka kroz drvo, gustina i drugo. Na osnovu ovih merenja, mašina procenjuje nosivost i krutost svakog komada, što omogućava preciznije i objektivnije klasiranje. Mašinsko klasiranje pruža prednost u pogledu preciznosti, jer se temelji na tačnim fizičkim parametrima koji direktno utiču na ponašanje drveta pod opterećenjem.

Jedan od ključnih razloga za klasiranje drveta je to što unutar iste vrste drveta, pa čak i unutar iste klase, postoji značajna varijacija u njegovim mehaničkim osobinama. Na primer, čvrstoća jednog komada drveta može značajno da varira u zavisnosti od njegovih unutrašnjih defekata i specifičnih karakteristika. Zbog ove varijacije, savremeni proračun drvenih konstrukcija koristi karakterističnu čvrstoću, koja odgovara 5%-om fraktilu distribucije čvrstoće. To znači da 95% uzoraka iste vrste drveta, klasifikovanih prema ovoj vrednosti, može izdržati veća opterećenja od predviđenih, ali se u proračunu koristi ova niža vrednost radi obazrivosti, čime se smanjuje rizik od oštećenja ili nesreća tokom upotrebe.

Kao standard klasiranja četinarskog (mekog) i listopadnog (tvrdog) drveta, koristi se evropski standard EN 338 [6], koji definiše različite klase mekog i tvrdog drveta u zavisnosti od njihove nosivosti i drugih mehaničkih svojstava, Tabela 2.2. Klase homogenog i kombinovanog lepljenog lameliranog drveta date su standardom EN 1194 [7]. Ovi standardi omogućavaju inženjerima da pravilno izaberu odgovarajući materijal za konstrukcijske elemente, uzimajući u obzir specifične zahteve projekta i sigurnosne faktore. Klasiranje drveta nije samo koristan, već i neophodan proces koji omogućava sigurnu i efikasnu primenu drveta u građevinskim konstrukcijama.

Tabela 2.2. Karakteristične vrednosti svojstava pojedinih klasa monolitnog mekog (C) i tvrdog (D) drveta i homogenog (h) i kombinovanog (c) lepljenog lameliranog drveta (GL)

Klase čvrstoće	C18	C24	C30	D30	D35	GL24h	GL24c	GL28h	GL28c	GL30h	GL30c
Čvrstoća (N/mm ²)											
Savijanje	$f_{m,k}$	18	24	30	30	35	24	24	28	30	30
Zatezanje paralelno	$f_{t,0,k}$	11	14	18	18	21	19,2	22,3	19,5	24	19,5
Zatezanje upravno	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Pritisak paralelno	$f_{c,0,k}$	18	21	23	23	25	24	28	24	30	24,5
Pritisak upravno	$f_{c,90,k}$	2,2	2,5	2,7	8,0	8,1	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Smicanje	$f_{v,k}$	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Svojstvo krutosti (kN/mm ²)											
Srednji modul elastičnosti paralelno	$E_{0,mean}$	9	11	12	11	12	11,5	12,6	12,5	13,6	13
Karakteristični modul elastičnosti paralelno	$E_{0,05}$	6,0	7,4	8,0	9,2	10,1	9,6	10,5	10,4	11,3	10,8
Srednji modul elastičnosti upravno	$E_{90,mean}$	0,30	0,37	0,40	0,73	0,80	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Srednji modul smicanja	G_{mean}	0,56	0,69	0,75	0,69	0,75	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Zapreminska masa (kg/m ³)											
Karakteristična zapreminska masa	ρ_k	320	350	380	530	540	385	425	390	430	390
Srednja zapreminska masa	ρ_{mean}	380	420	460	640	650	420	460	420	480	430

2.3. Tehnička svojstva drveta

Pod pojmom tehnička svojstva drveta podrazumevaju se one njegove osobine koje su posledica građe i hemizma drveta, a koje su od posebnog interesa za tehnički rad, odnosno za primenu drveta u drvenim konstrukcijama.

Fizička svojstva drveta

Razumevanje fizičkih svojstava drveta od ključne je važnosti za njegovu efikasnu i dugoročnu upotrebu. Različite vrste drveta nude različite prednosti i izazove u zavisnosti od svojih karakteristika. Bilo da se koristi u građevini, nameštaju ili industriji, poznavanje ovih svojstava omogućava optimalnu primenu drveta u skladu sa njegovim prirodnim osobinama. U fizička svojstva drveta ubrajamo ona svojstva koja se javljaju kao posledica delovanja prirodnih sila (sila zemljine teže, kretanja vode, talasa, zvuka, toplote, elektriciteta i svetla). Glavne fizičke osobine drveta su: vlažnost, zapreminska masa, promenljivost dimenzija i širenje usled toplotnog dejstva.

Vlažnost drveta predstavlja najbitniju osobinu drveta zato što se sa promenom količine vlage menjaju mehaničke i većina fizičkih osobina kao i trajnost drveta. Drvo je higroskopno, što znači da upija ili gubi vlagu iz svog okruženja, što može izazvati promene u njegovoj veličini, težini i čvrstoći. Vlažnost drveta ω izračunava se iz mase drveta m_ω , izmerene u vlažnom stanju i mase m_0 , izmerene u suvom stanju po sledećem izrazu:

$$\omega = \frac{m_\omega - m_0}{m_0} [\%]$$

Količina vlage u sveže isečenom drvetu može da varira u vrlo širokim granicama zavisno od vrste, odnosno poroznosti drveta i obično se kreće od 40-200% kod četinara i 35-130% kod listopadnih vrsta drveta. Sušenjem u prirodnim uslovima na vazduhu, vlažnost drveta se smanjuje na oko 20%, a veštački sušeno drvo u sušnici sadrži 8-12% vlage. Kao standardna vlažnost uzima se 15% i svojstva drveta se uglavnom određuju za takav nivo vlažnosti. Gubitkom vlage smanjuju se dimenzije i zapremina, odnosno dolazi do skupljanja drveta. Zbog nehomogene strukture, skupljanje drveta nije jednako u svim pravcima: linearno skupljanje u pravcu vlakana iznosi 0.1-0.3%, u radijalnom pravcu 3-6%, a u tangencijalnom pravcu 7-12%. Zbog ovakvog neravnomernog skupljanja može doći do raznih deformacija. Ukoliko se drvo suviše brzo suši ove promene zapremine mogu uzrokovati stvaranje pukotina. Ako se osušeno drvo nađe u vlažnoj sredini, zbog higroskopnosti celuloze i drugih sastojaka, dolazi do ponovnog povećanja vlažnosti i porasta zapremine – bubrenja. Bubrenje drveta je takođe neravnomerno u raznim pravcima. Česte i naizmenične promene vlažnosti dovode do neizbežnih deformacija drvenih delova konstrukcije. Drvo sa količinom vlage iznad 15% je podložno truljenju, zbog dejstva mikroorganizama koji se u takvim uslovima razmnožavaju u drvetu.

Standard razlikuje sledeće nivoe vlažnosti drveta:

- Napojeno drvo (šupljine u drvetu su potpuno ispunjene vodom)
- Sirovo drvo (vlažnost je veća od tačke zasićenja vlakana)
- Polusuvo drvo (ne sadrži slobodnu vodu, vlažnost oko 30 %)
- Prosušeno drvo (vlažnost je najviše 22%)

- Isušeno drvo (vlažnost je od 6-12%)
- Suvo drvo (vlažnost je oko 0%)

Kako svojstva drveta direktno zavise od njegove vlažnosti, sadržaj vlage kao i klimatski uslovi u kojima će se neka drvena nosiva konstrukcija nalaziti tokom upotrebe, moraju biti unapred poznati. Tek nakon što se svi ovi zahtevi uvaže, drvena konstrukcija se može svrstati u jednu od klasa upotrebljivosti ili razreda vlažnosti definisanih Evrokodom 5 [8], Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Eksploatacione klase

Eksploataciona klasa	Vlažnost drveta	Mikroklima prostora	Primer
1	$\leq 12\%$	Temperatura prostora 20°C i relativna vlažnost vazduha koja samo nekoliko nedelja godišnje prelazi 65%	Grejani prostor
2	$\leq 20\%$	Temperatura prostora 20°C i relativna vlažnost vazduha koja samo nekoliko nedelja godišnje prelazi 85%	Zatvoreni negrejani prostor, delimično otvoreni prostor
3	$> 20\%$	Klimatski uslovi koji dovode do veće vlažnosti drveta nego u eksploatacionoj klasi 2	Potpuno otvoren prostor

Za građevinske primene, drvo mora biti pravilno osušeno pre nego što se upotrebi. Sušenje drveta smanjuje sadržaj vode i povećava stabilnost materijala. Prekomerna vlažnost može uzrokovati deformacije, pucanje i smanjenje čvrstoće. Optimalni sadržaj vode za građevinsku upotrebu je obično između 12-20%, u zavisnosti od lokalnih klimatskih uslova.

Zapreminska masa predstavlja masu drveta po jedinici zapremine i obično se izražava u kilogramima po kubnom metru (kg/m^3). Zapreminska masa se razlikuje među vrstama drveta i može biti pod uticajem faktora poput starosti drveta i uslova u kojima je drvo raslo. Drveće koje raste u suvim i toplim područjima često ima veću zapreminsku masu u odnosu na drveće koje raste u vlažnijim područjima. Veća zapreminska masa znači da je drvo čvršće i teže, što obično znači i veću nosivost i otpornost na oštećenja. S druge strane, niža zapreminska masa može biti poželjna u situacijama kada je bitna lakoća materijala.

Evrokod 5 definiše karakterističnu zapreminsku masu ρ_k kao vrednost 5% fraktila, izvedenu iz mase (m) i zapremine (V) u stanju ujednačene vlažnosti, pri temperaturi od 20°C i relativnoj vlažnosti vazduha od 65%, Tabela 2.2. Odnos mase i zapremine drveta vlažnosti $\omega = 0\%$ označava zapreminsku masu u suvom stanju ρ_0 .

Specifična masa predstavlja samo masu drvene materije po jedinici zapremine. Specifična masa drveta kreće se u veoma uskom rasponu, od 1460 kg/m^3 do 1560 kg/m^3 . Zbog velike poroznosti, zapreminska masa suvog drveta je manja od 1000 kg/m^3 zbog čega ono pliva u vodi. Sa povećavanjem vlažnosti povećava se i zapreminska masa drveta.

Za građevinske potrebe, drvo sa većom zapreminskom masom obično ima bolja mehanička svojstva, dok se drvo sa nižom zapreminskom masom koristi za lakše strukture ili za namene gde je potrebna veća termička ili zvučna izolacija. Na primer, hrast i bukva imaju veću zapreminsku masu i bolju čvrstoću, dok bor ili jelovina manju, što ih čini pogodnijima za lakše konstrukcije.

Promenljivost dimenzija drveta usled skupljanja i bubrenja je prirodni proces koji se mora uzeti u obzir prilikom projektovanja drvenih konstrukcija. Drvo je higroskopno, što znači da upija ili gubi vlagu iz svog okruženja, čime dolazi do promena u njegovim dimenzijama. Ova svojstva, koja uključuju skupljanje i bubrenje drveta, imaju značajan uticaj na njegovu stabilnost, trajnost i ponašanje u građevinskim konstrukcijama.

Skupljanje drveta se javlja kada drvo gubi vodu i dolazi do smanjenja njegovih dimenzija, što je naročito izraženo u radijalnom i tangencijalnom pravcu. Drvo se prirodno osuši kada je izloženo nižem sadržaju vlage nego što je prisutno u njegovoj prirodnoj sredini, čime dolazi do kontrakcije ili skupljanja. Radijalno skupljanje odnosi se na smanjenje prečnika drveta (kroz prstenove godova) i obično je manje od tangencijalnog skupljanja. To znači da se drvo skuplja manje u pravcu od središta ka kori. Najveće skupljanje se javlja u tangencijalnom pravcu (približno paralelno sa prstenovima godova) i obično je veće od radijalnog skupljanja. Ovo skupljanje može dovesti do značajnih deformacija, kao što su uvijanje ili pucanje drvenih panela ili greda. Skupljanje se obično javlja u svim vrstama drveta, ali je intenzitet skupljanja različit i zavisi od vrste drveta. Drvo sa većom zapreminskom masom ili sa širim godovima može imati izraženije skupljanje nego vrste sa manjom zapreminskom masom.

Bubrenje drveta nastaje kada drvo upija vlagu iz okolnog vazduha ili iz vode, čime dolazi do povećanja njegovih dimenzija. Bubrenje je suprotan proces od skupljanja. Bubrenje drveta posebno je izraženo kada je drvo u kontaktu s vodom, čime može doći do značajnih promena u dimenzijama. Bubrenje je najizraženije u tangencijalnom pravcu, jer se drvo širi u pravcu prstenova/godova, a najmanje u longitudinalnom pravcu (u pravcu stabla paralelno sa vlaknima). Bubrenje može izazvati deformacije drvenih konstrukcija, kao što su savijeni podovi, promene u obliku vrata i prozora, a u najgorem slučaju, može doći do pukotina ili sloma elemenata glavne nosive konstrukcije.

Procenat skupljanja ili bubrenja zavisi od vrste drveta, smanjenja ili povećanja vlažnosti, kao i od prethodno pomenutih faktora poput zapreminske mase i broja godova. Na primer, vrste drveta poput hrasta imaju niže stope skupljanja u poređenju sa vrstama poput bora ili jelovine.

U higroskopskom području $\omega \leq \text{cca } 32\%$ vrlo jednostavno pomoću sledećeg izraza mogu se računski odrediti promene početnih dimenzija koje nastaju kao posledica upravo promene vlage u drvetu:

$$\Delta l = \beta \cdot \frac{\Delta \omega \cdot l}{100}$$

pri čemu je:

- β bubrenje/skupljanje u % po 1% promene vlažnosti drveta
- $\Delta \omega$ razlika u vlažnosti drveta izražena u %
- β_0 bubrenje/skupljanje paralelno u odnosu na vlakna oko 0,01% po 1% promene vlažnosti drveta (može se zanemariti)
- β_{90} bubrenje/skupljanje upravno u odnosu na vlakna, Tabela 2.4.

Tabela 2.4. Proračunske vrednosti za bubrenje/skupljanje izražene u % po 1 % promene vlažnosti drveta prema DIN-u 1052-1

Evropski četinari	Bukva i tvrda drva	Hrast	Afričke tvrde vrste
0,24	0,3	0,2	0,36
Ove vrednosti važe za vlažnost drveta u higroskopskom području			

Za precizno projektovanje i primenu drveta u građevinskim objektima, od ključne je važnosti poznavanje veličina skupljanja i bubrenja za specifičnu vrstu drveta. Ovi podaci omogućavaju inženjerima i arhitektama da precizno sračunaju promene dimenzija koje mogu nastati tokom vremena, što je važno za očuvanje stabilnosti i izbegavanje deformacija u gotovim strukturama. Da bi se minimizirale posledice skupljanja i bubrenja, važno je koristiti odgovarajuće tehnike obrade drveta, kao što su sušenje na odgovarajuće nivoe vlažnosti pre ugradnje i zaštita od vlage tokom životnog ciklusa objekta.

Širenje drveta usled toplotnog dejstva u drvenim konstrukcijama uglavnom se ne uzima u proračun jer, zbog svoje poroznosti, drvo slabo provodi toplotu i ima mali koeficijent termičkog širenja, tako da su mu termičke osobine dobre, pa se smatra dobrim izolacionim materijalom. Što je drvo poroznije, odnosno ima manju zapreminsku masu, to će imati manji koeficijent toplotne provodljivosti i biće bolji izolator. Koeficijent toplotne provodljivosti zavisi od građe drveta, zapreminske težine, vlažnosti, temperature i pravca vlakana, Tabela 2.5. Vlaga nepovoljno utiče na toplotnu izolaciju drveta tako što povećanje vlažnosti od 1% utiče na povećanje koeficijenta toplotne provodljivosti za 1,25%.

Drvo kao i svaki drugi materijal radi pri temperaturnim promenama. Koeficijent termičke dilatacije (za temperaturne promene od 25°C do 60°C) zavisi od vrste drveta, zapreminske mase, pravca vlakana, vlažnosti i temperature. Kod drveta, zbog anizotropije, treba razlikovati koeficijente termičkih dilatacija u longitudinalnom, radijalnom i tangencijalnom pravcu, Tabela 2.5.

Tabela 2.5. Prosečni koeficijent toplotne provodljivosti drveta na 20°C i koeficijent termičke dilatacije u temperaturnoj oblasti od – 50 do +50°C

Pravci anizotropije	Prosečni koeficijent toplotne provodljivosti [W/m°C]	Koeficijent termičke dilatacije
Longitudinalni pravac	0,1908 – 0,2844	$2,5 - 11 \cdot 10^{-6}$
Radijalni pravac	0,1044 – 0,1512	$1,6 - 3,5 \cdot 10^{-5}$
Tangencijalni pravac	0,0900 – 0,1404	$2,4 - 7,5 \cdot 10^{-5}$

U građevinarstvu od praktičnog značaja je međutim samo promena dužine u longitudinalnom pravcu, no i ona je u poređenju sa čelikom i betonom neznatna. U normalnom temperaturnom području promena dužine direktno je proporcijalna koeficijentu termičke dilatacije u longitudinalnom pravcu i dužini elementa odnosno temperaturi i određuje se prema poznatoj relaciji:

$$\Delta l = \alpha_{tII} \cdot l \cdot t$$

pri čemu je:

- α_{tII} promena jedinice dužine za temperaturu od 1°C odnosno koeficijent termičke dilatacije
- l dužina elementa
- t veličina temperature za koju se traži promena veličine l .

Mehanička svojstva drveta

Zbog nehomogenosti strukture drveta i njegove anizotropije, mehaničke karakteristike drveta mogu se značajno razlikovati, kako između različitih vrsta drveta, tako i unutar iste vrste drveta. Ove razlike proizlaze iz varijacija u konstitutivnim komponentama drveta (kao što su celuloza, hemiceluloza i lignin), koje se razlikuju po zapreminskom udelu u strukturi, kao i od prisustva različitih defekata (kao što su čvorovi, pukotine ili šupljine) i drugih oštećenja, koji mogu značajno uticati na mehaničke osobine materijala.

Drvo je higroskopan materijal, što znači da stalno razmenjuje vlagu sa svojim okruženjem. Sadržaj vlage u drvetu ima ključan uticaj na njegove mehaničke karakteristike, jer povećanje ili smanjenje vlage može značajno promeniti čvrstoću, elastičnost, otpornost na savijanje i druge osobine. Takođe, mehaničke karakteristike drveta zavise i od starosti drveta, jer sa godinama dolazi do promena u strukturi i gustini drveta. Brzina rasta drveta takođe ima značajan uticaj na kvalitet i čvrstoću drveta. Drvo koje brzo raste može imati manje gustine i slabiju strukturu, dok drvo koje sporo raste često ima veću gustinu i bolje mehaničke osobine. Na kraju, trajanje opterećenja takođe igra ulogu u ponašanju drveta pod naprezanjem. Dugotrajno opterećenje može izazvati plastične deformacije i promene u mehaničkim karakteristikama drveta, dok kratkotrajna opterećenja obično ne izazivaju trajne promene u strukturi materijala.

Mehanička svojstva drveta određuju se prema standardizovanim metodama testiranja, pri čemu se koriste uzorci drveta određenih dimenzija i vlažnosti, obično 12%, koji omogućavaju uporedivost rezultata između različitih vrsta drveta. Tokom testiranja, uzimaju se u obzir osnovna svojstva kao što su čvrstoća na zatezanje upravno $f_{t,90}$ i paralelno sa vlaknima $f_{t,0}$, čvrstoća na pritisak upravno $f_{c,90}$ i paralelno sa vlaknima $f_{c,0}$ i čvrstoća na smicanje f_v , koja su ključna za procenu nosivih sposobnosti drveta. U Tabeli 2.6 prikazane su vrednosti ovih mehaničkih karakteristika za različite vrste drveta prema podacima dostupnim u literaturi.

Tabela 2.6. Mehaničke karakteristike različitih vrsta drveta [9]

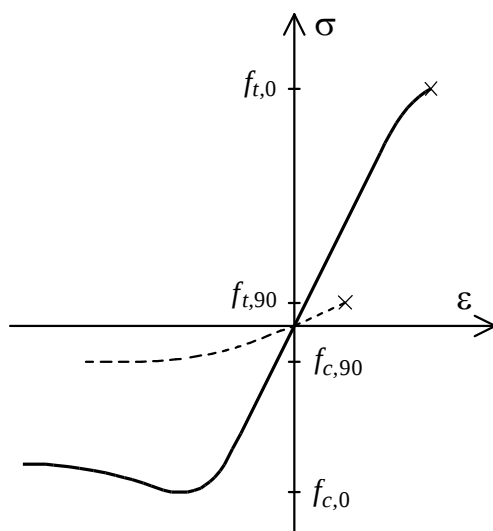
Vrsta	$f_{t,90}$ (MPa)	$f_{t,0}$ (MPa)	$f_{c,90}$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)	f_v (MPa)
Smreka	3	90	6	30	7
Bor	4	100	4	30	10
Ariš	2	100	8	35	9
Bukva	7	140	9	40	11
Hrast	4	90	8	40	11

Čvrstoća drveta na zatezanje u pravcu vlakana (duž stabla) je od 20 do 50 puta veća nego čvrstoća na zatezanje u pravcu koji je upravno na vlakna. Ova razlika je ključna jer drvo ima mnogo veće sposobnosti da izdrži naprezanje kada je opterećeno u pravcu svojih vlakana, dok je kod opterećenja u poprečnom pravcu čvrstoća znatno manja.

Čvrstoća na pritisak u pravcu vlakana je takođe znatno veća od čvrstoće na pritisak upravno na vlakna, i to u odnosu od 5 do 10 puta. Ovo znači da drvo bolje podnosi pritisak kada opterećenja deluju duž vlakana, što je posebno važno za elemente kao što su stubovi i drugi konstruktivni elementi, koji su pretežno izloženi opterećenju na pritisak.

Čvrstoća na smicanje upravno na vlakna je približno istog reda veličine kao čvrstoća na pritisak upravno na vlakna. Iako smicanje ne uzrokuje iste vrste oštećenja kao zatezanje ili pritisak, smanjenje čvrstoće na smicanje može izazvati pucanje ili delaminaciju, posebno u složenim konstrukcijama gde drvo doživljava različite vrste naprezanja.

Kada se drvo ispituje do loma aksijalnim zatezanjem, veza napon-dilatacija je prilično linearna do graničnog opterećenja, a lom je krt. Pri aksijalnom pritisku, drvo je znatno duktilniji materijal, sa linearnom vezom napon-dilatacija do granice proporcionalnosti, posle čega sledi plastično tečenje do dostizanja granične dilatacije. Tipični dijagrami napon-dilatacija drveta opterećenog na zatezanje i pritisak paralelno i upravno na vlakna prikazani su na Slici 2.3.

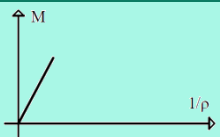
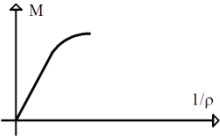
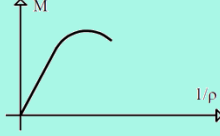
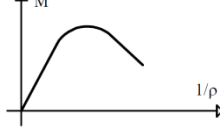


Slika 2.3. Dijagrami napon-dilatacija za drvo opterećeno paralelno vlaknima (puna linija) i upravno na vlakna (isprekidana linija) [10]

Konstruktivsko drvo u stvarnim dimenzijama i mali „čisti“ uzorci drveta, koji se koriste prilikom laboratorijskih ispitivanja, često pokazuju različita ponašanja. Prisustvo defekata utiče na mehaničke karakteristike i čini ponašanje drveta znatno krtim. S obzirom na to da je teško precizno odrediti veličinu, lokaciju i raspodelu defekata, njihov uticaj na karakteristike drveta je teško predvideti. Zbog toga, vrednosti čvrstoće koje se dobijaju testiranjem malih „čistih“ uzoraka ne mogu se direktno primeniti na konstruktivsko drvo. Opšte gledano, srednja vrednost čvrstoće drveta na zatezanje u pravcu vlakana, izmerena na malim uzorcima bez defekata, iznosi oko 80-100 MPa, što je približno duplo više od srednje vrednosti čvrstoće na pritisak u istom pravcu, koja se procenjuje na 40-50 MPa. Prisustvo defekata i njihova učestalost smanjuju ove vrednosti na približno 10-40 MPa za čvrstoću na zatezanje i 25-40 MPa za čvrstoću na pritisak. Prisustvo defekata u drvetu utiče znatno više na čvrstoću na zatezanje nego na čvrstoću na pritisak, tako da u važećim standardima usvojene vrednosti za ove razmatrane čvrstoće su približno iste.

Varijabilnost materijala, nelinearno ponašanje pri pritisku i prisustvo defekata čine da se ponašanje drveta pri savijanju ne može precizno odrediti samo na osnovu ispitivanja na zatezanje i pritisak. Zbog toga, važeći standardi razmatraju čvrstoću na savijanje kao nezavisnu karakteristiku. U Tabeli 2.7 prikazani su glavni oblici loma drveta pri čistom u zavisnosti od odnosa čvrstoća na zatezanje i pritisak u pravcu vlakana ($\eta = f_t/f_c$). U tehničkoj praksi, verovatnoća pojave ovih oblika loma varira, zavisno od konkretnih uslova.

Tabela 2.7. Glavni oblici loma drveta pri čistom savijanju [11]

	Opis loma	Uslov	Dijagram moment-krivina
1	Krt lom u zategnutoj zoni sa linearnom vezom između momenta savijanja i krivine do loma.	$\eta < 1$	
2	Lom u zategnutoj zoni praćen plastifikacijom pritisnute zone i spuštanjem neutralne ose. Veza moment-krivina se razlikuje od linearnog trenda.	$\eta \geq 1$	
3	Lom u zategnutoj zoni sa velikom duktilnošću usled plastifikacije poprečnog preseka. Dijagram moment-krivina pokazuje mali opadajući trend.	$\eta > 1$	
4	Lom u pritisnutoj zoni sa velikom duktilnošću usled znatne plastifikacije poprečnog preseka. Dijagram moment-krivina pokazuje evidentni opadajući trend.	$\eta \gg 1$	

Ispitivanja sprovedena na malim "čistim" uzorcima drveta pokazala su da se najčešći tip loma javlja kada se dostigne granična vrednost napona, odnosno kada se postigne granična vrednost dilatacije u zategnutoj zoni. Ovaj lom obično prati plastifikacija pritisnute zone. Odgovarajući oblici loma označeni su brojevima 2 i 3 u Tabeli 2.7. Nasuprot tome, oblik loma označen brojem 1 je relativno redak i ukazuje na materijal sa značajnim defektima. Ovaj oblik loma je najmanje poželjan zbog svojih krtih karakteristika i nedovoljno iskorišćenih dilatacija. Oblik loma označen brojem 4, iako nespecifičan za elemente korišćene u građevinskim konstrukcijama, tipičan je za sirovo drvo (drvo sa procentom vlažnosti iznad tačke zasićenja vlakana i ćelija). Ovaj oblik loma smatra se najboljim jer ga karakterišu velike dilatacije i progresivni gubitak kapaciteta nosivosti.

2.4. Greške i zaštita drveta

Greške drveta

Drvo je prirodni materijal koji se koristi u građevinskoj industriji zbog svoje čvrstoće, fleksibilnosti i estetskih karakteristika. Ipak, kao biološki materijal, drvo nije savršeno i može sadržati razne greške koje utiču na njegove mehaničke osobine i dugovečnost. Greške drveta mogu nastati tokom rasta stabla, procesa obrade, skladištenja ili tokom samog korišćenja u građevinskim konstrukcijama.

Greške nastale tokom rasta drveta su rezultat nepravilnosti u prirodnom rastu stabla i obično se ne mogu potpuno izbeći, ali mogu se predvideti i razumeti kako utiču na svojstva drveta. Kvrge su nepravilnosti strukture drveta, zaostali delovi grana uklještenih u stablo drveta. To su nepravilnosti koje neizbežno nastaju u toku rasta i predstavljaju svakako najvidljivije i najznačajnije greške drveta. Kvrge iako je od istog drveta ima drugačiju strukturu i homogenost pa samim tim i tehnička svojstva, što znači da se u osnovnoj masi drveta nalazi jedan prirodni umetak koji umanjuje kvalitet celine. Na mestima kvrga drvena vlakna su pretrpela određenu

devijaciju, koja se manifestuje zakrivljenošću odnosno zakošenošću vlakana u odnosu na osu debla. Zavisno od oblika, veličine, rasporeda, orijentacije, mesta nalaženja, stepena sraslosti i zdravosti, kvrge u manjoj ili većoj meri umanjuju tehnička svojstva drveta. Kvrge predstavljaju potencijalnu opasnost od eventualnih infekcija jer se u kontaktnoj zoni (drvo-kvrga) kumulira vlaga koja pogoduje razvoju mikroorganizama. Različita utezanja između mase drveta i kvrge imaju za posledicu labavljenje veze i, kasnije, ispadanje kvrge. Građu koja sadrži kvrge treba u konstrukciji orijentisati tako da se njihov negativan uticaj što više umani - strane preseka koje sadrže kvrge staviti u pritisnutu zonu, kvrgavo drvo ugrađivati izvan veza i spojeva, kao i izvan jače opterećenih preseka.

Drveće koje raste pod uglom ili na ograničenom prostoru može razviti zakrivljenost ili usukanost debla, što utiče na ravnotežu vlakana i sam materijal može biti slabiji u tim područjima. Vlakna ne idu paralelno sa osom debla, već se spiralno uvijaju ili su zakošena. Greška se vidi golim okom i utiče na mehaničke karakteristike drveta. Laboratorijskim ispitivanjima [12] konstatovano je da pri zakošenju vlakana 1:8 od čvrstoće na savijanje ostaje svega oko 53%, a za zakošenje 1:15 oko 76%. Stoprocentna čvrstoća drveta na savijanje ostaje ako je zakošenost vlakana 1:20. Ili, na primer, čvrstoća na pritisak pri zakošenosti vlakana 1:15 ostaje 100%, a za zakošenost vlakana 1:6 ostaje nešto oko 56%. U slučaju naprezanja na zatezanje, zakošenost vlakana vodi ka zatezanju upravo na vlakana, što je najslabiji pravac naprezanja drveta [13].

Zajedno sa kvrgama i zakošenim vlaknima, pukotine su najuticajnije greške koje se javljaju i o kojima se mora voditi računa pri korišćenju drveta kao materijala za konstrukcije. Po vremenu nastajanja razlikuju se dve kategorije ovih grešaka: one koje nastaju u toku rasta stabla i one koje nastaju u drvetu kao materijalu pripremljenom za konstrukcije ili u samim konstrukcijama. Pukotine nastale u toku rasta stabla su nepravilnosti prirasta i manifestuju se podužnim odvajanjem vlakana (npr. između godova), što stvara diskontinuitet u materijalu. Mnogo češće i praktično prsline koje se uvek javljaju su one koje su nastale usled skupljanja građe, smanjenjem vlažnosti drveta. Ove pukotine nastaju u radijalnom pravcu, od periferije ka srcu drveta i pružaju se po dužini građe. U početku to su mikroskopske, nevidljive pukotine, koje se kasnije sa sušenjem znatno povećavaju. U konstrukcijama od masivnog drveta ove pukotine narastaju do vrlo velikih dimenzija, do veličine od nekoliko centimetara, po čitavoj dužini elementa. U takvim razmerama one značajno smanjuju nosivost elementa i omogućavaju gljivicama i insektima lak, direktan pristup do samog srca elementa.

Na rast stabla mogu uticati faktori kao što su nejednak pristup svetlosti, loše tlo ili ekstremni vremenski uslovi, što može dovesti do nepravilnog formiranja godova (prstenova). Na primer, drveće koje raste u gustim šumama, gde konkurencija za svetlost i hranljive materije postaje intenzivna, može razviti nepravilne ili asimetrične godove, jer stabla moraju prilagoditi svoj rast kako bi se došlo do svetlosti. Slično tome, stabla koja rastu u područjima sa slabim nehranljivim tлом često formiraju tanje i slabije godove, jer nemaju dovoljno resursa za ravnomeran rast. Ekstremni vremenski uslovi, kao što su suše, mrazovi, jaki vetrovi ili poplave, takođe mogu uticati na formiranje godova. Na primer, tokom sušnih perioda stablo može prestati sa rastom ili usporiti rast, što može dovesti do nejednako širokih godova ili stvaranja "uskih prstenova". S druge strane, u uslovima prekomerne vlažnosti ili na područjima sa obilnim padavinama, drvo može brzo rasti, što stvara šire prstene. Ove nepravilnosti u formiranju godova mogu značajno uticati na mehaničke osobine drveta, jer nepravilna raspodela gustine i vlakana može smanjiti njegovu čvrstoću i stabilnost. Pored toga, ako drvo raste pod nepovoljnim uslovima, kao što su jak vetar ili nagibi terena, može razviti nepravilnu orijentaciju godova. Takve promene u strukturi godova mogu stvoriti slabosti u drvetu koje mogu postati potencijalni problemi u građevinskim primenama, jer nepravilnosti u vlaknima mogu smanjiti otpornost na savijanje i lom.

Pritisnuto drvo je rezultat reakcije drveta na dejstvo spoljašnjih sila. Četinari proizvode pritisnuto drvo kao zaraslo oštećenje u zoni visokih naprezanja. Ove površine su tamnije nego uobičajeno, što je posledica veće zastupljenosti kasnog drveta u okviru goda. Mada pritisnuto drvo ima veću gustinu, njegova krutost je obično manja u odnosu na drvo koje nije pretrpelo takve deformacije. Kada se ovakvo drvo koristi u konstrukcijama, može doći do povećanog rizika od krtog loma, jer su vlakna u zoni pritisnutog drveta stisnuta i mogu biti neregularna, što smanjuje sposobnost drveta da apsorbira deformacije. Ovaj tip loma se često dešava bez značajnijih znakova upozorenja, čineći ga posebno opasnim u konstrukcijama koje zahtevaju visoku čvrstoću i fleksibilnost, kao što su noseće grede u zgradama.

Smolnjače su sočivaste šupljine u drvetu koje su ispunjene smolom ili su sadržavale smolu. Nalaze se u zoni jednog goda, paralelno sa njegovom graničnom linijom, i pružaju se u pravcu vlakana. Nedostaci koji se javljaju u drvetu uticajem smolnjače manifestuju se umanjnjem njegovih tehničkih svojstava - prekidom strukture, povećanjem nehomogenosti i povećanjem otpornosti od zapaljivosti.

Greške nastale tokom obrade drveta nastaju usled nepravilne obrade drveta nakon što je isečeno. Ove greške mogu imati ozbiljan uticaj na mehanička svojstva drveta i njegovu primenljivost u građevinarstvu. Kada se drvo seče duž vlakana (paralelno s vlaknima), postoji veća verovatnoća da će doći do pogrešnog oblika ili smanjenja čvrstoće na određenim mestima. Sečenje poprečno na vlakna omogućava bolju raspodelu opterećenja i smanjuje mogućnost formiranja slabljenja u drvetu. Ako se, međutim, drvo seče duž vlakana, posebno ako se ne koristi adekvatna tehnika (npr. pravilna primena alata, kontrola brzine i smer sečenja), vlakna mogu biti oštećena što smanjuje njegovu mehaničku čvrstoću. Ovo može rezultirati povećanjem verovatnoće od loma ili deformacije tokom kasnije upotrebe, naročito pod velikim opterećenjima ili u konstrukcijama sa visokim zahtevanim standardima. Drvo može puknuti ili se raspasti ako se suši na pogrešan način. Prebrzo sušenje izaziva nejednaku kontrakciju unutar vlakana. Na primer, ako se spoljni deo drva osuši prebrzo u odnosu na unutrašnje delove, može doći do pucanja, dok se unutrašnji deo drva još uvek nalazi u vlažnom stanju. Nepravilna tehnika sušenja takođe može dovesti do deformacija, kao što su uvijanje ili savijanje drvenih elemenata, što dodatno smanjuje njihovu upotrebnu vrednost. Greške tokom obrade, poput nepravilnog sečenja ili sušenja, stoga zahtevaju pažljivo planiranje i kontrolu procesa, kako bi se minimizirale posledice na konačne proizvode i očuvala strukturna stabilnost drvenih elemenata.

Greške uzrokovane uslovima skladištenja i upotrebe nastaju ako se drvo ne skladišti ili ne koristi pravilno. Ove greške mogu značajno uticati na fizička i mehanička svojstva drveta, čineći ga manje otpornim na spoljne faktore i smanjujući njegovu trajnost. Skladištenje na vlažnim mestima može izazvati bubrenje ili truljenje drveta, što može značajno smanjiti njegovu čvrstoću i dugovečnost. Drvo lako upija vlagu iz okoline, a ukoliko se čuva u neprovetravanim ili previše vlažnim uslovima, može doći do razvoja plesni i gljivica, što dovodi do truleži i gubitka nosivosti materijala. Dugotrajno izlaganje direktnoj sunčevoj svetlosti može izazvati pucanje i slabljenje drvenih materijala, jer UV zraci mogu degradirati hemijske komponente drveta. Ova degradacija najčešće se manifestuje kroz promenu boje, površinsko isušivanje i pojavu finih pukotina koje s vremenom mogu prerasti u dublja oštećenja. Da bi se ove greške izbegle, neophodno je drvo skladištiti u suvim, dobro provetrenim prostorijama, koristiti adekvatne premaze i impregnacije, kao i zaštititi ga od direktnog uticaja sunčeve svetlosti i vlage. Takođe, neophodno je voditi računa i o pravilnoj montaži drvenih elementa u konstrukciji. Upotreba neodgovarajućih spojnica, eksera i šrafova može dovesti do pojave pukotina i smanjenja nosivosti, posebno ako se spajanja vrše bez prethodnog bušenja ili ako se elementi ne postavljaju u skladu sa pravcem vlakana.

Zaštita drveta

Svojstvo drveta da se odupre štetnom delovanju vremenskih prilika, raznih hemijskih supstanci i štetočina biljnog i životinjskog porekla naziva se trajnost. Trajnost se u velikoj meri menja u zavisnosti od vrste drveta, pa su, na primer, hrast i bor znatno trajniji od jele, smreke i bukve. Srž drveta je trajnije od ksilema jer srž sadrži manje vode, a više ekstraktnih supstanci, od kojih neke deluju toksično na štetočine. Insekti napadaju uglavnom ksilem drveta jer on sadrži skrob i šećer, koji su im potrebni za život. Zapreminska masa drveta može poslužiti kao merilo trajnosti samo kod istih vrsta, jer lakša stabla mogu imati više infiltrata s komponentama koje deluju toksično, pa su u tom slučaju lakša stabla trajnija. Drvo posečeno zimi, prema iskustvu, trajnije je, ali ne zbog same građe drveta, već zbog nepovoljnih klimatskih uslova za razvoj gljiva i insekata. Trajnost drveta može se kretati od nekoliko meseci do neograničenog broja godina. U Tabeli 2.8 prikazana je trajnost određenih botaničkih vrsta koje su najviše zastupljene u građevinarstvu.

Tabela 2.8. Trajnost botaničkih vrsta

Vrsta drveta	Nezaštićen prostor	Natkriven prostor
Jela	do 50	do 50
Bor	do 85	do 120
Smreka	do 70	do 70
Hrast	do 100	do 200
Bukva	do 60	do 100

Nezaštićeno drvo izloženo spoljašnjim uticajima postaje sivo nakon nekoliko meseci i započinje proces razgradnje prouzrokovan biološkim i atmosferskim agensima, što dalje dovodi do narušavanja strukture. Da bi se povećala trajnost drveta i produžio njegov vek upotrebe, neophodno je preduzeti odgovarajuće mere zaštite. Zaštita drvenih konstrukcija obuhvata primenu različitih metoda i materijala koji se koriste kako bi se sprečila ili usporila oštećenja drvenih elemenata. Takođe, zaštita uključuje preventivne mere, kao i restauraciju već oštećenih objekata. Preventivne mere uključuju obradu drveta pre nego što dođe do oštećenja, dok restauracione mere podrazumevaju obnavljanje ili saniranje već oštećenih elemenata.

Impregnacija se najčešće koristi za zaštitu drvenih konstrukcija od bioloških i fizičkih faktora. Primena specijalizovanih hemijskih preparata koji ulaze u strukturu drveta pomaže u zaštiti od insekata, gljivica, truljenja i vlage. Postoje različite vrste impregnacija: vodene, uljane i gasne, koje se biraju u zavisnosti od vrste drveta i uslova u kojima se koristi. Postupak impregnacije drveta može se razlikovati u zavisnosti od potrebne dubine prodiranja zaštitnih materijala. Na primer, površinsko nanošenje premaza ili prskanje može delovati samo na tanak sloj drveta, dok potapanje drvenih elemenata u hladne ili tople konzervanse omogućava dublje prodiranje zaštite. U slučaju hladnog potapanja, drvo se obično drži u rastvoru nekoliko dana (2-8 dana), dok se kod toplog procesa impregniranje obavlja u kraćem vremenskom periodu, obično od nekoliko sati do nekoliko dana. Ovi preparati deluju preventivno i sprečavaju oštećenje drveta od strane insekata, poput termita, ili od mikroorganizama koji izazivaju truljenje i propadanje.

Zaštita drvenih konstrukcija može se postići i nanošenjem sloja zaštitnih premaza (lakova, boja ili voskova) koji stvaraju barijeru protiv vlage, UV zračenja i mehaničkih oštećenja. Ovi premazi takođe povećavaju estetski izgled drvenih konstrukcija. Održavanje optimalnih uslova vlažnosti u prostoru u kojem se koriste drvene konstrukcije (npr. u građevinskim objektima, industrijskim halama) može značajno smanjiti rizik od truljenja ili napada insekata.

Ako dođe do oštećenja drveta, važno je pravovremeno intervenisati. U slučaju truljenja ili oštećenja drvenih elemenata, mogu se koristiti tehnike restauracije, uključujući zamenu oštećenih delova, impregnaciju obnovljenih delova ili primenu specijalizovanih reparativnih materijala. Kada se detektuju tragovi gljivica ili insekata, specijalizovani biocidni preparati se primenjuju kako bi se zaustavio dalji razvoj mikroorganizama. U slučajevima kada drvo nije moguće potpuno zameniti, primenjuju se različite metode ojačanja, kao što su ugradnja metalnih potpornih elemenata ili uvođenje novih tehnoloških rešenja za obnavljanje nosivosti drvenih konstrukcija.

Nezaštićeno drvo spada u zapaljive materijale, što u slučaju požara dovodi do male otpornosti građevinskih elemenata na požar. Prema reakciji na požar, drvo se obično svrstava u klasu D, u skladu sa standardom EN 13501-1: 2018, što znači da je veoma goriv materijal koji može značajno da doprinese razvoju požara u objektu. Upotreba usporivača požara može osetno da doprinese smanjenju rizika od izbijanja i razvoja požara i ograničenju njegovog širenja na druge elemente. Primena ekspandujućih premaza za zaštitu drveta od požara ogleda se u snižavanju temperature konstrukcija i njihove izolacije karbonskom penom pri čemu se povećava požarna otpornost. Protivpožarni premazi se koriste u kombinaciji sa odgovarajućim osnovnim i završnim premazima za dodatnu zaštitu od atmosferskih, mehaničkih i drugih uticaja i zbog dekorativnosti tretiranih elemenata. Ovi sistemi doprinose usporavanju razvoja požara i produžavaju vreme za evakuaciju. Izbor sistema, odnosno potreba korišćenja prajmera i završnih premaza zavisi od namene drvenih elemenata, estetskih zahteva projekta, uticaja atmosferskih prilika i slično.

Prilikom sagorevanja drveta formira se spoljašnji zaštitni sloj koji može da štiti unutrašnjost drvenog elementa. Takav sloj, koji se obično naziva ugljenisanim slojem, smanjuje snabdevanje kiseonikom i, zahvaljujući izuzetno niskoj provodnosti, sprečava povećanje temperature unutrašnjih slojeva, usporavajući tako proces sagorevanja jezgra drvenih elemenata (brzina sagorevanja je u proseku 1 mm/min). Zbog ove osobine, konstrukcioni drveni element može dugo da odoleva požaru, uglavnom mnogo duže nego čelični ili betonski element istih dimenzija.

Zaštita drvenih konstrukcija od ključne je važnosti za očuvanje dugovečnosti i sigurnosti objekata. Pravilna i pravovremena zaštita od bioloških, fizičkih i mehaničkih faktora, kao i redovno održavanje, mogu značajno povećati trajnost i stabilnost drvenih elemenata. S obzirom na složenost problema koji mogu nastati usled degradacije drvenih materijala, inženjeri moraju biti upoznati sa svim dostupnim metodama zaštite kako bi pravilno pristupili projektovanju i održavanju drvenih konstrukcija.

2.5. Građevinski proizvodi od drveta

Drvo kao građevinski materijal daje veoma prijatan osećaj i toplinu prostorima koji su od njega građeni. Ono je u hemijskoj ravnoteži sa okolinom i enterijeru obezbeđuje veoma ugodnu mikroklimu. Vazduh u prostorijama napravljenim od drveta, ili onim u kojima dominiraju drvene površine, obično je bogat negativnim jonima, što pomaže u prečišćavanju vazduha od viška pozitivnih, agresivnih jona, prašine i bakterija.

Od četinarara u građevinskoj tehnici najviše se upotrebljavaju bor, smrča, jela i ariš. Primena ovih vrsta drveta je raznovrsna: u mostogradnji, za izradu šipova, stubova, železničkih pragova, jamske građe, u zgradarstvu, stolarstvu, za izradu furnira, skela, međuspratnih i krovnih konstrukcija i brodskih podova. Od lišćara u građevinarstvu se najviše primenjuju bukva, hrast, jasen i brest. Ove vrste drveta upotrebljavaju se za izradu pragova, parketa, nameštaja, furnira. Pored ove upotrebe, hrastovina se upotrebljava i mnogo šire, kao za šipove, mostove, kaldrmu, jamsku građu.

Delovi oborenog stabla sortiraju se kao tehničko drvo, drvo za hemijsku preradu (pretežno proizvodnja celuloze potrebne industriji papira) i ogrevno drvo. Dobro tehničko drvo treba biti ravnih vlakana, bez mnogo čvorova, homogene strukture, ne sme biti vlažno, trulo, ispucalo niti izvitopereno. Tehnologija proizvodnje različitih materijala na bazi drveta može značajno promeniti i poboljšati svojstva drveta kao početnog (osnovnog) materijala. Pojava drvenih pločastih elemenata i ploča na bazi drveta omogućila je prelazak sa drvenih građevinskih elemenata uobičajenog duguljastog oblika (grede) na konstruktivne elemente sa ravnim površinama.

Medijapan (MDF - medium-density fibreboard) je jedan od najvažnijih pločastih materijala u industriji obrade drveta i široko se koristi u građevinskoj i industriji nameštaja, Slika 2.4. Proizvodi se od drvenih vlakana koja se dobijaju od otpadnih drvenih materijala (poput piljevine i strugotine). Ova vlakna se spajaju pomoću lepka i izlažu pritisku pod visokom temperaturom i pritiskom kako bi se formirale čvrste ploče srednje gustine. Ovaj proces omogućuje stvaranje vrlo ujednačenog materijala u pogledu zapreminske mase, čvrstoće i dimenzionalne stabilnosti.



Slika 2.4. Medijapan (MDF - medium-density fibreboard)

Proizvodnja MDF-a započinje sakupljanjem otpadnih drvenih materijala koji se potom usitnjavaju u fina drvena vlakna. U zavisnosti od željenih karakteristikama gotovog proizvoda, vlakna se mogu obraditi kako bi se postigla određena gustina ili specifične fizičke osobine. Nakon toga, vlakna se mešaju s lepkom (najčešće na bazi uree-formaldehida, ali postoje i ekološki prihvatljivije varijante) i dodaju im se potrebni aditivi, poput impregnacija za zaštitu od vlage ili plesni. Mešavina drvenih vlakana i lepila zatim se podvrgava visokom pritisku i temperaturi u posebnim presama koje stvaraju ploče željene debljine i dimenzija. Ploče se potom hlade, režu na standardne veličine i obrađuju prema potrebama krajnjeg korisnika.

MDF je poznat po svojoj ujednačenoj gustini kroz celi materijal, što znači da ne sadrži "meka" i "tvrda" područja poput drugih pločastih materijala (kao što su OSB ploče). Gustina MDF-a obično se kreće između 600 i 800 kg/m³, a u nekim slučajevima može biti i veća, čime se postiže još veća čvrstoća i otpornost. Jedna od najistaknutijih karakteristika MDF-a je njegova izuzetno glatka i ravna površina. Ova površina čini ga idealnim za lakiranje, oblaganje dekorativnim folijama ili obradom u složene oblike, čime se otvaraju brojne mogućnosti za upotrebu. MDF ima izvrsnu stabilnost u odnosu na vlagu, čime se smanjuje mogućnost uvijanja ili deformiranja, koje su česte pojave kod prirodnog drva. To ih čini izuzetno korisnim za primene gde je potrebna visoka preciznost dimenzija i stabilnost u promenjivim uslovima okoline. Međutim, iako MDF pokazuje bolju stabilnost od masivnog drveta, ipak nije otporan na vlagu u ekstremnim uslovima, pa je potrebno koristiti zaštitu poput vodootpornih premaza ili impregnacija u vlažnim prostorijama. Jedna od velikih prednosti MDF-a je njegova lakoća obrade. Zbog svoje fine, ujednačene strukture, MDF se lako reže, buši i oblikuje u složene oblike, što omogućava preciznu izradu nameštaja, vrata, panela, okvira i drugih proizvoda. MDF se može obraditi na standardnim alatima i mašinama, što smanjuje troškove obrade i povećava produktivnost.

MDF je najpoznatiji po svojoj širokoj primeni u proizvodnji nameštaja. Njegova glatka površina omogućava jednostavno lakiranje, dok dimenzionalna stabilnost smanjuje potrebu za održavanjem u vlažnim uslovima, kao što je slučaj s masivnim drvetom. MDF se koristi za izradu kuhinjskih elemenata, ormara, stolova, vrata, kao i ukrasnih panela i okvira. MDF ploče se takođe koriste za unutrašnje obloge, pregrade i podne obloge, posebno u suvim prostorijama. Iako MDF nije idealan za spoljašnju primenu zbog osetljivosti na vlagu, postoje specijalizovani MDF materijali koji su obrađeni dodatnim premazima kako bi se povećala njihova otpornost na spoljašnje uslove. Takvi MDF proizvodi koriste se kao spoljašnje obloge na fasadama i drugim projektima gde je potrebna dodatna zaštita.

Prednosti:

- Glatka i ujednačena površina pogodna za lakiranje i dekoraciju.
- Visoka dimenzionalna stabilnost i otpornost na uvijanje.
- Laka obrada pomoću standardnih alata.
- MDF je često povoljniji u odnosu na masivno drvo, a nudi slične estetske rezultate.
- Ekološki prihvatljiv u smislu iskorištavanja drvenih ostataka.

Nedostaci:

- Iako MDF pokazuje dobru otpornost na vlagu u odnosu na masivno drvo, ipak nije prikladan za izlaganje direktnoj vlazi, pa je potrebno preduzeti mere zaštite.
- MDF je manje čvrst od masivnog drveta, što znači da nije pogodan za primene koje zahtevaju veliku nosivost.
- Iako postoje ekološke varijante, mnogi MDF proizvodi koriste lepkove koji sadrže formaldehid, što može predstavljati problem u zatvorenim prostorima bez odgovarajuće ventilacije.

