

UNIVERZITET U BEOGRADU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Mr Ivan R. Glišović

**TEORIJSKA I EKSPERIMENTALNA
ANALIZA NOSAČA OD LEPLJENOG
LAMELIRANOG DRVETA OJAČANIH
KARBONSKIM TRAKAMA**

doktorska disertacija

Beograd, 2013.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ivan R. Glišović

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL
ANALYSIS OF GLULAM BEAMS
REINFORCED WITH CFRP PLATES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

Univerzitet u Beogradu
Građevinski fakultet

Mr Ivan R. Glišović, dipl. građ. inž.:

TEORIJSKA I EKSPERIMENTALNA ANALIZA NOSAČA OD LEPLJENOG
LAMELIRANOG DRVETA OJAČANIH KARBONSKIM TRAKAMA

doktorska disertacija

Mentor:

Prof. dr Boško Stevanović, dipl. građ. inž.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Komisija:

1. Prof. dr Boško Stevanović, dipl. građ. inž.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
2. Prof. dr Đorđe Vuksanović, dipl. građ. inž.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
3. Prof. dr Dragoslav Stojić, dipl. građ. inž.
Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu

Datum odbrane:

TEORIJSKA I EKSPERIMENTALNA ANALIZA NOSAČA OD LEPLJENOG LAMELIRANOG DRVETA OJAČANIH KARBONSKIM TRAKAMA

Rezime

Ideja o ojačanju nosača od lepljenog lameliranog drveta došla je kao odgovor na potrebu poboljšanja mehaničkih karakteristika, kao i obezbeđivanja veće pouzdanosti ovih konstrukcijskih elemenata.

Tokom prethodnih desetak godina primena polimera ojačanih vlaknima (FRP) za ojačanje i sanaciju konstrukcija je značajno povećana. Karakteristike kao što su mala težina, visoka krutost i čvrstoća na zatezanje, koroziona otpornost i širok spektar raspoloživih veličina i oblika su neki od razloga koji opravdavaju rastuću upotrebu ove vrste materijala. Mada su intezivna istraživanja primene FRP kompozita sprovedena za armiranobetonske i zidane elemente, vrlo ograničene informacije su dostupne vezano za primenu u drvenim konstrukcijama.

U okviru ove teze se istražuju mogućnosti primene karbonskih (CFRP) traka kao ojačanja lepljenih lameliranih drvenih nosača. Eksperimentalni, analitički i numerički pristupi su korišćeni u cilju procene efekta ojačanja na ponašanje nosača pri savijanju. Posebna pažnja je usmerena ka utvrđivanju optimalnog položaja ojačanja koji će omogućiti maksimalno poboljšanje nosivosti i krutosti u odnosu na neojačani nosač.

Eksperimentalni program je obuhvatio izradu i ispitivanje na savijanje neojačanih i ojačanih nosača. Svi nosači su ispitani do loma. Mehaničke karakteristike ojačanih nosača su upoređene sa karakteristikama neojačanih nosača sa aspekta veze opterećenje-ugib, oblika loma, nosivosti, krutosti i raspodele dilatacija u preseku.

Ostvarivanje spoja lepljenjem je široko prihvaćeno kao efikasan metod za ravnomerno prenošenje opterećenja između konstrukcijskih materijala i generalno se smatra kao najpogodnija tehnika povezivanja FRP materijala i drveta. Kvalitativna procena karakteristika spoja između drveta, epoksidnog lepka i karbonske trake sprovedena je posebnim ispitivanjem.

Program ispitivanja materijala je, takođe, sproveden, sa ciljem određivanja mehaničkih karakteristika drveta i CFRP materijala, koje mogu biti korišćene kao ulazni podaci za analitičku i numeričku analizu.

Analitički model za predviđanje nosivosti i krutosti ojačanih nosača je predložen. Model je kalibrisan na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja neojačanih nosača, a zatim modifikovan kako bi se uzeo u obzir efekat karbonskog ojačanja.

Trodimenzionalni nelinearni numerički model je razvijen da simulira ponašanje neojačanih i ojačanih nosača. Simuliranje je izvršeno primenom metode konačnih elemenata, korišćenjem programa ABAQUS. Model se može lako prilagoditi različitim geometrijama i karakteristikama materijala i kao takav predstavlja koristan alat za optimalizaciju projektovanja ojačanih nosača.

Na osnovu rezultata istraživanja, moguće je zaključiti da primena karbonskih traka predstavlja povoljno rešenje za ojačanje (sanaciju) lepljenih lameliranih drvenih nosača. Strateško postavljanje karbonskog ojačanja u zonu najvećih napona zatezanja nosača može dovesti do značajnog poboljšanja nosivosti i krutosti, kao i duktilnosti.

Ključne reči: lepljeno lamelirano drvo, nosači, ojačanje, karbonska vlakna, ispitivanje na savijanje, analitički model, analiza konačnim elementima.

Naučna oblast: Građevinarstvo

Uža naučna oblast: Drvene konstrukcije

UDK: 624.011.1(043.3)

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF GLULAM BEAMS REINFORCED WITH CFRP PLATES

Summary

The idea of reinforcing glued laminated timber (glulam) beams came in response to the need to improve the mechanical properties, as well as to ensure higher reliability of this type of structural elements.

In the last decade the use of fiber reinforced polymers (FRPs) in the context of strengthening and repairing structures has been significantly increased. Properties such as light weight, high stiffness and tensile strength, corrosion resistance and wide variety of available sizes and shapes are some of the reasons that justify the growing use of this type of materials. Although extensive research has been conducted for concrete and masonry members reinforced with FRP composites, very limited information is available for timber applications.

This thesis investigated the possibility of using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) plates as reinforcement of glulam beams. Experimental, analytical and numerical approaches are employed in order to assess the effect of the reinforcement on flexural behavior of beams. The main focus of this thesis had been on identifying an optimum reinforcement arrangement which maximizes the stiffness/strength properties.

The experimental test program involved the fabrication and testing in flexure of unreinforced beams and reinforced beams. All of the beams were tested to failure to examine their behavior and determine the effect of various reinforcing schemes. The mechanical performance of the reinforced beams is compared with that of the unreinforced glulam beams with regard to the load-deflection behavior, failure mode, ultimate load capacity, stiffness and strain profile distribution.

Adhesive bonding is widely recognized as an effective method for uniformly transferring the shear stresses between structural materials and is generally considered the most effective technique for connecting reinforcing FRP material and timber. Characterization of the bond performance between the timber, epoxy adhesive and CFRP plates was undertaken.

A program of material characterization studies was, also, undertaken to determine mechanical properties for the timber and CFRP which could be used as input data for the analytical and numerical models.

An analytical model is proposed to predict the flexural capacity and stiffness of reinforced glulam beams. The model is calibrated using the results of the unreinforced timber beam tests and modified to account for the effect of the CFRP reinforcement.

A 3D non-linear numerical model was developed to simulate the behavior of unreinforced and reinforced beams. The finite element package ABAQUS was employed for the simulations. The model can readily accommodate different geometries and material properties, and is therefore a useful tool to optimize the design of the CFRP reinforced glulam beams.

Based on the results of the study, it is possible to conclude that the application of CFRP plates is a promising solution to reinforce (repair) the glulam beams. Strategically positioned the CFRP reinforcement in the more highly stressed tension region at of the glulam beam may produce significant improvements in strength and stiffness, as well as ductility.

Keywords: glulam, beams, reinforcement, carbon fibers, bending tests, analytical model, finite element analysis.

Science field: Civil engineering

Field of research: Timber structures

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1 Opšte	1
1.2 Predmet i cilj istraživanja	4
1.3 Značaj istraživanja	5
2. DRVO KAO GRAĐEVINSKI MATERIJAL.....	6
2.1 Vrste drveta koje se upotrebljavaju u građevinskim konstrukcijama	6
2.2 Makro i mikro struktura drveta.....	7
2.3 Zavisnost karakteristika drveta od njegovog porekla	10
2.4 Osnovne greške drveta.....	11
2.5 Anizotropija	12
2.6 Mehaničke karakteristike drveta.....	15
2.7 Efekat veličine	18
2.8 Klasiranje drveta.....	20
2.9 Lepljeno lamelirano drvo.....	21
2.9.1 Proizvodnja lepljenog lameliranog drveta.....	21
2.9.2 Mehaničke karakteristike lepljenog lameliranog drveta	22
3. FRP KOMPOZITI.....	25
3.1 Sastavni delovi FRP kompozita.....	25
3.1.1 Vlakna	25
3.1.2 Matrica na bazi polimera.....	28
3.2 Kompozit	29
3.3 Mehaničke karakteristike.....	31
3.4 Povezivanje FRP kompozita za konstrukcijske elemente	35
4. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA PRIMENE FRP KOMPOZITA ZA OJAČANJE DRVENIH ELEMENATA	37
4.1 FRP kompoziti kao ojačanje.....	37
4.2 Ojačanje drvenih elemenata izloženih savijanju.....	39
5. PROGRAM EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA.....	71
5.1 Fizičke i mehaničke karakteristike upotrebljenih materijala	72
5.1.1 Fizičke i mehaničke karakteristike drveta.....	72

5.1.1.1	Određivanje vlažnosti drveta	72
5.1.1.2	Određivanje zapreminske mase drveta.....	73
5.1.1.3	Određivanje čvrstoće drveta na zatezanje paralelno vlaknima ...	75
5.1.1.4	Određivanje čvrstoće drveta na pritisak paralelno vlaknima	79
5.1.1.5	Određivanje čvrstoće drveta na savijanje.....	83
5.1.1.6	Određivanje čvrstoće drveta na smicanje paralelno vlaknima....	88
5.1.2	Fizičke i mehaničke karakteristike FRP kompozita.....	91
5.1.2.1	Određivanje čvrstoće karbonske trake na zatezanje.....	92
5.1.3	Fizičke i mehaničke karakteristike epoksidnog lepka.....	96
5.2	Ispitivanje karakteristika spoja drvo-karbonska traka	97
5.2.1	Test smicanjem.....	98
5.2.2	Pull-off test	101
5.3	Ispitivanje neojačanih i ojačanih nosača od lepljenog lameliranog drveta.....	104
5.3.1	Izrada nosača	105
5.3.2	Ispitivanje nosača	113
6.	PRIKAZ I INTERPRETACIJA REZULTATA EKSPERIMENTALNOG	
	ISPITIVANJA NOSAČA	117
6.1	Ponašanje opterećenje-ugib i oblik loma	117
6.2	Kapacitet nosivosti i deformabilnosti	130
6.3	Krutost	132
6.4	Raspodela dilatacija	141
6.5	Diskusija rezultata	145
6.5.1	Efekat ojačanja	145
6.5.2	Efekat dispozicije ojačanja.....	146
6.5.3	Efekat procenta ojačanja	147
6.5.4	Efekat lepljenog spoja	147
7.	ANALITIČKI PRORAČUN	148
7.1	Konstitutivni modeli za materijale.....	148
7.2	Oblici loma	150
7.3	Teorijski model.....	152
7.3.1	Neojačani nosači	154
7.3.2	Nosači ojačani karbonskom trakom postavljenom sa spoljašnje strane..	158

7.3.3 Nosači ojačani karbonskom trakom postavljenom između drvenih lamela	165
7.3.4 Nosači ojačani karbonskom trakom postavljenom u vertikalni prorez ...	173
7.4 Proračunski postupak	180
7.5 Model za proračun krutosti	183
7.6 Kalibracija modela	185
7.7 Rezultati analitičkog proračuna	186
8. NUMERIČKA ANALIZA	194
8.1 Numeričko modeliranje	194
8.2 Karakteristike materijala	197
8.3 Kalibracija modela	201
8.4 Rezultati numeričke analize	201
8.5 Poređenje rezultata numeričke analize sa analitičkim rezultatima	218
9. ZAKLJUČCI I PREPORUKE	220
LITERATURA	224
ANEKSI (Biografija autora - Izjava o autorstvu - Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada - Izjava o korišćenju)	232

1. UVOD

1.1 Opšte

Drvo kao građevinski materijal primenjuje se od najstarijih vremena. Pored kamena, to je dugi niz godina bio osnovni materijal za građenje [1]. I danas, pored progresa čelika i betona u savremenom građevinarstvu, drvene konstrukcije imaju svoje mesto. Velika čvrstoća paralelno sa vlaknima naspram male zapreminske težine, niska toplotna provodljivost, dobra otpornost na dejstvo mraza, zadovoljavajuća otpornost prema delovanju pojedinih hemijskih agenasa, laka obrada, velike mogućnosti oblikovanja, jednostavna montaža, nedvosmislena ekonomičnost, kao i atraktivan estetski izgled su neka od pozitivnih svojstava koja postavljaju drvo kao materijal za građenje ravnopravno sa drugim materijalima. I u budućnosti, zbog koncepta zaštite životne sredine i energetske efikasnosti, drvo će nastaviti da ima adekvatno mesto među konstrukcijskim materijalima. Drvo je obnovljiv i biorazgradiv materijal, sa minimalnim energetske zahtevima u procesu proizvodnje, obrade i primene [2].

Međutim, drvo ima i svoje nedostatke i mane. Ograničenja u pogledu dostupnosti stabala u prirodi od kojih se mogu dobiti željene veličine elemenata, kao i varijabilnost karakteristika nosivosti i krutosti prouzrokovane različitim uslovima rasta i prisustvom prirodnih defekata mogu značajno umanjiti primenu drveta u građevinarstvu. Problemi ove vrste se mogu, u nekim granicama, umanjiti primenom proizvoda na bazi drveta.

Lepljeno lamelirano drvo je proizvod koji se dobija lepljenjem tankih drvenih dasaka (lamela) u planiranom rasporedu po posebnom tehnološkom procesu. Ova

tehnologija omogućava proizvodnju drvenih elemenata u kojima su defekti rasuti, obezbeđujući finalni proizvod sa ravnomernim karakteristikama, čije su dimenzije teoretski neograničene. Sposobnost da premosti veće raspone i prihvati veće opterećenje znatno je unapredilo drvo kao građevinski materijal. Međutim, značajan napredak u tehnologiji lepljenog lameliranog drveta mora biti načinjen kako bi se održala konkurentnost sa drugim građevinskim materijalima, naročito čelikom.

Mada lepljeno lamelirano drvo pruža značajna poboljšanja u odnosu na monolitno drvo, njegova granična čvrstoća na savijanje ostaje uslovljena uticajem faktora koji mogu znatno redukovati čvrstoću, kao što su kvрге i podužni nastavci lamela u zategnutoj zoni. Lom drveta usled zatezanja je teško predvidiv i izuzetno krt. Prevremen (nenajavljen) lom povezan sa variabilnošću karakteristika materijala zahteva primenu većih koeficijenata sigurnosti u okviru standarda i propisa, što vodi ka povećanoj upotrebi materijala. Osim toga, u slučaju većih raspona dodatno povećanje dimenzija može se zahtevati radi zadovoljenja uslova upotrebljivosti. Razlog je mala vrednost modula elastičnosti drveta, kao i efekat tečenja drveta koji zahteva da se pri izračunavanju ugiba uzme u obzir trajanje opterećenje. Dodatno, zbog toga što je drvo organski materijal, može se javiti biološka degradacija konstrukcija. Defekti u oblasti najvećih napreznja mogu prouzrokovati značajnu redukciju nosivosti i krutosti konstrukcije.

U prošlosti, različite tehnike ojačanja, sa različitim stepenom efikasnosti, ispitane su sa ciljem povećanja krutosti i nosivosti konstrukcija. Istraživanja su uglavnom bila fokusirana na upotrebi metalnih ojačanja (čelične ploče ili šipke, aluminijumske ploče). Ovakve metode su jednostavne i efikasne, ali imaju određene nedostatke kao što su: povećanje sopstvene težine, teškoće pri transportu i izvođenju, troškovi održavanja i nekompatibilnost sa osnovnim materijalom. Tradicionalne metode generalno zahtevaju upotrebu mehaničkih spojnih sredstava (npr. zavrtnjeva ili eksera) koja mogu biti neefikasna u oštećenom drvetu. Osim ovoga, čelični elementi su osetljivi na koroziju, a aluminijumske ploče su sklone izbočavanju pri termičkim dejstvima [3].

Poslednjih godina, povećana dostupnost i sve niža cena polimera ojačanih vlaknima (Fibre Reinforced Polymer - FRP) stimulisala je istraživanje njihove primene u oblasti ojačanja i sanacije konstrukcija. FRP kompoziti su relativno nova klasa kompozitnih materijala u okviru kojih su prisutna vlakna (najčešće staklena ili

karbonska) izraženih mehaničkih karakteristika. Ovi kompozitni materijali su dostupni kao gotovi fabrički proizvodi najčešće u obliku traka ili tkanina, pri čemu se u prvom slučaju radi o proizvodima u okviru kojih su vlakna povezana izuzetno čvrstom, hemijski otpornom i trajnom sintetičkom smolom (kao matricom), dok je u drugom slučaju reč o proizvodima koji potpuno nalikuju na tkanine - bez prisustva ikakve vezivne supstance. Predmetni proizvodi se isporučuju u različitim debljinama i širinama, a mogu da imaju praktično neograničenu dužinu (u rolnama). Kod traka debljine se kreću do 3 mm, a širine do 200 mm, dok su u slučaju tkanina njihove efektivne debljine manje od 1 mm, a širine najčešće 50-1000 mm [4]. U okviru traka, vlakna su uglavnom orijentisana podužno-jednoaksijalno, dok kod tkanina njihova orijentacija može da bude jednoaksijalna ili biaksijalna. Povezivanje traka i tkanina za konstrukcijske elemente izvodi se uglavnom lepljenjem uz primenu odgovarajućih epoksidnih lepkova. Pored male sopstvene težine i vrlo visokih mehaničkih karakteristika, primena FRP traka kao materijala za ojačanje i sanaciju konstrukcija, nudi dosta pogodnosti kao što su: jednostavnost, izuzetna mnogostranost, velika mogućnost oblikovanja, pogodan i lak transport, primena i u ograničenom prostoru (smanjeni troškovi za skelu i radnu snagu), kao i minimalno remećenje objekta i njegovih korisnika u toku intervencije. FRP materijali, takođe, pokazuju odličnu trajnost u odnosu na druge konvencionalne konstrukcijske materijale. Kao rezultat njihove primene, troškovi održavanja se mogu redukovati.

Uspešna primena kompozitnih materijala u kombinaciji sa drvetom može biti izvodljiva zahvaljujući kompatibilnosti i komplementnosti njihovih karakteristika. Na primer, mala težina drveta, što je jedna od najznačajnijih karakteristika, nije ugrožena primenom karbonskih traka. Pored ovoga, najočigledniji nedostak drveta, kakav je izrazita mehanička heterogenost usled prisustva brojnih defekata, može se umanjiti povezivanjem sa drugim konstruktivno efikasnim materijalom kakav je FRP kompozit.

Kombinacija drvo-FRP ima, takođe, i neka ograničenja koja su posledica prirode datih materijala, uključujući različito ponašanje u odnosu na varijacije temperature i vlažnosti, kao i različito ponašanje pri požaru [5]. Još jedno važno pitanje odnosi se na način povezivanja dva materijala.

Mada su obimna istraživanja primene FRP kompozita sprovedena za ojačanje ili sanaciju armiranobetonskih i zidanih elemenata, vrlo ograničene informacije su

dostupne vezano za primenu u drvenim konstrukcijama. Najveća pažnja postojećih istraživanja usmerena je ka ojačanju drvenih elemenata na savijanje. Ojačanje drvenih elemenata na smicanje, kao i lokalno ojačanje na zatezanje upravno na vlakna su, takođe, bili predmet istraživanja [6].

1.2 Predmet i cilj istraživanja

Primena kompozitnih materijala kao ojačanja drvenih elemenata zahteva obraćanje posebne pažnje na nekoliko aspekata problema. Prvo, vrlo je važno pažljivo planirati vrstu intervencije koja treba da se realizuje. Zapravo, postoji mogućnost brojnih metoda ojačanja drvenih elemenata koristeći različite položaje FRP elemenata (spolja ili unutar poprečnog preseka drveta, u zategnutoj ili/i pritisnutoj zoni, horizontalno ili vertikalno postavljanje) i svaki izbor potencijalno vodi različitim rezultatom. Kad je izbor načinjen, sledeći korak je izbor najadekvatnijeg FRP elementa. Široka oblast proizvoda i materijalnih karakteristika FRP elemenata koja je trenutno na raspolaganju može dovesti do teškoće u izboru. Iz tog razloga, izbor metode i materijala ojačanja treba načiniti na osnovu precizne analize karakteristika elementa koji se ojačava kako bi se postigla efikasnost intervencije.

Predmet istraživanja u okviru ove teze je ponašanje pri savijanju lepljenih lameliranih nosača ojačanih karbonskim trakama. Posebna pažnja usmerena je ka utvrđivanju efikasne metode ojačanja koja će dovesti do maksimalnog poboljšanja nosivosti i krutosti u odnosu na neojačani nosač. Istraživanje je ograničeno na nosače statičkog sistema proste grede opterećene kratkotrajnim statičkim opterećenjem. Svi razmatrani nosači su pravi sa konstantnom visinom.

U skladu sa predmetom istraživanja, predviđeni su sledeći ciljevi istraživanja:

- određivanje nosivosti, krutosti i duktilnosti lepljenih lameliranih nosača ojačanih karbonskim trakama za različite metode ojačanja;
- određivanje mogućih oblika loma ojačanih nosača;
- utvrđivanje stepena poboljšanja nosivosti i krutosti ojačanih u odnosu na neojačane nosače za različite metode ojačanja;
- razvoj analitičkog modela za predviđanje krutosti i nosivosti ojačanih nosača;
- razvoj numeričkog modela za analizu ponašanja ojačanih nosača.

1.3 Značaj istraživanja

Primena kompozitnih materijala za ojačanje drvenih elemenata bi trebalo da pruža velike mogućnosti kod sanacije postojećih konstrukcija, ali i kod projektovanja novih objekata. Visoke mehaničke karakteristike kompozitnih materijala mogu značajno povećati nosivost i krutost ojačanih elemenata, ali i učiniti drvenu konstrukciju znatno pouzdanijom, redukujući mogućnost pojave krtog loma. Takođe, prisustvo karbonskih ojačanja može sprečiti otvaranje pukotina, ograničiti lokalna oštećenja i premostiti lokalne defekte u drvetu, i na taj način umanjiti varijabilnost mehaničkih karakteristika drveta. Sve ove karakteristike mogu građevinskim inženjerima koristiti u cilju efikasnije primene drveta kao materijala.

Rezultati istraživanja su značajni i za industriju proizvodnje lepljenog lameliranog drveta. Ako se FRP kompoziti i drvo mogu kombinovati u proizvod visokih mehaničkih karakteristika, dobre trajnosti i niske varijabilnosti, ova industrija može biti konkurentnija na tržištu. Osim toga, zahvaljujući poboljšanju konstrukcijskih karakteristika, moguće je redukovati dimenzije poprečnih preseka elemenata i korišćenje građe lošijeg kvaliteta. Iskorišćavanjem lošije drvene građe omogućava se efikasnija upotreba drvenih resursa.

Nakon dokazivanja da su kompozitno ojačanje i lepljeno lamelirano drvo kompatibilni, ista tehnologija i filozofija može biti primenjena i na druge proizvode na bazi drveta (šperploče, OSB ploče, vlaknaticе) i na taj način ih učiniti jačim i efikasnijim. Prema tome, uspešna primena kompozitnih materijala i konstrukcijskog drveta će koristiti celokupnoj drvnoj industriji.

Pozitivni rezultati ovog istraživanja mogu pružiti mogućnost industriji proizvodnje kompozitnih materijala da predstavi svoje proizvode građevinskoj industriji, kako projektantima tako i izvođačima. Sa povećanjem potražnje za kompozitnim proizvodima, cena ovih materijala će postati konkurentnija i ekonomičnija, a razvoj tehnologije će sve više napredovati.

2. DRVO KAO GRAĐEVINSKI MATERIJAL

2.1 Vrste drveta koje se upotrebljavaju u građevinskim konstrukcijama

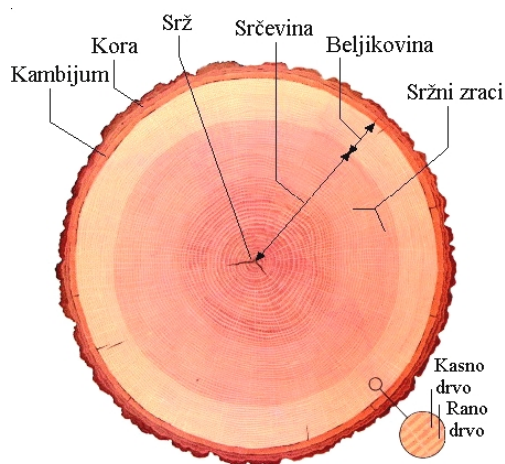
Drvo je široko rasprostranjeno na Zemlji, preko 30000 vrsta pokriva kopno od ekvatorijalnog do polarnih regiona. Drvene vrste su podeljene u dve glavne kategorije, četinare i lišćare. Ova podela je načinjena na osnovu sistema reprodukcije, ali takođe i na osnovu mikrostrukture.

U građevinskim konstrukcijama mogu se upotrebljavati mnoge vrste drveta. One variraju u zavisnosti epohe, podneblja, ekonomskih prilika i sl. Zbog toga nije adekvatno nabrajati sve vrste koje se mogu upotrebljavati, već samo one koje se mogu racionalno koristiti. Tržište u Evropi, pa i kod nas, svodi se uglavnom na četinarsko drvo (bor, jela, smrek, ariš) i manje na lišćarsko drvo (topola, hrast, bukva).

Istraživanje u okviru ove doktorske disertacije obuhvatilo je drvo smreke. Smreka (smrča, omorika) je visoko smolasto drvo koje može da dostigne visinu i do 50 m. Upotrebljava se u obliku tesane i rezane građe, pri čemu je moguće dobijanje konstrukcijskih elemenata vrlo velikih dužina. Ne koristi se za konstrukcije koje će biti izložene vlazi (npr. za mostove), pošto od vlage vrlo brzo strada, ali se zato vrlo često upotrebljava za međuspratne konstrukcije, krovne vezače i sl. Široko se primenjuje za izradu skela, a takođe ima veliku primenu i u stolariji (podovi, furnirski listovi, prozori, vrata i dr.).

2.2 Makro i mikro struktura drveta

Drvo je biološki, organski materijal sa velikim varijacijama u strukturi. Za primenu u građevinarstvu od najvećeg značaja je debl drвета. Makrostruktura debla drveta najbolje se može shvatiti razmatranjem poprečnog preseka. U poprečnom preseku lako se uočavaju sledeći strukturni elementi: srž (srce), drvna masa i kora (slika 2.1).



Slika 2.1 - Poprečni presek debla drveta [7]

Centralni deo poprečnog preseka stabla drveta je tzv. srž (srce). To je anatomska osa drveta čiji prečnik iznosi nekoliko milimetara. Odlikuje se tamnijom bojom i manjom tvrdoćom u odnosu na drvnu masu.

Najznačajniji element poprečnog preseka je drvna masa koja se sastoji od prstenova (godova), koji predstavljaju godišnje priraštaje drvne mase. Na svakom godu drveta zapažaju se dve zone: unutrašnja (konkavna strana), poznata kao rano ili prolećno drvo i spoljašnja (konveksna strana), poznata kao kasno - pozno ili jesenje drvo. Kao što se vidi i jedan god, posmatran sam za sebe, nije homogene građe. Isto tako postoji razlika u strukturi i boji pojedinih godova. Godovi bliže periferiji debla su mlađi, manje gusti, svežiji i svetlijeg su tona od godova bliže srži, koji su zbijeniji i tamnije boje. Spoljašnji deo poprečnog preseka, gde je proces rasta drveta još u toku i koji je odgovoran za skladištenje hrane i transport vode/minerala u krošnju drveta (fiziološki zadatak), naziva se beljikovina (beljika). Deo drveta oko srži, čija je uloga da

nosi drvo (mehanički zadatak), naziva se srčevina (srčka). Ovaj deo drveta naziva se još i pravo drvo.

Kora drveta predstavlja njegov zaštitni omotač. Sastoji se od: kambijuma, like i mrtve kore. Kambijum obuhvata beljikovinu i sadrži žive ćelije koje svake godine stvaraju novi god, tj. novi pojas beljikovine. U isto vreme najstariji pojas beljikovine gubi sposobnost da ispuni predviđeni zadatak i vremenom se polako pretvara u srčevinu.

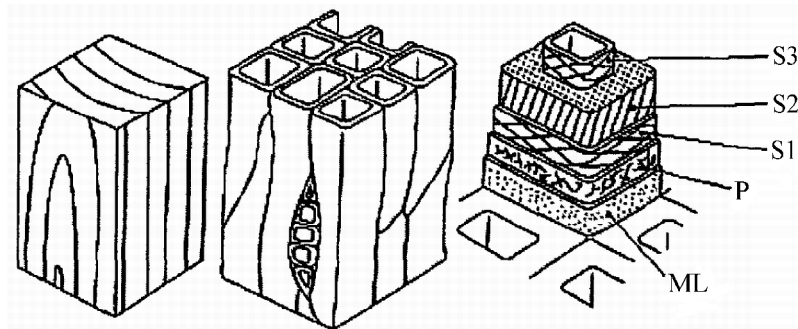
U okviru poprečnog preseka zapažaju se i sržni zraci, koji se sastoje od ćelija čiji je zadatak da formiraju radijalne veze između unutrašnjeg i spoljašnjeg dela poprečnog preseka drveta. Prema tome, sržni zraci imaju čisto fiziološku funkciju. U drvnoj masi se razlikuju primarni i sekundarni sržni zraci. Primarni polaze od srži i idu do periferije preseka, dok sekundarni idu od goda gde su formirani ka periferiji preseka.

Osnovni element mikrostrukture drveta je živa ćelija koja se sastoji od: ćelijske opne, protoplazme, jezgra i ćelijskog soka. U slučaju posečenog drveta, dolazi do odumiranja ćelija, pa odumrlu ćeliju formira samo ćelijska opna koja kao i u slučaju žive ćelije ostaje veoma propustljiva za vodu i druge tečnosti. Ćelije, koje mogu da budu veoma raznolikog kružnog ili ovalnog oblika, se uvek nadovezuju jedna na drugu. Tako se formira snop uzdužnih i poprečnih ćelija, koje čine tkivo drveta (drvnu masu). Kod četinarara, 90% ćelija je orijentisano vertikalno (u pravcu osovine stabla), dok je preostalih 10% poređano u horizontalnoj ravni u formi zraka. Tkivo drveta sačinjavaju ćelije ili grupe ćelija u formi vlakanaca ili formi cevčica (sudova). Vlakanca po pravilu imaju mehaničku funkciju, dok cevčice obavljaju fiziološku funkciju. Međutim, postoje i strukturni elementi koji istovremeno vrše obe funkcije, a to su tzv. traheide koje se uglavnom sreću kod četinarara. Šematski prikaz mikrostrukture drveta prikazan je na slici 2.2. Delovi ćelijske opne su sledeći:

- Središnja lamela (ML), sloj koji povezuje susedne ćelije drveta;
- Primarni zid (P);
- Sekundarni zid, koji se sastoji od spojašnjeg sloja (S1), srednjeg sloja (S2) i unutrašnjeg sloja (S3).

Ugao pružanja vlakanaca u odnosu na vertikalnu osu u sloju S2 utiče značajno na mehaničke karakteristike drveta. Ako je ugao blizak 0°, drvo će generalno imati visoke mehaničke karakteristike. Sa povećanjem ugla, čvrstoća drveta opada. Varijacija

ugla pružanja vlaknaca kod drveća iste vrste je uobičajena. Na primer, orijentacija vlaknaca u sloju S2 varira između 10-30° za drvo smreke [7]. Kao posledica izražene varijacije orijentacije vlaknaca, drvo ima izrađenu varijaciju mehaničkih karakteristika.



Slika 2.2 - Struktura ćelije drveta [7]

Na nivou molekula, drvo je sačinjeno primarno od celuloze, hemiceluloze, lignina i minorne vrednosti ostalih ekstrakata. Celuloza je najvažniji sastojak drveta. Reč je o linearnom polimeru, sastavljenom obično od nekoliko hiljada jedinica glukoze. Zahvaljujući ponašanju kao polarni molekul, molekuli celuloze su u stanju da privuku susedne molekule celuloze i na taj način formiraju vlakanca. Vlakanca su međusobno paralelni končani snopovi molekula celuloze okruženi ligninom i hemicelulozom, koji pomažu njihovom zajedničkom povezivanju. Stoga, na nivou ćelije, drvo se može klasifikovati kao prirodni kompozit sačinjen od celuloznih vlakana ugrađenih u matricu hemiceluloze i lignina. Orijentacija vlakana predominantno u jednom pravcu doprinosi visokoj čvrstoći na zatezanje i žilavosti drveta. Hemiceluloza je takođe polimer. Međutim, ona je sačinjena od mnoštva različitih molekula šećera, složenijih od glukoze, koji formiraju razgranati, amorfni molekul. Na drugoj strani, lignin ima kompleksnu, trodimenzionalnu strukturu, napravljenu od jedinica fenol-propana, povezanih na različite načine. Lignin, praktično, daje krutost i čvrstoću na pritisak ćelijama drveta. Kao i celuloza, hemiceluloza i lignin su polarni molekuli. Konačno, ekstrakti ne formiraju deo osnovne strukture drveta. Oni obuhvataju širok niz hemijskih supstanci koje utiču na svojstva drveta kao što su: boja, miris, ukus, otpornost na gljive i insekte, i zapaljivost.

Lišćari sadrže više celuloze nego četinari (45% naspram 41%) i manje lignina (22% naspram 28%) [8]. Sadržaj hemiceluloze je približno isti za obe vrste (30%).

Sadržaj hemijskih elemenata manje-više isti je za sve vrste drveta. Prosečan sadržaj pojedinih hemijskih elemenata u suvom drvetu je sledeći: ugljenik 49,6%, vodonik 5,9%, kiseonik 44,0%, azot 0,2% i pepeo u količini 0,3% [1].

2.3 Zavisnost karakteristika drveta od njegovog porekla

Karakteristike drveta je vrlo teško definisati čak i kad se radi o jednoj potpuno određenoj botaničkoj vrsti. Razlog za ovo može biti veoma različit: opšta pravila rasta drveta, pravilnost prirasta, lokalizacija uzorka, itd.

Nezavisno od vrste drveta, stanište na kojem drvo raste od velikog je uticaja na kvalitet drveta. To zavisi od geološkog sastava podloge (zemljišta) naročito od stepena vlažnosti zemlje i vlažnosti vazduha u kojoj drvo raste [9]. Na plodnim zemljištima zaštićenim od vetra bez veće vegetacije može se naći drvo normalnog prirasta sa homogenim karakteristikama. Takvo drvo karakteriše pravo stablo bez tehnoloških nedostataka, tj. bez zakrivljenosti. Na manje plodnim zemljištima u surovim klimatskim uslovima sa stalnim jakim vetrovima drvo će biti slabijeg kvaliteta.

U poprečnom preseku heterogenog drveta lako se raspoznaju godišnji priraštaji drvene mase (godovi). Ukoliko drvo sadrži više kasnog drveta u okviru jednog goda imaće bolje mehaničke karakteristike, a što više sadrži ranog drveta, biće lakše za obradu [1]. Pored ovoga, neujednačenost širine godova utiče na tehnička svojstva drveta, na homogenost građe drveta - povećava anizotropnost i umanjuju mehaničke karakteristike, a posebno čvrstoću na smicanje. Širina goda je posledica brzine rasta drveta.

Kao što je ranije navedeno, beljikovina se razlikuje od drveta srčevine. To se dešava zbog otvrdnjavanja ili mineralizacije drveta u određenom vremenskom periodu od obrazovanja lignina [9]. Mada je beljikovina nižih mehaničkih karakteristika, bar za drvo naših podneblja, nije neophodno da se pravi razlika između srčevine i beljikovine kada su mehaničke karakteristike u pitanju. Međutim, o ovome treba voditi računa kad su u pitanju insekti i gljive. Drvo, bilo beljikovine, bilo srčevine, nije isto po visini stabla. Donji deo stabla za razliku od gornjeg ne sadrži grane, pa daje materijal sa pravilnijim položajem vlakana.

2.4 Osnovne greške drveta

Kako je drvo organski materijal, koji nastaje prirodnim biološkim procesom, moguće su različite nepravilnosti (greške) koje manje ili više utiču na mogućnost njegove upotrebe u konstrukcijama. Razlikuju se nastale promene strukture, koje se već formiraju kod živog drveta u toku rasta, i promene koje su posledice fizičkih, mehaničkih i hemijskih uticaja koji mogu da se jave u toku rasta ili u toku obrade i upotrebe. Takođe, postoje i greške koje nisu posledica svojstava drveta, već greške mašina, odnosno čoveka, koje nastaju pri obradi 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. Drvo kvрге 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, kvрге u manjoj ili većoj meri umanjuju tehnička svojstva drveta. Kvrge predstavljaju potencijalnu opasnost od eventualnih infekcija jer se u kontaktnoj zoni (drvo-kvрга) kumulira vlaga koja pogoduje razvoju mikroorganizama. Različita utezanja između mase drveta i kvрге imaju za posledicu labavljenje veze i, kasnije, ispadanje kvрге. Građu koja sadrži kvрге treba u konstrukciji orijentisati tako da se njihov negativan uticaj što više umanjuje - strane preseka koje sadrže kvрге staviti u pritisnutu zonu, kvргavo drvo ugrađivati izvan veza i spojeva, kao i izvan jače opterećenih preseka.

Nepravilnost vlakana (usukanost) je greška rasta, kada vlakna ne idu paralelno sa osom debla (već se spirarlno uvijaju ili su zakošena). Greška se vidi golim okom i utiče na mehaničke karakteristike drveta. Laboratorijskim ispitivanjima [1] je konstatovano 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 upravno na vlakana, što je najslabiji pravac naprezanja drveta.

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.

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 proporcije kasnog drveta u okviru goda. Mada pritisnuto drvo ima veću gustinu, krutost je manja. Lom greda sa ovim nedostatkom drveta je obično vrlo krt [10].

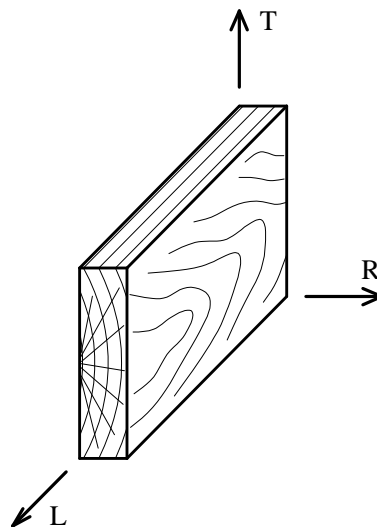
Smolnjače su greške kada su međuprostori različitih veličina ispunjeni smolom. Nalaze se u zoni jednog goda, paralelno sa njegovom graničnom linijom, i pružaju se u pravcu vlakana. Nedostaci koji se javljaju u drvetu uticajem smolnjače manifestuju se umanjnjem njegovih tehničkih svojstava - prekidom strukture, i povećanjem nehomogenosti i povećanjem otpornosti od zapaljivosti [1].

2.5 Anizotropija

Drvo je izrazito anizotropan materijal, tj. njegove fizičke i mehaničke karakteristike zavise od pravca. Razlog za ovo je prilično očigledan s obzirom na anatomiju i strukturu vlakana drveta.

Kod oblog drveta, bez kore, sa pravilnom konturom preseka i pravilnim rasporedom elemenata mikrostrukture, jasno je izražena cilindrična anizotropija. Glavni pravci anizotropije su longitudinalni (L), paralelno sa vlaknima, tangencijalni (T), u pravcu tangente na godove i upravno na vlakna, i radijalni (R), u pravcu poluprečnika godova i upravno na vlakna.

Obradom drveta, rezanjem, dobijaju se elementi sa različitom orijentacijom godova i drugih elemenata mikrostrukture, pa je generalno, otežano definisanje radijalnog i tangencijalnog pravca anizotropije. Imajući u vidu da se mehaničke karakteristike drveta u longitudinalnom pravcu bitno razlikuju od karakteristika za radijalni i tangencijalni pravac, to se za potrebe inženjerskih proračuna može usvojiti model ortogonalne anizotropije (slika 2.3). Ovaj model podrazumeva dva glavna pravca anizotropije i to: podužni (paralelno sa vlaknima) i poprečni (upravno na vlakna).



Slika 2.3 - Glavni pravci osa drveta

Konstitutivne jednačine za proizvoljan homogen, elastičan i anizotropan materijal (generalisani Hooke-ov zakon) se mogu prikazati u matričnom obliku kao:

$$\mathbf{s} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{e} , \quad (2.1)$$

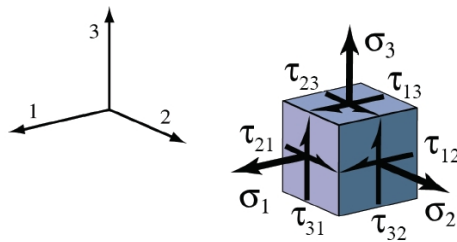
gde su:

$$\mathbf{s}^T = [s_{11} \ s_{22} \ s_{33} \ t_{23} \ t_{31} \ t_{12}] \text{ i } \mathbf{e}^T = [e_{11} \ e_{22} \ e_{33} \ g_{23} \ g_{31} \ g_{12}] \quad (2.2)$$

transponovane matrice tenzora napona i deformacije, a

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

matrica krutosti materijala. Prikaz komponenti tenzora napona dat je na slici 2.4.



Slika 2.4 - Komponente napona na infinitenzimalnom elementu

Može se pokazati da je matrica C simetrična ($C_{ij} = C_{ji}$), pa su od njenih 36 elemenata samo 21 nezavisni.

Kao pojednostavljenje, drvo se može smatrati kao homogen materijal (dimenzije preseka elemenata su velike u odnosu na širine godova) koji u datoj tački ima tri međusobno ortogonalne ravni elastične simetrije. Ako se uzme da su ravni elastične simetrije koordinatne ravni, tada matrica krutosti C ima sledeći oblik:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

U tom slučaju ima 9 međusobno nezavisnih konstanti elastičnosti.

Matrica fleksibilnosti S , koja predstavlja matricu inverznu matrici krutost C , može se izraziti u funkciji od materijalnih konstanti prema sledećem:

$$S = C^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{n_{21}}{E_2} & -\frac{n_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{n_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{n_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{n_{13}}{E_1} & -\frac{n_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

gde je E_i modul elastičnosti u pravcu ose x_i , ν_{ij} ($i \neq j$) je Poisson-ov koeficijent koji karakteriše poprečne kontrakcije u pravcu ose x_j od normalnog napona koji deluje u pravcu ose x_i , a G_{ij} ($i \neq j$) je modul klizanja (smicanja) koji karakteriše promenu ugla između x_i i x_j . Zbog simetričnosti matrice fleksibilnosti, ovde postoje veze:

$$E_1 n_{21} = E_2 n_{12}, \quad E_2 n_{32} = E_3 n_{23}, \quad E_3 n_{13} = E_1 n_{31}. \quad (2.6)$$

Dakle, 9 međusobno nezavisnih konstanti se zahteva za definisanje mehaničkog ponašanja drveta. To su: tri modula elastičnosti (L, R i T), tri modula klizanja (LR, LT i RT) i tri Poisson-ova koeficijenta (LR, LT i RT). Vrednosti ovih konstanti određuju se eksperimentalno kombinujući ispitivanja na zatezanje i smicanje, a zavisno od vrste drveta mogu se naći u različitim knjigama koje se bave mehanikom drveta.

2.6 Mehaničke karakteristike drveta

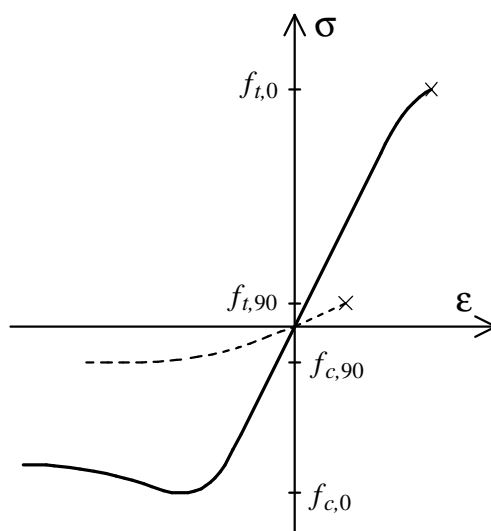
Zbog nehomogenosti građe drveta i njegove anizotropije mehaničke karakteristike se međusobno znatno razlikuju, kako između pojedinih vrsta tako i za drvo jedne iste vrste. Različite karakteristike i zapreminski udeo svake od osnovnih konstitutivnih komponenti (celuloza, hemiceluloza, lignin), kao i prisustvo defekata i oštećenja značajno utiču na mehaničke karakteristike. Drvo je higroskopan materijal i stalno razmenjuje vlagu sa okolinom. Sadržaj vlažnosti ima veliki uticaj na mehaničke karakteristike. Uz to, mehaničke karakteristike drveta zavise i od starosti drveta, brzine prirasta i vremena trajanja opterećenja.

Mehaničke karakteristike se određuju prema standardno definisanoj proceduri, na malim „čistim“ uzorcima drveta određene vlažnosti (obično 12%). U tabeli 2.1 dat je prikaz vrednosti čvrstoća na zatezanje (f_t), pritisak (f_c) i smicanje (f_v) različitih vrsta drveta datih u literaturi. Čvrstoća drveta na zatezanje u pravcu vlakana je 20-50 puta veća od čvrstoće na zatezanje upravno na vlakna, dok je čvrstoća na pritisak u pravcu vlakana 5-10 puta veća od čvrstoće upravno na vlakna. Čvrstoća na smicanje upravno na vlakna je približno istog reda veličine kao čvrstoća na zatezanje upravno na vlakna.

Tabela 2.1 - Mehaničke karakteristike različitih vrsta drveta [11]

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

Tipični dijagrami napon-dilatacija drveta opterećenog na zatezanje i pritisak paralelno i upravno na vlakna su prikazani na slici 2.5.



Slika 2.5 - Dijagrami napon-dilatacija za drvo opterećeno paralelno vlaknima (puna linija) i upravno na vlakna (isprekidana linija)[12]

Kada se drvo ispituje do loma aksijalnim zatezanjem, veza napon-dilatacija je prilično linearna do graničnog opterećanja, 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.

Međutim, konstrukcijsko drvo realnih dimenzija i mali „čisti“ uzorci drveta pokazuju različito ponašanje u većini slučajeva. Prisustvo defekata utiče na mehaničke karakteristike i čini ponašanje drveta znatno krtime. Zbog toga što je veličinu, lokaciju i raspodelu defekata teško istražiti, njihov efekat na karakteristike drveta je teško predvideti. Stoga, vrednosti čvrstoće određene na malim „čistim“ uzorcima drveta ne mogu se direktno primeniti na konstrukcijsko drvo.

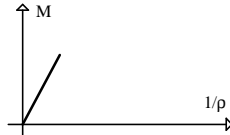
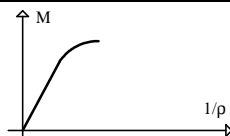
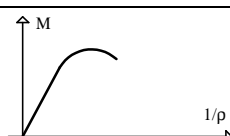
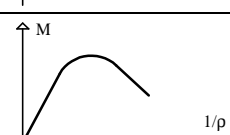
Generalno gledano, srednja vrednost čvrstoće drveta u pravcu vlakana, određena na malim „čistim“ uzorcima, iznosi 80-100 MPa, što je približno duplo više od srednje vrednosti čvrstoće na pritisak u pravcu vlakana, koja je procenjena kao 40-50 MPa. Ova značajna razlika ne važi za konstrukcijsko drvo, kod koga prisustvo i učestalost defekata umanjuje gore navedene vrednosti na 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.