Lesonit (HDF - high-density fibreboard) je pločasti materijal na bazi drveta sličan MDF-u, ali sa većom gustinom. Veća gustina daje HDF-u određene karakteristike koje ga čine pogodnijim za specifične primene u industriji, gde je potrebna veća čvrstoća, otpornost na habanje i dimenzionalna stabilnost.

HDF se proizvodi na isti način kao i MDF ploče. Ovaj postupak omogućava da vlakna budu usmerena i komprimirana u gustu i čvrstu strukturu. S obzirom na veći pritisak i gustinu u

produkciji, HDF ploče su značajno čvršće i kompaktnije od MDF-a, što im daje određene prednosti u odnosu na standardne ploče s nižom gustoćom. Gustina HDF-a obično je između 800 i 1000 kg/m³. HDF ima veću tvrdoću u odnosu na MDF, što ga čini otpornijim na oštećenja poput udaraca, ogrebotina i habanja. Ove karakteristike čine ga prikladnim za podne obloge, kao i za izradu laminatnih ploča, gdje je potrebna čvrsta i izdržljiva podloga. S obzirom na to da HDF ima bolju otpornost na udarce i ogrebotine, površine izrađene od ovog materijala su dugotrajnije i zahtevaju manje održavanja, čime se smanjuje potreba za čestim popravkama ili zamjenama. HDF se ponaša bolje u uslovima visoke vlage i temperaturnih promena, što ga čini prikladnim za primenu u prostorima gdje MDF može imati problema sa stabilnošću.

OSB ploče (Oriented strand board) su pločasti materijali koji se koriste u mnogim industrijskim granama, posebno u građevinarstvu. Sastoje se od nekoliko slojeva drvenih vlakana koja su presovana pod različitim uglovima, Slika 2.5, što omogućava postizanje veće čvrstoće i stabilnosti ploče. Ovaj način proizvodnje čini OSB ploče jednim od najpovoljnijih i najpraktičnijih materijala za mnoge građevinske primene.



Slika 2.5. OSB ploče (Oriented strand board)

Proizvodnja OSB ploča započinje sa odabirom odgovarajućih sirovina, a završava sa preciznim obradama i pakovanjem gotovih ploča. Proces je visoko tehnološki razvijen i podrazumeva korišćenje specijalizovane opreme koja omogućava kontrolisanu obradu i spajanje drvenih vlakana ili tračica pod visokim pritiskom i temperaturom. Za razliku od drugih pločastih materijala, kao što su MDF i HDF, kod kojih se koriste sitna drvena vlakna, OSB ploče se prave od većih drvenih tračica, koje mogu biti do nekoliko centimetara duge i široke.

Za proizvodnju OSB ploča koristi se uglavnom brzorastuće drvo poput bora, smreke, topole ili breze, koje se obrađuje u drvene trakice. Drvo mora biti pažljivo odabrano kako bi se osigurala uniformnost kvaliteta i veličine tračica, što utiče na konačnu čvrstoću i stabilnost ploče. Uglavnom se koristi drvo iz šumarstva, kao i drvenasti otpad (grane, trupci, otpad iz pilana) koji bi inače bio neiskorišten. Time se smanjuje otpad i povećava ekološka održivost proizvodnje.

Jedan od najvažnijih elemenata proizvodnje OSB ploča je način slaganja drvenih tračica. Slojna konstrukcija OSB ploče osigurava njenu čvrstoću i stabilnost. Trakice se slažu u različitim smerovima po slojevima. U prvom sloju obično su postavljene paralelno s dužinom ploče, dok se

u sledećem sloju smer tračica menja, u odnosu na prethodni sloj, čime se dodatno povećava čvrstoća i stabilnost ploče. Trakice se premazuju lepkom koji ih povezuje u jednu ploču. Osim lepka, mogu se dodavati i druge hemikalije za poboljšanje vatrootpornosti, otpornosti na vlagu i druge karakteristike materijala. Ploča se podvrgava visokim temperaturama i pritisku u presi. Ovaj proces kompresije omogućava da se lepak stvrdne, a ploča dobije čvrstu strukturu. Ploče mogu biti različitih debljina, zavisno o nameni, a deblje ploče pružaju veću čvrstoću i stabilnost. Na kraju, ploče se režu na standardne dimenzije i mogu se dodatno obrađivati prema potrebama kupca.

OSB ploče pokazuju bolju otpornost na vlagu od drugih pločastih materijala poput MDF-a ili iverice. Ovo je posebno važno u gradnji, jer mnoge OSB ploče dolaze s dodatnim premazima ili tretmanima koji ih štite od uticaja vlage, što im omogućava primenu u vlažnim uslovima. Proizvodnja OSB ploča često koristi drvene otpadne materijale i ostatke iz obrade drva, što smanjuje potrebu za korišćenjem celog drveta. To čini OSB ploče ekološki prihvatljivijim materijalom u odnosu na tradicionalno rezano drvo, jer omogućava efikasniju upotrebu resursa. Takođe, jedna od velikih prednosti OSB ploča je laka obrada. One se lako režu, buše, pilaju i lepe. Ovo čini OSB ploče vrlo pogodnima za upotrebu u različitim građevinskim projektima.

OSB ploče koriste se za izradu zidova, krovova, podova i montažnih kuća, kao nosivi element u konstrukcijama zbog svoje čvrstoće i sposobnosti podnošenja težine. Iako nije najčešći materijal za nameštaj, OSB ploče se ponekad koriste za izradu jeftinijeg nameštaja ili za enterijere koji zahtevaju industrijski izgled. OSB ploče se koriste kao podloga za fasade, zidove i krovne obloge. Takođe se koriste u privremenim građevinskim objektima i skladištima, za izradu paleta i kutija zbog svoje čvrstoće i lake obrade

Prednosti:

- Znatno su jeftinije od drugih pločastih materijala poput šperploče ili MDF-a, što ih čini popularnim izborom za građevinske projekte koji zahtevaju velike količine materijala po nižoj ceni.
- Zbog svoje svestranosti, mogu se koristiti u različitim aplikacijama. One se koriste za konstrukciju podova, krovova, zidova, montažnih kuća, unutrašnjih obloga i mnogih drugih građevinskih elemenata.
- Imaju veliku nosivost i mogu podneti velika opterećenja, što ih čini pogodnima za konstrukciju nosivih struktura.
- Iako su dostupne u mnogim građevinskim trgovinama, a mogu se nabaviti u različitim veličinama i debljinama, zavisno od specifičnih zahteva projekta.

Nedostaci:

- Iako pokazuju veću otpornost na vlagu od drugih ploča, one mogu nabubriti i deformisati se ako su izložene prekomernoj vlazi ili vodi. Zbog toga se preporučuje njihova zaštita odgovarajućim premazima i korišćenje u suvim uslovima, ili u uslovima gde vlaga nije stalna.
- Imaju karakterističan izgled drvenih tračica, što im može dati industrijski izgled koji nije uvek poželjan za sve vrste unutrašnjih prostora. Stoga, često zahtevaju dodatne obrade ili oblaganje kako bi se postigao željeni vizuelni efekat.
- Kao i mnogi drugi pločasti materijali na bazi drveta, OSB ploče mogu sadržati male količine formaldehida u lepkovima koji se koristi za povezivanje drvenih tračica. Iako moderne ploče zadovoljavaju stroge ekološke standarde, važno je obratiti pažnju na oznake sigurnosti.

Šperploča (Plywood) je vrlo specifičan građevinski materijal koji se koristi u širokom spektru industrijskih i građevinskih aplikacija. Ona je slojeviti proizvod, koji se sastoji od nekoliko tankih slojeva drvenih ploča (listova) ili furnira, koji su postavljeni jedan na drugi sa različito usmerenim drvenim vlaknima, Slika 2.6. Ovaj postupak spajanja slojeva drvenih listova pod određenim uglovima daje šperploči niz prednosti koje je čine izuzetno korisnom u mnogim industrijama.



Slika 2.6. Šperploča (Plywood)

Proizvodnja šperploče je složen proces koji uključuje nekoliko ključnih koraka, od selekcije sirovog drveta do završne obrade gotovih panela. Drvo se prvo seče u tanke ploče (furnire) debljine od 1 do 4 mm, zavisno od zahteva proizvodnje. Furniri se slažu u više slojeva, pri čemu se svaki sloj postavlja s vlaknima usmerenim u suprotnim smerovima u odnosu na prethodni sloj. Ovaj proces poznat je kao unakrsno laminiranje i omogućava šperploči da bude izuzetno čvrsta i stabilna, čak i u velikim dimenzijama. Nakon što su furniri složeni, sve se to spaja pomoću posebnih lepkova, a zatim se presuje pod visokim pritiskom i temperaturom. Ovaj proces daje šperploči čvrstinu i stabilnost. Po završetku presovanja, šperploča se reže na željene dimenzije i može se dodatno obrađivati lakiranjem, bojenjem ili obradom rubova, zavisno od namene.

Zahvaljujući slojevitom načinu proizvodnje, šperploča ima nekoliko karakteristika koje je čine izuzetno pogodnom za mnoge primene. S obzirom na usmerena vlakna u različitim pravcima, šperploča je vrlo otporna na savijanje, što joj omogućava da izdrži velika opterećenja. Zbog načina slaganja slojeva, šperploča je otporna na promene u veličini i obliku usled promena vlažnosti i temperature, što je čini pogodnom za upotrebu u različitim klimatskim uslovima. Šperploča je, u poređenju sa masivnim drvetom, lakša, ali i dalje zadržava potrebnu čvrstoću, što je čini pogodnom za mnoge konstrukcijske primene. Ovaj materijal se lako seče, buši i obrađuje, što omogućava fleksibilnost u dizajnu i konstrukciji.

Šperploča se koristi u raznim industrijskim granama, ali je posebno popularna u građevinarstvu, zbog svojih karakteristika koje je čine pogodnom za konstrukcijske i dekorativne aplikacije. Zbog svoje čvrstoće i stabilnosti, koristi se u konstrukciji podova, krovova, zidova i plafona. Često je sastavni deo montažnih objekata, jer se može brzo postaviti i ima dobru nosivost. Takođe, koristi se u izradi oplata za beton, kao i u izgradnji privremenih objekata. U montažnoj gradnji, šperploča je često odabrana zbog svoje sposobnosti da se koristi za izradu panela i drugih delova konstrukcije koji se brzo sklapaju na licu mesta.

Šperploča je čest materijal u proizvodnji nameštaja, poput stolova, ormara, polica, vrata i drugih unutrašnjih elemenata. Njena glatka površina i stabilnost omogućavaju kvalitetnu obradu i završne detalje, što je čini pogodnom za izradu dekorativnih predmeta. U unutrašnjoj gradnji, šperploča se koristi za oblaganje zidova, plafona, kao i za izradu vrata i prozorskih okvira. Zbog svoje sposobnosti da se lako oblaže laminatima ili drugim materijalima, koristi se i u estetske svrhe, kao što su oblaganje i dekoracija enterijera. Šperploča se često koristi u proizvodnji kutija za pakovanje, paleta i drugih transportnih materijala. Njen balans između čvrstoće i niske težine čini je idealnom za izradu čvrstih pakovanja koja moraju izdržati teške uslove transporta.

Prednosti:

- Zahvaljujući načinu slaganja slojeva, šperploča je vrlo čvrsta i otporna na savijanje, što je čini idealnom za konstrukcijske primene.
- Šperploča se ne širi i ne skuplja pod uticajem vlage, što je čini pogodnom za upotrebu u vlažnim uslovima (npr. u kupatilima, kuhinjama, spoljašnjim prostorima).
- Može se koristiti za širok spektar primena, od strukturalnih do dekorativnih, laka je za obradu.

Nedostaci:

- Iako ima visoku otpornost na vlagu, prekomerna vlaga može uzrokovati da se slojevi odvoje ili deformišu. Za upotrebu u vlažnim uslovima potrebno je koristiti specijalizovane vrste šperploče (npr. šperploča otporna na vlagu).
- Lepkovi koji se koriste u proizvodnji šperploče mogu sadržati hemikalije koje su štetne po zdravlje i životnu sredinu. Moderne tehnologije nastoje minimizirati korišćenje toksičnih lepkova.
- Iako je šperploča čvrsta, može biti osetljivija na udarce u poređenju sa čvrstim drvetom, pa nije pogodna za primene gde je potrebna otpornost na izuzetno visoko udarno opterećenje.

Lamelirane ploče (Laminated Veneer Lumber - LVL) su kompoziti na bazi drveta dobijeni slepljivanjem furnira pri čemu se furniri slažu paralelno, odnosno vlakna svakog furnira su paralelna dužini LVL-a. Ovaj materijal koristi se za izradu nosivih elemenata, kao što su drveni nosači, grede, stubovi i drugi konstruktivni delovi, jer se ponaša poput čvrstog drveta, ali ima bolju dimenzionalnu stabilnost. Kvantitativno iskorišćenje drveta je vrlo visoko. U literaturi se navodi podatak da se iz 1 m³ oblovine može dobiti tri puta više LVL građe nego standardne rezane građe istih karakteristika. Objašnjenje je u činjenici da se za proizvodnju LVL-a koriste trupci lošijeg kvaliteta i kod furnira za LVL se tolerišu veće greške nego kod drugih materijala, pa je time iskorišćenje veće. Jedna od najvećih prednosti LVL-a je fleksibilnost dimenzija. Izrađuje se u debljinama od 19 do 90 mm (što odgovara debljinama rezane građe), dok je dužina praktično ograničena samo dužinom prese ili transportom, a iznosi i do 25 m. Za proizvodnju LVL-a u svetu se koriste, uglavnom, furniri četinarara najčešće debljine 3,2 mm. Kod nas se furnir za LVL izrađuje od trupaca topole lošijeg kvaliteta.

3. STANDARDI, PROPISI I NORMATIVI U DRVENIM KONSTRUKCIJAMA

3.1. Struktura evrokodova

Evrokodovi predstavljaju skup normativnih dokumenata koji omogućavaju projektovanje građevinskih i infrastrukturnih objekata prema jedinstvenim tehničkim standardima na nivou Evropske unije, uz primenu različitih konstruktivnih materijala. Ovi dokumenti su hijerarhijski strukturirani, pri čemu osnovni dokument predstavlja EN 1990 – Evrokod 0: Osnove projektovanja konstrukcija, koji definiše osnovna načela i zahteve za pouzdanost konstrukcija. Sledeći dokument u hijerarhiji je EN 1991 – Evrokod 1: Delovanja na konstrukcije, koji se sastoji od deset delova i propisuje vrste i veličine opterećenja koja deluju na konstrukcije. Ovi osnovni dokumenti dopunjeni su nizom posebnih Evrokodova koji definišu metode proračuna i projektovanja za specifične konstruktivne materijale, kao što su drvo, čelik, armirani i prednapregnuti beton itd.

Evrokod koji se odnosi na projektovanje drvenih konstrukcija jeste EN 1995 – Evrokod 5: Projektovanje drvenih konstrukcija, koji je podeljen na tri dela:

- EN 1995-1-1: Projektovanje drvenih konstrukcija – Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade
- EN 1995-1-2: Projektovanje drvenih konstrukcija – Deo 1-2: Opšte – Projektovanje konstrukcija na dejstvo požara
- EN 1995-2: Projektovanje drvenih konstrukcija – Deo 2: Mostovi

Standard EN 1995 obuhvata zahteve u pogledu nosivosti, upotrebljivosti, trajnosti i otpornosti na požar. Pitanja kao što su toplotna i zvučna izolacija regulišu se drugim tehničkim normama.

Standard EN 1995-1-1 primenjuje filozofiju projektovanja prema graničnim stanjima, gde su zahtevi za pouzdanost konstrukcije određeni u odnosu na granična stanja – stanja nakon kojih konstrukcija ili njen element više ne zadovoljava predviđene kriterijume upotrebljivosti ili sigurnosti. Ova metoda omogućava realističniju analizu ponašanja konstrukcije u celini i predstavlja pristup koji je usvojen u okviru Evrokod sistema za projektovanje.

U svakom Evrokodu, svaka stavka je definisana kao Princip ili Pravilo primene. Princip predstavlja zahtev ili normativnu izjavu koja mora biti u potpunosti ispoštovana, osim ako dokumentom nije eksplicitno dozvoljena alternativa. Pravilo primene je pravilo koje omogućava zadovoljenje datog Principa. Projektant može koristiti alternativna projektantska pravila, pod uslovom da se može dokazati da su u potpunosti usklađena sa Principima i da obezbeđuju projektantska rešenja ekvivalentna u pogledu upotrebljivosti, nosivosti (konstruktivne pouzdanosti) i trajnosti konstrukcije. Međutim, važno je napomenuti da se u takvim slučajevima ne može tvrditi da je projekat u potpunosti usklađen sa Evrokodovima (EC), što može predstavljati problem ukoliko je potrebna EC oznaka za dati projekat ili za dokazivanje usaglašenosti nekog proizvoda.

U tekstu Evrokoda, stavke koje imaju oznaku broja u zagradi praćenog slovom “P” predstavljaju Princip, dok stavke koje imaju samo broj u zagradi bez slova “P” predstavljaju Pravila primene.

U slučajevima kada se smatra da je potrebno omogućiti nacionalni izbor za određena projektantska pravila ili vrednosti funkcija u Evrokodu, ti elementi se definišu kao Nacionalno određeni parametri (NDPs). Ove vrednosti i pravila objavljuju se u Nacionalnom prilogu (National Annex). Nacionalni prilog takođe može sadržati i tzv. nedvosmislene dopunske informacije (NCCI – Non-Contradictory Complementary Information), koje daju dodatna pojašnjenja i smernice za tumačenje i primenu pravila iz Evrokoda. Ako ove informacije nisu uključene u Nacionalni prilog, treba ih objaviti kao zaseban dokument.

Za primenu Evrokodova u Srbiji, ovi standardi se objavljuju preko Instituta za standardizaciju Srbije (ISS), sa dodatkom oznake “SRPS” ispred referentne oznake Evrokoda. Kada se Evrokod primenjuje na nacionalnom nivou, celokupnom tekstu Evrokoda prethodi odgovarajući Nacionalni prilog (NA). Pri projektovanju u skladu sa Evrokod pravilima, moraju se koristiti NDP vrednosti navedene u NA, umesto odgovarajućih opštih vrednosti datih u samom Evrokodu.

Skraćenice koje se odnose na Evrokodove, a koje će se koristiti u narednim poglavljima, date su u Tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Skraćenice za Evrokodove

Naziv standarda	Skraćenica
SRPS EN 1990: Evrokod — Osnove projektovanja konstrukcija [14]	EC0
SRPS EN 1991-1-1: Evrokod 1 — Dejstva na konstrukcije — Deo 1-1: Opšta dejstva — Zapreminske težine, sopstvena težina, korisna opterećenja za zgrade [15]	EC1
SRPS EN 1995-1-1: Evrokod 5 — Projektovanje drvenih konstrukcija — Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade [16]	EC5

3.2. Evrokod 0: Osnove projektovanja konstrukcija (EC0)

Evrokod 0 (EC0) definiše okvir u kojem se mora vršiti projektovanje konstrukcija i zasniva se na metodi projektovanja prema graničnim stanjima. U ovom poglavlju razmatra se definisana metodologija, kao i njena konkretna primena na projektovanje konstrukcija od drveta i proizvoda na bazi drveta, oslanjajući se na sadržaj Evrokoda 5 (EC5) kako bi se prikazalo na koji način su zahtevi interpretirani i implementirani.

Termini i definicije (EC0, 1.5)

Neki termini i definicije koji se koriste u EC0 nešto se razlikuju u odnosu na terminologiju koja se uobičajeno koristi u praksi projektovanja drvenih konstrukcija, pa se u nastavku navode najvažniji izrazi, uključujući i one koji su značajni za projektante koji nisu u potpunosti upoznati sa metodom projektovanja prema graničnim stanjima:

Dejstvo (F) [Action (F)]

- a) skup sila opterećenja koje deluju na konstrukciju (direktno dejstvo);
- b) skup prinudnih deformacija ili ubrzanja prouzrokovanih, na primer promenama temperature, varijacijom vlage, nejednakim sleganjem ili zemljotresima (indirektno dejstvo).

Uticaj od dejstva (E) [Effect of action (E)]

Uticaj od dejstava na konstrukcijske elemente (npr. unutrašnja sila, momenat, napon, dilatacija) ili na konstrukciju u celini (npr. ugib, rotacija).

Stalno dejstvo (G) [Permanent action (G)]

Dejstvo koje najverovatnije deluje tokom čitavog datog referentnog perioda i za koje je varijacija intenziteta tokom vremena zanemarljiva, ili za koje je varijacija uvek u istom smeru – monotona, dok dejstvo ne dostigne izvesnu graničnu vrednost.

Promenljivo dejstvo (Q) [Variable action (Q)]

Dejstvo, za koje varijacija intenziteta tokom vremena nije ni zanemarljiva niti monotona.

Granična stanja (Limit states)

Stanja posle kojih konstrukcija više ne ispunjava relevantne proračunske kriterijume.

Granična stanja nosivosti (Ultimate limit states)

Stanja koja se odnose na rušenje ili druge slične oblike loma konstrukcije. Oni po pravilu odgovaraju najvećoj nosivosti konstrukcije ili konstrukcijskog elementa.

Granična stanja upotrebljivosti (Serviceability limit states)

Stanja koja odgovaraju uslovima čijim prekoračenjem više nisu ispunjeni utvrđeni eksploatacioni zahtevi za konstrukciju ili konstrukcijski element.

Nepovratna granična stanja upotrebljivosti (Irreversible serviceability limit states)

Granična stanja upotrebljivosti posle kojih, pri prekoračenju utvrđenih eksploatacionih zahteva, ostaju neke posledice dejstava i onda kada se dejstva uklone.

Povratna granična stanja upotrebljivosti (Reversible serviceability limit states)

Granična stanja upotrebljivosti posle kojih, pri prekoračenju utvrđenih eksploatacionih zahteva ne ostaju posledice dejstava onda kada se dejstva uklone.

Kriterijum upotrebljivosti (Serviceability criterion)

Proračunski kriterijum za granično stanje upotrebljivosti.

Nosivost (Resistance)

Sposobnost elementa ili komponente ili, pak, poprečnog preseka elementa ili komponente konstrukcije da prihvati dejstva bez mehaničkog loma, npr. nosivost pri savijanju, nosivost pri izvijanju, nosivost pri zatezanju.

Čvrstoća (Strength)

Mehaničko svojstvo materijala koje ukazuje na njegovu sposobnost da prihvati dejstva, uobičajeno izražena u jedinicama napona.

Pouzdanost (Reliability)

Sposobnost konstrukcije ili konstrukcijskog elementa da ispuni utvrđene zahteve, uključujući proračunski eksploatacioni vek za koji su proračunati. Pouzdanost je, uobičajeno, izražena terminima verovatnoće. Pouzdanost obuhvata sigurnost, upotrebljivost i trajnost konstrukcije.

Osnovni zahtevi (EC0, 2.1)

Osnovni principi koje svaka konstrukcija mora da zadovolji definisani su u Evrokodu 0 (EC0), odeljak 2.1, i mogu se sažeti na sledeći način:

- Tokom predviđenog veka trajanja, konstrukcija mora izdržati sva moguća dejstva i ostati upotrebljiva za svoju namenu.
- Mora imati dovoljnu nosivost, upotrebljivost i trajnost.
- Mora u potpunosti ispunjavati zahteve otpornosti na požar.
- Mora biti projektovana tako da nije podložna nesrazmernim oštećenjima u odnosu na početni uzrok.

Projektantska ispravnost konstrukcije u pogledu nosivosti, upotrebljivosti i trajnosti postiže se primenom Evrokoda 5 (EC5), dok se otpornost na požar obezbeđuje projektovanjem u skladu sa zahtevima iz standarda SRPS EN 1995-1-2:2012 [17].

Robusnost konstrukcije postiže se sledećim merama:

- Minimizacija opasnosti kojima konstrukcija može biti izložena,
- Odabir konstruktivnog sistema koji je najmanje osetljiv na predviđene vrste opasnosti,
- Projektovanje konstrukcije tako da može podneti lokalizovana oštećenja, uključujući uklanjanje pojedinačnih elemenata ili manjih delova konstrukcije,
- Izbegavanje konstruktivnih sistema koji mogu doživeti naglo i neočekivano rušenje,
- Obezbeđivanje veza (veza za vezivanje) između pojedinačnih konstruktivnih elemenata.

Opšta stručna uputstva o pristupima za ispunjavanje zahteva u pogledu robusnosti data su u dokumentu Designers' Guide to EN 1990 [18].

Upravljanje pouzdanošću (EC0, 2.2)

Projektovanje konstrukcije mora zadovoljiti kriterijume pouzdanosti, a konceptualni zahtevi koje treba ispuniti definisani su u Evrokodu 0 (EC0), odeljak 2.2.

Uvedene su klase prema posledicama (Consequence Classes – CC) koje se određuju na osnovu posledica loma konstrukcije u pogledu gubitka ljudskih života, kao i ekonomskih, društvenih i ekoloških posledica, Tabela 3.2. Kategorije su sledeće:

- CC1 – male posledice
- CC2 – srednje posledice
- CC3 – velike posledice

Za većinu objekata u kojima se koriste drvo ili proizvodi na bazi drveta za nosivu konstrukciju ili njene elemente, odgovarajuća klasa prema posledicama biće CC2.

Tabela 3.2. Definicija klasa prema posledicama [14]

Klasa prema posledicama	Opis	Primeri zgrada i inženjersko građevinskih objekata
CC3	Velike posledice za gubitak ljudskih života, ili vrlo velike ekonomske i socijalne posledice, ili posledice po sredinu	Tribine, javne zgrade kod kojih su posledice loma velike (na primer koncertna dvorana)
CC2	Srednje posledice za gubitak ljudskih života, značajne ekonomske i socijalne posledice, ili posledice po sredinu	Stambene i administrativne zgrade, javne zgrade kod kojih su posledice loma srednje (na primer administrativna zgrada)
CC1	Male posledice za gubitak ljudskih života, kao i male ili zanemarljive ekonomske i socijalne posledice, ili posledice po sredinu	Poljoprivredne zgrade u koje ljudi normalno ne ulaze (na primer zgrade za skladištenje), staklene bašte

*Tabela B1, EC0

Svaka klasa prema posledicama povezana je sa odgovarajućom klasom prema pouzdanosti (Reliability Class – RC):

- CC1 ↔ RC1
- CC2 ↔ RC2
- CC3 ↔ RC3

Svaka klasa prema pouzdanosti ima pridruženi indeks pouzdanosti β , koji se može smatrati sigurnosnim indeksom koji treba postići za datu klasu. Za objekte koji pripadaju klasi prema posledicama CC2, preporučene minimalne vrednosti indeksa pouzdanosti date su u Tabeli 3.3. Prema navodima iz EC0, konstrukcije projektovane u skladu sa zahtevima EC0, SRPS EN 1991 – Evrokod 1: Dejstva na konstrukcije, i EC5, u pravilu će imati indeks pouzdanosti veći od 3,8 za referentni period od 50 godina. Za takav referentni period verovatnoća otkaza konstrukcije pri graničnom stanju nosivosti (ULS) biće između 10^{-4} i 10^{-5} , a verovatnoća otkaza pri graničnom stanju upotrebljivosti (SLS) biće između 10^{-1} i 10^{-2} .

Tabela 3.3. Preporučene najmanje vrednosti za indeks pouzdanosti β [14]

Klasa prema pouzdanosti RC2	ULS	SLS (nepovratno)
Referentni period od 1 godine	4,7	2,9
Referentni period od 50 godina	3,8	1,5

*Tabele B2 i C2, EC0

Takođe je važno napomenuti da postizanje navedenog nivoa pouzdanosti zavisi od nivoa kontrole projektne dokumentacije, uključujući proveru crteža, proračuna i specifikacija. Za usklađenost sa klasom prema pouzdanosti RC2, minimalni zahtev jeste da provere budu vršene od strane različitih lica od onih koji su bili odgovorni za izradu projektne dokumentacije, i to u skladu sa sistemom upravljanja kvalitetom organizacije, Tabela 3.4 (EC0, Aneks B, Tabela B4).

Tabela 3.4. Nivoi revizije projekta DSL [14]

Nivoi revizije projekta	Karakteristike	Najmanji preporučeni zahtevi za kontrolu proračuna, crteža i specifikacija
DSL3 odgovara RC3	Proširena revizija	Kontrola trećeg lica: kontrolu sprovodi organizacija, različita od one koja je pripremila projekat
DSL2 odgovara RC2	Normalna revizija	Kontrolu sprovode lica različita od onih koja su originalno odgovorna, a u saglasnosti sa procedurama organizacije
DSL1 odgovara RC1	Normalna revizija	Samokontrola: kontrolu sprovodi lice koje je pripremio projekat

*Tabela B4, EC0

Proračunski eksploatacioni vek (EC0, 2.3)

Na početku projektovanja neophodno je definisati "proračunski eksploatacioni vek" objekta koji se projektuje. U skladu sa definicijom iz Evrokoda 0 (EC0), proračunski eksploatacioni vek predstavlja:

„pretpostavljeni period u kojem će se konstrukcija, ili njen deo, koristiti za predviđenu namenu, sa očekivanim održavanjem, ali bez potrebe za velikom popravkom.”

U standardu EC0, Tabela 2.1, navedeno je pet kategorija proračunskog eksploatacionog veka, a za objekte sa glavnom nosećom konstrukcijom od drveta projektovane prema zahtevima EC5, najčešće se primenjuje Kategorija 4, sa indikativnim proračunskim eksploatacionim vekom od 50 godina, Tabela 3.5. U slučajevima kada je to neophodno ili korisno, dozvoljeno je projektovati konstrukciju sa proračunskim eksploatacionim vekom kategorije 4, ali ugraditi pojedine konstruktivne elemente sa kraćim proračunskim eksploatacionim vekom, pod uslovom da se oni mogu lako zameniti bez negativnog uticaja na funkcionalnost objekta.

Treba naglasiti da proračunski eksploatacioni vek ne mora nužno da se poklapa sa referentnim periodom koji se koristi za određivanje projektnih vrednosti uticaja sredine (npr. brzina vetra, ekstremne temperature itd.), ali svakako predstavlja smernicu pri izboru tih vrednosti.

Ukoliko investitor obezbedi odgovarajući plan pregleda i redovnog održavanja, i te aktivnosti se izvršavaju u skladu sa zahtevima, objekat će ostati upotrebljiv tokom celokupnog proračunskog eksploatacionog veka. Kod drvenih konstrukcija, posebno je važno da plan održavanja obuhvata i kontrolu uslova sredine u kojoj konstrukcija funkcioniše, kako bi oni odgovarali servisnoj klasi za koju je konstrukcija projektovana.

Tabela 3.5. Indikativni proračunski eksploatacioni vek [14]

Kategorija proračunskog eksploatacionog veka	Indikativni proračunski eksploatacioni vek (godina)	Primeri
1	10	Privremene konstrukcije*
2	10 do 25	Zamenljivi delovi konstrukcije, na primer kranski nosači, ležišta
3	15 do 30	Poljoprivredne i slične konstrukcije
4	50	Konstrukcije zgrada i druge jednostavne konstrukcije
5	100	Konstrukcije monumentalnih zgrada, mostovi, kao i konstrukcije drugih građevinskih objekata
* Konstrukcije ili delovi konstrukcija koji mogu da se demontiraju sa izgledima da se ponovo koriste, ne treba da se razmatraju kao privremeni.		

*Tabela 2.1, EC0

Trajnost (EC0, 2.4)

Konstrukcija mora da se proračuna tako da njena degradacija posle isteka proračunskog eksploatacionog veka ne utiče na narušavanje performansi konstrukcije ispod očekivane mere, imajući odgovarajući uvid u njenu sredinu i predviđeni nivo održavanja.

Prema Evrokodu 0 (EC0), tačka 2.4(2), faktori koji su posebno značajni da bi se obezbedila dovoljno trajna drvena konstrukcija su sledeći:

- **Predviđena ili predvidljiva upotreba konstrukcije**
Na primer, kod podova od drveta ili drvenih proizvoda mora se predvideti habanje i oštećenja nastala korišćenjem tokom proračunskog eksploatacionog veka.
- **Zahtevani proračunski kriterijumi**
Projektna namena mora biti definisana na početku. Treba identifikovati elemente koji će zahtevati zamenu tokom radnog veka (ako je to slučaj) i obezbediti da se njihova zamena može izvesti bez ugrožavanja funkcionalnosti objekta.
- **Očekivani uslovi sredine**
Ovo je posebno važno kod drvenih konstrukcija. Mehaničke osobine drveta značajno zavise od promena u uslovima sredine (vlaga, temperatura itd.). Konstrukcija mora tokom proračunskog eksploatacionog veka funkcionisati u okviru servisne klase za koju je projektovana.

- **Sastav, svojstva i ponašanje materijala i proizvoda**
Preporučuje se korišćenje materijala koji povećavaju trajnost konstrukcije. U odgovarajućim slučajevima, hemijska zaštita (impregnacija) drvenih elemenata treba biti predviđena. Ako se trajnost oslanja na takve tretmane, projektom mora biti omogućena njihova obnova tokom radnog veka, bez ugrožavanja funkcije objekta.
- **Izbor konstrukcijskog sistema**
Gde god je moguće, treba koristiti robusne konstruktivne sisteme, otporne na poznate projektne rizike. Poželjno je, ako je ekonomski opravdano, da sistem poseduje ugrađenu rezervnu nosivost iznad minimuma definisanog zahtevima za robustnost.
- **Kvalitet izrade i nivo kontrole**
Izrada i montaža konstrukcije moraju biti u potpunosti u skladu sa tehničkom specifikacijom, jer odstupanja mogu ugroziti trajnost, npr. loša priprema i primena lepкова kod lepljenih elemenata.
- **Predviđeno održavanje, tokom proračunskog eksploatacionog veka**
Strategija održavanja mora biti definisana već u fazi projektovanja, a objekat projektovan tako da omogući pristup za sprovođenje planiranog održavanja tokom celog proračunskog eksploatacionog veka.

Upravljanje kvalitetom (EC0, 2.5)

Jedan od osnovnih zahteva Evrokoda 0 (EC0) jeste da bude uspostavljen sistem upravljanja kvalitetom, pri čemu će kao prihvatljiv biti smatran sistem koji je usklađen sa zahtevima međunarodnog standarda SRPS EN ISO 9001:2023 [19].

Mere upravljanja kvalitetom obuhvataju:

- definisanje zahteva pouzdanosti,
- organizacione mere i
- kontrole u fazama proračuna, izvođenja, eksploatacije i održavanja.

Ukoliko takav sistem nije primenjen, projekat neće moći da se smatra usklađenim sa zahtevima Evrokoda 5 (EC5).

Principi proračuna prema graničnim stanjima: Opšte (EC0, 3.1)

Koncept proračuna po graničnim stanjima zasniva se na tome da se za unapred definisana stanja, konstrukcija može klasifikovati kao zadovoljavajuća ili nezadovoljavajuća. Granično stanje predstavlja stanje nakon kojeg konstrukcija više ne ispunjava projektne kriterijume i samim tim se smatra neispravnom u smislu upotrebljivosti ili sigurnosti.

Moguće je definisati više različitih graničnih stanja u zavisnosti od karakteristika konstrukcije i zahteva projekta, ali radi pojednostavljenja procesa projektovanja, Evrokod 0 (EC0) definiše dve osnovne kategorije graničnih stanja:

- **Granično stanje nosivosti (ULS – Ultimate Limit States)**
Odnosi se na sigurnosne granice, tj. stanja koja dovode do sloma konstrukcije ili gubitka stabilnosti.

- **Granično stanje upotrebljivosti (SLS – Serviceability Limit States)**

Odnosi se na normalne uslove eksploatacije, kao što su ugibi, vibracije, pukotine i druge pojave koje utiču na funkcionalnost, udobnost ili estetski izgled objekta.

Kod ULS-a, akcenat je na krajnjoj sigurnosti konstrukcije, dok se kod SLS-a razmatra nivo komfora i estetskih zahteva. Kao što je prikazano u Tabeli 3.3. nivo pouzdanosti koji se koristi u procesu projektovanja razlikuje se za svako granično stanje, u skladu sa njegovom prirodom i posledicama potencijalnog loma.

Proračunske situacije (EC0, 3.2)

Konstrukcija mora biti projektovana uzimajući u obzir relevantne proračunske situacije. Relevantne proračunske situacije moraju da se odaberu tako da uzimaju u obzir okolnosti pod kojima se od konstrukcije zahteva da ispuni svoju namenu. U skladu sa tim, Evrokod 0 (EC0) definiše četiri proračunske situacije koje je potrebno razmotriti:

- **Stalne proračunske situacije:** odnose se na normalne uslove eksploatacije, uključujući sopstvenu težinu konstrukcije, upotrebljiva opterećenja, kao i opterećenja vetrom, snegom i sl.
- **Povremene proračunske situacije:** odnose se na privremene uslove, kao što su oni koji nastaju tokom izgradnje, montaže, popravki ili intervencija na objektu.
- **Incidentne proračunske situacije:** uključuju izuzetne uslove primenljive na konstrukciju ili njenu izloženost, npr. eksplozije, sudare, požare, ili druge nepredviđene ekstreme.
- **Seizmičke proračunske situacije:** odnose na uslove primenljive na konstrukciju onda kada je ona izložena seizmičkim događajima.

Odabrane proračunske situacije moraju da budu stroge i raznovrsne dovoljno da uključe sve uslove koji razumno mogu da se predvide da će nastati tokom izvođenja i eksploatacije konstrukcije.

Granična stanja nosivosti (EC0, 3.3)

Granična stanja nosivosti (ULS) odnose se na bezbednost ljudi i/ili stabilnost same konstrukcije. Po potrebi, u okviru ovih stanja može se uzeti u obzir i zaštita sadržaja koje konstrukcija nosi, ukoliko je taj zahtev unapred definisan i usaglašen sa projektantom.

Posebna pažnja mora se obratiti na sledeća granična stanja nosivosti, koja su relevantna za drvene konstrukcije i moraju biti razmatrana u fazi projektovanja:

- gubitak ravnoteže konstrukcije ili bilo kojeg njenog dela razmatranog kao kruto telo;
- lom usled prevelike deformacije, transformacije konstrukcije ili bilo kojeg njenog dela u mehanizam, kidanje, gubitak stabilnosti konstrukcije, ili bilo kojeg njenog dela, uključujući oslonce i temelje;
- lom usled zamora ili drugih uticaja zavisnih od vremena.

Granična stanja upotrebljivosti (EC0, 3.4)

Granična stanja upotrebljivosti (SLS) odnose se na funkcionalnost i izgled konstrukcije ili konstrukcijskih elemenata pri normalnoj eksploataciji, kao i na udobnost korisnika objekta. U kontekstu upotrebljivosti, pojam "izgled" povezan je sa kriterijumima, kao što su veliki ugib i pojava širokih prslina, pre nego sa estetskim. Granična stanja upotrebljivosti potrebno je definisati na početku projekta, uz jasno razgraničenje između nepovratnih i povratnih stanja.

Nepovratno stanje: kada je granično stanje trajno narušeno, čak i nakon što prestanu delovanja koja su ga uzrokovala. Takva stanja tretiraju se kao granična stanja nosivosti (ULS), tj. pri prvom prekoračenju, projektno rešenje nije usklađeno sa zahtevima.

Povratno stanje: kada se, nakon uklanjanja uzročnih delovanja, narušeno stanje vrati u dozvoljene granice. U ovim slučajevima može se uspostaviti dogovor sa investitorom o:

- prihvatljivim uslovima pod kojima se povratno stanje može javiti,
- učestalosti i trajanju takvih pojava.

EN 1990 (EC0) predviđa sledeće tri vrste graničnih stanja upotrebljivosti:

- (a) Nije dozvoljeno nikakvo prekoračenje,
- (b) Učestalost i trajanje prekoračenja su dogovoreni sa investitorom,
- (c) Dugotrajna prekoračenja su dogovorena sa investitorom.

Za svaku od ovih situacija koriste se različite kombinacije opterećenja:

- Bez dozvoljenog prekoračenja → koristi se karakteristična kombinacija opterećenja
- Učestalost/trajanje dogovoreni → koristi se česta kombinacija
- Dugotrajna stanja dogovorena → koristi se kvazistalna kombinacija

Ove kombinacije opterećenja definisane su u EC0, poglavlja 4.1.3 i 6.5, kao i u tački 2.2.25.

U skladu sa EC5, tačka 2.2.3(2), proračuni trenutne deformacije trebalo bi da se vrše primenom karakteristične kombinacije opterećenja. Međutim, budući da to nije definisano kao Princip u EC5, u slučajevima kada se može dokazati ekonomska opravdanost i postigne dogovor sa investitorom, projektovanje se može zasnivati na čestoj kombinaciji, pod uslovom da je stanje povratno.

Kriterijumi za verifikaciju SLS odnose se na sledeće aspekte:

- (i) Deformacije koje utiču na izgled objekta, izazivaju oštećenja završnih slojeva ili nenosivih elemenata, narušavaju udobnost korisnika ili ometaju funkcionalnost konstrukcije.
- (ii) Vibracije koje izazivaju nelagodnost korisnicima ili ograničavaju upotrebljivost objekta.
- (iii) Oštećenja koja negativno utiču na izgled, trajnost ili funkcionalnost konstrukcije.

Proračun prema graničnim stanjima (EC0, 3.5)

U projektovanju prema graničnim stanjima, za svako granično stanje postavljaju se odgovarajući modeli konstrukcije i opterećenja, a verifikacija se sprovodi tako što se dokazuje da ni jedno od tih stanja neće biti prekoračeno kada se u modelima koriste projektne vrednosti opterećenja, karakteristika materijala ili proizvoda, kao i geometrije konstrukcije.

Iako je verifikaciju moguće vršiti proračunom direktno baziranim na metodama teorije verovatnoće, kao praktična metoda projektovanja preporučuje se deterministički metod parcijalnih koeficijenata, u skladu sa odeljkom 6 standarda EN 1990 (EC0).

Klasifikacija dejstava (EC0, 4.1.1)

Sledeći simboli i terminologija koriste se prilikom razmatranja dejstava (opterećenja):

(a) Stalna dejstva (G)

Dejstva koja deluju kontinuirano tokom vremena i čije promene su zanemarljive, npr.:

- sopstvena težina konstrukcije,
- nepokretna oprema,
- fiksne pregradne zidove,
- završne obloge,
- indirektna dejstva usled sleganja i/ili skupljanja materijala.

(b) Promenljiva dejstva (Q)

Dejstva koja ne deluju stalno, već se menjaju u vremenu, npr.:

- korisna opterećenja (opterećenje od ljudi, nameštaja itd.),
- vetar,
- sneg,
- termička dejstva (temperaturne promene).

(c) Incidentna dejstva (A)

Izuzetne situacije koje mogu izazvati posebna opterećenja, npr.:

- eksplozija,
- udarni efekti (sudar, pad predmeta itd.).

Karakteristične vrednosti dejstava (EC0, 4.1.2)

Dejstva se u proračunu izražavaju preko tzv. "reprezentativnih" vrednosti, a osnovna reprezentativna vrednost koja se koristi u projektovanju jeste karakteristična vrednost F_k . Karakteristična vrednost treba, kada god je to moguće, da se zasniva na statističkim podacima koji opisuju to dejstvo i, u zavisnosti od uslova projektovanja, može biti:

- srednja vrednost,
- gornja ili donja granična vrednost,
- nazivna vrednost (kada statistički podaci nisu dostupni).

1. Stalna dejstva (G_k)

Kada se odnosi na sopstvenu težinu materijala, zbog male promenljivosti (koeficijent varijacije tokom radnog veka manji od 0,05–0,1), u slučaju drvenih i drvoprerađivačkih proizvoda, vrednost G_k najčešće se određuje na osnovu nazivnih dimenzija i srednje specifične mase.

Standardi koji se koriste za ovu svrhu uključuju:

- SRPS EN 338:2009 (mehaničke osobine drvene građe),
- ili odgovarajuće tabele u EC1 (Eurocode 1: Dejstva na konstrukciju).

2. Promenljiva dejstva (Q_k)

Karakteristične vrednosti promenljivih dejstava, kao što su korisna opterećenja, sneg, vetar i termička dejstva, date su u odgovarajućim delovima EC1.

Kada se radi o klimatskim dejstvima (npr. vetar, temperatura), prema EC0, karakteristična vrednost se određuje tako da postoji verovatnoća od 0,02 (ili 2%) da će njen vremenski promenljivi deo biti prekoračen tokom referentnog perioda od jedne godine. Ova verovatnoća prekoračenja (p) i referentni period (r) povezani su približnom relacijom

$$T \approx \frac{r}{p}$$

gde je T povratni period (verovatno vreme između dva sukcesivna događaja u kojima će karakteristična vrednost biti premašena).

Za $p = 0,02$ i $r = 1$ godina, dobijamo $T \approx 50$ godina, što znači da postoji verovatnoća od oko 64% da će karakteristična vrednost biti premašena tokom 50-godišnjeg perioda. Ovaj princip se takođe primenjuje i na korisna opterećenja podova u zgradama.

Takođe treba napomenuti da se za zgrade sa više etaža može primeniti smanjenje korisnog opterećenja, a smernice za to nalaze se u EC1.

3. Incidentna dejstva (A_d)

Zbog nedostatka statističkih podataka, vrednosti za slučajna dejstva (npr. eksplozija, udar) ne mogu se standardizovati, već se vrednost A_d mora posebno definisati i usaglasiti za svaki konkretan projekat.

Druge reprezentativne vrednosti promenljivih dejstava (EC0, 4.1.3)

Pored karakterističnih vrednosti promenljivih dejstava (Q_k), u projektovanju se koriste i sledeće dodatne reprezentativne vrednosti:

1. Vrednost za kombinacije ($\psi_0 Q_k$): koristi se za proveru graničnih stanja nosivosti (ULS) i za karakteristične kombinacije nepovratnih graničnih stanja upotrebljivosti (SLS).
2. Česta vrednost ($\psi_1 Q_k$): koristi se u proračunima ULS koji uključuju incidentna dejstva, i za proračunski dokaz povratnih graničnih stanja upotrebljivosti (SLS).
3. Kvazistalna vrednost ($\psi_2 Q_k$): koristi se za procenu dugotrajnih dejstava, za predstavljanje promenljivih dejstava u incidentnim i seizmičkim kombinacijama pri ULS, i za verifikaciju čestih i dugotrajnih efekata SLS.

Značenje redukcionih faktora ψ_0 , ψ_1 i ψ_2 :

Faktor ψ_0 : uzima u obzir smanjenu verovatnoću istovremene pojave nepovoljnih vrednosti više nezavisnih promenljivih dejstava.

Faktor ψ_1 : vremenski zavisna funkcija – postavlja gornju granicu za vrednost promenljivog dejstva koja se koristi pri proverama. Za zgrade je podešena tako da je verovatnoća prekoračenja 1% referentnog perioda.

Faktor ψ_2 : takođe vremenski zavisna funkcija. U projektovanju drvenih konstrukcija, ψ_2 je ključan za konverziju promenljivih dejstava u ekvivalentna stalna dejstva – kvazistalna opterećenja koja se koriste za proračun sleganja usled tečenja. Za korisno opterećenje podova, ψ_2 se definiše tako da je verovatnoća prekoračenja 50% referentnog perioda. Za dejstva vetra, temperature, kao i snega na visinama do 1000 m n.v., $\psi_2 = 0$ (ne uzimaju se u obzir za dugotrajno delovanje).

Vrednosti redukcionih faktora ψ_0 , ψ_1 i ψ date su u Tabeli NA.A1.1 iz SRPS Nacionalnog dodatka EC0, a relevantne vrednosti za uslove opterećenja kod drvenih konstrukcija date su u Tabeli 3.6.

Tabela 3.6. Preporučene vrednosti ψ koeficijenata za zgrade [14]

Dejstvo	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Korisna opterećenja u zgradama, prema kategoriji (videti EC1)			
Kategorija A: prostori za stanovanje i boravak	0,7	0,5	0,3
Kategorija B: poslovni prostori	0,7	0,5	0,3
Kategorija C: prostori za okupljanje ljudi	0,7	0,7	0,6
Kategorija H: krovovi	0	0	0
Opterećenja zgrade snegom (videti EN 1991-1-3) za lokacije na nadmorskoj visini $H \leq 1000$ m	0,5	0,2	0
Opterećenja zgrade vetrom (videti EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0

*Tabela NA.A1.1, EC0

Svojstva materijala i proizvoda (EC0, 4.2)

Kao i u slučaju delovanja, osobine materijala ili proizvoda takođe se izražavaju pomoću karakterističnih vrednosti. U projektovanju sa drvetom i proizvodima na bazi drveta, karakteristična vrednost može biti:

- vrednost sa fraktilom od 5 % – koristi se za osobine vezane za čvrstoću,
- srednja vrednost (prosečna) – koristi se za osobine vezane za krutost.

Izuzetak od ovog pravila javlja se kada se osobine vezane za krutost koriste u proračunu parametara koji se odnose na čvrstoću. Na primer, prilikom određivanja čvrstoće drvene grede na savijanje, koristi se vrednost sa fraktilom od 5 % krutosti umesto srednje vrednosti.

Karakteristične vrednosti svojstava monolitnog i lepljenog lameliranog drveta u projektovanju prikazane su u Poglavlju 2.

Proračun uticaja u konstrukciji (EC0, 5.1)

EC0 ne daje konkretne smernice u vezi sa metodama proračuna konstrukcije koje treba koristiti u fazi projektovanja, osim zahteva da proračunski modeli budu primereni analiziranom graničnom stanju, da mogu sa prihvatljivim stepenom tačnosti da predvide ponašanje konstrukcije i da budu zasnovani na priznatim inženjerskim teorijama i praksi.

Linearno elastična analiza

Zasniva se na linearnim zakonima napona i deformacije, odnosno moment–zakrivljenost:

(a) Teorija prvog reda – sprovodi se na početno definisanoj geometriji konstrukcije i njenih elemenata, Slika 3.1a.

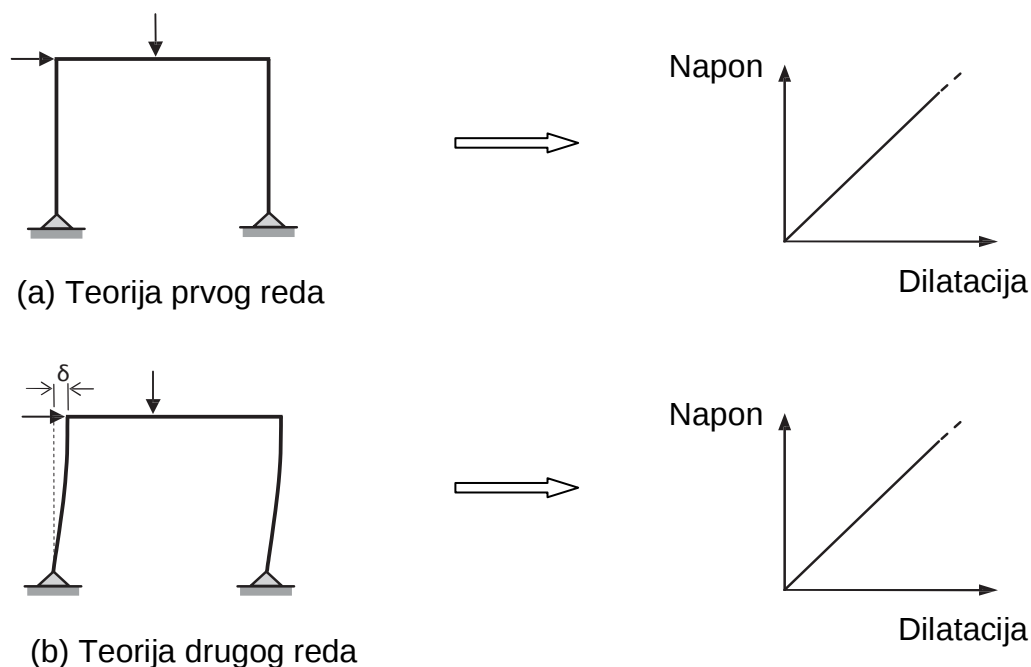
(b) Teorija drugog reda – izvodi se na deformisanoj geometriji konstrukcije, Slika 3.1b.