Varijabilnosti materijala, nelinearno ponašanje pri pritisku i prisustvo defekata onemogućavaju da se ponašanje drveta na savijanje odrediti direktno na osnovu ispitivanja na zatezanje i pritisak. Stoga, važeći standardi razmatraju čvrstoću na savijanje kao nezavisnu karakteristiku. U tabeli 2.2 objašnjeni su glavni oblici loma drveta pri čistom savijanju u zavisnosti od odnosa čvrstoća na zatezanje i pritisak u pravcu vlakana ($\eta = f_t/f_c$). U tehničkoj praksi, dati oblici loma imaju različitu verovatnoću događanja.

Ispitivanja na malim „čistim“ uzorcima drveta pokazala su da se najčešći tip loma javlja kada je dostignuta granična vrednost napona ili, preciznije, granična vrednost dilatacije u zategnutoj zoni, u većini slučajeva uz prisustvo plastifikacije pritisnute zone. Odgovarajući oblici loma su, onda, oni označeni brojevima 2 i 3 u tabeli 2.2. Suprotno, oblik loma označen kao 1 je relativno redak i ukazuje na naročito defektan materijal. Štaviše, ovo se smatra najmanje poželjnim oblikom loma zbog krutih karakteristika i nedovoljno iskorišćenih dilatacija. Na kraju, oblik loma pod brojem 4, neuobičajen za elemente upotrebljene u konstrukcijama, ali tipičan za sirovo drvo (drvo

sa procentom vlažnosti iznad zasićenosti vlakana i ćelija), bi bio najbolji, zato što ga karakterišu velike dilatacije i progresivni gubitak kapaciteta nosivosti.

Tabela 2.2 - Glavni oblici loma drveta pri čistom savijanju [5]

	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.	$\eta \gg 1$	

Osnovni cilj ojačanja drvenih elemenata je povezivanje duktilnog ponašanja i visoke granične čvrstoće. Ovaj rezultat za elemente izložene savijanju se može dobiti intervencijama sa ciljem poboljšanja ponašanja zategnute strane kroz postizanje veće čvrstoće na zatezanje. Odnos η se, dakle, veštački povećava, tako da se omogući plastifikacija pritisnute strane. Ovakva okolnost omogućava u isto vreme postizanje duktilnog loma i iskorišćavanje u potpunosti prednosti materijala koji sačinjavaju poprečni presek.

2.7 Efekat veličine

Dobro je poznata činjenica da čvrstoća može da zavisi od apsolutne veličine konstrukcije, bar za konstrukcije koje karakteriše krt lom. Ovo se može objasniti konceptom najslabije karike kakav je Weibull-ova teorija [13], kojom se kaže da čvrstoća konstrukcije zavisi isključivo od čvrstoće njenog najslabijeg dela. Kako je

verovatnoća nalaženja ozbiljnog defekta veća u većoj zapremini nego u manjoj, čvrstoća se smanjuje sa povećanjem veličine. Weibull-ova teorija je podesna da se koristi za materijale koji pokazuju krto ponašanje, kao što je drvo izloženo zatezanju i savijanju. Efekat veličine se može izaziti u odnosu na srednju vrednost ili karakterističnu vrednost čvrstoće, a rezultati su različiti [14].

U slučaju elemenata izloženih savijanju, moment savijanja u opštem slučaju se menja duž raspona, pa efekat veličine ne predstavlja samo verovatnoću pojave značajnog defekta unutar raspona, već i verovatnoću da se ovaj defekat nalazi u najkritičnijem preseku. Suprotno savijanju gde napon često varira po dužini elementa, element izložen zatezanju je obično opterećen silom koja je konstantna po dužini. Stoga, lom će se uvek dogoditi u najslabijem preseku. Duži element, veća verovatnoća da ima ozbiljan defekt i zbog toga manju čvrstoću. Naposljetku, pritisak je sličan zatezanju, jer u većini slučajeva elementi imaju konstantan napon po dužini. Međutim, postoji razlika u obliku loma. Ako je sprečeno izvijanje, vlakna će se zbiti pri naponu pritiska. Ovo će naravno voditi ka duktilnom lomu za razliku od krtog loma pri zatezanju. Kao posledica znatno duktilnijeg ponašanja, efekat veličine će biti manje izražen.

Efekat širine (manja dimenzija poprečnog preseka) se generalno može zanemariti, jer većina poprečnih preseka elemenata ima sličnu širinu. U slučaju savijanja, efekat promene visine (veća dimenzija poprečnog preseka) na čvrstoću je manji poredeći sa efektom promene dužine. Kod zatezanja, međutim, efekat visine je znatno izraženiji i u rangu je sa efektom dužine.

Dok savijanje rezultira promenljivim naponom u preseku, zatezanje rezultira visokim konstantnim naponom po celom preseku. Kako je uticaj defekata veći što je veća zategnuta površina, otuda objašnjenje zašto je čvrstoća na zatezanje drveta generalno manja od čvrstoće na savijanje. Ovaj efekat raspodele napona je blisko povezan sa efektom visine.

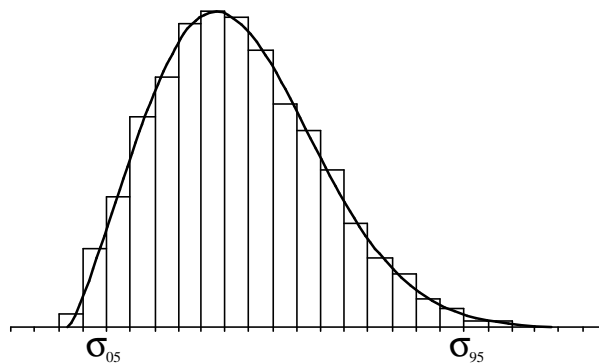
Sadržaj vlažnosti drveta je takođe povezan sa njegovom veličinom i čvrstoćom. Povećanje čvrstoće pri sušenju zabeleženo kod malih „čistih“ drvenih uzoraka nije očigledno kod uzoraka velikih dimenzija, jer unutrašnji naponi usled neujednačenog skupljanja mogu onemogućiti povećanje čvrstoće drveta [15].

2.8 Klasiranje drveta

U cilju optimalne primene drveta, tj. proračuna drvenih konstrukcija sa realnim čvrstoćama drveta, a ne sa prosečnim čvrstoćama vrste kojoj pripada drvo, neophodno je klasiranje drveta. Primena adekvatnog sistema klasiranja zahteva duboko znanje i razumevanja kako karakteristike nosivosti i krutosti konstrukcijskog drveta zavise od karakteristika „čistog“ drveta i uticaja različitih defekata. Trenutno postoje dva sistema klasiranja:

- Vizuelno klasiranje, koje je bazirano na vizuelnom pregledu kako bi se osiguralo da komadi nemaju vizuelne defekte veće od granica definisanih relevantnim pravilima klasiranja;
- Mašinsko klasiranje, gde se komadi propuštaju kroz mašinu kojom se nedestruktivno meri jedan ili više parametara. Na osnovu ovih merenja predviđaju se karakteristike nosivosti ili krutosti.

Unutar drveta iste vrste, pa i unutar iste klase, raspodela vrednosti određene čvrstoće je velika (slika 2.6). Stoga, se savremeni proračun drvenih konstrukcija bazira na karakterističnoj čvrstoći koja odgovara fraktilu 5% [16]. To znači da statistički 95% drvenih uzoraka može izdržati veća opterećenja, ali zbog obazrivosti potrebno je koristiti datu vrednost.



Slika 2.6 - Raspodela rezultata ispitivanja čvrstoće drveta na savijanje [17]

Kao primer klasiranja drveta, u tabeli 2.3 date su klase četinarskog drveta prema evropskom standardu EN 338 [18].

Tabela 2.3 - Klase četinarskog drveta prema EN 338 [18] (čvrstoće u MPa)

	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0

2.9 Lepljeno lamelirano drvo

Lepljeno lamelirano drvo je proizvod koji se u suštini dobija slaganjem više dasaka (lamela) jedne na drugu i njihovim lepljenjem zajedno, tako da formiraju poprečni presek željenog oblika. Lepljene drvene konstrukcije se koriste vekovima, ali se može reći da je proboj lepljenog lameliranog drveta nastao kada je Otto Hertzner (1846-1911) prijavio svoj patent lepljenog lameliranog drvenog elementa 1906. godine, nazvan Hertzner-nosač [14]. Ovo znači da se otprilike jedan vek lepljeno lamelirano drvo koristi kao materijal sa poboljšanim karakteristikama u odnosu na monolitno drvo. Među najčešće navedenim prednostima primene lepljenog lameliranog drveta su:

- poboljšane karakteristike nosivosti i krutosti;
- sloboda u izboru geometrijskih oblika;
- mogućnost usklađivanja kvaliteta lamele u odnosu na očekivane nivoe napona;
- poboljšanje stabilnosti dimenzija i oblika tokom izlaganja vlazi.

2.9.1 Proizvodnja lepljenog lameliranog drveta

U principu, sve drvene vrste se mogu koristiti za proizvodnju lepljenog lameliranog drveta. U praksi, ipak, primena četinara je predominantna, jer je primena lišćara često povezana sa teškoćama pri lepljenju. Obično se koriste drvene lamele debljine od 20-40 mm i dužine od 1,5-5,0 m. Orijentacija vlakna u okviru lamela je u podužnom pravcu konstrukcijskog elementa. Lamele se suše do uravnoteženog sadržaja vlažnosti (obično 12-15%) i klasiraju prema čvrstoći. Klasiranje čini mogućim prilagođavanje kvaliteta lamele očekivanom nivou napona u elementima izloženim savijanju, na način da lamele visokog kvaliteta budu smeštene u spoljašne delove

poprečnog preseka, a lamele nižeg kvaliteta u unutrašnju zonu. Za formiranje kontinualne lamele, odnosno spajanje lamela po dužini, obično se koriste zupčasti spojevi. Kontinualna lamela se zatim seče na zahtevanu dužinu. Trenje između zuba u spoju lamela omogućava sprovođenje sečenja direktno posle procesa spajanja. Posle kondicioniranja lamela (potrebno vreme zavisi od vrste lepka), lamele se obrađuju kako bi se uklonile neravnine na mestima zupčastih spojeva. Nakon ovoga, lamele se lepe zajedno u formu željenog poprečnog preseka. Lepljeno lamelirano drvo se drži pod pritiskom tokom određenog vremena za očvršćavanje lepka. Posle vremena potrebnog za kondicioniranje, laminat se obrađuje da postigne glatku i čistu površinu. Za proizvodnju lepljenog lameliranog drveta najčešće se upotrebljavaju lepkovi na bazi sintetičkih smola: fenol-resorcinski lepak i urea-formaldehidni lepak.

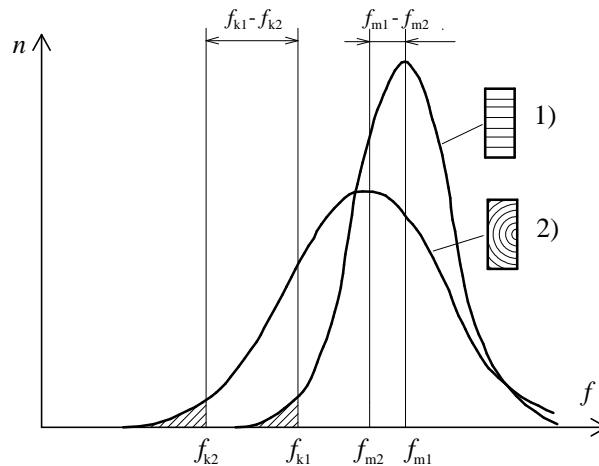
Teorijski, lepljeno lamelirano drvo se može proizvesti u bilo kojoj veličini. Iz praktičnih razloga povezanih sa transportom i fabričkim procesom maksimalna dužina je najčešće 16-20 m. Još jedan ograničavajući faktor je tzv. „otvoreno“ vreme lepka. Lepljeno lamelirano drvo se pojavljuje u različitim oblicima, prave prizmatične grede i stubovi su najčešći, ali zakrivljeni i zakošeni nosači su takođe u opštoj upotrebi.

Lepljeno lamelirano drvo je visoko projektovani proizvod, čija industrijska proizvodnje omogućava da kontrole kvaliteta budu sprovedene u proizvodnom procesu. Kontrola kvaliteta obuhvata ispitivanje zupčastih spojeva na zatezanje i savijanje, kao i ispitivanje na smicanje i delaminaciju lepljenog spoja. Ovakve metode kontrole kvaliteta su važni delovi proizvodnje lepljenog lameliranog drveta uključujući i unutrašnju kontrolu sprovedenu od strane proizvođača i spoljašnju kontrolu sprovedenu od strane nezavisnog trećeg lica.

2.9.2 Mehaničke karakteristike lepljenog lameliranog drveta

Lepljeno lamelirano drvo ima manju varijabilnost i više mehaničke karakteristike nego monolitno drvo, jer je moguće defekte rasta drveta ukloniti u proizvodnom procesu ili raspodeliti u okviru gotovog proizvoda. Manji uticaj defekata na čvrstoću znači efikasnije iskorišćenje materijala. Kao primer, funkcije gustine raspodele rezultata ispitivanja čvrstoće na savijanje monolitnog i lepljenog lameliranog drveta upoređene su na slici 2.7. Mada je lepljeno lamelirano drvo napravljeno od

lamela monolitnog drveta, karakterična čvrstoća, definisana sa 5%-nim fraktilom, je značajno viša za lepljeno lamelirano drvo nego za monolitno drvo. Razlog za ovo je i efekat raspodele opterećenja između lamela u okviru lepljenog lameliranog drveta, koji omogućava preraspodelu napona sa lokalno „slabe“ zone na susedni „jači“ region.



Slika 2.7 - Raspodele rezultata ispitivanja čvrstoće na savijanje: 1) lepljenog lameliranog drveta; 2) monolitnog drveta [19]

Kako su oblici loma lepljenog lameliranog drveta direktno povezani sa kvalitetom drvenih lamela, pažljiv izbor lamela i kontrola različitih faza proizvodnje čini ponašanje lepljenog lameliranog drveta kvalitativno različito od ponašanja monolitnog drveta. Sprovedena ispitivanja na savijanje do loma lepljenog lameliranog drveta pokazala su da teško postići stanje plastifikacije pritisnute strane. Lepljeno lamelirano drvo stoga ima izraženiju tendenciju ka krtom lomu nego monolitno drvo, sa oblikom loma 1 ili 2 pre nego 3 (tabela 2.2). Prema tome, čvrstoća na savijanje nosača od lepljenog lameliranog drveta je određena pre svega čvrstoćom na zatezanje najopterećene lamele. Lom je najčešće iniciran na mestu kvrga i zupčastih spojeva.

Predviđanje mehaničkih karakteristika lepljenog lameliranog drveta obično podrazumeva jedan od dva metoda:

1. Ispitivanje elemenata od lepljenog lameliranog drveta, koristeći dovoljno veliki broj uzoraka da se odrede mehaničke karakteristike na bazi statistike;
2. Koristeći model, verifikovan ispitivanjem, koji povezuje mehaničke karakteristike lepljenog lameliranog drveta sa mehaničkim karakteristikama pojedinačnih lamela.

Uzimajući u obzir brojne parametre koji utiču na mehaničke karakteristike lepljenog lameliranog drveta (npr. vrsta i klasa drveta, debljina lemele, karakteristike zubčastih spojeva, visina elementa) i potreban broj uzoraka, prvi metod je očigledno isuviše skup kao opšti metod. Model koji omogućava procenu mehaničkih karakteristika lepljenog lameliranog drveta na osnovu mehaničkih karakteristika lamela je, stoga, poželjan. Pored toga, racionalni model doprinosi razumevanju ponašanja lepljenog lameliranog drveta.

Na osnovu svega rečenog u vezi loma pri savijanju, čvrstoća na savijanje lepljenih lameliranih nosača se obično poredi sa čvrstoćom na zatezanje paralelno vlaknima drvenih lamela koje se koriste za izradu nosača. Ove dve čvrstoće su u korelaciji, ali naravno nisu iste. Čvrstoća na savijanje nosača je veća nego čvrstoća na zatezanje njegovih lamela, a količnik ovih čvrstoća, u opštem slučaju, raste sa opadanjem kvaliteta drveta [20]. Kao primer, u okviru EN 1194 [21] data je sledeća relacija na nivou karakterističnih čvrstoća:

$$f_{m,g,k} = 7 + 1,15 f_{t,0,l,k}, \quad (2.7)$$

gde je:

$f_{m,g,k}$ - karakteristična čvrstoća nosača na savijanje;

$f_{t,0,l,k}$ - karakteristična čvrstoća lamele na zatezanje paralelno vlaknima.

Prema istraživanju Falk i Colling -a [20] ovaj efekat lameliranja na nivou karakteristične čvrstoće je za 15-30% veći nego na nivou srednje vrednosti čvrstoće.

3. FRP KOMPOZITI

Polimeri ojačani vlaknima (FRP) su grupa naprednih kompozitnih materijala koji se sastoje od vlakana visokih mehaničkih karakteristika (kao mikroarmature) povezanih izuzetno čvrstom, hemijski otpornom i trajnom sintetičkom smolom (kao matricom). Vlakna i matrica zadržavaju svoj fizički i hemijski identitet, a ipak zajedno proizvode određena svojstva koja ne mogu biti dostignuta kada deluju samostalno. Zavisno od zahtevanih fizičkih i mehaničkih karakteristika, kao i od ekonomskih razmatranja, kompoziti mogu biti sačinjeni od različitih tipova vlakana i polimernih matrica, i prilagođeni da obezbede potrebnu nosivost i krutost u željenim pravcima.

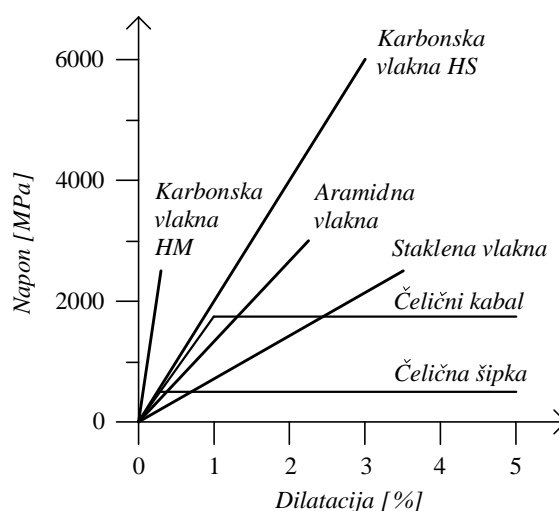
3.1 Sastavni delovi FRP kompozita

3.1.1 Vlakna

Izbor vlakana u mnogome utiče na karakteristike kompozita. U građevinarstvu dominiraju tri tipa vlakana: karbonska, staklena i aramidna. Vlakna imaju različite karakteristike, uključujući i cenu (tabela 3.1), što čini jednu vrstu više pogodnom od druge vrste za različite namene. Sva vlakna imaju generalno veliki kapacitet nosivosti (veći od običnog čelika) i linearno elastično ponašanje do loma. Najvažnije karakteristike koje se razlikuju između tipova vlakana su krutost i izduženje pri lomu. Ponašanje pri zatezanju tri tipa vlakana je šematski prikazano na slici 3.1 u poređenju sa čeličnim šipkama i čeličnim kablovima za prednaprezanje.

Tabela 3.1 - Poređenje između karakteristika vlakana i čelika [22, 6]

Materijal	Zapreminska masa (g/cm ³)	Modul elastičnosti (GPa)	Čvrstoća na zatezanje (MPa)	Izduženje pri lomu (%)	Cena (€/kg)
E-staklena vlakna	2,5-2,6	70-80	2000-3500	3,5-4,5	1,5-3,0
HM karbonska vlakna (visok modul elastičnosti)	1,85-1,9	390-760	2400-3400	0,5-0,8	20-60
HS karbonska vlakna (visoka čvrstoća)	1,75	240-280	4100-5100	1,6-1,73	20-60
Aramidna vlakna	1,44-1,47	62-180	3600-3800	1,4-5,2	20-35
Čelik	7,8	200-210	360-600	20-30	0,7



Slika 3.1 - Dijagrami napon-dilatacija za različita vlakna i armaturni čelik [23]

Staklena vlakna

Staklena vlakna su proizvod nastao mešanjem peska, kaolina, krečnjaka i kolemanita. Ova mešavina se izlaže visokoj temperaturi (1600°C), što rezultuje formiranjem tečnog stakla. Tečnost se zatim istovremeno izliva gravitaciono kroz mali otvor (prečnika 5-24 μm) i hladi. Ekstruzirana vlakna dobijena ovim procesom se grupišu zajedno u male svežnjeve (snopove). Varijacija u proporciji svake od osnovnih komponenti vodi ka različitim vrstama staklenih vlakana (E, C, R, S i T staklena vlakna). Svaka vrsta ima drugačiju primenu i prema tome različite karakteristike. FRP kompoziti koji su bazirani na staklenim vlaknima su obično označeni kao GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer).

Staklena vlakna imaju dobre mehaničke karakteristike (i u podužnom i u poprečnom pravcu) kombinovano sa visokom hemijskom otpornošću i odličnim

izolacionim svojstvima. Neki od nedostataka su relativno nizak modul elastičnosti, mala otpornost na zamor, osetljivost na habanje i na vlagu, kao i sklonost ka deformacijama tečenja.

E-staklena vlakna se najčešće koriste zbog njihovih dobrih mehaničkih karakteristika i relativno niske cene.

Karbonska vlakana

Karbonska vlakna se proizvode oksidacijom, karbonizacijom i grafitizacijom na visokim temperaturama sirovih materijala sa visokim sadržajem karbona, kao što su katranska smola, celuloza ili poliakrilnitrat (PAN). Varijacijom temperature od 2600°C do 3000°C tokom procesa grafitizacije mogu se dobiti vlakna velike čvrstoće (HS) ili vlakna visokog modula elastičnosti (HM). Karbonska vlakna su prečnika između 5 i 15 µm. FRP kompoziti koji su bazirani na karbonskim vlaknima su obično označeni kao CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer).

Karbonska vlakna imaju visoke mehaničke karakteristike u pravcu vlakana i znatno niže u poprečnom pravcu (anizotropno ponašanje). Ova vlakna imaju suštinski krto ponašanje sa relativno niskom absorpcijom energije, pa ipak njihova otpornost na zamor je veća u poređenju sa staklenim i aramidnim vlaknima. Koeficijent termičkog širenja karbonskih vlakana je negativan, što ih čini dimenzionalno stabilnim. Osnovne prednosti karbonskih vlakana su odnos između čvrstoće i težine, odlična trajnost i dobra reološka svojstva. Glavni ograničavajući faktor za primenu karbonskih vlakana je njihova cena.

Aramidna vlakana

Aramidna vlakna su sintetička vlakna, sačinjena od aromatičnih poliamida u ekstremno orijentisanoj formi. Tehnologija proizvodnje aramidnih vlakana bazirana je na visokim temperaturama i velikim brzinama ekstruzije polemera u konačan oblik praćeno brzim hlađenjem i sušenjem. Prečnik aramidnih vlakana je između 12 i 15 µm. FRP kompoziti koji su bazirani na aramidnim vlaknima su obično označeni kao AFRP (Aramid Fibre Reinforced Polymer). Dobro poznata trgovačka marka za aramidna vlakna je Kevlar, ali takođe postoje i drugi brendovi npr. Twaron, Technora i SVM.

Čvrstoća na zatezanje i modul elastičnosti aramidnih vlakana je u sredini između staklenih i karbonskih vlakana, ali ova vlakna imaju najmanju težinu i najveću čvrstoću na zatezanje naspram težine u poređenju sa staklenim i karbonskim vlaknima. Čvrstoća na pritisak aramidnih vlakana je obično oko 1/8 njihove čvrstoće na zatezanje. Usled izrazite anizotropije u strukturi vlakana, aramidna vlakna pri pritisku pokazuju značajan stepen plastičnog tečenja, što nije primećeno kod drugih vlakana. Ovaj duktilni oblik loma omogućava dobru otpornost kompozitima sa aramidnim vlaknima na dinamička i udarna opterećenja. Takođe, aramidna vlakana imaju visoku termičku stabilnost i dobru hemijsku otpornost. Mane aramidnih vlakana su nepostojanost na povišenim temperaturama, kao i osetljivost na vlažnost i UV zračenje.

3.1.2 Matrica na bazi polimera

Matrica je vezivni materijala, sa osnovnim zadatkom da drži vlakna zajedno i sačuva njihovu orijentaciju. Takođe, matrica ima ulogu da štiti vlakna od uticaja okruženja i mehaničkog habanja. Matrica, generalno, čini 30-40% FRP materijala.

Prilikom proizvodnje FRP materijala kao matrica najčešće se koriste termostabilni polimeri. Osnovne prednosti termostabilnih polimera su: nizak viskozitet koji omogućava relativno laku impregnaciju vlakana, dobra adheziona svojstva, mogućnost očvršćavanja na sobnim temperaturama, dobra otpornost na hemijske agense, odsustvo temperature topljenja [24]. Suštinski nedostaci su: ograničeni opseg radnih temperatura, loša žilavost (krto ponašanje), tendencija ka absorpciji vlažnosti iz okruženja. Najčešće korišćeni termostabilni polimer za FRP materijale koji imaju primenu u građevinarstvu je epoksid. Poliester ili vinilester se takođe upotrebljavaju. U tabeli 3.2 prikazane su karakteristike matrica na bazi ovih vrsta polimera.

FRP kompozitni materijali su takođe dostupni sa termoplastičnim polimerima. Generalno, termoplastični polimeri su žilaviji od termostabilnih i u nekim slučajevima imaju veće radne temperature. Pored toga, oni imaju bolju otpornost na faktore okruženja. Osnovni nedostaci za primenu ovih polimera su njihov visok viskozitet, koji čini impregnaciju vlakana teškom, i potreba za kompleksnom i skupom radnom opremom. Neke od vrsta termoplastičnih polimera koji se koriste za FRP kompozite su polietilen, polistirol i polipropilen.

Tabela 3.2 - Karakteristike matrice na bazi termostabilnih polimera [25,6]

Materijal	Zapreminska masa (g/cm ³)	Modul elastičnosti (GPa)	Čvrstoća na zatezanje (MPa)	Čvrstoća na pritisak (MPa)	Izduženje pri lomu (%)	Cena (€/kg)
Epoksid	1,1-1,4	2,0-6,0	35-130	100-200	1,0-1,85	6,5
Poliester	1,1-1,5	1,2-4,5	40-90	90-250	2,0-5,0	1,5
Vinilester	1,15	3,0-4,0	65-90	127	1,0-5,0	2,5

Epoksid

Epoksidi karakterišu visoke mehaničke karakteristike, dobra otpornost na vlagu, hemijske agense i povišene temperature, kao i odlična adhezivna svojstva. Odlikuju se malom žilavošću, tako da imaju relativno mala izduženja pri prekidu. Epoksidi očvršćavaju sporo i prilično su kruti posle potpunog očvršćavanja.

Poliester

Poliestere karakterišu relativno niska cena i dobar balans između mehaničkih, električnih i hemijskih karakteristika. Ovi polimeri su otporni na veliki broj hemijskih agenasa, pa i na dejstvo jakih oksidacionih sredstava i vlažnog hlora, koji inače razaraju epoksidi. Međutim, pri dugotrajnom delovanju vode kod poliesteru se zapaža značajan pad čvrstoće i smanjivanje adhezivne sposobnosti. Poliesteri polimeri su manje viskozni od epoksidnih, a njihovo očvršćavanje prati oslobađanje značajne količine toplote, kao i veliko skupljanje.

Vinilester

Vinilester predstavlja kompromis između epoksida i poliesteru s aspekta mehaničkih karakteristika i cene. Poredeći sa poliesterom, vinilester se manje skuplja, manje apsorbira vodu i ima veću hemijsku otpornost. Takođe, ovi polimeri imaju dovoljnu postojanost na visokim temperaturama.

3.2 Kompozit

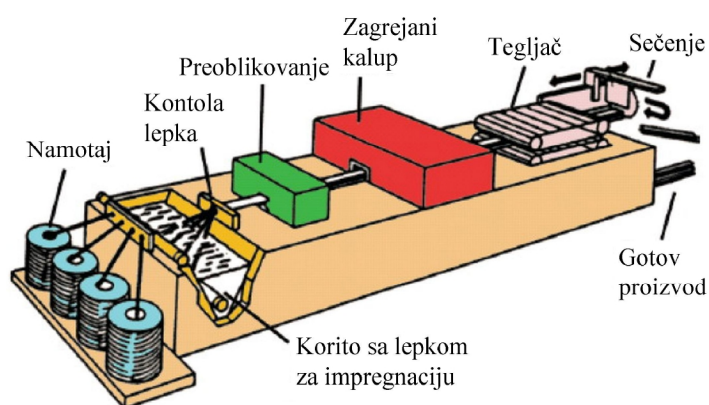
Kompozit nastaje kada se vlakna i matrica sjedine u novi materijal. Vlakna mogu biti postavljena samo u jednom pravcu (podužno) i tada je kompozit monoaksijalan. Takođe, vlakna mogu biti upletena u formu tkanine, odnosno biti

postavljena u više pravaca i tada je kompozit bi- ili multi-aksijalan. Kompatibilnost između vlakana i matrice je ključna za proizvodnju FRP kompozita.

Proces proizvodnje FRP kompozita varira u skladu sa zahtevanim karakteristikama finalnog proizvoda (trake, tkanine, šipke, sl.). Glavni koraci u proizvodnji uključuju „kvašenje“ vlakana lepkom (koji je u tečnom stanju), oblikovanje u traženi oblik/dimenzije i vezivanje. Svaki od ovih koraka može biti načinjen na različite načine, zavisno od tipa matrice (termoplastična ili termostabilna), tipa vlakana (kontinualna ili iseckana), orijentacije vlakana (jedan ili više pravaca), nivoa zahtevane kontrole kvaliteta (primena u vazduhoplovstvu zahteva viši nivo kontrole), itd.

Pultruzija je tehnologija koja se uglavnom koristi za proizvodnju FRP traka, proizvoda koji se najviše upotrebljavaju za ojačanje konstrukcija. Ova tehnologija je bazirana na kontinualnom proizvodnom procesu, koji se sastoji iz tri glavne faze: formiranje, impregnacija i očvršćavanje.

U najuobičajenijoj verziji projektovanoj za termostabilan lepak, komponente (lepak i vlakna) se posebno uvode u mašinu, koja samostalno uvlači vlakna, a zatim ih provlači kroz različite etape (faze) proizvodnje. Šematski prikaz procesa pultruzije prikazan je na slici 3.2.



Slika 3.2 - Pultruzioni proces [22]

Vlakna se uzimaju direktno sa namotaja i prenose u koritio sa lepkom, gde se sprovodi impregnacija. Svežnji (snopovi) impregniranih vlakana unose se u zagrejeni kalup, gde se materijal formira i bočno povezuje pri visokom pritisku. U toku ove faze, praznine između vlakana se eliminišu, kako bi se obezbedio odgovarajući kontinuitet u

poprečnom pravcu. Zagrevanje se obezbeđuje električnim otporom, a temperatura se kontroliše posredstvom termospoja. Trajanje faze zagrevanja je regulisano brzinom proizvodnje. Nakon izlaska iz kalupa, matrica je vezala i kompozit se izvlači konstantnom brzinom. Na kraju procesa materijal se seče na potrebnu dužinu.

Karakteristike FRP materijala se ne mogu predvideti jednostavnim sumiranjem karakteristika njegovih sastavnih delova. Vlakna i matrica deluju komplementno da obezbede željene karakteristike obe komponente. Na primer, većina lepkova na bazi polimera ima slabu čvrstoću na zatezanje, ali izuzetnu tvrdoću i savitljivost, dok tanka vlakna imaju veliku čvrstoću, ali oseljivost na oštećenja. Generalno, karakteristike FRP kompozita zavise od karakteristika materijala vlakana i matrice, orijentacije vlakana, koncentracije vlakana (zapreminski udeo, raspodela), itd.

3.3 Mehaničke karakteristike

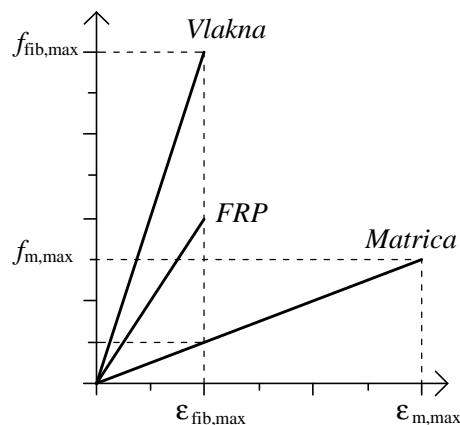
U FRP materijalima, vlakna obezbeđuju nosivost i krutost kompozita, dok je matrica neophodna da omogući raspodelu opterećenja na sva vlakna. Orijetacija vlakana utiče na karakteristike kompozita u tri pravca. Postavljanje vlakana u jednom pravcu rezultira anizotropnim ponašanjem, sa visokim mehaničkim karakteristikama u pravcu vlakana i niskim u pravcu upravnom na vlakna. Sa druge strane, nasumično raspoređivanje vlakna vodi ka izotropnom materijalu.

Kao pokazatelj mehaničkih karakteristika FRP kompozita najčešće služe čvrstoća na zatezanje, modul elastičnosti, kao i relativno izduženje pri prekidu nastalom usled zatezanja. Radni dijagram za vlakna, matricu i rezultujući FRP materijal prikazan je na slici 3.3. Kompozit i njegove komponente karakteriše isto linearno-elastično ponašanje do loma. Vrednosti granične čvrstoće i modula elastičnosti FRP materijala niže su od odgovarajućih vrednosti za sama vlakna, dok su vrednosti dilatacije pri lomu približno iste za oba materijala. Bez obzira na veliki kapacitet izduženja matrice, lom kompozita ipak nastaje pri dostizanju granične dilatacije izduženja vlakana, jer nije moguća preraspodela opterećenja sa vlakana na matricu.

Kao primer, u tabeli 3.3 upoređene su mehaničke karakteristike gotovog proizvoda (karbonskih traka) i odgovarajućih vlakana (karbonskih vlakana).

Tabela 3.3 - Poređenje između mehaničkih karakteristika CFRP traka i karbonskih vlakana [22]

Trake	Modul elastičnosti (MPa)		Granična čvrstoća (MPa)		Granična dilatacija (%)	
	Kompozit E_f	Vlakna E_{fib}	Kompozit $f_{f,max}$	Vlakna $f_{fib,max}$	Kompozit $\varepsilon_{f,max}$	Vlakna $\varepsilon_{fib,max}$
CFRP HS	160	210-230	2800	3500-4800	1,6	1,4-2,0
CFRP HM	300	350-500	1500	2500-3100	0,5	0,4-0,9



Slika 3.3 - Dijagrami napon-dilatacija za vlakna, matricu i FRP kompozit [22]

Za FRP materijal sačinjen od vlakana postavljenih u jednom pravcu, mehaničke karakteristike kompozita mogu se proceniti koristeći „mikro-mehanički“ model [22], baziran na karakteristikama svake od komponenti i njihovog zapreminskog udela:

$$E_f = V_{fib} E_{fib} + (1 - V_{fib}) E_m, \quad (3.1)$$

$$f_f \cong V_{fib} f_{fib} + (1 - V_{fib}) f_m, \quad (3.2)$$

gde je:

E_f - modul elastičnosti kompozita;

E_{fib} - modul elastičnosti vlakna;

E_m - modul elastičnosti matrice;

f_f - čvrstoća kompozita;

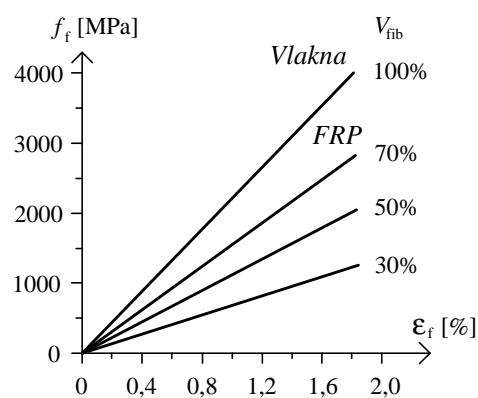
f_{fib} - čvrstoća vlakna;

f_m - čvrstoća matrice;

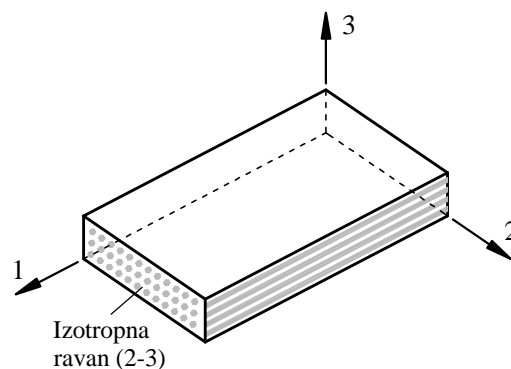
V_{fib} - zapreminski udeo vlakana (odnos zapremine vlakana i zapremine kompozita).

Osnovna pretpostavka ovog modela je postojanje perfektnog spoja između vlakana i matrice. Model daje preciznu procenu modula elastičnosti, dok se ista tačnost ne može postići za graničnu čvrstoću. Ipak, za potrebe proračuna uvek je bolje osloniti se na eksperimentalno određene veličine.

Koristeći date izraze lako se može utvrditi uticaj zapreminskog udela vlakana na mehaničke karakteristike FRP materijala. S obzirom da su vrednosti modula elastičnosti i čvrstoće vlakana značajno veće nego kod matrice, mehaničke karakteristike kompozita rastu sa porastom udela vlakana (slika 3.4).



Slika 3.4 - Radni dijagram u funkciji zapreminskog sadržaja vlakana [22]



Slika 3.5 - Monoaksijalni kompozit sa transverzalno izotropnom ravni

Većina monoaksijalnih kompozita mogu se razmatrati kao transverzalno izotropni materijali, kao što je prikazano na slici 3.5, gde ravan 2-3 upravna na vlakna je izotropna ravan. Konstitutivne jednačine se tada mogu prikazati u matričnom obliku kao:

$$\mathbf{s} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{e} , \quad (3.3)$$

gde su:

$$\mathbf{s}^T = [s_{11} \ s_{22} \ s_{33} \ t_{23} \ t_{31} \ t_{12}] \text{ i } \mathbf{e}^T = [e_{11} \ e_{22} \ e_{33} \ g_{23} \ g_{31} \ g_{12}] \quad (3.4)$$

transponovane matrice tenzora napona i deformacije, a

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

matrica krutosti materijala sa 5 nepoznatih elastičnih konstanti.

Matrica fleksibilnosti S , koja predstavlja matricu inverznu matrici krutost C , može se izraziti u funkciji od materijalnih konstanti prema sledećem:

$$S = C^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{23})}{E_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} , \quad (3.6)$$

gde je E_i modul elastičnosti u pravcu ose x_i , ν_{ij} ($i \neq j$) je Poisson-ov koeficijent koji karakteriše poprečne kontrakcije u pravcu ose x_j od normalnog napona koji deluje u pravcu ose x_i , a G_{ij} ($i \neq j$) je modul klizanja (smicanja) koji karakteriše promenu ugla između x_i i x_j . Dakle, 5 međusobno nezavisnih konstanti se zahteva za definisanje mehaničkog ponašanja kompozita: dva modula elastičnosti (E_1 i E_2), dva Poisson-ova koeficijenta (ν_{12} i ν_{23}) i jedan modul klizanja (G_{12}).

Za monoaksijalne tanke lamele (trake) izložene naponima u ravni, veza između komponentalnih deformacija i napona postaje:

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ g_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{n_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{n_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ t_{12} \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Mehaničko ponašanje monoaksijalnih lamela može se, dakle, opisati sa četiri nezavisne elastične konstante. Za njihovo određivanje obično se sprovodi ispitivanje na aksijalno zatezanje sa pravcem aplicirane sile pod uglom θ u odnosu na vlakna. Podešavanjem $\theta = 0^\circ$ (tj. vlakna paralelna sa pravcem sile) mogu se odrediti E_1 i ν_{12} , dok za $\theta = 90^\circ$ (tj. vlakna upravna na pravac sile) se može odrediti E_2 . G_{12} se može dobiti zavisno od izabranog ugla θ u funkciji od geometrije primenjenog ojačanja.

3.4 Povezivanje FRP kompozita za konstrukcijske elemente

Ako pravilan spoj nije postignut između FRP kompozita i podloge, FRP kompozit će biti podložan prevremenoj delaminaciji, neće se ostvariti spregnuto dejstvo i prevremeni lom se može dogoditi pri apliciranju „osetnijeg“ opterećenja. Stoga, uspešna primena FRP kompozita na konstrukcijske elemente zahteva da visoko kvalitetni, trajni spoj bude ostvaren između dva različita materijala.

Implementacija FRP ojačanja (trake, tkanine, šipke) obično zahteva upotrebu lepkova. Lepkovi predstavljaju materijale koji poseduju sposobnost transformisanja iz stanja lepljivosti u čvrsto stanje, u stanje monolitiziranja spojnih elemenata. Monolitizacija se izvodi prijanjanjem (athezijom) lepka na dodirne površine pri čemu kohezija ostaje nepromenljiva. Postoji nekoliko prednosti primene lepljenog spoja u odnosu na spoj ostvaren mehaničkim spojnim sredstvima. One uključuju mogućnost povezivanja različitih materijala, obezbeđivanje velike krutosti, ravnomerno raspodeljeno opterećenje i izbegavanje rupa opasnih za koncentracije napona. Na drugoj strani, lepkovi su osetljivi na uslove sredine, kao što je vlažnost, i nisu pogodni kada su izloženi visokim temperaturama (otpornost na požar).

Postoji mnogo tipova prirodnih ili sintetičkih lepкова (elastomeri, termoplastični, termostabilni lepکovi) koji se mogu koristiti. Ipak, izbor odgovarajućeg lepka treba da bude načinjen na bazi raspoložive podloge i izabranog FRP sistema. U okviru tehničkih listova za FRP proizvode, proizvođači obično navode koji lepak treba upotrebiti zavisno od konstrukcije koja se ojačava. Kao najpodesniji lepکovi za kompozitne materijale, najveću primenu imaju lepکovi na bazi epoksida. Epoksidni lepکovi su obično dvokomponentne viskozne mešavine, koje očvršćavaju putem kondezacione polimerizacije. Ovi lepکovi imaju određene prednosti kao što su dobre karakteristike popunjavanja pora na spojnim površinama, ograničeno skupljanje tokom vremena očvršćavanja, sposobnost očvršćavanja na ambijentalnim temperaturama i zahtevanje samo minimalnog pritiska u procesu spajanja.

Efikasnost prijanjanja lepka zavisi od mnogo faktora, kao što su: priprema podloge, hemijska kompozicija i viskozitet lepka, tehnika nanošenja lepka, kao i proces očvršćavanja lepka. Tri tipa loma se mogu zapaziti kod lepljenih spojeva (slika 3.6):

- Kohezivni lom, koji se dešava unutar jednog od materijala koji formiraju vezu. Isti materijal je, dakle, sa obe strane površine loma, koja može biti glatka ili hrapava. Ovo je idealan lom za lepکove.
- Atezivni lom, koji se dešava na spoju između lepka i podloge, kada je čvrstoća lepka niža od odgovarajuće čvrstoće podloge. Površina loma je glatka. Ovaj tip loma pokazuje nepravilnu primenu lepka (npr. nepoštovanje „radnog vremena“) ili neadekvatnu pripremu površine (prašina, mast itd.).
- Mešoviti lom, koji izgleda kao delimičan kohezivni i delimičan atezivni lom. Površina loma je veoma nepravilna i karakteriše je koegzistiranje oba materijala. Ovaj lom pokazuje slabu i nekonsolidovanu podlogu (npr. deterioracija drveta ili betona) i nepravilnu primenu lepka.



Slika 3.6 - Poređenje između različitih tipova loma [22]

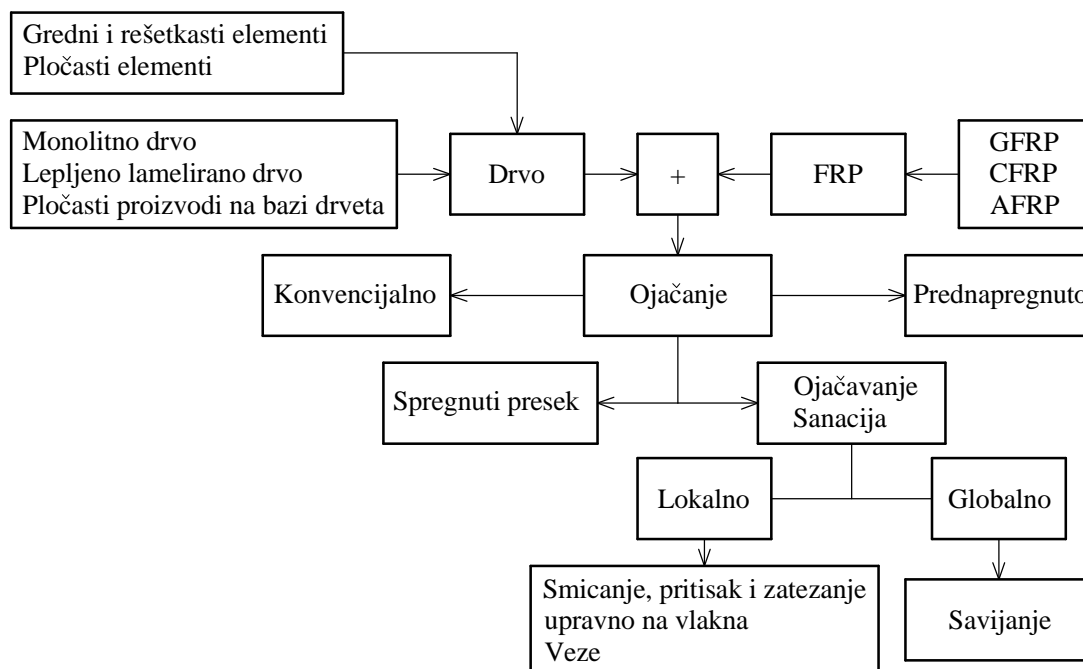
4. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA PRIMENE FRP KOMPOZITA ZA OJAČANJE DRVENIH ELEMENATA

4.1 FRP kompoziti kao ojačanje

Drvene konstrukcije se danas kombinuju sa različitim materijalima u cilju poboljšanja njihovih karakteristika nosivosti i krutosti. Spregnuto dejstvo vodi ka boljem iskorišćenju poprečnog preseka, tako što ojačanje sprečava pojavu preranog loma u kritičnim zonama. Ojačanje sa svojim visokim kapacitetom deformacije omogućava pritisnutim drvenim vlaknima da dosegnu dilatacije plastičnog tečenja, a zategnutim drvenim vlakna da dostignu njihov granični kapacitet nosivosti. Osim toga, prisustvo ojačanja može zanačajno umanjiti varijabilnost u čvrstoći drveta.