Nelinearna analiza

Zasniva se na nelinearnoj vezi napona i deformacije, kao što je prikazano na Slici 3.2:

(a) Teorija prvog reda – sprovodi se na početno definisanoj (neizmenjenoj) geometriji konstrukcije.

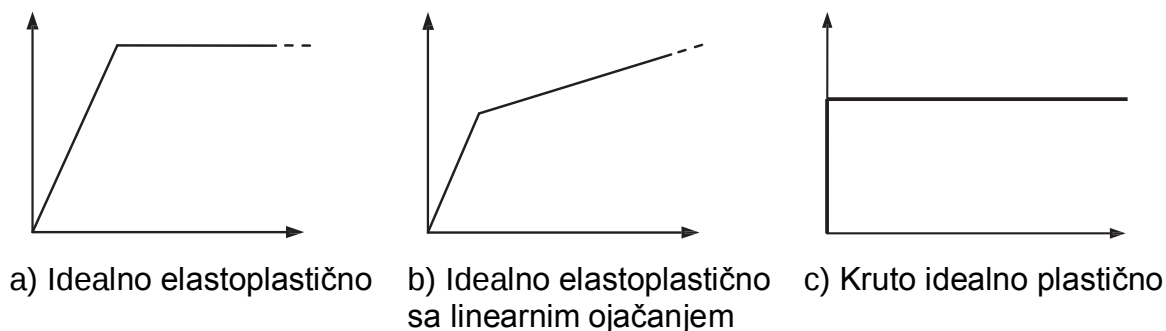
(b) Teorija drugog reda – sprovodi se na deformisanoj geometriji konstrukcije.



Slika 3.1. Linearno elastična teorija prvog i drugog reda

Sledeće karakteristike uobičajeno se vezuju za nelinearnu analizu koja uključuje plastično ponašanje:

- Idealno elastoplastično (Slika 3.2a) – ponašanje koje se sastoji iz početne linearno elastične faze, nakon koje sledi faza idealno plastičnog ponašanja bez ojačanja.
- Idealno elastoplastično sa linearnim ojačanjem (Slika 3.2b) – linearno elastično ponašanje nakon kojeg dolazi plastična faza sa ojačanjem (strain hardening).
- Kruto idealno plastično (Slika 3.2c) – čisto plastično ponašanje, koje se koristi pri analizi graničnih stanja odnosno za ocenu krajnjeg opterećenja (npr. za ponašanje spojeva izvedenih pomoću štapastih čeličnih spojnih sredstava u drvenim konstrukcijama).



Slika 3.2. Radni dijagrami u nelinearnoj analizi

Zahtevi za statičku analizu drvenih konstrukcija

Zahtevi za statičku analizu konstrukcija od drveta i materijala na bazi drveta definisani su u standardu EC5, Odeljak 5. Zbog krtog ponašanja drveta pri zateznim naprezanjima, plastična analiza se ne sme primenjivati, te EC5 zahteva da se unutrašnje sile u elementima konstrukcije određuju korišćenjem linearno elastične analize. Uticaji odstupanja od pravolinijskog oblika elemenata moraju biti uzeti u obzir, što se ostvaruje verifikacijom nosivosti elemenata prema pravilima projektovanja definisanim u EC5. Međutim, ukoliko se smatra da je neophodna analiza drugog reda prilikom projektovanja ravanskih ramova ili lukova, ona se mora izvesti u skladu sa zahtevima iz EC5, tačka 5.4.4.

Iako svi spojevi u drvenim konstrukcijama pokazuju polukrut karakter u određenoj meri, ukoliko rotaciona deformacija spojeva nema značajan uticaj na raspodelu sila u konstrukciji, EC5 dozvoljava da se takvi spojevi smatraju krutim. U suprotnom, mogu se smatrati rotaciono slobodnim (zglobnim) (EC5, 5.4.2(7)). Kako ovo nije princip (Principle) u EC5, ukoliko se proceni da bi polukruto ponašanje spojeva trebalo uzeti u obzir u analizi, i ako se ono može smatrati efektivno linearnim sa odgovarajućom duktilnošću, u model konstrukcije može se uključiti krutost spojeva i tako i dalje primeniti linearno-elastična analiza.

Kod spojeva izrađenih pomoću štapastih čeličnih spojnih sredstava, proračunske formule u EC5 zasnovane su na pretpostavci da će mehanizam loma u spoju odgovarati principima plastične teorije (vidi Sliku 3.2c). U tim slučajevima, unutrašnje sile u spojevima određuju se na osnovu elastične analize konstrukcije u stanju granične nosivosti (ULS), dok se otpornost spoja određuje primenom odgovarajućih proračunskih formula iz EC5, koje su primarno zasnovane na pretpostavci kruto idealno plastičnog ponašanja.

Ovo predstavlja jednu od očiglednih razlika između modela koji se koristi za određivanje delovanja (globalna analiza) i modela koji se koristi za proveru nosivosti, kada se može primeniti drugačiji pristup modeliranju.

Dokaz metodom parcijalnih koeficijenata: Opšte (EC0, 6.1)

Za uobičajene projektantske zahteve, proračun konstrukcije i njenih elemenata treba sprovoditi korišćenjem metoda parcijalnih faktora sigurnosti. U ovom metodu, dejstva se množe sa odgovarajućim parcijalnim faktorima kako bi se dobile proračunske vrednosti dejstava, E_d , dok se nosivosti (koje se uglavnom dobijaju iz čvrstoća materijala) dele parcijalnim faktorima kako bi se dobila proračunska nosivost, R_d , u stanju granične nosivosti (ULS) i graničnog stanja upotrebljivosti (SLS).

Verifikacija konstrukcije se vrši u odgovarajućem graničnom stanju, pri čemu mora biti zadovoljen sledeći uslov:

$$E_{d_{ULS}} \leq R_{d_{ULS}} \quad \text{i} \quad E_{d_{SLS}} \leq R_{d_{SLS}}$$

Vrednosti koje se koriste za dejstva i osobine materijala predstavljaju karakteristične ili druge reprezentativne vrednosti, dok vrednosti parcijalnih faktora zavise od graničnog stanja koje se razmatra. Te vrednosti moraju biti takve da se obezbedi nivo pouzdanosti koji je definisan u tački 2.2 EC0 za konstrukciju u tom graničnom stanju.

Proračunske vrednosti dejstava (EC0, 6.3.1)

Proračunska vrednost F_d , dejstva F , u opštem obliku, može da se izrazi kao:

$$F_d = \gamma_f F_{rep}$$

sa

$$F_{rep} = \psi F_k$$

gde je:

F_k karakteristična vrednost dejstva;

F_{rep} relevantna reprezentativna vrednost dejstva;

γ_f parcijalni koeficijent za dejstvo, kojim se uzima u obzir mogućnost nepovoljnih odstupanja vrednosti dejstava od reprezentativnih vrednosti;

ψ koeficijent, bilo da je jednak 1, ili, pak, ψ_0 , ψ_1 , ili ψ_2 .

Proračunske vrednosti za seizmička dejstva A_{Ed} treba da se odrede uzimajući u obzir ponašanje konstrukcije i druge relevantne kriterijume koji su razrađeni u EN 1998.

Proračunske vrednosti uticaja od dejstava (EC0, 6.3.2)

Na osnovu EC0, tačka 6.3.2(1), proračunske vrednosti uticaja od dejstava može se izraziti opštom formulom:

$$E_d = \gamma_{S_d} E\{\gamma_{f,i} F_{rep,i}; a_d\} \quad i \geq 1$$

gde je:

- a_d proračunske vrednosti geometrijskih podataka (videti EC0, 6.3.4);
- γ_{S_d} parcijalni koeficijent, kojim se uzima u obzir nepouzdanost:
 - u modeliranju uticaja od dejstava;
 - u modeliranju dejstava, u izvesnim slučajevima.

Za projektovanje konstrukcija od drveta i proizvoda na bazi drveta prema EC5, parcijalni faktori $\gamma_{f,i}$ i γ_{S_d} se kombinuju u jedinstveni faktor γ_F , čime se izraz pojednostavljuje:

$$E_d = E\{\gamma_F F_{rep,i}; a_d\} \quad i \geq 1$$

U okviru Evrokodova, pri određivanju proračunske vrednosti stalnog dejstva koristi se oznaka γ_G , dok se za promenljivo dejstvo koristi oznaka γ_Q . Vrednosti γ_G i γ_Q zavise od razmatranog graničnog stanja i ove vrednosti su definisane u narednim potpoglavljima.

Proračunske vrednosti svojstava materijala ili proizvoda (EC0, 6.3.3)

Proračunska vrednost svojstva materijala ili proizvoda (X_d) može se odrediti za granično stanje nosivosti (ULS) i granično stanje upotrebljivosti (SLS), s tim što se u projektovanju drvenih konstrukcija pojam X_d gotovo uvek odnosi na vrednost korišćenu za ULS. Ova vrednost dobija se po izrazu preuzetom iz EC0, jednačina 6.3:

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m}$$

gde su:

- X_k karakteristična vrednost svojstva materijala ili proizvoda (npr. čvrstoće ili krutosti);
- η srednja vrednost koeficijenta konverzije, kojim se uzimaju u obzir: uticaji zapremine i razmere, uticaji vlage i temperature i bilo koji drugi relevantni parametri;
- γ_m parcijalni koeficijent svojstva materijala ili proizvoda, kojim se uzimaju u obzir: mogućnost nepovoljnog odstupanja svojstva materijala ili proizvoda od njegove karakteristične vrednosti i slučajni deo koeficijenta konverzije η .

U okviru EC5, faktor η obuhvata uticaje trajanja opterećenja i promene sadržaja vlage na svojstva drveta i proizvoda na bazi drveta, i poznat je pod nazivom modifikacioni faktor, k_{mod} . Faktori koji pokrivaju efekte veličine i zapremine razmatraju se zasebno u EC5 i opisani su u narednim potpoglavljima.

Klase trajanja opterećenja

Klase trajanja opterećenja karakteriše uticaj konstantnog delovanja opterećenja za određeni vremenski period eksploatacionog veka konstrukcije. Odgovarajuće klase promenljivih dejstava moraju se odrediti na osnovu procene tipične promene opterećenja u vremenu. Radi uspostavljanja jedinstvene osnove za proračun, u standardu EC5, tačka 2.3.1.2, definisane su klase trajanja opterećenja, koje obuhvataju vremenske intervale opterećenja koji se najčešće javljaju u praksi.

Trajanje opterećenja povezano sa svakom klasom dato je u Tabeli 3.7, u skladu sa sadržajem NA.2.1 iz Nacionalnog dodatka SRPS za EC5. Sopstvena težina konstrukcije razmatra se kao stalno opterećenje. Promenljiva opterećenja (npr. korisno, sneg, vetar) razvrstavaju se u jednu od preostalih klasa u zavisnosti od vremenskog trajanja delovanja.

Tabela 3.7. Klase trajanja opterećenja [16]

Klase trajanja opterećenja	Stepen akumulativnog trajanja karakterističnog opterećenja	Primeri opterećenja
Stalno	više od 10 godina	sopstvena težina
Dugotrajno	6 meseci – 10 godina	korisno opterećenje skladišta
Srednje trajno	1 nedelja – 6 meseci	korisno opterećenje međuspratne konstrukcije, sneg
Kratkotrajno	manje od jedne nedelje	sneg, vetar
Trenutno		vetar, incidentna opterećenja

*Tabela 2.1 i 2.2, EC5

Eksploatacione klase

Pošto su mehanička svojstva drveta i proizvoda na bazi drveta zavisna od sadržaja vlage u materijalu, ova svojstva direktno zavise od temperaturnih i relativnih vlažnosti okruženja kojem su materijali izloženi tokom projektovanog veka trajanja konstrukcije. Radi uvažavanja ovog uticaja u proračunu, u standardu EC5, tačka 2.3.1.3, definisane su tri eksploatacione klase, koje pokrivaju tipične uslove sredine u kojima konstrukcije od drveta funkcionišu:

- Eksploataciona klasa 1 je okarakterisana sadržajem vlage unutar materijala koji odgovara temperaturi od 20 °C i relativnoj vlažnosti okolnog vazduha koja je samo nekoliko nedelja godišnje veća od 65 %.
- Eksploataciona klasa 2 je okarakterisana sadržajem vlage unutar materijala koji odgovara temperaturi od 20 °C i relativnoj vlažnosti okolnog vazduha koja je samo nekoliko nedelja godišnje veća od 85 %.
- Eksploataciona klasa 3 je okarakterisana klimatskim uslovima koji dovode do veće vlažnosti nego za eksploatacionu klasu 2.

Najveće vrednosti čvrstoće drveta postižu se u uslovima eksploatacione klase 1, dok su najniže vrednosti prisutne u uslovima eksploatacione klase 3. Uputstva za izbor odgovarajuće klase upotrebe za različite vrste elemenata u okviru teritorije Srbije data su u NA.2.2 u SRPS Nacionalnom dodatku (NA) za EC5.

Vrednosti faktora k_{mod} , koji zavise od klase trajanja opterećenja i od eksploatacione klase, date su u Tabeli 3.1 EC5, a pregled vrednosti za drvo i proizvode na bazi drveta dat je u Tabeli 3.8.

Tabela 3.8. Vrednosti k_{mod} [16]

Materijal	Standard	Eksploataciona klasa	Klase trajanja opterećenja				
			Stalno	Dugo-trajno	Srednje-trajno	Kratko-trajno	Trenutno
Monolitno drvo	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Lepljeno lamelirano drvo	EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Lamelirano furnirsko drvo (LVL)	EN 14374 EN 14279	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Špreploča	EN 636 Tip EN 636-1 Tip EN 636-2 Tip EN 636-3	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
OSB	EN 300 OSB/2 OSB/3, OSB/4 OSB/3, OSB/4	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
		1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
		2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Iverica	EN 312 Tip R4 i R5 Tip R5 Tip R6 i R7 Tip R7	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
		2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
		1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
		2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Vlaknatica, MDF	EN 622-5 MDF.LA MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
		2	/	/	/	0,45	0,80

*Tabela 3.1, EC5

Za drvo koje je ugrađeno sa vlažnošću bliskoj tački zasićenja vlakana i koje se suši pod opterećenjem, vrednosti za k_{mod} date u Tabeli 3.8, treba uvećati za 1,0.

Za monolitne drvene elemente, lepljeno lamelirano drvo i lamelirano furnirsko drvo (LVL), određene karakteristične čvrstoće su zavisne od dimenzija poprečnog preseka elementa, i kada je dimenzija manja od referentne vrednosti definisane u EC5, dozvoljeno je povećanje karakteristične čvrstoće množenjem sa koeficijentom k_h i/ili k_l . Ovi faktori prikazani su u Tabeli 3.9.

Tabela 3.9. Funkcija faktora veličine i dužine elementa u skladu sa EC5

Koeficijent	Funkcija faktora	Karakteristična osobina na koju se odnosi	Relevantna odredba u EC5
k_h	Koriguje karakterističnu čvrstoću na savijanje i/ili karakterističnu čvrstoću na zatezanje paralelno sa vlaknima uzimajući u obzir uticaj dimenzije preseka elementa kada je ona manja od referentne dimenzije definisane u EC5.	$f_{m,k}$	- Monolitno drvo: 3.2(3) - Lamelirano drvo: 3.3(3) - LVL: 3.4(3)
		$f_{t,0,k}$	- Monolitno drvo: 3.2(3) - Lamelirano drvo: 3.3(3)
k_l	Koriguje karakterističnu čvrstoću na zatezanje paralelno sa vlaknima kod LVL-a uzimajući u obzir uticaj dužine elementa kada je ona manja od referentne dužine definisane u EC5.	$f_{t,0,k}$	- LVL: 3.4(4)

U EC5, parcijalni koeficijent sigurnosti za svojstva materijala γ_m je proširen u γ_M , koji obuhvata: nepouzdanost modela nosivosti, negativne uticaje geometrijskih odstupanja, i nepovoljna odstupanja pretpostavljenih svojstava materijala ili proizvoda. Vrednosti γ_M za granična stanja nosivosti (ULS) u kombinacijama dejstava za stalne ili povremene proračunske situacije (osnovne kombinacije prema EC0, 6.4.3.2), kao i za incidentne kombinacije, date su u Tabeli 2.3 EC5. Sažetak ovih vrednosti za određivanje proračunske vrednosti u ULS, uključujući i incidentne kombinacije, dat je u Tabeli 3.10.

U EC0 nije data smernica o načinu određivanja proračunske vrednosti svojstava vezanih za krutost, dok su vrednosti koje se koriste u analizama deformacija i nosivosti date u EC5. Kod konstrukcija od drveta i proizvoda na bazi drveta, vrednost krutosti zavisi od razmatranog graničnog stanja, tj. da li se radi o analizi ugiba pri graničnom stanju upotrebljivosti (SLS) ili o analizi napona pri graničnom stanju nosivosti (ULS), da li raspodela unutrašnjih sila unutar konstrukcije (ili elementa) zavisi od raspodele krutosti, kao i da li se primenjuje teorija prvog ili drugog reda linearno elastične analize.

Tabela 3.10. Preporučene vrednosti za parcijalne koeficijente sigurnosti γ_M [16]

Proračunska situacija	Preporučena vrednost
Osnovne kombinacije:	
Monolitno drvo	1,30
Lepljeno lamelirano drvo	1,25
LVL, šperploča, OSB	1,20
Iverice	1,30
Vlaknatice, teške	1,30
Vlaknatice, srednje teške	1,30
Vlaknatice, MDF	1,30
Vlaknatice, lake	1,30
Veze	1,30
Nazubljene metalne ploče	1,25
Incidentne kombinacije	1,00

*Tabela 2.3, EC5

U skladu sa EC5, tačkom 2.4.1(2)P, proračunske vrednosti svojstva krutosti, E_d ili G_d , dobijaju se iz odgovarajućih srednjih vrednosti svojstva na sledeći način:

$$E_d = \frac{E_{mean}}{\gamma_M} \quad \text{i} \quad G_d = \frac{G_{mean}}{\gamma_M}$$

gde je:

E_{mean} srednja vrednost modula elastičnosti za drvo ili proizvod na bazi drveta;

G_{mean} srednja vrednost modula smicanja za drvo ili proizvod na bazi drveta.

Međutim, jednačine važe isključivo u slučaju teorije prvog reda linearno elastične analize za trenutno opterećenje pri graničnom stanju upotrebljivosti (SLS), kada je $\gamma_M = 1$, ili kod linearno elastične analize primenom teorije drugog reda pri graničnom stanju nosivosti (ULS), pri čemu se vrednost γ_M uzima iz Tabele 3.10. Za druge situacije u projektovanju drvenih konstrukcija koriste se drugačije vrednosti proračunskih krutosti, koje su razmatrane u narednim poglavljima.

Kod spojeva, u uslovima trenutnog opterećenja pri SLS-u, proračunska krutost određuje se pomoću modula pomerljivosti veze K_{ser} , datog u EC5, Tabela 7.1, u zavisnosti od tipa spojnog sredstva. Za ULS, proračunska krutost spoja K_u je jednaka $K_u = 2/3 K_{ser}$, prema EC5, tačka 2.2.2(2),.

U uslovima loma, u proračunima otpornosti koristi se karakteristična vrednost modula elastičnosti $E_{0,05}$ i karakteristična vrednost modula smicanja $G_{0,05}$.

Faktori koji se primenjuju na proračunsku čvrstoću pri ULS

Nakon što se proračunska vrednost svojstva materijala ili proizvoda, X_d , odredi u skladu sa zahtevima EC0, dodatna korekcija dobijenih vrednosti može biti potrebna radi uzimanja u obzir drugih faktora koji mogu uticati na to svojstvo, kao što su efekti nestabilnosti, sistemske čvrstoće itd. Ovi uticaji uzimaju se u obzir primenom korekcionih koeficijenata.

Pregled najčešće korišćenih koeficijenata iz standarda EC5, njihove funkcije i svojstava na koje se primenjuju, dat je u Tabeli 3.11.

Proračunske vrednosti geometrijskih podataka (EC0, 6.3.4)

Proračunske vrednosti geometrijskih podataka predstavljaju dimenzije koje se koriste pri projektovanju konstrukcije i njenih elemenata, uključujući, kada je primenjivo, i maksimalna dozvoljena odstupanja od pravolinijskog oblika, u skladu sa Odeljkom 10 standarda SRPS EN 1995-1-1 (EC5). Proračunska vrednost dimenzije definiše se izrazom:

$$a_d = a_{nom}$$

gde je:

a_d proračunska vrednost geometrijskog podatka;

a_{nom} nominalna dimenzija koja se koristi u projektnoj dokumentaciji i tehničkim crtežima.

Za konstrukcije od drveta i materijala na bazi drveta, proračunske dimenzije mogu se uzimati kao nominalne vrednosti definisane u odgovarajućim standardima za proizvode ili preuzete iz projektnih dokumentacija.

Kada su uticaji odstupanja geometrijskih podataka (na primer netačnost u nanošenju opterećenja ili položaju oslonaca) značajni za pouzdanost konstrukcije (na primer usled uticaja drugog reda), onda proračunske vrednosti geometrijskih podataka moraju da se definišu sa:

$$a_d = a_{nom} \pm \Delta a$$

gde je Δa veličina kojom se uzima u obzir mogućnost nepovoljnih odstupanja od karakterističnih ili nazivnih vrednosti i/ili kumulativni uticaj istovremene pojave nekoliko geometrijskih odstupanja.

Proračunska nosivost (EC0, 6.3.5)

Kod projektovanja konstrukcija od drveta i materijala na bazi drveta, u skladu sa zahtevima standarda EC0, proračunska vrednost nosivosti izražava se prema EC5, tačka 2.4.3, na sledeći način:

$$R_d = k_{mod} \frac{R_k}{\gamma_M}$$

gde je:

R_k karakteristična vrednost nosivosti pri ULS;

γ_M parcijalni koeficijent sigurnosti za svojstva materijala pri ULS

k_{mod} korekциони koeficijent kojim se uzimaju u obzir uticaj trajanja opterećenja i vlažnosti.

Tabela 3.11. Faktori koji se primenjuju na proračunsku čvrstoću pri ULS

Koeficijent	Funkcija faktora	Karakteristična osobina na koju se odnosi	Relevantna odredba u EC5
k_m	Uzima u obzir redistribuciju napona kada je poprečni presek opterećen savijanjem oko obe ose (y–y i z–z) i kada su naponi izvan elastične granice. Takođe uključuje uticaj varijacije čvrstoće materijala po preseku elementa.	$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}}$	6.1.6(2)
k_{vol}	Koriguje proračunsku čvrstoću na zatezanje upravno na vlakna za lepljeno lamelirano drvo i LVL u zoni slemena (npr. kod dvostruko zakošenih, zakrivljenih ili povijenih greda), kada napregnuti volumen prelazi referentni.	$f_{t,90,d}$	3.3(5), 3.4(7), 6.4.3(6), 6.4.3(7)
k_{dis}	Dodatno prilagođava proračunsku čvrstoću na zatezanje upravno na vlakna za gore pomenute oblike greda, uzimajući u obzir raspodelu napona u slemenim zonama.	$f_{t,90,d}$	6.4.3(6), 6.4.3(7)
k_{crit}	Korekcija momenta savijanja oko jače ose (y–y) zbog bočne torzione nestabilnosti kod elemenata sa vitkošću većom od 0,75.	$f_{m,y,d}$	6.3.3(3)
k_{cy}, k_{cz}	Uzimaju u obzir efekat aksijalne pritisne nestabilnosti oko ose y–y (za k_{cy}) i z–z (za k_{cz}) ako je vitkost veća od 0,3.	$f_{c,0,d}$	6.3.2
$k_{c,90}$	Povećava čvrstoću na pritisak upravno na vlakna uvažavajući veću dozvoljenu deformaciju u uslovima loma.	$f_{c,90,d}$	6.1.5
k_V	Smanjuje čvrstoću na smicanje na zasečenom delu kod oslonca	$f_{V,d}$	6.5.2
k_{sys}	Povećava proračunsku čvrstoću kada je nekoliko ekvidistantnih elemenata, komponenata ili sklopova bočno povezano u jedan sistem koji omogućava preraspodelu opterećenja.	Sve proračunske čvrstoće	6.6

Granična stanja nosivosti (EC0, 6.4.1-6.4.5)

Sledeća granična stanja nosivosti, kao relevantna, moraju da se dokažu:

- a) Ravnoteža (EQU) – Potvrđuje se da konstrukcija ili njen deo nisu nestabilni;
- b) Nosivost (STR) – Potvrđuje se da konstrukcija i njeni elementi neće otkazati usled napona, lokalne ili ukupne nestabilnosti elemenata, niti u spojevima. Ukoliko pomeranja utiču na ponašanje konstrukcije, njihov uticaj mora se uzeti u obzir;
- c) Geotehničko stanje (GEO) – Potvrđuje se da temelji objekta obezbeđuju potrebnu nosivost i krutost konstrukciji;
- d) Zamaranje materijala (FAT) – Potvrđuje se da elementi konstrukcije neće otkazati usled zamora.

Za konstrukcije od drveta i proizvoda na bazi drveta, uobičajeno je da se granična stanja EQU, STR i GEO smatraju relevantnim. Stanja zamora (FAT), ukoliko su prisutna, obuhvaćena su zahtevima za nosivost (STR) u okviru standarda SRPS EN 1995-1-1 (EC5).

Kombinacije opterećenja primenjuju se za svako relevantno granično stanje nosivosti (ULS), a metod parcijalnih koeficijenata se koristi za verifikaciju da je proračunska vrednost uticaja od dejstava manja ili jednaka proračunskoj vrednosti nosivosti.

Kada se razmatra granično stanje statičke ravnoteže konstrukcije (EQU), onda mora da se dokaže da je:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stb}$$

gde je:

$E_{d,dst}$ proračunska vrednost uticaja od destabilizujućih dejstava;

$E_{d,stb}$ proračunska vrednost uticaja od stabilizujućih dejstava.

Onda kada to odgovara, izraz za granično stanje statičke ravnoteže može da se dopuni dodatnim članovima, uključujući, na primer, koeficijent trenja između krutih tela.

Kada se razmatra granično stanje kidanja ili prevelike deformacije dela, elementa, ili veze konstrukcije (STR i/ili GEO), onda mora da se dokaže da je:

$$E_d \leq R_d$$

gde je:

E_d proračunska vrednost uticaja od dejstava, kao što su unutrašnja sila, moment ili vektor koji predstavlja nekoliko unutrašnjih sila ili momenata;

R_d proračunska vrednost odgovarajuće nosivosti.

Za svako relevantno granično stanje mora se odrediti proračunska vrednost uticaja od dejstava. U tu svrhu, dejstva za koja se smatra da mogu delovati istovremeno se kombinuju, a kada postoji više promenljivih dejstava, svaka kombinacija uključuje po jedno promenljivo dejstvo kao dominantno.

Kombinacije dejstava za stalne ili povremene proračunske situacije

Za dobijanje kombinacija dejstava u slučajevima stalnih ili povremenih proračunskih situacija (koje se u standardu EC0 nazivaju osnovne kombinacije), i uz izostavljanje dejstava od prethodnog naprezanja (jer se ona u principu ne primenjuju kod konstrukcija od drveta), koristi se sledeća osnovna kombinacija (EC0, jednačina (6.10)):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Alternativno, za potrebe provere graničnih stanja nosivosti (STR i GEO), moguće je razmatrati i manje povoljne (nepovoljnije) izraze (EC0, jednačina (6.10a) i (6.10b)):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

gde su:

- γ_G parcijalni koeficijent za stalna dejstva;
- γ_Q parcijalni koeficijent za promenljiva dejstva;
- ψ_0 koeficijent za vrednost promenljivog dejstva za kombinacije;
- ξ koeficijent redukcije, za nepovoljna stalna dejstva G ;
- G_k karakteristična vrednost stalnog dejstva;
- $Q_{k,1}$ dominantno promenljivo dejstvo;
- $Q_{k,i}$ prateća promenljiva dejstva.

Kombinacije dejstava za incidentne proračunske situacije

Za sva granične stanja u incidentnim proračunskim situacijama, primenjuje se sledeća kombinacija dejstava (EC0, jednačina (6.11b)):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + (\psi_{1,1} \text{ ili } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

gde je:

- A_d proračunska vrednost dejstva iz specifičnog incidentnog događaja (npr. udar, požar i sl.), ili predstavlja situaciju nakon incidentnog događaja (u tom slučaju $A_d = 0$);
- ψ_1 koeficijent za konverziju promenljivog dejstva u često dejstvo;
- ψ_2 koeficijent za konverziju promenljivog dejstva u kvazistalno dejstvo.

Numeričke vrednosti parcijalnog koeficijenta γ i koeficijenta redukcije ξ , koji se koriste za određivanje proračunskih vrednosti dejstava u skladu sa zahtevima za granična stanja ravnoteže (EQU) i granična stanja nosivosti (STR) bez uključivanja geotehničkih dejstava, u uslovima stalnih i povremenih proračunskih situacija, date su u EC0 Tabelama A1.2(A) do (C).

Vrednosti koje se primenjuju na sva granična stanja nosivosti (ULS) u slučaju incidentnih proračunskih situacija date su u EC0 u Tabeli A1.3.

Granična stanja upotrebljivosti (EC0, 6.5)

Granična stanja upotrebljivosti za zgrade treba da uzmu u obzir kriterijume koji se odnose, na primer na krutost poda, različite nivoe poda, horizontalno pomeranje sprata ili/i horizontalno pomeranje zgrade i krutost krova. Kriterijumi krutosti mogu da se izraze preko uslova ograničenja vertikalnih ugiba i vibracija. Kriterijumi bočnih krutosti mogu da se izraze preko uslova ograničenja horizontalnih pomeranja.

Kod drvenih konstrukcija neophodno je izvršiti proveru sledećih graničnih stanja upotrebljivosti (SLS):

- Vibracije
- Deformacije

Za ova stanja mora se dokazati ispunjenost sledeće nejednakosti (EC0, jednačina (6.13)):

$$E_d \leq C_d$$

gde je:

C_d granična proračunska vrednost relevantnog kriterijuma upotrebljivosti;

E_d proračunska vrednost uticaja od dejstava koja je utvrđena u kriterijumu upotrebljivosti, a određena na osnovu relevantne kombinacije.

Za potrebe SLS provere, parcijalni koeficijenti γ_G (za stalna dejstva) i γ_Q (za promenljiva dejstva) uzimaju se jednaki 1,0, a posebni uslovi opterećenja koji se primenjuju u ovim proračunskim stanjima dati su u nastavku poglavlja.

Vibracije

Da bi se ostvarilo zadovoljavajuće ponašanje u pogledu vibracija zgrada i njihovih konstrukcijskih elemenata prema uslovima upotrebljivosti, pored ostalih treba da se razmotre sledeći aspekti:

- a) udobnost korisnika;
- b) funkcionisanje konstrukcije ili njenih konstrukcijskih elemenata (na primer prsline u pregradama, oštećenje obloge, osetljivost sadržaja zgrade na vibracije).

Ostali aspekti treba da se razmotre za svaki projekat pojedinačno i dogovore sa investitorom.

Kriterijumi za vibracije prema standardu SRPS EN 1995 (EC5) ograničeni su na ponašanje međuspratnih konstrukcija u stambenim objektima. Proračunski uslovi opterećenja koji se koriste za dobijanje proračunske vrednosti uticaja od dejstava u graničnom stanju upotrebljivosti (SLS) su sledeći:

(a) Masa međuspratne konstrukcije po jedinici površine: koristi se za određivanje osnovne frekvencije međuspratne konstrukcije.

(b) Delovanje vertikalne sile od 1 kN: postavlja se u tački međuspratne konstrukcije gde se očekuje najveći vertikalni ugib, radi određivanja maksimalnog trenutnog vertikalnog ugiba usled dejstva sile hoda (koraka).

(c) Delovanje impulsa od 1 Ns: nanosi se na tačku međuspratne konstrukcije koja daje maksimalni vibracioni odgovor, radi određivanja maksimalne početne vrednosti brzine vertikalnih vibracija međuspratne konstrukcije, kao posledice udarne sile pete (heel impact).

Deformacije

Kombinacije dejstava za granična stanja upotrebljivosti, date su u standardu SRPS EN 1990 (EC0) pod sledećim nazivima:

- Karakteristična kombinacija
- Česta kombinacija
- Kvazistalna kombinacija

Koristeći oznake definisane u prethodnom potpoglavlju, kombinacije se određuju na sledeći način (u ovim izrazima je usvojeno da su svi parcijalni koeficijenti jednaki 1):

(a) Karakteristična kombinacija (EC0, jednačina (6.14b)):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Ova kombinacija se koristi za nepovratna stanja granične upotrebljivosti, tj. stanja kod kojih se narušavanje upotrebljivosti ne povlači čak ni nakon uklanjanja uzročnog dejstva. Ovo je kombinacija koja se koristi u SRPS EN 1995-1-1 (EC5), tačka 2.2.3.

(b) Česta kombinacija (EC0, jednačina (6.15b)):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Koristi se za povratna stanja granična stanja upotrebljivosti, tj. stanja kod kojih prestanak dejstva vodi ka povratku u dozvoljene granice. Iako nije eksplicitno navedena u EC5, ova kombinacija se može koristiti ukoliko postoji dogovor sa investitorom o konkretnim situacijama i učestalosti njihovog javljanja.

(c) Kvazistalna kombinacija (EC0, jednačina (6.16b)):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Kvazistalna kombinacija normalno se koristi za dugotrajna dejstva i izgled konstrukcije.

Da bi se dobila maksimalna vrednost proračunskog opterećenja, karakteristična kombinacija se sračunava sa svakim promenljivim dejstvom kao dominantnim.

Ako je prihvaćeno da kriterijum ugiba spada u povratna stanja, koristi se česta kombinacija. Proračunska deformacija (E_d) predstavlja trenutni ugib, koji uključuje i elastičnu deformaciju i pomeranja u vezama.

Deformacija usled tečenja računa se pomoću kvazipermanentne kombinacije, pod pretpostavkom da svi elementi imaju isti vremenski zavisni odziv i da postoji linearna zavisnost između dejstava i ugiba. Konačna deformacija dobija se kao zbir trenutne i deformacije usled tečenja.

3.3. Evrokod 5: Projektovanje drvenih konstrukcija — Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade (EC5)

U ovom poglavlju razmatrana su pitanja u vezi sa sadržajem standarda SRPS EN 1995-1-1 (EC5) koja nisu obrađena u prethodnom poglavlju, a za koja se smatra da zahtevaju dodatno pojašnjenje.

Opšte (EC5, 1.5)

Tradicionalno u Srbiji, osa z–z se koristi za označavanje podužne ose elementa, dok ose x–x i y–y predstavljaju glavnu i sporednu osu poprečnog preseka. U okviru sistema Eurokodova, podužna osa elementa označava se kao x–x, dok su y–y i z–z glavna i sporedna osa poprečnog preseka. Ova konvencija prikazana je na Slici 3.3. i primenjena je u ovom udžbeniku. Takođe, gde je potrebno prikazati pravac vlakana drveta, on je definisan simbolom prikazanim na Slici 3.3.



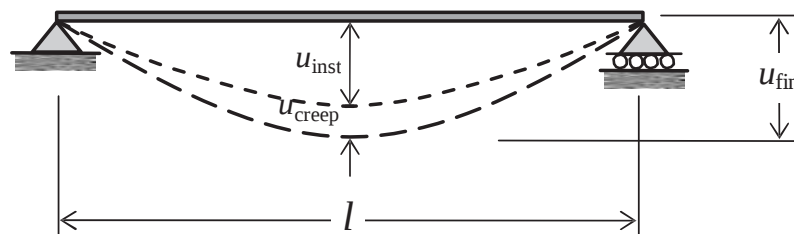
Slika 3.3. Glavne ose u okviru sistema Eurokodova

Granična stanja upotrebljivosti (EC5, 2.2.3)

Deformacije konstrukcije, nastale usled uticaja dejstava na konstrukciju (kao što su normalne i transversalne sile, momenti savijanja i pomerljivost veza) i usled uticaja vlažnosti, moraju da ostanu unutar odgovarajućih granica, kojima se uzimaju u obzir mogućnost oštećenja obloga, plafona, međuspratnih konstrukcija, pregradnih zidova i završne obrade, funkcionalne potrebe, kao i zahtevi spoljašnjeg izgleda. U standardu EC5, deformacija elementa ili konstrukcije se mora razmatrati u dve faze:

- Trenutna deformacija (u_{inst}) – deformacija koja nastaje odmah nakon primene dejstava i treba je izračunati za karakterističnu kombinaciju dejstava, videti EN 1990, tačka 6.5.3(2) a), korišćenjem srednje vrednosti odgovarajućeg modula elastičnosti, modula smicanja i modula pomerljivosti.
- Konačna deformacija (u_{fin}) – deformacija koja nastaje nakon svih vremenski zavisnih pomeranja, tj. uključujući tečenje i treba je izračunati za kvazistalnu kombinaciju dejstava, videti EN 1990, tačka 6.5.3(2) c).

Ove deformacije prikazane su na Slici 3.4. za slučaj proste grede bez prethodnog nadvišenja.



Slika 3.4. Komponente ugiba

Proračun deformacija vrši se na dva različita načina, u zavisnosti od ponašanja konstrukcije u pogledu tečenja:

(a) *Konstrukcije čiji elementi, komponente i veze imaju isto ponašanje pri tečenju*

Ponašanje drveta i proizvoda na bazi drveta u pogledu tečenja zavisi od više faktora, a radi pojednostavljenja proračuna, u EC5 usvaja se pretpostavka da je za stalno dejstvo tokom veka trajanja objekta trenutna deformacija (u_{inst}) i deformacija usled tečenja (u_{creep}) u sledećem odnosu:

$$u_{creep} = k_{def} u_{inst}$$

gde je:

k_{def} koeficijent deformacije, čija vrednost zavisi od tipa materijala i sadržaja vlage.

Vrednosti k_{def} eksperimentalno su određene za drvo i materijale na bazi drveta pri definisanim uslovima okoline (eksploatacione klase 1, 2 i 3) i date su u Tabeli 3.2 standarda EC5, a za pregled date su i u Tabeli 3.12. ovog udžbenika.

Tabela 3.12. Vrednosti k_{def} za drvo i materijale na bazi drveta

Materijal	Standard	Eksploataciona klasa		
		1	2	3
Monolitno drvo	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Lepljeno lamelirano drvo	EN 14080	0,60	0,80	2,00
Lamelirano furnirsko drvo (LVL)	EN 14374, EN 14279	0,60	0,80	2,00
Šperploča	EN 636			
	Tip EN 636-1	0,80	/	/
	Tip EN 636-2	0,80	1,00	/
	Tip EN 636-3	0,80	1,00	2,50
OSB	EN 300			
	OSB/2	2,25	/	/
	OSB/3, OSB/4	1,50	2,25	/
Iverica	EN 312			
	Tip R4	2,25	/	/
	Tip R5	2,25	3,00	/
	Tip R6	1,50	/	/
	Tip R7	1,50	2,25	/
Vlaknatica, teška	EN 622-2			
	HB.LA	2,25	/	/
	HB.HLA1, HB.HLA2	2,25	3,00	/
Vlaknatica, srednje teška	EN 622-3			
	MBH.LA1, MBH.LA2	3,00	/	/
	MBH.HLS1, MBH.HLS2	3,00	4,00	/
Vlaknatica, MDF	EN 622-5			
	MDF.LA	2,25	/	/
	MDF.HLS	2,25	3,00	/

Za konstrukcije i elemente koji ispunjavaju navedene uslove, konačna deformacija (u_{fin}) izražava se kao:

$$u_{fin} = u_{inst} + u_{creep} = u_{inst}(1 + k_{def})$$

Kada dejstvo nije stalno, radi uzimanja u obzir efekta tečenja, ono se mora preračunati u ekvivalentno stalno dejstvo. Ovo se postiže korišćenjem kvazistalne vrednosti dejstva.

U skladu sa 3.4(2)P standarda EC0, koji predstavlja princip, pravi se razlika između povratnih graničnih stanja upotrebljivosti (SLS) i nepovratnih graničnih stanja upotrebljivosti. U slučajevima kada je prihvatljivo za investitora (klijenta) da se usvoji povratno SLS stanje, radi ekonomičnijeg projektovanja preporučuje se upotreba česte kombinacije opterećenja, umesto karakteristične kombinacije za proračun pomeranja.

Pod pretpostavkom da važe nepovratna granična stanja upotrebljivosti (SLS), konačna deformacija konstrukcijskog elementa ili veze pod stalnim i promenljivim dejstvom izračunava se na sledeći način:

- Za stalno dejstvo (G) na elementu ili vezi:

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} + u_{creep,G} = u_{inst,G}(1 + k_{def}) \quad (\text{EC5, jednačina (2.3)})$$

- Za dominantno promenljivo dejstvo (Q_1) na elementu ili vezi:

$$u_{fin,Q,1} = u_{inst,Q,1} + u_{creep,Q,1} = u_{inst,Q,1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) \quad (\text{EC5, jednačina (2.4)})$$

- Za ostala promenljiva dejstva (Q_i) na elementu ili vezi:

$$u_{fin,Q,i} = u_{inst,Q,i} + u_{creep,Q,i} = u_{inst,Q,i}(\psi_{0,i} + \psi_{2,i}k_{def}) \quad (\text{EC5, jednačina (2.5)})$$

- Konačna deformacija pri delovanju n promenljivih dejstava:

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q,1} + \sum_{i=2}^n u_{fin,Q,i} \quad (\text{na osnovu EC5, jednačine (2.2)})$$

Vrednosti ψ faktora preuzimaju se iz Tabele NA.A1.1 u SRPS Nacionalnom aneksu za EC0 (delimično reprodukovano u Tabeli 3.6). Ako postoji samo jedno promenljivo dejstvo, treća jednačina se ne primenjuje.

(b) Konstrukcije čiji elementi, komponente i veze imaju različito ponašanje pri tečenju

U ovakvim situacijama, ponašanje pri tečenju utiče na krutost i raspodelu napona, te linearna veza između trenutne i deformacije usled tečenja ne važi. Trenutna deformacija računa se na isti način kao i u slučaju kada elementi, komponente i veze imaju isto ponašanje pri tečenju. Deformacija usled tečenja dobija se primenom karakteristične kombinacije dejstava (kvazistalna kombinacija se ne koristi) i primenom umanjenih vrednosti krutosti elemenata konstrukcije. Umanjene vrednosti krutosti date su u narednom izlaganju.

Za konstrukcije ili elemente koji ispunjavaju ove uslove, konačna deformacija, u_{fin} , dobija se:

$$u_{fin} = u_{(inst+creep)}$$

gde je $u_{(inst+creep)}$ deformacija dobijena linearnom elastičnom analizom konstrukcije pri trenutnom dejstvu i na osnovu umanjenih krutosti.

U oba navedena slučaja ako se drvo ugrađuje pri ili blizu tačke zasićenja vlakana, a predviđeno je da tokom eksploatacije gubi vlagu pod opterećenjem, u skladu sa EC5, 3.2(4), vrednost k_{def} iz Tabele 3.12. uvećava se za 1,0.

Za veze, prema EC5 2.3.2.2, ako je spoj formiran od drvenih elemenata sa istim ponašanjem pri tečenju, vrednost k_{def} u analizi se uzima duplo veća od vrednosti iz Tabele 3.12.

Kada se povezuju dva drvena elementa koja imaju različito vremenski zavisno ponašanje, proračun konačne deformacije treba sprovesti sa sledećim korekcionim koeficijentom k_{def} :

$$k_{def} = 2 \sqrt{k_{def,1} k_{def,2}}$$

Primena faktora 2 za određivanje k_{def} kod veza može biti neodgovarajuća za određene uslove i dimenzije spoja, ali pošto SRPS Nacionalni aneks za EC5 ne daje dodatna uputstva, potrebno je pridržavati se zahteva standarda.

Uticiji trajanja opterećenja i vlažnosti na čvrstoću (EC5, 2.3.2.1)

Korekcionni koeficijenti kojima se uzima u obzir uticaj trajanja opterećenja i vlažnosti na čvrstoću određuju se iz Tabele 3.1 u EC5.

Kada se povezuju dva drvena elementa koja imaju različito vremenski zavisno ponašanje, proračun nosivosti treba sprovesti sa sledećim korekcionim koeficijentom k_{mod} :

$$k_{mod} = \sqrt{k_{mod,1} k_{mod,2}}$$

gde su $k_{mod,1}$ i $k_{mod,2}$ korekcionni koeficijenti drvenih elemenata, svakog posebno.

Uticiji trajanja opterećenja i vlažnosti na deformacije (EC5, 2.3.2.2)

Pri graničnom stanju upotrebljivosti (SLS), kako bi se dokazala usklađenost sa kriterijumima SLS za trenutne i konačne deformacije, potrebno je sprovesti analize pomeranja za oba stanja. Kada konstrukcija sadrži elemente, komponente ili veze sa različitim vremenski zavisnim ponašanjem, mora se uzeti u obzir uticaj tečenja na krutost:

(a) Analiza za trenutno stanje

Analiza se vrši korišćenjem proračunske kombinacije dejstava za SLS, zavisno od toga da li se primenjuje karakteristična ili česta kombinacija dejstava. Pošto ponašanje pri tečenju nije relevantno za ovo stanje, prema EC5, 2.2.3(2), koriste se srednje vrednosti modula elastičnosti, modula smicanja i modula pomerljivosti za određivanje krutosti.

(b) Analiza za konačno stanje deformacije (u_{fin})

Kada konstrukcija ima linearno elastično ponašanje i sastoji se od elemenata, komponenti i veza sa istim ponašanjem prilikom tečenja, proračunska kombinacija dejstava biće zbir dejstava korišćenih u analizi trenutnog stanja (a) i kvazi-permanentne kombinacije. U ovom slučaju, tečenje ne utiče na raspodelu napona, te se koriste iste krutosti kao u analizi trenutnog stanja.

(c) Konstrukcije sa različitim ponašanjem pri tečenju

Kod konstrukcija koje sadrže elemente sa različitim vremenski zavisnim ponašanjem, tečenje utiče na ponašanje deformacija. Za analizu konačne deformacije koristi se isto dejstvo kao u (a),

a efekat tečenja uzima se u obzir primenom smanjenih vrednosti krutosti elemenata konstrukcije. Prema EC5, 2.3.2.2(1), jednačine (2.7-2.9), smanjene vrednosti krutosti dobijaju se primenom konačnih srednjih vrednosti modula elastičnosti, modula smicanja i modula pomerljivosti, izračunatih po jednačinama:

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{(1 + k_{def})}$$

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1 + k_{def})}$$

$$K_{ser,fin} = \frac{K_{ser}}{(1 + k_{def})}$$

gde je:

- $E_{mean,fin}$ konačna srednja vrednost modula elastičnosti;
- E_{mean} srednja vrednost modula elastičnosti;
- $G_{mean,fin}$ konačna srednja vrednost modula smicanja;
- G_{mean} srednja vrednost modula smicanja;
- $K_{ser,fin}$ konačna vrednost modula pomerljivosti;
- K_{ser} modul pomerljivosti;
- k_{def} koeficijent za procenu deformacije usled tečenja, čime se uzima u obzir relevantna eksploataciona klasa.

Na osnovu ovoga, proračunske vrednosti krutosti u analizi biće:

$$E_{d,SLS} = \frac{E_{mean}}{(1 + k_{def})}, \quad G_{d,SLS} = \frac{G_{mean}}{(1 + k_{def})}, \quad K_{d,SLS} = \frac{K_{ser}}{(1 + k_{def})}$$

gde su:

- $E_{d,SLS}$ proračunska vrednost konačne srednje vrednosti modula elastičnosti pri SLS;
- $G_{d,SLS}$ proračunska vrednost konačne srednje vrednosti modula smicanja pri SLS;
- $K_{d,SLS}$ proračunska vrednost konačne vrednosti modula pomerljivosti pri SLS.

Pri graničnom stanju nosivosti (ULS), analize se sprovode radi provere nosivosti i stabilnosti konstrukcije, pri čemu se koristi ona najnepovoljnija kombinacija dejstava:

(a) Linearno-elastična teorija prvog reda (bez uticaja raspodele krutosti)

Kada se proračun vrši linearno-elastičnom analizom po teoriji prvog reda i raspodela krutosti unutar konstrukcije ne utiče na raspodelu unutrašnjih sila, prema EC5, 2.2.2(1)P, koriste se srednje vrednosti odgovarajućeg modula elastičnosti, modula smicanja i modula pomerljivosti za određivanje krutosti.

Ovo važi kada svi elementi imaju isto vremenski zavisno ponašanje, pa su relevantne vrednosti E_{mean} , G_{mean} i K_{ser} .

(b) Linearno-elastična teorija prvog reda (sa uticajem raspodele krutosti)

Kada raspodela krutosti utiče na raspodelu unutrašnjih sila (npr. konstrukcije sa elementima i vezama sa različitim vremenski zavisnim ponašanjem, ili spregnuti elementi od materijala sa različitim ponašanjem pri tečenju):

- Za trenutno stanje, koriste se iste krutosti kao u (a).
- Za konačno stanje, prema EC5, 2.2.2(1)P, krutosti se određuju primenom konačnih srednjih vrednosti modula elastičnosti, modula smicanja i modula pomerljivosti:

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{(1 + \psi_2 k_{def})}$$

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1 + \psi_2 k_{def})}$$

$$K_{ser,fin} = \frac{K_{ser}}{(1 + \psi_2 k_{def})}$$

gde je ψ_2 faktor za kvazistalnu vrednost dejstva koje uzrokuje najveće naprezanje u odnosu na nosivost. Za stalno opterećenje koristi se vrednost 1. Ako je određivanje ψ_2 komplikovano, može se konzervativno usvojiti vrednost $\psi_2 = 1$.

(c) Linearno-elastična teorija drugog reda

Kada se proračun vrši linearno-elastičnom analizom po teoriji drugog reda prema EC5, 2.2.2(1)P, krutosti se određuju korišćenjem proračunskih vrednosti modula elastičnosti i modula smicanja, definisanih u EC5, 2.4.1(2)P, dok se za veze koristi K_u , prema EC5, 2.2.2(2).

Na osnovu gore navedenog, proračunske vrednosti krutosti u analizi su:

- Za slučaj (a):

$$E_{d,ULS} = E_{mean}, \quad G_{d,ULS} = G_{mean}, \quad K_{d,ULS} = K_{ser}$$

- Za slučaj (b) (konačno stanje):

$$E_{d,ULS} = \frac{E_{mean}}{(1 + \psi_2 k_{def})}, \quad G_{d,ULS} = \frac{G_{mean}}{(1 + \psi_2 k_{def})}, \quad K_{d,ULS} = \frac{K_{ser}}{(1 + \psi_2 k_{def})}$$

- Za slučaj (c):

$$E_{d,ULS} = \frac{E_{mean}}{\gamma_M}, \quad G_{d,ULS} = \frac{G_{mean}}{\gamma_M}, \quad K_{d,ULS} = K_u$$

gde su:

- $E_{d,ULS}$ proračunska vrednost konačne srednje vrednosti modula elastičnosti pri ULS;
- $G_{d,ULS}$ proračunska vrednost konačne srednje vrednosti modula smicanja pri ULS;
- $K_{d,ULS}$ proračunska vrednost konačne vrednosti modula pomeljivosti pri ULS.
- γ_M parcijalni koeficijent sigurnosti za svojstva materijala pri ULS

Veze između napona i deformacija (EC5, 3.1.2)

Iako je stvarna zavisnost napona i deformacije kod drveta i proizvoda na bazi drveta pri opterećenju do loma generalno nelinearna, karakteristične vrednosti konstruktivnog drveta i proizvoda na bazi drveta određuju se pod pretpostavkom linearne zavisnosti. Za elemente ili delove elemenata izložene pritisku, može se koristiti nelinearna (elastoplastična) veza.