Ranijim istraživanjima je uglavnom razmatrana primena metalnih ojačanja u drvenim konstrukcijama. Čelične i aluminijumske ploče su najčešće korišćena metalna ojačanja. Dobijeni rezultati su sasvim zadovoljavajući, sa prosečnim povećanjem krutosti, kao i nosivosti za 40-50%, pri procentu ojačanja od oko 1% [25]. Glavni nedostatak primene metalnih ojačanja u drvenim konstrukcijama je nekompatibilnost između drveta i materijala ojačanja usled različitog ponašanja u vremenu.

Poslednja istraživanja u oblasti ojačanja drveta pokazala su dobre mogućnosti primene FRP kompozita kao ojačanja drvenih konstrukcija. Različite kombinacije vlakna-matrica u okviru FRP kompozita su korišćene sa različitim drvenim materijalom, kao i za različite vrste naprezanja. Šematski prikaz primene FRP kompozita u drvenim konstrukcijama dat je na slici 4.1.



Slika 4.1 - Mogućnosti primene FRP kompozita u drvenim konstrukcijama [26]

CFRP kompoziti u poređenju sa klasičnim građevinskim čelikom imaju 4-6 puta nižu zapreminsku masu i čak do 10 puta veću čvrstoću na zatezanje. Modul elastičnosti je generalno manji nego kod čelika, ali može biti približno isti (ili nešto veći). Za razliku od čelika koji pokazuje izrazito plastično ponašanje pri zatezanju, ojačanja na bazi karbonskih vlakana imaju elastično ponašanje do loma. Što se tiče izduženja pri lomu, ono je generalno 5-10 puta manje nego kod klasičnog čelika.

CFRP kompoziti imaju nekoliko važnih prednosti u odnosu na čelik kada se razmatraju kao materijal za ojačanje drveta. Oni su znatno trajniji nego čelik i bolje prijanjaju za drvo, a zbog niskog koeficijenta toplotne provodljivosti opstaju duže na visokim temperaturama. Takođe, CFRP kompoziti imaju dobru otpornost na zamor, oko tri puta veću od čelika, uz nizak koeficijent termičkog širenja i povoljne karakteristike tečenja i relaksacije. Pored ovoga, ojačanja na bazi karbonskih vlakana imaju visoku otpornost na koroziju i UV zračenje. Drveni elementi ojačani CFRP kompozitima pogodni su i za primenu u agresivnoj sredini, jer oba materijala imaju dobru otpornost prema velikom broju hemikalija, dok takođe pokazuju elektromagnetnu neutralnost.

Ojačanja na bazi karbonskih vlakana su dostupna u praktično neograničenim dužinama što omogućava jednostavno sečenje na licu mesta, dok je dužina čeličnih

ploča ograničena. Dostupnost u velikim dužinama pojednostavljuje proces izvođenja, bez preklapanja i spojeva. Zahvaljujući maloj težini, CFRP kompoziti su laki za postupanje i manipulaciju, pa je ugrađivanje vrlo brzo i jednostavno. Na drugoj strani, čelične ploče zahtevaju skelu i pridržavanje do postizanja dovoljne čvrstoće lepljenog spoja.

CFRP kompoziti su znatno skuplji u poređenju sa čelikom. Međutim, pri različitim primenama ovog ojačanja nije najbolje razmatrati samo koštanje materijala. Potrebno je razmatrati ukupne troškove, koji osim cene materijala uzimaju u obzir i cenu ugrađivanja.

4.2 Ojačanje drvenih elemenata izloženih savijanju

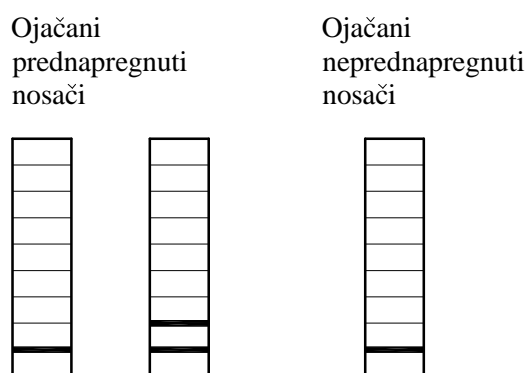
Pre 1990. godine, istraživači su uglavnom proučavali izvodljivost primene FRP kompozita kao ojačanja drvenih elemenata. Theakston (1965) [27] je istraživao mogućnosti ojačanja monolitnih i lepljenih lameliranih drvenih nosača sa staklenim vlaknima. Ojačavanje nosača dovelo je do povećanja nosivosti od 39%. Spaun (1981) [28] je za svoje istraživanje izabrao E-staklena vlakna zbog niske cene i fenol-resorcil lepak. Zabeleženo je značajno povećanje u čvrstoći na zatezanje, koje je proporcionalno zapreminskom udelu vlakana u okviru ojačanja. Van de Kuilen (1991) [29] je pokazao da se krutost može značajno povećati koristeći ojačanje staklenim vlaknima u poliesterskoj matrici. Osim ovoga, značajno povećanje graničnog momenta savijanja je postignuto uprkos problemima u kvalitetu spoja između FRP materijala i drveta. Plevris i Triantafillou (1992) [30] su istraživali mogućnosti ojačanja monolitnih drvenih greda karbonskim trakama postavljenim sa zategnute strane. U tu svrhu razvijen je numerički postupak za predviđanje ponašanja ojačanih greda. Triantafillou i Deskovic (1992) [31] su sproveli slično istraživanje koristeći prednapregnute karbonske trake kao ojačanje. Rezultati su pokazali da i sa malim procentom ojačanja može se značajno povećati nosivost i krutost.

Tokom devedesetih godina prošlog veka, sa sve većom dostupnošću kompozitnih materijala i manjom cenom, istraživanja drvenih nosača ojačanih FRP materijalima su intezivirana.

Dagher i grupa autora (1996) [32] su istraživali FRP ojačanje nosača od lepljenih nosača napravljenih od četinarske građe (kanadska cuga). Ova vrsta drveta je izabrana zbog verovanja autora da se FRP materijali mogu koristiti sa velikim uspehom za ojačanje monolitnih i lepljenih lameliranih nosača od drveta koje je jeftino i ima loše mehaničke karakteristike. Devet nosača ojačanih sa FRP trakom na zategnutoj strani i tri neojačana nosača ispitani su na savijanje. Niska, srednja i visoka klasa kvaliteta drveta su korišćene u okviru eksperimentalnog programa. Procenat ojačanja pružao se od 0,3% do 3,1%. Nosači su bili raspona 16 ft (4,88 m) i poprečnog preseka $3 \frac{3}{16} \times 12$ in ($8,1 \times 30,5$ cm).

Ojačani nosači sa 1-3% FRP ojačanja su pokazali značajno poboljšanje nosivosti (do 56%) i krutosti (do 37%) u odnosu na neojačane nosače. Povećanje nosivosti nosača je delom zbog efikasnijeg korišćenja čvrstoće drveta na pritisak. Generalno, veće povećanje nosivosti je dobijeno kod drveta lošijeg kvaliteta. Razlog leži u činjenici da niže klase drveta karakteriše velika razlika između vrednosti čvrstoće na pritisak i čvrstoće na zatezanje, koja se može umanjiti zategnutim FRP ojačanjem.

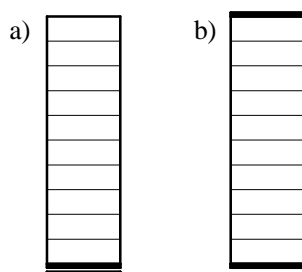
Galloway i grupa autora (1996) [33] su ispitivali karakteristike lepljenih lameliranih drvenih nosača ojačanih AFRP (Kevlar) trakama, sa i bez prednaprezanja. Primarni cilj ispitivanja bio je utvrđivanje uticaja ojačanja i postupka prednaprezanja na krutost i nosivost lepljenih lameliranih nosača (bor). Ukupno 28 nosača ($9 \times 31,4 \times 549$ cm), obuhvaćenih serijama neojačanih, ojačanih i prethodno napregnutih ojačanih nosača, ispitano je na savijanje. Kod ojačanih i prethodno napregnutih ojačanih nosača AFRP trake su bile smeštene unutar preseka, u zategnutoj zoni, između drvenih lamela (slika 4.2). Površina poprečnog preseka jedne AFRP trake iznosila je $29,4 \text{ mm}^2$.



Slika 4.2 - Poprečni preseci ispitanih ojačanih uzoraka [33]

Rezultati ispitivanja, i pored velike varijabilnosti, su pokazali da je nosivost ojačanih nosača do 24,3% veća u odnosu na neojačane nosače. Prethodno naprezanje ojačanja nije dovelo do značajnijeg povećanja graničnog opterećenja nosača. Lom svih ispitanih uzoraka nastao je usled zatezanja, pri čemu se kod većine nosača (15 od 28) lom dogodio na mestu zubčastog nastavka lamela.

Hernandez i grupa autora (1997) [34] su sproveli istraživanje sa ciljem utvrđivanja karakteristika nosača od lepljenog lameliranog drveta ojačanih sa GFRP trakama. Dvanaest nosača (topola) dimenzija poprečnog preseka 4 x 13 in (10,2 x 33 cm) i dužine 20 ft (6,1 m) ojačano je trakama na bazi staklenih vlakana i ispitano je na savijanje. Polovina od broja nosača je ojačana sa dve GFRP trake zalepljene sa donje (zategnute) strane nosača (slika 4.3a). Kod druge polovine nosača po jedna GFRP traka je postavljena na donju i gornju površinu nosača (slika 4.3b). Procenat ojačanja za obe serije iznosio je 2,8%.



Slika 4.3 - Poprečni preseki ispitanih ojačanih uzoraka [34]

Mada je broj uzoraka mali za značajniju statističku obradu, rezultati su pokazali da je dodavanjem 3% GFRP ojačanja moguće povećati krutost na savijanje za 18% i nosivost za 26%. Analiza je pokazala da ojačanje samo na zategnutoj strani efikasnije poboljšava nosivost, a ojačanje i na zategnutoj i na pritisnutoj strani efikasnije poboljšava krutost. Međutim, prema autorima, poboljšanje postignuto postavljanjem ojačanja na donju i gornju površinu nosača nije dovoljno u odnosu na cenu materijala i izvođenja ojačanja. Većina nosača doživela je katastrofalan lom u zategnutoj zoni, praćen kompletnom deliminacijom kompozitnog ojačanja. Lom nosača je uglavnom bio uslovljen čvrstoćom na zatezanje na mestu poprečnog nastavka drvenih lamela, pa se veruje da bi poboljšanje ovih spojeva moglo dovesti do pomeranja loma u pritisnutu

zonu i dodatnog povećanja nosivosti. Ovo se posebno odnosi na nosače ojačane samo na zategnutoj strani.

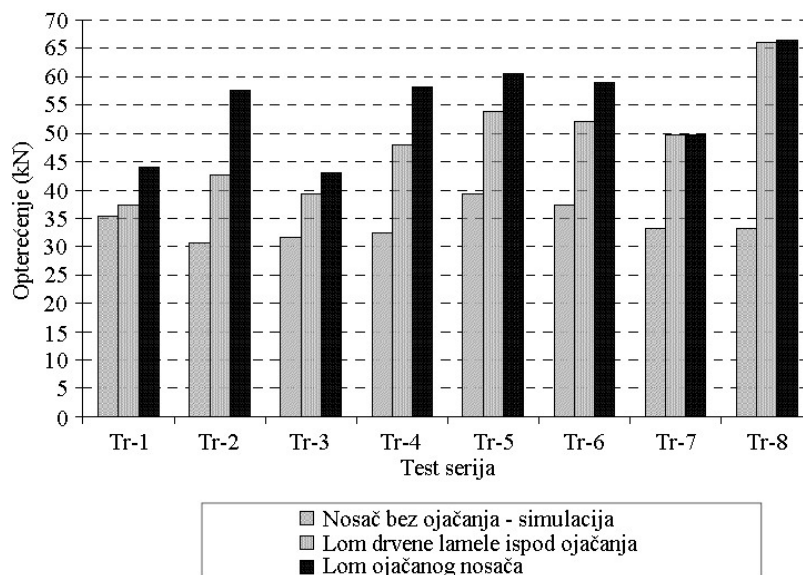
Blass i Romani (2000) [35, 36] su sproveli istraživački projekat u okviru kog su proučavali ponašanje ojačanih drvenih nosača od lepljenog lameliranog drveta. Trideset nosača sa FRP ojačanjem postavljenim u zategnutoj zoni unutar preseka između dve poslednje drvene lamele (Tip 1) i osam nosača sa FRP ojačanjem postavljenim na zategnutoj strani spolja (Tip 2) ispitano je na savijanje do loma. Nosači, napravljeni od četinarske građe, bili su širine 10 cm, prosečne visine 31 cm i dužine 4,5 m. Kao ojačanje korišćene su trake na bazi karbonskih i aramidnih vlakana, različite debljine i modula elastičnosti. Takođe, različite vrste lepkova su upotrebljene za povezivanje drveta i traka. Program ispitivanja prikazan je u tabeli 4.1.

Tabela 4.1 - Program eksperimentalnog ispitivanja [35]

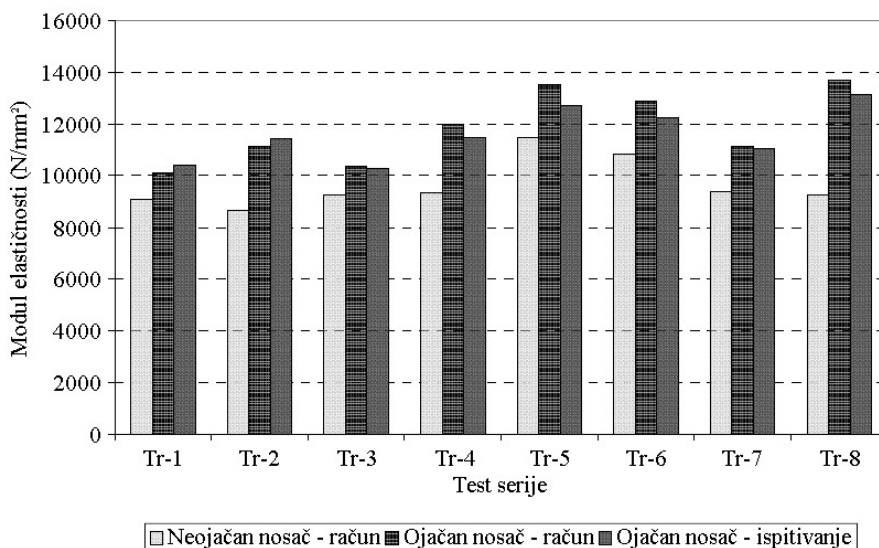
Test serija	Broj uzoraka	Tip ojačanja	FRP materijal (broj slojeva)	Lepak	Poprečno spajanje lamela
Tr-1	5	1	CFRP (1)	Epoksid	ne
Tr-2	5	1	CFRP (2)	Epoksid	ne
Tr-3	5	1	CFRP (1)	Epoksid	da
Tr-4	5	1	CFRP (2)	Epoksid	da
Tr-5	5	1	AFRP (4)	Poliuretan	da
Tr-6	5	1	AFRP (4)	Poliuretan	da
Tr-7	5	2	CFRP (1)	Poliuretan	da
Tr-8	3	2	CFRP (2)	Poliuretan	da

Lom nosača ojačanih sa spoljašnje strane dogodio se u zategnutoj zoni na mestu defekata ili poprečnog nastavka drvenih lamela. Kod uzoraka serija sa ojačanjem unutar preseka najpre je zabeležen lom drvene lamele ispod ojačanja, a zatim je sledio globalni lom u drvenom preseku iznad ojačanja obično na mestu nastavka drvenih lamela. Posle prvog loma, optrećenje naglo opada, a zatim ponovo raste do konačnog loma. Kod pojedinih uzoraka vidljivi su tragovi plastifikacije, koji su se pružali čak do 1/3 visine nosača. Eksperimentalna i teorijska analiza rezultata je pokazala da primenom FRP ojačanja u zategnutoj zoni je moguće značajno povećati nosivost i krutost nosača. Na slikama 4.4 i 4.5 prikazano je poređenje rezultata ojačanih nosača sa odgovarajućim rezultatima neojačanih nosača. Rezultati nosivosti i krutosti za neojačane nosače

dobijeni su na osnovu računskih simulacija. Efekat ojačanja je bio veći sa porastom udaljenja ojačanja od težišta poprečnog preseka, sa povećanjem procenta ojačanja i sa višim modulom elastičnosti ojačanja.



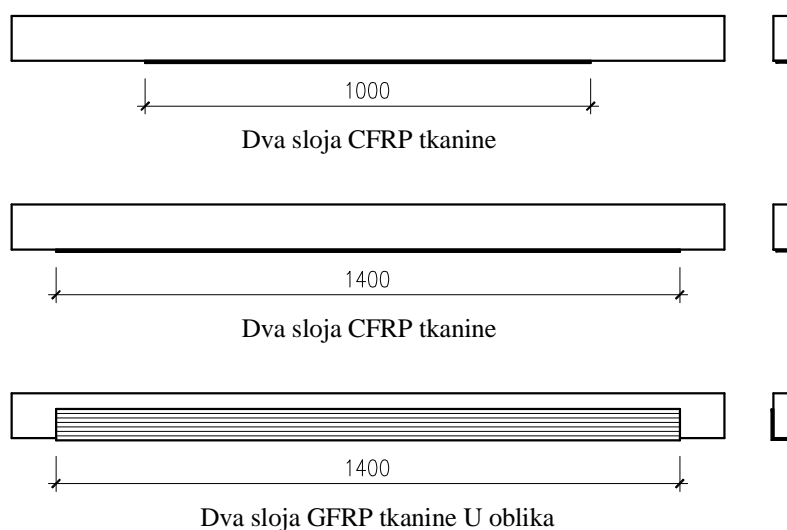
Slika 4.4 - Poređenje rezultata nosivosti neojačanih i ojačanih nosača [35]



Slika 4.5 - Poređenje rezultata krutosti neojačanih i ojačanih nosača [35]

Johns and Lacroix (2000) [17] su istraživali primenu CFRP i GFRP tkanina za ojačanje monolitnih drvenih preseka. Svoje ispitivanje su sproveli na drvenim

gredicama, poprečnog preseka 39 x 89 mm i dužine 1675 mm. Tri serije od 25 ojačanih uzoraka, zajedno sa odgovarajućim serijama neojačanih uzoraka, su ispitane na savijanje. Prikaz šema ojačanja dat je na slici 4.6. Kod dve serije uzoraka ojačanje su činile karbonske tkanine postavljene sa zategnute (donje) strane, s tim da su dužine oblasti koje su pokrivale bile različite (duž celog raspona ili samo na dužini konstantnog momenta). Treća serija uzoraka ojačana je tkaninama na bazi staklenih vlakana, U-oblika duž celog raspona.

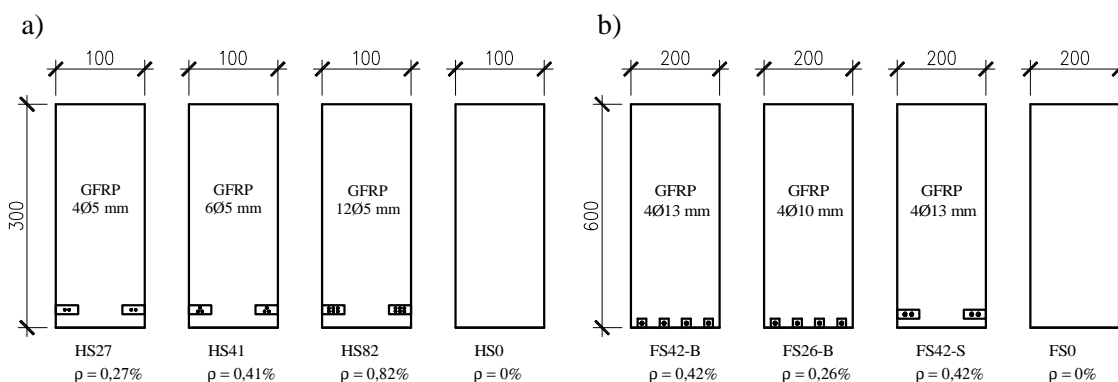


Slika 4.6 - Šeme ojačanja tri serije uzoraka [17]

Eksperimentalni rezultati su pokazali povećanje nosivosti za „najslabije“ uzorke svih serija između 40 i 100%, što je objašnjeno povećanjem efektivne čvrstoće drveta u neposrednoj blizini kompozitnog materijala. Ojačanje na zategnutoj strani duž celog raspona grede ili opšivanje grede ojačanjem U-oblika eliminiše zatezanje kao oblik loma i vodi ka lomu na pritiskutoj strani, u zoni maksimalnog momenta savijanja. Manja varijabilnost dobijenih rezultata, izražena užom raspodelom graničnog opterećenja, ukazala je na mogućnost uzimanja pri proračunu veće vrednosti karakteristične čvrstoće za ojačano drvo.

Gentile zajedno sa Svecova i Rizkalla (2000) [3, 37] je sproveo eksperimentalni program sa ciljem procene ponašanja na savijanje 30 godina starih drvenih nosača (Duglasova jela) ojačanih sa GFRP šipkama. Dvadeset dve grede (10 x 30 x 430 cm) isečene iz glavnih nosača starog drvenog mosta, od kojih je 15 ojačanih, ispitano je na

savijanje. Grede su bile ojačane šipkama na bazi staklenih vlakana postavljenih u zategnutoj zoni sa bočnih strana (slika 4.7a). Uticaj površine ojačanja u poprečnom preseku je bio razmatran kroz tri procenta ojačanja: 0,27, 0,41 i 0,82%. Pored greda, četiri cela glavna nosača mosta (20 x 60 x 1040 cm), od kojih su tri ojačana, ispitano je sa ciljem utvrđivanja uticaja efekata veličine uzorka na rezultate ojačanja. Ovi nosači su ojačani šipkama na bazi staklenih vlakana, koje su postavljene u zategnutoj zoni odozdo ili sa bočnih strana (slika 4.7b). Procenti ojačanja kod nosača bili su 0,26 i 0,42%.



Slika 4.7 - Poprečni preseki ispitanih ojačanih i neojačanih uzoraka [3]

Istraživanje je pokazalo da su GFRP šipke efikasna tehnika ojačanja na savijanje monolitnih drvenih nosača. Slično ponašanje, u smislu oblika loma, dijagrama opterećenje-ugib, raspodele dilatacija i granične čvrstoće, je zabeleženo kod obe grupe ispitanih uzoraka. Nije evidentiran nikakav efekat veličine uzorka. Za procente ojačanja između 0,27 i 0,82%, granično opterećenje se povećalo 48-60%. Ojačanjem nosača prosečna vrednost granične dilatacije zatezanja drveta se povećala za 64%, što pokazuje da prisustvo ojačanja znatno umanjuje uticaj defekata u drvetu. Osim ovoga, kod 60% ojačanih uzoraka zabeleženi oblik loma je duktilni lom u pritisnutoj zoni.

Fiorelli i Dias (2003) [38] su sprovedi eksperimentalnu i teorijsku analizu drvenih greda ojačanih staklenim i karbonskim vlaknima. Ukupno je ispitano na savijanje devet greda (bor) ojačanih sa zategnute (donje) strane FRP materijalom. Po dve grede dimenzija 6 x 12 x 300 cm i 6 x 16 x 300 cm ojačano je GFRP trakom (procenat ojačanja 1,0%) odnosno CFRP trakom (procenat ojačanja 0,4%). Jedna greda, dimenzija 6 x 12 x 300 cm, ojačana je sa tri GFRP trake, tako da je procenat ojačanja iznosio 3%.

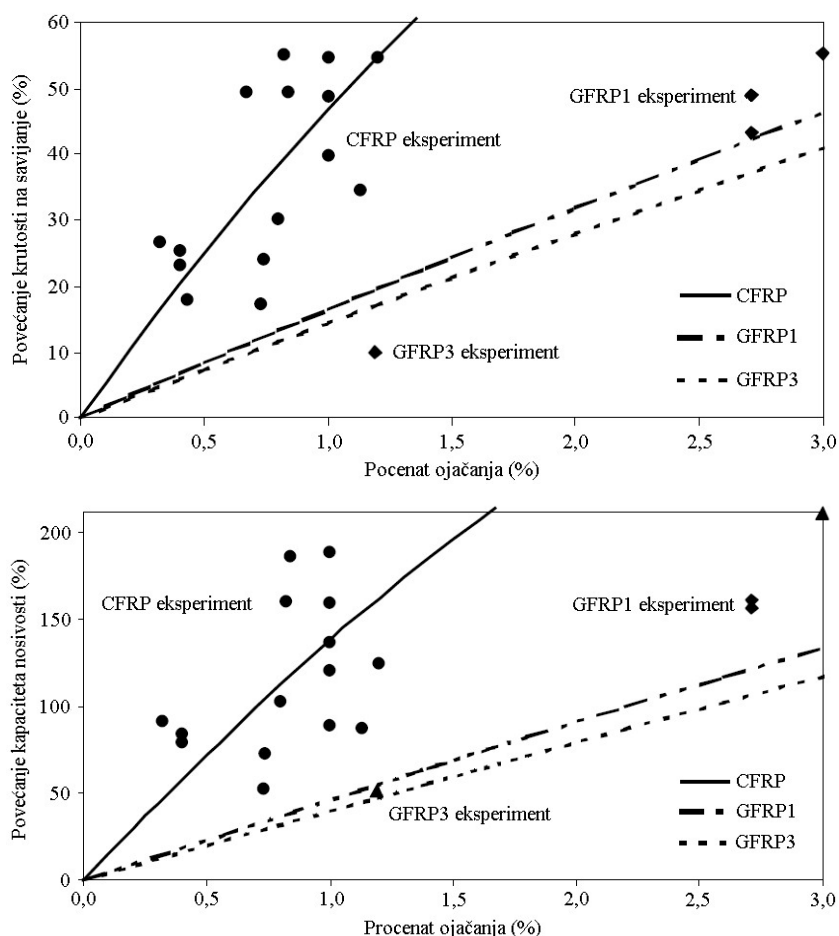
Primena ojačanja vodila je ka povećanju duktilnosti greda. Ojačane grede su prvo pokazale znakove plastifikacije u pritisnutoj zoni, što je uzrokovalo povećanje nosivosti, a zatim je sledio lom drveta u zategnutoj zoni u blizini ojačanja. Poredeći sa teorijskim vrednostima za neojačane grede, povećanje krutosti variralo je od 15 do 30% za grede sa 1,0% GFRP ojačanja ili 0,4% CFRP ojačanja. U slučaju grede sa 3,0% GFRP ojačanja povećanje krutosti bilo je značajno, približno 60%.

Tabela 4.2 - Dimenzije nosača i detalji ojačanja [39]

Oznaka nosača	Raspon (mm)	Visina (mm)	Širina (mm)	Ojačanje		Površina ojačanja	
				Tip	Šema	(mm ²)	%
2/1	2000	120	70	GFRP-2	B	221	2,7
2/2	2000	120	70	GFRP-3	B	252	3,0
2/3	2000	120	70	CFRP	C	68+68	0,8+0,8
2/4	2000	120	70	CFRP	D	68+34	0,8+0,4
2/5	2000	120	68	-	A	0	0,0
2/6	2000	120	68	CFRP	B	82	1,0
2/7	2000	120	68	GFRP-2	B	221	2,7
3/1	3000	150	70	-	A	0	0,0
3/2	3000	150	70	GFRP-1	B	225	2,1
3/3	3000	150	70	CFRP	B	42	0,7
4/1	4000	300	70	GFRP-3	B	252	1,2
6/1	6000	300	70	-	A	0	0,0
6/2	6000	300	70	CFRP	B	84	0,4
6/3	6000	300	70	CFRP	B	252	1,2
6/4	6000	300	70	-	A	0	0,0
6/5	6000	300	70	CFRP	B	154	0,8
6/6	6000	300	70	CFRP	D	168+84	0,8+0,4

Gilfillan, Gilbert i Patrick (2003) [39] su sprovedli eksperimentalno i teorijsko istraživanje sa ciljem primene FRP ojačanja za poboljšanje mehaničkih karakteristika lepljenih lameliranih drvenih nosača izrađenih od sitkanske smreke. Ovu vrstu drveta karakteriše mala zapreminska masa, kao i male dimenzije, a kada se suši ima tendenciju ka krivljenju. Ukupno je ispitano na savijanje 17 nosača različitih dimenzija, od kojih je

13 bilo ojačano. Položaj ojačanja obuhvatio je sledeće slučajeve: FRP ojačanje na zategnutoj strani, FRP ojačanje na zategnutoj i pritisnutoj strani (horizontalno postavljeno) i FRP ojačanje na zategnutoj i pritisnutoj strani (vertikalno postavljeno). FRP ojačanje bilo je u formi traka, na bazi karbonskih ili staklenih vlakana. Informacije vezane za sve ispitane nosače date su tabeli 4.2.



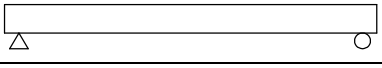
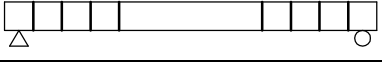
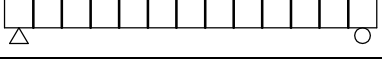
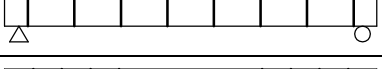
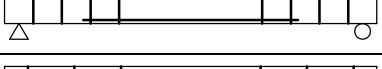
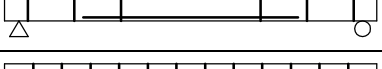
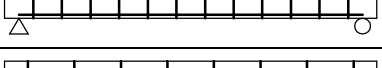

Slika 4.8 - Eksperimentalni rezultati i teorijsko predviđanje [39]

Lom svih neojačanih nosača dogodio se iznenada usled zatezanja u drvetu. Nosači ojačani samo sa zategnute strane pokazali su vidljivo gužvanje drvenih vlakana gornjih lamela. Plastifikacija pritisnute zone je praćena sekundarnim lomom pri kome se drvo raspuklo podužno. Kod uzoraka sa zategnutim i pritisnutim ojačanjem, lom se desio kada se u preseku blisko sredini raspona nosača pritisnuta traka izvila i odlepila. Ojačani nosači imali su zanačajno veću krutost i nosivost nego neojačani (slika 4.8). Rezultati su pokazali da se veća nosivost i krutost dobija kada se ista površina ojačanja

postavi samo u zategnutoj zoni umesto da se raspoređi između zategnute i pritisnute zone.

Svecova i Eden (2004) [40] su sprovedli istraživanje sa ciljem doprinosa razvoju praktične metodologije ojačanja postojećih drvenih mostova primenom šipki na bazi staklenih vlakana. Povod za ovo istraživanje je težnja da se umesto skupe zamene starih i oštećenih drvenih mostova ojačaju postojeće konstrukcije i na taj način im se produži upotrební vek. Eksperimentalni program obuhvatio je ispitivanje na savijanje do loma 45 drvenih greda (Duglasova jela), isečenih iz glavnih nosača drvenih mostova oblasti Manitoba u Kanadi. Grede su bile širine 10 cm, visine 30 cm i dužine 2 m. Generalno, dve šeme ojačanja su primenjene u okviru programa ispitivanja. Prva grupa, Grupa S, obuhvatila je 16 greda, koje su ojačane samo vertikalnim šipkama (prečnika 16 mm) kao ojačanjem na smicanje, dok je druga grupa od 20 greda, Grupa SF, pored vertikalnih imala i ojačanja u vidu dve horizontalne šipke sa bočnih strana (prečnika 5 mm), što je predstavljalo kombinaciju ojačanja na savijanje i na smicanje. Položaj i rastojanje vertikalnih šipki, kao i dužina horizontalnih šipki su parametri koji su varirali. Rezultati ispitivanja ojačanih greda upoređeni su sa rezultatima ispitivanja grupe od 9 neojačanih greda (Grupa C). Program eksperimentalnog ispitivanja dat je u tabeli 4.3.

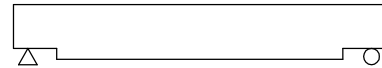
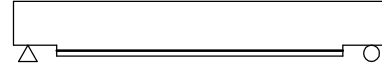
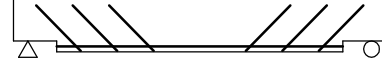
Tabela 4.3 - Program eksperimentalnog ispitivanja [40]

Oznaka uzoraka	Šema ojačanja	Broj uzoraka
C		9
S-S150		5
S-C150		6
S-C300		5
SF-S150		5
SF-S300		5
SF-C150		5
SF-C300		5

Poredeći sa kontrolnim gredama, ojačane grede su imale veću čvrstoću na savijanje i to 17-35% grede Grupe S i 47-52% grede Grupe SF. Primena u isto vreme ojačanja na smicanje i savijanje pored znatnog povećanja nosivosti vodila je i ka lomu u pritisnutoj zoni, praćeno velikim deformacijama neposredno pre loma. Takođe, uvođenje kombinovanog ojačanja redukovalo je varijabilnost u čvrstoći drveta.

Istraživanje Amy i Svecova (2004) [41] predstavlja nastavak eksperimentalnog programa ojačanja glavnih nosača drvenih mostova. Sva istraživanja do tada su sprovedena na pravougaonim gredama bez zasečenih krajeva. Međutim, većina drvenih nosača u okviru mostova u oblasti Manitomba (Kanada) je imala redukovanu visinu na krajevima. Zbog koncentracije napona na mestu nagle promene visine, na zasećenim delovima nosača, ovaj eksperimentalni program je obuhvatio ojačanje zasećenih drvenih nosača. Ukupno 26 drvenih nosača (10 x 40 x 340 cm) ispitano je na savijanje do loma: 8 neojačanih (kontrolnih) uzoraka (Grupa C), 12 ojačanih horizontalnim GFRP šipkama (prečnika 12 mm) u oblasti najvećih napona savijanju u zategnutoj zoni (Grupa F) i 6 ojačanih horizontalnim GFRP šipkama u zategnutoj zoni i kosim GFRP šipkama, pod uglom od 60° prema horizontalnoj ravni, kao ojačanje na smicanje (Grupa FD). Program eksperimentalnog ispitivanja dat je u tabeli 4.4.

Tabela 4.4 - Program eksperimentalnog ispitivanja [41]

Grupa uzoraka	Šema ojačanja	Broj uzoraka
C		8
F		12
FD		6

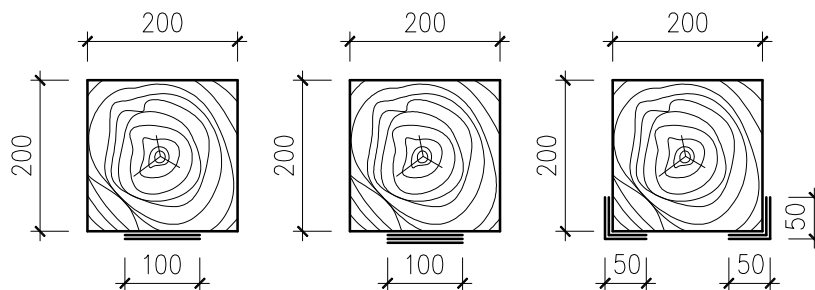
Primena samo ojačanja na savijanje se ne preporučuje za zasećene nosače, jer je dominantan smičući lom na zasećenom delu, koji znatno redukuje nosivost nosača. Primena ojačanja i na savijanje i na smicanje za ovaj tip nosača vodila je ka povećanju graničnog opterećenja od 22%, uz promenu oblika loma (pritisak upravno na vlakna u pritisnutoj zoni). Duktilnost nosača je, takođe, povećana primenom GFRP ojačanja.

Znatno veće povećanje duktilnosti je zabeleženo kod nosača ojačanih i na savijanje i na smicanje u odnosu na nosače ojačane samo na savijanje.

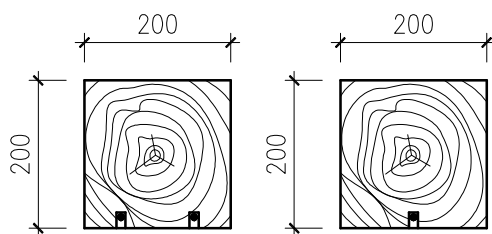
Borri, Corradi i Grazini (2005) [42] su istraživali mogućnosti ojačanja postojećih drvenih elemenata izloženih savijanju primenom FRP materijala. Teorijsko i eksperimentalno istraživanje je sprovedeno radi utvrđivanja krutosti, nosivosti i duktilnosti ojačanih drvenih greda. Dvadeset drvenih greda dužine 400 cm i poprečnog preseka 20 x 20 cm je ispitano u okviru eksperimentalnog dela. U pogledu klasifikacije drveta, ove grede su klasifikovane kao druga klasa. Tri neojačane grede su ispitane sa jednim ciljem kvalitativne procene efikasnosti intervencije kroz poređenje sa rezultatima ojačanih greda. Prvi set uzoraka obuhvatio je 8 greda ojačanih karbonskim thaninama u okviru tri različite šeme ojačanja (slika 4.9):

- šema 1: dve karbonske tkanine postavljene u zategnutoj zoni greda (procenat ojačanja 0,082%);
- šema 2: tri karbonske tkanine postavljene u zategnutoj zoni greda (procenat ojačanja 0,123%);
- šema 3: dva para po dve karbonske tkanine postavljene bočno u zategnutoj zoni (procenat ojačanja 0,164%).

Prethodno naprezanje je sprovedeno na četiri uzorka sa ciljem povećanja krutosti ojačanih greda. Prednapregnuto ojačanje je primenjeno u pritisnutoj zoni u okviru šema ojačanja 1 i 2. Pored uzoraka ojačanih karbonskim tkaninama, ispitano je i 5 drvenih greda ojačanih karbonskim šipkama. U zategnutoj zoni, blisko donjoj površini, je postavljena jedna ili dve šipke, prečnika 7,5 mm (slika 4.10). Dodatno, jedna greda je ojačana sa dve prednapregnute karbonske šipke.



Slika 4.9 - Šeme ojačanja greda sa karbonskim tkaninama [42]



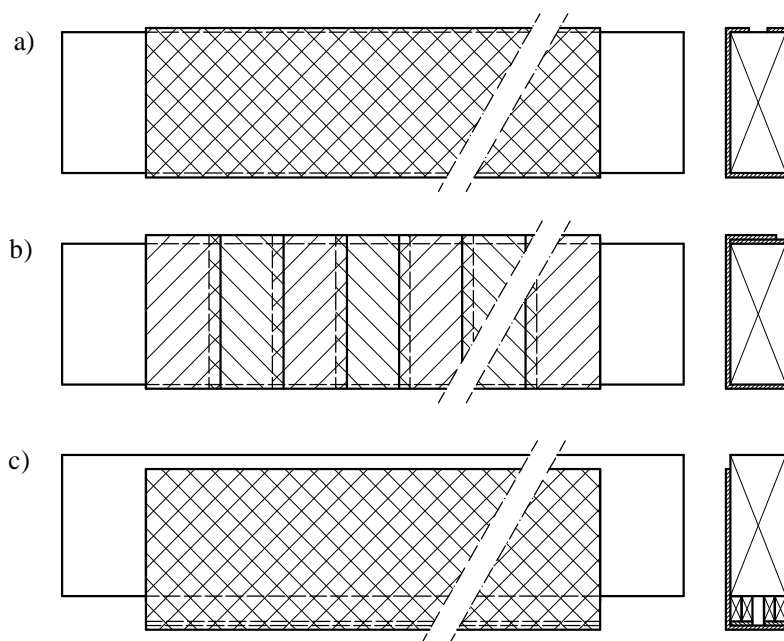
Slika 4.10 - Šeme ojačanja greda sa karbonskim šipkama [42]

Drvene grede ojačane sa karbonskim tkaninama pokazale su znatno duktilnije ponašanje u odnosu na neojačane grede. Lom ojačanih nosača se uvek događao usled pucanja drveta u zategnutoj zoni. Atežija između drveta i kompozitnog materijala narušena je jedino posle loma drveta. Prisustvo CFRP ojačanja u okviru šema ojačanja 1 i 2 uticalo je na povećanje maksimalnog opterećenje (42,3-60,3%) i krutosti (22,5-29,2%). Ojačanjem u skladu sa šemom 3, kapacitet nosivosti se povećao 55,0%, a krutost se povećala 30,3% u odnosu na neojačane uzorke. Sve grede ojačane karbonskim šipkama imale su manje duktilno ponašanje poredeći sa neojačanim gredama, kao i sa gredama ojačanim karbonskim tkaninama. Pozitivan efekat izazvan prisustvom šipki nije bio dovoljan da ograniči lokalna oštećenja i premosti lokalne defekte u drvetu. U oba slučaja ojačanja sa karbonskim šipkama zabeleženo je, takođe, povećanje nosivosti i krutosti (28,9% i 22,0% za slučaj jedne šipke, odnosno 52,0% i 25,5% za slučaj dve šipke). Prednaprezanje CFRP tkanina i šipki nije vodilo ka bilo kakvom značajnijem poboljšanju poredeći sa neprednapregnutim ojačanjem.

Buell and Saadatmanesh (2005) [43] su kroz svoj istraživački projekat pokazali kako savremeni kompozitni materijali mogu biti korišćeni za ojačanje postojećih glavnih nosača mosta sa ciljem povećanja kapaciteta nosivosti. Biaksijalne karbonske tkanine su upotrebljene kao primarno ojačanje. Ukupno 10 monolitnih drvenih nosača (Duglasova jela) je isečeno iz noseće konstrukcije mosta u Yumi (Arizona), koji je nešto ranije zamenjen. Sedam od deset nosača je ojačano. Ukupno šest nosača (19,7 x 47,9 x 914 cm) je ispitano na savijanje, a četiri nosača (19,7 x 47,9 x 457 cm) na smicanje, radi određivanja krutosti, čvrstoće na savijanje i čvrstoće na smicanje.

Nosači B3 i B7 su bili ojačani karbonskom tkaninom iz jednog komada, koja je pokrivala zategnutu stranu, obe bočne strane i dve trećine pritisnute strane (slika 4.11a). Karbonska vlakana su bila orijentisana pod uglom $\pm 45^\circ$ da optimizuju krutost na

smicanje. Nosači B4 i B9 su bili opšiveni preklopljenim komadima karbonske tkanine postavljanim upravno na podužnu osu nosača (slika 4.11b). Svaki komad tkanine pokrivaio je sve strane nasača. Cilj ispitivanja ovih uzoraka bio je određivanje karakteristika preklopljenih tkanina. Nosač B5 je bio ojačan samo sa dve karbonske trake postavljene sa donje strane nosača, dok je nosač B6 bio ojačan i karbonskim trakama sa donje strane i opšiven karbonskom tkaninom iz komada. Cilj ispitivanja uzoraka B6 bio je da se utvrdi efikasnost ojačavanja kombinacijom traka i tkanina. Nosač B10 je ispitan da se proceni efekat postavljanja karbonskog ojačanja sa donje strane što dalje od neutralne ose, sa ciljem maksimalnog povećanja otpornog momenta preseka i boljeg iskorišćenja drveta i ojačanja. Veće udaljenje karbonskih traka postignuto je postavljanjem dodatnih drvenih gredica (3,8 x 8,9 cm) sa donje strane nosača (slika 4.11c). Pored prisustva dve karbonske trake, nosač je bio opšiven karbonskom trakom iz komada, koja je pokrivala donju i bočne strane nosača. Neojačani nosači su imali oznake B1, B2 i B8.

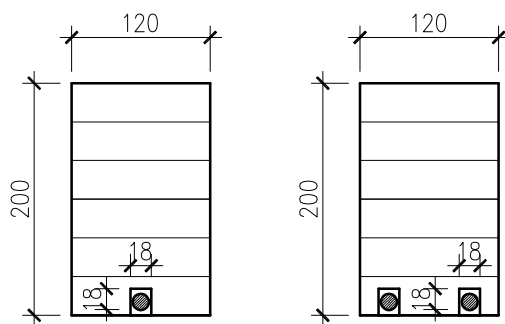


Slika 4.11 - Prikaz ojačanih nosača: a) B3 i B7; b) B4 i B9; c) B10 [43]

Primena karbonskih tkanina dovela je do poboljšanja mehaničkih karakterisika i to: povećanje krutosti na savijanje 17-27% i povećanje čvrstoće na savijanje 40-69%. Pored ovoga, duktilnost nosača opšivenih karbonskim tkaninama značajno je povećana.

Koeficijent duktilnosti, baziran na ugibu nosača, povećan je 28-51% u odnosu na neojačane nosače. Kod nosača kome je visina dodatno povećana (B10), usled povećanja duktilnosti drvo je efikasnije iskorišćeno, a umesto loma u zategnutoj zoni javio se lom u pritisnutoj zoni nosača. Čvrstoća na smicanje paralelno vlaknima je povećana kada su nosači opšiveni tkaninama. Ovo se najbolje vidi na primeru nosača koji je ojačan samo karbonskim trakama sa donje strane (B5). To je bio jedini nosač kod koga se pri ispitivanju na savijanje lom desio usled smicanja. Lom ovog nosača nastao je pri opterećenju koje je 22% manje od opterećenja neojačanog nosača B1. Nosači koji su ojačani karbonskom tkanininom iz komada imali su bolje karakteristike nego nosači ojačani tkaninama sa preklopom. Dodatne karbonske trake na donjoj strani nosača u kombinaciji sa tkaninom nisu pokazale značajan doprinos krutosti i nosivosti, kada se izvrši poređenje u odnosu na nosače sa samo karbonskom tkaninom kao ojačanjem.

Micelli, Scialpi i La Tegola (2005) [44] su razmatrali mogućnost upotrebe CFRP šipki kao ojačanja lepljenih lameliranih drvenih nosača. Šest nosača od lepljenog lameliranog nosača (smreka), od čega četiri ojačana, je ispitano na savijanje. Nosači (12x20x500 cm) su ojačani karbonskim šipkama prečnika 12,5 mm (jednom ili dve) postavljenim u zategnutoj zoni, u neposrednoj blizini donje površine (slika 4.12).



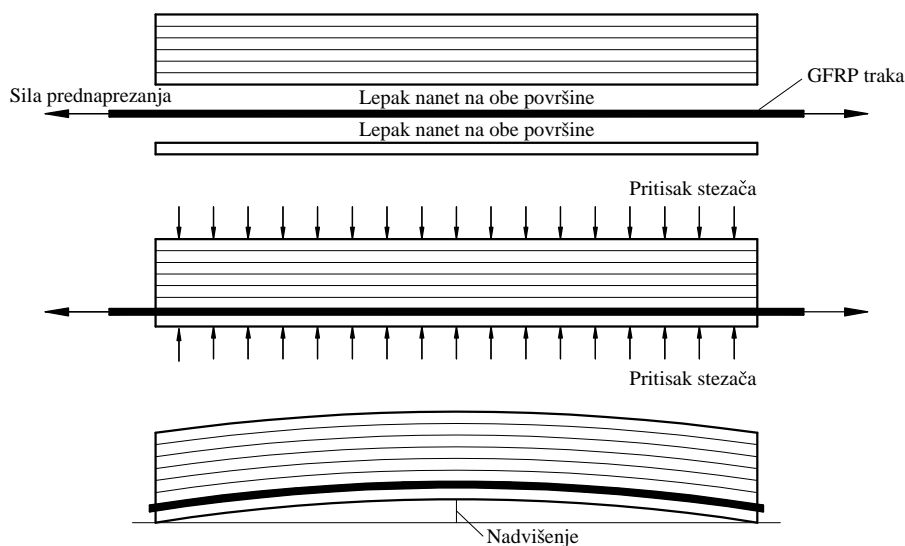
Slika 4.12 - Poprečni preseki ojačanih nosača [44]

Eksperimentalni rezultati su pokazali da se postavljanjem CFRP šipki sa zategnute strane poprečnog preseka može značajno poboljšati nosivost i krutost nosača. Za procenat ojačanja 0,51% i 1,03%, zabeleženo je povećanje graničnog momenta od 26% i 82%, odnosno povećanje krutosti od 8% i 19% u odnosu na neojačane nosače. Oblici loma i eksperimentalni podaci pokazali su odlične karakteristike spoja između

dreveta i karbonskih šipki. Lom kako neojačanih, tako i ojačanih nosača zavisio je pre svega od čvrstoće drveta na zatezanje.

Issa i Kmeid (2005) [45] su sprovedli eksperimentalno istraživanje sa ciljem određivanja karakteristika na savijanje ojačanih i neojačanih greda od lepljenog lameliranog drveta. Potrebu za ojačanjem lepljenih lameliranih greda pravdali su nižom cenom ojačanih greda zbog mogućnosti upotrebe drveta lošijeg kvaliteta, kao i smanjenjem dimenzija poprečnog preseka. Ukupno je ispitano 9 greda dimenzija 6x11x176 cm, od kojih je šest bilo ojačano. Primenjena su dva tipa ojačanja. Prvi tip ojačanja predstavljao je čelični lim, debljine 1,5 mm, postavljen sa donje (zategnute) strane greda. Drugi tip ojačanja predstavljala je karbonska traka, poprečnog preseka 1,2x5 mm, postavljena, takođe, spolja sa zategnute strane.

Na osnovu malog broja ispitanih uzoraka mogli su se izvući samo neki opšti zaključci. Ojačanjem greda se može promeniti oblik loma od krtog ka diktilnom. Primena čeličnog lima kao ojačanja vodila je ka povećanju krutosti greda od 45,1% i povećanju nosivosti od 35,6%. Sa druge strane, postavljanjem karbonske trake na zategnutoj strani ojačanih nosača, krutost se povećala za 27,8 %, dok se nosivost povećala za 55,9 % u poređenju sa neojačanim gredama. Takođe, ojačavanje je imalo i pozitivan efekat na povećanje ugiba pri lomu. Zabeleženo povećanje ugiba iznosilo je 67,3% u slučaju ojačanja čeličnim limom i 71% za slučaj ojačanja karbonskom trakom.



Slika 4.13 - Šema procesa prethodnog naprezanja nosača [46]

Guan, Rodd i Pope (2005) [46] su se u okviru svog istraživanja bavili prethodno napregnutim drvenim nosačama koristeći GFRP trake. Lepljeni lamelirani drveni nosači dimenzija poprečnog preseka 9,5 x 31,5 cm i dužine 3,5 m prednapregnuti su GFRP trakom 70 mm širine i 3 mm debljine, smeštenom u zategnutoj zoni, između dve poslednje drvene lemele. Šematski prikaz procesa prethodnog naprezanja nosača prikazan je na slici 4.13.

Koristeći kalibrisani model konačnih elemenata sprovedena je parametarska studija da se proceni uticaj varijacije debljine trake, raspona nosača i veličine sile prednaprezanja na ponašanje nosača pri savijanju. Pokazano je da su debljina trake na bazi staklenih vlakana 4 mm i sila prednaprezanja 60% granične čvrstoće zatezanja GFRP kompozita granične vrednosti za optimalno ponašanje nosača.

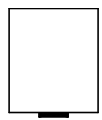
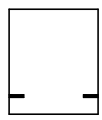
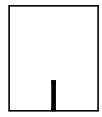
Brunner i Schnueriger (2005) [47] su se kroz svoje istraživanje, pre svega, bavili ojačanjem drvenih nosača prethodno napregnutim kompozitnim materijalima. U okviru datog rada, ispitivanje na savijanje je sprovedeno sa ciljem demonstriranja povećanja efikasnosti ojačanih lepljenih lameliranih drvenih nosača primenom prednaprezanja. U prvoj test seriji, šest nosača (14 x 20x 400 cm) bilo je ojačano sa prednapregnutom karbonskom trakom (1,14 x 50 mm) sa zategnute (donje) strane nosača. U drugoj test seriji, šest nosača, istog kvaliteta drveta i dimenzija, bilo je ojačano karbonskom trakom bez prethodnog naprezanja. U cilju poređenja rezultata, ispitano je i šest neojačanih nosača.

Kod svih ispitanih nosača, lom je izazvan krtim pucanjem drveta u zategnutoj zoni. U slučaju ojačanih nosača, karbonska traka je pucala neposredno posle loma u drvetu. Znakovi plastifikacije, u formi izbočavanja drvenih vlakana, bili su vidljivi na pritisnutoj strani nosača. Svi uzorci su imali prilično linearno ponašanje opterećenje-ugib, što je ukazalo da je procenat ojačanja od 0,2% isuviše mali da izazove značajniju plastifikaciju pritisnute strane. Eksperimentalni rezultati su potvrdili da primena prednapregnutih karbonskih traka vodi ka većem poboljšanju kapaciteta nosivosti nosača nego kad je traka postavljena bez prethodnog naprezanja. Nosivost neojačanih nosača se povećala 34% kada su ojačani prednapregnutom trakom nasuprot 22% kada traka nije prednapregnuta.

Schober i Rautenstrauch (2006) [48] su proučavali primenu CFRP traka kao tehnike za sanaciju i ojačavanje postojećih drvenih međuspratnih konstrukcija. Tri

različite serije greda su obuhvaćene eksperimentalnim programom, Serija Vh sa ojačanjem postavljenim spolja i Serije Vs i Vv sa ojačanjem unutar drvenog preseka (tabela 4.5). Ukupno je ispitano na savijanje 12 starih drvenih greda, prosečnih dimenzija poprečnog preseka 16,6 x 17,9 cm i dužine 3,5 m. Usled pukotina uobičajenih za stare drvene grede primećena je redukcija momenta inercije i krutosti na savijanje, koja je procenjena na oko 17%.

Tabela 4.5 - Program eksperimentalnog ispitivanja [48]





Seriya uzoraka	Tip	Ojačanje	Broj uzoraka
Vh		1 traka, 1,4 x 50 mm, centralno postavljena u zategnoj zoni, horizontalno odozdo	4
Vs		2 trake, 1,4 x 25 mm, postavljene u zategnoj zoni, horizontalno sa strane, 3 cm od donje ivice	4
Vv		1 traka, 1,4 x 50 mm, centralno postavljena u zategnoj zoni, vertikalno odozdo	4

Drvene grede ojačane karbonskim trakama pokazale su znatno duktilnije ponašanje u odnosu na neojačane grede. Prisustvo CFRP ojačanja je sprečilo otvaranje pukotina i na taj način omogućilo gredama da prihvate veće opterećenje pre loma. Poboljšanje kapaciteta nosivosti je zabeleženo posebno kod serija uzoraka sa ojačanjem postavljenim unutar preseka. Lom greda u ovim slučajevima izazvan je smicanjem usled cepanja preseka u podužnom pravcu između pukotina. Kako bi se ovo izbeglo predloženo je uvođenje dodatnog ojačanje na smicanje. Primenom datih šema ojačanja krutost na savijanje se, prosečno za sve serije, povećala za 5,86%.

Johnsson, Blanksvard i Carolin (2006) [49] su istraživali ojačanje nosača od lepljenog lameliranog drveta pomoću CFRP šipki. Posebna pažnja bila je usmerena ka utvrđivanju potrebne minimalne dužine sidrenja ojačanja, pri kojoj neće doći do pojave prevremenog loma. Ukupno je ispitano 10 lepljenih lameliranih nosača (smreka), porečnog preseka 9 x 22,5 cm i dužine 350 cm. Karbonske šipke (pravougaonog

poprečnog preseka, 10 x 10 mm) su postavljene unutar preseka, u neposrednoj blizini donje površine. Program eksperimentalnog ispitivanja dat je u tabeli 4.6.

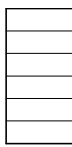
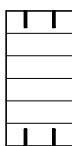
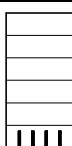
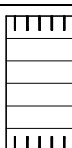

Tabela 4.6 - Program eksperimentalnog ispitivanja [49]

Serijski uzorak	Tip	Ojačanje	Broj uzoraka
1		Bez ojačanja	3
2		1 šipka, centrano postavljena u zategnutoj zoni, celom dužinom nosača	3
3		2 šipke, simetrično postavljene u zategnutoj zoni, celom dužinom nosača	3
4		1 šipka, centralno postavljena u zategnutoj zoni, kraće dužine	1

Poredeći sa neojačanim nosačima, ojačani nosači su pokazali povećanje kapaciteta nosivosti za 44-63% i krutosti za 10%. Poboljšanje nosivosti povezano je sa promenom oblika loma od krtoeg loma na zategnutoj strani ka duktilnom lomu u pritisnutoj strani. Kao posledica duktilnog ponašanja ojačanih nosača, ugib u sredini nosača pri lomu povećao se do 80%. Rezultati eksperimentalne i teorijske analize dužine sidrenja CFRP šipke pokazali su da je minimalna potrebna dužina 150 mm.

Jacob i Garzon-Barragan (2007) [25] su istraživali mogućnosti primene čelika i CFRP materijala kao ojačanja lepljenih lameliranih drvenih nosača. Njihovo istraživanje bilo je posebno fokusirano ka istraživanju različitih šema ojačanja da se dođe do optimalnog položaja ojačanja koji će maksimalno poboljšati karakteristike krutosti i nosivosti. Istraživanje je uključilo analitički, numerički i eksperimentalni pristup. Na osnovu prethodnog modeliranja, četiri šeme ojačanja su izabrane za eksperimentalno ispitivanje. Ukupno devet nosača (11,5 x 20 x 400 cm), uključujući dva neojačana, ispitano je na savijanje do loma. Svi uzorci su bili napravljeni od lepljenog lameliranog drveta četitnara II klase. Različite šeme ojačanja primenjene u okviru ovog istraživanja date su u tabeli 4.7.

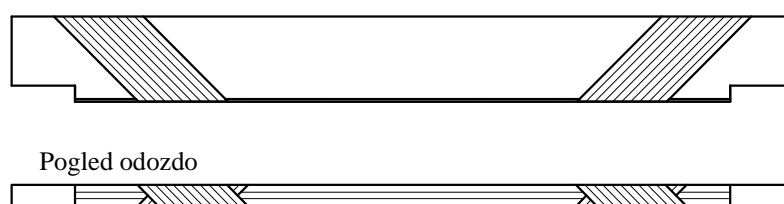
Tabela 4.7 - Program eksperimentalnog ispitivanja [25]

Oznaka nosača	Tip	Ojačanje
Beam-1 Beam-2		Bez ojačanja
Beam-3 Beam-5		Čelični lim 4x (4mm x 30mm) Procenat ojačanja: 2% 50% zat. 50% prit.
Beam-4 Beam-6		Čelični lim 4x (4mm x 30mm) Procenat ojačanja: 2% 100% zat. 0% prit.
Beam-7		CFRP trake 10x (1,4mm x 25mm) Procenat ojačanja: 1,5% 50% zat. 50% prit.
Beam-9 Beam-10		CFRP trake 9x (1,4mm x 30mm) Procenat ojačanja: 2,8% 66,6% zat. 33,3% prit.

Mada se zbog malog broja nije mogla sprovesti značajnija statistička analiza, neki opšti zaključci su se mogli izvesti. Sve intervencije su rezultovale značajnim povećanjem nosivosti, kao i krutosti. Povećanje graničnog opterećenja 57-96% i povećanje krutosti 80-107% postignuto je primenom različitih šema ojačanja. Procenat ojačanja u poprečnom preseku je bio presudan u pogledu oblika loma. Kod većine ojačanih uzoraka lom je izazvan zatezanjem pri savijanju, jer procenat ojačanja nosača na zategnutoj strani nije bio suviše veliki da izazove čist lom usled pritiska. Međutim, kada je procenat ojačanja bio previše visok, umesto oblika loma karakterističnih za savijanja događao se smičući lom. Upravo zbog ovoga, zaključeno je da povećanje procenta ojačanja nužno ne rezultuje povećanjem nosivosti. S druge strane, povećanje površine ojačanja u osnovi znači uvođenje krućeg materijala u poprečni presek, što je vodilo ka očiglednom povećanju krutosti. Položaj ojačanja je, takođe, veoma važan faktor u globalnom ponašanju nosača. Kontrolom procenta ojačanja u zategnutoj i pritisnutoj zoni moguće je postići željeni oblik loma. Nosači ojačani samo na zategnutoj

strani, kao i nosači sa minimalnim ojačanjem na pritisnutoj strani pokazali su plastifikaciju sa zbijanjem drvenih vlakana pritisnute strane, što je omogućilo duktilniji lom. Uvođenjem veće količine ojačanja u pritisnutu zonu vodilo je ka krtom lomu u zategnutoj zoni. Razlog leži u činjenici da je čvrstoća na pritisak drveta znatno povećana sa pritisnutim ojačanjem, pa je prema tome kapacitet drveta na pritisak značajno veći od kapaciteta na zatezanje. Zaključeno je da je optimalna konfiguracija ona koja ima ojačanje raspoređeno tako da 20-25% bude u pritisnutoj zoni, a ostatak u zategnutoj zoni. Ova šema ojačanja daje maksimalnu nosivost, sa značajno visokom krutošću, i dozvoljava određenu plastifikaciju u pritisnutoj zoni. Poređenje različitih materijala upotrebljenih za ojačenje izvršeno je na osnovu uticaja na globalno ponašanje nosača. Čelik zahvljujući kapacitetu plastičnog tečenja povećava duktilnost nosača, dok na drugoj strani CFRP ojačanje čini nosače krućim.

Gomez i Svecova (2008) [50] su nastavili dalje ranije započeto ispitivanje zasečenih glavnih nosača drvenih mostova ojačanih na smicanje i na savijanje. Devet starih drvenih nosača (10 x 40 x 365 cm) je ispitano pre i posle ojačanja u cilju određivanja efekta ojačanja na krutost na savijanje. Ojačanje na savijanje činila su dva sloja GFRP tkanina na zategnutoj strani, celom dužinom i širinom nosača. Ojačanje na smicanje predstavljale su 30 cm široke GFRP trkanine zakošene 45° u odnosu na podužni pravac. Ove tkanine su postavljene na krajevima nosača i opšivale su ceo poprečni presek. Izgled ojačanih nosača prikazan je na slici 4.14.



Slika 4.14 - Prikaz ojačanja nosača [50]

Primena predložene dispozicije ojačanja dovela je do poboljšanja krutosti za 5,5-52,8%, zavisno od stepena oštećenja nosača pre ojačanja. Kod ojačanih nosača sa položajem pukotina blisko sredini visine poprečnog preseka, dužine veće od visine nosača, dogodio se smičući lom praćen odvajanjem ojačanja na smicanje. Ako su

pukotine locirane bliže donjoj ili gornjoj ivici nosača, smičući lom kod pravilno ojačanih nosača je manje verovatan.

Li, Xie i Tsai (2009) [51] su istraživali mehaničke karakteristike drvenih greda ojačanih karbonskim trakama zalepljenim spolja sa donje (zategnute) strane. Eksperimentalno ispitivanje je sprovedeno na malim drvenim uzorcima dimenzija 6,5x6,5x110 cm, napravljenim od dve vrste drveta karakteristične za istorijske zgrade Tajvana (kineska jela i kineska cuga). Ukupno osam grupa uzoraka (za obe vrste drveta: neojačani, ojačani sa jednom, dve i tri karbonske trake), sa po tri uzorka u svakoj, je ispitano na savijanje. Posle ispitivanja rezultati su verifikovani kroz poređenje sa analitičkim proračunom.

Oblik loma za sve ispitane ojačane uzorke bio je lom usled savijanja, praćen u nekim slučajevima delaminacijom ili pucanjem CFRP ojačanja. Poređenje ponašanja neojačanih i ojačanih uzoraka je pokazalo da se sa primenom ojačanja nosivost i krutost povećavaju. Povećanje graničnog opterećenja bilo je u skladu sa brojem karbonskih traka u preseku i iznosilo je 44-58%, odnosno 39-61%, zavisno od vrste drveta. Sa druge strane, kao posledica povećanja krutosti, ugib u sredini se smanjivao kako se broj karbonskih traka u preseku povećavao.

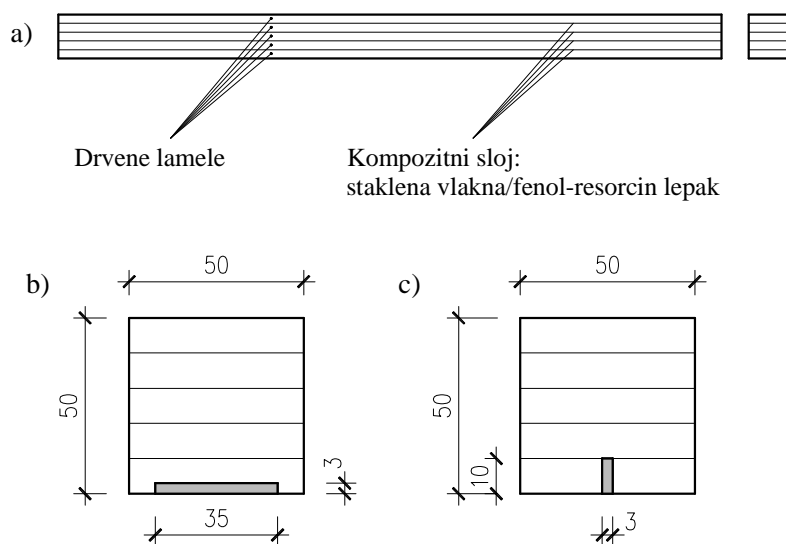
Predmet istraživanja Ribeiro i grupe autora (2009) [52] bio je razvoj novih proizvoda na bazi lepljenog lameliranog drveta. Prvi razmatrani proizvod je zasnovan na konceptu lameliranog drvenog kompozita sa staklenim vlaknima, dok je drugi proizvod baziran na konceptu primene traka na bazi staklenih vlakana zalepljenih u zategnutoj zoni lepljenog lameliranog drvenog elementa. Za oba proizvoda korišćene su borove drvene lamele i fenol-resorcin lepak. Četiri različite serije ojačanih greda je ispitano (slika 4.15):

- Serija LW1: lepljeno lamelirano drvo sa jednim slojem staklenih vlakana, u formi dva snopa, između drvenih lamela;
- Serija LW2: lepljeno lamelirano drvo sa dva sloja staklenih vlakana, u formi tri snopa, između drvenih lamela;
- Serija LWH: lepljeno lamelirano drvo sa horizontalnom GFRP trakom (3 x 35 mm) u zategnutoj zoni;
- Serija LWV: lepljeno lamelirano drvo sa vertikalnom GFRP trakom (3 x 10 mm) u zategnutoj zoni.

U cilju demonstracije potencijala greda ojačanih na predstavljeni način, izvršeno je i ispitivanje dve serije neojačanih greda:

- Serija SW: monolitno drvo;
- Serija LW: lepljeno lamelirano drvo.

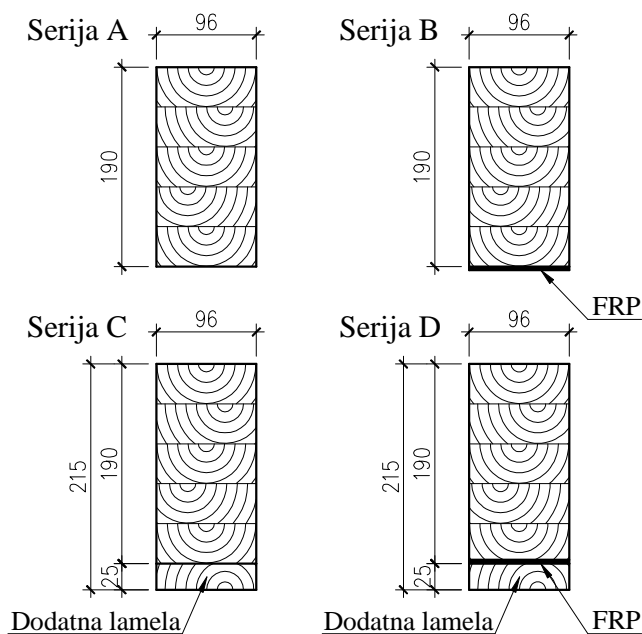
Svaka od šest serija je obuhvatila deset uzoraka (50 x 50 x 760 mm) ispitanih na savijanje.



Slika 4.15 - Šeme ojačanja ispitanih serija uzoraka: a) Serije LW1 i LW2;
b) Serija LWH; c) Serija LWV [52]

Generalno, kolaps greda kako neojačanih, tako i ojačanih izazvan je lomom drvenih lamela koje su najviše napregnute. Ni kod jednog od uzoraka sa staklenim vlaknima postavljenih između drvenih lamela nije primećena delaminacija. Određeni stepen delaminacije zabeležen je kod nekoliko uzoraka ojačanih trakama. Uzorci ojačani sa staklenim vlaknima pokazali su bolje mehaničke karakteristike nego uzorci bez ojačanja. Međutim, uvođenje ojačanja nije dovelo do značajnije redukcije u varijabilnosti rezultata u okviru pojedinačnih serija. Poredeći uzorke sa jednim i dva sloja staklenih vlakana (Serije LW1 i LW2), nije zabeleženo značajnije poboljšanje u mehaničkom ponašanju. S obzirom da za uzorke Serije LW2 treba tri puta više staklenih vlakana, ovaj proizvod nije zadovoljio. Za uzorke ojačane GFRP trakama (Serije LWH i LWV) poboljšanje karakteristika je verifikovano kroz poređenje sa gredama ojačanim staklenim vlaknima, nosivost se povećala za oko 20%, a krutost za oko 40%. Međutim,

lamelirani drveni kompoziti su pokazali veću duktilnost pri lomu nego proizvodi sa trakama. Poredeći međusobno uzorke ojačane sa horizontalnom odnosno vertikalnom trakom, bolje mehaničke karakteristike su zabeležene u slučaju horizontalnog ojačanja.



Slika 4.16 - Poprečni preseki uzoraka ispitanih serija [53]

Raftery i Harte (2010) [53, 54] su sproveli istraživanje ojačanja lepljenih lameliranih nosača od drveta lošijeg kvaliteta primenom FRP kompozita. Eksperimentalni program je obuhvatio ispitivanje na savijanje četiri serije lepljenih lameliranih nosača napravljenih od sitkanske smreke (slika 4.16):

- Serija A: nejačani nosači (6 uzoraka);
- Serija B: nosači sa FRP ojačanjem, postavljenim spolja sa donje (zategnute) strane (5 uzoraka);
- Serija C: nejačani nosači sa dodatnom drvenom lamelom sa zategnute strane u odnosu na nejačane nosače Serije A (10 uzoraka);
- Serija D: ojačani nosači sa dodatnom drvenom lamelom sa zategnute strane u odnosu na ojačane nosače Serije B, tako da je položaj FRP ojačanja unutar preseka nosača, između dve poslednje lamele u zategnutoj zoni (5 uzoraka).

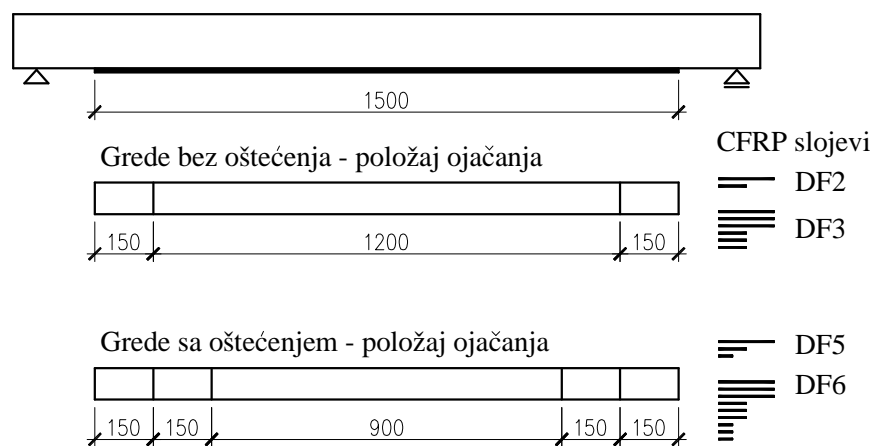
FRP ojačanje korišćeno u okviru ovog ispitivanja obuhvatilo je epoksidom spojene dve GFRP trake, širine 96 mm i debljine 1,2 mm, u formu trake ukupne debljine 2,8 mm.

Procenat ojačanja iznosio je približno 1,26% za nosače visine 190 mm i 1,12% za nosače visine 215 mm. Svi ispitani nosači su bili dužine 420 cm. Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata razvijen je numerički model sa ciljem simuliranja ponašanja neojačanih i ojačanih nosača.

Neojačani nosači su pokazali linearno-elastično ponašanje u poređenju sa pseudo-duktilnim ponašanjem ojačanih nosača. Strateško postavljanje ojačanja u zategnutoj zoni vodilo je ka pojavi plastifikacije pritisnutih vlakana u gornjim drvenim lamelama. Pojava plastifikacije je uvela značajnu duktilnost u ponašanje i omogućilo efikasnije iskorišćenje drveta kao materijala u pritisnutoj zoni. Ipak, zbog lošijeg kvaliteta upotrebljenog drveta, lom svih nosača nastao je usled zatezanja na mestu kvrga ili u čistom drvetu u donjem delu nosača. Kod svih uzoraka Serije D, sa ojačanjem između drvenih lamela, dogodio se lom u dve faze. Najpe se desio lom dodatne lamele, bez potpune delaminacije, kao rezultat prekomernih napona zatezanja, a zatim je sledio konačan lom u drvenim lamelama neposredno iznad ojačanja. Kod tri od pet nosača kapacitet nosivosti je ponovo dosegnut posle inicijalnog loma u dodatnoj drvenoj lameli. Poredeći neojačane i ojačane nosače zabeleženo je umereno poboljšanje krutosti i značano poboljšanje nosivosti. Posle dodavanja ojačanja sa zategnute strane nosača visine 195 mm krutost se povećala za 12,1%, a nosivost se povećala 38%. U slučaju kada je ojačanje postavljeno između drvenih lamela nosača visine 215 mm povećanje krutosti je iznosilo 10,1%, dok je povećanje nosivosti iznosilo 28,6%. Pored ovoga, zabeležena je redukcija varijabilnosti rezultata ojačanih nosača. Svi ovi parametri pokazali su sposobnost FRP trake da premosti lokane defekte prisutne u drvetu.

Kim i Harries (2010) [55] su sprovedli eksperimentalnu i numeričku analizu drvenih greda ojačanih CFRP kompozitima. Ekperimentalni program je obuhvatio šest drvenih greda (Duglasova jela) starih 38 godina, dimenzija 38 mm širine, 138 mm visine i 2690 mm dužine. U cilju simuliranja oštećenja greda, kod tri grede formiran je zasek na sredini raspona duž cele širine dimenzija 10 x 10 mm. Grede su ojačavane sa dva tipa CFRP kompozita: karbonskim trakama (16 mm širina x 2 mm debljina) i karbonskim tkaninama (35 mm širine x 0,165 mm debljine). Grede bez oštećenja ojačane su sa dva sloja karbonskih traka ili sa šest slojeva karbonskih tkanina, dok su oštećene grede imale tri sloja karbonskih traka ili devet slojeva karbonskih tkanina (slika 4.17). Kompozitni slojevi su smaknuto postavljeni tako da se redukuje

koncentracija napona na krajevima koja može izazvati delaminaciju. U cilju predviđanja ponašanja greda ojačanih CFRP kompozitima, razvijen je 3D model konačnih elementa. Kalibrisani model je upotrebljen za parametarsku studiju kojom je ispitan uticaj različitih karakteristika CFRP materijala na ponašanje greda od različitih vrsta drveta.

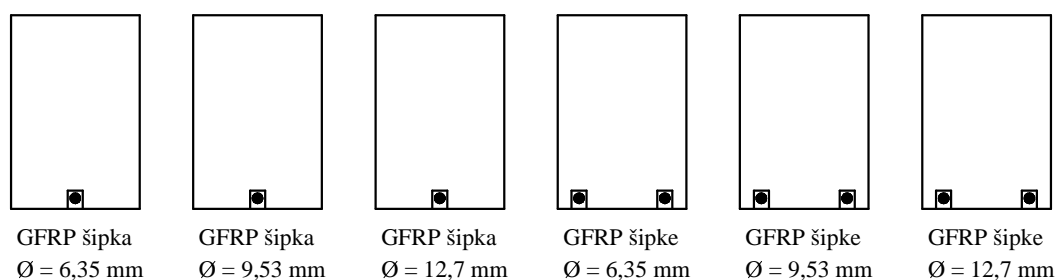


Slika 4.17 - Šeme ojačanja ispitanih uzoraka [55]

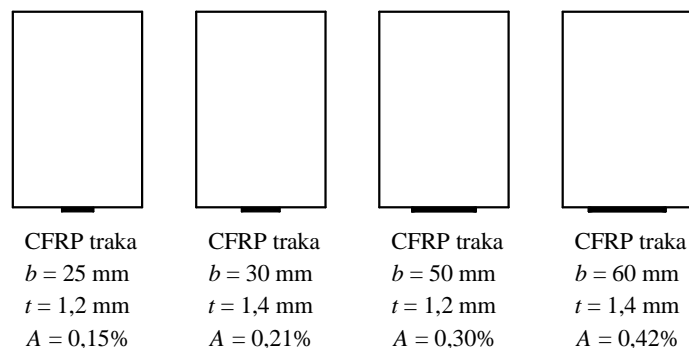
Lom svih ispitanih greda bio je krt. Koncentracija napona na mestu oštećenja je suštinski uticala na oblik loma i kapacitet nosivosti greda. Ojačavanjem se značajno povećao kapacitet drvenih greda od 33% do 184% poredeći sa neojačanim uzorcima. Kod ojačanih greda bez oštećenja zabeleženo je primetno poboljšanje krutosti na savijanje, dok se isto ne može reći za ojačane grede sa oštećenjem. Ojačani nosači sa oštećenjem pokazali su veće povećanje kapaciteta deformabilnosti nego oni bez oštećenja, poredeći sa neojačanim nosačima. Ovo ukazuje da se sa CFRP ojačanjem može efikasno poboljšati duktilnost oštećenih drvenih elemenata, pod uslovom da je obezbeđena adekvatna veza drvo-CFRP kompozit. Numeričkom analizom utvrđeno je da modul elastičnosti CFRP kompozita ne utiče značajno na granično opterećenje ojačanih drvenih greda, jer pojava lom pre svega zavisi od karakteristika drveta. Ipak, modul elastičnosti ojačanja utiče na oblik loma ojačanih nosača. Sa povećanjem procenta ojačanja, nosivost ojačanih greda se povećavala, ali to povećanje nije bilo proporcionalno. Za vrednosti procenta CFRP ojačanja koje su veće od 1,9% nije zabeleženo dalje povećanje nosivosti.

Ahmad (2010) [56] je istraživao ponašanje na savijanje greda od tropskog drveta (žuti meranti) kada su ojačane FRP kompozitima. Kao ojačanje korišćene su GFRP

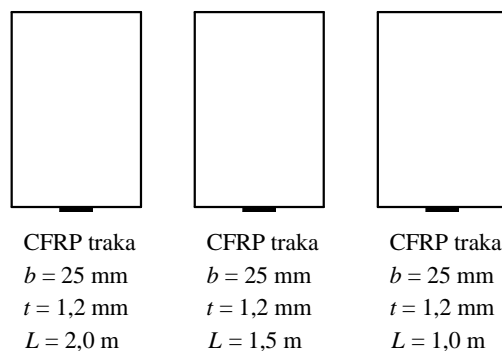
šipke i CFRP trake. Eksperimentani deo istraživanja obuhvatio je ispitivanje 28 greda, uključujući 2 neojačane, dimenzija 10 x 20x 300 cm. Ukupno 13 šema ojačanja je razmatrano, pri čemu su po dva uzorka ispitana u okviru svake serije. Šeme ojačanja primenom šipki na bazi staklenih vlakana obuhvatile su jednu ili dve šipke, različitog prečnika, postavljene u zategnutoj zoni grede (slika 4.18). Šeme ojačanja primenom traka na bazi karbonskih vlakana podrazumevale su jednu traku, različite površine i dužine, postavljenu na zategnutoj strani grede (slike 4.19 i 4.20).



Slika 4.18 - Poprečni preseki greda ojačanih GFRP šipkama [56]



Slika 4.19 - Poprečni preseki greda ojačanih CFRP trakama različite površine [56]



Slika 4.20 - Poprečni preseki greda ojačanih CFRP trakama različite dužine [56]

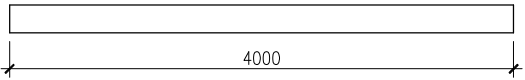
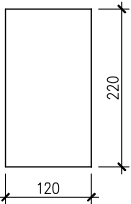
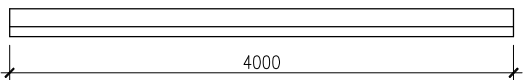
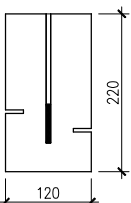
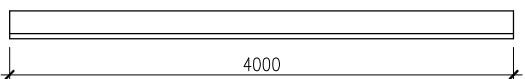
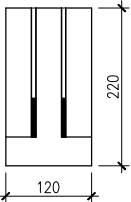
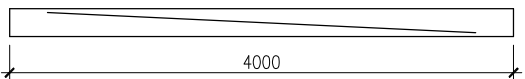
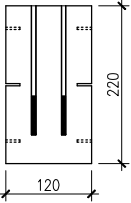
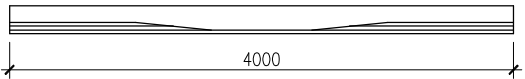
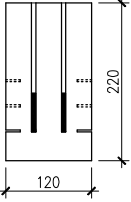
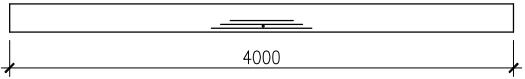
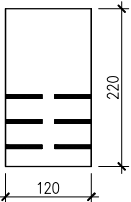
Sve ojačane grede pokazale su na početku ispitivanja linearno-elastično ponašanje, a sa porastom opterećanja nelinearno (plastično) ponašanje do pojave loma. Ojačane grede sa CFRP trakama pokazale su se duktilnijim i imale su manja oštećenja pri lomu u poređenju sa gredama ojačanim GFRP šipkama. Nosivost je povećana za 17,0-25,1% kada su grede ojačane šipkama sa procentom ojačanja 0,16-1,27%, dok je povećanje nosivosti iznosilo 31,8-44,5% za procenat ojačanja trakama 0,15-0,42%. Zabeleženo poboljšanje krutosti u slučaju primene šipki bilo je 24,0-64,4%, dok se krutost povećala 32,6-87,6% za slučaj ojačanja trakama. Osim ovoga, primena ojačanja vodila je ka smanjenju granične vrednosti dilatacije zatezanja i povećanju granične vrednosti dilatacije pritiska. Rezultati dobijeni za grede ojačane CFRP trakama su bili znatno ubedljiviji u poređenju sa gredama ojačanim GFRP šipkama. Primena traka ima tu prednost što je veća površina zaštićena. S druge strane, žljeb za postavljanje šipke znatno slabi drveni presek. Kada se analizira efekat dužine karbonske trake, može se zaključiti da duža traka vodi ka većoj nosivosti grede. Prema rezultatima ove analize, sidrenje karbonske trake na krajevima se ne zahteva ako je dužina trake veća od 2,0 m ili 2/3 dužine grede. Delaminacija trake će se javiti ako je njena dužina manja od 1,5 m ili polovine dužine grede. U tom slučaju, kapacitet nosivosti grede nije u potpunosti iskorišćen.

Henriquez i grupa autora (2010) [57] su svoje istraživanje fokusirali na proceni karakteristika nosivosti lepljenih lameliranih drvenih nosača ojačanih prednapregnutim GFRP trakama. Osim 15 prethodno napregnutih nosača, na savijanje je ispitano i po 15 neojačanih i konvencionalno ojačanih nosača. Svi nosači (Duglasova jela) su bili dimenzija poprečnog preseka 13 x 30,5 cm i dužine 6,7 m. Ove dimenzije su izabrane da bi se eliminisala potreba za razmatranjem redukcije nosivosti usled efekta veličine. Ojačanje je izvršeno GFRP trakama debljine 3,3 mm i širine 121 mm, postavljenim u zategnutoj zoni sa spoljašnje strane.

Lom lepljenih lameliranih nosača svih ispitanih grupa dogodio se u zategnutoj zoni, sa izuzetkom jednog prednapregnutog nosača kod koga se lom desio u pritisnutoj zoni. Prethodno naprezanje nosača sa 1% GFRP ojačanja na zategnutoj strani i silom prednaprezanja od 30% granične čvrstoće zatezanja GFRP materijala povećalo je nosivost za 95% u odnosu na neojačane uzorke i 38% u odnosu na nosače ojačane bez prethodnog naprezanja. Ojačani nosači su imali krutost za oko 8% veću od neojačanih

nosača. Krutost je približno ista kod svih nosača sa ojačanjem, što je i očekivano, jer je krutost funkcija modula elastičnosti drveta i GFRP materijala, i ne zavisi od prednapreznja.

Tabela 4.8 - Program eksperimentalnog istraživanja [59]

Test serija	Podužni izgled i opis	Poprečni presek
A, G	 <p>Seriya A - neojačane grede; sto godina staro drvo Seriya G - neojačane grede; novo drvo</p>	
B	 <p>Grede ojačane sa jednom karbonskom trakom vertikalno postavljenom celom dužinom; pukotine u drvetu simulirane nesimetričnim zasecima 4x25 mm celom dužinom.</p>	
C	 <p>Grede kod kojih je oštećeni deo uklonjen i zamenjen drvenim umetcima; dve karbonske trake postavljene vertikalno celom dužinom.</p>	
D	 <p>Grede ojačane sa dve karbonske trake vertikalno postavljene celom dužinom; pukotine u drvetu simulirane zasecima 3x20 mm sa obe strane.</p>	
E	 <p>Grede ojačane sa dve karbonske trake vertikalno postavljene celom dužinom; pukotine u drvetu simulirane sa tri zaseseka 3x20 mm sa obe strane.</p>	
F	 <p>Grede ojačane u zoni maksimalnog momenta savijanja sa tri horizontalno postavljene karbonske trake dužina 400, 500 i 600 mm; oštećenje zategnute zone simulirano rupom prečnika 25 mm.</p>	

Jankowski, Jasienko, Nowak i Czepizak (2010) [58, 59] su sproveli eksperimentalnu i numeričku analizu drvenih greda međuspratnih konstrukcija, oštećenih različitim uzrocima degradacije (biokorozija, vlaga, preopterećenje), ojačanih CFRP trakama. Ukupno 18 stogodišnjih drvenih greda (bor) svrstanih u šest serija (po tri grede u svakoj) i tri nove grede ispitane su na savijanje (tabela 4.8). Karbonske trake, debljine 1,2 mm i širine 50 mm, zalepljene su unutar poprečnog preseka epoksidnim lepkom.

Kod svih uzoraka lom se javio u zategnutoj zoni, u poprečnom preseku koji je sadržao neki vid defekta. Ni u jednom slučaju lom se nije dogodio kao rezultat popuštanja spoja drvo-traka. Povećanje kapaciteta nosivosti ispitanih ojačanih greda je značajno i iznosilo je od 21% za grede Serije F do 79,3% za grede Serije D. Relativno široko pružanje vrednosti graničnog opterećenja između pojedinačnih uzoraka zabeleženo je kod gotovo svih test serija, što je posledica građe drveta i prisutnih defekata. Ojačavanjem karbonskim trakama krutost na savijanje pri sili 10 kN (oko 1/3 graničnog opterećenja neojačanih nosača) se povećala od 14,6% za grede Serije F do 32,2% za grede Serije D u poređenju sa neojačanim gredama. Povećanje krutosti omogućilo je ojačanim gredama da graničnu vrednost ugiba dostignu pri većem opterećenju. Analizom merenih dilatacija je utvrđeno da ojačanje postavljeno vertikalno unutar preseka je iskorišćeno u malom stepenu (do 12%). U cilju boljeg iskorišćenja i bolje efikasnosti ojačanja predloženo je prednaprezanje. Međutim, ovo rešenje je teško primenljivo kod objekata od istorijskog značaja.

Fiorelli i Dias (2011) [60] su u okviru nastavka svog ranijeg istraživanja analizirali karakteristike nosača od lepljenog lameliranog drveta ojačanih GFRP trakama. Ispitano je šest nosača (bor) dimenzija 7x30x400 cm, od kojih je četiri ojačano trakama na bazi staklenih vlakana postavljenih unutar preseka, u zategnutoj zoni, između dve poslednje drvene lamele. Razmatana su dva procenta ojačanja: 1,2 i 3,3%.

Uvođenje GFRP ojačanja u zategnutu zonu nosača povećalo je nosivost i krutost, i to povećanje raste sa porastom procenta ojačanja. Ojačani nosači su pokazali dva nivoa loma. Prvi lom izazvan je zatezanjem u drvenoj lameli ispod ojačanja, dok se drugi (konačni) lom dogodio kao rezultat plastičnog tečenja na gornjoj strani nosača, praćen smičućim lomom na spoju drvo-ojačanje ili lomom usled zatezanja u drvetu neposredno iznad ojačanja.

Yahyei-Moayyed i Taheri (2011) [61] su sprovedli eksperimentalno i numeričko istraživanje ponašanja pri kratkotrajnom i dugotrajnom opterećenju drvenih greda ojačanih AFRP trakama. Eksperimentalno ispitivanje obuhvatilo je dve vrste drveta: bor (Serija SYP) i jela (Serija DF). Svi uzorci su bili kvadratnog poprečnog preseka 38x38 mm i dužine 500 mm. Trake na bazi aramidnih vlakana, debljine 1,12 mm, postavljene su na donjoj (zategnutoj) strani uzoraka. Osim ovoga, tri uzorka su bila ojačana AFRP trakom debljine 0,56 mm, u cilju poređenja uticaja procenta ojačanja na karakteristike ojačanih greda. Po šest uzoraka obe vrste drveta bilo je izloženo dugotrajnom opterećenju u periodu od nekoliko meseci.

Većina ojačanih uzoraka pokazala je sličano ponašanje, posle značajnog nivoa plastične deformacije sledio je iznenadan krt lom drveta u zategnutoj zoni. Lom u pritisnutoj zoni zabeležen je kod nekoliko uzoraka, pre svega kod Serije DF. Rezultati u okviru eksperimentalnog programa kratkotrajnog opterećenja pokazali su poboljšanje kapaciteta nosivosti ojačanih greda od 32% (Serija DF) do 74% (Serija SYP) u odnosu na neojačane uzorke. Povećanje krutosti iznosilo je 19% (Serija SYP) i 11% (Serija DF). Ovi rezultati su sugerisali da je uticaj ojačanja zanatno veći na nosivost nego na krutost. Povećanje procenta ojačanja vodilo je ka poboljšanju krutosti pri istom nivou opterećenja od 20%. Suprotno, kapacitet nosivosti se povećao svega za 9,5%, što je posledica dominantnog smičućeg loma na spoju drvo-AFRP ojačanje. Rezultati ispitivanja uzoraka posle izlaganja dugotrajnom opterećenju pokazali su da prisustvo AFRP ojačanja umanjuje ugib nastao usled tečenja drveta, posebno kod drvenih vrsta sa nižom krutošću.

Jesus, Pinto i Morais (2012) [62] su istraživali mehaničko ponašanje monolitnih drvenih greda ojačanih CFRP trakama različite dužine, koristeći eksperimentalni, numerički i analitički pristup. U okviru eksperimentalnog dela, sprovedeno je ispitivanje na savijanje tri test serije uzoraka (bor), dimenzija 50x50x760 mm. Ojačanje u okviru ove studije predstavljale su jednoaksijalne karbonske trake površine poprečnog preseka 1,2x50 mm. Jedna serija od ukupno 19 uzoraka je ispitana bez ikakvog ojačanja. Dve serije su ispitane sa ojačanjem od karbonskih traka, dužine 350 mm (18 uzoraka) i 600 mm (10 uzoraka), zalepljenih sa zategnute strane uzoraka. Na osnovu eksperimentalnih rezultata autori su razvili model konačnih elementa sa ciljem određivanja kontaktnih

napona na spoju drveta i ojačanja. Numerički rezultati razmatranih napona su upoređeni sa vrednostima dobijenim primenom odgovarajućih analitičkih modela datih u literaturi.

Analizirajući ponašanje opterećenje-ugib, uzorci test serije sa malom dužinom ojačanja su pokazali manju nelinearnost nego uzorci ostalih test serija. Tipičan oblik loma ojačanih uzoraka karakterisalo je iniciranje pukotine na mestu završetka ojačanja. Posle iniciranja u spoju drvo-traka pukotina se razvila u drvetu, usled čega je sledio konačan lom uzorka. Koncentracija napona na kraju ojačanja je odgovorna za nastajanje pukotine. Analiza rezultata pokazala je da uzorci ojačani sa CFRP trakama imaju veću krutost nego neojačani uzorci (23% više za ojačanje dužine 350 mm, 34% više za ojačanje dužine 600 mm). Uzorci ojačani sa trakama od 600 mm imali su beznačajno veću krutost (9%) kada se uporede sa trakama od 350 mm. U pogledu graničnog opterećenja, primena ojačanja dužine 350 mm vodila je ka neočekivanom smanjenju opterećenja pri lomu (-12%) u odnosu na neojačane uzorke, dok je primena ojačanja dužine 600 mm vodila ka povećanju graničnog opterećenja (28%). Upotreba CFRP ojačanja proizvodi koncentraciju napona na krajevima ojačanja, što može imati negativan uticaj na nosivost greda. Efekat dužine ojačanja na granično opterećenje demonstriran je redukcijom koncentracije kontaktnih napona sa povećanjem dužine ojačanja. U cilju poboljšanja poređenja mehaničkih karakteristika, dutilnost uzoraka je procenjena na osnovu koeficijenta duktilnosti, baziranog na vrednostima ugibu u sredini raspona. Izračunate vrednosti koeficijenta duktilnosti iznosile su 1,7, 1,0 i 2,0, redom za neojačane, ojačane na dužini 350 mm i ojačane na dužini 600 mm uzorake. Ove vrednosti su potvrdile da primena ojačanja nedovoljne dužine čini ojačane uzorke krutijim u odnosu na neojačane. Na drugoj strani, primena ojačanja dovoljne dužine povećava duktilnost ojačanih uzoraka u odnosu na neojačane.

5. PROGRAM EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA

Eksperimentalnim istraživanjima obuhvaćene su tri međusobno povezane grupe istraživanja:

- ispitivanje mehaničkih karakteristika upotrebljenih materijala (drveta, karbonske trake);
- ispitivanje karakteristika veze između drveta i karbonske trake ostvarene epoksidnim lepkom;
- ispitivanje nosača od lepljenog lameliranog drveta ojačanih karbonskim trakama za različite šeme ojačanja u okviru zategnute zone, kao i ispitivanje neojačanih nosača koji su poslužili kao reper za utvrđivanje efikasnosti intervencije.

Činjenica da u našoj zemlji nisu vršena nikakva eksperimentalna istraživanja drvenih nosača ojačanih karbonskim trakama podstakla je istraživanje sa ciljem utvrđivanja karakteristika i ponašanja ojačanih nosača, za različite nivoe opterećenja sve do loma. U tu svrhu izvršeno je ispitivanje na savijanje ukupno 31 nosača od lepljenog lameliranog drveta ojačanih karbonskim trakama. Šeme ojačanja obuhvatile su različiti položaj karbonskih traka u okviru poprečnog preseka (traka spolja ili unutra, horizontalno ili vertikalno postavljena) i različiti procenat ojačanja (jedna ili dve trake u preseku). Pored ojačanih ispitano je i 8 neojačanih (kontrolnih) nosača.