Uticaj veličine i zapremine elementa na čvrstoću (EC5, 3.2, 3.3, 3.4 i 6.4.3)

Drvo nije homogeni materijal, i zbog prisustva grešaka, varijabilnosti čvrstoće po preseku i dužini elemenata, kao i zbog različitih konfiguracija dejstava, čvrstoća se razlikuje između i unutar pojedinačnih elemenata. Iako su sprovedena brojna istraživanja i teorijske analize uticaja dimenzija elementa, njegove dužine, zapremine, konfiguracije dejstava i raspodele naprezanja, još uvek ne postoji potpuna saglasnost o uticaju ovih faktora i načinu njihove primene u projektovanju. Posledica navedenog je da, za razliku od projektovanja konstrukcija od čelika i armiranog betona, kod drvenih konstrukcija, čak i kada se koristi drvo iste klase čvrstoće, uticaj grešaka može dovesti do toga da elementi različitih dimenzija imaju različite karakteristične čvrstoće.

Da bi se ovi efekti uzeli u obzir, karakteristične vrednosti mehaničkih svojstava koja su pod njihovim uticajem određuju se na osnovu referentnih dimenzija (za visinu, širinu i dužinu postoje referentne dimenzije iznad kojih se efekat može zanemariti). Karakteristična čvrstoća svojstva koja se koristi u proračunu dobija se množenjem karakteristične čvrstoće date u odgovarajućem SRPS standardu sa faktorom k , koji se određuje na osnovu dimenzija elementa i referentne dimenzije.

Relacije za uticaj veličine elementa i zapremine na čvrstoću koje su korišćene u EC5 za monolitno drvo, lamelirano drvo i LVL, kao i za efekte zapremine i raspodele napona u slemenoj zoni dvostruko zakošenih, zakrivljenih i lučno savijenih lameliranih i LVL nosača, sažeto su prikazane u Tabeli 3.13, zajedno sa pripadajućim referentnim kriterijumima.

Nosivost sistema (EC5, 6.6)

Kada je nekoliko ekvidistantnih elemenata, komponenata ili sklopova bočno povezano u jedan sistem, svojstva nosivosti elemenata mogu se uvećati koeficijentom nosivosti sistema k_{sys} . Faktor k_{sys} je relevantan samo kada sistem može da preraspodeli opterećenje. On koristi činjenicu da će krutiji elementi primiti veći deo primenjenog dejstva od slabijih, kao i da je verovatnoća mala da susedni elementi imaju identične karakteristike čvrstoće i krutosti.

Dokaz nosivosti sistema sa preraspodelom opterećenja treba da se sprovede pod pretpostavkom da su opterećenja kratkotrajna.

Tabela 3.13. Vrednosti za k_h , k_l , k_{vol} i k_{dis}

Materijal	Faktor	Definicija/uslovi	Karakteristična ili proračunska vrednost
Monolitno drvo	Za savijanje i zatezanje: $k_h = \min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2} \text{ ili } 1,3 \right\}$	Zapreminska masa $\leq 700 \text{ kg/m}^3$ (i) Savijanje: referentna visina 150 mm. (ii) Zatezanje: referentna maksimalna dimenzija poprečnog preseka 150 mm.	(i) Čvrstoća pri savijanju: $= k_h f_{m,k}$ (ii) Čvrstoća pri zatezanju paralelno sa vlaknima: $= k_h f_{t,0,k}$
Lepjeno lamelirano drvo (LLD)	Za savijanje i zatezanje i raspodelu napona: $k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1} \text{ ili } 1,1 \right\}$ $k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0,2}$ Za dvostrano zakošene i zakrivljene nosače: $k_{dis} = 1,4$ Za kolenaste nosače: $k_{dis} = 1,7$	Za određivnje k_h : (i) Savijanje: referentna visina 600 mm. (ii) Zatezanje: referentna maksimalna dimenzija poprečnog preseka 600 mm. Za određivnje k_{vol} : (i) Zatezanje: referentna zapremina $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$. Zapremina slemene zone V u m^3 je definisana u EC5, Slika 6.9, koja ne treba da bude veća od $2V_b/3$, gde je V_b ukupna zapremina nosača.	(i) Čvrstoća pri savijanju: $= k_h f_{m,k}$ (ii) Čvrstoća pri zatezanju paralelno sa vlaknima: $= k_h f_{t,0,k}$ (i) Čvrstoća pri zatezanju upravno na vlakna: $= k_{vol} k_{dis} f_{t,90,d}$
Lamelirano furnirsko drvo (LVL)	Za savijanje i zatezanje i raspodelu napona: $k_h = \min \left\{ \left(\frac{300}{h} \right)^s \text{ ili } 1,2 \right\}$ $k_l = \min \left\{ \left(\frac{3000}{l} \right)^{s/2} \text{ ili } 1,1 \right\}$ $k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0,2}$ Vrednosti za k_{dis} su iste kao za LLD.	Za određivnje k_h : (i) Eksponent uticaja veličine s mora se uzeti u skladu sa SRPS EN 14374. (ii) Savijanje: referentna visina 300 mm. Za određivnje k_l : (i) Zatezanje: referentna dužina 3000 mm, a eksponent uticaja veličine s se određuje isto kao i za k_h . Za određivnje k_{vol} : (i) Zatezanje: referentna zapremina $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$.	(i) Čvrstoća pri savijanju: $= k_h f_{m,k}$ (i) Čvrstoća pri zatezanju paralelno sa vlaknima: $= k_l f_{t,0,k}$ (i) Čvrstoća pri zatezanju upravno na vlakna: $= k_{vol} k_{dis} f_{t,90,d}$

U slučaju da je sistem sposoban da omogući prenošenje opterećenja sa jednog elementa na susedne elemente, koeficijent k_{sys} treba da se uzme kao 1,1. Ovo važi kada je sistem raspodele opterećenja sledećeg tipa:

(a) Konstruktivni pod sa podnim gredama gde je podna obloga kontinuirana preko najmanje dva raspona, a spojevi podne obloge su naizmenično raspoređeni što zahteva najmanje četiri grede.

(b) Stubna zidna konstrukcija povezana oplatom koja je fiksirana za stubove u skladu sa preporukama proizvođača ili zahtevima projektne dokumentacije. Najveći razmak stubova ne sme biti veći od 610 mm osno.

(c) Letve za crep, rožnjače ili daščana oplata povezane sa krovnim rešetkama, gde su elementi za raspodelu opterećenja kontinuirani preko najmanje dva raspona, pri čemu su spojevi naizmenično raspoređeni što zahteva najmanje četiri rešetke, a razmak rešetki ne sme biti veći od 1,2 m.

Za lamelirane drvene konstrukcijske ploče ili međuspratne konstrukcije treba da se koriste vrednosti koeficijenta k_{sys} date u EC5, slika 6.12.

4. PROJEKTOVANJE DRVENIH KONSTRUKCIJA

4.1. Proračun poprečnih preseka izloženih savijanju

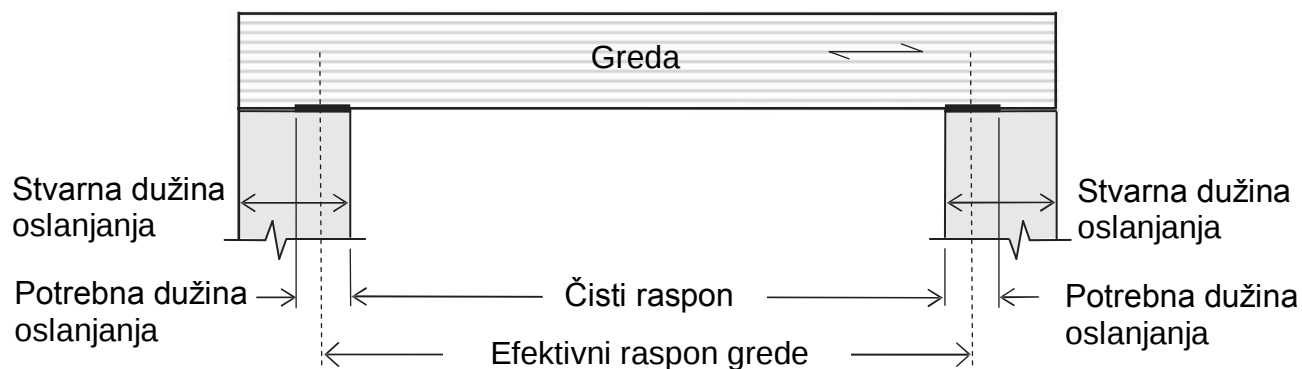
Elementi izloženi savijanju moraju zadovoljiti relevantna pravila projektovanja i zahteve prema Evrokodu 5 (EC5). Stanja ravnoteže i uslovi čvrstoće (tj. savijanje, smicanje i pritisak) odnose se na situacije loma i predstavljaju granična stanja nosivosti (ULS), dok se uslovi pomeranja i vibracija odnose na normalne situacije upotrebe i predstavljaju granična stanja upotrebljivosti (SLS). Međutim, ako se u projektu može pojaviti situacija u kojoj bi pomeranje konstrukcije moglo dovesti do njenog urušavanja, neophodno je izvršiti proveru graničnih stanja nosivosti za najveće proračunsko opterećenje nastalo primenom osnovne kombinacije dejstava.

Uopšteno posmatrano savijanje je najkritičniji kriterijum za grede srednjih raspona, ugib i vibracije su dominantni za grede velikih raspona, a smicanje je presudno za grede malih raspona izložene velikom opterećenju. U praksi, ipak, potrebno je izvršiti proračunske provere za sve uslove nosivosti i pomeranja.

Za uslove povezane sa nosivošću, proračunska vrednost svakog napona izračunava se i upoređuje sa proračunskom vrednošću odgovarajuće čvrstoće modifikovane po potrebi odgovarajućim koeficijentima, pri čemu, da bi se zadovoljili zahtevi pouzdanosti propisani standardom, kod metode parcijalnih koeficijenata mora biti ispunjen sledeći uslov:

$$\text{Proračunska vrednost napona} \leq (\text{Koeficijenti čvrstoće}) \times \text{Proračunska vrednost čvrstoće}$$

Prema EC5, napon pritiska na osloncima grede smatra se ravnomerno raspodeljenim po površini oslonca. Za jednostavno oslonjene grede, kada je površina oslonca znatno veća nego što je potrebno s aspekta čvrstoće, greda se projektuje tako da se oslanja na dovoljnu površinu oslonca kako proračunska čvrstoća na pritisak ne bi bila prekoračena. U takvim slučajevima, proračunska rasponska dužina, tj. efektivni raspon grede, biće jednaka čistom rasponu uvećanom za polovinu dužine oslonca na svakom kraju, kao što je prikazano na Slici 4.1.



Slika 4.1. Efektivni raspon grede

Granična stanja nosivosti (ULS)

Pri graničnom stanju nosivosti (ULS), poprečni presek grede proverava se u odnosu na uslove stanja loma, a postupci projektovanja za elemente od punog drveta ili proizvode na bazi drveta dati su u Odeljku 6 standarda EC5.

Savijanje (kada je relativna vitkost na savijanje oko glavne ose $\leq 0,75$)

Kada je element opterećen savijanjem u jednoj ravni oko svoje y–y ose (jake ose), a relativna vitkost na savijanje oko te ose je $\leq 0,75$, uslov projektovanja je da maksimalni napon savijanja u preseku ne sme biti veći od proračunske čvrstoće na savijanje drveta ili proizvoda na bazi drveta. Ovaj uslov zadovoljava se ako je ispunjena jednačina:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

Za element savijen oko svoje z–z ose (slabe ose), uslov projektovanja je isti, odnosno maksimalni napon savijanja u preseku ne sme biti veći od proračunske čvrstoće na savijanje materijala elementa. Za savijanje oko ove ose važi:

$$\frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Ako je element opterećen savijanjem oko obe ose, a relativna vitkost oko ose y–y je $\leq 0,75$, uslovi projektovanja su dati sledećim jednačinama:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

gde su:

$\sigma_{m,y,d}$ i $\sigma_{m,z,d}$ proračunske vrednosti napona savijanja oko glavnih osa inercije, Slika 3.3;
 $f_{m,y,d}$ i $f_{m,z,d}$ odgovarajuće proračunske vrednosti čvrstoće pri savijanju.

Koeficijentom k_m uzima se u obzir preraspodela napona i efekat nehomogenosti materijala u poprečnom preseku. Vrednost za koeficijent k_m treba da se uzme na sledeći način:

- Za monolitno drvo, lepljeno lamelirano drvo i LVL:
 - za pravougaoni poprečni presek: $k_m = 0,7$;
 - za ostale poprečne preseke: $k_m = 1,0$.
- Za ostale konstrukcijske proizvode na bazi drveta, za sve poprečne preseke: $k_m = 1,0$.

Savijanje (kada je relativna vitkost na savijanje oko glavne ose > 0,75)

Bočna torziona stabilnost grede mora da se proveriti u oba slučaja, gde postoji samo moment M_y oko jače y-ose i gde postoji kombinacija momenta M_y i sile pritiska N_c . Relativna vitkost za slučaj savijanja treba da se uzme kao:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}$$

gde je:

$\sigma_{m,crit}$ kritična vrednost napona savijanja, izračunata prema klasičnoj teoriji stabilnosti, koristeći petoprocentni fraktil za svojstva krutosti;

$f_{m,k}$ karakteristična vrednost čvrstoće pri savijanju.

Jednačina važi samo kada je kritični napon savijanja manji ili jednak granici elastičnosti materijala. Kada se ovaj limit premaši, potrebno je modifikovati odnos kako bi se uzelo u obzir elastoplastično ponašanje materijala i definisala minimalna vrednost relativne vitkosti, ispod koje bočno-torziono izvijanje neće nastati.

Kritičan napon savijanja treba da se uzme kao:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0.05} \cdot I_z \cdot G_{0.05} \cdot I_{tor}}}{l_{ef} \cdot W_y}$$

gde je:

$E_{0.05}$ karakteristična vrednost modula elastičnosti paralelno vlaknima (petoprocentni fraktil);

$G_{0.05}$ karakteristična vrednost modula smicanja paralelno vlaknima (petoprocentni fraktil);

I_z moment inercije preseka oko slabije z-ose;

I_{tor} torzioni moment inercije;

l_{ef} efektivna dužina grede, prema Tabeli 4.1;

W_y otporni moment preseka u odnosu na jaču y-osu.

Za monolitno meko drvo pravougaonog poprečnog preseka kritičan napon savijanja treba da se uzme kao:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0.78 \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} \cdot E_{0.05}$$

gde je:

b širina grede;

h visina grede.

Tabela 4.1. Odnos efektivne dužine i dužine nosača

Tip grede	Tip opterećenja	l_{ef}/l *
Prosta greda	Konstantan moment	1,0
	Jednako podeljeno opterećenje	0,9
	Koncentrisana sila u sredini raspona	0,8
Konzola	Jednako podeljeno opterećenje	0,5
	Koncentrisana sila na slobodnom kraju	0,8
* Dati odnos između efektivne dužine l_{ef} i dužine l važi za grede sa torziono krutim osloncima i opterećene u težištu. Ukoliko je opterećena pritisnuta ivica grede, l_{ef} bi trebalo uvećati za $2h$, odnosno, ukoliko je opterećena zategnuta ivica grede, smanjiti za $0,5h$.		

U slučaju gde postoji samo moment M_y oko "jače" y-ose, naponi treba da zadovolje sledeći uslov:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d}$$

gde je:

$\sigma_{m,d}$ proračunska vrednost napona savijanja;

$f_{m,d}$ proračunska vrednost čvrstoće pri savijanju;

k_{crit} koeficijent kojim se uzima u obzir redukcija čvrstoće pri savijanju usled bočnog izvijanja.

U slučajevima kada može doći do efekata bočne nestabilnosti kod grede, maksimalno dozvoljeno početno odstupanje od pravolinijskog oblika u sredini dužine grede, prema EC5 Odeljak 10, ograničeno je na:

- $l/300$ za puno drvo,
- $l/500$ za LVL i lamelirano drvo,

gde je l dužina grede u mm.

Za grede sa početnim bočnim odstupanjem od pravosti unutar ovih granica, k_{crit} može da se odredi prema sledećem izrazu:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{za } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{za } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ 1/\lambda_{rel,m}^2 & \text{za } \lambda_{rel,m} > 1,4 \end{cases}$$

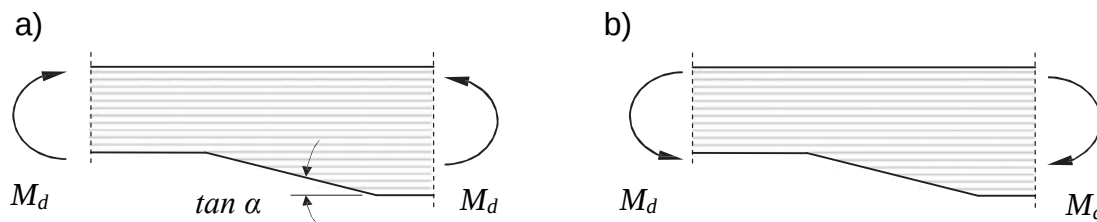
Za koeficijent k_{crit} može da se uzme vrednost 1,0 za grede kod kojih je sprečeno bočno pomeranje duž pritisnute ivice i sprečena torziona rotacija na osloncima.

Savijanje - zasečeni nosači

Efekat koncentracije napona na mestu nagle promene visine preseka mora da se uzme u obzir pri proverbi nosivosti elemenata.

Efekat koncentracije napona može da se zanemari u sledećim slučajevima:

- savijanja sa naponima zatezanja na zasečenom delu, ako nagib zasecanja nije veći od 1:10 odnosno $\tan \alpha \leq 0,1$ (videti Sliku 4.2a);
- savijanja sa naponima pritiska na zasečenom delu, videti Sliku 4.2b.



Slika 4.2. Savijanje na zasečenom delu: a) sa naponima zatezanja na zasečenom delu, b) sa naponima pritiska na zasečenom delu

Smicanje

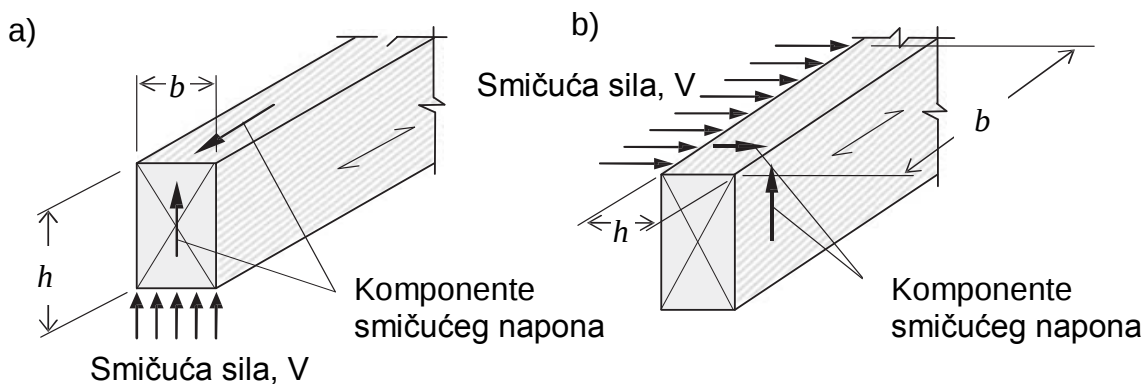
Kod elemenata koji su izloženi smicanju sa komponentom napona paralelno vlaknima (videti Sliku 4.3a), kao i smicanju sa obe komponente napona upravne na vlakna (videti Sliku 4.3b), mora da se zadovolji sledeći uslov:

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

gde je:

τ_d proračunska vrednost smičućeg napona;

$f_{v,d}$ odgovarajuća proračunska vrednost čvrstoće pri smicanju.



Slika 4.3. Komponente smičućeg napona: (a) Elementi sa komponentom smičućeg napona paralelno vlaknima (b) Elementi sa obe komponente smičućeg napona upravne na vlakna (rolling shear)

Čvrstoća pri smicanju upravno na vlakna približno je jednaka dvostrukoj čvrstoći pri zatezanju upravno na vlakna.

Za proveru smičuće otpornosti elemenata izloženih savijanju, treba uzeti u obzir uticaj pukotina, koristeći efektivnu širinu elementa kao:

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b$$

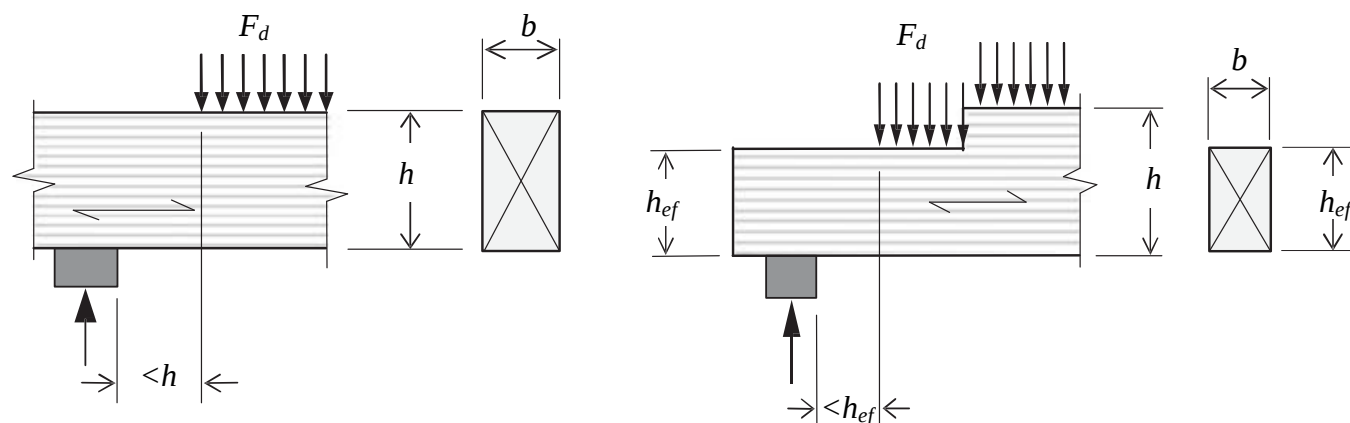
gde je b širina elementa u odgovarajućem preseku.

Preporučene vrednosti za k_{cr} su:

- $k_{cr} = 0,67$ za monolitno drvo;
- $k_{cr} = 0,67$ za lepljeno lamelirano drvo i
- $k_{cr} = 1,00$ za ostale proizvode na bazi drveta u skladu sa EN 13986 i EN 14374.

Informacije o nacionalnom izboru mogu se naći u nacionalnom prilogu.

Kod oslonca, doprinos ukupnoj transverzalnoj sili od strane koncentrisane sile F , koja deluje na gornjoj površini grede na rastojanju manjem od h ili h_{ef} od ivice oslonca, može da se zanemari (videti Sliku 4.4). Za nosače zasečene kod krajnjeg oslonca, ova redukcija transverzalne sile važi samo kad je zasecanje nosača na suprotnoj strani od oslonca.



Slika 4.4. Uslovi kod oslonca, kada se koncentrisana sila F može zanemariti pri izračunavanju transverzalne sile

Za nosače pravougaonog poprečnog preseka čija se vlakna u suštini pružaju u pravcu dužine elementa, smičući naponi na zasečenom delu kod oslonca treba da se izračunaju koristeći efektivnu (redukovanu) visinu h_{ef} .

Potrebno je pokazati da je:

$$\tau_d = \frac{1,5 \cdot V}{b \cdot h_{ef}} \leq k_v \cdot f_{v,d}$$

gde je k_v redukcionni koeficijent definisan prema sledećem:

- Za nosače zasečene sa suprotne strane od oslonca:

$$k_v = 1,0$$

- Za nosače zasečene sa iste strane gde je i oslonac (videti Sliku 4.5):

$$k_v = \min \left\{ \frac{1,0}{k_n \left(1 + \frac{1,1 \cdot i^{1,5}}{\sqrt{h}} \right)}, \frac{\sqrt{h} \left(\sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0,8 \frac{x}{h} \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)}{1,0} \right\}$$

gde je:

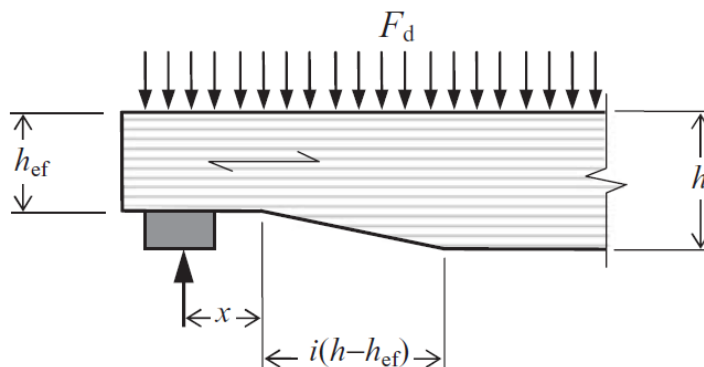
i nagib zasecanja (videti Sliku 4.5);

h visina nosača, u mm;

x rastojanje od ose oslonca do zasečenog dela, u mm.

$$\alpha = \frac{h_{ef}}{h}$$

$$k_n = \begin{cases} 4,5 & \text{za LVL} \\ 5 & \text{za monolitno drvo} \\ 6,5 & \text{za lepljeno lamelirano drvo} \end{cases}$$



Slika 4.5. Nosači zasečeni kod oslonca

Pritisak upravno na vlakna

Iako je drvo anizotropan materijal, kada se koristi u konstrukcijske svrhe, pretpostavlja se da je ortotropno. To znači da se smatra da ima različita mehanička svojstva u tri međusobno ortogonalne ose.

Ortogonalne ose su usklađene sa:

- pravcem vlakana (L),
- radijalnim pravcem (R) i
- tangencijalnim pravcem (T).

Svojstva drveta duž L ose nazivaju se svojstvima paralelnim sa vlaknima. Zbog strukture ćelija drveta, ova svojstva su znatno veća u pogledu čvrstoće i krutosti od odgovarajućih svojstava u R i T pravcima. Kada je drvo opterećeno u R ili T pravcu, njegova ćelijska struktura se opterećuje u svojim najslabijim pravcima. Iako vrednosti svojstava u R i T pravcu nisu iste, razlike su male, pa se za praktične potrebe projektovanja ova svojstva tretiraju kao jedna grupa. Svojstva u R i T pravcu nazivaju se svojstvima poprečno na vlakna.

Simboli korišćeni u EC5 za pritisnu čvrstoću paralelno i upravno na vlakna su:

$\sigma_{c,0,k}$ karakteristična čvrstoća na pritisak paralelno sa vlaknima;

$\sigma_{c,90,k}$ karakteristična čvrstoća na pritisak upravno na vlakna.

Podindeksi znače:

c (ili t) vrsta napona (c – pritisak; t – zatezanje);

0 (ili 90) pravac napona u odnosu na pravac vlakana (0 – paralelno; 90 – upravno);

k (ili d) vrsta napona (k – karakteristična čvrstoća; d – proračunska vrednost napona).

Kod elemenata koji su izloženi pritisku upravno na vlakna mora da se zadovolji sledeći uslov:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$$

sa

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}}$$

gde je:

$\sigma_{c,90,d}$ proračunska vrednost napona pritiska upravno na vlakna na efektivnoj kontaktnoj površini;

$F_{c,90,d}$ proračunska vrednost sile pritiska upravne na vlakna;

A_{ef} efektivna kontaktna površina pri pritisku upravno na vlakna;

$f_{c,90,d}$ proračunska vrednost čvrstoće pri pritisku upravno na vlakna;

$k_{c,90}$ koeficijent kojim se uzima u obzir konfiguracija opterećenja, mogućnost cepanja i stepen deformacije usled pritiska.

Efektivna kontaktna površina upravno na vlakna A_{ef} , treba da se odredi uzimajući u obzir efektivnu kontaktnu površinu paralelnu vlaknima, gde se stvarna kontaktna dužina l , uvećava po 30 mm sa svake strane, ali ne više od a , l ili $l_1/2$, videti Sliku 4.6.

Za vrednost koeficijenta $k_{c,90}$ treba da se uzme 1,0, osim ako se primenjuju uslovi u sledećim pasusima. U tim slučajevima može da se uzme veća utvrđena vrednost za $k_{c,90}$, sve do granične vrednosti $k_{c,90} = 1,75$.

Za elemente koji su kontinualno oslonjeni, pod uslovom da je $l_1 \geq 2h$, videti sliku 4.6a, koeficijent $k_{c,90}$ treba da se uzme kao:

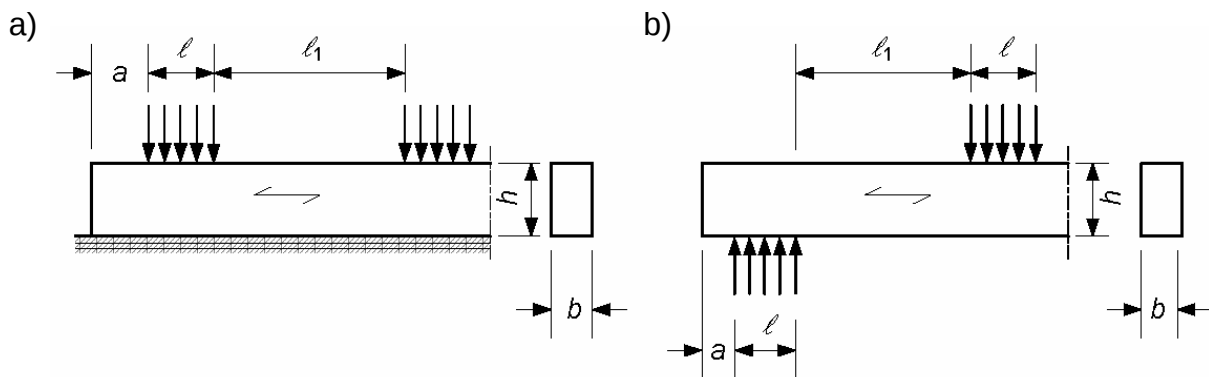
- $k_{c,90} = 1,25$ za monolitno meko drvo;
- $k_{c,90} = 1,5$ za lepljeno laminatno meko drvo;

gde je h visina elementa, a l kontaktna dužina.

Za elemente koji su diskretno oslonjeni, pod uslovom da je $l_1 \geq 2h$, videti sliku 4.6b, koeficijent $k_{c,90}$ treba da se uzme kao:

- $k_{c,90} = 1,50$ za monolitno meko drvo;
- $k_{c,90} = 1,75$ za lepljeno laminatno meko drvo, uz uslov da je $l \leq 400$ mm;

gde je h visina elementa, a l kontaktna dužina.



Slika 4.6. Elementi sa (a) kontinualnim oslanjanjem i (b) diskretnim oslanjanjem [8]

Torzija

Kod elemenata koji su izloženi torziji, mora da se zadovolji sledeći uslov:

$$\tau_{tor,d} \leq k_{shape} \cdot f_{v,d}$$

sa

$$k_{shape} = \begin{cases} 1.2 & \text{za kružni poprečni presek} \\ \min \left\{ 1 + 0.15 \cdot \frac{h}{b}, 2.0 \right\} & \text{za pravougaoni poprečni presek} \end{cases}$$

gde je:

$\tau_{tor,d}$ proračunska vrednost smičućeg napona usled torzije;

$f_{v,d}$ proračunska vrednost čvrstoće pri smicanju;

k_{shape} koeficijent koji zavisi od oblika poprečnog preseka;

h veća dimenzija poprečnog preseka;

b manja dimenzija poprečnog preseka.

Smicanje i torzija

Kada je element opterećen kombinovanim delovanjem torzije i smicanja, odgovarajući torzioni i direktni naponi smicanja se kombinuju, te se presek mora proračunati za resultantno maksimalno stanje napona smicanja. EC5 pokriva samo elemente opterećene smicanjem ili torzijom, ali ne i kombinacijom smicanja i torzije. Istraživanja o ovom kombinovanom stanju napona su ograničena, ali se, koristeći odnos za torzionu čvrstoću predlaže sledeći kriterijum loma:

$$\frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape} \cdot f_{v,d}} + \left(\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \right)^2 \leq 1$$

Predložena jednačina pretpostavlja određeni stepen redistribucije napona, čime se povećava kombinovana otpornost preseka na smicanje.

Kao alternativa, može se primeniti konzervativniji pristup, u kojem se pojedinačni naponi smicanja sabiraju linearno, a kriterijum loma tada glasi:

$$\frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape} \cdot f_{v,d}} + \frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1$$

Torzione napone smicanja nije potrebno kombinovati sa naponima savijanja, pritiska, zatezanja, pa kada torzioni napon deluje zajedno sa takvim naprezanjima u elementu, proverava se samo uslov torzionog smicanja.

Granična stanja upotrebljivosti (SLS)

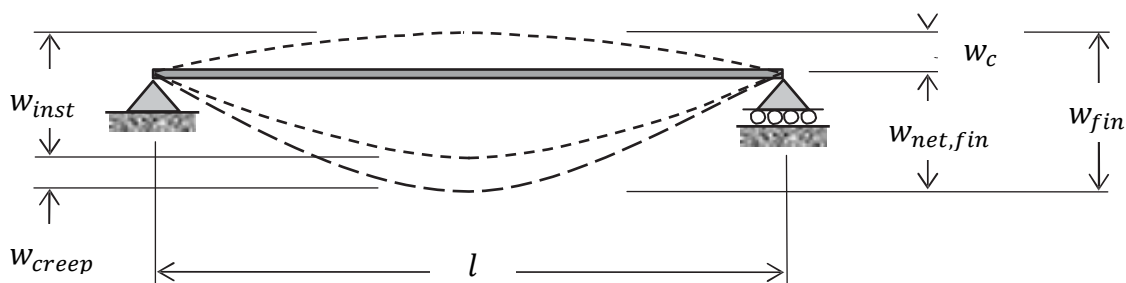
Pri graničnom stanju upotrebljivosti (SLS), mora se dokazati da se elementi ponašaju zadovoljavajuće pri normalnoj upotrebi, pri čemu su glavni zahtevi koje treba proveriti – ugibi i vibracije.

Granične vrednosti ugiba grede

EC5 zahteva da deformacija grede bude takva da objekat može da funkcioniše kako je predviđeno, bez negativnih vizuelnih efekata, bez konstruktivnih posledica (npr. oštećenja nekonstruktivnih elemenata usled deformacija) i da instalacije mogu nesmetano da funkcionišu.

Deformacija grede od drveta ili proizvoda na bazi drveta sastoji se od više komponenti, a pri proračunskom opterećenju za granično stanje upotrebljivosti (SLS), granične vrednosti ovih komponenti prikazane su na Slici 4.7, gde simboli u EC5 znače:

- w_c nadvišenje (ukoliko je predviđeno);
- w_{inst} trenutni ugib;
- w_{creep} ugib usled tečenja;
- w_{fin} konačni ugib;
- $w_{net,fin}$ neto konačni ugib.



Slika 4.7. Komponente ugiba

Neto ugib ispod prave linije koja povezuje oslonce, $w_{net,fin}$, treba uzeti kao:

$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c = w_{fin} - w_c$$

Preporučene granične vrednosti ugiba za grede raspona l , u zavisnosti od nivoa deformacije koji se smatra prihvatljivim, date su u Tabeli 4.2. Informacije o nacionalnom izboru mogu se naći u nacionalnom prilogu.

Tabela 4.2. Primeri graničnih vrednosti ugiba greda

	w_{inst}	$w_{net,fin}$	w_{fin}
Greda na dva oslonca	od $l/300$ do $l/500$	od $l/250$ do $l/350$	od $l/150$ do $l/300$
Konzole	od $l/150$ do $l/250$	od $l/125$ do $l/175$	od $l/75$ do $l/150$

Vibracije

Ljudsko telo je izuzetno osetljivo na vibracije, i poštovanjem kriterijuma datih u EC5, koji se odnose na proračunske zahteve za međuspratne konstrukcije od proizvoda na bazi drveta u stambenim objektima, obezbeđuje se da ponašanje konstrukcije u pogledu vibracija ostane u prihvatljivim granicama pri SLS opterećenju.

Osetljivost ljudi na vibracije je složena oblast, a istraživanja o nelagodnosti izazvanoj vibracijama pokazala su da su glavni faktori koji utiču na to da li osoba vibraciju doživljava kao prihvatljivu ili neprihvatljivu sledeći:

- Nelagodnost usled vibracija izazvanih mašinama
- Nelagodnost usled vibracija izazvanih hodaњem (koracima)
- Blizina izvora vibracija i prenos vibracija.

Uticaj ovih faktora mođe se svesti na prihvatljiv nivo odgovarajućim projektovanjem i konstruktivnim detaljima, kako same konstrukcije tako i nekonstrukcijskih elemenata. Mora se obezbediti da dejstva koja se mogu prilično tačno predvideti za element, komponentu ili konstrukciju ne prouzrokuju vibracije koje mogu umanjiti funkcionalnost konstrukcije ili izazvati neprihvatljivu neudobnost kod korisnika. Nivo vibracija treba proceniti na osnovu merenja ili proračunom, uzimajući u obzir očekivanu krutost elementa, komponente ili konstrukcije i prigušenje. Za međuspratne konstrukcije, ako se ne raspolođe pouzdanim podacima, treba usvojiti modalno relativno prigušenje $\zeta = 0,01$ (tj. 1%).

Vibracije izazvane radom mašina

Vibracije izazvane rotacionim mašinama i drugom sličnom opremom moraju se ograničiti za najnepovoljnije kombinacije stalnog i promenljivih opterećenja koje se mogu očekivati. Za međuspratne konstrukcije, nivo prihvatljivosti za ustaljene vibracije treba uzeti prema standardu ISO 2631-2 (Prilog A, slika 5a), sa multiplikacionim faktorom 1,0.

Kada vibracije mašine prelaze prihvatljive nivoe, najčešći naćin rešavanja problema je:

- izolacija temelja mašine od konstrukcije ili
- ugradnja antivibracionih oslonaca između mašine i konstrukcije, ćime se menja odziv konstrukcije.

Ovo obićno zahteva analizu dinamićkog ponašanja konstrukcije, a zbog specifićne prirode problema, EC5 se njime ne bavi.

Međuspratne konstrukcije stambenih zgrada

Vibracije međuspratnih konstrukcija stambenih zgrada istrađuju se već duđe vreme, a tokom tog perioda kriterijumi za granićne vrednosti su se menjali. Proraćunski zahtevi u EC5 odnose se iskljućivo na stambene podove ćija je osnovna (fundamentalna) frekvencija veća od 8 Hz. Podovi sa osnovnom frekvencijom manjom od 8 Hz zahtevaju posebna ispitivanja i nisu obuhvaćeni ovim standardom.

Za međuspratne konstrukcije ćija je osnovna frekvencija viša od 8 Hz ($f_1 > 8 \text{ Hz}$) treba da se zadovolje sledeći uslovi:

$$\frac{w}{F} \leq a \quad \text{mm/kN}$$

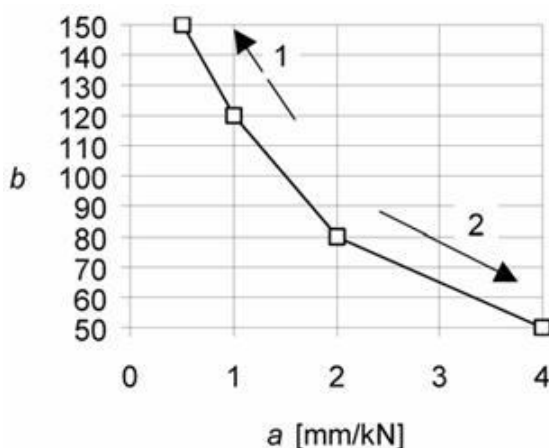
i

$$v \leq b^{(f_1 \zeta - 1)} \quad \text{m/(Ns}^2\text{)}$$

gde je:

- w maksimalni trenutni vertikalni ugib usled koncentrisane vertikalne sile koja je naneta na bilo koju tačku međuspratne konstrukcije, uzimajući u obzir preraspodelu opterećenja;
- v brzina odgovora za jedinični impuls, tj. maksimalna početna vrednost brzine vertikalnih vibracija međuspratne konstrukcije (u m/s), usled idealnog jediničnog impulsa (1 Ns) nanetog na tačku međuspratne konstrukcije koja daje maksimalni vibracioni odgovor. Komponente vibracionog odgovora većeg od 40 Hz mogu se zanemariti;
- ζ modalno relativno prigušenje.

Preporučene granične vrednosti za parametre a i b i preporučena veza između njih data je na slici 4.8. Informacije o nacionalnom izboru mogu se naći u nacionalnom prilogu.



Na slici je:

- 1 Bolje performanse međuspratne konstrukcije
- 2 Lošije performanse međuspratne konstrukcije

Slika 4.8. Preporučene vrednosti i veza između parametara a i b [8]

Izračunavanja navedenih uslova treba da se sprovedu sa pretpostavkom da je međuspratna konstrukcija neopterećena, tj. samo za masu koja odgovara sopstvenoj težini međuspratne konstrukcije i drugim permanentnim dejstvima.

Za pravougaonu međuspratnu konstrukciju dimenzija $b \times l$, slobodno oslonjenu duž sve četiri ivice i sa drvenim gredama raspona l , osnovna frekvencija f_1 aproksimativno može da se izračuna kao:

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$$

gde je:

- m masa po jedinici površine, u kg/m^2 ;
- l raspon međuspratne konstrukcije, u m;
- $(EI)_l$ ekvivalentna krutost međuspratne konstrukcije na savijanje oko ose upravne na pravac pružanja greda, u Nm^2/m .

Osim ako podna obloga nije projektovana da zajedno sa podnim gredama funkcioniše kao spregnuta konstrukcija u pravcu raspona greda ekvivalentna krutost međuspratne konstrukcije na savijanje $(EI)_l$ treba da se određuje isključivo na osnovu krutosti na savijanje samih podnih greda. Spregnuto delovanje između podne obloge i drvenih greda može se pretpostaviti samo u slučaju kada je podna obloga zalepljena za grede i proračunata u skladu sa tačkom 9.1.2 EC5, uz napomenu da lepila moraju ispunjavati zahteve definisane u tačkama 3.6 i 10.3 EC5.

Za pravougaonu međuspratnu konstrukciju dimenzija $b \times l$, slobodno oslonjenu duž sve četiri ivice, vrednost v aproksimativno može da se izračuna kao:

$$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{m \cdot b \cdot l + 200}$$

gde je:

- v brzina vibracionog odgovora za jedinični impuls, u $\text{m}/(\text{Ns}^2)$;
- n_{40} broj tonova oscilovanja sa svojstvenom frekvencijom nižom od 40 Hz;
- b širina međuspratne konstrukcije, u m;
- m masa, u kg/m^2 ;
- l raspon međuspratne konstrukcije, u m.

Vrednost n_{40} može da se izračuna iz izraza:

$$n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{b}{l} \right)^4 \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right\}^{0,25}$$

gde je $(EI)_b$ ekvivalentna krutost međuspratne konstrukcije na savijanje oko ose paralelne sa pravcem pružanja greda (u Nm^2/m), pri čemu je $(EI)_b < (EI)_l$.

Treba napomenuti da, kada se koristi $\zeta = 0,02$ kao modalno relativno prigušenje, brzina vibracionog odgovora za jedinični impuls obično neće biti određujući faktor za dimenzionisanje greda kod drvenih podova u stambenim objektima.

4.2. Proračun poprečnih preseka izloženih aksijalnim ili kombinovanim naprezanjima

Ovo poglavlje obrađuje projektovanje pravih elemenata od monolitnog drveta ili konstrukcijskih proizvoda na bazi drveta, konstantnog poprečnog preseka, kod kojih vlakna drveta pretežno prate podužnu osu elementa, a elementi su izloženi dejstvu aksijalnog pritiska ili zatezanja, kao i kombinovanom dejstvu aksijalnih sila i savijanja.

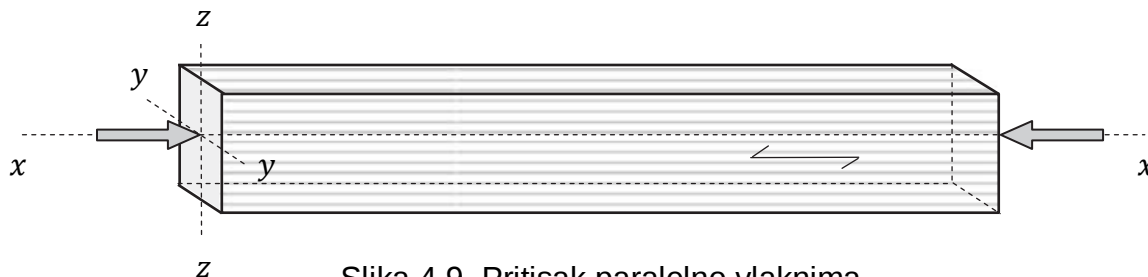
Elementi opterećeni aksijalnim silama moraju biti projektovani u skladu sa odgovarajućim pravilima i zahtevima standarda EC5. Stanja ravnoteže i uslovi čvrstoće odnose se na krajnja granična stanja (ULS), jer predstavljaju situacije potencijalnog sloma konstrukcije. Sa druge strane, stanje pomeranja (deformacije) odnosi se na normalne uslove upotrebe, ali EC5 ne daje konkretne smernice za ograničene kriterijume u ovom pogledu. U situacijama kada postoji opasnost od bočne nestabilnosti elementa, propisana je maksimalna dozvoljena devijacija od pravolinijskog oblika, a ova vrednost data je u odeljku 10 standarda EC5.

Kada su elementi ili konstrukcije izloženi kombinovanim naprezanjima — na primer, istovremenom dejstvu aksijalnih sila i savijanja, javljaju se dodatni proračunski uticaji, a zahtevi za projektovanje u takvim uslovima takođe su obrađeni u ovom poglavlju.

Proračun poprečnih preseka izloženih aksijalnim naprezanjima

Pritisak paralelno vlaknima

Ovi elementi izloženi su dejstvu pritiskne sile koja deluje paralelno s pravcem vlakana duž podužne ose x – x , kao što je prikazano na Slici 4.9.



Slika 4.9. Pritisak paralelno vlaknima

Kada je element izložen aksijalnoj sili pritiska, njegova nosivost zavisi od više faktora:

- Mehaničkih svojstava materijala – pritisna čvrstoća i modul elastičnosti drveta;
- Geometrije elementa – dimenzije poprečnog preseka i dužina elementa;
- Uslova oslanjanja – stepen bočnog oslanjanja i ukrućenosti na krajevima;
- Geometrijskih nesavršenosti – odstupanja od projektovanih dimenzija, početna zakrivljenost i nagnutost;
- Varijabilnosti i nesavršenosti materijala – promenljiva zapreminska masa, prisustvo čvorova, sadržaj vlage.

Pravila sadržana u standardu EC5 uzimaju u obzir sve ove faktore.

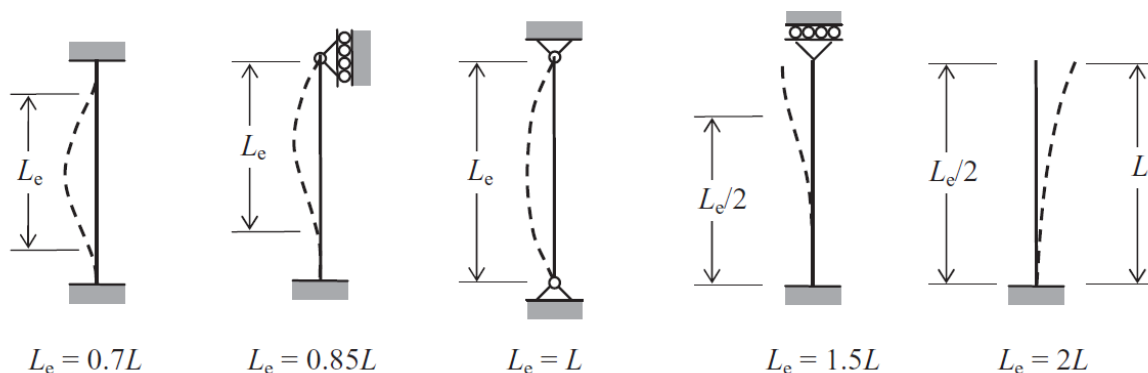
Kod delovanja aksijalne sile, zbog nesavršenosti geometrije ili neujednačenosti u materijalu (ili kombinacije oba faktora), sa porastom vitkosti elementa λ , dolazi do bočnog pomeranja elementa i eventualnog loma usled izvijanja.

Vitkost elementa definiše se kao efektivna dužina elementa, L_e , podeljena sa poluprečnikom inercije, i :

$$\lambda = \frac{L_e}{i}$$

gde je poluprečnik inercije $i = \sqrt{I/A}$, I je moment inercije preseka, a A površina poprečnog preseka. Izvijanje će se javiti oko ose sa većim koeficijentom vitkosti.

Iako EC5 ne sadrži konkretne metode za određivanje efektivne dužine elementa, ako krajnji oslonci obezbeđuju potpunu pozicionu i ugaonu kontrolu, mogu se primeniti vrednosti prikazane na Slici 4.10, gde je L stvarna (geometrijska) dužina elementa. U slučajevima kada kontrola položaja i ugla na krajevima elementa nije potpuno obezbeđena, ali su poznate krutosti veza nad osloncima, efektivna dužina može se približno proceniti metodama teorije drugog reda.



Slika 4.10. Efektivne dužine i uslovi oslanjanja

Relativne vitkosti treba uzeti kao:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

i

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

gde su:

λ_y i $\lambda_{rel,y}$ vitkosti koje odgovaraju savijanju oko y-ose (izvijanje u z-pravcu);

λ_z i $\lambda_{rel,z}$ vitkosti koje odgovaraju savijanju oko z-ose (izvijanje u y-pravcu);

$E_{0,05}$ karakteristična vrednost modula elastičnosti paralelno vlaknima (petoprocentni fraktil).

Za slučaj kada su $\lambda_{rel,z} \leq 0,3$ i $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$, naponi treba da zadovolje sledeće uslove:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}$$

gde je:

$\sigma_{c,0,d}$ proračunska vrednost napona pritiska paralelno vlaknima;

$f_{c,0,d}$ proračunska vrednost čvrstoće pri pritisku paralelno vlaknima.

U svim ostalim slučajevima, naponi koji su uvećani usled izvijanja treba da zadovolje sledeće uslove:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

odnosno

$$\sigma_{c,0,d} \leq k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}$$

$$\sigma_{c,0,d} \leq k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}$$

gde su simboli definisani kako sledi:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}}$$

$$k_y = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2)$$

$$k_z = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0.3) + \lambda_{rel,z}^2)$$

gde je:

β_c koeficijent za elemente ograničene pravosti definisane u odeljku 10 EC5. Početno odstupanje od pravosti mereno u sredini raspona treba ograničiti na 1/500 dužine za lepljene lamelirane i LVL elemente i na 1/300 dužine elemenata od monolitnog drveta. Ograničenja izbočenosti, data u većini pravila za klasifikaciju čvrstoće drveta, neadekvatna su za izbor materijala za navedene elemente i stoga treba da se posebna pažnja obrati na njihovu pravost.

$$\beta_c = \begin{cases} 0,2 & \text{za monolitno drvo} \\ 0,1 & \text{za lepljeno lamelirano drvo i LVL} \end{cases}$$

Pritisak pod uglom u odnosu na vlakna

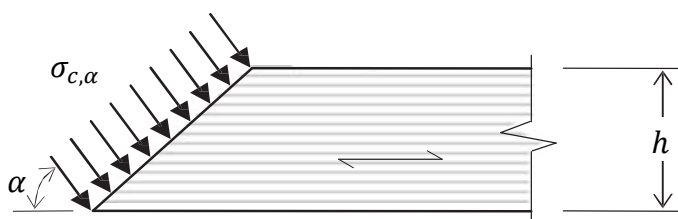
Uzajamno dejstvo napona pritiska u dva ili više pravaca mora da se uzme u obzir. Naponi pritiska pod uglom, a u odnosu na vlakna (videti Sliku 4.11), treba da zadovolje sledeći uslov:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

gde je:

$\sigma_{c,\alpha,d}$ napon pritiska pod uglom α u odnosu na vlakna;

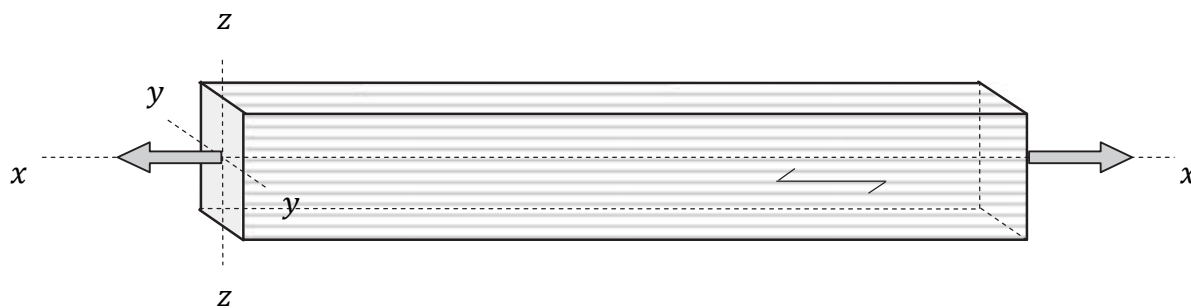
$k_{c,90}$ koeficijent dat u odeljku 6.1.5 EC5, kojim se uzima u obzir uticaj napona upravno na vlakna.



Slika 4.11. Naponi pritiska pod uglom u odnosu na vlakna

Zatezanje paralelno vlaknima

Ovi elementi izloženi su dejstvu sile zatezanja koja deluje paralelno s pravcem vlakana duž podužne ose x-x, kao što je prikazano na Slici 4.12.



Slika 4.12. Zatezanje paralelno vlaknima

Iako je zatezna čvrstoća čistih uzoraka drveta $f_{t,0,k}$, veća od pritisne čvrstoće $f_{c,0,k}$, zbog toga što do loma u zatezanju dolazi na krh način (za razliku od plastičnog u slučaju pritiska), i zbog osetljivosti na nagib vlakana, čvorove i druge defekte, zatezna čvrstoća konstruktivnog drveta je u praksi uglavnom manja od njegove pritisne čvrstoće. Ovo je naročito izraženo kod nižih klasa čvrstoće.

Kod zategnutih elemenata ne dolazi do izvijanja (stabilnost nije kritična), tako da je razmatranje vitkosti potrebno samo ako postoji rizik od promene znaka napona – na primer, zbog dejstva vetra na elemente rešetkastih nosača.

Zategnuti elementi treba da se provere na najslabijem mestu, koje se najčešće nalazi kod spojeva. Pošto se proračun veza vrši nakon odabira preseka elementa, projektovanje zategnutih elemenata uglavnom podrazumeva metod pokušaja i greške. Pretpostavlja se tip i dimenzije veze, pa se proverava da li je odabrani poprečni presek elementa dovoljan na mestu veze, uzimajući u obzir smanjenje efektivne površine zbog spoja. Kada se veze projektuju, element se ponovo proverava s tačnim podacima o neto poprečnom preseku.

Važno je napomenuti da se prema EC5, tačka 5.2(3), slabljenje površine poprečnog preseka može zanemariti kada se koriste ekseri i šrafovi prečnika 6 mm ili manji koji se ugrađuju bez prethodnog bušenja. Međutim, prema EC5, tačka 5.2(4), svi otvori koji se nalaze unutar rastojanja od polovine minimalnog razmaka između spojnih sredstava (merenog paralelno s pravcem vlakana) u odnosu na određeni presek, trebaju se računati kao da se nalaze upravo u tom preseku.

Kod elemenata koji su izloženi zatezanju paralelno vlaknima mora da se zadovolji sledeći uslov:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d}$$

gde je:

$\sigma_{t,0,d}$ proračunska vrednost napona zatezanja paralelno vlaknima;

$f_{t,0,d}$ proračunska vrednost čvrstoće pri zatezanju paralelno vlaknima.

Proračun poprečnih preseka izloženih kombinovanim naprezanjima

Zahtevi za verifikaciju nosivosti elementa opterećenog kombinovano pritiskom i savijanjem primenjuje se na prave elemente konstantnog poprečnog preseka, od monolitnog drveta, lepljenog lameliranog drveta ili konstrukcijskih proizvoda na bazi drveta, čija se vlakna u suštini pružaju u pravcu dužine elementa. Pretpostavlja se da je element izložen naprezanjima od kombinovanih dejstava ili naprezanjima koja deluju u pravcu dve ili tri njegove glavne ose.

U slučajevima kada je u skladu sa EC5 potrebno uzeti u obzir efekte stabilnosti, kriterijumi za verifikaciju nosivosti stubova izloženih kombinovanim dejstvu pritiska i momenta savijanja razlikuju se od kriterijuma koji se primenjuju pri verifikaciji nosivosti greda izloženih istom kombinovanim opterećenju. Generalizacija kroz uniformnu klasifikaciju može dovesti do nepouzdatih rezultata u pogledu sigurnosti konstrukcije. Stoga se naredni proračunski postupak primenjuje na sve konstruktivne elemente izložene kombinovanim aksijalnom pritisku i savijanju, uz jasno definisana ograničenja primene metode, u skladu sa kriterijumima predviđenim standardom EC5.

Stubovi izloženi pritisku u kombinaciji sa savijanjem

Za slučaj kada su $\lambda_{rel,z} \leq 0,3$ i $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$, naponi treba da zadovolje sledeće uslove:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

U svim ostalim slučajevima, naponi koji su uvećani usled izvijanja treba da zadovolje sledeće uslove:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Grede izložene savijanju u kombinaciji sa pritiskom

Za slučaj gde postoji kombinacija momenta M_y oko jače y-ose i sile pritiska N_c , naponi treba da zadovolje sledeći uslov:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

Zatezanje sa savijanjem

Kod elemenata koji su napregnuti na ekscentrično zatezanje, moraju da se zadovolje sledeći uslovi:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Pritisak sa savijanjem

Kod elemenata koji su napregnuti na ekscentrični pritisak, moraju da se zadovolje sledeći uslovi:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

4.3. Proračun poprečnih preseka elemenata sa promenljivom visinom ili zakrivljenim oblikom

Lepljeni lamelirani drveni elementi predstavljaju prefabrikovane konstruktivne elemente izrađene lepljenjem tankih drvenih lamela, čime se postiže izuzetno povoljan odnos čvrstoće i krutosti prema sopstvenoj masi. Elementi se mogu projektovati sa značajnom otpornošću na požar, kao i sa visokim stepenom arhitektonske i estetske obrade površine.

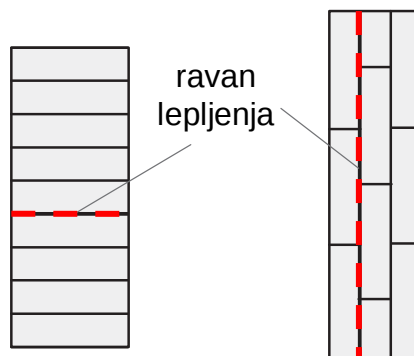
Prednosti lepljenih lameliranih drvenih elemenata:

- Proizvodna fleksibilnost – Zahvaljujući izradi tankih lamela, moguće je oblikovati složene geometrijske forme. Dimenzije, dužine i oblici mogu se prilagoditi projektnim zahtevima, a praktična ograničenja uslovljena su samo kapacitetima proizvodnje i transporta.
- Povećana pouzdanost materijala – Višeslojna struktura omogućava ravnomerniju raspodelu prirodnih nedostataka drveta, čime se smanjuje varijabilnost mehaničkih karakteristika i povećava nosivost preseka.
- Integracija prednaprezanja – Tokom proizvodnje lako se može ugraditi nadvišenje u element, čime se unapređuju radne karakteristike konstrukcije pod opterećenjem.

Proračun lepljenih lameliranih elemenata vrši se u skladu sa zahtevima standarda SRPS EN 1995-1-1 (EC5). Ista metodologija proračuna primenjuje se i na elemente izrađene od laminiranog furnirskog drveta (LVL). Lepljeni lamelirani elementi mogu služiti kao grede, stubovi ili elementi izloženi kombinovanom dejstvu savijanja i aksijalnog opterećenja. Proizvodnja lepljenih lameliranih elemenata mora biti usklađena sa zahtevima standarda SRPS EN 386.

Lepljeni lamelirani drveni elementi formiraju se lepljenjem drvenih lamela sa vlaknima koja su orijentisana pretežno paralelno. Prema standardu SRPS EN 386, proizvode se u dve osnovne varijante, Slika 4.13:

- Horizontalni lepljeni lamelirani elementi kod kojih su ravni lepljenja orijentisani upravno na veću dimenziju preseka (duža stranica poprečnog preseka),
- Vertikalni lepljeni lamelirani elementi kod kojih su ravni lepljenja orijentisani upravno na manju dimenziju preseka (kraća stranica poprečnog preseka).



Slika 4.13. Horizontalni i vertikalni lepljeni lamelirani elementi

Postoje dve osnovne varijante lepljenih lameliranih elemenata:

- Homogeni lepljeni lamelirani elementi – sve lamele istog kvaliteta i vrste drveta,
- Kombinovani lepljeni lamelirani elementi – spoljne i unutrašnje lamele različitih kvaliteta i/ili vrsta drveta. Spoljašnje lamele moraju biti više klase čvrstoće i zauzimati najmanje jednu šestinu ukupne visine preseka sa svake strane elementa.

Lepljeni lamelirani drveni elementi moraju biti usklađeni sa zahtevima standarda SRPS EN 386 i SRPS EN 1194. Standard SRPS EN 1194 definiše klase čvrstoće za lepljene lamelirane elemente, metodologiju za određivanje karakterističnih vrednosti čvrstoće i krutosti, kriterijume za klasifikaciju prema vrstama drveta i kvalitetnim klasama, uključujući kombinacije različitih vrsta i klasa drveta. Sistem klasifikacije zasniva se na principu sličnom onom iz standarda SRPS EN 338 za konstruktivno drvo, ali se primenjuje isključivo na horizontalno lamelirane elemente izrađen od najmanje četiri lamele, pri čemu sve lamele moraju biti od mekog drveta.

Prema standardu SRPS EN 1194 karakteristične vrednosti čvrstoće, krutosti i zapreminske mase definisane su za četiri klase čvrstoće i označene kao GL 24, GL 28, GL 32 i GL 36. Svaka klasa označava se sufiksom h (homogeni) ili c (kombinovani). Kao i kod monolitnog drveta u standardu SRPS EN 338, bročana oznaka u nazivu klase označava karakterističnu čvrstoću na savijanje izraženu u N/mm². Primer karakteristika pojedinih klasa čvrstoće dat je u Tabeli 2.2.

Karakteristična čvrstoća na savijanje $f_{m,k}$ iz Tabele 2.2 odnosi se na elemente minimalne visine preseka od 600 mm, dok se karakteristična čvrstoća na zatezanje paralelno sa vlaknima $f_{t,0,k}$ odnosi na elemente minimalne širine od 600 mm. Ove vrednosti čvrstoće mogu se povećati kod lepljenih lameliranih drvenih nosača manjih dimenzija primenom faktora veličine preseka, navedenog u odeljku 3.3. i Tabeli 3.13. Prema EC5, ovaj faktor se sme primeniti samo na visinu preseka kod savijanja i na širinu preseka kod zatezanja.

Proračunske vrednosti za lepljene lamelirane nosače određuju se na isti način kao i za elemente od monolitnog drveta, uz primenu relevantnih faktora iz EC5 za određeni materijal. Na primer, proračunska čvrstoća na savijanje $f_{m,d}$ lepljenog lameliranog nosača računa se kao:

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_h \cdot k_{sys} \cdot f_{m,g,k}}{\gamma_M}$$

gde je:

- k_{mod} korekcionni koeficijent kojim se uzimaju u obzir uticaj trajanja opterećenja i vlažnosti (Tabela 3.8);
- k_h koeficijent veličine preseka (Tabela 3.13);
- k_{sys} koeficijent nosivosti sistema;
- $f_{m,g,k}$ karakteristična vrednost čvrstoće na savijanje za odgovarajuću klasu lepljenog lameliranog drveta;
- γ_M parcijalni koeficijent sigurnosti za svojstva materijala (Tabela 3.10).

Mehaničke osobine lepljenih lameliranih drvenih elemenata mogu se izvesti iz ekvivalentnih svojstava lamela od mekog drveta koje se koriste u njegovoj izradi. Odnosi između svojstava lamela i svojstava lepljenih lameliranih drvenih elemenata dati su u Tabeli A.1 standarda SRPS EN 1194, a prikazani su i u Tabeli 4.3. Jednačine iz Tabele 4.3 važe za homogeni element izrađen od lamela mekog drveta, ali se mogu koristiti i za proračun lepljenih lameliranih elemenata koji ne potpadaju pod četiri definisane klase čvrstoće iz standarda.

Mehaničke karakteristike lamela preuzimaju se iz standarda SRPS EN 338 za vrste mekog drveta, ili se određuju postupkom definisanim u SRPS EN 1194. Posebni zahtevi za čvrstoću veze na krajevima lamela (finger joint) moraju biti ispunjeni za sve lamele, a alternativne metode za njihovo ostvarivanje date su u odeljku 6.3.2 standarda SRPS EN 1194.

Tabela 4.3. Mehaničke karakteristike lepljenih lameliranih drvenih elemenata
(sve vrednosti čvrstoće i krutosti date su u N/mm²)

Mehaničke karakteristike	SRPS EN 1194
Savijanje $f_{m,g,k}$	$= 7 + 1,15 \cdot f_{t,0,l,k}$
Zatezanje $f_{t,0,g,k}$ $f_{t,90,g,k}$	$= 5 + 0,8 \cdot f_{t,0,l,k}$ $= 0,2 + 0,015 \cdot f_{t,0,l,k}$
Pritisak $f_{c,0,g,k}$ $f_{c,90,g,k}$	$= 7,2 \cdot f_{t,0,l,k}^{0,45}$ $= 0,7 \cdot f_{t,0,l,k}^{0,5}$
Smicanje $f_{v,g,k}$	$= 0,32 \cdot f_{t,0,l,k}^{0,8}$
Modul elastičnosti $E_{0,g,mean}$ $E_{0,g,05}$ $E_{90,g,mean}$	$= 1,05 \cdot E_{0,l,mean}$ $= 0,85 \cdot E_{0,l,mean}$ $= 0,035 \cdot E_{0,l,mean}$
Modul smicanja $G_{g,mean}$	$= 0,065 \cdot E_{0,l,mean}$
Zapreminska masa $\rho_{g,k}$	$= 1,10 \cdot \rho_{l,k}$

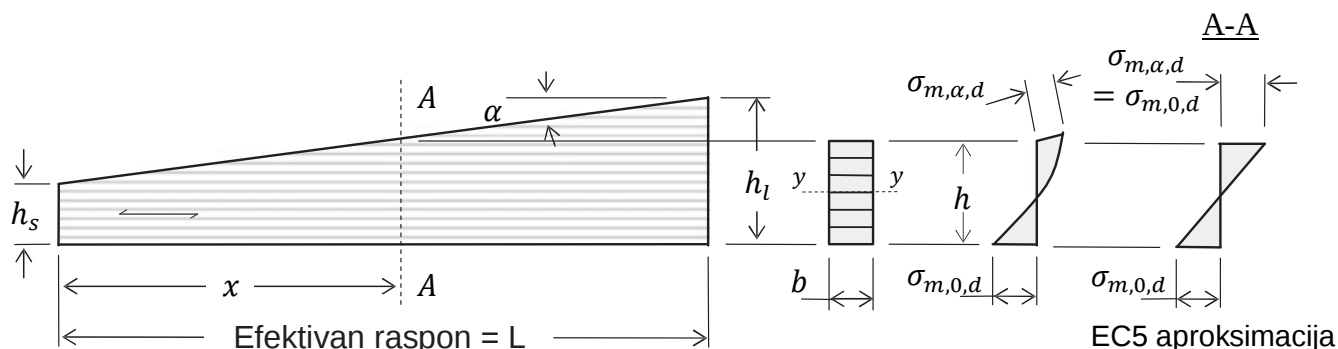
Kada je potrebno odrediti mehaničke karakteristike kombinovanog lepljenog lameliranog elementa, pod uslovom da zone sa različitim lamelama zauzimaju najmanje jednu šestinu visine preseka ili dvema lamelama – u zavisnosti od toga koji uslov daje veću visinu, odnosi iz Tabele 4.3 primenjuju se na karakteristike pojedinačnih delova poprečnog preseka elementa. Ako se projektuje kombinovano lepljeno lamelirano drvo koje ne ispunjava zahteve klase čvrstoće GL24c do GL38c, verifikacija čvrstoće na savijanje mora se izvršiti u svim relevantnim tačkama poprečnog preseka. Kako je pri tome potrebno analizirati elemente različitih modula elastičnosti, može se primeniti metoda ekvivalentnog preseka. Kod ove metode, materijal u spoljnim ili unutrašnjim lamelama odabira se kao referentni, dok se ostali materijal zamenjuje ekvivalentnom površinom odabranog materijala tako da sila u zamenjenom materijalu na određenoj udaljenosti od neutralne ose, izazvana savijanjem, bude jednaka sili koju bi prenosio originalni materijal na istom mestu. Na taj način dobija se „jednomaterijalni“ presek, na koji se može primeniti teorija savijanja i direktno odrediti napon u odabranom materijalu.

Jednostrano zakošeni nosači

Ovi nosači imaju pravougaoni poprečni presek, a njihova visina se linearno menja od jednog do drugog kraja, kako je prikazano na slici 4.14. Iako EC5 ne propisuje gornju granicu za nagib α , u praksi se on najčešće kreće u opsegu od 0° do 10° .

Ovakav tip nosača primenjuje se u krovnim konstrukcijama, pri čemu ključne provere projektovanja vezane su za:

- maksimalna naprezanja na smicanje,
- maksimalna naprezanja na savijanje u stanju granične nosivosti (ULS),
- ponašanje u pogledu ugiba u stanju granične upotrebljivosti (SLS).



Slika 4.14. Jednostrano zakošen nosač

U pogledu maksimalnog naprezanja na smicanje, usled zakošenog oblika nosača raspodela smičućih napona neće biti jednaka po visini preseka, niti konstantna duž ose grede. Takođe, usled zakošenog oblika, pri delovanju momenta savijanja, raspodela napona od savijanja po preseku biće nelinearna, što je ilustrovano na slici 4.14.

U skladu sa EC5, radi pojednostavljenja postupka projektovanja, naponi u preseku se određuju primenom konvencionalne teorije elastičnog savijanja, pri čemu se zanemaruje uticaj zakošenosti nosača. Napon savijanja na zakošenoj strani, koji deluje paralelno sa tom stranom, kao i napon savijanja na horizontalnoj površini donjeg lica, uzimaju se jednakim naponima savijanja dobijenim pod pretpostavkom da zakošenost ne postoji.

Na osnovu EC5 aproksimacije, kada na nosač deluje proračunski momenat savijanja M_d na udaljenosti x od kraja na kojem je visina nosača h_s , maksimalni napon savijanja na zakošenoj strani nosača pod uglom α u odnosu na pravac vlakana, kao i u vlaknu koje je najudaljenije na strani nosača paralelnoj s vlaknima, biće:

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \sigma_{m,0,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2}$$

Ovi naponi zavisiće od tipa dejstva i geometrije nosača, a kod proste grede sa poprečnim presekom prikazanim na Slici 4.14, maksimalno naponsko stanje javiće se kada x ima vrednost navedenu u Tabeli 4.4. U istoj tabeli date su i vrednosti maksimalnih napona u preseku A-A.

Tabela 4.4. Položaj i vrednost maksimalnog napona savijanja kod jednostrano zakošenog nosača pri različitim uslovima opterećenja

Vrsta opterećenja	x	W	$\sigma_{m,\alpha,d} = \sigma_{m,0,d}$
Jednako podeljeno opterećenje, q_d	$x = \frac{L}{\left(1 + \frac{h_l}{h_s}\right)}$	$W_x = \frac{2b}{3} \left(\frac{h_l}{\left(1 + \frac{h_l}{h_s}\right)} \right)^2$	$= \frac{q_d \cdot x \cdot (L - x)}{2W_x}$
Koncentrisana sila u sredini raspona, Q_d	kada je $\frac{h_l}{h_s} \leq 3$: $x = \frac{L}{2}$ kada je $\frac{h_l}{h_s} > 3$: $x = \frac{L}{\left(\frac{h_l}{h_s} - 1\right)}$	$W1_x = \frac{b \cdot (h_l - h_s)^2}{24}$ $W2_x = \frac{2}{3} b h_s^2$	$= \frac{Q_d \cdot x}{2(W1_x)}$ $= \frac{Q_d \cdot x}{2(W2_x)}$

U krajnjim vlaknima zakošene ivice, naponi treba da zadovolje sledeći uslov:

$$\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{m,\alpha} \cdot f_{m,d}$$

gde je:

$\sigma_{m,\alpha,d}$ proračunska vrednost napona savijanja pod uglom u odnosu na vlakna;

$f_{m,d}$ proračunska vrednost čvrstoće pri savijanju;

$k_{m,\alpha}$ koeficijent koji treba da se izračuna prema sledećem:

Za napone zatezanja paralelne zakošenoj ivici:

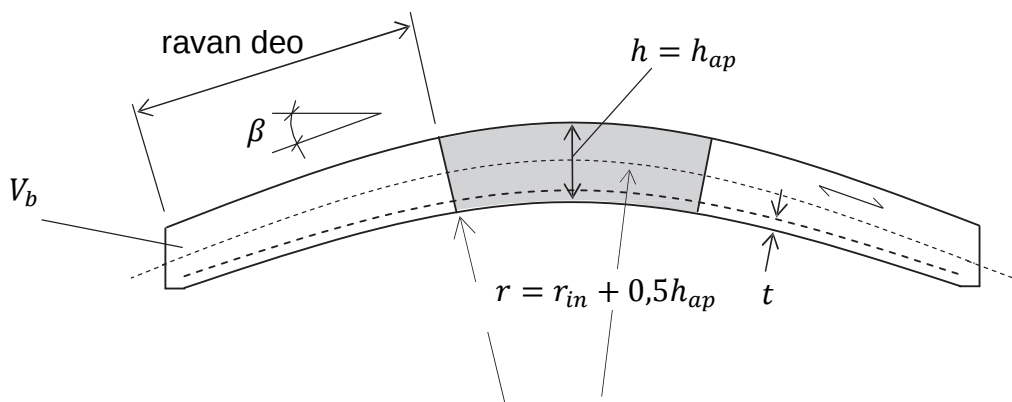
$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{0,75 \cdot f_{v,d}} \cdot \tan \alpha \right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{t,90,d}} \cdot \tan^2 \alpha \right)^2}}$$

Za napone pritiska paralelne zakošenoj ivici:

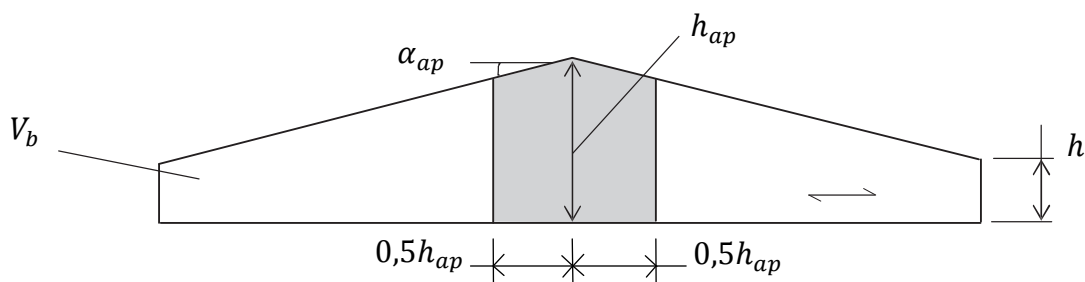
$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1,5 \cdot f_{v,d}} \cdot \tan \alpha \right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \tan^2 \alpha \right)^2}}$$

Dvostrano zakošeni, zakrivljeni i kolenasti nosači

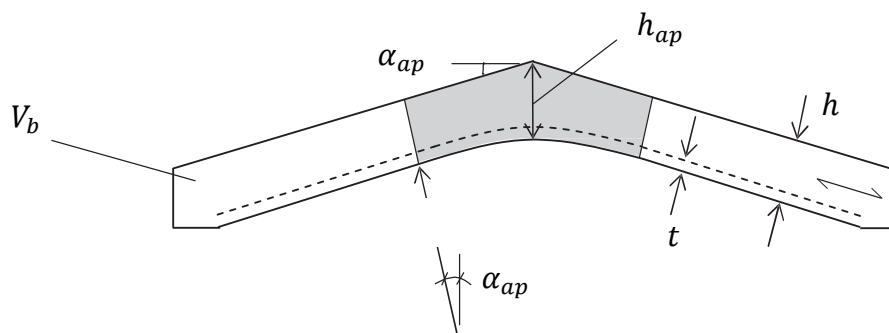
Ovi tipovi nosača prikazani su na Slici 4.15. i imaju pravougaoni poprečni presek. Kritični projektni proračuni za ove nosače isti su kao oni navedeni za jednostrano zakošene nosače. Na graničnom stanju nosivosti (ULS) potrebno je proveriti maksimalni napon smicanja i maksimalni napon savijanja, dok se na graničnom stanju upotrebljivosti (SLS) mora dokazati prihvatljivo ponašanje u pogledu ugiba.



(a) Zakrivljen nosač



(b) Dvostrano zakošen



(c) Kolenast nosač

Slika 4.15. Zakrivljen nosač, dvostrano zakošen i kolenast nosač sa vlaknima paralelnim sa donjom ivicom nosača

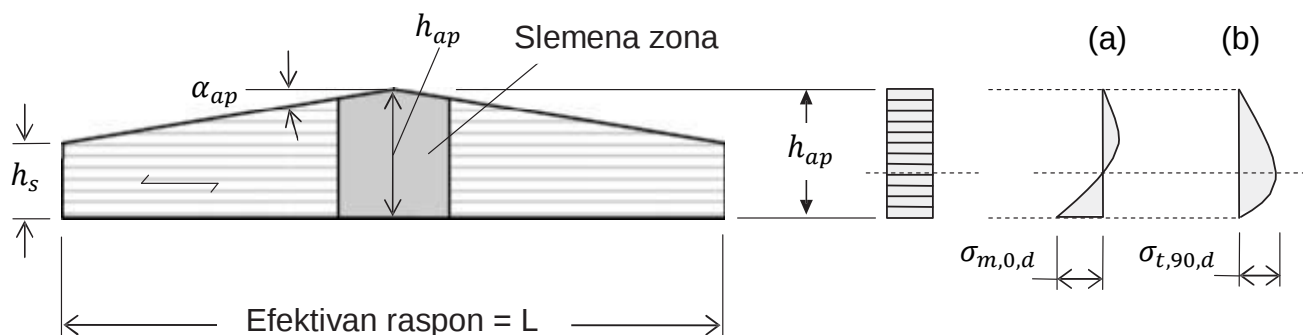
Kod ovih nosača, međutim, pored provera u zoni zakošenja nosača, neophodno je izvršiti i verifikaciju naponskog stanja u slemenoj zoni, pri čemu treba uzeti u obzir uticaj na čvrstoću materijala koji proizilazi iz:

- zaostalih napona nastalih u procesu proizvodnje,
- raspodele napona i zapreminskog efekta,
- kombinacije napona smicanja u slemenoj zoni i napona zatezanja upravno na vlakna, izazvanih savijanjem.

Zapremina materijala u oblasti slemene zone koja je pogođena navedenim naponima zatezanja upravno na vlakna prikazana je na Slici 4.15. Ova zona mora biti ograničena na najviše $2V_b/3$, gde je V_b ukupna zapremina nosača.

Dvostrano zakošen i kolenast nosač

U slemenoj zoni dvostrano zakošenih nosača i kolenastih nosača, raspodela napona savijanja je složena i nelinearna, što je prikazano na Slici 4.16. za dvostrano zakošeni nosač. Napon savijanja u samom slemenu biće jednak nuli, dok će raspodela napona savijanja biti kao na Slici 4.16a. Napon zatezanja upravno na vlakna koji se javlja u preseku dostiže maksimalnu vrednost u položaju neutralne ose, a raspodela ovih napona prikazana je na slici 4.16b.



Slika 4.16. Raspodela napona savijanja i napona zatezanja upravno na vlakna u slemenoj zoni dvostrano zakošenog nosača

U slemenoj zoni, naponi savijanja $\sigma_{m,d}$ treba da zadovolje sledeći uslov:

$$\sigma_{m,d} \leq k_r \cdot f_{m,d}$$

gde je k_r koeficijent kojim se uzima u obzir redukcija čvrstoće usled savijanja lamela u toku izrade nosača i to:

- Za nosače sa dvostranim zakošenjem $k_r = 1,0$;
- Za zakrivljene i kolenaste nosače k_r treba da se uzme kao:

$$k_r = \begin{cases} 1 & \text{za } \frac{r_{in}}{t} \geq 240 \\ 0,76 + 0,001 \cdot \frac{r_{in}}{t} & \text{za } \frac{r_{in}}{t} < 240 \end{cases}$$

gde je:

r_{in} poluprečnik krivine intradosa nosača (videti Sliku 4.15);
 t debljina lamele.

Napon savijanja u slemenom preseku treba da se izračuna prema izrazu:

$$\sigma_{m,d} = k_l \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2}$$

sa:

$$k_l = k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_3 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2 + k_4 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^3$$

$$k_1 = 1 + 1,4 \cdot \tan \alpha_{ap} + 5,4 \cdot \tan^2 \alpha_{ap}$$

$$k_2 = 0,35 - 8 \cdot \tan \alpha_{ap}$$

$$k_3 = 0,6 + 8,3 \cdot \tan \alpha_{ap} - 7,8 \cdot \tan^2 \alpha_{ap}$$

$$k_4 = 6 \cdot \tan^2 \alpha_{ap}$$

$$r = r_{in} + 0,5h_{ap}$$

gde je:

$M_{ap,d}$ proračunska vrednost momenta savijanja u slemenu;

h_{ap} visina nosača u slemenu;

b širina nosača;

r_{in} poluprečnik krivine intradosa nosača;

α_{ap} ugao nagiba zakošene stranice.

U slemenj zoni najveći napon zatezanja upravno na vlakna $\sigma_{t,90,d}$ treba da zadovolji sledeći uslov:

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}$$

sa:

$$k_{vol} = \begin{cases} 1,0 & \text{za monolitno drvo} \\ \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0,2} & \text{za lepljeno lamelirano drvo i LVL} \end{cases}$$

$$k_{dis} = \begin{cases} 1,4 & \text{za dvostrano zakošene i zakrivljene nosače} \\ 1,7 & \text{za kolenaste nosače} \end{cases}$$

gde je:

- k_{dis} koeficijent kojim se uzima u obzir efekat raspodele napona u slemenoj zoni;
- k_{vol} zapreminski koeficijent;
- $f_{t,90,d}$ proračunska vrednost čvrstoće na zatezanje upravno na vlakna;
- V_0 referentna zapremina od 0,01 m³;
- V zapremina slemene zone u m³ (videti sliku 4.15), koja ne treba da bude veća od $2V_b/3$, gde je V_b ukupna zapremina nosača.

Najveći napon zatezanja upravno na vlakna, usled momenta savijanja, treba da se izračuna prema izrazu:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2}$$

ili kao alternativa

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} - 0,6 \cdot \frac{p_d}{b}$$

gde je:

- p_d proračunska vrednost momenta savijanja u slemenu;
- b širina nosača;
- $M_{ap,d}$ proračunska vrednost momenta u slemenu, koji izaziva napon zatezanja na donjoj zakrivljenoj ivici;

sa:

$$k_p = k_5 + k_6 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_7 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2$$

$$k_5 = 0,2 \cdot \tan \alpha_{ap}$$

$$k_6 = 0,25 - 1,5 \cdot \tan \alpha_{ap} + 2,6 \cdot \tan^2 \alpha_{ap}$$

$$k_7 = 2,1 \cdot \tan \alpha_{ap} - 4 \cdot \tan^2 \alpha_{ap}$$

U slučaju kombinovanog dejstva zatezanja upravno na vlakna i smicanja, sledeći uslov treba da se zadovolji:

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1$$

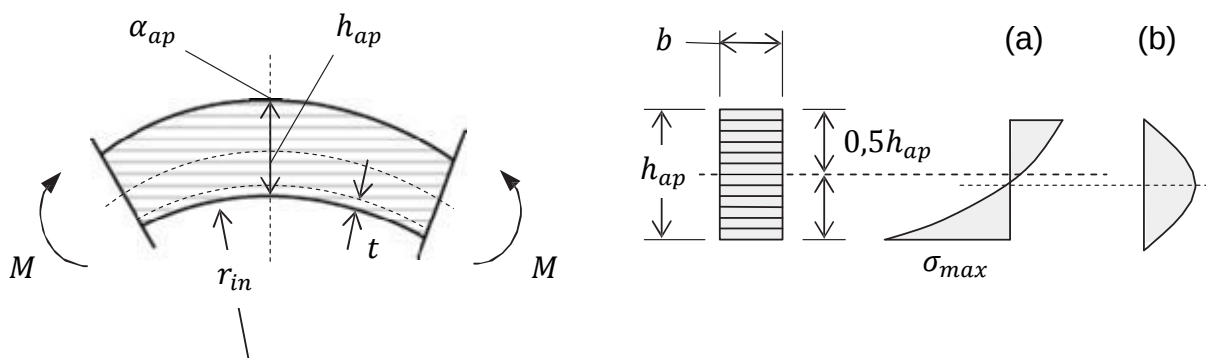
gde je:

τ_d proračunska vrednost smičućeg napona;

$f_{v,d}$ proračunska vrednost čvrstoće na smicanje.

Zakrivljen nosač

Za razliku od slučaja ravnog nosača konstantnog poprečnog preseka, kod zakrivljenog nosača konstantnog preseka opterećenog čistim momentom, kao što je prikazano na slici 4.17, raspodela napona savijanja u presecima duž nosača neće biti linearna. Položaj neutralne ose nalazi se ispod težišne ose, a raspodela napona savijanja biće kao na slici 4.17a, pri čemu se maksimalni napon savijanja javlja na unutrašnjem radijusu preseka. Napon zatezanja upravno na vlakna, koji se javlja u preseku, dostiže maksimalnu vrednost u položaju neutralne ose i nelinearno opada do nule na spoljnim površinama, kao što je prikazano na slici 4.17b.



Slika 4.17. Raspodela napona savijanja i napona zatezanja upravno na vlakna u slemenj zoni zakrivljenog nosača

Napon savijanja u slemenom preseku treba da se izračuna prema izrazu:

$$\sigma_{m,d} = k_{curve,b} \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2}$$

gde je:

$$k_{curve,b} = 1 + 0,35 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + 0,60 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2$$

Najveći napon zatezanja upravno na vlakna, usled momenta savijanja, treba da se izračuna prema izrazu:

$$\sigma_{t,90,d} = k_{curve,t} \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2}$$

gde je:

$$k_{curve,t} = 0,25 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)$$

4.4. Veze ostvarene metalnim spojnim sredstvima

Opšte

Ukoliko nisu data pravila u ovom odeljku, nosivost i krutost spojnih sredstava mora se odrediti na osnovu ispitivanja u skladu sa EN 1075, EN 1380, EN 1381, EN 26891 i EN 28970. Ako referentni standardi opisuju ispitivanje na pritisak i zatezanje, karakteristične vrednosti nosivosti spojnih sredstava moraju da se odrede na osnovu ispitivanja na zatezanje.

Veze sa većim brojem spojnih sredstava

Raspored i dimenzije spojnih sredstava u konstrukcionoj vezi, uključujući njihov međusobni razmak, kao i rastojanja do ivica i krajeva spajanih elemenata, moraju se odrediti tako da se obezbedi postizanje projektovane nosivosti i krutosti veze. Prilikom određivanja rasporeda potrebno je poštovati minimalne dozvoljene razmake kako bi se sprečilo oštećenje materijala oko spojnog sredstva, kao i maksimalne razmake kako bi se izbegla prekomerna deformacija ili smanjenje krutosti.

Posebnu pažnju treba obratiti na činjenicu da nosivost veze koja sadrži veći broj spojnih sredstava istog prečnika i tipa ne mora biti jednaka prostom zbiru nosivosti pojedinačnih spojnih sredstava. U praksi se često javlja efekat međusobnog ometanja (tzv. "grupni efekat"), pri čemu se nosivost po elementu smanjuje zbog interakcije među spojnim sredstvima i promene raspodele opterećenja.

U slučajevima kada je veza izvedena pomoću više različitih tipova spojnih sredstava ili kada se krutost spojnih sredstava u pojedinim spojnim ravnima višesečne veze značajno razlikuje, neophodno je izvršiti proveru njihove kompatibilnosti. Time se obezbeđuje da spojna sredstva deluju usklađeno, bez pojave lokalnog preopterećenja ili prerane deformacije pojedinih elemenata, što bi moglo dovesti do smanjenja ukupne pouzdanosti veze.

Za jedan red spojnih sredstava paralelno vlaknima, efektivna karakteristična vrednost nosivosti paralelno vlaknima, $F_{v,ef,Rk}$, treba da se uzme kao:

$$F_{v,ef,Rk} = n_{ef} \cdot F_{v,Rk}$$

gde je:

- $F_{v,ef,Rk}$ efektivna karakteristična vrednost nosivosti jednog reda spojnih sredstava paralelno vlaknima;
- n_{ef} efektivni broj spojnih sredstava u redu paralelno vlaknima;
- $F_{v,Rk}$ karakteristična vrednost nosivosti pojedinačnog spojnog sredstva paralelno vlaknima.

Za silu koja deluje pod uglom u odnosu na pravac pružanja reda spojnih sredstava, treba da se dokaže da je komponenta sile paralelna sa redom manja ili jednaka nosivosti izračunatoj prema gornjem izrazu.

Višesečne veze

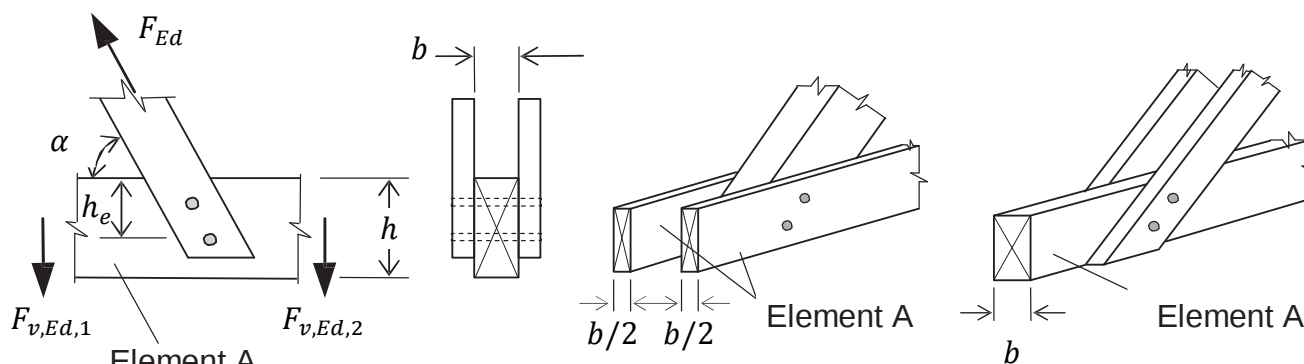
U višesečnim vezama nosivost svake pojedinačne spojne ravni potrebno je proračunati uz pretpostavku da se ona ponaša kao deo veze sastavljene od tri elementa. Ovakav pristup omogućava realniju procenu raspodele opterećenja i potencijalnih zona koncentracije napona unutar svake ravni.

Kada se pristupa kombinovanju nosivosti pojedinačnih spojnih ravni u okviru iste višesečne veze, neophodno je da merodavni tipovi loma spojnih sredstava u svim odgovarajućim spojnim ravnima budu međusobno kompatibilni. Pod kompatibilnošću se podrazumeva da mehanizmi loma (npr. izvlačenje spojnog sredstva, sečenje spojnog sredstva, lom osnovnog materijala) imaju slične deformacione karakteristike i da se razvijaju pri približno istim nivoima opterećenja.

Na taj način se izbegava situacija u kojoj bi u jednoj spojnoj ravni došlo do prevremenog loma, što bi moglo dovesti do preraspodele opterećenja na preostale ravni i izazvati lančanu reakciju preopterećenja, smanjujući ukupnu nosivost i sigurnost veze.

Veze pod uglom u odnosu na vlakna

Kada sila u vezi deluje pod uglom u odnosu na vlakna, Slika 4.18, mora da se uzme u obzir mogućnost cepanja usled komponente sile zatezanja upravne na vlakna, $F_{Ed} \cdot \sin \alpha$.



Slika 4.18. Veze pod uglom

Da bi se uzela u obzir mogućnost cepanja usled komponente sile zatezanja upravne na vlakna, $F_{Ed} \cdot \sin \alpha$, mora da se zadovolji sledeći uslov:

$$F_{v,Ed} \leq F_{90,Rd}$$

sa

$$F_{v,Ed} = \max \begin{cases} F_{v,Ed,1} \\ F_{v,Ed,2} \end{cases}$$

gde je:

- $F_{90,Rd}$ proračunska vrednost čvrstoće pri cepanju, izračunata od karakteristične čvrstoće pri cepanju $F_{90,Rk}$ u skladu sa 2.4.3 EC5;
- $F_{v,Ed,1}, F_{v,Ed,2}$ proračunske vrednosti smičuće sile sa jedne, odnosno sa druge strane veze;
- $F_{v,Rk}$ karakteristična vrednost nosivosti pojedinačnog spojnog sredstva paralelno vlaknima.

Za meko drvo, karakteristična čvrstoća pri cepanju za vezu, data na slici 4.18, treba da se uzme kao:

$$F_{90,Rk} = 14 \cdot b \cdot w \cdot \sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h}\right)}}$$

sa

$$w = \begin{cases} \max \left\{ \left(\frac{w_{pl}}{100} \right)^{0,35} \right. & \text{za nazubljene metalne ploče} \\ 1 & \text{za sva ostala spojna sredstva} \end{cases}$$

gde je:

- $F_{90,Rk}$ karakteristična vrednost čvrstoće pri cepanju;
- w korekcionni koeficijent;
- h_e rastojanje od opterećene ivice do ose najudaljenijeg spojnog sredstva ili ivice metalne nazubljene ploče, u mm;
- h visina drvenog elementa, u mm;
- b širina drvenog elementa, u mm;
- w_{pl} širina nazubljene metalne ploče paralelno vlaknima, u mm.

Alternativne sile u vezi

Karakteristična vrednost nosivosti veze mora da se redukuje ako je veza izložena alternativnim unutrašnjim silama usled srednje trajnih ili dugotrajnih dejstava. Uticaj srednje trajnih i dugotrajnih dejstava na nosivost veze, gde sila varira između proračunske sile zatezanja $F_{t,ed}$ i proračunske sile pritiska $F_{c,ed}$, treba da se uzme u obzir proračunom veze za $F_{t,ed} + 0,5 \cdot F_{c,ed}$ i $F_{c,ed} + 0,5 \cdot F_{t,ed}$.

Nosivost metalnih štapastih spojnih sredstava opterećenih upravno na svoju osu

Pri određivanju karakteristične nosivosti veze, ostvarene metalnim štapastim spojnim sredstvima, moraju da se razmotre doprinosi čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe drveta, tečenja i čvrstoće pri čupanju spojnog sredstva.

Veze drvo–drvo i ploča na bazi drveta – drvo

Karakteristična nosivost eksera, sponki, zavrtnja, trnova i zavrtnja za drvo u spojnoj ravni po spojnom sredstvu treba da se uzme kao najmanja vrednost dobijena iz sledećih izraza:

za jednosečna spojna sredstva:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right.$$

za dvosečna spojna sredstva:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d} \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right.$$

sa

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$$

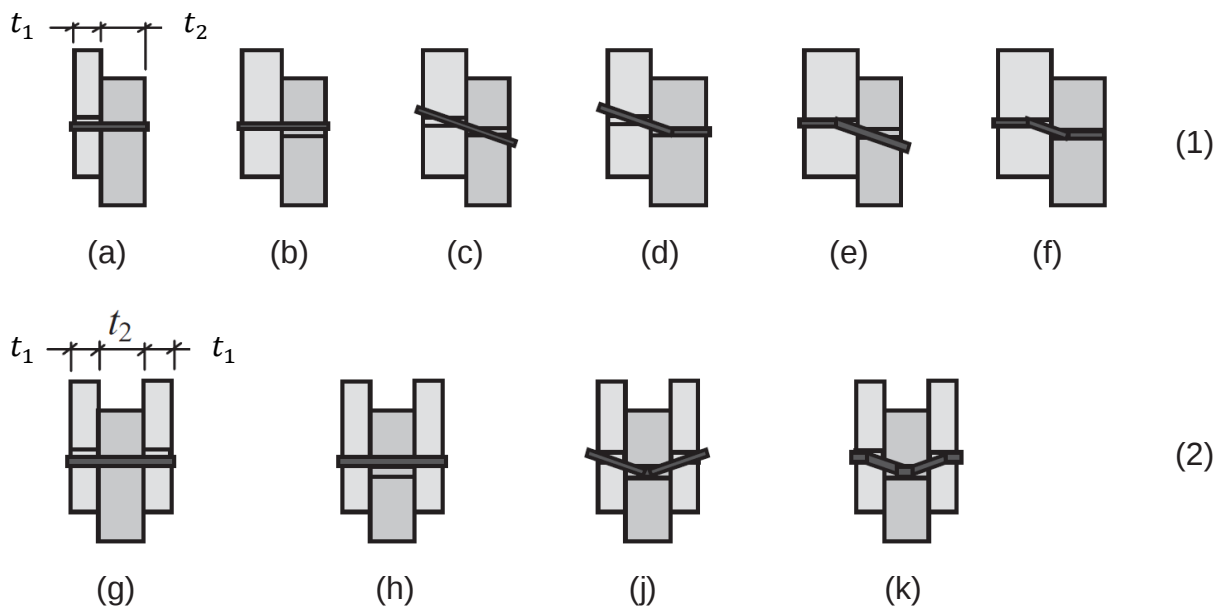
gde je:

- $F_{v,Rk}$ karakteristična vrednost nosivosti spojnog sredstva u spojnoj ravni;
- t_i debljina drveta ili ploče ili dubina zabijanja, sa i jednako 1 ili 2;
- $f_{h,i,k}$ karakteristična vrednost čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe drvenog elementa i ;
- d prečnik spojnog sredstva;
- $M_{y,Rk}$ karakteristična vrednost momenta tečenja spojnog sredstva;
- β odnos između čvrstoća na pritisak po omotaču rupe elemenata;
- $F_{ax,Rk}$ karakteristična vrednost nosivosti na čupanje spojnog sredstva.

U navedenim izrazima, prvi deo izraza iza zagrade je nosivost prema Johansenovoj teoriji tečenja, dok je drugi deo izraza $F_{ax,Rk}/4$ doprinos efekta prijanjanja. Doprinos nosivosti usled efekta prijanjanja treba da se ograniči sledećim procentima u odnosu na Johansenov deo:

- Kružni ekseri 15 %;
- Kvadratni i rebrasti ekseri 25 %;
- Ostale vrste eksera 50 %;
- Zavrtnji za drvo 100 %;
- Zavrtnji 250 %.
- Trnovi 0 %

Ako $F_{ax,Rk}$ nije poznato, onda doprinos efekta prijanjanja treba uzeti kao 0. Za jednosečna spojna sredstva karakteristična vrednost nosivosti na čupanje, $F_{ax,Rk}$, uzima se kao manja vrednost nosivosti u dva elementa. Različiti tipovi loma prikazani su na Slici 4.19.



Slika 4.19. Tipovi loma za veze drvo – drvo i ploče na bazi drveta–drvo:
(1) Jednosečna veza i (2) Dvosečna veza

Ukoliko u daljem tekstu nisu data proračunska pravila, karakteristična vrednost čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe $f_{h,k}$ treba da se odredi u skladu sa EN 383 i EN 14358. Ukoliko u daljem tekstu nisu data proračunska pravila, karakteristična vrednost momenta tečenja $M_{y,Rk}$ treba da se odredi u skladu sa EN 409 i EN 14358.

Slova ispod skica odgovaraju redosledu jednačina u navedenim izrazima.

Veze čelik–drvo

Karakteristična nosivost veze čelik–drvo zavisi od debljine čeličnih ploča. Čelične ploče sa debljinom ne većom od $0,5d$ klasifikovane su kao tanke ploče, a čelične ploče sa debljinom ne manjom od d , sa tolerancijom prečnika rupe manjom od $0,1d$, klasifikovane su kao debele ploče. Karakteristična nosivost veza sa čeličnim pločama debljine između tankih i debelih ploča treba da se izračuna linearnom interpolacijom između graničnih vrednosti za tanke i debele ploče. Nosivost čelične ploče takođe mora da se proveri.