Posebna pažnja u ispitivanjima posvećena je analizi lepljenog spoja između drveta i karbonske trake. Od ponašanja spoja zavisi prenos opterećenja sa drveta na kompozitni materijal, odnosno iskorišćenost pojedinačnih materijala. Kvalitativna procena karakteristika spoja između drveta, epoksidnog lepka i karbonske trake izvršena je posebnim ispitivanjem.

Ispitivanje materijala je veoma važno u cilju razumevanja ponašanja pojedinačnih materijala pri opterećenju. Rezultati i opažanja iz ovih ispitivanja su od velike koristi pri proučavanju ponašanja kako neojačanih, tako i ojačanih nosača. Takođe, vrednosti karakteristika materijala su važne kao ulazni podaci za analitičku i numeričku analizu. Kada se ojačani nosači modeliraju, ispravan unos podataka treba da obezbedi tačnost rezultata.

5.1 Fizičke i mehaničke karakteristike upotrebljenih materijala

5.1.1 Fizičke i mehaničke karakteristike drveta

Nosači od lepljenog lameliranog drveta koji su korišćeni u ovim ispitivanjima izrađeni su od četinarske građe (smreka), vizuelno klasirane kao I klasa.

Ispitivanja fizičkih i mehaničkih karakteristika drveta urađena su u svemu prema važećim EN i ISO standardima, na malim „čistim“ uzorcima. Dobijene vrednosti su zatim posredstvom korekcionih faktora transformisane na vrednosti koje odgovaraju realnim drvenim presecima. Vrednosti modula elastičnosti, granične čvrstoće i graničnih dilatacija su glavni ulazni podaci u okviru analitičke i numeričke analize.

5.1.1.1 Određivanje vlažnosti drveta

Kako čvrstoća i zapreminska masa drveta variraju sa sadržajem vlage, neophodno je da vlažnost svakog uzorka bude poznata u vreme ispitivanja.

Prema ISO 3130 [63] merenje vlažnosti drveta se vrši postupkom merenja masa vlažnih i potpuno suvih uzoraka drveta, pri čemu se sušenje vrši na temperaturi 103 ± 2 C° do konstantne mase. Smatra se da je masa konstantna ako gubitak mase između dva uzastopna merenja u intervalu od 6h, iznosi od 0,5% mase uzorka ili manje. Uzorci za ispitivanje su najčešće kvadratnog poprečnog preseka 20x20 mm i dužine u pravcu vlakana 25 ± 5 mm. Vlažnost svakog uzorka se računa pomoću izraza:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100, \quad (5.1)$$

gde je

w - vlažnost uzorka u vreme ispitivanja, u %;

m_1 - masa uzorka pre sušenja, u g;

m_2 - masa uzorka posle sušenja, u g.

Međutim, obzirom na veliki broj i raznovrsnost uzoraka koji su obuhvaćeni ovim eksperimentalnim istraživanjem bilo je skoro nemoguće a i neracionalno za svaki uzorak odrediti vlažnost isušivanjem, odnosno procedurom koja je data u pomenutom standardu. Zbog toga je vlažnost uzoraka mehaničkih ispitivanja (zatezanje, pritisak, savijanje, smicanje) određena pomoću vlagomera. U tu svrhu korišćen je digitalni vlagomer tipa Gann Hydromette HTR 300, sa odgovarajućim elektrodama za drvo. Merenje vlažnosti pomoću ovog vlagomera zasniva se na principu električnog otpora.

5.1.1.2 Određivanje zapreminske mase drveta

Zapreminska masa drveta je određena u skladu sa standardom ISO 3131 [64]. Ukupno je ispitano 40 uzoraka dimenzija 20 x 20 x 25 mm. Uzorci su isečeni iz četiri nasumično izabrana nosača od lepljenog lameliranog drveta na najmanje 150 mm udelenosti od čela, neposredno nakon njihovog ispitivanja. Svi uzorci su bez kvrga, pukotina, smolnih džepova i drugih nepravilnosti koje mogu uticati na rezultate ispitivanja.

Masa uzorka je merena vagom sa tačnošću od 0,01 g. Za merenje dimenzija poprečnog preseka i dužine uzorka duž ose simetrije korišćeno je kljunasto merilo (nonijus) preciznosti 0,1 mm. Zapreminska masa svakog uzorka je izračunata prema izrazu:

$$r = \frac{m}{a \cdot b \cdot l}, \quad (5.2)$$

gde je m masa uzorka, a a , b i l su dimenzije uzorka. Pre ispitivanja uzorci su kondicionirani na temperaturi od 20 ± 2 C° i relativnoj vlažnosti vazduha od $65 \pm 5\%$ da bi se postigla ravnotežna vlažnost. Odmah nakon merenja mase i dimenzija, određena je vlažnost uzorka u skladu sa standardom ISO 3130.

Rezultati ispitivanja zapreminske mase, kao i vlažnosti drveta dati su u tabeli 5.1. Prosečna vrednost zapreminske mase drveta iznosila je 427 kg/m^3 , pri sadržaju vlage od 11,7 %.

Tabela 5.1 - Rezultati ispitivanja zapreminske mase drveta

Uzorak br.	Dimenzije uzorka (mm)			Masa uzorka (g)	Masa suvog uzorka (g)	Zapreminska masa (kg/m^3)	Sadržaj vlage (%)
	a	b	l				
1	20,3	20,3	25,4	4,56	4,09	437	11,5
2	20,3	20,0	25,3	4,20	3,77	409	11,3
3	20,4	20,2	25,4	4,25	3,82	408	11,3
4	20,4	20,2	25,3	4,61	4,13	444	11,8
5	20,1	20,1	25,4	4,35	3,90	426	11,6
6	19,7	20,0	24,4	4,61	4,12	483	11,9
7	20,1	20,1	25,4	4,20	3,77	411	11,4
8	20,1	20,2	25,4	4,14	3,73	402	11,2
9	20,4	20,4	25,4	4,72	4,23	448	11,6
10	20,4	20,2	25,3	4,35	3,89	417	11,8
11	20,2	19,9	25,3	4,77	4,26	470	11,9
12	20,3	20,3	25,5	4,67	4,19	446	11,5
13	20,2	20,3	25,5	4,88	4,37	468	11,7
14	20,3	20,3	25,3	4,35	3,89	419	11,8
15	20,3	20,4	25,3	4,67	4,18	447	11,6
16	20,0	20,3	25,4	4,25	3,80	413	11,7
17	20,4	20,3	25,2	4,40	3,95	425	11,5
18	19,9	20,4	25,4	4,61	4,12	450	12,0
19	20,2	20,4	25,5	4,93	4,39	470	12,2
20	20,1	20,1	25,2	4,04	3,62	399	11,4
21	20,4	19,8	25,4	4,14	3,71	406	11,6
22	20,3	20,2	25,3	4,35	3,90	420	11,7
23	20,2	20,3	25,4	4,51	4,03	435	11,9
24	19,7	20,3	25,4	4,09	3,67	404	11,6
25	20,3	20,4	25,5	4,35	3,89	414	11,9
26	20,0	19,6	25,2	3,93	3,53	401	11,5
27	20,4	20,2	25,4	4,46	3,99	428	11,7
28	20,0	20,1	25,5	4,67	4,17	457	11,8
29	20,3	20,3	25,2	4,25	3,82	411	11,3
30	20,3	20,2	25,4	4,56	4,08	440	11,8
31	20,2	20,3	25,3	4,25	3,81	410	11,6
32	19,7	19,6	25,3	4,11	3,68	422	11,8
33	20,2	20,3	25,3	4,30	3,85	417	11,7
34	20,1	20,1	25,3	4,25	3,81	418	11,5
35	20,3	20,1	25,2	4,46	3,98	435	11,9
36	20,2	20,2	25,2	4,09	3,67	400	11,4
37	20,3	20,3	25,4	4,35	3,90	418	11,6
38	19,9	20,3	25,5	4,20	3,77	407	11,4
39	19,8	20,3	25,2	4,14	3,71	410	11,7

Tabela 5.1 (Nastavak)

Uzorak br.	Dimenzije uzorka (mm)			Masa uzorka (g)	Masa suvog uzorka (g)	Zapreminska masa (kg/m ³)	Sadržaj vlage (%)
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>l</i>				
40	20,4	20,3	25,4	4,56	4,07	437	12,1
Srednja vrednost						427	11,7
Standardna devijacija						22	
Koeficijent varijacije						5,1	

5.1.1.3 Određivanje čvrstoće drveta na zatezanje paralelno vlaknima

Ispitivanje drveta na zatezanje paralelno vlaknima izvršeno je u skladu sa standardom EN 408 [65]. Ukupno je ispitano 20 uzoraka prizmatičnog oblika, kvadratnog poprečnog preseka sa ivicom od 20 mm i dužinom u pravcu vlakana od 300 mm. Po pet uzoraka je uzeto iz četiri nasumično izabrana nosača, neposredno nakon njihovog ispitivanja. Uzorci su isečeni na najmanje 150 mm od čela nosača. Dužina uzorka je određena iz uslova da minimalna dužina u okviru koje se vrši ispitivanje treba da bude devet puta veća od širine poprečnog preseka i uz uzimanje u obzir potrebne dužine sidrenja (dužina potrebna za pritezanje uzorka u mašini kojom se vrši ispitivanje). Pre ispitivanja uzorci su kondicionirani na temperaturi od 20 ± 2 C° i relativnoj vlažnosti vazduha od $65\pm 5\%$ da bi se postigla ravnotežna vlažnost. Priprema svih uzoraka je izvršena na Građevinskom fakultetu u Beogradu.

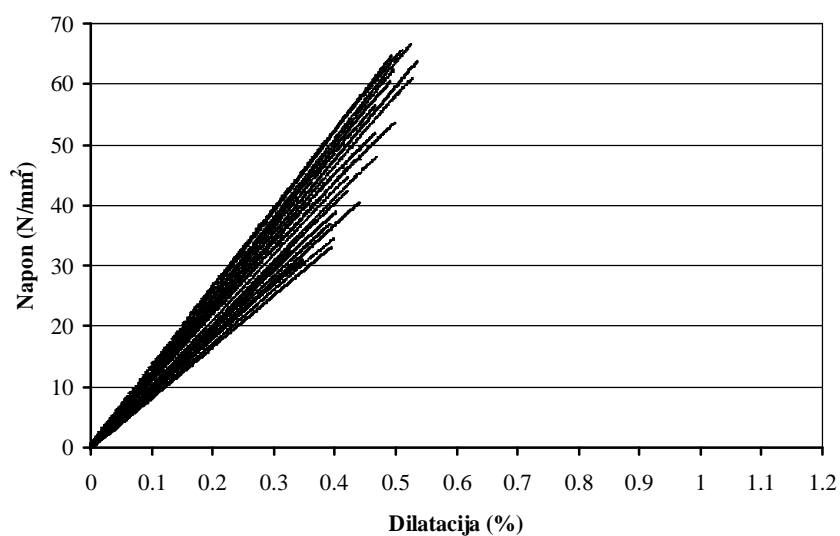
Ispitivanje je sprovedeno na Tehnološko-metalurškom fakultetu u Beogradu. Za ispitivanje je korišćena univerzalna test mašina Instron 1332, kapaciteta 100 kN (slika 5.1). Neposredno pre ispitivanja dimenzije uzorka su izmerene kljunastim merilom (nonijusom) preciznosti 0,1 mm. Posle postavljanja u vertikalni položaj u mašini, uzorak je ravnomerno pritegnut odgovarajućim bočnim pritiskom. Veoma je važno da vrednost bočnog pritiska bude odgovarajuća. Nizak bočni pritisak može dovesti do isklizavanja uzorka, dok visok bočni pritisak može dovesti do loma uzorka neposredno iznad zone pritezanja. U cilju merenja deformacija, postavljen je, u srednjem delu dužine uzorka, ekstenzometar sa mernom bazom od 50 mm. Ispitivanje je sprovedeno do loma sa kontrolisanom brzinom pomeranja od 0,25 mm/min, tako da se maksimalno opterećenje dostigne unutar 300 ± 120 s. Registrovanje podataka o opterećenju i deformacijama tokom ispitivanja obavljeno je uz pomoć akvizicionog sistema,

očitanjem instrumenata svakih 0,1 s. Odmah posle ispitivanja, sadržaj vlage u drvetu meren je pomoću digitalnog vlagomera.



Slika 5.1 - Ispitivanje uzoraka drveta na zatezanje paralelno vlaknima

Rezultati ispitivanja uzoraka drveta na zatezanje paralelno vlaknima, u vidu dijagrama napon-dilatacija, prikazani su na slici 5.2. Ponašanje svih uzoraka je linearno-elastično do loma. Lom uzoraka je izuzetno krt, bez ikakvih znakova plastičnog ponašanja. Na slici 5.3 prikazan je tipičan oblik loma ispitanih uzoraka.



Slika 5.2 - Dijagrami napon-dilatacija za drvo pri zatezanju paralelno vlaknima



Slika 5.3 - Tipičan oblik loma drvenih uzoraka pri zatezanju paralelno vlaknima

Detaljni rezultati ispitivanja za svaki ispitani uzorak dati su u tabeli 5.2. Tri parametra su važna u ovom ispitivanju: granična čvrstoća, granično istezanje i modul elastičnosti. Čvrstoća na zatezanje izračunata je kao napon koji izaziva maksimalna sila zatezanja pri lomu po jedinici prvobitne površine poprečnog preseka uzorka:

$$f_{t,0} = \frac{F_{\max}}{A}, \quad (5.3)$$

gde je:

$f_{t,0}$ - čvrstoća drveta na zatezanje paralelno vlaknima, u N/mm^2 (MPa);

F_{\max} - maksimalna sila zatezanja, u N;

A - površina poprečnog preseka uzorka, u mm^2 .

Granično istezanje (istezanje pri lomu) uzeto je kao dilatacija koja odgovara graničnoj čvrstoći na zatezanje. Početni nagib dijagrama napon-dilatacija predstavlja modul elastičnosti. Modul elastičnosti je izračunat prema izrazu:

$$E_{t,0} = \frac{l_1(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)}, \quad (5.4)$$

gde je:

$E_{t,0}$ - modul elastičnosti drveta pri zatezanju paralelno vlaknima, u N/mm^2 (MPa);

F_1 - sila zatezanja koja odgovara vrednosti 10% maksimalne sile ($0,1 F_{\max}$), u N;

F_2 - sila zatezanja koja odgovara vrednosti 40% maksimalne sile ($0,4 F_{\max}$), u N;

w_1 - promena merne dužine, u mm, merena za vrednost sile F_1 ;

w_2 - promena merene dužine, merena za vrednost sile F_2 ;

l_1 - merna baza ekstenzometra, u mm;

A - površina poprečnog preseka uzorka, u mm^2 .

Tabela 5.2 - Rezultati ispitivanja čvrstoće drveta na zatezanje paralelno vlaknima

Uzorak br.	Dimenzije uzorka		Granična sila (kN)	Čvrstoća na zatezanje (N/mm^2)	Istezanje pri lomu (%)	Modul elastičnosti (N/mm^2)	Sadržaj vlage (%)
	Širina (mm)	Visina (mm)					
1	19,9	19,7	20,50	52,3	4,68	10398	10,8
2	19,4	19,7	23,85	62,4	5,35	12213	11,3
3	19,7	19,8	13,46	34,5	3,98	9957	11,2
4	19,7	19,7	12,61	32,5	3,32	8781	11,3
5	19,8	19,7	24,89	63,8	5,11	12438	11,2
6	19,8	19,9	14,54	36,9	3,92	9541	11,1
7	19,8	19,9	23,84	60,5	4,91	11690	10,9
8	19,7	19,5	25,62	66,7	5,26	12637	11,5
9	19,7	19,8	22,00	56,4	4,66	11453	11,1
10	20,0	19,7	15,29	38,8	4,03	9614	10,9
11	19,7	19,7	18,08	46,6	4,69	10176	11,1
12	19,8	19,7	17,47	44,8	4,23	10082	11,2
13	19,9	19,7	15,88	40,5	4,41	9751	11,4
14	19,8	19,5	24,98	64,7	4,94	12587	11,4
15	19,8	19,8	13,02	33,2	3,94	9005	11,2
16	19,8	19,9	16,67	42,3	4,21	9197	10,9
17	19,7	19,9	21,05	53,7	5,00	11085	11,5
18	19,8	19,7	23,99	61,5	4,95	12289	11,2
19	19,9	19,8	24,04	61,0	5,27	11884	11,3
20	19,7	19,6	12,01	31,1	3,49	8557	10,8
Srednja vrednost				49,2	4,52	10667	11,2
Standardna devijacija				12,4	0,60	1383	
Koeficijent varijacije (%)				25,2	13,4	13,0	

Srednja vrednost čvrstoće na zatezanje paralelno vlaknima iznosila je 49,2 MPa, sa koeficijentom varijacije 25,2%. Za izduženje pri lomu, merena srednja vrednost bila je 4,52%, pri čemu je koeficijent varijacije iznosio 13,4%. Srednja vrednost modula elastičnosti iznosila je 10667 MPa, sa koeficijentom varijacije 13,0%. S obzirom na prirodu drveta kao materijala, visoke vrednosti koeficijenta varijacije su očekivane. Zabeležena prosečna vrednost vlažnosti uzoraka iznosila je 11,2%.

Dobijene vrednosti predstavljaju karakteristike pri zatezanju malih „čistih“ drvenih uzoraka i kao takve ne odgovaraju karakteristikama konstrukcijskog drveta

realnih dimenzija. Čvrstoća na zatezanje konstrukcijskog drveta može se odrediti na osnovu čvrstoće na zatezanje određene na malim uzorcima drveta i korekcionih faktora kojima se uzima u obzir veličina uzorka. U okviru ovog istraživanja, u skladu sa EN 384 [66] i EN 1194 [21] korišćeni su sledeći korekциони faktori čvrstoće na zatezanje:

$$\text{za širinu uzorka: } f_t = (b/150)^{0,2} f_{t, \text{test}}, \quad (5.5)$$

$$\text{za dužinu uzorka: } f_t = (l/9 \cdot 150)^{0,1} f_{t, \text{test}}, \quad (5.6)$$

gde je:

f_t - čvrstoća na zatezanje konstrukcijskog drveta, u MPa;

$f_{t, \text{test}}$ - čvrstoća na zatezanje određena na malim „čistim“ uzorcima drveta, u MPa;

b - širina poprečnog preseka ispitanog uzorka, u mm;

l - dužina ispitanog uzorka, u mm.

Vrednost 150 koja figuriše u izrazima (5.5)-(5.6) predstavlja referentnu širinu poprečnog preseka uzoraka, u mm. Inače, pod širinom se smatra veća dimenzija poprečnog preseka uzorka. Primenom datih korekcionih koeficijenata dobijena čvrstoća konstrukcijskog drveta na zatezanje paralelno vlaknima je 27,8 MPa.

5.1.1.4 Određivanje čvrstoće drveta na pritisak paralelno vlaknima

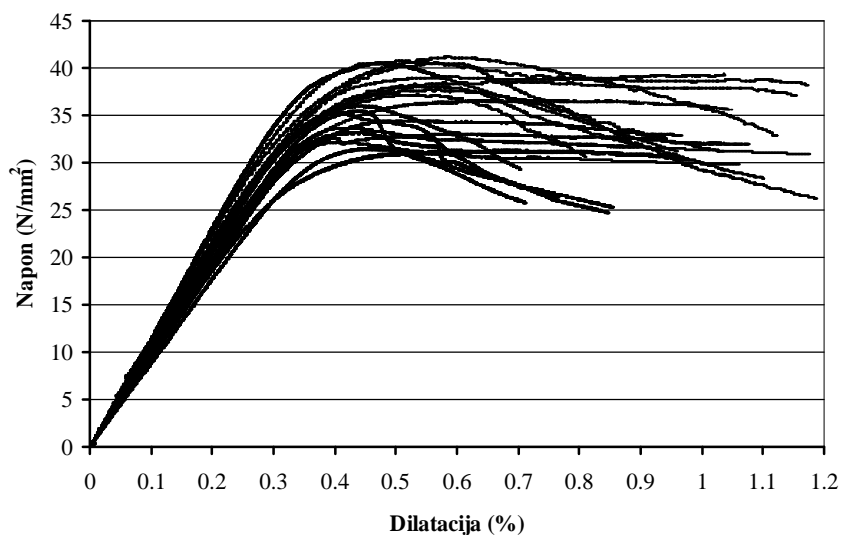
Ispitivanje drveta na pritisak paralelno vlaknima izvršeno je u skladu sa standardom EN 408 [65]. Ukupno je ispitano 20 uzoraka prizmatičnog oblika, kvadratnog poprečnog preseka sa ivicom od 20 mm i dužinom u pravcu vlakana od 120 mm. Po pet uzoraka je uzeto iz četiri nasumično izabrana nosača, neposredno nakon njihovog ispitivanja. Uzorci su isečeni na najmanje 150 mm od čela nosača. Dužina uzoraka je određena iz uslova po kom dužina treba da bude jednaka šest puta manja dimenzija poprečnog preseka. Prilikom izrade uzoraka posebno je vođeno računa da sve strane budu upravne jedna na drugu, sa ravnim i glatkim površinama, a oštrim i neoštećenim ivicama. Pre ispitivanja uzorci su kondicionirani na temperaturi od 20 ± 2 °C i relativnoj vlažnosti vazduha od $65 \pm 5\%$ da bi se postigla ravnotežna vlažnost. Priprema svih uzoraka je izvršena na Građevinskom fakultetu u Beogradu.

Ispitivanje je sprovedeno na Tehnološko-metalurškom fakultetu u Beogradu. Za ispitivanje je korišćena univerzalna test mašina Instron 1332, kapaciteta 100 kN (slika 5.4). Neposredno pre ispitivanja dimenzije uzoraka su izmerene kljunastim merilom (nonijusom) preciznosti 0,1 mm. Uzorci su centrično postavljeni između, praktično, dve čelične ploče tako da sila pritiska za sve vreme ispitivanja bude upravna na površine uzoraka. U cilju merenja deformacija, postavljen je, u srednjem delu dužine uzorka, ekstenzometar sa mernom bazom od 50 mm. Ispitivanje je sprovedeno do loma sa kontrolisanom brzinom pomeranja od 0,5 mm/min, tako da se maksimalno opterećenje dostigne unutar 300 ± 120 s. Registrovanje podataka o opterećenju i deformacijama tokom ispitivanja obavljeno je uz pomoć akvizicionog sistema, očitavanjem instrumenata svakih 0,1 s. Odmah posle ispitivanja, sadržaj vlage u drvetu meren je pomoću digitalnog vlagomera.



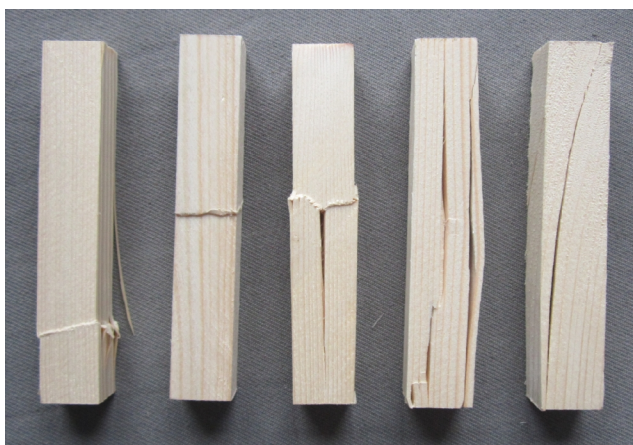
Slika 5.4 - Ispitivanje uzoraka drveta na pritisak paralelno vlaknima

Rezultati ispitivanja uzoraka drveta na zatezanje paralelno vlaknima, u vidu dijagrama napon-dilatacija, prikazani su na slici 5.5. Svi uzorci su pokazali isto početno linearno-elastično ponašanje drveta do tačke proporcionalnosti. Posle ove tačke, drvo nastavlja gotovo elastično ponašanje do dostizanja maksimalnog napona pritiska pri kome vlakna počinju da se zbijaju, a zatim sledi plastično ponašanje pri kome dilatacije pritiska rapidno rastu bez povećanja napona.



Slika 5.5 - Dijagrami napon-dilatacija za drvo pri pritisku paralelno vlaknima

Kod većine ispitanih uzoraka zabeležen je oblik loma sa izraženim zbijanjem vlakana i ovo je tipičan oblik loma za četinarsku građu. Karakteristični oblici loma drveta pri pritisku paralelno vlaknima prikazani su na slici 5.6.



Slika 5.6 - Karakteristični oblici loma drvenih uzoraka pri pritisku paralelno vlaknima

Detaljni rezultati ispitivanja za svaki ispitani uzorak dati su u tabeli 5.3. Tri parametra su važna u ovom ispitivanju: granična čvrstoća, dilatacija pri lomu i modul elastičnosti. Čvrstoća na pritisak izračunata je kao napon koji izaziva maksimalna sila pritiska po jedinici prvobitne površine poprečnog preseka uzorka:

$$f_{c,0} = \frac{F_{\max}}{A}, \quad (5.7)$$

gde je:

$f_{c,0}$ - čvrstoća drveta na pritisak paralelno vlaknima, u N/mm^2 (MPa);

F_{\max} - maksimalna sila pritiska, u N;

A - površina poprečnog preseka uzorka, u mm^2 .

Početni nagib dijagrama napon-dilatacija predstavlja modul elastičnosti. Modul elastičnosti je izračunat prema izrazu:

$$E_{c,0} = \frac{l_1 (F_2 - F_1)}{A (w_2 - w_1)}, \quad (5.8)$$

gde je:

$E_{c,0}$ - modul elastičnosti drveta pri zatezanju paralelno vlaknima, u N/mm^2 (MPa);

F_1 - sila pritiska koja odgovara vrednosti 10% maksimalne sile ($0,1 F_{\max}$), u N;

F_2 - sila pritiska koja odgovara vrednosti 40% maksimalne sile ($0,4 F_{\max}$), u N;

w_1 - promena merne dužine, u mm, merena za vrednost sile F_1 ;

w_2 - promena merene dužine, merena za vrednost sile F_2 ;

l_1 - merna baza ekstenzometra, u mm;

A - površina poprečnog preseka uzorka, u mm^2 .

Tabela 5.3 - Rezultati ispitivanja čvrstoće drveta na pritisak paralelno vlaknima

Uzorak br.	Dimenzije uzorka		Maksimalna sila (kN)	Čvrstoća na pritisak (N/mm^2)	Dilatacija pri lomu (%)	Modul elastičnosti (N/mm^2)	Sadržaj vlage (%)
	Širina (mm)	Visina (mm)					
1	19,9	19,7	13,92	35,5	7,12	9682	11,6
2	19,4	19,9	14,90	38,6	11,55	10709	11,3
3	20,0	20,2	16,64	41,2	11,22	11012	10,7
4	20,0	20,1	15,72	39,1	11,75	10619	11,5
5	19,6	19,8	12,50	32,2	10,61	9390	11,0
6	18,8	19,9	12,61	33,7	11,77	9815	10,8
7	20,0	19,9	16,24	40,8	10,39	11095	11,6
8	20,0	19,7	14,66	37,2	8,12	10264	10,9
9	20,0	20,0	15,08	37,7	11,88	10498	11,8
10	20,0	20,0	13,28	33,2	7,65	9304	10,9
11	19,8	19,8	15,88	40,5	9,60	11219	11,4
12	20,1	20,0	13,79	34,3	8,49	9597	11,2
13	19,9	19,8	12,41	31,5	8,56	9055	11,6
14	20,0	19,8	14,53	36,7	10,51	10386	11,2
15	19,9	20,1	16,19	40,5	10,35	10889	11,4

Tabela 5.3 (Nastavak)

Uzorak br.	Dimenzije uzorka		Maksimalna sila (kN)	Čvrstoća na pritisak (N/mm ²)	Dilatacija pri lomu (%)	Modul elastičnosti (N/mm ²)	Sadržaj vlage (%)
	Širina (mm)	Visina (mm)					
16	20,2	20,8	16,01	38,1	11,01	10817	11,5
17	20,1	19,7	13,12	33,1	10,77	9472	11,1
18	20,0	19,5	13,77	35,3	9,68	9930	11,4
19	19,7	20,1	12,41	31,3	9,78	9179	11,2
20	19,9	19,9	14,30	36,1	7,06	10055	11,6
Srednja vrednost				36,3	9,89	10149	11,3
Standardna devijacija				3,2	1,56	691	
Koeficijent varijacije (%)				8,8	15,8	6,8	

Srednja vrednost čvrstoće na pritisak paralelno vlaknima iznosila je 36,3 MPa, sa koeficijentom varijacije 8,8%. U slučaju dilatacije pri lomu, merena srednja vrednost bila je 9,89%, pri čemu je koeficijent varijacije iznosio 15,8%. Srednja vrednost modula elastičnosti iznosila je 10149 MPa, sa koeficijentom varijacije 6,8%. Zabeležena prosečna vrednost vlažnosti uzoraka iznosila je 11,3%.

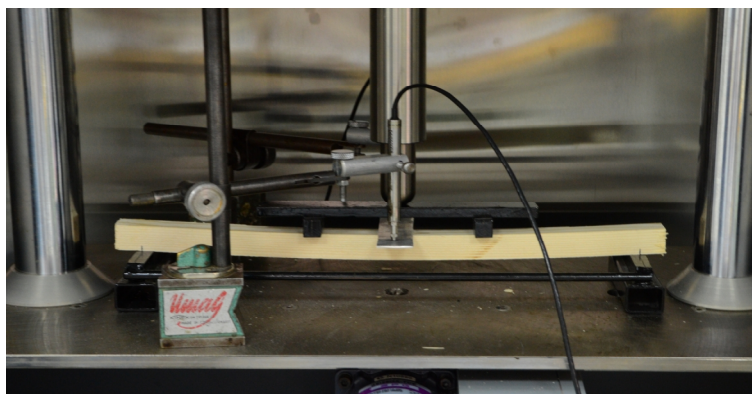
Dobijene vrednosti predstavljaju karakteristike pri pritisku malih „čistih“ drvenih uzoraka. Kako efekat veličine nije izražen kod elemenata izloženih pritisku, ove vrednosti se mogu koristiti i za konstrukcijsko drvo.

5.1.1.5 Određivanje čvrstoće drveta na savijanje

Ispitivanje drveta na savijanje izvršeno je u skladu sa standardom EN 408 [65]. Prema datom standardu uzorci se ispituju kao proste grede opterećene sa dve koncentrisane sile u trećinama raspona. Ovakvim rasporedom opterećenja u srednjoj trećini raspona javlja se konstantan moment savijanja, bez transverzalne sile. Ukupno je ispitano 20 uzoraka prizmatičnog oblika, kvadratnog poprečnog preseka sa ivicom od 20 mm i dužinom u pravcu vlakana od 400 mm. Po pet uzoraka je uzeto iz četiri nasumično izabrana nosača, neposredno nakon njihovog ispitivanja. Uzorci su isečeni na najmanje 150 mm od čela nosača. Dužina uzoraka je određena iz uslova da minimalna dužina treba da bude 19 puta visina poprečnog preseka. Prilikom izrade uzoraka posebno je vođeno računa da sve strane budu upravne jedna na drugu, sa ravnim i glatkim površinama, a oštrim i neoštećenim ivicama. Pre ispitivanja uzorci su kondicionirani na temperaturi od 20 ± 2 C° i relativnoj vlažnosti vazduha od 65 ± 5 % da bi

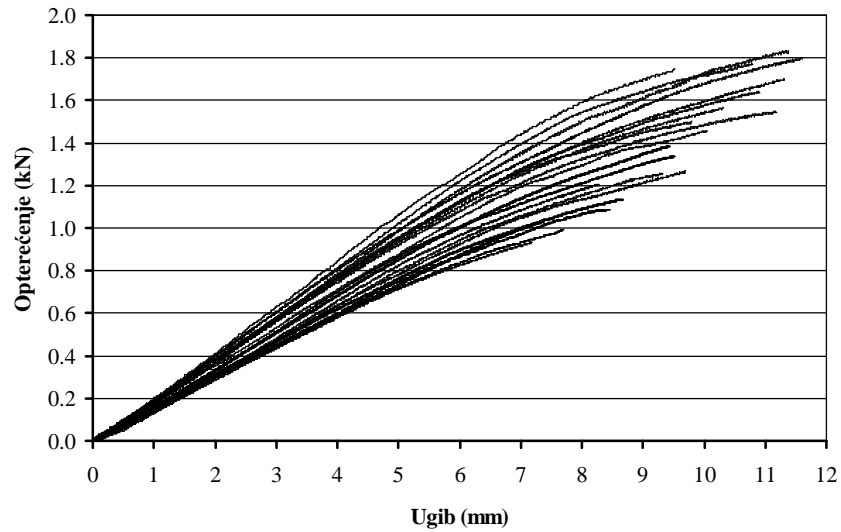
se postigla ravnotežna vlažnost. Priprema svih uzoraka je izvršena na Građevinskom fakultetu u Beogradu.

Ispitivanje je sprovedeno u Laboratoriji za kolovozne konstrukcije Građevinskog fakulteta u Beogradu. Za ispitivanje je korišćena univerzalna test mašina UTM 25 IPC Global, kapaciteta 25 kN (slika 5.7). Pre početka ispitivanja dimenzije uzoraka su izmerene kljunastim merilom (nonijusom) preciznosti 0,1 mm. Širina je merena u tangencijalnom, a visina u radijalnom pravcu. Uzorci su postavljeni na improvizovane oslonce, tako da raspon bude jednak 18 puta visina poprečnog preseka. U eksperimentalnoj proceduri, opterećenje je transformisano sa jedne na dve koncentrisane sile primenom krutog čeličnog elementa. Ugib je meren u sredini pomoću dva induktivna ugibomera. Ispitivanje je sprovedeno do loma sa kontrolisanom brzinom pomeranja od 2,0 mm/min, tako da se maksimalno opterećenje dostigne unutar 300 ± 120 s. Registrovanje podataka o opterećenju i deformacijama tokom ispitivanja obavljeno je uz pomoć akvizicionog sistema, očitavanjem instrumenata svakih 0,1 s. Neposredno posle ispitivanja, sadržaj vlage u drvetu meren je pomoću digitalnog vlagomera.



Slika 5.7 - Ispitivanje uzoraka drveta na savijanje

Dijagrami opterećenje-ugib u sredini za sve ispitane uzorke prikazani su na slici 5.8. Svi uzorci su pokazali slično ponašanje. Linearan deo dijagrama ukazuje da se drvo ponaša elastično do određenog nivoa opterećenja. Posle toga, sledi nelinearan deo gde drvo pokazuje određeni stepen plastičnog ponašanja. Lom svih uzoraka desio se u zategnutoj zoni, unutar srednje trećine raspona. Na slici 5.9 prikazan je tipičan oblik loma ispitanih uzoraka.



Slika 5.8 - Dijagrami opterećenje-ugib za drvo pri savijanju



Slika 5.9 - Tipičan oblik loma drvenih uzoraka pri savijanju

Detaljni rezultati ispitivanja za svaki ispitani uzorak dati su u tabeli 5.4. Dva parametra su važna u ovom ispitivanju: granična čvrstoća i modul elastičnosti. Čvrstoća na savijanje izračunata je kao napon koji izaziva maksimalni moment savijanja:

$$f_m = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{F_{\max} \cdot l}{bh^2}, \quad (5.9)$$

gde je:

f_m - čvrstoća drveta na savijanje, u N/mm^2 (MPa);

M_{\max} - maksimalni moment savijanja, u Nmm;

W - otporni moment preseka, u mm^3 ;

F_{\max} - maksimalna sila aplicirana test mašinom, u N;

l - razmak oslonaca uzorka, u mm;

b - širina poprečnog preseka uzorka, u mm;

h - visina poprečnog preseka uzorka, u mm.

Modul elastičnosti je izračunat prema izrazu:

$$E_m = \frac{23}{648} \frac{(F_2 - F_1)l^3}{2(w_2 - w_1)I} = \frac{23}{108} \frac{(F_2 - F_1)l^3}{(w_2 - w_1)bh^3}, \quad (5.10)$$

gde je:

E_m - modul elastičnosti drveta pri savijanju, u N/mm^2 (MPa);

F_1 - sila koja odgovara vrednosti 10% maksimalne sile ($0,1 F_{\max}$), u N;

F_2 - sila koja odgovara vrednosti 40% maksimalne sile ($0,4 F_{\max}$), u N;

w_1 - ugib u sredini uzorka, u mm, meren za vrednost sile F_1 ;

w_2 - ugib u sredini uzorka, u mm, meren za vrednost sile F_2 ;

l - rastojanje oslonaca uzorka, u mm;

I - moment inercije poprečnog preseka uzorka, u mm^4 ;

b - širina poprečnog preseka uzorka, u mm;

h - visina poprečnog preseka uzorka, u mm.

Tabela 5.4 - Rezultati ispitivanja čvrstoće drveta na savijanje

Uzorak br.	Dimenzije uzorka		Maksimalna sila (kN)	Čvrstoća na savijanje (N/mm^2)	Modul elastičnosti (N/mm^2)	Sadržaj vlage (%)
	Širina (mm)	Visina (mm)				
1	19,9	20,1	1,679	75,2	11926	10,9
2	19,9	20,1	0,994	44,5	9546	11,1
3	19,8	20,0	1,460	66,4	10962	10,9
4	20,1	20,2	1,583	69,5	12143	11,4
5	20,1	20,0	1,747	78,2	13076	10,8
6	20,0	19,8	1,038	47,7	8838	11,2
7	20,0	20,0	1,468	66,1	11675	11,1
8	20,2	20,1	1,794	79,1	13322	11,3
9	19,9	20,0	1,833	82,9	12514	11,5
10	19,8	20,0	0,932	42,4	9313	11,4
11	20,0	19,9	1,386	63,0	10725	11,5
12	19,9	20,0	1,259	56,9	9792	11,5
13	19,8	20,1	1,193	53,7	10521	10,9
14	19,9	20,1	1,338	59,9	11293	11,3

Tabela 5.4 (Nastavak)

Uzorak br.	Dimenzije uzorka		Maksimalna sila (kN)	Čvrstoća na savijanje (N/mm ²)	Modul elastičnosti (N/mm ²)	Sadržaj vlage (%)
	Širina (mm)	Visina (mm)				
15	20,0	19,9	1,888	85,8	12859	11,2
16	19,9	19,9	1,543	70,5	11434	11,3
17	19,8	20,0	1,086	49,4	9061	10,8
18	20,0	19,9	1,267	57,6	10224	11,2
19	19,9	20,1	1,135	50,8	10018	11,0
20	20,0	20,2	1,637	72,2	12358	11,2
Srednja vrednost				63,6	11080	11,2
Standardna devijacija				13,1	1391	
Koeficijent varijacije (%)				20,6	12,6	

Srednja vrednost čvrstoće na savijanje iznosila je 63,6 MPa, sa koeficijentom varijacije 20,6%. U slučaju modula elastičnosti, srednja vrednost iznosila je 11080, pri čemu je koeficijent varijacije iznosio 12,6%. Zabeležena prosečna vrednost vlažnosti uzoraka iznosila je 11,2%.

Dobijene vrednosti predstavljaju karakteristike pri savijanju malih „čistih“ drvenih uzoraka i kao takve ne odgovaraju karakteristikama konstrukcijskog drveta realnih dimenzija. Čvrstoća na savijanje konstrukcijskog drveta može se odrediti na osnovu čvrstoće na savijanje određene na malim uzorcima drveta i korekcionih faktora kojima se uzima u obzir veličina uzorka. U okviru ovog istraživanja, u skladu sa EN 384 [66] korišćen je sledeći korekcioni faktor čvrstoće na savijanje:

$$\text{za visinu uzorka: } f_m = (h/150)^{0,2} f_{m,test}, \quad (5.11)$$

gde je:

f_m - čvrstoća na savijanje konstrukcijskog drveta, u MPa;

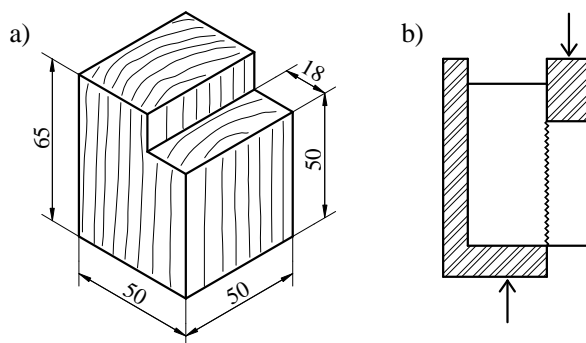
$f_{m,test}$ - čvrstoća na savijanje određena na malim „čistim“ uzorcima drveta, u MPa;

h - visina poprečnog preseka ispitanog uzorka, u mm.

Vrednost 150 koja figuriše u izrazu (5.11) predstavlja referentnu visinu poprečnog preseka uzoraka, u mm. Primenom datog korekcionog koeficijenta dobijena čvrstoća konstrukcijskog drveta na savijanje je 42,5 MPa.

5.1.1.6 Određivanje čvrstoće drveta na smicanje paralelno vlaknima

Zbog komplikovanosti eksperimentalne procedure prema EN 408 [65], ispitivanje na smicanje paralelno vlaknima je izvršeno u skladu sa standardom SRPS D.A1.053 [67]. Isti postupak je dat i u standardu ASTM D143-09 [68]. Prema ovim standardima ispitivanje se sprovodi na uzorcima oblika zasečenog kvadra tako što se silom pritiska preko pritiskivača deluje u ravni smicanja uzorka (slika 5.10). Nedostatak ove dispozicije ispitivanja je što se pored smičućih napona javljaja i napon zatezanja upravno na vlakna, što u nekoj meri utiče na rezultate.

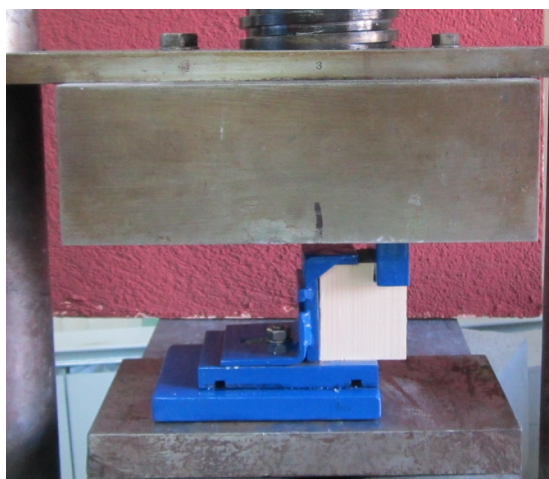


Slika 5.10 - Ispitivanje drveta na smicanje paralelno vlaknima: a) uzorak; b) dispozicija

Ukupno je ispitano 20 uzoraka uzetih iz četiri nasumično izabrana nosača (po pet iz svakog), neposredno nakon njihovog ispitivanja. Uzorci su isečeni tako da se smicanje dogodi po tangencijalnoj površini. Prilikom izrade uzoraka posebno je vođeno računa da sve strane budu upravne jedna na drugu, sa ravnim i glatkim površinama, a oštrim i neoštećenim ivicama. Pre ispitivanja uzorci su kondicionirani na temperaturi od 20 ± 2 C° i relativnoj vlažnosti vazduha od $65 \pm 5\%$ da bi se postigla ravnotežna vlažnost. Priprema svih uzoraka je izvršena na Građevinskom fakultetu u Beogradu.

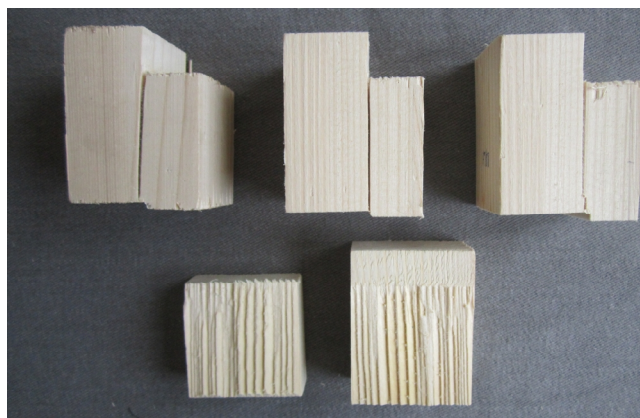
Ispitivanje je sprovedeno u Laboratoriji za ispitivanje materijala Građevinskog fakulteta u Beogradu. Za ispitivanje je korišćena hidraulička presa Amsler, kapaciteta 250 kN (slika 5.11). Pre ispitivanja dimenzije smičuće površine u ravni smicanja su izmerene kljunastim merilom (nonijusom) preciznosti 0,1 mm. Uzorci su postavljeni u specijalno izrađen alat za ovaj tip ispitivanja, a silom pritiska se delovalo preko pritiskivača mase 0,6 kg. Ispitivanje je sprovedeno do loma sa kontrolisanom brzinom

nanošenja sile, tako da do smicanja dođe u vremenu od 1,5 do 2 min. U trenutku loma maksimalna sila je očitana sa tačnošću 0,1 kN. Odmah posle ispitivanja, sadržaj vlage u drvetu meren je pomoću digitalnog vlagomera.



Slika 5.11 - Ispitivanje uzoraka drveta na smicanje paralelno vlaknima

Kod svih uzoraka dogodio se lom po očekivanoj ravni smicanja. Na slici 5.12 prikazan je tipičan oblik loma ispitanih uzoraka.



Slika 5.12 - Tipičan oblik loma drvenih uzoraka pri smicanju paralelno vlaknima

Vrednosti eksperimentalno dobijenih čvrstoća ispitanih uzoraka na smicanje paralelno vlaknima date su tabeli 5.5. Čvrstoća na smicanje je određena kao napon koji izaziva maksimalna sila pritiska po jedinici površine smicanja prema izrazu:

$$f_v = \frac{F_{\max}}{A}, \quad (5.12)$$

gde je:

f_v - čvrstoća drveta na smicanje paralelno vlaknima, u N/mm² (MPa);

F_{\max} - maksimalna sila pritiska, u N;

A - površina po kojoj se događa smicanje, u mm².

Tabela 5.5 - Rezultati ispitivanja čvrstoće drveta na smicanje paralelno vlaknima

Uzorak br.	Površina smicanja		Maksimalna sila (kN)	Čvrstoća na smicanje (N/mm ²)	Sadržaj vlage (%)
	Širina (mm)	Dužina (mm)			
1	50,8	50,2	16,2	6,4	11,3
2	50,7	50,1	15,5	6,1	11,5
3	50,5	50,1	17,5	6,9	11,2
4	50,6	50,1	15,4	6,1	11,0
5	50,0	50,3	15,1	6,0	11,3
6	51,0	50,3	16,3	6,4	11,2
7	50,7	50,3	16,5	6,5	10,9
8	51,1	50,0	16,2	6,3	11,2
9	51,1	50,5	14,8	5,7	10,8
10	50,9	50,1	16,0	6,3	11,3
11	50,2	50,0	14,4	5,7	11,4
12	50,7	50,7	13,2	5,1	11,4
13	50,8	50,4	15,8	6,2	11,6
14	50,4	50,4	17,4	6,8	11,8
15	51,1	50,5	14,6	5,7	11,4
16	50,9	50,4	16,2	6,3	11,6
17	50,7	50,7	12,3	4,8	11,4
18	50,6	50,3	15,3	6,0	11,5
19	50,7	50,6	16,3	6,4	11,7
20	50,8	49,9	16,8	6,6	11,5
Srednja vrednost				6,1	11,4
Standardna devijacija				0,62	
Koeficijent varijacije (%)				10,2	

Srednja vrednost čvrstoće na smicanje paralelno vlaknima iznosila je 6,1 MPa, sa koeficijentom varijacije 10,2%. Zabeležena prosečna vrednost vlažnosti uzoraka iznosila je 11,4%.