Karakteristična nosivost eksera, zavrtnja, trnova i zavrtnja za drvo u spojnoj ravni po spojnom sredstvu treba da se uzme kao najmanja vrednost dobijena iz sledećih izraza:

za tanke čelične ploče u jednosečnim vezama:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \frac{0,4 \cdot f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d}{1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} \right.$$

za debele čelične ploče u jednosečnim vezama:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right.$$

za čelične ploče kao srednji element dvosečne veze, bez obzira na debljinu:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right.$$

za tanke čelične ploče kao bočni element dvosečne veze:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \frac{0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d}{1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} \right.$$

za debele čelične ploče kao bočni element dvosečne veze:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right.$$

gde je:

$F_{v,Rk}$ karakteristična vrednost nosivosti spojnog sredstva u spojnoj ravni;

$f_{h,k}$ karakteristična vrednost čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe drvenog elementa;

t_1 debljina bočnog drvenog elementa ili dubina zabijanja, u zavisnosti od toga šta je manje;

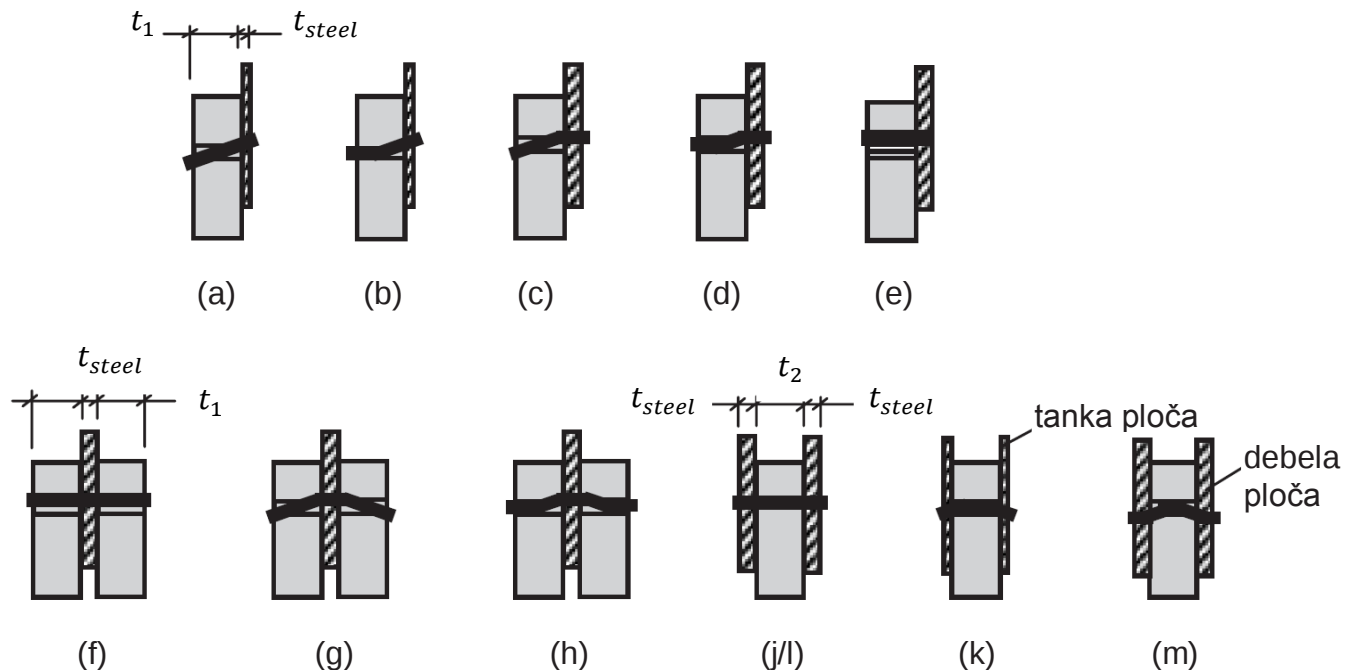
t_2 debljina srednjeg drvenog elementa;

d prečnik spojnog sredstva;

$M_{y,Rk}$ karakteristična vrednost momenta tečenja spojnog sredstva;

$F_{ax,Rk}$ karakteristična vrednost nosivosti na čupanje spojnog sredstva.

Različiti tipovi loma kod veze čelik-drvo prikazani su na Slici 4.20 i slova ispod skica odgovaraju redosledu jednačina u navedenim izrazima.



Slika 4.20. Tipovi loma kod veze čelik-drvo

Mora da se uzme u obzir da nosivost veza čelik-drvo sa opterećenim krajem može da bude smanjena lomom duž obima grupe spojnih sredstava. Ova pojava nastaje kada opterećenje na spoju ne izaziva pojedinačni lom spojnog sredstva, već dovodi do izdvajanja cele grupe iz osnovnog materijala, pri čemu se formira lomna linija koja obuhvata više spojnih sredstava istovremeno. Takav grupni lom obično se javlja kod veza sa većim brojem blisko raspoređenih spojnih sredstava, kada se naponi u zoni između spojnih sredstava preklapaju i dolazi do gubitka kohezije materijala duž spolnog oboda grupe. Posledica je nagli gubitak nosivosti veze, pri čemu je ostvarena nosivost znatno manja od zbira nosivosti pojedinačnih spojnih sredstava. Metoda za određivanje nosivosti grupe spojnih sredstava data je u Prilogu A EC5.

Veze ostvarene ekserima

Ekseri opterećeni upravno na svoju osu

Simboli za debljine u jednosečnoj i dvosečnoj vezi definisani su na sledeći način:

t_1 je:

- debljina prvog elementa za jednosečnu vezu;
- minimum debljine prvog elementa i dubine zabijanja u zadnji element za dvosečnu vezu;

t_2 je:

- dubina zabijanja za jednosečnu vezu;
- debljina srednjeg elementa za dvosečnu vezu.

Prethodno bušenje rupa u drvetu treba da se primeni kada je karakteristična vrednost zapreminske mase drveta veća od 500 kg/m³ i/ili prečnik d eksera veći od 6 mm. Za kvadratne i nazubljene eksere, prečnik eksera d treba da se uzme kao dimenzija strane.

Za glatke eksere proizvedene od žice sa minimalnom čvrstoćom na zatezanje od 600 N/mm², treba da koriste sledeće karakteristične vrednosti za moment tečenja:

$$M_{y,Rk} = \begin{cases} 0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6} & \text{za kružne eksere} \\ 0,45 \cdot f_u \cdot d^{2,6} & \text{za kvadratne i rebraste eksere} \end{cases}$$

gde je:

$M_{y,Rk}$ karakteristična vrednost momenta tečenja spojnog sredstva, u Nmm;

d prečnik eksera kao što je definisano u EN 14592, u mm;

f_u čvrstoća žice pri zatezanju, u N/mm².

Za eksere sa prečnicima do 8 mm važe sledeće karakteristične vrednosti čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe za drvo i LVL:

- bez prethodno izbušenih rupa (zabijeni ekseri):

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} \text{ N/mm}^2$$

- sa prethodno izbušenim rupama (bušeni ekseri):

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \text{ N/mm}^2$$

gde je:

ρ_k karakteristična vrednost zapreminske mase drveta, u kg/m³;

d prečnik eksera, u mm.

Za eksere sa prečnikom većim od 8 mm ne koriste se karakteristične vrednosti čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe koje su propisane za standardne eksere manjih dimenzija. Umesto toga, u proračunu se primenjuju karakteristične vrednosti čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe koje se koriste za veze ostvarene zavrtnjima. Ovo proizilazi iz činjenice da eksere većih prečnika, zbog povećane kontaktne površine i načina prenosa opterećenja, treba tretirati proračunski slično zavrtnjima, jer su im mehanizmi prenosa sile i deformaciono ponašanje slični. Takav pristup obezbeđuje realniju procenu nosivosti veze, naročito u zonama gde su lokalni naponi pri pritisku po omotaču rupe dominantan faktor u određivanju nosivosti.

Za jedan red od n eksera paralelan vlaknima, izuzev ukoliko su ekseri u tom redu smaknuti upravno na vlakna najmanje za $1d$ (videti Sliku 4.21), nosivost paralelno vlaknima treba da se izračuna koristeći efektivan broj spojnih sredstava:

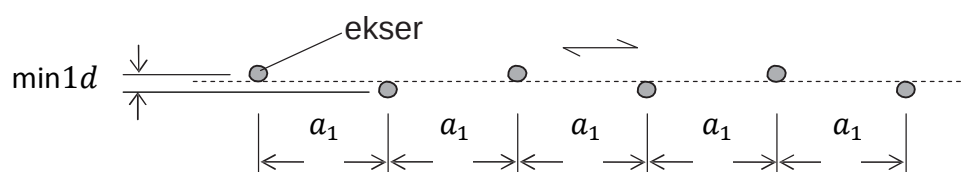
$$n_{ef} = n^{k_{ef}}$$

gde je:

n_{ef} efektivni broj eksera u redu;

n broj eksera u redu;

k_{ef} koeficijent dat u tabeli 4.5.



Slika 4.21. Ekseri u redu paralelnom vlaknima smaknuti za d upravno na vlakna

U vezi treba da budu najmanje dva eksera. Zahtevi za konstrukcijsko oblikovanje i kontrolu veza ostvarenih ekserima dati su u odeljku 10.4.2. EC5.

Tabela 4.5. Vrednosti za k_{ef}

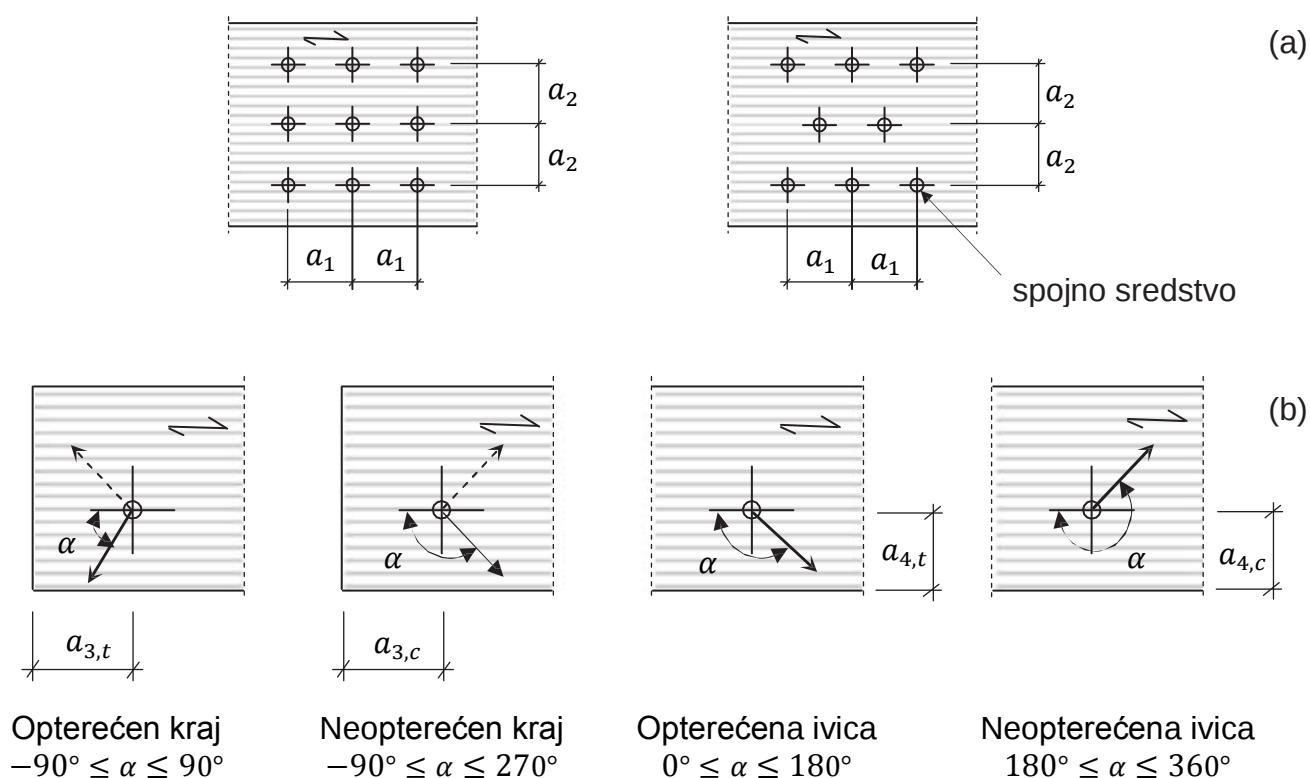
Razmak ^a	k_{ef}	
	Zabijeni ekseri	Bušeni ekseri
$a_1 \geq 14d$	1,00	1,00
$a_1 = 10d$	0,85	0,85
$a_1 = 7d$	0,70	0,70
$a_1 = 4d$	/	0,50
^a Za međuvrednosti se dozvoljava linerna interpolacija.		

Veze drvo–drvo ostvarene ekserima

Za glatke eksere dubina zabijanja u zadnji element treba da bude najmanje $8d$. Za sve ostale eksere, definisane u EN 14592, dubina zabijanja u zadnji element treba da bude najmanje $6d$.

Ekseri u čelu nosača ne treba da se smatraju sposobnim da prenesu sile upravne na svoju osu. Kao alternativa ovoj odredbi, za eksere u čelu nosača važe sledeća pravila:

- Glatki ekseri mogu da se koriste za sekundarne konstrukcije. Primer sekundarne konstrukcije je čeonu dasku krovnog venca koja naleže na rogove. Proračunska vrednost nosivosti eksera treba da se uzme kao $1/3$ vrednosti pune nosivosti.
- Svi ostali ekseri, definisani u EN 14592, mogu da se koriste i za konstrukcije koje nisu sekundarne. Proračunska vrednost nosivosti eksera treba da se uzme kao $1/3$ vrednosti pune nosivosti glatkih eksera ekvivalentnog prečnika, pod uslovom:
 - da su ekseri samo opterećeni upravno na svoju osu;
 - da postoje najmanje tri eksera u vezi;
 - da je dubina zabijanja u zadnje drvo najmanje $10d$;
 - da veza nije izložena uslovima koji odgovaraju eksploatacionoj klasi 3;
 - da su zadovoljeni propisani minimalni razmaci i rastojanja od ivica dati u Tabeli 4.6. i šematski prikazani na Slici 4.22.



Slika 4.22. Razmaci i rastojanja od ivica i krajeva (a) razmaci u redu (paralelni vlaknima) i između redova (upravno na vlakna), (b) rastojanja od ivica i krajeva

Minimalni razmaci i minimalna rastojanja od ivica i od krajeva dati su u Tabeli 4.6 (videti Sliku 4.22), gde je:

- a_1 razmak između eksera u okviru jednog reda, paralelno vlaknima;
- a_2 razmak između redova eksera, upravno na vlakna;
- $a_{3,c}$ rastojanje između eksera i neopterećenog kraja;
- $a_{3,t}$ rastojanje između eksera i opterećenog kraja;
- $a_{4,c}$ rastojanje između eksera i neopterećene ivice;
- $a_{4,t}$ rastojanje između eksera i opterećene ivice;
- α ugao između sile i pravca vlakana.

Tabela 4.6. Minimalni razmaci i minimalna rastojanja od ivica i krajeva za eksere

Razmaci ili rastojanja	Ugao α	Minimalni razmaci ili minimalna rastojanja od ivica i krajeva		
		bez prethodno izbušenih rupa		sa prethodno izbušenim rupama
		$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	$420 \text{ kg/m}^3 < \rho_k \leq 500 \text{ kg/m}^3$	
Razmak a_1 (paralelno vlaknima)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$d < 5 \text{ mm}$ $(5 + 5 \cos\alpha)d$ $d \geq 5 \text{ mm}$ $(5 + 7 \cos\alpha)d$	$(7 + 8 \cos\alpha)d$	$(4 + \cos\alpha)d$
Razmak a_2 (upravno na vlakna)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$5d$	$7d$	$(3 + \sin\alpha)d$
Rastojanje $a_{3,t}$ (opterećen kraj)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$(10 + 5\cos\alpha)d$	$(15 + 5\cos\alpha)d$	$(7 + 5\cos\alpha)d$
Rastojanje $a_{3,c}$ (neopterećen kraj)	$90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$10d$	$15d$	$7d$
Rastojanje $a_{4,t}$ (opterećena ivica)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$d < 5 \text{ mm}$ $(5 + 2\sin\alpha)d$ $d \geq 5 \text{ mm}$ $(5 + 5\sin\alpha)d$	$d < 5 \text{ mm}$ $(7 + 2\sin\alpha)d$ $d \geq 5 \text{ mm}$ $(7 + 5\sin\alpha)d$	$d < 5 \text{ mm}$ $(3 + 2\sin\alpha)d$ $d \geq 5 \text{ mm}$ $(3 + 4\sin\alpha)d$
Rastojanje $a_{4,c}$ (neopterećena ivica)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$5d$	$7d$	$3d$

Prethodno bušenje rupa u drvetu treba da se primeni kada je debljina drvenih elemenata manja od:

$$t = \max \left\{ \begin{array}{l} 7d \\ (13d - 30) \cdot \frac{\rho_k}{400} \end{array} \right.$$

gde je:

- t minimalna debljina drvenog elementa koja ne zahteva prethodno bušenje rupa, u mm;
- ρ_k karakteristična vrednost zapreminske mase, u kg/m³;
- d prečnik eksera, u mm.

Prethodno bušenje rupa u drvetu sklonom cepanju treba da se primeni kada je debljina drvenih elemenata manja od:

$$t = \max \left\{ \begin{array}{l} 14d \\ (13d - 30) \cdot \frac{\rho_k}{200} \end{array} \right.$$

Primeri vrsta drveta koje su sklone cepanju su jela (*Abies alba*), duglazija (*Pseudotsuga menziesii*) i smreka (*Picea abies*).

Veze ploča na bazi drveta - drvo ostvarene ekserima

Minimalni razmaci između eksera za sve veze ploča na bazi drveta-drvo jesu oni dati u Tabeli 4.6 pomnoženi faktorom 0,85. Ivična i krajnja rastojanja za eksere ostaju nepromenjena osim ako u daljem tekstu nije drugačije navedeno.

Minimalna rastojanja od ivica i krajeva za elemente od šperploče treba da se uzmu kao $3d$ od neopterećene ivice (ili kraja) i $(3 + 4 \sin \alpha)d$ od opterećene ivice (ili kraja), gde je α ugao između pravca opterećenja i opterećene ivice (ili kraja).

Za eksere sa prečnikom glave od najmanje $2d$, mogu da se uzmu sledeće karakteristične vrednosti čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe:

- za šperploče:

$$f_{h,k} = 0,11 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3}$$

gde je:

- $f_{h,k}$ karakteristična vrednost čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe, u N/mm²;
- ρ_k karakteristična vrednost zapreminske mase šperploče, u kg/m³;
- d prečnik eksera, u mm.

- za vlaknatice u skladu sa EN 622-2:

$$f_{h,k} = 30 \cdot d^{-0,3} \cdot t^{0,6}$$

gde je:

- $f_{h,k}$ karakteristična vrednost čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe, u N/mm²;

d prečnik eksera, u mm.

t debljina ploče, u mm.

- za iverice i OSB ploče:

$$f_{h,k} = 65 \cdot d^{-0,7} \cdot t^{0,1}$$

gde je:

$f_{h,k}$ karakteristična vrednost čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe, u N/mm²;

d prečnik eksera, u mm.

t debljina ploče, u mm.

Veze čelik-drvo ostvarene ekserima

Važe minimalna rastojanja od ivica i krajeva za eksere data u Tabeli 4.6. Minimalni razmaci između eksera jesu oni dati u tabeli 4.6 pomnoženi faktorom 0,7.

Ekseri opterećeni u pravcu svoje ose

Ekseri opterećeni u pravcu svoje ose koji se koriste za stalna i dugotrajna aksijalna opterećenja moraju da budu sa navojem. Definicija eksera sa navojem data je u EN 14592 i glasi: Ekser koji ima telo profilisano ili obrađeno na delu svoje dužine od minimalno $4,5d$ ($4,5$ puta nazivni prečnik) i sa karakterističnom čvrstoćom pri čupanju $f_{ax,k}$ većom ili jednakom 6 N/mm^2 , izmerenom na drvetu sa karakterističnom vrednošću zapreminske mase od 350 kg/m^3 , kondicioniranom do konstantne mase na temperaturi od 20 °C i relativnoj vlažnosti 65% .

Za eksere sa navojem, samo deo sa navojem treba da se smatra sposobnim da prenese aksijalno opterećenje. Ekseri u čelu nosača ne treba da se smatraju sposobnim da prenesu aksijalno opterećenje.

Karakteristična nosivost eksera na čupanje, $F_{ax,Rk}$, za eksere zabijene upravno na vlakna (Slika 4.23a) i za koso zabijene eksere (Slika 4.23b), treba da se uzme kao manja vrednost određena iz sledećih izraza:

- za sve eksere osim glatkih, kao što je definisano u EN 14592:

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} & (a) \\ f_{head,k} \cdot d_h^2 & (b) \end{cases}$$

- za glatke eksere:

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} & (a) \\ f_{ax,k} \cdot d \cdot t + f_{head,k} \cdot d_h^2 & (b) \end{cases}$$

gde je:

- $f_{ax,k}$ karakteristična vrednost čvrstoće pri čupanju;
- $f_{head,k}$ karakteristična vrednost čvrstoće pri utiskivanju;
- d prečnik eksera;
- t_{pen} dubina zabijanja u zadnji element ili dužina dela sa navojem u zadnjem elementu;
- t debljina prvog elementa;
- d_h prečnik glave eksera.

Karakteristične čvrstoće $f_{ax,k}$ i $f_{head,k}$ treba da se odrede ispitivanjem u skladu sa EN 1382, EN 1383 i EN 14358, osim ako u daljem tekstu nije drugačije utvrđeno.

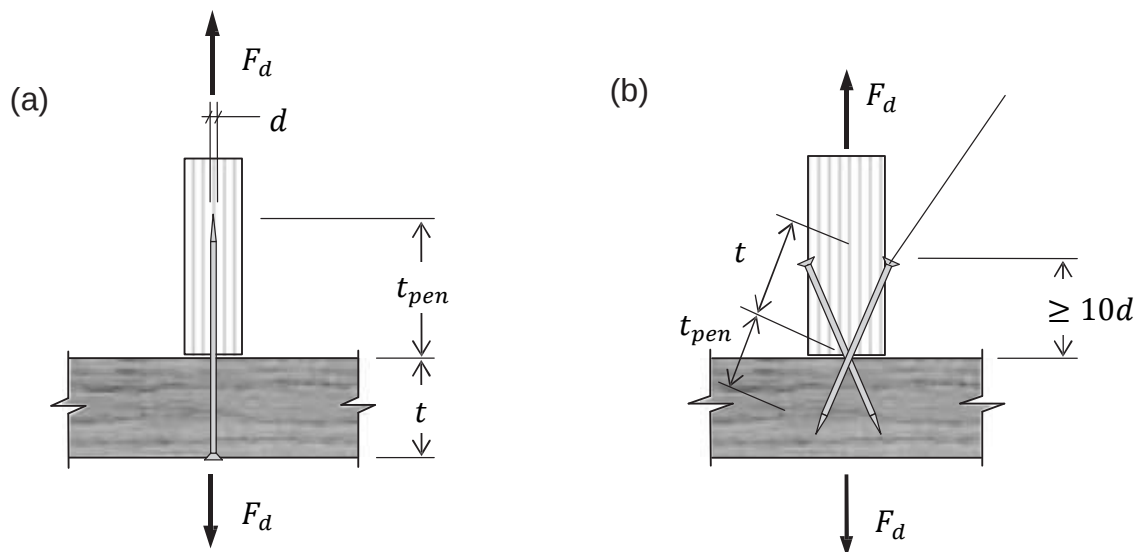
Za glatke esere sa dubinom zabijanja u zadnji element većom od $12d$, karakteristične vrednosti čvrstoća na čupanje i utiskivanje treba da se odrede prema sledećim izrazima:

$$f_{ax,k} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$$

$$f_{head,k} = 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$$

gde je:

ρ_k karakteristična vrednost zapreminske mase drveta, u kg/m^3 .



Slika 4.23. (a) Ekseri zabijeni upravno na vlakna i (b) koso zabijeni ekseri

Za glatke eksere, dubina zabijanja u zadnji element, t_{pen} , treba da bude najmanje $8d$. Za eksere sa dubinom zabijanja u zadnji element manjom od $12d$ nosivost pri čupanju treba da se pomnoži sa $(t_{pen}/4d - 2)$. Za eksere sa navojem, dubina zabijanja u zadnji element treba da bude najmanje $6d$. Za eksere sa dubinom zabijanja u zadnji element manjom od $8d$, nosivost pri čupanju treba da se pomnoži sa $(t_{pen}/2d - 3)$.

Za drvo koje je ugrađeno sa vlažnošću bliskoj tački zasićenosti vlakana i koje se suši pod opterećenjem, vrednosti $f_{ax,k}$ i $f_{head,k}$ treba da se pomnože sa 2/3.

Razmaci, rastojanja od ivica i krajeva za eksere opterećene upravno na svoju osu važe i za eksere opterećene u pravcu svoje ose.

Za koso zabijene eksere, rastojanje od opterećenog kraja treba da bude najmanje $10d$ (videti Sliku 4.23b). U ovakvoj vezi treba da budu najmanje dva koso zabijena eksere.

Kombinovano opterećeni ekseri

Kod veza izloženih istovremenom dejstvu opterećenja u pravcu ose eksera $F_{ax,Ed}$ i opterećenja upravno na osu eksera $F_{v,Ed}$, treba da se zadovolje sledeći uslovi:

- za glatke eksere:

$$\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}} + \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \leq 1$$

- za sve eksere osim glatkih, kao što je definisano u EN 14592:

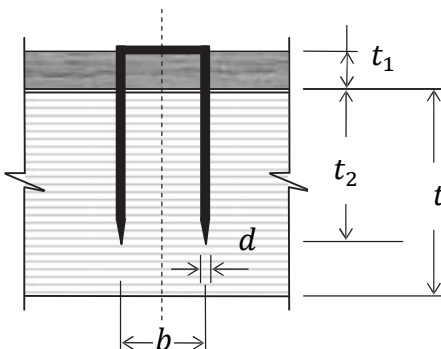
$$\left(\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right)^2 \leq 1$$

gde su: $F_{ax,Rd}$ i $F_{v,Rd}$ proračunske vrednosti nosivosti veze sa opterećenjem samo u pravcu ose eksera ili samo upravno na osu eksera.

Veze ostvarene sponkama

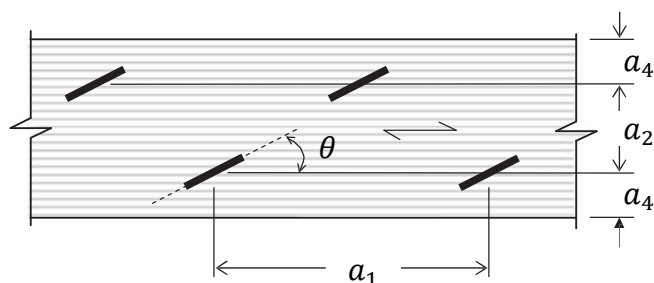
Pravila data za veze ostvarene ekserima, izuzev preporuke za sračunavanje karakteristične vrednosti za moment tečenja, važe za kružne, približno kružne i pravougaone sponke, sa jednostrano zakošenim ili običnim šiljcima. Za sponke pravougaonog poprečnog preseka, ekvivalentni prečnik d treba da se uzme kao kvadratni koren proizvoda dimenzija poprečnog preseka.

Širina krune sponki b treba da bude najmanje $6d$, a dužina zabijanja t_2 treba da bude najmanje $14d$ (videti Sliku 4.24). U vezi treba da je najmanje dve sponke.



Slika 4.24. Dimenzije sponke

Proračunska vrednost nosivosti sponki u spojnoj ravni može da se uzme kao ekvivalentna nosivosti dva eksera sa prečnikom sponke, ako je ugao između krune sponke i pravca vlakana drveta veći od 30° , videti Sliku 4.25. Ako je ugao između krune sponke i pravca vlakana jednak ili manji od 30° , proračunsku vrednost nosivosti treba pomnožiti sa faktorom 0,7.



Slika 4.25. Definisane oznake za razmake i rastojanja za sponke

Za sponke napravljene od žice sa minimalnom čvrstoćom pri zatezanju od 800 N/mm^2 , treba da se koristi sledeća karakteristična vrednost za moment tečenja po jednoj nožici:

$$M_{y,Rk} = 240 \cdot d^{2,6}$$

gde je:

$M_{y,Rk}$ karakteristična vrednost momenta tečenja, u Nmm;
 d prečnik nožice sponke, u mm.

Tabela 4.7. Minimalni razmaci i minimalna rastojanja od ivica i krajeva za sponke

Razmaci ili rastojanja	Ugao α	Minimalni razmaci ili minimalna rastojanja od ivica i krajeva
a_1 (paralelno vlaknima) za $\theta \geq 30^\circ$ za $\theta < 30^\circ$	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(10 + 5 \cos\alpha)d$ $(15 + 5 \cos\alpha)d$
a_2 (upravno na vlakna)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$15d$
$a_{3,t}$ (opterećen kraj)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$(15 + 5 \cos\alpha)d$
$a_{3,c}$ (neopterećen kraj)	$90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$15d$
$a_{4,t}$ (opterećena ivica)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$(15 + 5 \sin\alpha)d$
$a_{4,c}$ (neopterećena ivica)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$10d$

Za red od n sponki paralelan vlaknima, nosivost paralelno vlaknima treba da se izračuna korišćenjem efektivnog broja spojnih sredstava n_{ef} .

Minimalni razmaci između sponki, minimalna rastojanja od ivica i krajeva dati su u Tabeli 4.7 i prikazani su na slici 4.25, gde je θ ugao između krune sponke i pravca vlakana.

Veze ostvarene zavrtnjima

Zavrtnji opterećeni upravno na svoju osu

Veze drvo-drvo ostvarene zavrtnjima

Za zavrtnje treba da se koristi sledeća karakteristična vrednost momenta tečenja:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$$

gde je:

- $M_{y,Rk}$ karakteristična vrednost momenta tečenja, u Nmm;
 $f_{u,k}$ karakteristična vrednost čvrstoće na zatezanje, u N/mm²;
 d prečnik zavrtnja, u mm.

Za zavrtnje prečnika do 30 mm, treba da se koristi sledeća karakteristična vrednost čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe za drvo i LVL, pod uglom α u odnosu na vlakna:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k$$

gde je:

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015 \cdot d & \text{za meko drvo} \\ 1,30 + 0,015 \cdot d & \text{za LVL} \\ 0,90 + 0,015 \cdot d & \text{za tvrdo drvo} \end{cases}$$

i:

- $f_{h,0,k}$ karakteristična vrednost čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe paralelno vlaknima, u N/mm²;
 ρ_k karakteristična vrednost zapreminske mase drveta, u kg/m³;
 α ugao između opterećenja i vlakana;
 d prečnik zavrtnja, u mm.

Minimalne razmake i minimalna rastojanja od ivica i krajeva treba uzeti prema Tabeli 4.8, sa simbolima prikazanim na Slici 4.22.

Za jedan red od n zavrtnja paralelan vlaknima, nosivost paralelno vlaknima treba da se izračuna korišćenjem efektivnog broja zavrtnja n_{ef} :

$$n_{ef} = \min \left\{ n, n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \right\}$$

Za opterećenja upravna na vlakna, efektivni broj spojnih sredstava treba da se uzme kao:

$$n_{ef} = n$$

gde je:

- a_1 razmak između zavrtnja u pravcu vlakana;
- d razmak između zavrtnja u pravcu vlakana;
- n broj zavrtnja u redu.

Za uglove $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ između opterećenja i pravca vlakana, n_{ef} može da se odredi linearnom interpolacijom između vrednosti ovih izraza.

Tabela 4.8. Minimalni razmaci i minimalna rastojanja od ivica i krajeva za zavrtnje

Razmaci ili rastojanja	Ugao α	Minimalni razmaci ili minimalna rastojanja od ivica i krajeva
a_1 (paralelno vlaknima)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 + \cos\alpha)d$
a_2 (upravno na vlakna)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$4d$
$a_{3,t}$ (opterećen kraj)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7d; 80 \text{ mm})$
$a_{3,c}$ (neopterećen kraj)	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$	$(1 + 6\sin\alpha)d$
	$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$	$4d$
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$(1 + 6 \sin\alpha)d$
$a_{4,t}$ (opterećena ivica)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max[(2 + 2\sin\alpha)d; 3d]$
$a_{4,c}$ (neopterećena ivica)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

Veze ploča na bazi drveta - drvo ostvarene zavrtnjima

Karakteristična vrednost čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe za šperploču, za bilo koji ugao u odnosu na vlakna površinskih slojeva, treba da se izračuna prema izrazu:

$$f_{h,k} = 0,11 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k$$

Karakteristična vrednost čvrstoće pri pritisku po omotaču rupe za ivericu i OSB ploču, za bilo koji ugao u odnosu na vlakna površinskih slojeva, treba da se izračuna prema izrazu:

$$f_{h,k} = 50 \cdot d^{-0,6} \cdot t^{0,2}$$

gde je:

- ρ_k karakteristična vrednost zapreminske mase šperploče, u kg/m^3 ;
- d prečnik zavrtnja, u mm;
- t debljina ploče, u mm.

Veze čelik–drvo ostvarene zavrtnjima

Važe pravila data za nosivost metalnih štapastih spojnih sredstava opterećenih upravno na svoju osu kod veze čelik–drvo.

Zavrtnji opterećeni u pravcu svoje ose

Aksijalna nosivost i nosivost na čupanje zavrtnja treba da se uzme kao manja vrednost od:

- čvrstoće zavrtnja pri zatezanju;
- nosivosti podložne pločice ili nosivosti čelične ploče (za veze čelik-drvo).

Nosivost podložne pločice treba da se izračuna usvajanjem karakteristične vrednosti čvrstoće pri pritisku na kontaktnoj površini od $3f_{c,90,k}$.

Nosivost čelične ploče, po jednom zavrtnju, ne treba da prelazi nosivost kružne podložne pločice sa prečnikom čija dimenzija je minimum od:

- $12t$, gde je t debljina ploče;
- $4d$, gde je d prečnik zavrtnja.

Veze ostvarene trnovima

Veze ostvarene trnovima projektuju se i proračunavaju prema pravilima koja važe za zavrtnjeve opterećene upravno na svoju osu, budući da je mehanizam prenosa opterećenja sličan kod oba tipa spojnih sredstava. Prečnik trna treba da bude veći od 6 mm i manji od 30 mm. U proračunu potrebno je obratiti pažnju na minimalne dozvoljene razmake prema ivicama i između trnova, kako bi se izbeglo cepanje ili lokalno gnječenje materijala.

Minimalni razmaci i minimalna rastojanja od ivica i krajeva treba da se uzmu prema Tabeli 4.9, sa simbolima prikazanim na Slici 4.22.

Tabela 4.9. Minimalni razmaci i minimalna rastojanja od ivica i krajeva za trnove

Razmaci ili rastojanja	Ugao α	Minimalni razmaci ili minimalna rastojanja od ivica i krajeva
a_1 (paralelno vlaknima)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + 2 \cos\alpha)d$
a_2 (upravno na vlakna)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$
$a_{3,t}$ (opterećen kraj)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7d; 80 \text{ mm})$
$a_{3,c}$ (neopterećen kraj)	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$ $150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$ $210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$\max(a_{3,t} \sin\alpha d; 3d)$ $3d$ $\max(a_{3,t} \sin\alpha d; 3d)$
$a_{4,t}$ (opterećena ivica)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max[(2 + 2\sin\alpha)d; 3d]$
$a_{4,c}$ (neopterećena ivica)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

Veze ostvarene zavrtnjima za drvo

Zavrtnji za drvo opterećeni upravno na svoju osu

Efekat dela sa navojem zavrtnja za drvo mora da se uzme u obzir pri određivanju nosivosti, koristeći efektivni prečnik d_{ef} .

Pravila data za nosivost metalnih štapastih spojnih sredstava opterećenih upravno na svoju osu važe za zavrtnje za drvo kod kojih je spoljni prečnik navoja jednak prečniku glatkog dela vrata zavrtnja, pod uslovom da:

- Za efektivni prečnik d_{ef} uzima se prečnik glatkog dela vrata zavrtnja;
- Dubina prodiranja glatkog dela vrata zavrtnja u zadnji element je najmanje $4d$.

Kada ovi uslovi nisu ispunjeni, nosivost zavrtnja za drvo treba da se izračuna uzimanjem da je efektivni prečnik d_{ef} jednak 1,1 puta prečnik zavrtnja u korenu navoja.

Pravila data za zavrtnjeve opterećene upravno na svoju osu važe za zavrtnje za drvo sa prečnikom glatkog dela vrata većim od 6 mm. Pravila data za eksere opterećene upravno na svoju osu važe za zavrtnje za drvo sa prečnikom glatkog dela vrata jednakim ili manjim od 6 mm.

Zavrtnji za drvo opterećeni u pravcu svoje ose

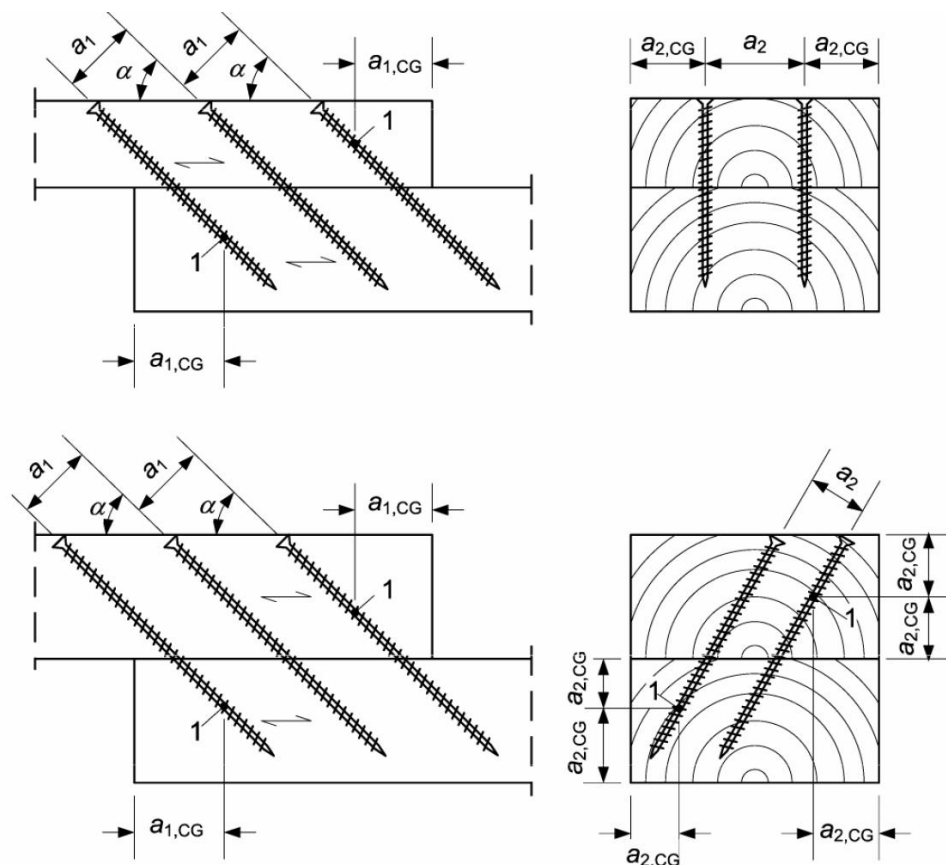
Prilikom provere nosivosti aksijalno opterećenih zavrtnja sledeći tipovi loma moraju da se uzmu obzir:

- lom pri čupanju dela zavrtnja sa navojem;
- lom pri kidanju glave zavrtnja korišćenih u kombinaciji sa čeličnim pločama (nosivost pri kidanju glave zavrtnja treba da bude veća od čvrstoće zavrtnja pri zatezanju);
- lom pri utiskivanju glave zavrtnja;
- lom zavrtnja pri zatezanju;
- lom pri izvijanju zavrtnja opterećenog na pritisak;
- lom duž obima grupe zavrtnja, za zavrtnje za drvo u kombinaciji sa čeličnim pločama.

Minimalni razmaci i minimalna rastojanja od ivica i krajeva za zavrtnje opterećene u pravcu svoje ose, videti Sliku 4.26, treba da se uzmu prema tabeli 4.10, uz uslov da je $t \geq 12d$. Minimalna dubina prodiranja dela zavrtnja sa navojem u zadnji element treba da bude $6d$.

Tabela 4.10. Minimalni razmaci i rastojanja od ivica i krajeva za osovinski opterećene zavrtnje

Minimalni razmaci zavrtnja u ravni paralelnoj vlaknima a_1	Minimalni razmaci zavrtnja upravnih na ravan paralelnu vlaknima a_2	Minimalno rastojanje težišta dela zavrtnja sa navojem od kraja elementa $a_{1,cg}$	Minimalno rastojanje težišta dela zavrtnja sa navojem od ivice elementa $a_{2,cg}$
$7d$	$5d$	$10d$	$4d$



Slika 4.26. Razmaci i rastojanja od krajeva i ivica elementa [8]

Za veze sa zavrtnjima za drvo u skladu sa EN 14592 i uslovima $6 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm}$ i $0,6 \leq d_1/d \leq 0,75$ gde je d spoljni prečnik navoja i d_1 unutrašnji prečnik navoja, karakteristična vrednost nosivosti pri čupanju treba da se uzme prema sledećem izrazu:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot k_d}{1,2 \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}$$

gde je:

$$f_{ax,k} = 0,52 \cdot d^{-0,5} \cdot l_{ef}^{-0,1} \cdot \rho_k^{0,8}$$

$$k_d = \min \left\{ \frac{d}{8}, 1 \right\}$$

$F_{ax,\alpha,Rk}$ karakteristična vrednost nosivosti pri čupanju veze pod uglom α u odnosu na vlakna, u N;

$f_{ax,k}$ vrednost čvrstoće pri čupanju upravno na vlakna, u N/mm^2 ;

n_{ef} efektivni broj zavrtnja,

l_{ef} dubina prodiranja dela sa navojem u zadnji element, u mm;

ρ_k karakteristična vrednost zapreminske mase, u kg/mm^3 ;

α ugao osovine zavrtnja u odnosu na vlakna, sa $\alpha \geq 30^\circ$.

Kada uslovi u pogledu spoljašnjeg i unutrašnjeg prečnika navoja nisu zadovoljeni, karakteristična vrednost nosivosti pri čupanju $F_{ax,\alpha,Rk}$, treba da se uzme prema sledećem izrazu:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{1,2 \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8}$$

gde je:

$f_{ax,k}$ karakteristična vrednost čvrstoće pri čupanju upravno na vlakna, određena u skladu sa EN 14592 za odgovarajuću vrednost zapreminske mase ρ_a ;

ρ_k odgovarajuća vrednost zapreminske mase za $f_{ax,k}$, u kg/m^3 .

Karakteristična nosivost pri utiskivanju veze sa zavrtnjima za drvo opterećenim u pravcu svoje ose treba da se uzme kao:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} \cdot f_{head,k} \cdot d_h^2 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8}$$

gde je:

$F_{ax,\alpha,Rk}$ karakteristična vrednost nosivosti veze pri utiskivanju pod uglom α u odnosu na vlakna, u N, sa $\alpha \geq 30^\circ$;

$f_{head,k}$ karakteristična vrednost čvrstoće zavrtnja pri utiskivanju, određena u skladu sa EN 14592 za odgovarajuću vrednost zapreminske mase ρ_a ;

d_h prečnik glave zavrtnja u mm.

Karakteristična nosivost veze pri zatezanju (kidanje glave ili čvrstoća pri zatezanju tela zavrtnja bez navoja), $F_{t,Rk}$, treba da se uzme kao:

$$F_{t,Rk} = n_{ef} \cdot f_{tens,k}$$

gde je:

$f_{tens,k}$ karakteristična čvrstoća pri zatezanju zavrtnja određena u skladu sa EN 14592;

n_{ef} efektivni broj zavrtnja.

Za veze ostvarene većim brojem zavrtnja za drvo, opterećene komponentom sile u pravcu ose zavrtnja, efektivni broj zavrtnja za drvo dat je kao:

$$n_{ef} = n^{0,9}$$

gde je n broj zavrtnja za drvo koji zajedno deluju u vezi.

Kombinovano opterećeni zavrtnji za drvo

Kod veze ostvarene zavrtnjima za drvo izložene istovremenom dejstvu opterećenja u pravcu ose i upravno na osu zavrtnja, treba da se važe uslovi dati za kombinovano opterećene eksere.

5. DRVENE KONSTRUKCIJE U EKOLOŠKOM GRAĐEVINARSTVU

5.1. Održivi dizajn u drvenim konstrukcijama

Održivi dizajn u drvenim konstrukcijama podrazumeva primenu principa održivosti u celokupnom procesu projektovanja, izgradnje i korišćenja drvenih objekata. Cilj je da se minimiziraju negativni ekološki uticaji tokom celokupnog životnog ciklusa zgrade, od nabavke materijala, preko gradnje, do demontaže i reciklaže na kraju životnog veka objekta. Drvo, kao materijal koji je prirodno obnovljiv, nudi značajne prednosti u ovom kontekstu, ali njegovo korišćenje mora biti pažljivo usmereno kako bi se postigao maksimalni ekološki učinak.

Ključni principi održivog dizajna u drvenim konstrukcijama uključuju:

Odgovorno upravljanje šumama i sertifikacija

Odgovorno upravljanje šumama podrazumeva održavanje ravnoteže između ekoloških, ekonomskih i društvenih aspekata šumskog ekosistema. Šume predstavljaju ključan resurs za gradnju drvenih konstrukcija, ali prekomerna ili neodgovorna seča može dovesti do deforestacije, gubitka biodiverziteta i narušavanja životnih uslova lokalnih zajednica. Sertifikati poput FSC (Forest Stewardship Council) i PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification) igraju važnu ulogu u garantovanju da proces proizvodnje drveta prati principe održivosti.

Ključne prednosti sertifikovanog drveta

- **Zaštita biodiverziteta:** Sertifikovane šume su upravljane tako da se štiti raznovrsnost biljnih i životinjskih vrsta. To uključuje očuvanje staništa ugroženih vrsta, zaštitu rečnih tokova, zemljišta i prirodnih resursa.
- **Obezbeđivanje obnovljivosti resursa:** Sertifikacija osigurava da se drvo seče u skladu sa planovima koji omogućavaju prirodnu regeneraciju šuma. Ovo podrazumeva ograničenja u količini drveta koje se može iseći i vreme potrebno za obnavljanje, kao i sprovođenje proaktivnih mera poput pošumljavanja i sadnje novih stabala.
- **Socijalna odgovornost:** Ovi standardi garantuju da se prava lokalnih i autohtonih zajednica poštuju. To uključuje pristup šumskim resursima, zapošljavanje lokalnog stanovništva i poboljšanje njihovog životnog standarda kroz fer poslovne prakse.
- **Prevenција ilegalne seče:** Sertifikovani lanci snabdevanja prate poreklo drveta kroz transparentne i strogo kontrolisane procese, čime se eliminiše ilegalna seča, koja često nanosi nepovratnu štetu ekosistemima i podriva lokalne ekonomije. Sertifikacija pruža mehanizme za praćenje i verifikaciju izvora drveta, čime osigurava poštovanje zakona i promoviše odgovorno poslovanje u industriji drveta.
- **Smanjenje uticaja na klimatske promene:** Odgovorno upravljanje šumama pomaže u očuvanju šumskih površina koje apsorbuju ugljen-dioksid. Održive prakse seče sprečavaju gubitak skladištenog ugljenika i degradaciju zemljišta, što doprinosi borbi protiv globalnog zagrevanja.

Uloga sertifikata FSC i PEFC

- **FSC (Forest Stewardship Council):** FSC sertifikat garantuje da je drvo proizvedeno u skladu s visokim ekološkim, socijalnim i ekonomskim standardima. Sertifikacija obuhvata stroge kriterijume koji se odnose na očuvanje šuma, održivo upravljanje resursima i transparentnost lanca snabdevanja.
- **PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification):** PEFC sertifikat fokusira se na priznavanje lokalnih standarda održivog upravljanja šumama, koji su usklađeni s međunarodnim smernicama. PEFC omogućava da se nacionalni standardi održivosti prilagode specifičnostima lokalnih zajednica i ekosistema, istovremeno ih usklađujući sa globalnim principima.

Sertifikati FSC i PEFC nisu samo oznake kvaliteta, već i potvrda posvećenosti, održivosti i odgovornosti prema prirodi i društvu. Kada se drvo sa sertifikatom koristi u građevini, investitori i projektanti mogu biti sigurni da doprinose očuvanju životne sredine. Ovo uključuje ne samo izbor materijala, već i promociju održivih praksi kroz građevinski sektor. Sve češće, sertifikacija postaje ključni uslov u javnim nabavkama i ekološkim standardima koji se primenjuju u građevinarstvu. Odgovorno upravljanje šumama i sertifikacija nisu samo koraci ka održivosti, već i način da se obezbedi ravnoteža između potreba sadašnje generacije i očuvanja resursa za buduće generacije. Uvođenjem sertifikovanog drveta u gradnju, doprinosi se zaštiti prirodnih ekosistema, unapređenju socijalne pravde i smanjenju štetnog uticaja na klimu, čineći drvene konstrukcije integralnim delom globalne održivosti.

Lokalno poreklo drveta

Korišćenje lokalnog drveta smanjuje emisiju ugljen-dioksida koja nastaje prilikom transporta materijala, čime se smanjuje potrošnja fosilnih goriva i negativan uticaj na životnu sredinu. Osim toga, lokalna proizvodnja i upotreba drvenih materijala podržava lokalnu ekonomiju kroz otvaranje radnih mesta u šumarstvu, drvnoj industriji i građevinarstvu, čime se obezbeđuje finansijska stabilnost lokalnih zajednica. Ovaj pristup takođe smanjuje zavisnost od globalnih lanaca snabdevanja, čineći projekte manje podložnim kašnjenjima i poremećajima uzrokovanim ekonomskim, političkim ili ekološkim krizama. Na taj način, lokalno drvo ne samo da doprinosi održivosti, već i jača otpornost zajednica i osigurava stabilnost u procesu gradnje.

- **Smanjenje ugljeničnog otiska transporta:** Korišćenje drveta iz lokalnih izvora značajno smanjuje emisiju ugljen-dioksida povezanu s transportom materijala. Dugački lanci snabdevanja često uključuju transport brodovima, kamionima ili vozovima, što povećava emisije gasova sa efektom staklene bašte. Lokalno nabavljeno drvo zahteva minimalne udaljenosti za prevoz, čime se umanjuje negativan uticaj na životnu sredinu.
- **Podrška lokalnoj ekonomiji:** Odabir lokalnih proizvođača drveta podstiče razvoj lokalne ekonomije, zadržava finansijska sredstva unutar zajednice i otvara radna mesta u sektoru šumarstva, prerade drveta i gradnje. Ovo doprinosi stabilnosti zajednice i jačanju regionalnih resursa, istovremeno smanjujući zavisnost od uvoza.
- **Bolja kontrola kvaliteta i održivosti:** Kada se drvo nabavlja lokalno, lakše je proveriti način na koji je proizvedeno, uključujući prakse održivog šumarstva i usklađenost sa standardima sertifikacije (poput FSC-a). Transparentnost u lancu snabdevanja omogućava projektantima i izvođačima da biraju materijale koji su zaista ekološki prihvatljivi.

- **Prilagođenost lokalnim klimatskim uslovima:** Lokalno drvo često je prilagođeno specifičnim klimatskim uslovima regije, čime pruža bolje performanse u pogledu otpornosti na vlagu, temperaturne promene i druge faktore. Na primer, vrste drveta koje su prirodno otporne na vlagu idealne su za oblasti sa visokim padavinama.
- **Smanjenje rizika od poremećaja u lancu snabdevanja:** Globalni lanci snabdevanja često su podložni kašnjenjima i poremećajima usled ekonomskih, političkih ili klimatskih kriza. Oslanjanje na lokalne izvore drveta smanjuje ovu ranjivost, omogućavajući stabilniju i pouzdaniju nabavku materijala.
- **Kulturni i estetski aspekti:** Korišćenje lokalnog drveta može doprineti očuvanju regionalnog identiteta i tradicionalnih tehnika gradnje. Na primer, autohtone vrste drveta često imaju jedinstvene estetske karakteristike koje odražavaju prirodni i kulturni pejzaž regije. Integracija ovih elemenata u arhitektonske projekte doprinosi autentičnosti i prepoznatljivosti objekta.