5.1.2 Fizičke i mehaničke karakteristike FRP kompozita

Za ojačanje nosača od lepljenog lameliranog drveta u okviru ovog istraživanja korišćeni su CFRP kompoziti u formi traka i tkanina. Proizvođač ovih proizvoda je „Sika“ (Švajcarska), kompanija koja ima značajno iskustvo u oblasti ojačanja i sanacije građevinskih konstrukcija.

Kao primarno ojačanje nosača upotrebljene su karbonske trake pod oznakom Sika CarboDur S613, širine 60 mm i debljine 1,3 mm. Sika CarboDur trake predstavljaju polimere armirane karbonskim vlaknima sa epoksidnom matricom, a koriste se za ojačanje betonskih, zidanih i drvenih konstrukcija. Reč je monoaksijalnim trakama sačinjenim od vlakana koja se pružaju samo u podužnom pravcu, pri čemu je zapreminski udeo suvih vlakana minimum 68%. Zapreminska masa ovih ojačanja je $1,6 \text{ g/cm}^3$. U tabeli 5.6 su prikazane mehaničke karakteristike Sika CarboDur traka date od strane proizvođača. Mehaničke vrednosti su dobijene za longitudinalni pravac vlakana.

Tabela 5.6 - Mehaničke karakteristike Sika CarboDur traka
(prema tehničkom listu proizvođača [69])

Tip	Čvrstoća na zatezanje (N/mm^2)	Istezanje pri lomu (%)	Modul elastičnosti (N/mm^2)
XS	2200	1,2	165000
S	2800	1,7	165000
M	2900	1,35	21000
H	1350	0,45	30000

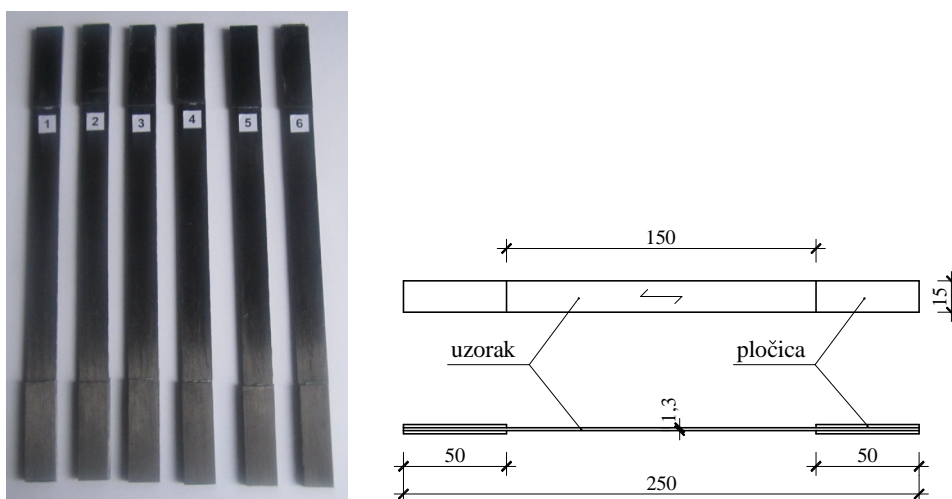
Pored karbonskih traka jedna serija nosača ojačana je dodatno karbonskim tkaninama pod oznakom SikaWrap-230 C, širine 30 cm. SikaWrap je jednosmerna pletena tkanina sa karbonskim vlaknima za suhu primenu. S obzirom da je reč o proizvodu bez prisustva vezivne supstance, vlakna čine 99% ukupne težine. Debljina tkanina, bazirano na sadržaju vlakana, iznosi 0,131 mm, dok je površinska masa $230 \pm 10 \text{ g/m}^2$. Zapreminski sadržaj vlakana je $1,76 \text{ g/cm}^3$. Mehaničke karakteristike suvih karbonskih vlakna, kao i impregnirane tkanine lepkom (Sikadur 330) u laminat debljine 1mm su date u tabeli 5.7.

Tabela 5.7 - Mehaničke karakteristike karbonskih vlakana i SikaWrap-230 C tkanine
(prema tehničkom listu proizvođača [70])

Karbonska vlakna			Impregnirana tkanina	
Čvrstoća na zatezanje (N/mm ²)	Istezanje pri lomu (%)	Modul elastičnosti (N/mm ²)	Granično opterećenje (kN/m' širine)	Modul elastičnosti (kN/mm ²)
4300	1,8	238000	350	28,0

5.1.2.1 Određivanje čvrstoće karbonske trake na zatezanje

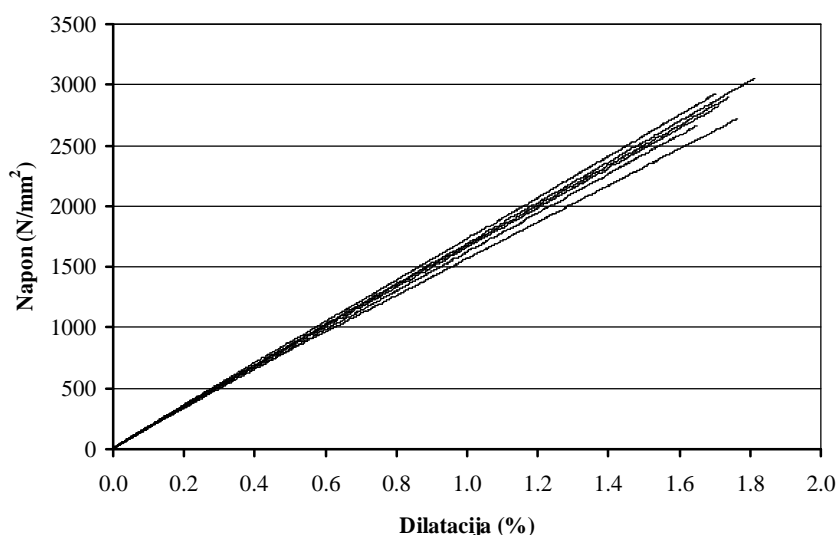
Ispitivanje karbonske trake Sika CarboDur S613 na zatezanje izvršeno je u skladu sa standardom EN 527-5 [71]. Ukupno je ispitano 6 uzoraka prizmatičnog oblika, pravougaonog poprečnog preseka širine 15 mm i debljine 1,3 mm, i dužine u pravcu vlakana od 250 mm. Ukupna dužina uzorka određena je na osnovu dužine u okviru koje se vrši ispitivanje (150 mm) i dužine potrebne za njeno sidereenje, odnosno dužine potrebne za pritezanje u mašini kojom se vrši ispitivanje (2 x 50 mm). Dužina pritezanja je određena tako da tokom testa zatezanja uzorak ne pukne ili ne isklizne u zoni pritezanja. Kao ojačanje u zoni pritezanja, na krajevima uzorka, korišćene su pločice od CFRP materijala dužine 50 mm i širine 15 mm (slika 5.13). Povezivanje ovih pločica za uzorke ostvareno je epoksidnim lepkom. Pre nanošenja lepka, površine koje se lepe pažljivo su očišćene rastvaračem Sika Colma Cleaner, kako bi se skinula sva nečistoća.



Slika 5.13 - Uzorci za ispitivanje karbonske trake na zatezanje

Posle nanošenja lepka na pločice i traku, pločice su postavljene na odgovarajuća mesta i uzorci su pritegnuti na krajevima odgovarajućim pritiskom tako da debljina lepka bude konstantna. Posebna pažnja je obraćena na kvalitet lepljenog spoja, kao i da ojačani krajevi budu identični sa obe strane trake. Uzorci su tako koncipirani da je omogućeno unošenje aksijalnog opterećenja, bez efekta torzije i savijanja. Priprema svih uzoraka izvršena je na Građevinskom fakultetu u Beogradu.

Ispitivanje je sprovedeno na Tehnološko-metalurškom fakultetu u Beogradu. Za ispitivanje je korišćena univerzalna test mašina Instron 1332, kapaciteta 100 kN (slika 5.14). Pre ispitivanja dimenzije poprečnog preseka uzoraka izmerene su kljunastim merilom (nonijusom) preciznosti 0,01 mm. Posle postavljanja u vertikalni položaj u mašini, uzorak je ravnomerno pritegnut odgovarajućim bočnim pritiskom. U cilju merenja istezanja, postavljen je, u srednjem delu dužine uzorka, ekstenzometar sa mernom bazom od 50 mm. Ispitivanje je sprovedeno do loma sa kontrolisanom brzinom pomeranja od 2 mm/min. Registrovanje merenih podataka obavljeno je uz pomoć akvizicionog sistema, očitavanjem instrumenata svakih 0,1 s .



Slika 5.15 - Dijagrami napon-dilatacija za uzorke karbonske trake pri zatezanju

Rezultati ispitivanja uzoraka karbonske trake na zatezanje, u vidu dijagrama napon-dilatacija, prikazani su na slici 5.15. Ponašanje svih uzoraka je linearno elastično do loma. Usled krтости karbonske trake, svim uzorcima se dogodio iznenadni lom neposredno po dostizanju granične čvrstoće na zatezanje. Lom uzoraka je nastao usled

pucanja vlakana i cepanja duž granične površine između vlakana i matrice u pravcu paralelnom sa vlaknima. Tipičan oblik krtoq loma prikazan je na slici 5.16. Generalno, lom svih uzoraka dogodio se unutar srednje zone, što ukazuje da nije došlo do klizanja na mestima pritezanja traka u mašini za ispitivanje. Na osnovu ovoga može se zaključiti da je primenjena tehnika ojačanja na krajevima uzoraka uspešna.



5.16 - Tipičan oblik loma uzoraka karbonske trake pri zatezanju

Detaljni rezultati za svaki ispitani uzorak dati su u tabeli 5.8. Tri parametra su važna u ovom ispitivanju: granična čvrstoća, granično istežanje i modul elastičnosti. Čvrstoća na zatezanje izračunata je kao napon koji izaziva maksimalna sila zatezanja pri lomu po jedinici površine poprečnog preseka uzorka:

$$f_t = \frac{F_{\max}}{A}, \quad (5.13)$$

gde je:

f_t - čvrstoća karbonske trake na zatezanje, u N/mm^2 (MPa);

F_{\max} - maksimalna sila zatezanja, u N;

A - površina poprečnog preseka uzorka, u mm.

Granično istežanje (istežanje pri lomu) uzeto je kao dilatacija koja odgovara graničnoj čvrstoći na zatezanje. Početni nagib dijagrama napon-dilatacija predstavlja modul elastičnosti trake. Prema standardu EN 527-5 nagib je definisan referentnim tačkama na dijagramu koje odgovaraju vrednostima dilatacija od 0,0005 (0,05%) i 0,0025 (0,25%). S obzirom da su date vrednosti dilatacija mnogo male u odnosu na vrednosti graničnih dilatacija dobijenih ispitivanjem, za potrebe izračunavanja modula elastičnosti u okviru ovog istraživanja je usvojeno da referentne tačke odgovaraju vrednostima dilatacija od

0,001 (0,1%) i 0,005 (0,5%). Modul elastičnosti izračunat je kao odnos razlike napona i razlike odgovarajućih dilatacija:

$$E_t = \frac{S_2 - S_1}{e_2 - e_1}, \quad (5.14)$$

gde je:

E_t - modul elastičnosti karbonske trake, u N/mm^2 (MPa);

S_1 - napon, u N/mm^2 , meren za vrednost dilatacije $e_1 = 0,001$;

S_2 - napon, u N/mm^2 , meren za vrednost dilatacije $e_2 = 0,005$.

Tabela 5.8 - Rezultati ispitivanja karbonske trake na zatezanje

Uzorak br.	Dimenzije uzorka		Granična sila (kN)	Čvrstoća na zatezanje (N/mm^2)	Istezanje pri lomu (%)	Modul elastičnosti (N/mm^2)
	Debljina (mm)	Širina (mm)				
1	1,3	15,42	56,57	2822	1,71	166019
2	1,3	14,80	56,28	2925	1,70	173005
3	1,3	15,45	53,49	2663	1,65	162382
4	1,3	15,40	58,01	2897	1,74	167149
5	1,3	15,30	54,03	2717	1,76	155610
6	1,3	15,25	60,50	3052	1,81	169095
Srednja vrednost				2846	1,73	165543
Standardna devijacija				143	0,06	5996
Koficijent varijacije (%)				5,0	3,2	3,6

Srednja vrednost čvrstoće na zatezanje iznosila je 2846 MPa, sa koeficijentom varijacije 5,0%. Za izduženje pri lomu, merena srednja vrednost bila je 1,73%, pri čemu je koeficijent varijacije iznosio 3,2%. Srednja vrednost modula elastičnosti iznosila je 165543 MPa, sa koeficijentom varijacije 3,6%. Nizak koeficijent varijacije je rezultat proizvodnje karbonskih traka u fabrički kontrolisanim uslovima, sa vrlo precizno definisanom tolerancijom u odnosu na mehaničke karakteristike.

U tabeli 5.9 prikazano je poređenje eksperimentalnih rezultata i vrednosti datih od strane proizvođača. Generalno, eksperimentalni rezultati čvrstoće na zatezanje, modula elastičnosti i istežanja pri lomu su bliski deklarisanim vrednostima od strane proizvođača.

Tabela 5.9 - Poređenje eksperimentalnih rezultata sa vrednostima datim u tehničkom listu proizvođača

Eksperimentalni rezultati			Proizvođač - Sika		
Čvrstoća na zatezanje (N/mm ²)	Istezanje pri lomu (%)	Modul elastičnosti (N/mm ²)	Čvrstoća na zatezanje (N/mm ²)	Istezanje pri lomu (%)	Modul elastičnosti (N/mm ²)
2846	1,73	165543	2800	1,7	165000

5.1.3 Fizičke i mehaničke karakteristike epoksidnog lepka

Povezivanje karbonskih traka i tkanina za nosače od lepljenog lameliranog drveta ostvareno je pomoću epoksidnih lepkova. U okviru ovog istraživanja korišćena su dva lepka Sikadur-30 i Sikadur-330, proizvođača „Sika“.

Osnovne prednosti ovih lepkova su: lakoća mešanja i nanošenja, nije potreban osnovni sloj (prajmer), tolerantnost na vlagu u toku očvršćavanja, visoke mehaničke karakteristike, odlično prijanjanje za različite podloge, velika otpornost na abraziju i udare.

Sikadur-30 je dvokomponentni, tiksotropni, epoksidni lepak bez sadržaja rastvarača predviđen za korišćenje na „normalnim“ temperaturama između +8°C i +35°C. Preporučuje se za lepljenje karbonskih traka za beton, opeku ili drvo, kao i za lepljenje čeličnih ploča za beton. Mešanjem komponente A (smola) i komponente B (očvršćivač) u odnosu 3:1 po težini ili zapremini, lepak je spreman za upotrebu. U tabeli 5.10 su prikazane neke od tehničkih karakteristike lepka Sikadur 30 date od strane proizvođača.

Sikadur-330 je dvokomponentni, tiksotropni, epoksidni lepak bez sadržaja rastvarača namenjen za lepljenje i impregnaciju karbonskih traka i tkanina. Osnovna primena ovog lepka je impregnacija SikaWrap tkanina prilikom primene „suvog“ postupka ugradnje. Lepak je predviđen za korišćenje na „normalnim“ temperaturama između +10°C i +35°C. Mešanjem komponente A (smola) i komponente B (očvršćivač) u odnosu 4:1 po težini, lepak je spreman za upotrebu. U tabeli 5.11 su prikazane neke od tehničkih karakteristike lepka Sikadur 330 date od strane proizvođača.

Tabela 5.10 - Karakteristike lepka Sikadur-30

(prema tehničkom listu proizvođača [72])

Karakteristika	Vrednost
Gustina (na 23°C)	1,65±0,1 kg/l
Čvrstoća na pritisak (nakon 7 dana, na 10°C)	70-80 N/mm ²
Čvrstoća na pritisak (nakon 7 dana, na 35°C)	85-95 N/mm ²
Čvrstoća na smicanje (nakon 7 dana, na 15°C)	14-17 N/mm ²
Čvrstoća na smicanje (nakon 7 dana, na 35°C)	16-19 N/mm ²
Čvrstoća na zatezanje (nakon 7 dana, na 10°C)	24-27 N/mm ²
Čvrstoća na zatezanje (nakon 7 dana, na 35°C)	26-31 N/mm ²
Modul elastičnosti pri savijanju (nakon 7 dana, na 23°C)	12800 N/mm ²
Skupljanje	0,04%
Koeficijent termičkog širenja (-10°C do 40 °C)	9x10 ⁻⁵ 1/°C
„Radno vreme“ (na 20°)	90 min
„Radno vreme“ (na 35°)	40 min
„Otvoreno vreme“ (na 20°C)	110 min
„Otvoreno vreme“ (na 35°)	30 min

Tabela 5.11 - Karakteristike lepka Sikadur-330

(prema tehničkom listu proizvođača [73])

Karakteristika	Vrednost
Gustina (na 23°C)	1,31 kg/l
Čvrstoća na zatezanje (nakon 7 dana, na 23°C)	30 N/mm ²
Izduženje pri lomu (nakon 7 dana, na 23°C)	0,9 %
Modul elastičnosti pri zatezanju (nakon 7 dana, na 23°C)	4500 N/mm ²
Koeficijent termičkog širenja (-10°C do 40 °C)	45x10 ⁻⁶ 1/°C
„Radno vreme“ (na 10°)	90 min
„Radno vreme“ (na 35°)	30 min
„Otvoreno vreme“ (na 10°C)	60 min
„Otvoreno vreme“ (na 35°)	30 min

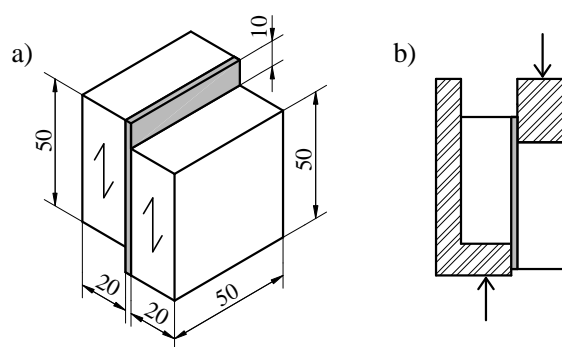
5.2 Ispitivanje karakteristika spoja drvo-karbonska traka

U kontekstu bilo koje tehnike ojačanja, ponašanje spoja je veoma važno pitanje, jer određuje karakteristike celokupnog sistema. Karakteristike spoja ne utiču samo na graničnu nosivost ojačanog elementa, nego i na neke aspekte upotrebljivosti, kao što su deformacije.

Ostvarivanje spoja lepljenjem je široko prihvaćeno kao efikasan metod za ravnomerno prenošenje napona smicanja između konstrukcijskih materijala i generalno se smatra kao najpogodnija tehnika povezivanja FRP ojačanja za konstrukcijske elemente. Kao što je ranije rečeno, najveću primenu imaju lepkovi na bazi epoksida. Međutim, epoksidni lepkovi su tek poslednjih godina primenjivani na drvo, stoga, samo ograničeno znanje je dostupno o kvalitetu formirane veze [74, 75].

5.2.1 Test smicanjem

Kvalitet spoja između drveta i karbonske trake procenjen je na osnovu ispitivanja na smicanje u skladu sa standardom ISO 6238 [76]. Ukupno 10 uzoraka, koji se sastoje od dva drvena komada između kojih je zalepljeno parče karbonske trake, ispitano je do loma na način što se silom pritiska preko pritiskivača delovalo u ravni spoja (slika 5.17). Drveni komadi su prizmatičnog oblika, pravougaonog poprečnog preseka širine 50 mm i debljine 20 mm, i dužine u pravcu vlakana od 50 mm. Svi drveni elementi su takvi da ne sadrže kvрге, pukotine, smolne džepove i druge neregularnosti koje mogu sprečiti formiranje kvalitetnog spoja. U okviru uzorka drveni komadi su postavljeni smaknuto za 10 mm. Prilikom izrade uzorka posebno je vođeno računa da sve strane budu upravne jedna na drugu, sa ravnim i glatkim površinama, a oštrim i neoštećenim ivicama.

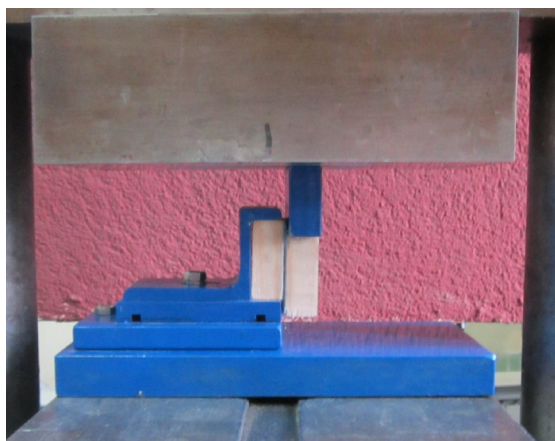


Slika 5.17 - Ispitivanje spoja drvo-FRP traka na smicanje: a) uzorak; b) dispozicija

Priprema površina koje se spajaju je veoma bitna za kvalitet ostvarenog lepljenog spoja. Drvene površine su obrađene blagim šmirglanjem, kako bi se uklonila

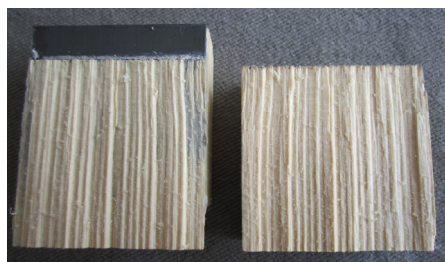
sva fizička i hemijska nečistoća koja može biti prisutna na površini drveta. Ovako tretirana površina omogućava nanošenje ravnomernog, tankog sloja lepka. Priprema karbonske trake podrazumevala je jedino proces brisanja (čišćenja) rastvaračem Sika Colma Cleaner, u cilju uklanjanja eventualne prljavštine i masnoće. Pošto su drvene površine pripremljene, na njih je nanesen sloj lepka Sikadur-30 u debljini oko 0,5 mm. Prilikom spajanja, isečeno parče karbonske trake Sika CarboDur S613 je najpre postavljeno na jedan drveni komad, a zatim je preko trake postavljen drugi drveni komad. Mada epoksidni lepkovi, generalno, ne zahtevaju pritiskanje, ravnomerni pritisak je primenjen u periodu od 24h, da se eliminišu eventualne šupljine i istisne sav višak lepka. Po oslobađanju od pritiska uzorci su do ispitivanja (min. 7 dana) kondicionirani na temperaturi od 20 ± 2 C° i relativnoj vlažnosti vazduha od $65\pm 5\%$. Priprema svih uzoraka je izvršena na Građevinskom fakultetu u Beogradu.

Ispitivanje je sprovedeno u Laboratoriji za ispitivanje materijala Građevinskog fakulteta u Beogradu. Za ispitivanje je korišćena hidraulička presa Amsler, kapaciteta 250 kN (slika 5.18). Pre ispitivanja dimenzije spojne površine u ravni smicanja su izmerene kljunastim merilom (nonijusom) preciznosti 0,1 mm. Uzorci su postavljeni u specijalno izrađeni alat za ovo ispitivanje, a silom pritiska se delovalo preko pritiskivača mase 0,6 kg. Ispitivanje je sprovedeno do loma sa kontrolisanom brzinom nanošenja sile, tako da do smicanja dođe u vremenu od 60 ± 20 s. U trenutku loma maksimalna sila je očitana sa tačnošću 0,1 kN. Neposredno posle ispitivanja, sadržaj vlage u drvetu meren je pomoću digitalnog vlagomera.



Slika 5.18 - Ispitivanje spoja drvo-karbonska traka na smicanje

Posle ispitivanja, vizuelna procena tipa loma svakog uzorka je izvršena da se utvrdi da li je lom po drvetu, lepku ili karbonskoj traci. U svim slučajevima, površina po kojoj se dogodio lom obuhvatila je drvenu podlogu, što pokazuje dobar kvalitet spoja ostvarenog epoksidnim lepkom. Tipičan oblik loma prikazan je na slici 5.19.



Slika 5.19 - Tipičan oblik loma pri ispitivanju na smicanje spoja drvo-karbonska traka

Tabela 5.12 - Rezultati ispitivanja spoja drvo-karbonska traka na smicanje

Uzorak br.	Površina smicanja		Maksimalna sila (kN)	Čvrstoća na smicanje (N/mm ²)	Sadržaj vlage (%)
	Širina (mm)	Dužina (mm)			
1	50,4	49,2	10,9	4,40	11,2
2	50,4	50,0	11,7	4,64	11,5
3	50,7	49,9	14,8	5,85	10,9
4	50,9	50,0	10,7	4,20	11,4
5	50,5	49,5	10,3	4,12	11,6
6	50,2	50,4	12,9	5,10	11,2
7	50,3	50,2	14,1	5,58	11,3
8	50,3	50,0	11,3	4,49	11,1
9	50,8	50,1	12,2	4,79	11,4
10	50,1	49,8	13,4	5,37	11,6
Srednja vrednost				4,86	11,3
Standardna devijacija				0,60	
Koeficijent varijacije (%)				12,3	

Vrednosti eksperimentalno dobijenih čvrstoća spoja na smicanje date su tabeli 5.12. Čvrstoća na smicanje je određena kao napon koji izaziva maksimalna sila pritiska po jedinici površine smicanja prema izrazu:

$$f_{gv} = \frac{F_{\max}}{A}, \quad (5.15)$$

gde je:

f_{gv} - čvrstoća spoja na smicanje, u N/mm² (MPa);

F_{\max} - maksimalna sila pritiska, u N;

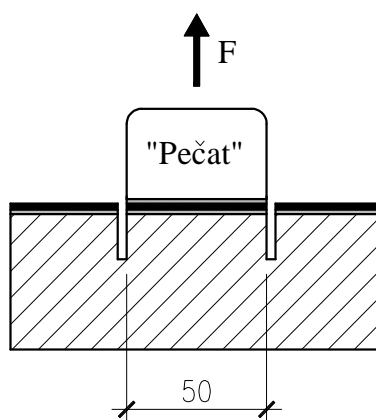
A - površina po kojoj se događa smicanje, u mm².

Primena datog izraza podrazumeva trenutni lom i jednako podeljenu raspodelu napona duž površine smicanja. Realnu raspodelu, ipak, karakteriše koncentracija napona na krajevima trake, kao i napon zatezanja upravno na površinu smicanja.

Srednja vrednost čvrstoće spoja na smicanje iznosila je 4,86 MPa, sa koeficijentom varijacije 12,3%. Zabeležena prosečna vrednost vlažnosti uzoraka iznosila je 11,3%.

5.2.2 Pull-off test

Procena kvaliteta ostvarene veze između drveta i karbonske trake na osnovu athezione čvrstoće na zatezanje izvršena je pull-off testom u skladu sa standardom EN 1542 [77]. Ispitivanje se sprovodi „otkidanjem“ metalnih „pečata“ (kruti element od čelika ili aluminijuma) prečnika Ø50 mm, koji se lepe preko zalepljene karbonske trake. Oko zalepljenog „pečata“ obavezno se izvodi zasek koji prolazi kroz traku i zalazi u dubinu drveta (obično 5-15 mm), tako da pri izlaganju „pečata“ sili zatezanja dolazi do otkidanja (slika 5.20). Ispitivanje je izvršeno na deset mesta u okviru dva uzorka nosača (po pet na svakom).

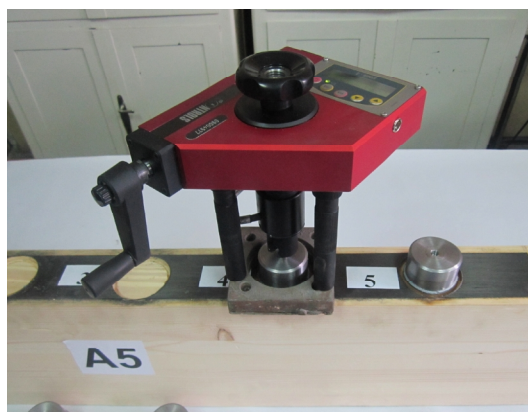


Slika 5.20 - Dispozicija ispitivanja spoja drvo-karbonska traka pull-off testom

Priprema drvene površine i karbonske trake, kao i lepljenje karbonske trake sprovedeno je po istom postupku koji se primenjuje prilikom ojačavanja nosača. Drvena

površina je pripremljena blagim šmirglanjem i usisavanjem, dok je karbonska traka pripremljena brisanjem rastvaračem Sika Colma Cleaner. Tanak sloj lepka Sikadur-30 nanešen je i na drvenu površinu i na karbonsku traku. Karbonska traka je zatim zalepljena za drvenu podlogu. Lepljenje karbonske trake je praćeno adekvatnim pritiskom gumenim valjkom sa ciljem da se ostvari što bolji kontakt i istisne sav suvišan lepak. Posle 24h izvedeni su zaseci i zalepljeni „pečati“ na mestima gde će spovesti ispitivanje. Pre ispitivanja uzorci su kondicionirani na temperaturi od 20 ± 2 C° i relativnoj vlažnosti vazduha od $65\pm 5\%$ da bi se postigla ravnotežna vlažnost u drvetu. Priprema svih uzoraka je izvršena na Građevinskom fakultetu u Beogradu.

Ispitivanje je sprovedeno u Laboratoriji za ispitivanje materijala Građevinskog fakulteta u Beogradu. Za ispitivanje je korišćen specijalni uređaj za ovaj tip ispitivanja Controls 58-C0215/T, kapaciteta 16 kN (slika 5.21). Povezivanje uređaja i „pečata“ ostvareno je pomoću zavrtnja. Prilikom ispitivanja posebno je obraćena pažnja da se uređaj ne pomera, kao i da se optrećenje nanosi u centar „pečata“ i pod uglom $90^{\circ}\pm 1$. Ispitivanje je sprovedeno do loma sa kontrolisanom brzinom nanošenja sile. U trenutku loma maksimalna sila je očitana sa tačnošću 0,001 kN. Odmah posle ispitivanja, sadržaj vlage u drvetu meren je pomoću digitalnog vlagomera.



Slika 5.21 - Ispitivanje spoja drvo-karbonska traka pull-off testom

Posle ispitivanja, vizuelna procena tipa loma na svakom ispitanom mestu je izvršena da se utvrdi da li je „otkidanje“ „pečata“ preko drveta, lepka ili karbonske trake. U svim slučajevima, površina loma je bila unutar drvenog preseka (slika 5.22). Na ovaj način ponovo je potvrđen dobar kvalitet spoja ostvarenog epoksidnim lepkom.



Slika 5.22 - Tipičan oblik loma pri ispitivanju spoja drvo-karbonska traka pull-off testom

Na bazi vrednosti zatežuće sile pri kojoj je došlo do „otkidanja“ „pečata“ i poznate površine „pečata“ izračunata je atheziona čvrstoća na zatezanje:

$$f_{m,p} = \frac{F_{\max}}{A}, \quad (5.16)$$

gde je:

$f_{m,p}$ - atheziona čvrstoća na zatezanje, u N/mm² (MPa);

F_{\max} - maksimalna sila pritiska, u N;

A - površina „pečata“, u mm².

Ova veličina u izvesnom smislu definiše i čvrstoću drveta na zatezanje upravno na vlakna. Detaljni rezultati za svaki ispitani uzorak dati su u tabeli 5.13.

Tabela 5.13 - Rezultati ispitivanja spoja drvo-karbonska traka pull-off testom

Uzorak br.	Maksimalna sila (kN)	Čvrstoća na zatezanje (N/mm ²)	Sadržaj vlage (%)
1	5,196	2,65	11,2
2	5,982	3,05	11,1
3	5,077	2,59	11,3
4	5,154	2,63	11,4
5	5,676	2,89	11,6
6	4,856	2,47	11,3
7	4,627	2,36	11,3
8	4,995	2,55	11,4
9	4,253	2,17	11,5
10	4,789	2,44	11,2
Srednja vrednost		2,58	11,3
Standardna devijacija		0,25	
Koeficijent varijacije		9,8	

Srednja vrednost athezione čvrstoće na zatezanje iznosila je 2,58 MPa, sa koeficijentom varijacije 9,8%. Zabeležena prosečna vrednost vlažnosti uzoraka iznosila je 11,3%.

U pogledu ispitivanja pull-off testom u literaturi jedino postoje sledeći uslovi za podobnosti betona kao podloge za lepljenje FRP ojačanja [78]:

- $f_{m,p} > 1,5$ MPa , ako se radi o FRP trakama;
- $f_{m,p} > 1,0$ MPa , ako se radi o FRP tkaninama.

Poredeći rezultate datog ispitivanja sa ovim kriterijumima, može se zaključiti da drvo predstavlja zadovoljavajuću podlogu za primenu karbonskih traka.

5.3 Ispitivanje neojačanih i ojačanih nosača od lepljenog lameliranog drveta

Eksperimentalni program u okviru ovog dela istraživanja obuhvatio je izradu i ispitivanje na savijanje do loma neojačanih i ojačanih nosača. Ispitivanje neojačanih nosača sprovedeno je isključivo sa ciljem kvantitativne procene efikasnosti intervencije putem poređenja rezultata sa odgovarajućim rezultatima za ojačane nosače.

U okviru ojačanih nosača razmatrani su različiti položaji ojačanja u poprečnom preseku, kao i različit procenat ojačanja. Procenat ojačanja je definisan kao:

$$r_f = \frac{A_f}{bh} \cdot 100, \quad (5.17)$$

gde je:

r_f - pocenat ojačanja, u %;

A_f - ukupna površina karbonske trake u poprečnom preseku nosača, u cm²;

b - širina poprečnog preseka nosača, u cm;

h - visina poprečnog preseka nosača, u cm.

Program ispitivanja je dat u tabeli 5.14, a konfiguracije test serija su prikazane na slici 5.23. Serija A predstavlja neojačane nosače, odnosno referentnu konfiguraciju. Veći broj neojačanih nosača je ispitivan zbog velike varijabilnosti koja je povezana sa njihovim ponašanjem. Serije B i C ojačanih nosača predstavljaju konfiguraciju ojačanja karbonskim trakama sa spoljašnje strane preseka. Uticaj različitih procenata ojačanja istraživani je na primeru ove konfiguracije ojačanja. Dodatno ojačavanje karbonskim

tkaninama koje su postavljene u zoni sidrenja karbonske trake sa spoljašnje strane preseka proučavano je u okviru Serije D. Ova konfiguracija je bazirana na iskustvu ojačavanja betonskih greda karbonskim trakama, gde tkanine imaju pre svega ulogu da spreče eventualnu pojavu delaminacije trake. Dva položaja karbonskih tkanina su razmatrana: vertikalni i kos (pod uglom od 45°). Kroz konfiguracije Serija E i F istraživane su mogućnosti ojačanja nosača postavljanjem karbonske trake unutar preseka. U okviru Serije E traka je postavljena vertikalno u prethodno usečeni presek u nosaču, dok je u slučaju Serije F traka postavljena horizontalno između dve drvene lamele (zadnje i predzadnje) u fazi konačne izrade nosača. Postavljanje karbonske trake unutar poprečnog preseka nosača, pored poteškoća u realizaciji, ima nekoliko značajnih prednosti kao što su: veća sigurnost pri požaru, bolja estetska svojstva, bolja veza drvo-traka (dvostruka površina lepljenja) i sprečena pojava delaminacije trake.

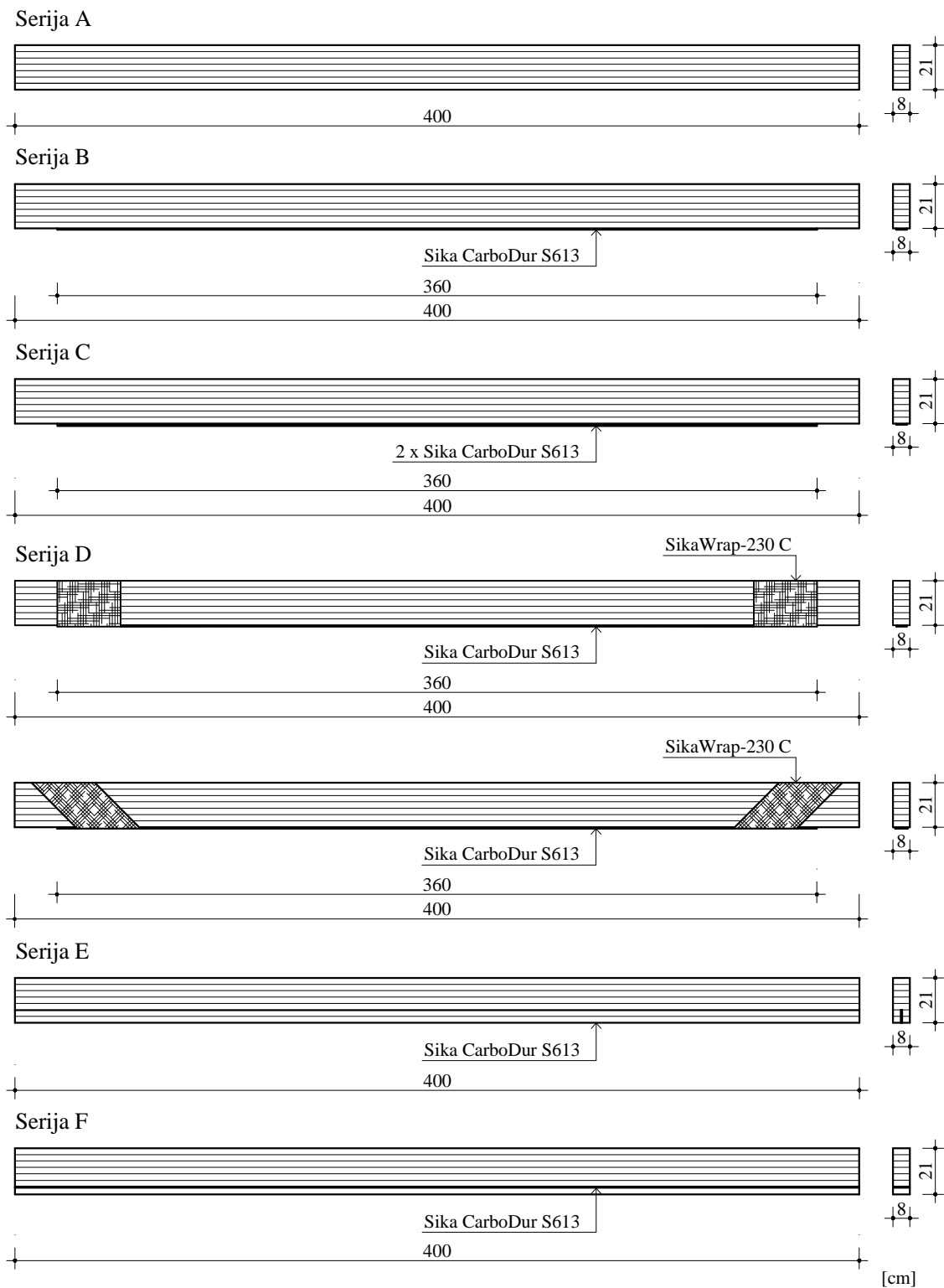
Tabela 5.14 - Program ispitivanja nosača

Test serija	Opis	Procenat ojačanja (%)	Broj uzoraka
A	neojačani nosači	-	8
B	ojačani nosači	0,46	10
C	ojačani nosači	0,93	5
D	ojačani nosači	0,46	3+3
E	ojačani nosači	0,46	5
F	ojačani nosači	0,46	5

Ispitivanje je sprovedeno u okviru dve faze. Prva faza (april 2011) obuhvatila je ispitivanje nosača ojačanih sa spoljašnje strane preseka, a druga faza (april 2012) ispitivanje nosača ojačanih unutar preseka. Neojačani nosači su ispitivani u okviru obe faze, pet u prvoj i tri u drugoj. Uslovi izrade, pripreme i ispitivanja uzoraka su bili identični u obe faze istraživanja.

5.3.1 Izrada nosača

Lepljeni lamelirani drveni nosači su proizvedeni u fabrici „Piramida“ u Sremskoj Mitrovici, dok je ojačanje nosača sprovedeno na Građevinskom fakultetu u Beogradu.



Slika 5.23 - Konfiguracije ispitanih serija nosača

Kao što je već rečeno, nosači su izrađeni od drveta smreke. Drvo je uzeto iz istog šumskog područja u cilju smanjenja uticaja varijabilnosti karakteristika drveta

izazvanih uslovima rasta. Drvena građa je najpre sušena do dostizanja 18% vlažnosti, a zatim kondicionirana tri meseca na temperaturi 20 ± 2 °C i relativnoj vlažnosti vazduha od 65 ± 5 %. Posle kondicionog perioda izmereni sadržaj vlage drveta bio je oko 12 %.

Svaki nosač formiran je lepljenjem 7 lamela, širine 8 cm i debljine 3 cm, dajući konačne dimenzije poprečnog preseka 8 x 21 cm. Kako je ispitivanje sprovedeno prema EN 408 [65], usvojena je dužina nosača od 4 m, čime je ispunjen uslov da dužina treba da bude minimum 19 puta veća od visine poprečnog preseka. Sve lamele su iz komada, bez poprečnog nastavljanja. Lamele boljeg kvaliteta (manje defekata koji umanjuju čvrstoću kao što su kvрге, pukotine i zakošenost vlakana) postavljene su u zone najvećih napona. Za spajanje lamela u monolitni presek korišćen je lepak fenol-resorcin, pri čemu je spajanje izvršeno pri pritisku od 0,5-0,8 MPa u trajanju od 12h i pri temperaturi od oko 20°C.

Za ojačane nosače karbonskom trakom između drvenih lamela, proizvođač je dostavio posebno deo nosača formiran spajanjem 6 lamela i dodatnu lamelu. U slučaju nosača ojačanih vertikalno postavljenom karbonskom trakom unutar preseka, vertikalni prerez za smešataj ojačanja je u fabrici mašinski usečen. Prerez je smešten u donjoj zoni, po sredini preseka, duž cele dužine nosača, širine 4 mm i dubine 62 mm. Veličina proreza je usvojena da omogući smeštanje karbonske trake (dimenzija 1,3x60 mm), sa minimalno potrebnom debljinom lepka sa obe strane trake i sa minimalnim slabljenjem drveta. Na slici 5.24 su prikazani nosači pre ojačanja.



Slika 5.24 - Nosači pre ojačanja

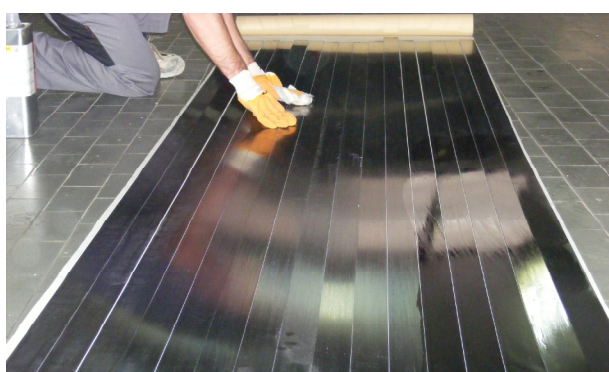
Lepljenje karbonskih traka je pažljivo pripremljeno. Da bi se ostvarila optimalna veza između drveta i kompozita, drvena površina je pripremljena tako da bude ravna,

čista i suva. Kada je karbonska traka sa spoljašnje strane, posebna pažnja prilikom pripreme podloge obraćena je na mesta gde će doći krajevi trake, kako bi se osiguralo pravilno „sidrenje“. Takođe, površina karbonske trake je pripremljena tako da bude čista.

Drvena površina je pripremljena saglasno instrukcijama za pravilno povezivanje karbonske trake i drveta datih od strane proizvođača. Kod uzoraka kod kojih je karbonska traka postavljena horizontalno, da bi se uklonili sitni parčiči drveta i prašina, najpre je primenjeno blago šmirglanje u zoni gde se postavlja traka, a zatim i usisavanje (slika 5.25). Slično, kod uzoraka sa vertikalno postavljenom trakom, prorez je potpuno očišćen malom četkicom i vazдушnim mlazom kako bi se osigurala čista površina spoja.



Slika 5.25 - Priprema drvene površine



Slika 5.26 - Priprema karbonskih traka

Karbonske trake su brusilicom isečene na potrebnu dužinu. Dužina karbonskih traka za slučaj ojačanja sa spoljašnje strane nosača iznosila je 360 cm, a u slučaju

ojačanja unutar preseka dužina karbonske trake bila je jednaka dužini nosača 400 cm. Neposredno pre nanošenja lepka, površina trake, koja treba da se lepi, očišćena je rastvaračem Sika Colma Cleaner kako bi se skinula sva nečistoća (slika 5.26). Pre nanošenja lepka sačekano je da se površina karbonske trake osuši.

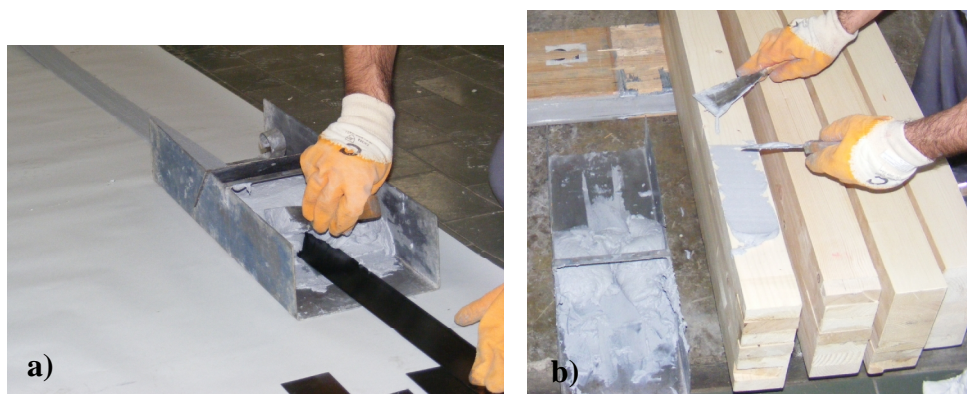
Dva tipa lepka su korišćena za povezivanje karbonske trake i drvene podloge, pri čemu oba imaju epoksid kao glavnu komponentu. Lepak Sikadur-30 je gust i manje viskozan, dok je lepak Sikadur-330 viskozan i lak za ugradnju. Stoga, lepak Sikadur-30 je korićen za trake koje se postavljaju sa spoljašnje strane nosača, a lepak Sikadur-330 za karbonske trake postavljene unutar nosača. Kako je reč o dvokomponentnim lepkovima, potrebno je da komponenta A i komponenta B budu pomešane u odnosu propisanom od strane proizvođača. Komponente su prvo tačno izmerene pomoću elektronske vage, a zatim mešane zajedno pomoću posebnog nastavka priključenog na električnu bušilicu sve dok materijal nije postao gladak po konzistenciji i jednoobrazne sive boje (min. 3 minuta) (slika 5.27). Nakon mešanja cela izmešana količina sipana je u čistu posudu i mešana ponovo oko 1 minut malom brzinom kako bi se sveo ulazak vazduha na minimum. Uvek je pomešana samo ona količina koja može biti upotrebljena u roku predviđenom za upotrebu po pripremi.



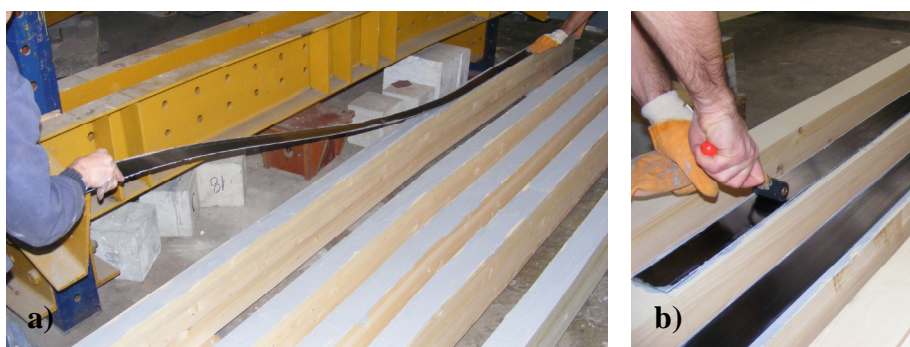
Slika 5.27 - Pripremanje lepka

Za nosače ojačane karbonskim trakama sa spoljašnje strane, lepak Sikadur-30 nanešen je pomoću specijalne prevlake na očišćenu karbonsku traku (slika 5.28a). Tanak sloj lepka nanešen je i na pripremljenu drvenu podlogu pomoću špahtle (slika 5.28b). Unutar „otvorenog vremena“ lepka, karbonska traka je zalepljena na drvenu

površinu. Lepljenje karbonske trake je započeto sa jednog kraja nosača (slika 5.29a) i praćeno je adekvatnim pritiskanjem gumenim valjkom sa ciljem da se suvišan lepak izbaci sa strana trake (slika 5.29b). Sav višak lepka je zatim uklonjen. Proces u dva koraka je, praktično, primenjen za nosače ojačane sa dve karbonske trake na zategnutoj strani nosača. Pošto je prva traka zalepljena za nosač prema već opisanom postupku, isti epoksidni lepak je nanet na drugu karbonsku traku, koja je zatim postavljena preko već pričvršćene prve trake.



Slika 5.28 - Nanošenje lepka: a) na karbonsku traku; b) na drvenu površinu



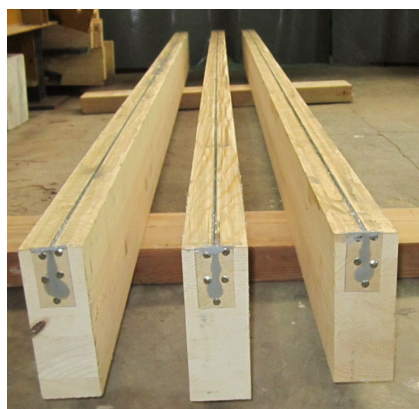
Slika 5.29 - Proces lepljenja karbonske trake: a) početna faza; b) završna faza

Proces lepljenja karbonske trake za slučaj kada je postavljena između drvenih lamela, započeo je nanošenjem vrlo tankog sloja lepka Sikadur-330 na pripremljenu drvenu površinu već formiranog dela nosača, a zatim je očišćena karbonska traka, na koju nije nanet lepak, postavljena po istom principu kao u slučaju postavljanja karbonske trake sa spoljašnje strane. Tanak sloj lepka nanet je i na dodatnu lamelu, koja je zatim postavljena preko već pričvršćene karbonske trake. Kako je karbonska traka

bila uža od širine nosača, prazan prostor je popunjen lepkom. Ojačani nosači su zatim pritisnuti u trajanju od 24h teretom formiranim od betonskih kocki, sa ciljem osiguranja lepljenog spoja i zadržavanja ojačanja u pravilnom položaju (slika 5.30).



Slika 5.30 - Stavljanje pod pritisak nosača kod kojih je karbonska traka postavljena između drvenih lamela



Slika 5.31 - Izgled nosača ojačanih karbonskom trakom postavljenom u vertikalni prorez

U slučaju nosača ojačanih vertikalno postavljenom karbonskom trakom, prorez u koji se postavlja ojačanje je najpre 3/4 popunjen lepkom Sikadur-330 koristeći specijalnu brizgaljku i špahtlu. Posebno se vodilo računa da se spreči zadržavanje vazduha. Očišćena karbonska traka je zatim pažljivo postavljena u prorez. Postavljena karbonska traka je potisnula lepak, koji je zatim potpuno ispunio prostor između trake i drveta. U cilju održanja ojačanja u projektovanom (vertikalnom) položaju i

garantovanja odgovarajućeg sloja lepka između ojačanja i drvenog preseka, distanceri od isečenih komadića karbonske trake utisnuti su u lepak kontinualno celom dužinom trake. Sav istisnuti višak lepka je uklonjen. Izgled nosača sa postavljanim ojačanjem prikazan je na slici 5.31.

Kod nosača koji su pored karbonske trake dodatno ojačani sa dva sloja karbonskih tkanina na krajevima, prvo je postavljena karbonska traka prema već opisanom postupku, a zatim su postavljene tkanine. Drvene površine na koje naležu tkanine su pripremljene na isti način kao trake, a pošto se tkanine obavijaju oko nosača dodatno su zaobljene oštre ivice poprečnog preseka. Tkanine su isečene na željene dimenzije pomoću makaza. Dužina vertikalno postavljenih tkanina je usvojena tako da se omogući obavljanje nosača sa preklapanjem najmanje 10 cm. Dijagonalne tkanine su skrojene tako da se delovi postavljaju nezavisno sa lica odnosno naličija nosača, a preklapaju se po širini nosača. Na pripremljenu podlogu najpre je nanešen lepak Sikadur-330 koristeći valjak, a zatim je postavljena tkanina u zahtevanom pravcu. Tkanina je pažljivo nameštena na lepak delovanjem u pravcu vlakana valjkom za impregnaciju, sve dok se lepak ne istisne sa kroz vlakna. Po obavijanju tkanine oko nosača, dodatni sloj lepka je nanešen kako bi se obezbedila potpuna natopljenost tkanine lepkom. Za drugi sloj tkanine procedura se praktično ponavlja. Primer izgleda kraja nosača nakon završenog celokupnog procesa ojačanja prikazan je na slici 5.32.

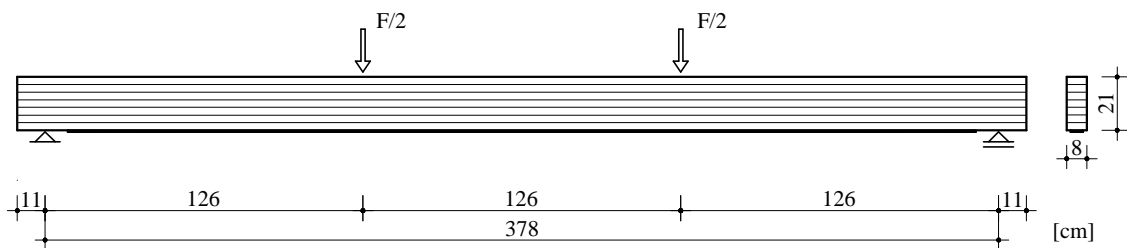


*Slika 5.32 - Izgled krajeva nosača dodatno ojačanih
koso postavljenim karbonskim tkaninama*

Kako bi se obezbedio pravilan spoj, ojačani nosači su čuvani sedam dana na sobnoj temperaturi 22 ± 2 °C.

5.3.2 Ispitivanje nosača

Eksperimentalna ispitivanja o kojima je reč sprovedena su u hali za ispitivanje materijala i konstrukcija Građevinskog fakultetu u Beogradu. Ispitivanje neojačanih i ojačanih nosača izvršeno je u zatvorenom čeličnom ramu. Svi nosači ispitani su na savijanje kao proste grede raspona 378 cm (18 puta visina nosača) opterećene koncentrisanim silama u trećinama raspona, u skladu sa EN 408 [65]. Ovakvim rasporedom sila, u srednjoj trećini nosača dobijen je konstantan moment savijanja, bez transverzalne sile. Šematski prikaz dispozicije ispitivanja je dat na slici 5.33, dok je prikaz jednog nosača u ramu za ispitivanje dat na slici 5.34.



Slika 5.33 - Dispozicija ispitivanja nosača

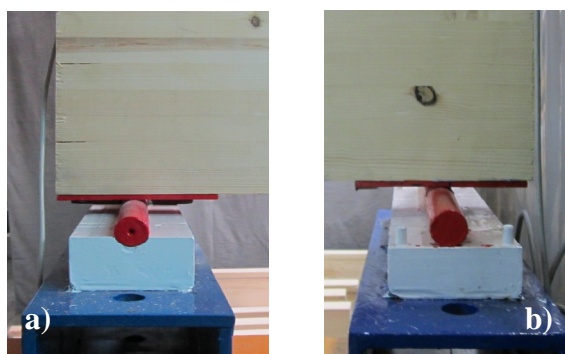


Slika 5.34 - Nosač u ramu za ispitivanje

Opterećenje je aplicirano putem hidrauličke panj prese kapaciteta 350 kN. U eksperimentalnoj proceduri, opterećenje je transformisano sa jedne na dve koncentrisane sile pomoću jakog čeličnog profila IPE 160 (slika 5.35). Slobodno oslanjanje nosača omogućeno je primenom valjkastih čeličnih ležaja prečnika 30 mm (slika 5.36). Takođe, valjkasti ležaji korišćeni su na mestima nanošenja sila, kako bi se obezbedilo „čisto“ vertikalno opterećenje. Čelične pločice debljine 8 mm postavljene su ispod tačaka opterećenja i na osloncima sa ciljem da minimiziraju lokalna oštećenja (gnječenje) drveta. Bočna ukrućenja su predviđena da spreče eventualno bočno izvijanje nosača.



Slika 5.35 - Srednji deo nosača sa položajem elemenata za nošenje opterećenja

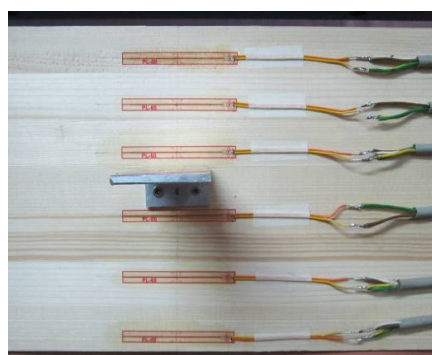
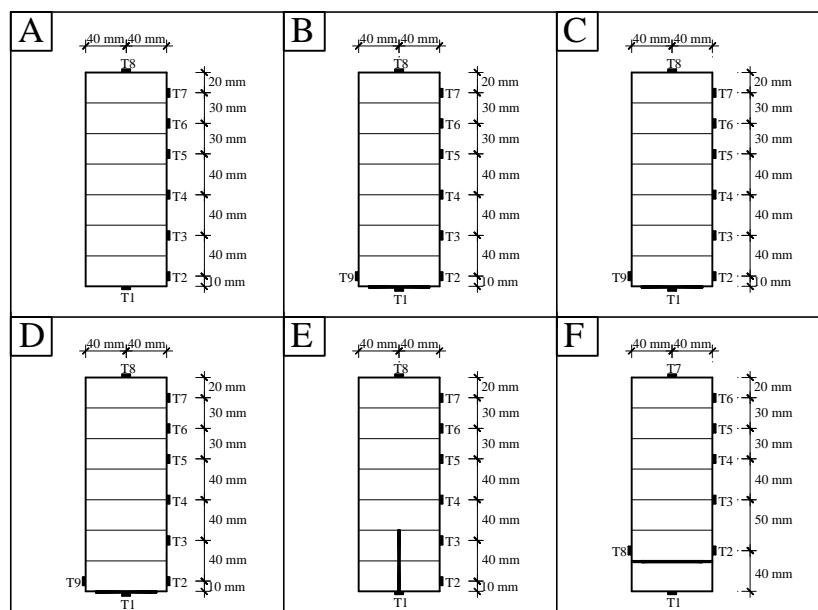


Slika 5.36 - Oslonački delovi nosača: a) nepokretan oslonac; b) pokretan oslonac

Nanošenje sile mereno je preko dozne U25 (HBM) nosivosti 250 kN sa tačnošću od 0,01 kN. Ugib nosača meren je pomoću induktivnih ugibomera. Ugib u sredini raspona praćen je koristeći jedan ugibomer (HBM W100TK, ± 100 mm), pozicioniran u da omogući čitanje u blizini neutralne ose, dok je ugib na osloncima meren pomoću dva

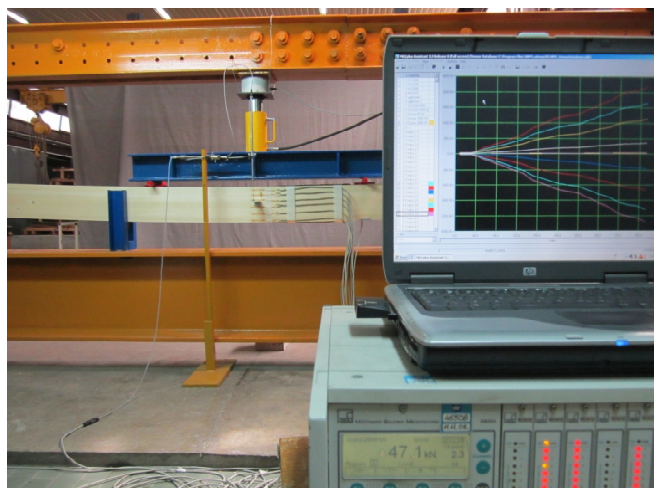
ugibomera (HBM W20TK, ± 20 mm). Svi ugibomeri su tačnosti 0,01 mm. Pored ugiba, u sredini raspona merene su i dilatacije po visini nosača koristeći merne trake (TML PL-60-11, 60 mm dužine), sa tačnošću merenja od 1×10^{-6} mm/mm. Ovo je neophodno kako bi se utvrdio stepen plastifikacije drveta u pritisnutoj zoni, kao i odredilo pomeranje položaja neutralne ose preseka usled prisustva ojačanja. Raspored mernih traka duž poprečnog preseka za različite serije nosača je dat u tabeli 5.15. Dati rasporedi mernih traka su primenjeni na po dva uzorka iz svake serije, dok su ostali uzorci imali merne trake samo na gornjoj i donjoj strani nosača. Merne trake su zalepljene na prethodno očišćenu površinu specijalnim lepkom za merne trake (TML CN). Na slici 5.37 prikazan je deo nosača sa mernim trakama postavljenim na njegovoj bočnoj strani.

Tabela 5.15 - Raspored mernih traka po visini poprečnog preseka za sve serije nosača



Slika 5.37 - Merne trake postavljene na bočnoj strani nosača

Podaci o dilatacijama sa mernih traka, podaci o deformacijama sa ugibomera i odgovarajući podaci o opterećenju sa dozne su prikupljeni uz pomoć akvizicionog sistema (HBM MGC). Akvizicija mernih podataka sprovedena je sa frekvencijom od 2 Hz. Na slici 5.38 prikazano je praćenje ponašanja jednog od ispitanih nosača.



Slika 5.38 - Nosač u fazi ispitivanja

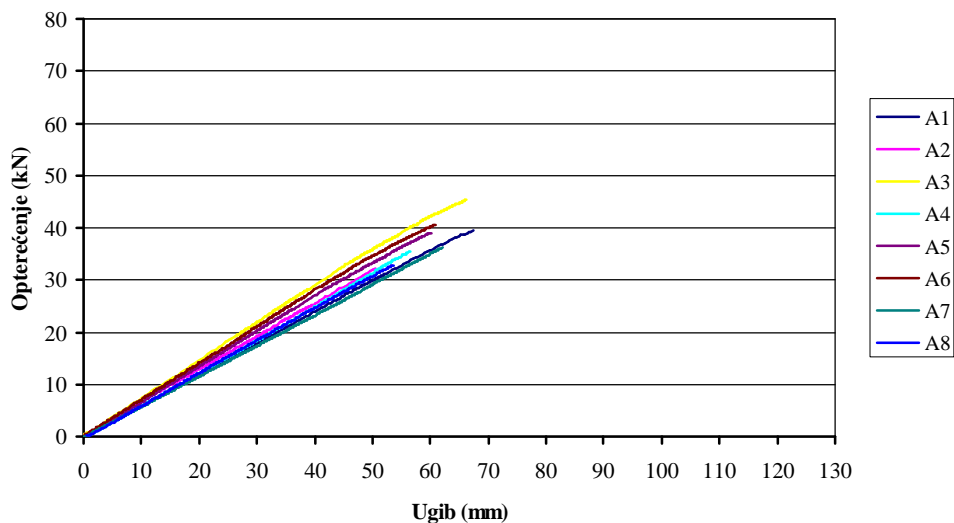
Opterećenje je nanošeno kontrolisanom brzinom 4,5 kN/min, sa ciljem postizanja loma neojačanih nosača za oko 10 min. Ojačani nosači su ispitani istom procedurom nanošenja opterećenja čime je obezbeđeno korektno poređenje rezultata. Vreme do loma za ojačane nosače obično je iznosilo 10-15 min.

Sve vreme ispitivanja nosača, u hali, na mestu neposredno pored rama za ispitivanje, kontrolisana je vlažnost i temperatura vazduha. Vlažnost vazduha „kretala“ se u granicama 55-65%, a temperatura u granicama 20-25 °C. Neposredno posle završetka ispitivanja, sadržaj vlage u drvetu meren je pomoću digitalnog vlagomera na različitim lokacijama u okviru nosača. Zabeležena vlažnost u svim slučajevima je bila u oblasti 10,6-11,4%.

6. PRIKAZ I INTERPRETACIJA REZULTATA EKSPERIMENTALNOG ISPITIVANJA NOSAČA

6.1 Ponašanje opterećenje-ugib i oblik loma

Ponašanje opterećenje-ugib do loma neojačanih nosača (Serija A) prikazano je na slici 6.1. Neojačani nosači su pokazali prilično linearno-elastično ponašanje do loma. Kolaps gotovo svih ovih nosača dogodio se usled inicijalnog loma u zategnutom delu nosača. Kao posledica krtoeg ponašanja drveta pri zatezanju, lom se dogodio iznenada, bez ikakvih naznaka pre dostizanja graničnog opterećenja. Katastrofalna priroda loma neojačanih nosača prikazana je na slici 6.2. Kod pet od osam ispitanih uzoraka lom je iniciran na mestima grešaka građe drveta (kvrge) u oblasti maksimalnog momenta savijanja, između tačaka apliciranja opterećenja (slika 6.3). Svaku lokalnu zonu oko defekta karakteriše izrazita zakošenost drvenih vlakana, što vodi ka visokoj komponenti napona zatezanja upravno na vlakna. Kao rezultat ovog naprezanja javljaju se izražene podužne pukotine, koje se u nekim slučajevima pružaju gotovo do oslonaca. Kod dva od osam nosača lom se dogodio po čistom drvetu u ivičnoj lameli zategnute zone (slika 6.4). Jedan od ovih nosača pokazao je ograničeno nelinearno ponašanje. Smicanje kao oblik loma zabeleženo je u jednom slučaju (slika 6.5). Ni u jednom od neojačanih nosača nema tragova plastifikacije na lamelama u pritisnutoj zoni.



Slika 6.1 - Dijagrami opterećenje-ugib za neojačane nosače (Serija A)



Slika 6.2 - Karakterističan lom neojačanih nosača (nosač A8)



Slika 6.3 - Lom neojačanog nosača usled zatezanja na mestu kvрге (nosač A2)



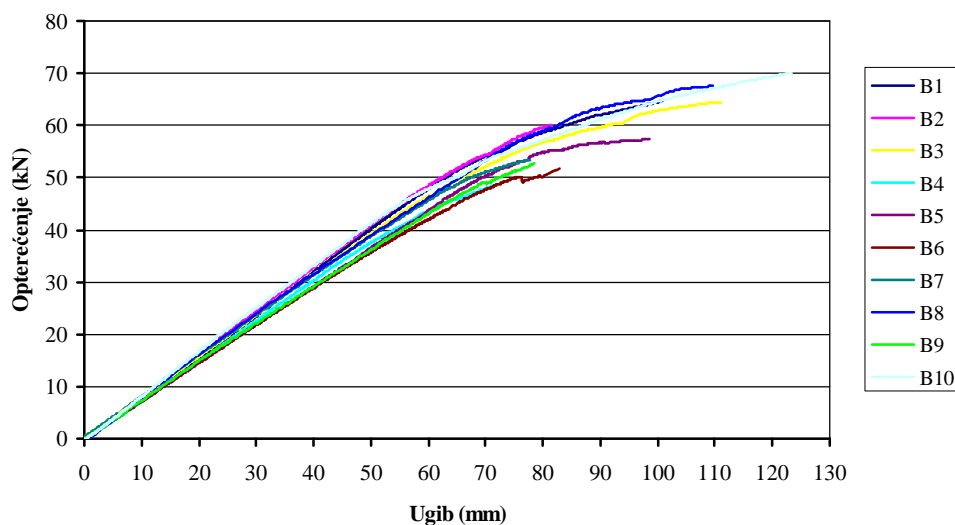
Slika 6.4 - Lom neojačanog nosača usled zatezanja po čistom drvetu (nosač A4)



Slika 6.5 - Lom neojačanog nosača usled smicanja (nosač A6)

Nosači ojačani sa jednom karbonskom trakom na donjoj (zategnutoj) strani (Serija B) pokazali su duktilnije ponašanje u odnosu na neojačane nosače, što se može videti na slici 6.6. Najčešći mehanizam kolapsa ovih nosača je lom drveta izazvan zatezanjem, sa ili bez delimične plastifikacije pritisnute zone nosača. Ponašanje opterećenje-ugib ovih nosača je linearno-elastično do pojave lokalnog oštećenja izazvanog prisustvom defekata i diskontinuiteta drveta u zategnutoj zoni. Plastično tečenje drveta izaziva nelinearno ponašanje, koje se završava iznenadnim padom opterećenja usled loma drveta u zategnutoj zoni, u okviru srednje trećine raspona (slika 6.7). Kod pojedinih nosača vidljivi su tragovi plastifikacije u formi zbijanja drvenih vlakana (slika 6.8), ali generalno se može reći da je pritisnuta zona ostala nedeformisana. Rezultati su pokazali da se kod sedam od deset ispitanih uzoraka inicijalni lom dogodio u zategnutim lamelama na mestu kvrga u drvetu, dok se kod dva uzorka lom dogodio po čistom drvetu u ivičnoj lameli zategnute strane nosača. Prisustvo podužnih pukotina posle inicijalnog loma izazvanog zatezanjem zabeleženo je

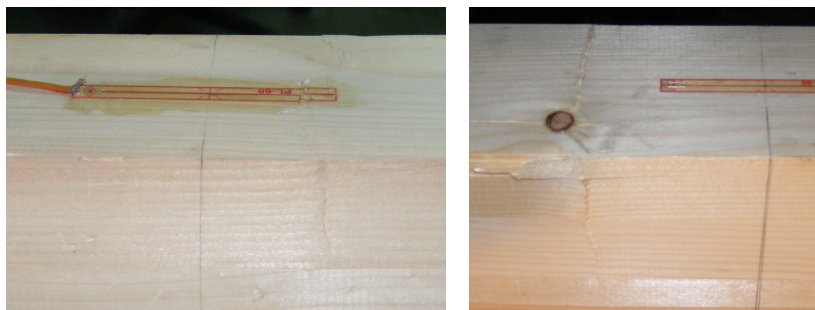
kod većine nosača. Kod dva nosača kod kojih je lom iniciran na mestu kvrga na zategnutoj strani, u oblasti apliciranih sila, zabeleženo je smicanje kao sekundarni oblik loma (slika 6.9). Dati oblik loma je primetan kod laboratorijskih ispitivanja, posebno kada opterećenje čine jedna ili dve koncentrisane sile, pri čemu transverzalna sila može predstavljati dominantnu unutrašnju silu. Suprotno, ovo ne bi trebalo da je slučaj karakterističan za jednako podeljeno opterećenje. Lom izazvan čisto smicanjem desio se u jednom nosaču, što je okarakterisano kao posledica odvajanja drvne mase između godova unutar jedne drvne lamele (slika 6.10). U većini slučajeva, lom izazvan dostizanjem granične čvrstoće drveta u zategnutoj zoni je bio eksplozivne prirode, što je prouzrokovalo odvajanje i delimično pucanje karbonske trake (slika 6.11). Ostvarena athezija između drveta i karbonske trake narušena je jedino posle loma u drvetu.



Slika 6.6 - Dijagrami opterećenje-ugib za ojačane nosače Serije B



Slika 6.7 - Karakterističan lom ojačanih nosača Serije B (nosači B9 i B4)



Slika 6.8 - Tragovi plastifikacije pritiskute zone (nosači B8 i B10)



Slika 6.9 - Lom usled smicanja (nosač B5)

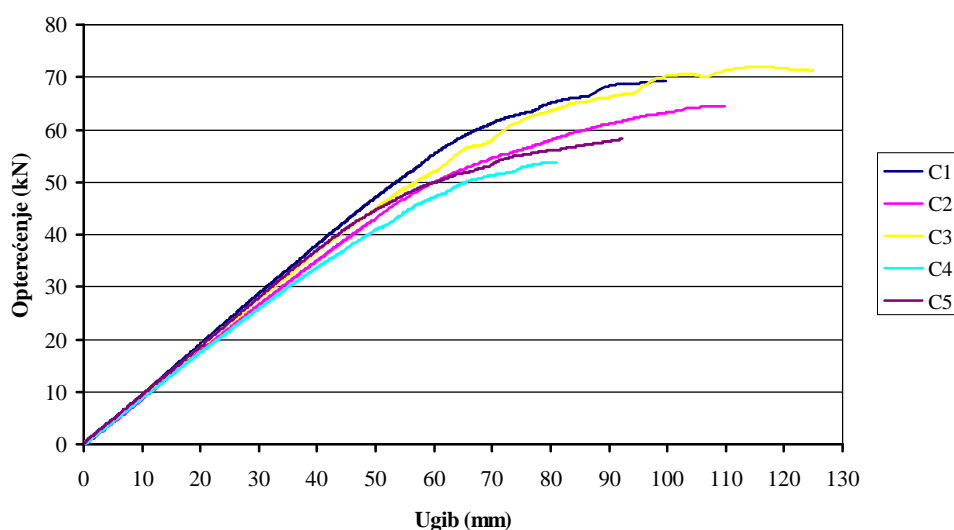


Slika 6.10 - Smičući lom usled odvajanja drvene mase između godova (nosač B2)



Slika 6.11 - Lom pri kome je došlo do potpunog odvajanja karbonske trake (nosač B1)

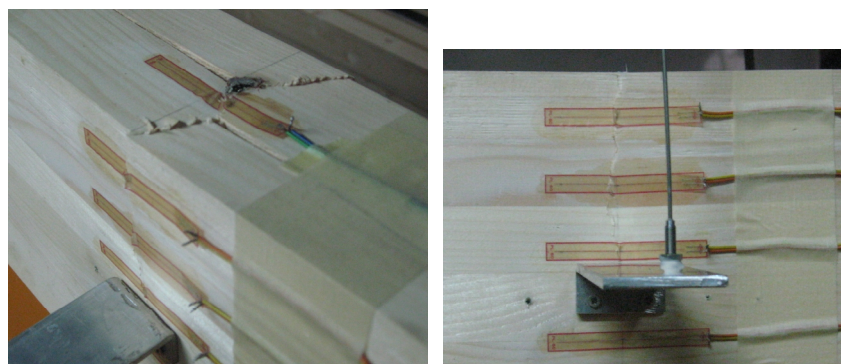
Poput nosača Serije B i nosači Serije C, ojačani sa dve karbonske trake na zategnutoj strani nosača, pokazali su određeno duktilno ponašanje (slika 6.12). Očekivano, nelinearna oblast ponašanja je izraženija kod ove serije nosača. Međutim, dominantni oblik loma ispitanih nosača je smicanje izazvano pucanjem drveta usled koncentracije smičućeg napona u zoni sidrenja trake (slika 6.13). Granični lom usled smicanja je posledica većeg procenta ojačanja u poprečnom preseku. Većim procentom ojačanja sprečen je lom u zategnutoj zoni, a kako kapacitet pritisnute zone nije dostignut, oblik loma se pomerio ka smicanju. Smičući lom je prilično iznenađan i vrlo krt. Kod svih nosača kod kojih se dogodio ovaj tip loma primetni su tragovi plastifikacije u formi zbijanja drvenih vlakana u gornjim lamelama. Lom izazvan pritiskom usled savijanja je zabeležen u jednom od uzoraka. Plastifikacija je veoma vidljiva u pritisnutoj zoni sa očiglednim zbijanjem drvenih vlakana (slika 6.14). Efekat plastifikacije kod nekih nosača se mogao uočiti i prema zakrivljenosti nakon rasterećenja. Zbijanje drvenih vlakana može se, takođe, videti u blizini mesta nanošenja sile, što je prouzrokovano gnječenjem drveta usled pritiska upravno na vlakna (slika 6.15). Kod jednog od pet ispitanih nosača lom usled zatezanja se desio na mestu defekta drveta u ivičnoj lameli zategnute strane nosača. U svim slučajevima, veza između karbonskog ojačanja, drveta i lepka je ostala netaknuta sve vreme ispitivanja.



Slika 6.12 - Dijagrami opterećenje-ugib za ojačane nosače Serije C



Slika 6.13 - Karakterističan lom ojačanih nosača Serije C (nosači C1 i C2)

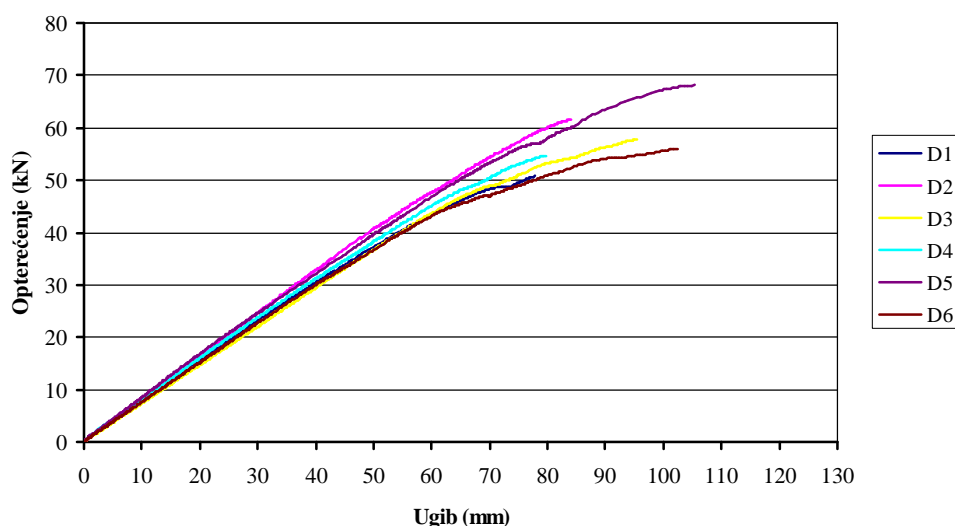


Slika 6.14 - Lom u pritisnutoj zoni (nosač C3)



Slika 6.15 - Lokalni lom na mestu unošenja sile (nosač C2)

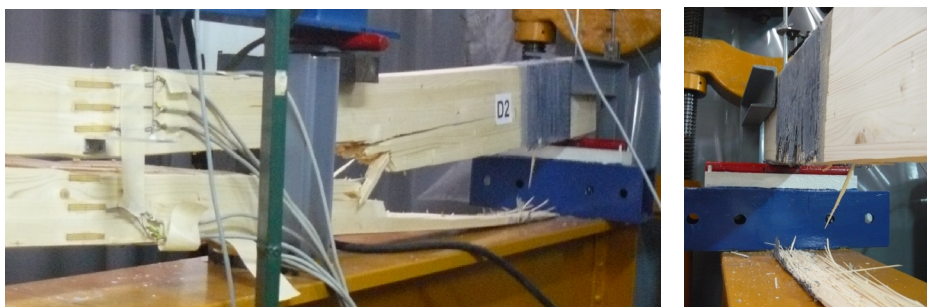
Dijagrami opterećenje-ugib za nosače ojačane sa jednom karbonskom trakom na zategnutoj strani i dodatnim karbonskim tkaninama u zonama oslonaca (Serija D) prikazane su na slici 6.16. Kao kod nosača ojačanih samo sa karbonskom trakom, kolaps ovih nosača je uslovljen čvrstoćom drveta u zategnutoj zoni (slika 6.17). S obzirom da je savijanje dominantni oblik loma i da se delaminacija karbonske trake događa jedino kao post-efekat, uticaj karbonskih tkanina na ponašanje nosača nije vidljiv. Stoga, u daljoj analizi nije pravljena razlika između uzoraka ojačanih vertikalno postavljenim tkaninama i uzoraka sa koso postavljenim tkaninama na krajevima nosača. Kod pet od šest ispitanih uzoraka lom je iniciran na mestu defekata u drvetu u zategnutim lamelama, dok se kod jednog uzorka lom desio po čistom drvetu u ivičnoj lameli zategnute strane nosača. Smicanje, kao sekundarni oblik loma, zabeleženo je kod dva ispitana nosača. Slično kao kod nosača Serije B, ovaj oblik loma je iniciran na mestu kvрге u oblasti trećina raspona nosača. Na slici 6.18 može se primetiti da je usled ovakvog loma došlo do cepanja tkanine, koja nema dovoljnu otpornost da se suprotstavi delovanju u ravni smicanja. Generalno, plastifikacija pritisnute zone je slabo izražena, izuzev kod jednog nosača gde je jasno vidljivo izbočavanje vlakana usled prisustva kvрге u ivičnoj lameli (slika 6.19).



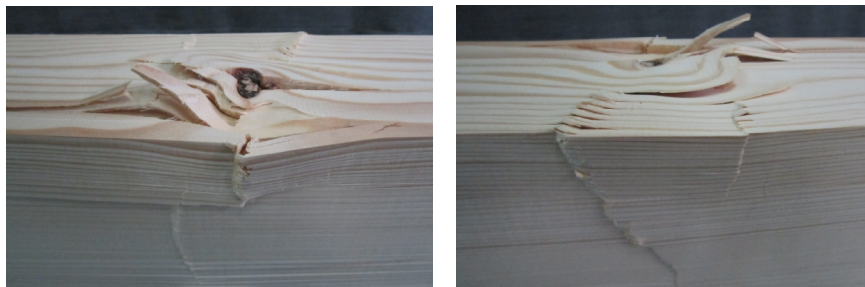
Slika 6.16 - Dijagrami opterećenje-ugib za ojačane nosače Serije D



Slika 6.17 - Karakterističan lom ojačanih nosača Serije D (nosači D3 i D4)



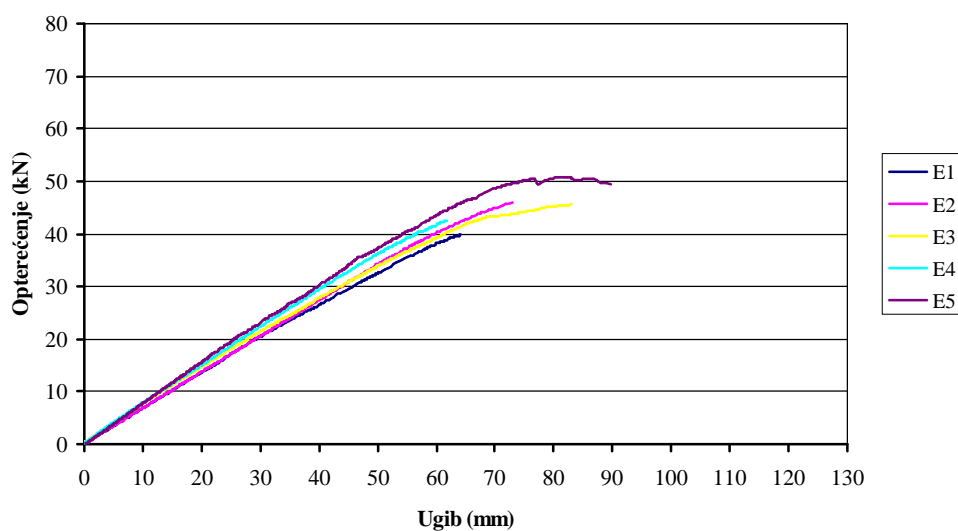
Slika 6.18 - Lom usled smicanja (nosač D2)



Slika 6.19 - Izbočavanje pritisnutih vlakana na mestu kvrge (nosač D6)

Prisustvo horizontalno postavljene karbonske trake na zategnutoj strani nosača sprečava otvaranje pukotina, ograničava lokalna oštećenja i premošćava lokalne defekte u drvetu i na taj način omogućava znatno duktilnije ponašanje ojačanih nosača. Stepenn duktilnosti nosača u mnogome zavisi od kvaliteta drvenih lamela u donjoj (zategnutoj) zoni i što su kvalitetnije lamele smeštene neposredno iznad karbonske trake to je duktilnost veća.

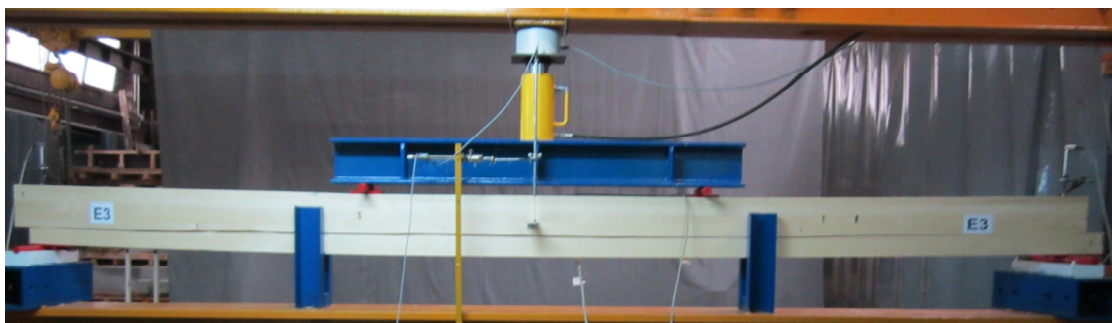
Dijagrami opterećenje-ugib na slici 6.20 pokazuju u suštini linearno ponašanje do loma nosača ojačanih sa vertikalno postavljenom karbonskom trakom unutar preseka (Serija E). Plastično tečenje drveta prekinuto je lomom nosača usled pojave pukotina u zategnutoj zoni. Pozitivni efekti usled prisustva karbonske trake nisu dovoljni da ograniče lokalna oštećenja i premoste lokalne defekte u drvetu. Pored toga, podužnim prorezom za smeštaj karbonske trake dodatno se slabi nosač remećenjem drvenih vlakana u zoni usecanja. Kod četiri od pet ispitanih nosača kolaps je nastao lomom drvenog preseka sa leve ili desne strane karbonske trake, u okviru srednje trećine raspona nosača (slika 6.21). Rezultati su pokazali da je lom kod tri uzorka iniciran prisustvom defekata drveta (kvrge, smolni džep), dok se lom jednog uzorka dogodio po čistom drvetu. Lom jednog uzorka nastao je usled smicanja u ravni neposredno iznad vertikalno postavljene karbonske trake (slika 6.22). Tragovi plastifikacije su zabeleženi samo kod jednog od ispitanih nosača. Prianjanje između ojačanja i drveta je bilo efikasno do loma nosača. Odvajanje karbonske trake od drveta, a u nekim slučajevima i gužvanje (slika 6.23), događalo se jedino posle loma drveta u zategnutoj zoni.



Slika 6.20 - Dijagrami opterećenje-ugib za ojačane nosače Serije E



Slika 6.21 - Karakterističan lom ojačanih nosača Serije E (nosači E1 i E4)



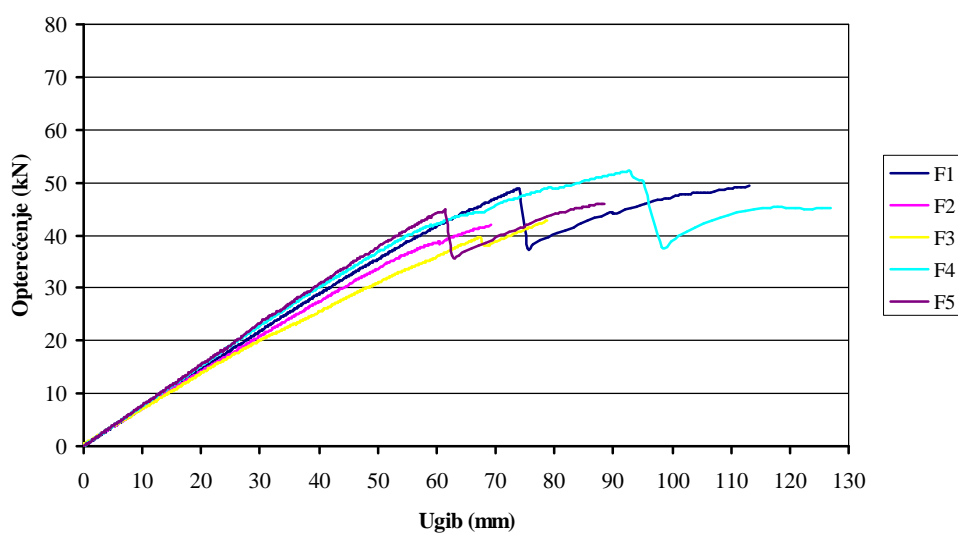
Slika 6.22 - Lom usled smicanja (nosač E3)



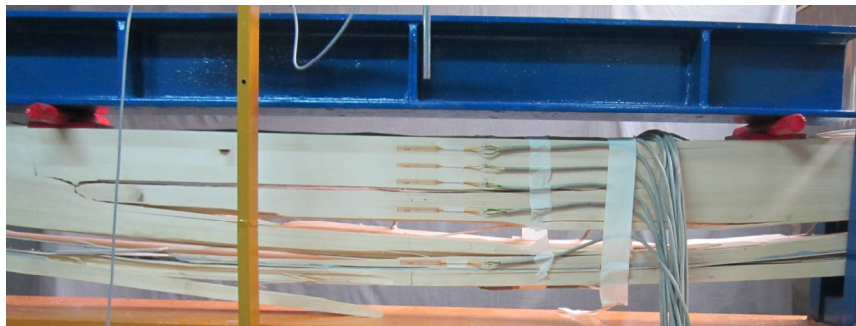
Slika 6.23 - Lom pri kome je došlo do odvajanja karbonske trake (nosač E2)

Ponašanje do loma nosača ojačanih sa karbonskom trakom između drvenih lamela u zategnutoj zoni (Serija F), izraženo preko dijagrama opterećenje-ugib,

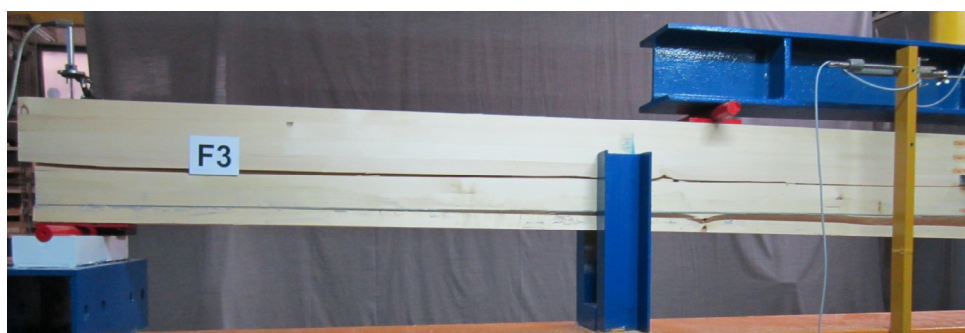
prikazano je na slici 6.24. Posle početne linearno-elastične faze, efekat plastičnog tečenja pritisnute zone drveta je primetan do loma drvene lamele ispod karbonske trake, koji nastaje usled dostizanja granične vrednosti napona zatezanja. Opterećenje u tom trenutku rapidno opada. Kako karbonska traka ostaje neoštećena, tokom faze posle loma lamele ispod karbonske trake opterećenje raste ponovo do globalnog loma koji se javlja u drvenom preseku iznad karbonske trake. Lom lamele ispod karbonske trake nije prouzrokovao potpunu delaminaciju i ova lamela nastavlja da doprinosi kapacitetu nosivosti nosača. Kapacitet nosivosti, kao i duktilnost, u fazi posle loma lamele ispod ojačanja zavisi od oblika globalnog loma nosača. Rezultati ispitivanja su pokazali da kod tri nosača, koji su demonstrirali opisano ponašanje, globalni lom je nastao usled zatezanja iniciran na mestu defekta drveta u lamelama neposredno iznad karbonske trake (slika 6.25). Konačan lom usled smicanja posle delimičnog pucanja drvene lamele ispod karbonske trake dogodio se kod jednog od ispitanih uzoraka (slika 6.26). Uzrok ovog loma je greška drveta koja se manifestuje u odvajanju drvene mase u smeru godova (slika 6.27). Kod jednog ispitanog nosača desio se prevremeni lom u lameli iznad karbonske trake iniciran prisustvom kvрге (slika 6.28). Nijedan od zabeleženih lomova nije prouzrokovao odvajanjem ili delaminacijom ojačanja. Postoji lokalno odvajanje trake u blizini pukotina u drvetu, ali spoj između trake i drveta izvan ovih oblasti je netaknut. Tragovi plastifikacije pritisnute zone u oblasti srednje trećine raspona, u formi zbijanja drvenih vlakana, prisutni su kod tri od pet nosača (slika 6.29).



Slika 6.24 - Dijagrami opterećenje-ugib za ojačane nosače Serije F



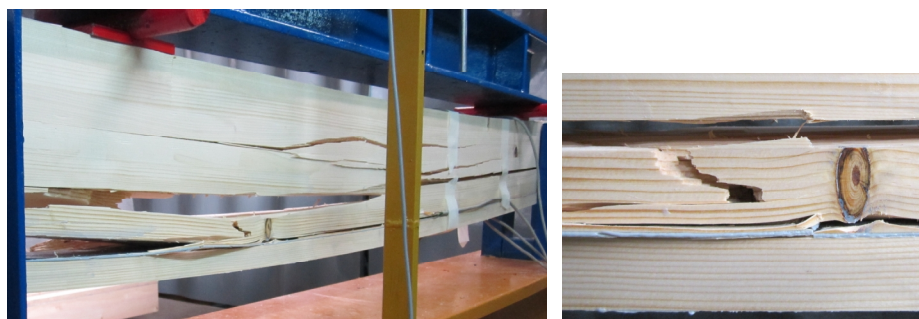
Slika 6.25 - Karakterističan lom ojačanih nosača Serije F (nosač F4)



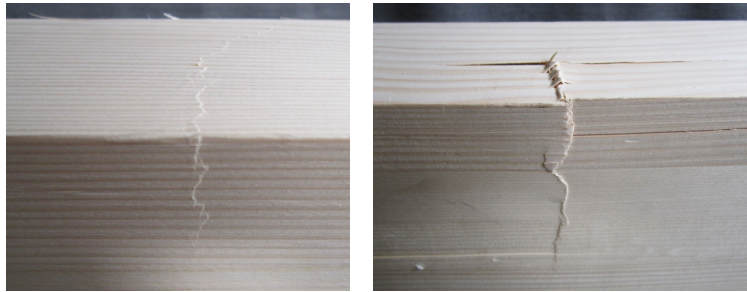
Slika 6.26 - Lom usled smicanja (nosač F3)



Slika 6.27 - Odvajanje drvne mase između godova (nosač F3)



Slika 6.28 - Prevremen lom u drvenoj lameli iznad karbonske trake (nosač F2)



Slika 6.29 - Tragovi plastifikacije pritiskute zone (nosači F1 i F4)

6.2 Kapacitet nosivosti i deformabilnosti

Prikaz eksperimentalnih rezultata u smislu maksimalnog opterećenja, maksimalnog momenta savijanja, ugiba u sredini nosača pri maksimalnom opterećenju, kao i ugiba u sredini nosača pri lomu za sve ispitane serije nosača dat je tabelama 6.1-6.6. Za nosače Serije F koje karakteriše dve faze loma, u tabeli 6.6 su date vrednosti za opterećenje i ugib za obe faze, pri lomu drvene lamele ispod karbonske trake i pri konačnom lomu nosača. U tabelama za ojačane nosače prikazano je i povećanje razmatranih veličina u odnosu na neojačane nosače. Odovarajuće vrednosti za opterećenja i ugibe su očitane sa eksperimentano dobijenih krivih, dok je vrednost maksimalnog momenta savijanja izračunata prema dobro poznatom izrazu za prostu gredu opterećenu sa dve koncentrisane sile u trećinama raspona:

$$M_{\max} = \frac{F_{\max} \cdot l}{6}, \quad (6.1)$$

gde je:

F_{\max} - maksimalno opterećenje aplicirano putem prese;

l - raspon nosača.