Zaključno, fokus na lokalno poreklo drveta nije samo ekološki opravdan, već donosi i ekonomske, funkcionalne i kulturne prednosti koje obogaćuju svaki projekat održivog dizajna. Time se postiže ravnoteža između očuvanja prirodnih resursa i podrške lokalnim zajednicama, dok se istovremeno podstiče razvoj inovativnih, estetski privlačnih i ekološki odgovornih rešenja. Ovakav pristup doprinosi stvaranju održive graditeljske prakse koja zadovoljava trenutne potrebe, a pritom ne ugrožava resurse budućih generacija.

Obnovljivi izvori energije u proizvodnji

Korišćenje obnovljivih izvora energije u svim fazama proizvodnje drvenih materijala igra ključnu ulogu u smanjenju ekološkog otiska održivih konstrukcija. Energetski intenzivni procesi, kao što su sušenje drveta, sečenje, obrada i proizvodnja prefabrikovanih elemenata, mogu značajno doprineti emisijama ukoliko se oslanjaju na fosilna goriva. Primena obnovljivih izvora energije omogućava da ovaj proces bude ekološki prihvatljiviji i doprinosi održivosti celokupnog projekta.

- **Solarna energija:** Solarna energija može se koristiti u raznim fazama proizvodnje drvenih konstrukcija. Postavljanjem solarnih panela na krovove proizvodnih hala, moguće je obezbediti energiju za rad mašina i osvetljenje postrojenja. Solarna energija je naročito pogodna za postrojenja smeštena u sunčanim područjima.
- **Vetrogeneratori:** U regijama sa konstantnim vetrovima, vetrogeneratori mogu predstavljati izvor čiste energije za proizvodne pogone. Energija vetra koristi se za napajanje mašina koje obrađuju drvo, dok njen višak može biti iskorišćen za druge industrijske procese ili lokalne zajednice. Ovaj vid energije takođe može doprineti smanjenju zavisnosti od neobnovljivih izvora u ruralnim područjima gde se drvna industrija često razvija.
- **Hidroenergija:** U blizini reka ili vodotokova, mala hidroelektrana može biti održiv način snabdevanja proizvodnih kapaciteta energijom. Hidroenergija je pouzdan izvor čiste energije koji omogućava kontinuiran rad postrojenja, posebno u industrijskim zonama s pristupom vodenim resursima.
- **Biomasa i drvni otpad:** Drvna industrija sama generiše velike količine otpada, poput piljevine, iverja i ostataka drvenih trupaca. Ovi materijali mogu se koristiti kao gorivo za proizvodnju energije u postrojenjima. Energetski sistemi na bazi biomase omogućavaju

kružno upravljanje resursima, smanjujući otpad i zamenu fosilnih goriva. Korišćenjem drvnog otpada za grejanje ili proizvodnju električne energije, moguće je dodatno smanjiti ugljenični otisak.

Prednosti korišćenja obnovljivih izvora energije

- **Smanjenje emisija:** Prelazak na obnovljive izvore značajno smanjuje emisiju ugljen-dioksida i drugih zagađujućih gasova.
- **Niži troškovi na duži rok:** Iako početna ulaganja u obnovljive izvore mogu biti visoka, dugoročno smanjuju operativne troškove zbog nižih cena energije.
- **Energetska nezavisnost:** Lokalna proizvodnja energije iz obnovljivih izvora smanjuje zavisnost od fosilnih goriva i eksternih dobavljača.
- **Podrška cirkularnoj ekonomiji:** Kombinovanjem biomase s drugim obnovljivim izvorima energije, drvna industrija doprinosi zatvaranju ciklusa proizvodnje i minimalizaciji otpada.

Primena obnovljivih izvora energije u proizvodnji drvenih materijala predstavlja korak ka održivoj budućnosti. Korišćenjem solarne, vetrovne, hidroenergije i biomase, moguće je stvoriti energetske efikasne procese koji minimalno utiču na životnu sredinu. Time se ne samo doprinosi očuvanju prirodnih resursa već se obezbeđuje i dugoročna održivost drvne industrije kao jednog od ključnih sektora u ekološkoj gradnji.

Dugotrajnost i ciklus života konstrukcije

Dugotrajnost drvenih konstrukcija direktno zavisi od pravilnog projektovanja, odabira materijala, tehnika obrade i održavanja tokom upotrebe. Drvo ima veliku sposobnost dugotrajnog očuvanja, naročito kada se koristi u kontrolisanim uslovima. Održivi dizajn uzima u obzir životni vek zgrade i korišćenje materijala koji će dugo trajati, smanjujući potrebu za čestim obnovama ili popravkama. Takođe, na kraju životnog veka zgrade, drvo se može reciklirati ili ponovo iskoristiti u novim projektima.

U kontekstu održivog dizajna, fokus je na maksimiziranju životnog veka zgrade i minimiziranju njenog ukupnog ekološkog otiska kroz sledeće aspekte:

- **Dugotrajnost kroz pravilnu zaštitu drveta:** Drvo je osetljivo na vlagu, pa je ključno obezbediti odgovarajuću hidroizolaciju i ventilaciju. Korišćenje krovnih nadstrešnica, pravilnog temeljenja i ventilisanih fasada značajno produžava vek drvenih konstrukcija. Impregnacija drveta ili korišćenje prirodno otpornih vrsta, poput ariša ili tikovine, smanjuje rizik od oštećenja izazvanih insektima, gljivicama i plesnima. Primena protivpožarnih premaza i tehnika konstrukcije koje usporavaju širenje plamena povećavaju sigurnost objekta.
- **Planiranje dugog životnog ciklusa:** Održivi dizajn uključuje projektovanje objekata koji zahtevaju minimalno održavanje i omogućavaju lako prilagođavanje promenama u budućnosti. Modularni i fleksibilni dizajni omogućavaju jednostavno prilagođavanje unutrašnjih prostora bez potrebe za velikim rekonstrukcijama.
- **Održavanje i upravljanje zgradom:** Kvalitetno projektovane i izgrađene drvene konstrukcije mogu trajati vekovima uz pravilno održavanje. To podrazumeva redovne inspekcije, premazivanje zaštitnim slojevima i brzo rešavanje eventualnih problema, kao što su oštećenja izazvana vlagom ili štetočinama.

- **Reciklaža i ponovna upotreba drveta:** Na kraju životnog veka zgrade, drvo predstavlja vredan materijal koji se može reciklirati ili prenameniti. Drvo može biti usitnjeno i korišćeno za proizvodnju drvenih ploča, izolacionih materijala ili biogoriva. Elementi poput greda, dasaka ili panela mogu se direktno iskoristiti u novim projektima, čime se smanjuje potreba za eksploatacijom novih resursa. Ako drvo nije tretirano štetnim hemikalijama, može se kompostirati, vraćajući organsku materiju u prirodni ciklus.
- **Minimalizacija otpada kroz kružnu ekonomiju:** Projektovanjem za demontažu (eng. design for disassembly), elementi drvenih konstrukcija mogu se lako rastaviti, sortirati i prenameniti. Ovo ne samo da smanjuje količinu otpada, već i smanjuje emisije povezane s proizvodnjom novih materijala.
- **Ekološka vrednost u životnom ciklusu:** Drvo tokom svog životnog ciklusa funkcioniše kao prirodni skladištar ugljen-dioksida. Korišćenjem drveta u gradnji, ugljenik ostaje „zaključan“ tokom trajanja zgrade, što doprinosi smanjenju emisije ugljeničnih gasova. Čak i nakon završetka životnog veka zgrade, drveni materijali zadržavaju ovu ekološku vrednost kroz reciklažu i prenamenu.

Dugotrajnost i optimizacija ciklusa života drvenih konstrukcija ključni su za održivi dizajn. Pravilno projektovanje i održavanje ne samo da produžavaju životni vek konstrukcije, već smanjuju ukupne ekološke i finansijske troškove. Uvođenjem kružne ekonomije u građevinsku industriju, drvo postaje ne samo održiv već i regenerativan materijal, čime doprinosi očuvanju prirodnih resursa i zdravijem životnom okruženju.

Kombinacija drvenih materijala sa drugim ekološkim materijalima

U održivom dizajnu, drvo se često kombinuje sa drugim ekološkim materijalima kao što su reciklirani beton, prirodni izolatori (npr. konoplja, ovsen vlakna), i ekološke boje i lakovi koji ne sadrže štetne hemikalije. Ova kombinacija omogućava stvaranje zdravih, energetski efikasnih zgrada koje imaju minimalan uticaj na životnu sredinu.

- **Reciklirani beton:** Beton, iako je jedan od najzastupljenijih materijala u građevinskoj industriji, ima visok ugljenični otisak zbog procesa njegove proizvodnje. Međutim, reciklirani beton predstavlja održivu alternativu. Upotreba starog betona, na primer betonskih ploča i građevinskog otpada, smanjuje potrebu za novim resursima i doprinosi smanjenju otpada na deponijama. Kombinovanjem drvenih konstrukcija s recikliranim betonom, može se ostvariti značajan energetski balans – drvo osigurava termoizolaciju, dok beton doprinosi stabilnosti i dugovečnosti strukture. Reciklirani beton može se koristiti za temelje, zidove ili podove, dok drvo doprinosi lakoći i fleksibilnosti gornjih konstrukcija (kao što su drveni okviri, krovovi i fasade). Ovaj spoj omogućava dizajn koji je izdržljiv, a ujedno i energetski efikasan.
- **Prirodni izolatori (npr. konoplja, ovsen vlakna):** U održivim drvenim konstrukcijama, važan aspekt je upotreba prirodnih izolacijskih materijala koji smanjuju potrošnju energije za grejanje i hlađenje, kao i emisije CO₂. Prirodni izolatori, poput konoplje, ovsenih vlakana, pamuka, drvenih vlakana ili celuloze, nude ekološki prihvatljive alternative sintetičkim izolacijama kao što su polistiren i poliuretanske pene. Konoplja je brzo rastuća biljka koja zahteva minimalno zemljište i vodu. Njena vlakna se koriste u obliku ploča za termoizolaciju i zvučnu izolaciju, a takođe su biološki razgradiva i imaju visok kapacitet upijanja ugljen-dioksida tokom svog rasta. Pored toga, konoplja ima prirodnu otpornost na

plesan, štetočine i vlagu, što je čini idealnom za upotrebu u vlažnijim klimama. Ovsena vlakna su takođe prirodan materijal koji pruža visoke termoizolacijske karakteristike, s niskim uticajem na životnu sredinu tokom proizvodnje. Osim toga, ovsena vlakna su lako dostupna i obnovljiva. U kombinaciji s drvetom, ova vlakna omogućavaju zdravu unutrašnju klimu i minimalizuju potrebu za veštačkim grejanjem i hlađenjem objekta.

- **Ekološki boje i lakovi:** Upotreba ekoloških boja i lakova je ključna za očuvanje kvaliteta unutrašnje atmosfere u održivim drvenim konstrukcijama. Tradicionalni lakovi i boje sadrže štetne hemikalije koje mogu negativno uticati na zdravlje korisnika prostora, kao i na životnu sredinu. S druge strane, ekološke boje i lakovi sastoje se od prirodnih sastojaka, poput biljnih smola, mineralnih pigmenata i biljnih ulja, koji ne emituju štetne gasove i imaju niži uticaj na okolinu. Ove boje ne samo da su bezbednije za upotrebu, već obezbeđuju i bolju zaštitu od vlage i štetočina na drvenim površinama. Ekološki premazani drveni materijali su dugotrajniji i lakši za održavanje, čime se produžava vek trajanja objekta i smanjuje potreba za obnovom.

Kombinacija drvenih materijala s ekološkim materijalima kao što su reciklirani beton, prirodni izolatori i ekološki boje pruža niz prednosti. Ova kombinacija ne samo da poboljšava energetske performanse objekta, već omogućava stvaranje zdrave i udobne unutrašnje atmosfere. Korišćenje ovih materijala takođe doprinosi smanjenju ugljeničnog otiska građevinskog sektora i smanjuje negativan uticaj na okolinu. Kroz pametan izbor materijala i njihovih kombinacija, održivi dizajn može značajno poboljšati kvalitet života, istovremeno minimizirajući štetu koju građevinske aktivnosti nanose planeti. Kombinacija drvenih materijala sa drugim ekološkim materijalima omogućava stvaranje energetski efikasnih, dugotrajnih i ekološki prihvatljivih objekata. Ovaj pristup podržava kružnu ekonomiju i dugoročnu održivost, dok istovremeno poboljšava kvalitet prostora za korisnike.

5.2. Korišćenje recikliranog i obnovljivog drveta

U vremenu kada se svet suočava s ozbiljnim ekološkim krizama poput klimatskih promena, deforestacije i prekomerne proizvodnje otpada, pronalaženje održivih rešenja postalo je imperativ. Prirodni resursi, uključujući šume, nalaze se pod sve većim pritiskom usled rastuće potražnje za sirovinama i energijom. U tom kontekstu, korišćenje recikliranog i obnovljivog drveta izdvaja se kao jedan od ključnih koraka ka održivom razvoju. Ova praksa ne samo da omogućava zadovoljenje ljudskih potreba za drvetom bez prekomernog iscrpljivanja prirodnih šuma, već pruža i niz dodatnih ekoloških, ekonomskih i društvenih benefita. Reciklirano drvo pomaže u smanjenju otpada i ponovnoj upotrebi materijala, dok obnovljivo drvo, uzgajano na održiv način, osigurava stabilne zalihe sirovine uz minimalan uticaj na životnu sredinu.

Reciklirano drvo

Reciklirano drvo odnosi se na drvene materijale koji su već korišćeni, ali su prerađeni kako bi se upotrebili u novim projektima. To mogu biti stare drvene grede, podovi, nameštaj, ili otpadni materijali iz drvne industrije. Recikliranje drveta podrazumeva procese kao što su skidanje starih premaza, rezanje, brušenje i obrada, kako bi materijal ponovo bio upotrebljiv. Ovaj proces ne samo da smanjuje potrebu za sečom novih stabala, već takođe doprinosi smanjenju otpada, stvarajući ekonomičan i ekološki prihvatljiv materijal za dalju upotrebu.

Vrste recikliranog drveta

- **Drvo iz demoliranih objekata:** Ovo drvo dolazi sa starih zgrada, mostova ili drugih građevinskih struktura koje su srušene ili renovirane. Uklonjeni materijali često uključuju drvene grede, plafonske obloge, vrata ili prozore. Ova vrsta drveta poznata je po svojoj dugotrajnosti, kvalitetu i često jedinstvenom vizuelnom izgledu, sa godovima i patinom koji pričaju priču o njenoj istoriji.
- **Reciklirani nameštaj i proizvodi:** Stariji nameštaj, drveni podovi, ormari, stolice i drugi proizvodi često se razmontiraju kako bi se delovi drveta ponovo iskoristili. Na primer, daske sa starinskih stolova mogu se koristiti za pravljenje polica, dok se segmenti starih podova mogu transformisati u dekorativne zidne obloge.
- **Industrijski otpad:** Ostaci drveta iz drvne industrije, kao što su piljevina, odbačene daske ili neispravni proizvodi, takođe se mogu reciklirati. Ovaj otpad se često prerađuje u ivericu, MDF ploče ili druge kompozitne materijale.
- **Drveni elementi iz transportne industrije:** Stare palete, sanduci i transportni kontejneri od drveta često se razmontiraju i njihovi delovi koriste za različite građevinske ili zanatske projekte.

Prednosti korišćenja recikliranog drveta

- **Smanjenje uticaja na šume i ekosistem:** Recikliranjem drveta smanjuje se potreba za sečom novih stabala, što doprinosi očuvanju šuma i smanjuje negativan uticaj na prirodna staništa. Ovaj proces pomaže u očuvanju globalnog biodiverziteta i usporava trendove krčenja šuma.
- **Smanjenje otpada:** Recikliranjem drveta značajno se smanjuje količina drvnog otpada koji bi inače završio na deponijama. To doprinosi smanjenju emisije metana, gasa staklene bašte koji se oslobađa tokom raspadanja organskog materijala na deponijama.
- **Niži energetska trošak:** Proces obrade recikliranog drveta često troši manje energije nego seča, transport i obrada sirovog drveta. Ovo smanjenje energetske potrošnje doprinosi i manjoj emisiji ugljen-dioksida.
- **Jedinstven dizajn:** Reciklirano drvo pruža mogućnosti za stvaranje unikatnih komada, bilo da se koristi u arhitekturi, enterijerima ili umetnosti. Njegov rustični i autentični izgled daje poseban karakter prostoru, često nedostižan sa potpuno novim materijalima.
- **Ekonomičnost:** Iako početni troškovi obrade mogu biti viši, dugoročno korišćenje recikliranog drveta može biti ekonomičnije zbog njegove izdržljivosti i višestruke upotrebe.

Upotrebom recikliranog drveta doprinosi se smanjenju ekološkog otiska građevinskih i industrijskih projekata. Povećanjem svesti i potražnje za ovim materijalom, podstiče se razvoj održivih praksi koje imaju potencijal da transformišu građevinsku i drvnu industriju u celini.

Obnovljivo drvo

Obnovljivo drvo dolazi iz šuma i plantaža koje se održivo upravljaju. Ove šume se sade i seku planski, u skladu sa strogo definisanim standardima, kako bi se očuvao biodiverzitet i osigurala kontinuirana obnova šumskog pokrivača. Proces uključuje planiranu sadnju novih stabala na mestu posečenih, čime se šumski resursi održavaju za buduće generacije. Sertifikacije poput FSC (Forest Stewardship Council) i PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification) igraju ključnu ulogu u osiguravanju da je drvo poreklom iz održivih izvora. Ove oznake garantuju da proizvodni proces uzima u obzir ekološke, socijalne i ekonomske faktore.

Vrste obnovljivog drveta

- **Brzo rastuće vrste drveća:** Brzo rastuće vrste, kao što su vrba, topola, eukaliptus i određene vrste bora, predstavljaju važan izvor obnovljivog drveta. Ova stabla dostižu zrelost u relativno kratkom vremenskom periodu, često u roku od 5 do 15 godina, čime se ubrzava proces obnavljanja. Drvo ovih vrsta koristi se za širok spektar namena, uključujući proizvodnju papira, nameštaja, građevinskih materijala i energetskih peleta.
- **Plantaže drveća:** Plantaže drveća su specijalno dizajnirani prostori gde se stabla uzgajaju pod kontrolisanim uslovima. Ove plantaže se vode tako da optimizuju prinos drveta, uz minimalan uticaj na okolinu. U plantažama se često koristi selektivna sadnja vrsta koje odgovaraju lokalnim klimatskim uslovima i potrebama tržišta. Primera radi, plantaže bambusa (tehnički trava, ali često korišćena kao drvo) obezbeđuju brz rast i široku primenu, uključujući podove, građevinske materijale i tekstile.
- **Agrošumarstvo:** Kombinovanje uzgoja drveta sa poljoprivrednim kulturama u agrošumarskim sistemima omogućava dodatnu produktivnost zemljišta. Ovi sistemi pružaju obnovljivi izvor drveta, dok istovremeno poboljšavaju plodnost tla, smanjuju eroziju i povećavaju biodiverzitet.

Prednosti korišćenja obnovljivog drveta

- **Održiva proizvodnja:** Drvo sa održivo upravljanih plantaža omogućava stalnu obnovu resursa. Sadjom novih stabala posle svake seče obezbeđuje se kontinuirana proizvodnja, čime se drvo iz obnovljivih izvora pretvara u trajno dostupan materijal. Održiva proizvodnja podrazumeva i minimalno narušavanje prirodnog staništa, uz kontrolisano korišćenje zemljišta i voda, čime se obezbeđuje balans između ljudskih potreba i ekoloških prioriteta.
- **Manje krčenje prirodnih šuma:** Upotreba drveta iz plantaža smanjuje pritisak na prirodne šumske ekosisteme, koji često imaju ključnu ulogu u očuvanju globalnog biodiverziteta. Plantaže, uzgajane uz održive prakse, obezbeđuju stabilne zalihe drveta za industrijske i građevinske potrebe, smanjujući potrebu za sečom starih i netaknutih šuma. Na taj način, prirodne šume mogu biti zaštićene kako bi se očuvala staništa ugroženih vrsta, podržali složeni ekosistemi i očuvala ravnoteža koja utiče na globalnu klimu, ciklus vode i kvalitet zemljišta.
- **Manji uticaj na životnu sredinu:** Plantaže obnovljivog drveta često primenjuju praksu ekološki prihvatljivog uzgoja. Ove prakse uključuju minimalnu upotrebu hemikalija, očuvanje kvaliteta zemljišta i vode, i stvaranje skloništa za divlje životinje.
- **Ekonomičnost i dostupnost:** Plantaže omogućavaju stabilne i predvidive zalihe drveta, što doprinosi nižim troškovima proizvodnje i većoj dostupnosti materijala na tržištu. To je posebno značajno za industrije koje se oslanjaju na drvo kao osnovnu sirovinu.
- **Raznovrsnost primene:** Obnovljivo drvo se koristi u širokom spektru industrija, uključujući građevinarstvo, proizvodnju nameštaja, energetiku (biomasa) i proizvodnju papira. Njegova svestranost, uz održivost, čini ga ključnim resursom za budućnost.

Obnovljivo drvo ima potencijal da promeni način na koji koristimo šumske resurse. Uz primenu održivih metoda, ovaj materijal postaje most između ljudskih potreba i očuvanja prirode. Plantaže i šume obnovljivog drveta stvaraju radna mesta, pružaju lokalnim zajednicama dodatne prihode i doprinose globalnoj borbi za smanjenje ekološkog otiska. Promovisanje i širenje svesti o važnosti obnovljivog drveta ključno je za stvaranje ekološki balansirane budućnosti.

Proces obrade recikliranog drveta

Obrada recikliranog drveta zahteva precizne korake kako bi se osigurala maksimalna iskorišćenost materijala, očuvanje njihovog kvaliteta i bezbedna upotreba u novim projektima. To uključuje pažljivo planiranje svakog koraka u lancu obrade, od prikupljanja sirovina do finalnog proizvoda, uz primenu ekološki prihvatljivih tehnologija i postupaka. Ovi procesi su ključni za stvaranje održivih proizvoda koji zadovoljavaju zahteve modernih industrija, kao i za minimizaciju uticaja na životnu sredinu kroz smanjenje otpada, energetske efikasne proizvodnje i očuvanje prirodnih resursa.

Obrada recikliranog drveta obuhvata nekoliko ključnih koraka:

- 1. Prikupljanje:** Prvi korak u procesu obrade recikliranog drveta je prikupljanje materijala sa različitih lokacija, uključujući demolirane građevinske objekte, odbačeni nameštaj i proizvode, industrijski otpad iz drvne industrije kao i građevinski i komunalni otpad. Rušenje građevinskih objekata obuhvata vađenje starih greda, podova, vrata, prozorskih okvira, krovnih konstrukcija i drugih elemenata koji su pogodni za ponovnu upotrebu. Reciklirano drvo se prikuplja i iz starog nameštaja poput stolica, stolova, ormara, polica, kao i iz manjih predmeta poput drvenih ukrasa i kutija. Piljevina, odbačene daske, greške u proizvodnji, kraće komade drveta ili ostatke obrade često prikupljaju pogoni za reciklažu kako bi se ponovo koristili za proizvodnju iverice, peleta ili drugih drvnih proizvoda. Pored direktnih izvora, reciklirano drvo može dolaziti iz centara za reciklažu otpada, gde se selektuje i odvaja iz građevinskog i komunalnog otpada. Prikupljanje često zahteva organizaciju specijalizovanih timova za demontažu, kako bi se materijali uklonili pažljivo i sa minimalnim oštećenjima. Ovaj proces uključuje pažljivo razmontiranje struktura, selektivno uklanjanje materijala i sortiranje drveta prema vrsti, veličini i stanju. Osim fizičkog rada, važan je i logistički aspekt – organizacija transporta do centara za reciklažu ili radionica za obradu. Dodatno, neki materijali zahtevaju procenu potencijalnih toksičnih supstanci, poput olovnih boja ili tretmana konzervansima, što uključuje specijalnu opremu i postupke za sigurno rukovanje. Ovaj pažljiv pristup osigurava da se maksimalan deo materijala može ponovo koristiti, smanjujući otpad i štedeći prirodne resurse.
- 2. Priprema i čišćenje:** Nakon prikupljanja, drvo prolazi kroz temeljni proces pripreme i čišćenja kako bi postalo pogodna sirovina za dalju obradu i ponovnu upotrebu. Proces pripreme obuhvata uklanjanje eksera, šrafova, spajalica i drugih metalnih delova. Ovaj korak je ključan kako bi se sprečilo oštećenje alata tokom obrade i osigurala bezbednost u rukovanju drvetom. Metalni delovi se uklanjaju pomoću magneta, specijalizovanih mašina ili ručnog alata, poput klešta i detektora metala, kako bi se identifikovale i uklonile skrivene komponente. Proces čišćenja obuhvata grubo uklanjanje starih slojeva boje, laka ili lepkova, kako bi se otkrila prirodna struktura drveta i omogućila nova obrada. Da bi se eliminisali štetni organizmi poput insekata, buđi ili gljivica, drvo se tretira ekološki prihvatljivim biocidima, izlaže toplotnoj obradi ili fumigaciji. Ovaj korak osigurava da drvo bude higijenski ispravno i sigurno za upotrebu, posebno u enterijerima i građevinskim projektima. Nakon čišćenja, drvo se sortira prema kvalitetu i veličini. Oštećeni delovi se uklanjaju ili izdvajaju za sekundarnu upotrebu, dok se očuvani segmenti pripremaju za dalju obradu. U slučajevima kada drvo ima manja oštećenja, pukotine ili ogrebotine, ono se može popraviti upotrebom smola, lepkova ili umetaka od drveta. Ovaj korak produžava trajnost i estetsku vrednost materijala. Ova faza je od suštinskog značaja za postizanje

visokog kvaliteta recikliranog drveta, jer osigurava da je materijal očišćen, stabilan i spreman za nove namene.

3. **Obrada:** Pripremljeno drvo prolazi kroz detaljan proces obrade kako bi se osiguralo da ispunjava standarde kvaliteta, funkcionalnosti i estetike. Svaki korak u ovom procesu ima za cilj maksimizaciju potencijala materijala i njegovo prilagođavanje specifičnim namenama. Prvi korak u obradi pripremljenog drveta jeste prilagođavanje njegovih dimenzija specifičnim zahtevima projekta. Za precizno sečenje koriste se različite vrste testera (poprečne, kružne, trakaste) kako bi se drvo seklo u skladu s tehničkim crtežima i zahtevima projekta. Precizno sečenje smanjuje otpad i omogućava optimalnu upotrebu svakog komada drveta. Izrada uniformnih oblika je posebno važna za projekte u kojima je potrebno više identičnih delova, poput parketa, panela ili građevinskih elemenata. Brušenje je ključni proces koji obezbeđuje glatke površine i uklanjanje starih slojeva, poput boje, laka ili prljavštine. Prvo se koriste abrazivni materijali grublje granulacije kako bi se uklonili veći ostaci premaza i izravnale neravnine. Nakon grube obrade, koristi se fina granulacija za postizanje glatke i estetski privlačne površine. Kod delova s delikatnim detaljima, poput ukrasnih elemenata, koristi se ručno brušenje kako bi se očuvali originalni detalji. Da bi se povećala funkcionalnost ili estetska vrednost, drvo se može kombinovati s dodatnim materijalima. Epoksidne smole se često koriste za popunjavanje pukotina ili oštećenja, čime se postiže dodatna čvrstoća i vizuelni efekat (npr. „river table“ stolovi). Dodavanje metalnih ukrasa, spojeva ili nogara daje modernu i industrijsku notu drvenim proizvodima. U kombinaciji sa staklom, drvo se koristi za izradu stolova, vrata ili drugih dekorativnih predmeta.
4. **Testiranje i sertifikacija:** Da bi reciklirano drvo bilo bezbedno i efikasno za ponovnu upotrebu, mora proći stroge testove koji obezbeđuju njegov kvalitet, sigurnost i dugotrajnost. Ovi procesi su ključni za izgradnju poverenja među korisnicima i za ispunjavanje standarda u industriji građevinarstva, nameštaja i dekoracije. Testira se sposobnost drveta da izdrži različite vrste opterećenja, uključujući pritisak, savijanje i udarce. Ovi testovi su posebno važni za drvo koje će se koristiti u konstrukcionim elementima, poput greda ili podnih obloga. Proverava se da li drvo ima pukotine, šupljine ili unutrašnje oštećenje koje bi moglo ugroziti njegovu stabilnost. Ovo se često radi rendgenskim snimanjem ili ultrazvučnim metodama. Takođe, ispituje se i prisustvo potencijalno štetnih hemikalija, poput ostataka starih boja koje mogu sadržavati olovo ili premaza koji sadrže formaldehid. Proverava se da li je drvo tretirano protiv insekata, gljivica i buđi kako bi se osiguralo da neće uzrokovati zdravstvene probleme ili štetu u prostoru gde se koristi. Utvrđuje se da li drvo zadržava svoje dimenzije tokom temperaturnih promena i izloženosti vodi. Stručnjaci pregledaju materijal i proveravaju njegovu istoriju, uključujući poreklo, prethodnu upotrebu i način obrade. Uzorci drveta šalju se u akreditovane laboratorije gde prolaze detaljne analize. Nakon uspešno završenih testova, izdaje se sertifikat koji potvrđuje da materijal ispunjava zahteve za određene primene, bilo da je to u građevini, enterijeru ili industriji nameštaja.

Obrada recikliranog drveta zahteva pažljivo planiranje i stručno upravljanje kako bi se osiguralo maksimalno iskorišćenje resursa uz minimalan uticaj na prirodu. Ovi procesi omogućavaju transformaciju drveta u visokokvalitetne proizvode, doprinoseći održivosti u građevinskoj industriji. Njihova primena je ključ za očuvanje šuma i stvaranje ekološki odgovorne budućnosti.

Ekološki i ekonomski benefiti recikliranog i obnovljivog drveta

Održivo upravljanje prirodnim resursima sve više postaje prioritet u globalnom naporu da se ublaže posledice klimatskih promena i očuva prirodna ravnoteža. Korišćenje recikliranog i obnovljivog drveta nije samo ekološki svestan izbor već i praktičan način da se odgovori na rastuće potrebe industrije i društva uz smanjenje štetnog uticaja na životnu sredinu postižući balans između ekoloških i ekonomskih ciljeva, stvarajući održivu osnovu za buduće generacije.

Ekološki benefiti

- **Očuvanje šuma:** Korišćenjem recikliranog drveta produžava se životni ciklus materijala, čime se smanjuje potreba za sečom prirodnih šuma. Ovo pomaže u očuvanju staništa mnogih ugroženih vrsta i smanjuje gubitak biodiverziteta. Plantaže obnovljivog drveta smanjuju pritisak na prirodne šume, jer se one specijalno uzgajaju za kontinuiranu eksploataciju bez ugrožavanja prirodnih resursa.
- **Smanjenje emisije ugljen-dioksida:** Drvo prirodno skladišti ugljen-dioksid (CO₂) tokom svog životnog ciklusa. Kada se reciklira ili koristi sa obnovljivih plantaža, smanjuje se potreba za proizvodnjom novih materijala, čime se smanjuje emisija CO₂ koja bi nastala prilikom proizvodnje ili transporta sirovina. Reciklirano i obnovljivo drvo se često koristi u gradnji zgrada sa niskim emisijama, što doprinosi smanjenju ugljeničnog otiska građevinskih sektora.
- **Manja energetska potrošnja:** Obrada recikliranog drveta troši manje energije u poređenju sa proizvodnjom potpuno novog drvenog materijala. Ovo uključuje nižu potrošnju goriva, električne energije i vode, što značajno smanjuje ukupni uticaj na životnu sredinu. Plantaže drveća često koriste prirodne resurse poput kišnice i sunčeve energije, čime se dodatno smanjuje ekološki trošak njihove proizvodnje..

Ekonomski benefiti

- **Smanjenje troškova sirovina:** Reciklirano drvo često je jeftinije od sveže sečenog drveta, a njegova dostupnost iz lokalnih izvora može dodatno smanjiti troškove transporta. Projekti koji koriste reciklirane materijale često dobijaju poreske olakšice ili subvencije, što dodatno smanjuje ukupne troškove.
- **Podsticanje lokalnih ekonomija:** Korišćenje lokalnih izvora recikliranog drveta ili plantaža obnovljivog drveta podstiče otvaranje radnih mesta u zajednicama. To uključuje sakupljanje, obradu i distribuciju drveta. Uspostavljanje održivih plantaža drveta donosi prihod ruralnim područjima i pruža mogućnost za razvoj lokalnih zanata i industrije.
- **Povećanje tržišne konkurentnosti:** Kompanije koje koriste reciklirano ili obnovljivo drvo mogu se pozicionirati kao lideri u održivosti, što privlači ekološki osvešćene klijente. Eko-sertifikati poput FSC ili PEFC povećavaju kredibilitet kompanija na globalnom tržištu i omogućavaju lakši pristup međunarodnim projektima koji zahtevaju održive materijale. Potrošači su sve spremniji da plate više za proizvode izrađene od održivih materijala, što može rezultirati većim profitom za kompanije koje ih koriste.

Korišćenje recikliranog i obnovljivog drveta predstavlja ključni element održivog građevinarstva. Ne samo da doprinosi smanjenju otpada i očuvanju prirodnih resursa, već i pruža ekonomske prednosti i podržava globalne ciljeve smanjenja emisije ugljen-dioksida. Kako bi se postigao dugoročni održivi razvoj, važno je kontinuirano ulagati u inovacije u obradama i tehnologijama koje omogućavaju efikasnu upotrebu ovih materijala.

5.3. Drvo u pasivnim i energetske efikasnim zgradama

Drvo je jedan od najstarijih i najčešće korišćenih građevinskih materijala u istoriji gradnje, ali njegov značaj u savremenoj arhitekturi posebno raste zbog svoje uloge u održivoj gradnji. U poslednjim decenijama, drvo se sve više koristi u projektovanju pasivnih i energetske efikasnih zgrada, jer doprinosi smanjenju energetske potrošnje i poboljšanju kvaliteta unutrašnjeg prostora. Njegova primena nije samo stvar estetike, već ima i funkcionalne aspekte, poput smanjenja ugljeničnog otiska građevina, što ga čini jednim od ključnih materijala u kontekstu borbe protiv klimatskih promena. Ovo poglavlje se fokusira na detaljnu analizu uloge drveta u savremenoj održivoj gradnji, uključujući njegovu primenu u pasivnim kućama i energetske efikasnim objektima. Pored prednosti, biće razmatrani i izazovi u njegovoj upotrebi, poput trajnosti, zaštite od požara i dostupnosti resursa.

Drvo kao ekološki materijal

Drvo je prirodni materijal koji se obnavlja i ima niz ekoloških prednosti u odnosu na građevinske materijale poput čelika, betona i plastike. Kao obnovljiv resurs, drvo dolazi iz šuma koje, uz održivo upravljanje, imaju sposobnost kontinuirane regeneracije. Ova osobina čini drvo ne samo dostupnim već i održivim resursom, za razliku od čelika i betona, čija proizvodnja zavisi od iscrpljivanja ograničenih prirodnih resursa i zahteva energetske intenzivne procese. Proizvodnja drveta ima značajno manji uticaj na životnu sredinu u poređenju sa alternativama. Na primer, proizvodnja betona i čelika uključuje visoke emisije ugljen-dioksida (CO_2), zbog sagorevanja fosilnih goriva i hemijskih reakcija u procesu. Nasuprot tome, obrada drveta zahteva znatno manje energije, što rezultira smanjenjem emisija tokom proizvodnog ciklusa. Osim toga, drvna industrija često generiše manje otpada. Ostatke drva moguće je koristiti za pravljenje ploča od iverice, briketa za ogrev ili za biomasu, dok se otpad od čelika i betona uglavnom odlaze ili se reciklira uz značajan utrošak energije. Ipak jedna od najvažnijih prednosti drveta je njegova sposobnost apsorpcije i skladištenja ugljen-dioksida tokom rasta. Drvo upija CO_2 iz atmosfere kroz proces fotosinteze i pretvara ga u biomasu. Kada se koristi u građevinarstvu, ovaj "zarobljeni" ugljenik ostaje vezan sve dok se drvo ne raspadne, sagori ili hemijski ne razgradi. Na primer, prosečan kubni metar drveta može uskladištiti oko 1 tonu CO_2 , što znači da građevinski objekti izrađeni od drveta zapravo funkcionišu kao privremeni rezervoari ugljenika. Ovo je značajna prednost u borbi protiv klimatskih promena, jer se upotrebom drveta smanjuje ukupna količina ugljen-dioksida u atmosferi.

Pasivne kuće i energetske efikasne zgrade

Pasivne kuće (Passivhaus) predstavljaju vrhunac energetske efikasnosti u građevinarstvu, postavljajući standarde koji omogućavaju minimalnu potrošnju energije uz maksimalan komfor za stanare. Ove zgrade dizajnirane su tako da koriste prirodne resurse, poput sunčeve energije, i smanjuju oslanjanje na konvencionalne sisteme grejanja i hlađenja. Jedan od ključnih materijala koji doprinose ostvarivanju ovih ciljeva jeste drvo.

Pasivne kuće se oslanjaju na nekoliko osnovnih principa kako bi postigle izuzetno nisku potrošnju energije. Zidovi, podovi i krovovi imaju deblje slojeve izolacije koji sprečavaju gubitak toplote zimi i pregrevanje leti. Zgrade su projektovane tako da imaju minimalna propuštanja vazduha, čime se eliminišu gubici energije kroz pukotine i spojeve. Velike staklene površine okrenute prema jugu maksimalno iskorišćavaju prirodno osunčanje, dok pravilno postavljene nadstrešnice sprečavaju pregrevanje. Specijalni sistemi omogućavaju stalnu izmenu vazduha uz zadržavanje toplote iz izduvnog vazduha.

Drvo je nezamenjiv materijal u konstrukciji pasivnih i energetski efikasnih zgrada, jer kombinuje ekološke, tehničke i estetske prednosti. Drvo ima nisku toplotnu provodljivost, što ga čini prirodnim izolatorom. Na primer, lamelirano drvo i drveni paneli koriste se za konstrukciju zidova sa visokom izolacionom vrednošću. Ovi materijali pomažu u održavanju unutrašnje temperature, smanjujući potrebu za dodatnim grejanjem i hlađenjem. Masivne drvene ploče (CLT - Cross Laminated Timber) i lamelirano drvo (glulam) omogućavaju izgradnju čvrstih, ali lakih struktura. Ove tehnologije omogućavaju bržu gradnju i visoku preciznost, što je ključno za postizanje hermetičnosti u pasivnim kućama. Pored toplotnih svojstava, drvene fasade dodaju estetsku vrednost i prirodan izgled zgradama. Uz pravilnu obradu i zaštitu, drvo na fasadama pruža dugotrajnu otpornost na spoljašnje uticaje.

Drvo ne samo da doprinosi energetskoj efikasnosti već ima i značajan uticaj na kvalitet unutrašnjeg prostora. Drvo "diše", apsorbujući višak vlage iz vazduha i otpuštajući ga kada je vazduh suv. Ovo stvara prijatnu i zdravu mikroklimu, smanjujući rizik od razvoja buđi i alergena. Zbog svojih prirodnih svojstava, drvo pruža osećaj topline i udobnosti, što doprinosi kvalitetu života stanara. Kao prirodni i obnovljivi materijal, drvo ima nizak ugljenični otisak. Njegova upotreba u pasivnim kućama podržava ciljeve održivog razvoja.

Saradnja drveta sa savremenim tehnologijama omogućava još bolje performanse. Savremene tehnologije proizvodnje drvenih ploča omogućavaju korišćenje lepкова i premaza koji ne ispuštaju štetne materije, dodatno unapređujući zdravlje unutrašnjeg prostora. Takvi premazi ne samo da produžavaju vek trajanja drveta već i obezbeđuju njegovu otpornost na vlagu, UV zračenje, insekte i gljivice, čime se smanjuju troškovi održavanja. Ugrađeni senzori u drvenim konstrukcijama mogu pratiti promene u vlažnosti i strukturi materijala, osiguravajući dugotrajnost i sigurnost objekta. Ovi senzori omogućavaju pravovremenu detekciju potencijalnih problema, poput povećane vlage koja može dovesti do razvoja buđi ili oštećenja usled temperaturnih promena. Integracija sa pametnim sistemima zgrada pruža mogućnost daljinskog praćenja i automatskog reagovanja na promene, što dodatno povećava efikasnost i održivost.

Prednosti drveta u pasivnim i energetski efikasnim zgradama

- **Dobra toplotna izolacija:** Drvo je izvanredan prirodni izolator zahvaljujući svojoj ćelijskoj strukturi koja sadrži vazdušne džepove. Ovo svojstvo omogućava zgradama od drveta da zadrže stabilnu unutrašnju temperaturu tokom cele godine. Zimi, drveni materijali smanjuju gubitke toplote, dok leti pomažu u sprečavanju prekomernog zagrevanja. Upotreba drvenih panela, kao što su CLT ploče, i drvenih fasada dodatno unapređuje termoizolacione karakteristike zgrade.
- **Otpornost na vlagu:** Drvo ima sposobnost da reaguje na promene vlažnosti u svom okruženju, apsorbujući višak vlage iz vazduha i otpuštajući je kada je potrebno. Ova prirodna regulacija vlažnosti doprinosi stvaranju zdravijeg unutrašnjeg okruženja i smanjuje rizik od razvoja buđi, plesni i drugih problema povezanih sa prekomernom vlagom. Korišćenjem adekvatno tretiranih drvenih materijala, otpornost na vlagu može se dodatno unaprediti, čineći drvo pogodnim i za prostorije sa većom izloženošću vlazi, poput kupatila ili kuhinja.
- **Zdravstvene koristi:** Prisustvo drveta u unutrašnjim prostorima povoljno utiče na zdravlje i dobrobit stanara. Istraživanja pokazuju da prirodni materijali poput drveta stvaraju osećaj topline i udobnosti, smanjuju stres i podstiču opuštanje. Drvene površine mogu poboljšati akustiku prostora, smanjujući nivo buke, što doprinosi boljoj koncentraciji i kvalitetu sna. Osim toga, drvo ne ispušta štetne materije, za razliku od nekih veštačkih materijala, čime dodatno unapređuje kvalitet vazduha u prostoru.

- **Smanjenje troškova energije:** Drvo doprinosi energetskej efikasnosti zgrada, jer omogućava bolju kontrolu toplote i smanjuje potrebu za intenzivnim korišćenjem grejanja i hlađenja. Pasivne kuće koje koriste drvene materijale mogu ostvariti značajne uštede na troškovima energije tokom celog životnog veka zgrade. Na primer, pravilno izolovani drveni zidovi i fasade smanjuju gubitke toplote, dok termički stabilni prozorski okviri od drveta sprečavaju termičke mostove, čime dodatno unapređuju performanse zgrade.
- **Održiva proizvodnja:** Drvo iz održivo upravljanih šuma predstavlja jedan od najekološkijih građevinskih materijala. Za razliku od materijala poput betona ili čelika, proizvodnja drvenih elemenata zahteva značajno manje energije i ima niži ugljenični otisak. Pored toga, tokom svog životnog ciklusa drvo skladišti ugljen-dioksid, čime dodatno doprinosi smanjenju emisija gasova sa efektom staklene bašte. Korišćenjem sertifikovanog drveta iz šuma koje se regenerišu, gradnja ne samo da postaje održivija, već i aktivno doprinosi očuvanju prirodnih resursa.

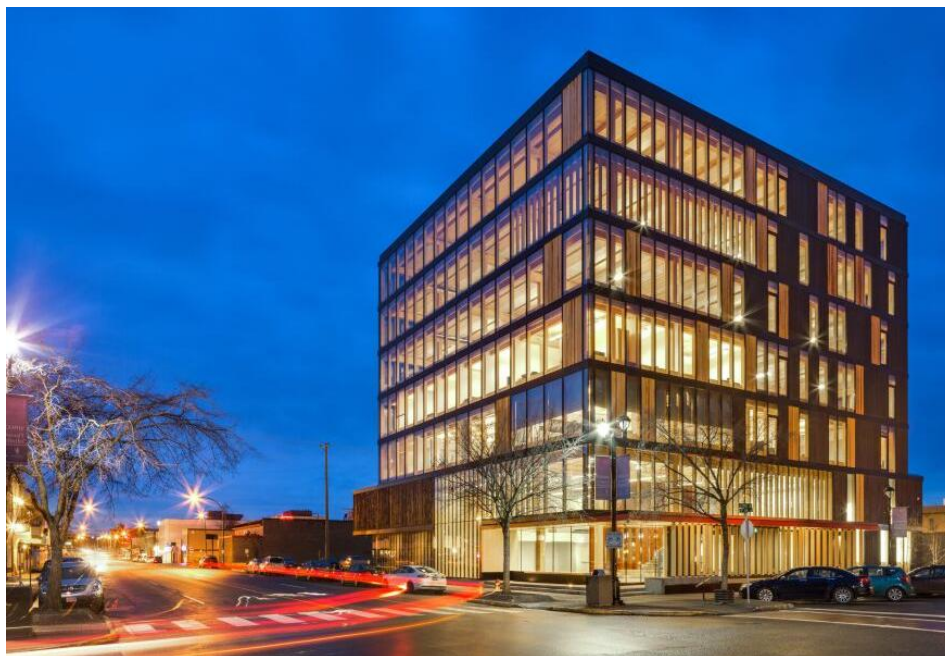
Izazovi i prepreke

Iako drvo ima mnoge prednosti, postoje i određeni izazovi u njegovoj primeni u energetskej efikasnim zgradama. Jedan od glavnih izazova je njegova osjetljivost na vlagu i insekte, što može uticati na njegovu dugovečnost. Vlažnost može dovesti do deformacija, truljenja i razvoja buđi, dok insekti, poput termita i drvotočaca, mogu ugroziti strukturalnu stabilnost. Kako bi se ovi rizici smanjili, neophodno je koristiti odgovarajuće metode obrade drveta, poput termoobrade, primene zaštitnih premaza i tretmana protiv štetočina, kao i pažljivog projektovanja kako bi se sprečio kontakt drveta s vlagom ili tlom. Takođe, iako drvo ima vrlo dobre toplotne osobine, mora se pažljivo birati i postavljati u skladu sa principima energetskej efikasnosti. Neadekvatno planiranje može dovesti do pojave termičkih mostova, gubitka energije ili kondenzacije unutar konstrukcije, što može negativno uticati na izolaciona svojstva i dugovečnost objekta. Pravilan dizajn, upotreba parnih barijera i kvalitetna ugradnja izolacionih slojeva ključni su za rešavanje ovih problema. Još jedan izazov leži u potrebi za edukacijom i obukom profesionalaca u građevinskej industriji. Arhitekti, inženjeri i izvođači radova često se suočavaju s nedostatkom znanja o ponašanju drveta u različitim klimatskim uslovima i specifičnostima njegove primene u energetskej efikasnim zgradama. Obezbeđivanje obuka i razvoj stručnih vodiča za rad sa drvetom prema standardima pasivnih kuća i energetskej efikasnih zgrada može značajno doprineti postizanju optimalnog dizajna i maksimalne efikasnosti objekata. Dodatno, nabavka i dostupnost visokokvalitetnog drveta može biti izazov, naročito u regijama sa ograničenim lokalnim resursima. Održivo upravljanje šumama, promocija upotrebe inženjerskog drveta i podsticanje lokalne proizvodnje mogu pomoći u rešavanju problema dostupnosti i smanjenju troškova. Na kraju, važno je napomenuti da saradnja između različitih sektora, uključujući proizvođače materijala, projektante i građevinske kompanije, igra ključnu ulogu u prevazilaženju ovih prepreka i omogućavanju šire primene drveta u energetskej efikasnom građevinarstvu.

Drvo se kao materijal sve više prepoznaje kao ključni element u gradnji pasivnih i energetskej efikasnih zgrada. Njegove ekološke prednosti, sposobnost pružanja dobre toplotne izolacije i pozitivan uticaj na unutrašnju klimu čine ga idealnim izborom za modernu održivu gradnju. Međutim, kako bi se izbegli potencijalni problemi i osigurala dugoročna efikasnost, važno je koristiti savremene tehnologije obrade i primene drva, kao i pratiti najnovije smernice u građevinskej industriji. Korišćenje drva u pasivnim zgradama neće samo doprineti smanjenju potrošnje energije, već će imati i pozitivan ekološki uticaj, čineći gradnju održivijom i ekološki odgovornijom.

5.4. Primeri uspešnih ekoloških projekata

1. **The Wood Innovation and Design Centre (WIDC), Kanada** – The Wood Innovation and Design Centre (WIDC), Slika 5.1, smešten u Princ Džordžu, Britanska Kolumbija, predstavlja jedan od viših drvenih objekata u svetu. Ovaj centar simbolizuje inovaciju u građevinskoj industriji, istovremeno promovišući održivost i upotrebu ekološki prihvatljivih materijala. WIDC koristi masivne drvene elemente kao što su CLT (unakrsno lepljeno drvo) i glulam (lepljeno lamelirano drvo). Ovi materijali su poznati po svojoj izuzetnoj čvrstoći, trajnosti i sposobnosti da skladište ugljenik, smanjujući ukupne emisije ugljen-dioksida tokom životnog ciklusa zgrade. Dizajn zgrade fokusira se na minimizaciju energetske potrebe kroz upotrebu naprednih izolacionih tehnika i prirodnog osvetljenja. Fasada zgrade je optimizovana kako bi se smanjio gubitak toplote zimi i pregrevanje leti. WIDC integriše tehnologije koje koriste obnovljive izvore energije, poput solarnih panela i sistema za efikasnu ventilaciju. Ove tehnologije pomažu zgradi da smanji potrošnju energije i osigura održivo funkcionisanje. Centar nije samo arhitektonsko remek-delo, već i edukativni prostor namenjen istraživanju i razvoju novih tehnologija u drvenim konstrukcijama. On inspiriše građevinsku industriju širom sveta da se okrene održivim praksama.



Slika 5.1. The Wood Innovation and Design Centre (WIDC), Kanada [20]

2. **The Bullitt Center, SAD** – Bullitt Center, smešten u Sijetlu, Vašington, često se naziva „najzelenijom komercijalnom zgradom na svetu“, Slika 5.2. Ova zgrada je razvijena kao deo vizije Bullitt fondacije da inspiriše građevinski sektor i pokaže kako održiva arhitektura može postati standard. Cilj je bio stvoriti zgradu koja ne samo da ima minimalan uticaj na životnu sredinu, već doprinosi njenom očuvanju. Bullitt Center koristi drvene elemente u svojoj konstrukciji, uključujući drvo dobijeno iz lokalnih, obnovljivih izvora. Konstrukcija je osmišljena tako da maksimalno smanji otpad tokom izgradnje. Takođe, drvo je birano zbog svoje sposobnosti da skladišti ugljenik, čime se dodatno smanjuje emisija ugljen-dioksida povezana sa tradicionalnim građevinskim materijalima. Zgrada je projektovana

da proizvodi više energije nego što troši, što postiže kroz nekoliko ključnih tehnologija. Krov Bullitt Centra pokriven je velikim solarnim panelima, koji proizvode dovoljno električne energije za sve potrebe zgrade. Prostrani prozori i efikasno osvetljenje smanjuju potrebu za električnom energijom. Koriste se prirodni sistemi za hlađenje i grejanje, što smanjuje upotrebu konvencionalnih HVAC sistema. Bullitt Center implementira zatvoreni sistem reciklaže vode. Sva kišnica koja padne na zgradu prikuplja se, prečišćava i koristi za sanitarne i druge potrebe. Umesto klasičnih toaleta, koriste se kompostni sistemi koji minimizuju upotrebu vode i omogućavaju preradu otpada u korisne resurse. Zgrada je projektovana u skladu sa najstrožim standardima održivosti, uključujući Living Building Challenge, koji zahteva da zgrada bude potpuno energetski nezavisna, koristi samo obnovljive materijale i funkcioniše kao deo prirodnog ekosistema. Bullitt Center nije samo zgrada, već i edukativni alat koji pokazuje kako budućnost komercijalne arhitekture može izgledati. Njegov model „net-zero“ emisije ugljen-dioksida i obnovljive energije inspirisao je mnoge slične projekte širom sveta, postavljajući nove standarde za održivu gradnju.



Slika 5.2. The Bullitt Center, SAD [21]

3. **The Edge, Holandija** – The Edge se nalazi u Amsterdamu, Slika 5.3, i predstavlja poslovnu zgradu koja kombinuje inovativne tehnologije, održive građevinske prakse i vrhunski dizajn. Njena glavna svrha je pružanje modernog i ekološki održivog radnog prostora. Iako zgrada nije potpuno izrađena od drveta, drvo se koristi u velikoj meri za unutrašnje elemente i delove konstrukcije. Korišćenje ovog prirodnog materijala doprinosi smanjenju ugljeničnog otiska, stvaranju prijatne atmosfere za radnike i integraciji održivih građevinskih rešenja. The Edge je opremljena naprednim tehnologijama koje optimizuju potrošnju energije i resursa. Fasada i krov zgrade prekriveni su solarnim panelima, što omogućava generisanje značajnog dela energije potrebne za rad zgrade. Sistem za

grejanje i hlađenje koristi geotermalne izvore, smanjujući potrošnju fosilnih goriva. Rasveta u zgradi koristi LED tehnologiju, dok senzori beleže prisustvo ljudi, nivo prirodne svetlosti i temperaturu kako bi automatski prilagodili potrošnju energije. Zgrada koristi napredne IoT (Internet of Things) sisteme za povezivanje svih aspekata upravljanja objektom. Na primer, aplikacija omogućava zaposlenima da personalizuju postavke osvetljenja i temperature na osnovu njihovih potreba, čime se dodatno povećava energetska efikasnost. Pored drvenih elemenata, The Edge je izgrađena od recikliranih i ekološki prihvatljivih materijala. Dizajn zgrade omogućava maksimalno korišćenje prirodne svetlosti, čime se smanjuje potreba za veštačkim osvetljenjem. The Edge je dobila ocenu 98.36% na BREEAM skali (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), što je čini jednom od najzelenijih poslovnih zgrada na svetu. Njena održivost, inovativnost i doprinos očuvanju životne sredine učinili su je simbolom zelene gradnje. The Edge pokazuje kako moderna arhitektura može uspešno spojiti tehnologiju, prirodne resurse i održivost. Kombinovanjem drvenih elemenata sa naprednim sistemima za energetska efikasnost, ova zgrada ne samo da smanjuje negativan uticaj na životnu sredinu, već i postavlja standard za budućnost održivog poslovanja.



Slika 5.3. The Edge, Holandija [22]

4. **Kirstenbosch Tree Canopy Walkway, Južna Afrika** – Kirstenbosch Tree Canopy Walkway predstavlja arhitektonsko i ekološko čudo smešteno u botaničkoj bašti Kirstenbosch u Kejptaunu, Slika 5.4. Ova jedinstvena staza omogućava posetiocima da dožive prirodu na potpuno nov način – šetajući kroz krošnje drveća, visoko iznad tla. Staza je inspirisana oblikom zmije koja se kreće kroz drveće. Njena struktura, koja se elegantno uvija i savija, harmonično se uklapa u prirodni pejzaž. Izgrađena je od održivih materijala, uključujući čelik i drvo, s naglaskom na minimalan uticaj na okolinu. Korišćeno drvo dolazi iz lokalnih izvora, čime se smanjuje emisija ugljen-dioksida povezana s transportom materijala. Kirstenbosch Tree Canopy Walkway projektovana je uz strogo poštovanje ekoloških standarda. Tokom gradnje, radilo se na očuvanju vegetacije i izbegavanju bilo kakvog narušavanja korenovog sistema drveća. Drvo i drugi korišćeni

materijali su obnovljivi i prilagođeni klimi i uslovima u botaničkoj bašti. Staza, duga oko 130 metara i na visini od 12 metara u najvišim tačkama, omogućava panoramski pogled na bujni pejzaž botaničke bašte i okolna brda. Posetioци mogu uživati u neposrednom kontaktu s florom i faunom regije, a da pri tome ne naruše prirodno stanište. Osim što pruža jedinstveno iskustvo, Kirstenbosch Tree Canopy Walkway ima i obrazovnu ulogu. Informativne ploče duž staze objašnjavaju značaj očuvanja prirode, raznolikost biljnih i životinjskih vrsta u Južnoj Africi, kao i ekološke tehnike korišćene u gradnji staze. Kirstenbosch Tree Canopy Walkway nije samo atrakcija već i simbol održivog razvoja i inovativnog pristupa arhitekturi u prirodnom okruženju. Ova staza inspiriše posetioce da cene prirodne lepote i razmišljaju o svojoj ulozi u očuvanju životne sredine.



Slika 5.4. Kirstenbosch Tree Canopy Walkway, Južna Afrika [23]

5. **The Green School, Indonezija** – Green School se nalazi na Baliju, ostrvu poznatom po prirodnim lepotama i bogatoj kulturi, Slika 5.5. Ideja škole je da stvori obrazovni prostor koji je u skladu s prirodom, koristeći održive materijale i tehnike gradnje. Osnovana je 2008. godine i brzo je postala globalni simbol ekološke svesti u obrazovanju. Škola je izgrađena uglavnom od bambusa, koji je lokalni, obnovljivi materijal sa izuzetno povoljnim ekološkim karakteristikama. Bambus je fleksibilan, jak i brzo raste, što ga čini idealnim za održivu gradnju. Pored bambusa, korišćeni su prirodni materijali poput palminog lišća i lokalno drvo, čime se dodatno smanjio ugljenični otisak gradnje. Arhitektonski dizajn prati principe održivosti i harmonije sa okruženjem, što se ogleda u otvorenim, prozračnim prostorima koji smanjuju potrebu za veštačkim osvetljenjem i klimatizacijom. Škola koristi inovativne metode za prikupljanje i filtraciju kišnice, kao i reciklažu otpadnih voda. To obezbeđuje održivo korišćenje vode i smanjuje uticaj na lokalne vodne resurse. Deo energetske potrebe škole pokriva se korišćenjem solarnih panela, čime se smanjuje zavisnost od fosilnih goriva. Green School kombinuje tradicionalne nastavne metode s inovativnim programima usmerenim na ekologiju i održivost. Učenici ne samo da uče o prirodi i održivim praksama, već i aktivno učestvuju u njihovoj primeni kroz projekte poput sadnje drveća, izgradnje bašti i upravljanja otpadom. Programi su osmišljeni tako da podstiču kreativnost, odgovornost i svest o globalnim ekološkim izazovima. Škola angažuje lokalne zanatlije i koristi resurse iz okoline, čime podržava lokalnu ekonomiju. Organizuju se i ekološke radionice i događaji otvoreni za zajednicu, promovišući širenje

znanja o održivosti. Green School je inspiracija mnogim sličnim projektima širom sveta, ona nije samo obrazovna ustanova, već i primer kako održiva arhitektura i ekološka svest mogu oblikovati buduće generacije. Kombinovanjem inovacija, lokalnih resursa i obrazovnih principa, škola dokazuje da je moguće graditi i učiti na način koji doprinosi očuvanju naše planete.



Slika 5.5. The Green School, Indonezija [24]

Ovi primeri dokazuju da drvo, kao prirodni i ekološki materijal, može igrati ključnu ulogu u modernom građevinarstvu. Korišćenjem inovativnih tehnika i obnovljivih resursa moguće je izgraditi objekte koji smanjuju negativan uticaj na okolinu, povećavaju energetske efikasnost i unapređuju kvalitet života. Osim što doprinosi smanjenju emisija ugljen-dioksida, upotreba drvenih konstrukcija omogućava fleksibilnost u dizajnu i integraciju sa prirodnim okruženjem. Drvo je lagano, ali izuzetno izdržljivo, što ga čini idealnim za održive projekte u urbanim i ruralnim sredinama. Ovakvi projekti takođe podstiču ekološku svest, kako kod investitora i arhitekata, tako i kod korisnika, ukazujući na mogućnosti harmoničnog suživota sa prirodom. Uvođenjem ovakvih praksi u širem obimu, građevinska industrija može postati jedan od ključnih pokretača globalne tranzicije ka održivijoj budućnosti, gde su prirodni resursi efikasno iskorišćeni, a životna sredina zaštićena za naredne generacije.

6. BUDUĆNOST I PERSPEKTIVE DRVENIH KONSTRUKCIJA

6.1. Budućnost drvenih konstrukcija u građevinskoj industriji

Drvo, kao jedan od najstarijih građevinskih materijala, proživljava renesansu u savremenoj građevinskoj industriji. U eri ubrzane urbanizacije i povećanog fokusa na održivost, drvene konstrukcije postaju ključna tema. Kombinacija tradicionalnih svojstava drveta i savremenih tehnoloških inovacija omogućava stvaranje održivih, čvrstih i estetski privlačnih građevinskih rešenja. Razvoj drvenih konstrukcija u budućnosti oslanjaće se na napredak u materijalima, tehnikama obrade, savremenim metodama projektovanja i sve većem usvajanju održivih građevinskih rešenja. U ovom potpoglavlju istražićemo glavne trendove koji će oblikovati i unaprediti ovaj sektor.

Biotehnologija i unapređenje sirovina

Biotehnologija ima ogroman potencijal da redefiniše proizvodnju drveta, otvarajući nove mogućnosti za optimizaciju njegovih mehaničkih i bioloških osobina. Kroz genetske modifikacije i selektivni uzgoj stabala, moguće je postići značajna poboljšanja u otpornosti, kvalitetu i održivosti sirovina koje se koriste u građevinskoj industriji.

- **Brzorastuće vrste drveća:** Jedan od glavnih ciljeva biotehnologije u šumarstvu jeste razvoj brzorastućih vrsta drveća. Genetski modifikovane vrste omogućavaju kraće cikluse rasta, čime se ubrzava obnova šuma i smanjuje eksploatacija prirodnih resursa. Ovakve vrste su posebno korisne u područjima s intenzivnom potražnjom za građevinskim materijalom, jer omogućavaju kontinuiranu i održivu proizvodnju drveta. Brže obnavljanje šuma takođe doprinosi borbi protiv klimatskih promena, jer se povećava kapacitet apsorpcije ugljen-dioksida. Na primer, stabla poput genetski modifikovanih topola ili eukaliptusa, koja su već predmet istraživanja, mogu postati osnova za održive šumarske prakse i masovnu proizvodnju drvene sirovine u budućnosti.
- **Otpornost na štetočine i bolesti:** Prirodne šume i plantaže često su izložene napadima insekata, gljivica i mikroorganizama koji mogu ozbiljno ugroziti kvalitet drveta. Biotehnoška intervencija omogućava razvoj stabala sa unapređenom otpornošću na ovakve pretnje, smanjujući potrebu za pesticidima i drugim hemijskim tretmanima. Ovaj pristup ne samo da produžava životni vek drveta, već i smanjuje negativan uticaj hemikalija na okolinu. Na primer, genetska modifikacija može uključiti uvođenje gena koji proizvode prirodne otpore na specifične patogene, čineći drvo dugotrajnijim i pogodnijim za primenu u građevinskim projektima.
- **Kvalitet drveta:** Biotehnologija omogućava precizno upravljanje karakteristikama drveta tokom rasta, čime se može proizvesti sirovina sa specifičnim svojstvima. Na primer, genetski unapređena stabla mogu imati uniformniju teksturu, poboljšanu gustinu ili povećanu otpornost na savijanje i pritisak. Ovo ne samo da olakšava proces obrade drveta, već omogućava i razvoj materijala s većom strukturnom pouzdanošću. Pored toga,

moguće je manipulacijom genima smanjiti sadržaj lignina u drvetu, što ga čini pogodnijim za proizvodnju kompozitnih materijala poput lameliranog furnira ili unakrsno lameliranih panela (CLT). Ovakva poboljšanja otvaraju vrata inovativnim primenama drveta u građevinskim projektima velikih razmera.

- **Utica na održivost:** Biotehnološka unapređenja ne samo da poboljšavaju kvalitet i otpornost drveta već doprinose i održivijem upravljanju šumama. Razvoj stabala sa kraćim ciklusima rasta i većom otpornošću omogućava šumarstvu da odgovori na rastuće potrebe građevinske industrije, istovremeno smanjujući negativne ekološke posledice. Na ovaj način, biotehnologija postaje ključni saveznik u prelasku na održivu građevinsku praksu, pružajući materijale koji su i ekološki prihvatljivi i visokog kvaliteta. Budućnost drvenih konstrukcija će u velikoj meri zavisiti od ovih inovacija, koje obećavaju revoluciju u načinu na koji uzgajamo i koristimo drvo u građevinarstvu.

Nano-tehnologija u obradi drveta

Primena nano-tehnologije u građevinskoj industriji donosi revolucionarne promene u obradi drveta, omogućavajući mu da zadrži svoja prirodna svojstva, dok istovremeno postaje otpornije, trajnije i funkcionalnije. Ove inovacije otvaraju nove mogućnosti za širu upotrebu drveta u zahtevnim građevinskim projektima, čineći ga konkurentnim alternativama tradicionalnim materijalima poput čelika i betona.

- **Nano-premazi:** Nano-premazi predstavljaju jedan od najznačajnijih doprinosa nano-tehnologije obradi drveta. Primena tankih slojeva nano-materijala omogućava povećanu otpornost na vlagu – hidrofobni premazi sprečavaju prodiranje vode u strukturu drveta, čime se smanjuje rizik od truljenja i bubrenja, zaštitu od UV zračenja – nano-premazi smanjuju oštećenja izazvana dugotrajnom izloženošću sunčevim zracima, čuvajući boju i teksturu drveta i zaštitu od mikroorganizama – antimikrobne čestice u nano-premazima sprečavaju razvoj gljivica i bakterija, produžavajući vek trajanja drvenih konstrukcija u ekstremnim uslovima.
- **Povećanje mehaničke čvrstoće:** Integracijom nano-čestica u unutrašnju strukturu drveta dolazi do značajnog unapređenja njegovih mehaničkih svojstava. Nano-materijali, poput nano-celuloze i nano-glina, poboljšavaju sposobnost drveta da izdrži velika opterećenja, čineći ga pogodnim za upotrebu u visokim konstrukcijama i mostovima. Ojačano drvo postaje otpornije na fizička oštećenja, što ga čini idealnim za podne obloge i druge površine koje su često izložene intenzivnoj upotrebi.
- **Samopopravljajući materijali:** Jedna od najinovativnijih primena nano-tehnologije je razvoj samopopravljajućih drvenih materijala. Ovi materijali sadrže kapsule ispunjene hemijskim jedinjenjima koja se aktiviraju u slučaju mikro-oštećenja. Kada dođe do pukotina ili ogrebotina kapsule se otvaraju i oslobađaju hemijske agense koji ispunjavaju oštećeni prostor, obnavljajući strukturu drveta. Ovaj proces smanjuje potrebu za skupim i čestim intervencijama održavanja, čime doprinosi dugoročnim uštedama.

Digitalne tehnologije i inovacije u projektovanju

Digitalizacija i automatizacija revolucioniraju način na koji se drvene konstrukcije projektuju, proizvode i montiraju, donoseći veću efikasnost, preciznost i održivost. Ove tehnologije ne samo

da unapređuju svaki korak u građevinskom procesu već omogućavaju i stvaranje inovativnih konstrukcija koje su ranije bile nezamislive.

- **BIM (Building Information Modeling):** BIM tehnologija postaje nezaobilazan alat u savremenom projektovanju. Kroz detaljno modelovanje svih aspekata projekta, BIM omogućava integraciju arhitektonskih, građevinskih i inženjerskih elemenata u jedinstven, sveobuhvatan model. To znači da projektni timovi mogu simulirati različite scenarije, unapred detektovati potencijalne greške i optimizovati korišćenje resursa. Kod drvenih konstrukcija, BIM igra ključnu ulogu u preciznom definisanju dimenzija, spojeva i potrebnih prilagođavanja, čime se smanjuju troškovi i ubrzava proces izgradnje.
- **Generativni dizajn:** Generativni dizajn, vođen algoritmima veštačke inteligencije, omogućava arhitektama i inženjerima da istraže na hiljade različitih opcija za dizajn jedne konstrukcije. Ova tehnologija koristi zadate parametre poput opterećenja, troškova i estetskih kriterijuma kako bi stvorila optimalna rešenja. Kod drvenih konstrukcija, generativni dizajn omogućava maksimizaciju čvrstoće i funkcionalnosti uz istovremeno smanjenje količine potrebnog materijala, što ga čini savršenim za održive projekte. Na ovaj način nastaju kompleksne forme i strukture koje ne bi bile moguće tradicionalnim metodama projektovanja.
- **CNC mašine i 3D štampa:** Automatizovana proizvodnja pomoću CNC (Computer Numerical Control) mašina omogućava izuzetnu preciznost pri rezanju, bušenju i oblikovanju drvenih elemenata. Ovo ne samo da ubrzava proces izrade već i smanjuje mogućnost ljudske greške. Prefabrikovani elementi izrađeni CNC mašinama dolaze spremni za montažu, čime se značajno skraćuje vreme gradnje. S druge strane, 3D štampanje postaje inovativni alat za kreiranje složenih drvenih komponenti. Kombinovanjem drvenih vlakana i biorazgradivih smola, moguće je štampati prilagođene elemente koji smanjuju otpad i omogućavaju reciklažu materijala. Ova tehnologija je naročito korisna za specifične dekorativne detalje ili prilagođene spojeve koji zahtevaju visoku preciznost.
- **Integracija digitalnih tehnologija u praksu:** Integracija ovih tehnologija u građevinsku industriju ne samo da donosi bolju efikasnost već i omogućava veću fleksibilnost u dizajnu i gradnji. Od konceptualizacije do finalne izgradnje, digitalne tehnologije pružaju arhitektama, inženjerima i izvođačima alate da realizuju vizije koje su ekološki prihvatljive, tehnički inovativne i vizuelno upečatljive. Uz pomoć digitalizacije, budućnost drvenih konstrukcija ne leži samo u njihovoj održivosti već i u njihovoj sposobnosti da se prilagode rastućim zahtevima savremenog društva za bržim, efikasnijim i ekološki prihvatljivijim rešenjima.

Inovacije u inženjerskim proizvodima od drveta

Napredak u razvoju inženjerskih proizvoda od drveta omogućava njihovu primenu u konstrukcijama koje su ranije bile neizvodive, proširujući mogućnosti ovog materijala u građevinskoj industriji. Inovacije u ovoj oblasti otvaraju vrata za gradnju složenih, izdržljivih i održivih struktura koje mogu zadovoljiti čak i najstrože građevinske zahteve.

- **Napredni CLT i GLULAM paneli:** Unakrsno lamelirano drvo (CLT) i lamelirano lepljeno drvo (GLULAM) predstavljaju ključne inženjerske proizvode u savremenoj gradnji. Istraživanja u ovoj oblasti fokusiraju se na otpornost na vlagu, zaštitu od požara i

Izdržljivost u ekstremnim uslovima. Uvođenje hidroizolacionih premaza i aditiva smanjuje rizik od deformacija i propadanja drveta u uslovima visoke vlažnosti. Razvijaju se napredni premazi i tretmani koji povećavaju otpornost ovih materijala na vatru, omogućavajući njihovu sigurnu primenu u visokim i javnim zgradama. CLT i GLULAM nosači sada se projektuju za izdržavanje seizmičkih uticaja, jakih vetrova i ekstremnih temperaturnih razlika, čineći ih pogodnim za gradnju u različitim klimatskim zonama.

- **Hibridni materijali:** Kombinovanje drveta s drugim održivim materijalima, poput kompozita na bazi biljnih vlakana, donosi nova inovativna rešenja. Ovi hibridni materijali zadržavaju prirodna svojstva drveta, dok im dodaci povećavaju mehaničku otpornost, smanjuju težinu i poboljšavaju izolacione karakteristike. Na primer: drvo+staklena vlakna poboljšava čvrstoću konstrukcija, što je idealno za mostove i velike rasponske konstrukcije, a drvo+reciklirani materijali povećava održivost proizvoda, smanjujući otpad u građevinskoj industriji.
- **Biokompoziti:** Upotreba biokompozita, u kojima se drvo kombinuje s bio-polimerima ili drugim prirodnim materijalima, otvara nove mogućnosti za prilagodljive i visokoefikasne proizvode. Ovi materijali nude ekološku održivost, višestruku primenu i estetsku i funkcionalnu vrednost. Kao alternativa sintetičkim kompozitima, biokompoziti smanjuju oslanjanje na fosilna goriva. Njihova primena seže od građevinskih elemenata do izolacionih panela i unutrašnjih završnih obrada. Biokompoziti omogućavaju fleksibilnost u dizajnu, dok istovremeno obezbeđuju izdržljivost i otpornost.

Drvene konstrukcije kao deo ugljenično negativnih zgrada

Drvene konstrukcije predstavljaju suštinski element u nastanku ugljenično negativnih zgrada, objekata koji ne samo da minimizuju emisije ugljen-dioksida, već aktivno doprinose njegovom uklanjanju iz atmosfere. Ova vizija odgovara savremenim potrebama za održivošću i borbom protiv klimatskih promena, istovremeno redefinišući standarde u arhitekturi i građevinskoj industriji.

- **Pasivne kuće:** Korišćenje drveta u kombinaciji s prirodnim izolacionim materijalima, poput vune, celuloze ili lanenih vlakana, omogućava projektovanje pasivnih kuća – objekata s minimalnim energetske potrebama za grejanje i hlađenje. Prirodna termoizolaciona svojstva drveta smanjuju gubitke energije, dok se preciznim projektovanjem postiže optimizacija sunčeve svetlosti i ventilacije. Drvene pasivne kuće dokazano smanjuju potrošnju energije do 90% u poređenju s tradicionalnim zgradama, što ih čini idealnim modelom za održivo stanovanje.
- **Integracija obnovljivih izvora energije:** U kombinaciji s tehnologijama obnovljivih izvora energije, poput solarnih panela i geotermalnih sistema, drvene konstrukcije postižu dodatni nivo energetske nezavisnosti i efikasnosti. Instalacija solarnih panela na krovovima drvenih zgrada ili integracija solarnih ćelija u fasadne sisteme doprinosi proizvodnji čiste energije direktno na mestu potrošnje. Ove tehnologije omogućavaju da drvene zgrade postanu energetski pozitivne – proizvode više energije nego što troše.
- **Ugljenično skladištenje:** Jedna od najznačajnijih uloga drveta u građevinskoj industriji je njegova sposobnost da skladišti ugljenik. Tokom rasta, drveće apsorbira CO_2 iz atmosfere i skladišti ga u svojim vlaknima, a taj ugljenik ostaje zarobljen u drvenim elementima sve dok se oni koriste u građevinskim strukturama. Masivni drveni elementi, poput CLT panela ili lameliranih greda, omogućavaju dugotrajno skladištenje ugljenika,

što pomaže u smanjenju ukupnog ugljičnog otiska građevinskog sektora. Prema istraživanjima, drvena konstrukcija može skladištiti i do jedne tone CO₂ po kubnom metru drveta.

- **Kružna ekonomija i reciklaža:** Drvene konstrukcije lako se uklapaju u modele kružne ekonomije. Po završetku životnog ciklusa zgrade, drvo se može reciklirati, ponovo koristiti ili čak kompostirati, čime se dodatno smanjuje otpad. Ovo dodatno produžava vreme skladištenja ugljenika, istovremeno minimizujući ekološki uticaj.

Sociokulturni i regulatorni pomaci

Šire prihvatanje drvenih konstrukcija u građevinskoj industriji zahteva promenu društvene percepcije i prilagođavanje regulatornog okvira kako bi se drvo pozicioniralo kao ravnopravna alternativa tradicionalnim materijalima poput betona i čelika. Ovi pomaci su ključni za ubrzanje tranzicije ka održivijem građevinskom sektoru.

- **Edukacija i promocija:** Jedan od najvažnijih koraka ka širem prihvatanju drvenih konstrukcija jeste informisanje svih učesnika u građevinskom procesu. Projektanti, investitori i krajnji korisnici često nisu dovoljno upoznati s prednostima drveta, poput njegove održivosti, termičkih karakteristika i estetske privlačnosti. Organizacija stručnih seminara, izrada vodiča za projektovanje s drvetom i promocija inovativnih projekata mogu značajno povećati interes i poverenje u ovaj materijal. Takođe, edukacija bi trebalo da obuhvati i širu javnost, kako bi korisnici postali svesni ekoloških i funkcionalnih prednosti drvenih objekata. Na primer, medijski projekti, poput dokumentaraca o održivoj gradnji ili kampanja za popularizaciju drvenih zgrada, mogu promeniti postojeće predrasude.
- **Regulativa:** Regulatorni okvir često predstavlja prepreku većoj primeni drvenih konstrukcija. Tradicionalni građevinski standardi favorizuju beton i čelik, dok drvo zahteva specifična testiranja i prilagođavanja kako bi ispunilo propise. Modernizacija građevinskih standarda, uključujući prilagođavanje propisa za zaštitu od požara i strukturne stabilnosti, ključna je za širu primenu drveta. Osim toga, država može uvesti podsticaje za korišćenje održivih materijala, kao što su subvencije, poreske olakšice ili krediti s povoljnijim uslovima za projekte koji koriste drvo. Takve inicijative bi ne samo olakšale upotrebu drveta, već bi i stimulisale inovacije u ovoj oblasti.
- **Društvena percepcija:** Jedan od ključnih izazova za šire prihvatanje drvenih konstrukcija jeste promena društvenih stavova. Drvo se često doživljava kao materijal pogodan samo za male, tradicionalne ili ruralne objekte. Međutim, uspešni projekti urbanih drvenih zgrada mogu promeniti ovu percepciju. Promovisanje ovakvih projekata kroz arhitektonske izložbe, publikacije i medijske kanale može značajno doprineti jačanju poverenja u drvo kao materijal za visokogradnju. Kada društvo počne da posmatra drvo kao sinonim za inovaciju, održivost i urbanu sofisticiranost, to će otvoriti vrata za njegovu širu primenu i dugoročan uticaj na građevinsku industriju.

Razvoj drvenih konstrukcija neće se oslanjati samo na tehnološke inovacije, već i na međusobnu saradnju industrije, akademske zajednice i zakonodavstva. Biotehnologija, nanotehnologija, digitalne alatke i promena regulatornog okvira definišu budućnost ovog sektora. Uvođenje inovacija u sve faze, od uzgoja sirovina do završne montaže, omogućiće drvetu da postane ključni građevinski materijal u održivom razvoju.

6.2. Trendovi i inovacije u korišćenju drveta kao građevinskog materijala

Drvo je oduvek bilo jedan od najvažnijih građevinskih materijala zbog svojih brojnih prednosti, kao što su lakoća obrade, čvrstoća i prirodna estetska vrednost. Međutim, u poslednjim decenijama, uz napredak tehnologije i sve veći fokus na održivost, drvo se ponovo pojavljuje kao materijal sa velikim potencijalom za modernu gradnju. U ovom poglavlju razmotrićemo najnovije trendove i inovacije u korišćenju drveta u građevinskoj industriji, s naglaskom na ekološke prednosti, tehničke inovacije i estetske aspekte.

Masivni drveni paneli i CLT (Cross-Laminated Timber)

Unakrsno lamelirano drvo (CLT) je inovativni materijal izrađen od višeslojnih panela drveta, pri čemu su vlakna susednih slojeva orijentisana uglavnom pod pravim uglom, Slika 6.1. Ova unakrsna struktura pruža CLT-u izuzetnu čvrstoću i stabilnost, omogućavajući mu da podnese visoka opterećenja i različite klimatske uslove. Zahvaljujući ovom svojstvu, CLT postaje ključni element u modernoj gradnji, posebno u projektima gde je potrebno spojiti održivost, efikasnost i funkcionalnost.

Jedna od najvažnijih karakteristika CLT-a je njegova laka obrada i transport u poređenju s tradicionalnim građevinskim materijalima kao što su beton i čelik. CLT paneli se izrađuju u kontrolisanim fabričkim uslovima, što osigurava visoku preciznost i minimalne greške u konstrukciji. Njegova relativno mala težina olakšava manipulaciju na gradilištu, smanjuje potrebu za teškom opremom i omogućava brzu montažu. CLT je takođe poznat po svojoj svestranosti, jer se može koristiti za različite delove zgrade, uključujući zidove, podove i plafone. Njegova čvrstoća i krutost omogućavaju izgradnju višespratnica, uključujući stambene komplekse, kancelarijske prostore i javne objekte. Ovaj materijal je posebno privlačan u projektima koji zahtevaju održive građevinske prakse, jer je drvo obnovljiv resurs koji tokom rasta apsorbuje ugljen-dioksid, čime doprinosi smanjenju ugljeničnog otiska.



Slika 6.1. Unakrsno lamelirano drvo (CLT) [25]

Primeri uspešne primene CLT-a uključuju neke od najpoznatijih građevina širom sveta. Na primer, zgrada "Mjøstårnet" u Norveškoj, Slika 6.2, koja je trenutno jedan od najviših drvenih nebodera na svetu, koristi CLT kao osnovni konstruktivni sistem. Pored visokih zgrada, CLT se

koristi i za izgradnju školskih objekata, kulturnih centara i luksuznih vila, što svedoči o njegovoj prilagodljivosti i estetskoj vrednosti. Osim što doprinosi stabilnosti i dugovečnosti građevina, CLT donosi i vizuelnu toplinu i prirodni izgled unutrašnjim prostorima, što ga čini atraktivnim za arhitekte i dizajnere. Sa sve većim fokusom na održivu gradnju, očekuje se da će upotreba CLT-a nastaviti da raste, postavljajući nove standarde u građevinskoj industriji.



Slika 6.2. Zgrada "Mjøstårnet" u Norveškoj (CLT) [26]

Bambus kao alternativa tradicionalnom drvetu

Bambus se ističe svojom izuzetnom čvrstoćom i elastičnošću. Zbog visoke otpornosti na pritisak i sposobnosti savijanja bez lomljenja, predstavlja pouzdan materijal za različite vrste konstrukcija, naročito u područjima podložnim zemljotresima. Njegova vlaknasta struktura omogućava da izdrži sile slične onima koje podnosi čelik, dok njegova težina ostaje znatno manja od tradicionalnih građevinskih materijala poput betona i drveta.

U mnogim delovima sveta, posebno u Aziji, Južnoj Americi i Africi, bambus se koristi za izgradnju tradicionalnih i savremenih struktura. Bambus se koristi za gradnju kuća, naročito u tropskim i ruralnim područjima, gde je lako dostupan i povoljan. U kombinaciji s drugim materijalima, poput blata ili cigle, često se koristi za stvaranje stabilnih i udobnih domova. Njegova čvrstoća i fleksibilnost čine ga idealnim za izgradnju mostova u oblastima gde su potrebna prirodna i održiva rešenja. Tradicionalni bambusovi mostovi još uvek se koriste u mnogim ruralnim zajednicama. Bambus se prerađuje i u laminirane ploče i panele, koje se koriste za oblaganje zidova, plafona i podova. Ovi proizvodi se odlikuju modernim izgledom, otpornošću na vlagu i dugotrajnošću.

Zahvaljujući napretku u tehnologijama obrade, bambus se transformiše u visokokvalitetne građevinske proizvode. Laminirani bambus omogućava pravljenje masivnih panela i greda, koji

su konkurentni tradicionalnim drvenim elementima, Slika 6.3. Ovi proizvodi nalaze široku primenu u dizajnu enterijera i eksterijera zbog svoje čvrstoće, estetskog izgleda i otpornosti na habanje. Pored toga, bambus se koristi za proizvodnju kompozitnih materijala, kao što su bambus-beton i bambus-polimeri, koji nude dodatnu otpornost i dugotrajnost, proširujući mogućnosti njegove primene u modernoj arhitekturi.



Slika 6.3. Kuća izgrađena sa bambusom kao konstruktivnim materijalom [27]

Rastuća svest o održivosti i potreba za smanjenjem emisije ugljen-dioksida dodatno popularizuju bambus kao ekološki odgovoran izbor. Njegova otpornost, estetska privlačnost i svestranost čine ga idealnim materijalom za projekte koji zahtevaju ravnotežu između funkcionalnosti i zaštite životne sredine. S obzirom na njegove osobine i inovacije u preradi, bambus ima potencijal da postane ključni materijal u budućem građevinarstvu, posebno u urbanim sredinama koje teže održivoj izgradnji.

Drvo u kombinaciji s drugim materijalima

Jedan od značajnih trendova u savremenom građevinarstvu je integracija drveta s drugim materijalima kako bi se postigla optimalna funkcionalnost, estetika i održivost. Kombinovanjem drveta s čelikom, betonom, staklom ili recikliranim materijalima, stvaraju se inovativna rešenja koja kombinuju prednosti svakog od materijala, pružajući dodatnu čvrstoću, trajnost i energetske efikasnost.

Na primer, drveni elementi upareni s čelikom koriste se za konstrukcije koje zahtevaju veliku nosivost, dok istovremeno zadržavaju prirodan izgled i toplinu drveta. Ova kombinacija je posebno popularna u industrijskim i komercijalnim objektima, gde čelik osigurava strukturnu stabilnost, dok drvo doprinosi estetici i akustičkim svojstvima prostora. Upotreba drveta i betona često se sreće u hibridnim konstrukcijama, gde beton pruža potrebnu otpornost na pritisak i vlagu, dok drvo preuzima ulogu laganog, fleksibilnog materijala s odličnim izolacionim svojstvima. Ovakve kombinacije posebno su korisne u izgradnji temelja, podova i mešoviti zidova. Kombinacija drveta i stakla donosi jedinstven spoj prirodnog i modernog. Drvo u okviru staklenih fasada stvara energetski efikasne objekte, pružajući toplinsku izolaciju i prirodnu ventilaciju, uz istovremeno maksimiziranje prirodnog osvetljenja. Ova kombinacija se često koristi u javnim i poslovnim objektima, kao i u stambenim prostorima, gde doprinosi stvaranju prijatnog i zdravog okruženja. Takođe, u ekološki orijentisanoj gradnji, drvo se kombinuje s recikliranim materijalima, poput recikliranog metala ili plastike, kako bi se dodatno smanjio ekološki otisak objekata. Ovi materijali zajedno stvaraju građevinske elemente koji su održivi i dugotrajni, uz istovremeno smanjenje otpada i negativnog uticaja na životnu sredinu.

Ovaj trend sinergije materijala omogućava projektantima i arhitektama da osmisle građevine koje nisu samo funkcionalne i estetski privlačne, već i usklađene s principima održivosti, čime odgovaraju na savremene izazove u građevinskoj industriji.

Pametne drvene građevinske komponente

Razvoj tehnologije pametnih materijala doveo je do uvođenja inovativnih drvenih građevinskih elemenata opremljenih senzorima koji pružaju podatke u realnom vremenu o stanju i performansama zgrade. Ovi senzori se ugrađuju unutar drvenih panela, nosača ili obloga, omogućavajući praćenje ključnih parametara kao što su temperatura, vlažnost, naprezanje i deformacije materijala. Jedna od najvažnijih prednosti ovih pametnih sistema je mogućnost rane detekcije potencijalnih problema, kao što su povećana vlažnost koja može dovesti do razvoja plesni ili slabljenja strukture. Na primer, senzori mogu signalizirati curenje vode ili promene u strukturalnom integritetu pre nego što šteta postane ozbiljna. Ova funkcionalnost omogućava pravovremenu intervenciju, smanjujući troškove održavanja i produžavajući vek trajanja zgrade.

Pametni drveni materijali takođe doprinose energetske efikasnosti objekta. Podaci prikupljeni senzorima integrišu se s pametnim sistemima za upravljanje energijom, koji optimizuju grejanje, hlađenje i ventilaciju na osnovu trenutnih uslova u prostoru. Na taj način smanjuju se energetske gubici i poboljšava udobnost korisnika. Osim toga, ovi sistemi igraju ključnu ulogu u održivoj gradnji, jer omogućavaju precizno praćenje životnog ciklusa zgrade. Podaci prikupljeni tokom vremena mogu se koristiti za optimizaciju budućih projekata, čime se dodatno smanjuje ekološki otisak građevinske industrije.

Kombinacija prirodnih svojstava drveta s tehnologijom pametnih materijala predstavlja korak napred ka integraciji održivosti i digitalizacije u građevinarstvu. Pametne drvene komponente ne samo da unapređuju performanse zgrada, već i redefinišu način na koji se tradicionalni materijali uklapaju u modernu gradnju.

Upotreba drvenih vlakana (Fiberboard)

Drvena vlakna, koja se obrađuju u ploče srednje ili visoke gustine (MDF i HDF), predstavljaju jedan od najraznovrsnijih proizvoda u modernoj građevinskoj i dizajnerskoj industriji. Ovi materijali nastaju od ostataka drveta, poput piljevine i strugotine, koji se vezuju sintetičkim smolama i presuju pod visokim pritiskom i temperaturom. Zahvaljujući procesu proizvodnje, MDF i HDF ploče nude izuzetnu homogenost i stabilnost, što ih čini idealnim za raznovrsnu upotrebu, kako u enterijeru, tako i u eksterijeru.

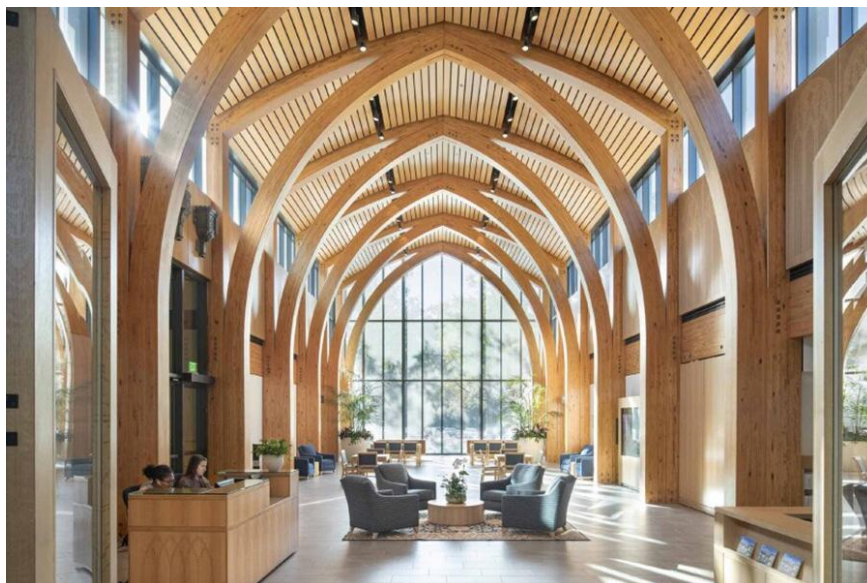
Razvoj tehnologija proizvodnje omogućio je poboljšanje čvrstoće i otpornosti drvenih vlaknastih ploča na vlagu, čime se proširila njihova primena. Moderne MDF i HDF ploče tretiraju se posebnim hemijskim i površinskim premazima koji smanjuju upijanje vode i povećavaju otpornost na deformacije. Ovo ih čini pogodnim ne samo za unutrašnje zidne obloge, nameštaj i dekorativne elemente, već i za primenu u vlažnim prostorijama, poput kuhinja i kupatila. U građevinarstvu, drvene vlaknaste ploče koriste se za izradu fasadnih sistema koji kombinuju lakoću i čvrstoću. Ovi paneli omogućavaju konstrukciju laganih, estetski privlačnih i energetski efikasnih fasada, koje nude odličnu toplotnu i zvučnu izolaciju. Njihova glatka površina omogućava lako farbanje, furniranje ili laminiranje, čime se postižu različiti dekorativni efekti. U enterijeru, MDF i HDF ploče su nezaobilazne u proizvodnji nameštaja, kuhinjskih ormarića, dekorativnih panela i obloga za zidove i plafone. Zahvaljujući preciznosti obrade, ovi materijali

omogućavaju složene dizajnerske detalje, poput gravura i perforacija, koje se lako implementiraju uz pomoć CNC tehnologije.

Jedna od ključnih prednosti MDF i HDF ploča je njihova održivost. Korišćenjem drvnog otpada i recikliranih materijala u proizvodnji, smanjuje se potreba za sečom stabala, čime se doprinosi očuvanju prirodnih resursa. Dalji razvoj tehnologija u pravcu smanjenja emisije formaldehida i uvođenje ekoloških veziva dodatno unapređuju održivost ovih materijala. U budućnosti se očekuje širenje primene drvenih vlakana kroz razvoj novih kompozitnih materijala, poboljšanje otpornosti na vremenske uslove i integraciju sa pametnim građevinskim tehnologijama. MDF i HDF ploče, kao spoj prirodnih i industrijskih resursa, nastaviće da igraju ključnu ulogu u modernom građevinarstvu i dizajnu.

Estetski trendovi: Prirodni izgled i „biophilic“ dizajn

Savremeni estetski trendovi u arhitekturi i dizajnu snažno su inspirisani prirodom, a drvo igra ključnu ulogu u ovoj paradigmi. „Biophilic“ dizajn, koji teži ponovnom uspostavljanju veze između ljudi i prirodnog okruženja, koristi drvo kao jedan od osnovnih elemenata zbog njegovih toplih, teksturalnih i vizuelnih karakteristika, Slika 6.4.



Slika 6.4. „Biophilic“ dizajn u drvenim konstrukcijama [28]

U enterijerima, prirodni izgled drveta ističe se kao dominantan element koji prostorijama daje toplinu, eleganciju i osećaj udobnosti. Upotreba drvenih obloga za zidove, plafone i podove sve je prisutnija, jer drvo svojim prirodnim bojama i teksturama unosi organski karakter u prostor. Osim obloga, drvo se koristi i za izradu nameštaja, stubova, stepeništa i dekorativnih detalja. Svetle vrste drveta, poput hrasta i bora, popularne su u minimalističkim i skandinavskim enterijerima, dok tamnije vrste, poput oraha i mahagonija, donose notu luksuza i klasične sofisticiranosti. Kombinacija drveta s drugim materijalima, poput stakla, betona i metala, stvara kontrastne i moderne prostore koji spajaju prirodno i industrijsko.

Na spoljnim fasadama, drvo pruža prirodan i autentičan izgled, istovremeno obezbeđujući odlične izolacione osobine. Fasade obložene drvetom stapaju se s prirodnim okruženjem, čineći objekte estetski prijemčivim i ekološki osvešćenim. Moderna arhitektura često koristi termički

modifikovano drvo ili vrste otporne na spoljašnje uticaje, poput kedra i ariša, koje osiguravaju dugotrajnost i otpornost na vremenske uslove.

Pored estetike, korišćenje drveta u dizajnu prostora ima i dokazani psihološki uticaj. Istraživanja pokazuju da prirodni materijali, poput drveta, mogu smanjiti stres, povećati produktivnost i doprineti opuštenijem okruženju. Njegova prisutnost u prostorijama povezana je s osećajem topline i harmonije, što doprinosi stvaranju zdravijeg životnog i radnog prostora. Ovi pozitivni efekti čine drvo idealnim izborom za stambene objekte, ali i za prostore poput škola, bolnica i kancelarija, gde je podsticanje dobrobiti i produktivnosti od ključne važnosti.

Povećanje životnog veka drvenih objekata

Svojstva drveta, kao što su prirodna toplina i estetska privlačnost, čine ga poželjnim materijalom u građevini, ali njegova otpornost na spoljašnje uticaje dugo je bila ograničavajući faktor. Savremena tehnologija tretiranja drveta značajno je unapredila njegovu trajnost, omogućavajući mu da zadrži svoje performanse čak i u najzahtevnijim uslovima.

Jedan od ključnih inovativnih pristupa je primena nano-tehnologije. Nanočestice ugrađene u premaze i tretmane drveta poboljšavaju otpornost na vlagu, UV zračenje i biološke agense, poput plesni i insekata. Ovi tretmani omogućavaju dublju penetraciju zaštitnih supstanci u strukturu drveta, stvarajući barijere koje usporavaju habanje i degradaciju tokom vremena. Takođe, termalna modifikacija drveta sve je češća u modernoj građevinskoj industriji. Ovaj proces uključuje izlaganje drveta visokim temperaturama u kontrolisanom okruženju, čime se smanjuje njegov sadržaj vlage i uklanjaju hranljive materije koje privlače insekte. Rezultat je drvo koje je prirodno otpornije na truljenje, bez potrebe za hemijskim tretmanima. Još jedna značajna inovacija su održivi premazi i boje, izrađeni od biorazgradivih ili ekološki prihvatljivih materijala. Ovi premazi pružaju zaštitu od vlage, UV zračenja i vremenskih uticaja, a istovremeno omogućavaju drvetu da „diše“. Ovakvi proizvodi ne samo da produžavaju vek trajanja drvenih objekata, već i smanjuju ekološki otisak.

Zahvaljujući ovim naprednim tehnologijama, potreba za čestim održavanjem drvenih konstrukcija značajno je smanjena. Ovo čini drvo konkurentnim materijalom u dugovečnosti, čime se podstiče njegova šira upotreba u savremenoj arhitekturi. U kombinaciji sa održivom praksom gradnje, drvo ne samo da postaje trajniji materijal, već i ključni element u razvoju ekološki odgovornih građevinskih rešenja.

Trendovi u upotrebi drveta kao građevinskog materijala sve više idu ka održivosti, efikasnosti, energetske štednje i smanjenju ekološkog otiska. Inovacije u tehnologiji obrade drveta, u kombinaciji sa naprednim inženjeringom i ekološkim svestima, stvaraju nove mogućnosti za primenu ovog tradicionalnog materijala u modernim građevinskim projektima. Drvo se ponovo afirmiše kao ključni materijal u savremenoj gradnji. Inovacije u tehnologiji obrade drveta, uz sve veći fokus na ekološke prednosti, omogućavaju sve širu primenu ovog materijala u građevinskoj industriji. Sa novim materijalima, drvo ne samo da zadržava svoje tradicionalne prednosti, već postaje i konkurentno u pogledu snage, izdržljivosti i svestranosti. Upotreba drveta u modernim zgradama, pa čak i u visokim zgradama, pokazuje njegov potencijal da bude ključni materijal za održivu i inovativnu arhitekturu u budućnosti.

7. LITERATURA

- [1] Ahmer, C. Riegl's 'Modern Cult of Monuments' as a theory underpinning practical conservation and restoration work. *Journal of Architectural Conservation* 2020, 26(2), 150–165. <https://doi.org/10.1080/13556207.2020.1738727> .
- [2] <https://www.palazzomediciriccardi.it/en/the-palace/> preuzeto 17.11.2024.
- [3] Bancroft R. M. Renewal of Roof Over Departure Platform at King's Cross Terminus, G.N.R.'. *Transactions of the Society of Engineers* 1887, 125-134.
- [4] <https://archello.com/project/brock-commons-tallwood-house/> preuzeto 17.11.2024.
- [5] Lopes DJV, Monti GF, Burgreen GW, Moulin JC, dos Santos Bobadilha G, Entsminger ED and Oliveira RF. Creating High-Resolution Microscopic Cross-Section Images of Hardwood Species Using Generative Adversarial Networks. *Front. Plant Sci.* 2021, 12:760139. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.760139> .
- [6] European Committee for Standardization (CEN). Structural timber - Strength classes. EN 338, 2009. Brussels, Belgium.
- [7] European Committee for Standardization (CEN). Timber structures - Glued laminated timber - Strength classes and determination of characteristic values. EN 1194, 1999. Brussels, Belgium.
- [8] European Committee for Standardization (CEN). "Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings" EN 1995-1-1, 2004. Brussels, Belgium.
- [9] Gustafsson, P. J. Chapter 7: Fracture perpendicular to grain - structural applications. *Timber engineering*, S. Thelandersson and H. J. Larsen, eds., John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2003, 103-130.
- [10] Edlund, B. "Lecture B2: Tension and compression." *Timber Engineering Step 1*, Blass H.J., ed., Centrum Hout, Almere, 1993, The Netherlands, B2/1-B2/8.
- [11] CNR Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction. Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. *Timber structures*. CNR-DT 201/2005, 2007. Rome, Italy.
- [12] Gojković, M., Stojić, D. *Drvene konstrukcije*, Građevinski fakultet u Beogradu, 1996, Beograd.

- [13] Isaksson, T. Chapter 4: Structural timber - variability and statistical modelling.” Timber engineering, S. Thelandersson and H. J. Larsen, eds., John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2003, England, 45-66.
- [14] SRPS EN 1990: Evrokod 0 - Osnove projektovanja konstrukcija, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 2012.
- [15] SRPS EN 1991-1-1: Evrokod 1 - Dejstva na konstrukcije - Deo 1-1: Opšta dejstva - Zapreminske težine, sopstvena težina, korisna opterećenja za zgrade, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 2012.
- [16] SRPS EN 1995-1-1: Evrokod 5 — Projektovanje drvenih konstrukcija — Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 2012.
- [17] SRPS EN 1995-1-2: Evrokod 5 — Projektovanje drvenih konstrukcija — Deo 1-2: Opšte – Projektovanje konstrukcija na dejstvo požara, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 2012.
- [18] Gulvanessian, H., Calgaro, J.-A., Holicky, M. Designers’ Guide To EN 1990 Eurocode: Basis of Structural Design, Thomas Telford, London.
- [19] SRPS EN ISO 9001: Sistemi menadžmenta kvalitetom — Zahtevi sa uputstvom za korišćenje, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 2023.
- [20] https://www.architectmagazine.com/technology/architectural-detail/innovative-detail-wood-innovation-and-design-centre_o/ preuzeto 04.12.2024.
- [21] Azarbayjani, M., Thaddeus, D.J. One Floor at a Time: Cross-Laminating a Sustainable Future for Mass Timber in North America. In: Sayigh, A. (eds) The Importance of Wood and Timber in Sustainable Buildings. Innovative Renewable Energy. Springer, Cham 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71700-1_10 .
- [22] El-Hussieny, E. Emerging the concept of Sustainable Architecture in forming a Smart City. Resourceedings 2023, 3(1), 22–32. <https://doi.org/10.21625/resourceedings.v3i1.948> .
- [23] <https://urnabios.com/centenary-tree-canopy-walkway/> preuzeto 04.12.2024.
- [24] <https://the.akdn/en/how-we-work/our-agencies/aga-khan-trust-culture/akaa/green-school/> preuzeto 04.12.2024
- [25] Liu, Y.; Guo, H.; Sun, C.; Chang, W.-S. Assessing Cross Laminated Timber (CLT) as an Alternative Material for Mid-Rise Residential Buildings in Cold Regions in China—A Life-Cycle Assessment Approach. Sustainability 2016, 8, 1047.

- [26] Ilgin, H.E.; Karjalainen, M. Preliminary Design Proposals for Dovetail Wood Board Elements in Multi-Story Building Construction. *Architecture* 2021, 1, 56-68.
- [27] Bredenoord, J. Bamboo as a Sustainable Building Material for Innovative, Low-Cost Housing Construction. *Sustainability* 2024, 16, 2347. <https://doi.org/10.3390/su16062347> .
- [28] Kremer P.D., Abbasnejad B., Ahankoob A., Wakefield R. An Assessment of the Quantifiable Effects for Expressed TimberBiophilic Treatments: A Case for Mass Timber Construction?. *Mass Timber Construction Journal* 2024, 7, 31.