Srednja vrednost graničnog opterećenja za neojačane (kontrolne) uzorke bila je 37,9 kN, sa koeficijentom varijacije 12,1%. Velika razlika između najnižeg i najvišeg opterećenja pokazuje veliku varijabilnost u čvrstoći drveta. Kako je drvo prirodni materijal ovi rezultati su očekivani. Velika varijabilnost se pri proračunu drvenih konstrukcija uzima u obzir kroz upotrebu karakteristične vrednosti čvrstoće (5% fraktil) i odgovarajućeg koeficijenta sigurnosti. Ako bi se smanjila velika promenljivost

svojstava drveta, postoji potencijal da proračun drvenih konstrukcija učini manje konzervativnim u budućnosti [40].

Kapacitet nosivosti ojačanih nosača uslovljen je oblikom loma, prisustvom imperfekcija u osetljivoj zoni, položajem ojačanja, kao i procentom ojačanja. Ispitivanja sprovedena na nosačima ojačanim jednom karbonskom trakom sa donje strane pokazala su srednje vrednosti graničnog opterećenja za deset uzorkaka Serije B i šest uzoraka Serije D od 59,1 kN i 58,2 kN, sa koeficijentom varijacije 12,4% odnosno 11,4%. Srednja vrednost graničnog opterećenja za pet uzoraka ojačanih sa dve karbonske trake sa donje strane (Serija C) bila je 63,5 kN, pri čemu je koeficijent varijacije 11,9 %. Za pet nosača ojačanih jednom karbonskom trakom postavljenom između drvenih lamela (Serija F) srednja vrednost maksimalnog opterećenja iznosila je 46,4 kN, sa koeficijentom varijacije 9,3%. Srednja vrednost graničnog opterećenja za pet uzoraka Serije E, ojačanih vertikalno postavljenom karbonskom trakom, bila je 45,0 kN, pri čemu je koeficijent varijacije iznosio 9,2%.

Kada se pravi poređenje sa neojačanim nosačima, kolaps ojačanih nosača dogodio se pri znatno većim opterećenjima. Ovo pokazuje da su nosači uspešno ojačani koristeći karbonske trake. Povećanje kapaciteta nosivosti ojačanih uzoraka iznosilo je od 18,6% za nosače Serije E do 67,7% za nosače Serije C. Nosači sa ojačanjem postavljenim horizontalno imali su veću nosivost u odnosu na one koji su bili ojačani vertikalno postavljenim ojačenjem. Povećanje kapaciteta nosivosti nosača Serije B u odnosu na neojačane nosače (Serija A) bilo je 56,0%, što je tri puta više nego što je dobijeno za nosače serije E. Horizontalno postavljena traka deluje kao most preko defekata i na taj način omogućava da se karakteristike konstrukcijskog drveta približe karakteristikama drveta dobijenim ispitivanjem na malim „čistim“ uzorcima. Pored ovoga, razlog velike razlike između dobijenih srednjih vrednosti graničnog opterećenja upoređenih serija uzoraka je i određeno oštećenje nastalo izvođenjem proreza za smešataj ojačanja. Položaj karbonske trake u okviru zategnute zone nosača, takođe, ima značajan uticaj na granično opterećenje. Kapacitet nosivosti nosača kod kojih je karbonska traka postavljena između drvenih lamela (Serije F) veći je za 22,5% od kapaciteta nosivosti neojačanih nosača, ali je ovo povećanje za 2,5 puta manje nego kod nosača ojačanih sa donje strane (Serija B). Objašnjenje se može naći u mehanizmu loma. Prerani lom lamele ispod karbonske trake uslovio je konačan kapacitet nosivosti.

Povećanje graničnog opterećenja nije proporcionalno površini ojačanja u okviru poprečnog preseka nosača. Kapacitet nosivosti se povećao za oko 20% kada je procenat ojačanja povećan duplo, sa 0,46% (Serija B) na 0,93% (Serija C). Ovaj fenomen može se objasniti činjenicom da povećanje površine ojačanja vodi ka većoj nelinearnosti u ponašanju drveta. Opšivanje nosača karbonskim tkaninama na krajevima, u dispoziciji sa jednom karbonskom trakom sa donje strane, nije imalo uticaj na vrednosti maksimalnog opterećenja. Povećanje kapaciteta nosivosti od 53,5% u slučaju nosača Serije D praktično je isto kao kod nosača Serije B.

Pored navedene analize rezultata, zanimljivo je primetiti da su od svih ojačanih nosača po dva nosača iz Serija E (E1, E2) i Serija F (F2, F3) imala manje granično opterećenje od „najjačeg“ neojačanog nosača (A3). Svakako, ovo nije pouzdan pokazatelj efikasnosti ojačanja, jer je lom nosača uglavnom uslovljen defektima u drvetu.

Uvođenje ojačanja nije značajno smanjilo varijaciju rezultata graničnog opterećenja. Razlog leži u činjenici da je najčešće lom izazvan zatezanjem. Kao što je ranije rečeno, lom usled zatezanja je krt, nasumičan i teško predvidiv.

Nosači ojačani karbonskim trakama pretrpeli su veće deformacije pre loma. Povećanje srednje vrednosti ugiba u sredini nosača pri lomu u odnosu na neojačane nosače iznosilo je od 24,1% (Serija E) do 69,4% (Serija C). Rezultati povećanja deformabilnosti se dobro slažu sa rezultatima povećanja nosivosti, osim u slučaju nosača Serije F. Nosači ojačani karbonskom trakom postavljenom između drvenih lamela posle loma lamele ispod karbonske trake nastavljaju da rade kao nosači ojačani karbonskom trakom sa donje strane, ali sa manjom visinom, što je uticalo na konačnu vrednost ugiba pri lomu.

6.3 Krutost

Krutost ispitanih nosača je izračunata za njihovo linearno-elastično ponašanje. Za svaku krivu opterećenje-ugib, oblast između $0,1 F_{\max}$ i $0,4 F_{\max}$ (F_{\max} - maksimalno opterećenje) je razmatrana za izračunavanje nagiba pravolinijskog dela krive. Koristeći dobro poznati izraz za ugib u sredini proste grede opterećene sa dve koncentrisane sile u trećinama raspona, krutost na savijanje EI je izračunata kao:

$$EI = \frac{23}{1296} \frac{(F_2 - F_1) \cdot l^3}{(w_2 - w_1)}, \quad (6.2)$$

gde je:

F_1 - opterećenje koje odgovara vrednosti 10% maksimalnog opterećenja ($0,1 F_{\max}$);

F_2 - opterećenje koje odgovara vrednosti 40% maksimalnog opterećenja ($0,4 F_{\max}$);

w_1 - ugib u sredini nosača meren za vrednost opterećenja F_1 ;

w_2 - ugib u sredini nosača meren za vrednost opterećenja F_2 ;

l - raspon nosača.

Rezultati krutosti na savijanje za sve serije ispitanih nosača su dati u tabelama 6.1-6.6. Pored ovoga, u tabelama za ojačane nosače prikazano je i povećanje krutosti u odnosu na neojačane nosače.

Srednja vrednost krutosti neojačanih nosača bila je $646,4 \text{ kNm}^2$, sa koeficijentom varijacije 7,7%. Na osnovu ispitivanja sprovedenih na nosačima ojačanim jednom karbonskom trakom sa donje strane, dobijena je srednja vrednost krutosti $772,7 \text{ kNm}^2$ za uzorke Serije B i $780,5 \text{ kNm}^2$ za uzorke Serije D, sa koeficijentom varijacije 4,9% odnosno 4,2%. Srednja vrednost krutosti za uzorke ojačane sa dve karbonske trake sa donje strane (Serija C) bila je $910,6 \text{ kNm}^2$, pri čemu je koeficijent varijacije 4,3%. Za nosače ojačane jednom karbonskom trakom postavljenom između drvenih lamela (Serija F) srednja vrednost krutosti iznosila je $727,6 \text{ kNm}^2$, sa koeficijentom varijacije 6,2%. Srednja vrednost krutosti za nosače Serije E, ojačane vertikalno postavljenom karbonskom trakom, bila je $717,8 \text{ kNm}^2$, pri čemu je koeficijent varijacije iznosio 5,5%.

Uvođenje u poprečni presek materijala sa velikom krutošću, kakav su karbonske trake, rezultovalo je povećanjem krutosti na savijanje nosača. Najveće povećanje krutosti u odnosu na neojačane nosače zabeleženo je kod nosača Serije C od 40,9%, a najmanje povećanje kod nosača Serije E 11,1%. Nosači sa ojačanjem postavljenim horizontalno sa donje strane pokazali su najveću krutost u odnosu na ostale serije ojačanih nosača. Razlog leži u položaju težišta ojačanja u odnosu na neutralnu osu preseka. Povećanje krutosti nosača Serije B, ojačanih karbonskom trakom sa donje (zategnute) strane, u odnosu na kontrolne nosače (Serija A) iznosilo je 19,5%. Postavljanje karbonske trake unutar preseka između dve poslednje lamele u zategnutoj

zoni (Serija F) dovelo je do povećanja krutosti od 12,6%, što je oko 1,5 puta manje nego što je dobijeno za nosače Serije B. Slično, postavljanje karbonske trake unutar preseka u vertikalnom položaju vodilo je ka povećanju krutosti, ali je to povećanje za 1,75 puta manje u odnosu na nosače Serije B. I pored toga što je položaj težišta ojačanja kod uzoraka Serija F i E približno isti, razlika u povećanju krutosti od 13,5% može se objasniti slabljenjem drvenog preseka prilikom izvođenja podužnog proreza za smeštaj ojačanja. Upotreba karbonskih tkanina na krajevima nosača Serije D nema nikakav uticaj na veličinu krutosti na savijanje. Povećanje krutosti od 20,7% u odnosu na neojačane uzorke je približno isto kao kod nosača Serije B.

Pored položaja karbonske trake u okviru poprečnog preseka, na veličinu krutosti u velikoj meri utiče i procenat ojačanja. Poređenjem srednjih vrednosti krutosti nosača Serija B i C može se zaključiti da je povećanje krutosti proporcionalno površini ojačanja u okviru poprečnog preseka nosača. Krutost se povećala 210% kada je procenat ojačanja povećan duplo, umesto jedne karbonske trake (Serija B) zalepljene su dve (Serija C).

Uticaj prirode drveta na karakteristike krutosti mogu se najbolje videti kroz sledeći primer: neojačani nosač A3 imao je veću krutost nego ojačani nosači B6, E1, E2, E4, F2 i F4.

Ojačavanjem nosača varijabilnost rezultata krutosti je umanjena. Ovo može biti rezultat izraženog uticaja karbonskih traka, proizvoda sa visokom kontrolom kvaliteta i malom varijabilnošću mehaničkih karakteristika.

Prisustvo karbonskog ojačanja u poprečnom preseku nosača efikasno je smanjilo ugibe u elastičnoj oblasti u odnosu na nosače koji nisu bili ojačani. Ovaj efekat je naročito poželjan sa aspekta graničnog stanja upotrebljivosti kako bi se obezbedila udobnost eksploatacije drvenih konstrukcija.

Tabela 6.1 - Rezultati eksperimentalnog ispitivanja neojačanih nosača (Serija A)

Uzorak	Maksimalno opterećenje (kN)	Maksimalni moment savijanja (kNm)	Ugib u sredini pri max. opterećenju (mm)	Ugib u sredini pri lomu (mm)	Krutost na savijanje EI (kNm ²)	Oblik loma
A1	39,4	25,2	66,7	66,7	605,8	zatezanje
A2	32,3	20,7	50,5	50,5	643,4	zatezanje
A3	45,4	29,0	66,3	66,3	729,0	zatezanje
A4	35,5	22,7	56,5	56,5	617,6	zatezanje
A5	39,0	25,0	60,1	60,1	675,9	zatezanje
A6	42,6	27,3	60,9	60,9	699,2	smicanje
A7	36,1	23,1	64,8	64,8	587,6	zatezanje
A8	32,9	21,0	53,6	53,6	612,8	zatezanje
Sr. vred.	37,9	24,3	59,9	59,9	646,4	
St. dev.	4,6	2,9	6,0	6,0	50,1	
Koef. var. (%)	12,1	12,1	10,0	10,0	7,7	

Tabela 6.2 - Rezultati eksperimentalnog ispitivanja ojačanih nosača Serije B

Uzorak	Maksimalno opterećenje (kN)	Maksimalni moment savijanja (kNm)	Ugib u sredini pri max. opterećenju (mm)	Ugib u sredini pri lomu (mm)	Krutost na savijanje EI (kNm ²)	Oblik loma
B1	64,6	41,4	100,9	100,9	797,4	zatezanje
B2	60,0	38,4	81,5	81,5	818,1	smicanje
B3	64,4	41,2	111,2	111,2	777,8	zatezanje
B4	48,4	30,9	71,0	71,0	753,4	zatezanje
B5	57,3	36,7	98,5	98,5	732,2	zatezanje / smicanje
B6	51,8	33,1	83,0	83,0	720,1	zatezanje
B7	53,4	34,2	77,6	77,6	784,8	zatezanje
B8	67,5	43,2	109,7	109,7	781,6	zatezanje / smicanje
B9	53,7	34,4	80,8	80,8	730,3	zatezanje
B10	70,1	44,9	123,5	123,5	830,8	zatezanje
Sr. vred.	59,1	37,8	93,8	93,8	772,7	
St. dev.	7,3	4,7	17,4	17,4	37,8	
Koef. var. (%)	12,4	12,4	18,6	18,6	4,9	
Povećanje (%)	56,0	56,0	56,5	56,5	19,5	

Tabela 6.3 - Rezultati eksperimentalnog ispitivanja ojačanih nosača Serije C

Uzorak	Maksimalno opterećenje (kN)	Maksimalni moment savijanja (kNm)	Ugib u sredini pri max. opterećenju (mm)	Ugib u sredini pri lomu (mm)	Krutost na savijanje EI (kNm ²)	Oblik loma
C1	69,3	44,4	99,8	99,8	957,8	smicanje
C2	64,6	41,3	109,7	109,7	882,7	smicanje
C3	72,0	46,1	115,5	124,9	916,7	pritisak
C4	53,8	34,4	81,0	81,0	860,7	zatezanje
C5	58,2	37,2	92,2	92,2	935,1	smicanje
Sr. vred.	63,5	40,7	99,6	101,5	910,6	
St. dev.	7,6	4,9	13,8	16,8	39,2	
Koef. var. (%)	11,9	11,9	13,8	16,5	4,3	
Povećanje (%)	67,7	67,7	66,3	69,4	40,9	

Tabela 6.4 - Rezultati eksperimentalnog ispitivanja ojačanih nosača Serije D

Uzorak	Maksimalno opterećenje (kN)	Maksimalni moment savijanja (kNm)	Ugib u sredini pri max. opterećenju (mm)	Ugib u sredini pri lomu (mm)	Krutost na savijanje EI (kNm ²)	Oblik loma
D1	50,8	32,5	77,9	77,9	772,7	zatezanje
D2	61,7	39,5	84,2	84,2	823,4	zatezanje / smicanje
D3	57,9	37,0	95,5	95,5	736,5	zatezanje
D4	54,7	35,0	79,6	79,6	787,2	zatezanje
D5	68,1	43,6	105,4	105,4	804,1	zatezanje / smicanje
D6	56,0	35,8	102,3	102,3	759,2	zatezanje / pritisak
Sr. vred.	58,2	37,2	90,8	90,8	780,5	
St. dev.	6,6	4,3	11,7	11,7	33,0	
Koef. var. (%)	11,4	11,4	12,8	12,8	4,2	
Povećanje (%)	53,5	53,5	51,5	51,5	20,7	

Tabela 6.5 - Rezultati eksperimentalnog ispitivanja ojačanih nosača Serije E

Uzorak	Maksimalno opterećenje (kN)	Maksimalni moment savijanja (kNm)	Ugib u sredini pri max. opterećenju (mm)	Ugib u sredini pri lomu (mm)	Krutost na savijanje EI (kNm ²)	Oblik loma
E1	39,8	25,5	64,4	64,4	681,7	zatezanje
E2	46,0	29,4	72,9	72,9	686,1	zatezanje
E3	45,6	29,2	83,1	83,1	710,5	zatezanje
E4	42,6	27,2	61,9	61,9	733,7	zatezanje
E5	50,8	32,5	81,5	89,6	777,3	zatezanje / smicanje
Sr. vred.	45,0	28,8	72,7	74,4	717,8	
St. dev.	4,1	2,6	9,6	11,9	39,2	
Koef. var. (%)	9,2	9,2	13,2	16,0	5,5	
Povećanje (%)	18,6	18,6	21,4	24,1	11,1	

Tabela 6.6 - Rezultati eksperimentalnog ispitivanja ojačanih nosača Serije F

Uzorak	Maksimalno opterećenje (kN)	Maksimalni moment savijanja (kNm)	Ugib u sredini pri max. opterećenju (mm)	Ugib u sredini pri lomu (mm)	Krutost na savijanje EI (kNm ²)	Oblik loma
F1	48,9 / 49,2	31,5	74,1 / 113,1	113,1	729,9	zatezanje
F2	41,9	26,8	69,3	69,3	695,5	zatezanje
F3	42,8	27,4	78,8	78,8	669,9	smicanje
F4	52,2 / 45,2	33,4	92,7 / 126,9	126,9	766,9	zatezanje
F5	44,9 / 46,0	29,4	61,6 / 88,6	88,6	775,9	zatezanje
Sr. vred.	46,4	29,7	88,5	95,3	727,6	
St. dev.	4,3	2,8	16,5	24,0	45,4	
Koef. var. (%)	9,3	9,3	18,6	25,2	6,2	
Povećanje (%)	22,5	22,5	55,9	59,1	12,6	

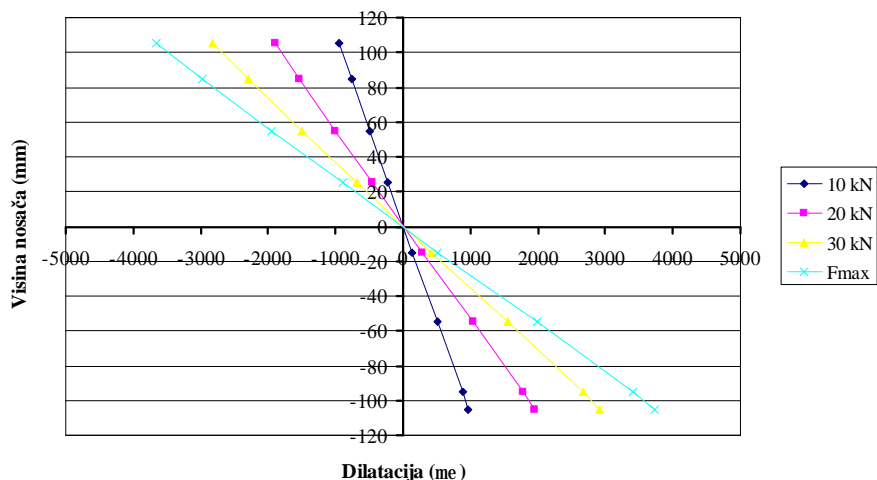
6.4 Raspodela dilatacija

Za svaki ispitani nosač, dilatacije su merene u sredini raspona koristeći merne trake, kao što je opisano u delu 5.3.2. Sve dilatacije su merene od početka do kraja ispitivanja, ali kontinualno beleženje dilatacija nije uvek bilo moguće. Pucanje drveta u zategnutoj zoni ili zbijanje drvenih vlakana u pritisnutoj zoni onemogućavalo je dalje merenje dilatacija.

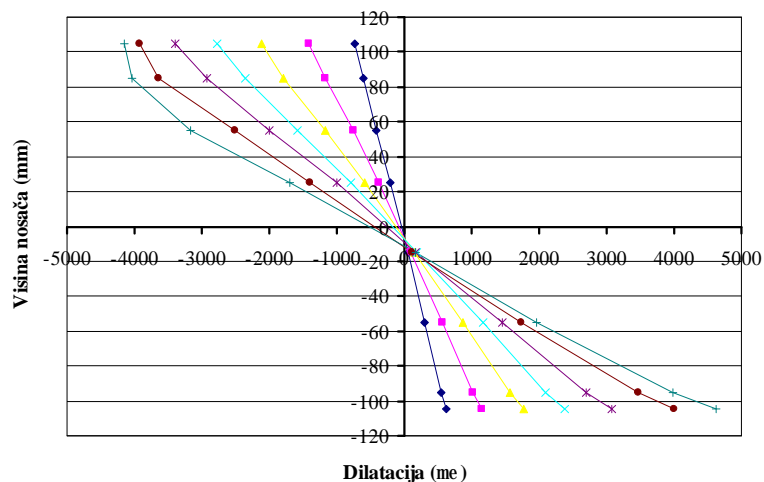
Tipični primeri raspodele dilatacija po visini poprečnog preseka za neojačane i ojačane nosače pri različitim nivoima opterećenja prikazani su na slikama 6.30-6.35. Ovi profili prikazuju dilatacije pritiska i zatezanja, kao negativne odnosno pozitivne vrednosti, na x-osi i položaj mernih traka po visini, u odnosu na sredinu poprečnog preseka, na y-osi. Za nosač Serije F koji karakteriše dve faze ponašanja (pre i posle loma drvene lamele ispod karbonske trake), na slici 6.35 date su raspodele dilatacija za karakteristične nivoe opterećenja obe faze (I i II).

Raspodela dilatacija u preseku neojačanih nosača sasvim je linearna do loma, potvrđujući na taj način pretpostavku teorije savijanja da ravni preseki pri deformaciji ostaju ravni. Vrednosti dilatacija u zategnutoj i pritisnutoj zoni bile su približno iste pri svim nivoima opterećenja. Sa porastom opterećenja nije zabeleženo pomeranje položaja neutralne ose, što potvrđuje da nije došlo do plastifikacije drveta na pritisnutoj strani.

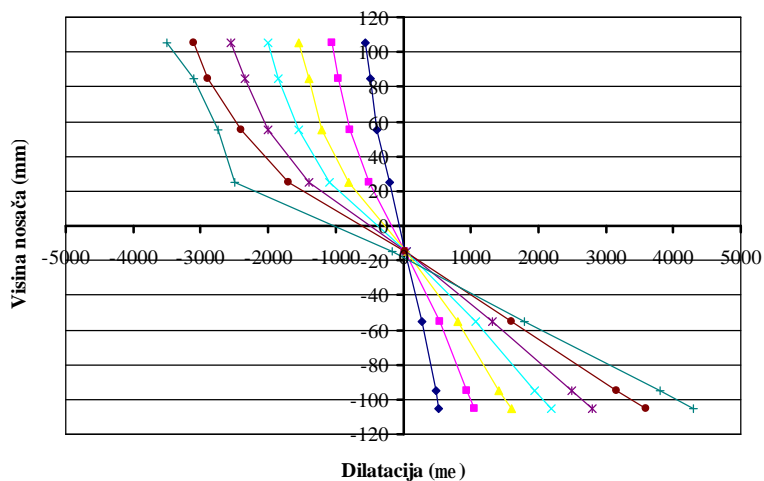
Linearna raspodela dilatacija po visini preseka vidljiva je u elastičnoj oblasti ponašanja ojačanih nosača. U slučaju nosača kod kojih je plastično ponašanje pritisnute zone dostignuto, može se primetiti nelinearna raspodela dilatacija blizu stanja loma. Kod nosača ojačanih sa dve karbonske trake na zategnutoj strani nelinearno ponašanje pritisnutog drveta je evidentno, sa vrednostima dilatacija koje su niže u pritisnutoj zoni. Usled doprinosa karbonske trake kao zategnutog elementa, neutralna osa ojačanih nosača se pomerila prema zategnutoj strani nosača. Nije zabeležena značajna varijacija u položaju neutralne ose sa porastom opterećenja i pojavom plastifikacije. Merene dilatacije na karbonskoj traci kod nosača ojačanih sa spoljašnje strane slažu se vrlo dobro sa dilatacijama izmerenim na drvenom preseku, što ukazuje da nema primetnog klizanja između drvene podloge i karbonske trake.



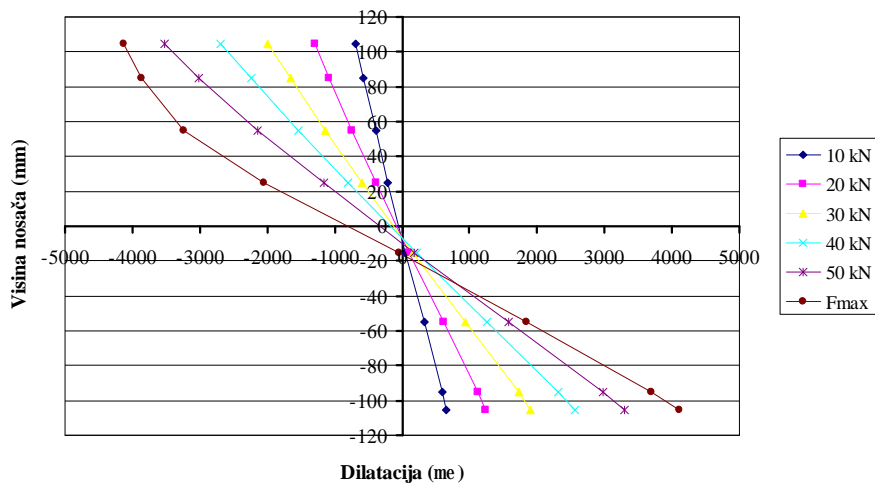
Slika 6.30 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za neojačani nosač A5



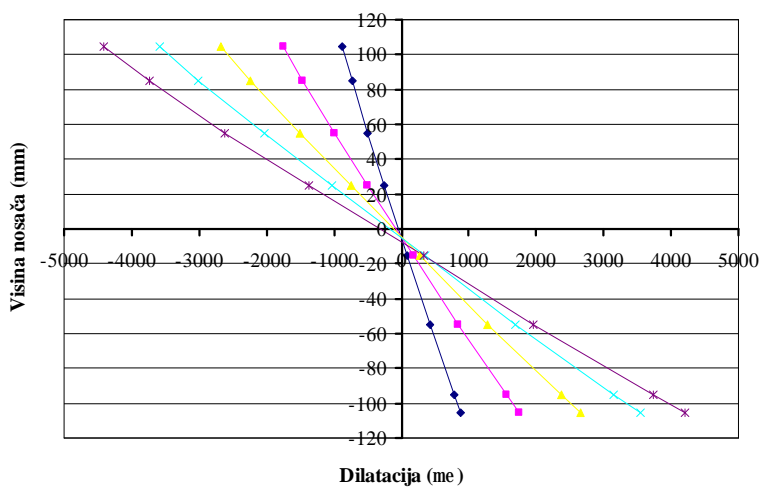
Slika 6.31 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za ojačani nosač B1



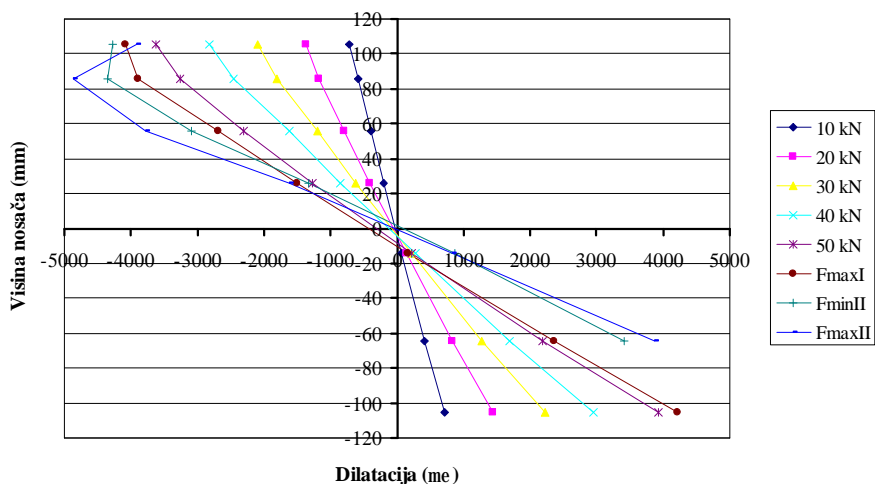
Slika 6.32 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za ojačani nosač C1



Slika 6.33 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za ojačani nosač D6



Slika 6.34 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za ojačani nosač E2



Slika 6.35 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za ojačani nosač F4

Ojačani nosači su pokazali znatno poboljšanje u dilatacijama. Na osnovu profila prikazanih na slikama 6.30-6.35 može se zaključiti da su pri istom nivou opterećenja dilatacije zatezanja kod ojačanih nosača znatno manje nego kod neojačanih nosača. Na primer, dilatacije zatezanja nosača B1, ojačanog jednom karbonskom trakom sa donje strane, su iznosile 73% vrednosti dilatacija neojačanog nosača A5 pri opterećenju od 39,0 kN (lom nosača A5). S druge strane, prisustvo karbonskog ojačanja smanjuje uticaj defekata u drvetu i omogućava povećanje maksimalne dilatacije zatezanja drveta. U tabeli 6.7 date su prosečne vrednosti dilatacija zatezanja pri lomu za sve serije ispitanih nosača. U slučajevima da je zbog pojave pukotina došlo do otkazivanja merne trake na donjoj ivici nosača, dilatacije su izračunate na osnovu merenja drugih mernih traka i pretpostavke linearne raspodele dilatacija po visini.

Tabela 6.7 - Merene prosečne vrednosti dilatacije zatezanja u drvetu pri lomu

Test serija	Dilatacija zatezanja (%)	Povećanje (%)
A	0,368	-
B	0,453	23,1
C	0,462	25,5
D	0,459	24,8
E	0,422	14,6
F	0,452	22,7

Povećanje dilatacija zatezanja pri lomu ojačanih u odnosu na neojačane nosače bilo je u oblasti 15-25%. Nosači sa horizontalno postavljenim ojačanjem imali su veće dilatacije zatezanja pri lomu u odnosu na one kod kojih je ojačanje bilo u vertikalnom položaju. Ovo potvrđuje da efekat premošćavanja lokalnih defekata i ograničavanja lokalnih oštećenja drveta pre svega zavisi od izabrane dispozicije ojačanja. Povećanje procenta ojačanja u dispoziciji sa spoljašnjom primenom karbonskih traka nije dovelo do značajnijeg povećanja dilatacija zatezanja pri lomu. Razlog leži u činjenici da je veća površina ojačanja u okviru poprečnog preseka nosača izloženih savijanju rezultovala smicanjem kao dominantnim oblikom loma, što je onemogućilo da drvena vlakna dostignu njihovu graničnu vrednost dilatacije.

Pored poboljšanja u dilatacijama zatezanja, merenja su pokazala da se bolje iskorišćenje materijala u pritiskutoj zoni drveta u odnosu na neojačani nosač može

postići postavljanjem karbonskog ojačanja u zategnutoj zoni nosača. Ojačanje omogućava veće dilatacije u pritisnutoj zoni zahvaljujući većem rastojanju pritisnutih vlakana od neutralne ose.

Merene prosečne vrednosti dilatacija u karbonskim trakama kod nosača ojačanih sa spoljašnje strane, zajedno sa odgovarajućim vrednostima napona dati su u tabeli 6.8. Naponi zatezanja u karbonskim trakama su izračunati koristeći vrednosti očitane sa mernih traka i vrednost modula elastičnosti CFRP materijala ($E = 165543$ MPa). U svim ojačanim nosačima, naponi zatezanja u karbonskim trakama pri lomu nosača ostali su dosta ispod granične čvrstoće ($f_t = 2846$ MPa). Prosečna vrednost napona zatezanja pri lomu u karbonskoj traci za nosače ojačane sa jednom karbonskom trakom (Serija B) bila je 748 MPa, ili 26% granične vrednosti, dok je isti parametar za nosače ojačane sa dve karbonske trake (Serija C) iznosio 788 MPa, odnosno 28% od granične vrednosti. Ovo pokazuje efektivnost ojačanja u smislu iskorišćenja CFRP materijala.

Tabela 6.8 - Merene prosečne vrednosti napona i dilatacija u karbonskim trakama pri lomu

Test serija	Procenat ojačanja (%)	Dilatacija zatezanja (%)	Napon zatezanja (MPa)
B	0,46	0,452	748
C	0,93	0,476	788
D	0,46	0,463	766

6.5 Diskusija rezultata

6.5.1 Efekat ojačanja

Kod većine nosača granični lom dogodio se usled zatezanja pri savijanju, jer uzorci nisu bili previše ojačani na zategnutoj strani kako bi se izazvao čist lom usled pritiska. Smičući lom je, takođe, zabeležen kod nekoliko nosača. Događaji koji vode do loma u velikoj meri zavise od površine i položaja karbonske trake. Ojačanje utiče na plastično ponašanje nosača, koje inače nije toliko dominantno zbog niske čvrstoće drveta na zatezanje. Neojačani nosači su popustili usled zatezanja pre pojave ikakve plastifikacije pritisnute zone. Primena ojačanja u zategnutoj zoni poboljšava kapacitet

drveta na zatezanje i sprečava prerano pucanje vlakana usled zatezanja. Sa povećanjem opterećenja dolazi do progresivnog kolapsa najudaljenijih drvenih vlakna u pritisnutoj zoni usled zbijanja, što rezultira globalnim plastičnim ponašanjem nosača. Ovo se dešava zbog činjenice da plastifikacija drveta omogućava značajnu duktilnost i da ova pojava nije nagla kao što je to lom usled zatezanja.

Pored povećanja duktilnosti, sve intervencije rezultovale su poboljšanjem nosivosti i krutosti. Takođe, eksperimentalni rezultati su pokazali da uvođenje ojačanja u poprečni presek, generalno, redukuje varijabilnost rezultata. Kapacitet nosivosti je uslovljen oblikom loma, prisustvom imperfekcija u kritičnim zonama, kao i položajem ojačanja. Krutost zavisi od položaja ojačanja i u najvećoj meri od procenta ojačanja.

6.5.2 Efekat dispozicije ojačanja

Položaj ojačanja u okviru zategnute zone je veoma važan u pogledu nosivosti, krutosti i deformabilnosti nosača. Postavljanjem karbonskih traka što dalje od težišta preseka vodi ka većem povećanju nosivosti i krutosti. S druge strane, postavljanje karbonske trake unutar preseka, između lamela, rezultuje većom deformabilnošću u odnosu na slučaj kada se ista karbonska traka postavi na donju, spoljašnju, stranu nosača. Objašnjenje leži u mehanizmu loma. Lom lamele ispod karbonske trake uslovljava da se dati nosač dalje ponašanje kao nosač sa manjom visinom, ali sa većim procentom ojačanja.

Horizontalno postavljene karbonske trake su povoljnije u smislu mehaničkog ponašanja nosača kada se uporede sa vertikalno postavljenim trakama. Vertikalni položaj trake rezultuje znatno krtime lomom, jer ne omogućava dovoljnu plastifikaciju u pritisnutoj zoni. Pozitivan efekat izazvan prisustvom ojačanja nije dovoljan da ograniči lokalna oštećenja i premosti lokalne defekte. Pored ovoga, prerez za smeštaj karbonske trake usečen u nosačima proizvodi neka ograničena oštećenja.

Uticaj dodatnih karbonskih tkanina u sistemu sa jednom karbonskom trakom postavljenom sa donje strane nosača nije primetan. Nosači ojačani na ovaj način ponašaju su se gotovo istovetno kao i nosači ojačani samo sa karbonskom trakom.

6.5.3 Efekat procenta ojačanja

Efekat procenta ojačanja je, takođe, važan faktor za globalno ponašanje nosača. Povećanje krutosti je proporcionalno procentu ojačanja, jer povećanje površine ojačanja suštinski znači uvođenje krućeg materijala u poprečni presek. Međutim, isto ne važi i za povećanje nosivosti. Kada procenat ojačanja raste, oblik loma se pomera od uobičajenog loma usled savijanja ka lomu usled smicanja. Zbog činjenice da veći procenat ojačanja čini nosač krućim, drvena vlakna teže dostižu vrednosti svojih graničnih dilatacija. Sa povećanjem opterećenja, napon smicanja raste i dostiže graničnu vrednost, što na kraju rezultira lomom. Stoga, ako se želi povećanje nosivosti, dodatno ojačanje na smicanje mora biti uključeno u poprečni presek.

Radi postizanja efikasnije upotrebe karbonskih traka u dispoziciji sa većim procentom ojačanja, veoma je važno dodatno obezbeđenje sidrenja krajeva trake. U ovom kontekstu, nekoliko šema za sidrenje (stege, zavrtnji, trake U oblika, obmotavanje tkaninom u blizini kraja trake) mogu se primeniti i analizirati njihov efekat na kapacitet na savijanje i oblik loma ojačanih nosača. Verovatno da bi poboljšanje kapaciteta smicanja nosača sa dve karbonske trake postavljene na zategnutoj strani rezultovalo sa više uzoraka koji imaju primarni oblik loma u pritisnutoj zoni.

6.5.4 Efekat lepljenog spoja

Oblici loma i eksperimentalni rezultati pokazali su odlične karakteristike spoja drvo-karbonska traka, pri čemu su karakteristike drveta uglavnom odgovorne za kritične događaje koji su doveli do loma. Ovo znači da je lepak prilično uspešan u prenošenju opterećenja na ojačanje. Procena stepena efikasnosti upotrebljenih epoksidnih lepкова (u svrhu poređenja) nije mogla biti realizovana u okviru ovog rada, jer je potrebna sofisticiranija merna oprema, kao i više usresređeno istraživanje karakteristika lepka. Generalno, efikasnost oba primenjena lepka je bila dobra za kratkotrajno dejstvo opterećenja, jer nije postojao nijedan slučaj loma po lepku. Ponašanje pri dugotrajnim opterećenjima je svakako nešto što treba da bude predmet daljih istraživanja.

7. ANALITIČKI PRORAČUN

Zbog kompleksnosti drveta kao materijala, proračun drvenih konstrukcija se obično sprovodi prema teoriji dopuštenih napona. Ovo podrazumeva da se ponašanje drveta predstavi jednostavnim linearno-elastičnim modelom i da lom drvenih elementa izloženih savijanju uvek nastaje usled zatezanja. Međutim, ojačanjem kompozitnim materijalima veza napon-dilatacija u poprečnom preseku se menja, pa prema tome plastično ponašanje drveta u pritisnutoj zoni, kao i mogućnost loma usled pritiska treba uzeti u razmatranje pri proračunu. Stoga, nelinearnost drveta mora biti prisutna u analitičkom modelu tako da što tačnije odgovara ponašanju ojačanih drvenih nosača.

Razvoj proračunskog modela kojim se može odrediti krutost i granična nosivost ojačanih nosača je ključan za optimalnu upotrebu kompozitnih materijala, kao i za njihovu širu primenu.

7.1 Konstitutivni modeli za materijale

Analiza nelinearnog ponašanja ojačanih nosača od lepljenog lameliranog drveta zahteva definisanje veze napon-dilatacija za drvo pri zatezanju i pri pritisku. Generalno, konstitutivno ponašanje drveta može se opisati kroz različite modele (tabela 7.1), koje karakteriše različit stepen aproksimacije. Zajedničko za sve modele je sledeće:

- Ponašanje pri aksijalnom zatezanju je linearno-elastično do loma, pa se može predstaviti pravolinijskim dijagramom napon-dilatacija, sa konstantnim nagibom. Za vrednost graničnog napona, neposredno je određena vrednost granične dilatacije i obrnuto.

- Ponašanje pri aksijalnom pritisku je linearno do granice elastičnosti, posle čega slede plastične deformacije. Početno ponašanje se može predstaviti pravolinijskim dijagramom napon-dilatacija, sa konstantnim nagibom.
- Modul elastičnosti predstavlja nagib linearnog dela dijagrama napon-dilatacija, kako pri zatezanju, tako i pri pritisku.

Tabela 7.1 - Konstitutivni modeli za drvo i lepljeno lamelirano drvo [5]

1. Elasto-plastični model	
Analitički izraz	Dijagram
$s = E_w \cdot e \quad \text{za } e_{cy} < e < e_{tu}$ $s = f_c \quad \text{za } e < e_{cy}$ <p style="text-align: right;">(7.1)</p>	
2. Bazan-Buchanan model	
Analitički izraz	Dijagram
$s = E_w \cdot e \quad \text{za } e_{cy} < e < e_{tu}$ $s = f_c + m \cdot E_w \cdot (e - e_{cy}) \quad \text{za } e < e_{cy}$ <p style="text-align: right;">(7.2)</p>	
3. O'Halloran model	
Analitički izraz	Dijagram
$s = E_w \cdot e \quad \text{za } 0 < e < e_{tu}$ $s = A \cdot e ^n + E_w \cdot e \quad \text{za } e_{cu} < e < 0$ <p style="text-align: right;">(7.3)</p>	

U odnosu na plastično ponašanje pri pritisku, tri konstitutivna modela prikazana u tabeli 7.1 zahtevaju posebno razmatranje. Model 1 je vrlo jednostavan, ograničavajući dijagram napon-dilatacija na oblik trougao-pravougaonik. Uprkos pojednostavljenju, ovaj model je široko primenjen. Model 2 je znatno potpuniji nego prethodni, bez gubljenja prednosti jednostavnosti u pogledu linearnosti. Teškoća predstavlja definisanje koeficijenta $m < 1$, koji karakteriše nagib plastičnog dela sa negativnim ojačanjem (razmekšanje). Model 3, u odnosu na navedene modele, daje najbolji opis stvarnog ponašanja drveta, ali je najkomplicovaniji. Za definisanje ovog modela neophodno je definisati dva parametra $A > 0$ i $n > 0$.

CFRP materijal se može idealizovati linearno-elastičnim modelom sa krtnim oblikom loma. Dijagram napon-dilatacija, kao i analitički izraz dati su tabeli 7.2.

Tabela 7.2 - Konstitutivni model za CFRP kompozite

Linearno-elastični model	
Analički izraz	Dijagram
$s = E_f \cdot e \quad \text{za } e_{cu} < e < e_{tu} \quad (7.4)$	

7.2 Oblici loma

Različiti oblici loma neojačanih i ojačanih nosača od lepljenog lameliranog drveta su mogući. Oblici loma zavise pre svega od karakteristika materijala, položaja ojačanja u okviru poprečnog preseka, kao i od procenta ojačanja. Takođe, oblici loma su uslovljeni prisustvom kvrga i drugih imperfekcija drveta. Ovi faktori se obično ne uzimaju u razmatranje prilikom modeliranja, već se njihov uticaj u proračun uvodi kroz korekzione koeficijente vezane za čvrstoću materijala. U daljem tekstu navedeni su mogući oblici loma.

Lom u zategnutom delu drvenog preseka

Lom u zategnutom delu drvenog preseka je najčešći oblik loma u drvenim konstrukcijama. Ovaj oblik loma je krt, jer drvo nema kapacitet plastičnog ponašanja pri zatezanju. Granično stanje drveta pri zatezanju se smatra da je dostignuto kada je maksimalni normalni napon u zategnutoj zoni jednak čvrstoći drveta na zatezanje. Odnosno, nosač se razmatra da je doživeo kolaps kada je dilatacija zatezanja u ivičnom drvenom vlaknu dostigla granični nivo.

Dva oblika loma mogu se identifikovati u zategnutoj zoni zavisno od stepena plastifikacije pritisnutog dela nosača:

- Lom drveta u zategnutoj zoni dok je poprečni presek u linearno-elastičnom stanju. Ovaj lom se događa kada je napon u ivičnom drvenom vlaknu u zategnutoj zoni dostigao graničnu vrednost, a pritisnuta zona je i dalje u linearno-elastičnoj oblasti ponašanja. Ovaj oblik loma je karakterističan za neojačane nosače kod kojih je čvrstoća na zatezanje manja od čvrstoće na pritisak. Lom je izuzetno krt.
- Lom drveta u zategnutoj zoni dok je poprečni presek u elastično-plastičnom stanju. Ovaj lom se javlja kada napon u ivičnom drvenom vlaknu u zategnutoj zoni dostiže graničnu vrednost posle izvesne plastifikacije u pritisnutoj zoni, pri čemu u pritisnutoj zoni nisu dostignute granične dilatacije pritiska. Ovo je najčešći oblik loma i karakterističan je za nosače ojačane samo u zategnutoj zoni. Bez obzira na izvestan stepen duktilnosti u globalnom ponašanju, drvena vlakna lokalno pucaju usled zatezanja što čini oblik loma krtim.

Lom u pritisnutom delu drvenog nosača

Lom u pritisnutom delu drvenog nosača je vrlo redak oblik loma kod neojačanih, ali kada se nosač ojača u zategnutom delu, ovaj oblik loma se može češće javljati. Granično stanje drveta pri pritisku smatra se da je dostignuto kada maksimalna dilatacija u pritisnutoj zoni dosegne vrednost granične dilatacije pritiska.

U toku eksperimentalnih istraživanja identifikovan je jedan oblik loma na pritisnutoj strani:

- Lom drveta u pritisnutoj zoni pre konačnog kolapsa nosača u zategnutoj zoni. Ovo se događa kod nosača sa većim procentom ojačanja u zategnutoj zoni. Ponašanje nosača je prilično duktilno usled plastične deformacije u pritisnutoj zoni.

Lom drveta usled smicanja

Smičući lom drveta je oblik loma koji se češće događa kod ojačanih nosača. Ojačanje nosača u zategnuto zoni i veliki kapacitet drveta u pritisnutoj zoni mogu pomeriti lom ka smicanju. Ovaj oblik loma se javlja kada smičući napon dostigne graničnu čvrstoću drveta na smicanje. Takođe, kod nosača sa većim procentom ojačanja lom smicanjem javlja se u zoni sidrenja ojačanja usled koncentracije smičućih napona. Lom je izrazito krt.

Lom ojačanja

Napon u ojačanju može biti znatno veći od napona u drvetu usled razlike u modulu elastičnosti. Što materijal ojačanja ima veću krutost, to može navući na sebe veće napone. Stoga, moguće je da ojačanje dostigne svoj granični kapacitet pre drveta. U toj situaciji krto ojačanje doživljava iznenadni kolaps.

Lom lepka

Lepak igra značajnu ulogu u prenosu napona sa drveta na ojačanje. Na mesta sidrenja, gde se sile praktično unose u ojačanje, postoji šansa za lom lepka. Lom lepka se može, takođe, javiti u blizini prvih pukotina u drvetu, usled naglog prenošenja opterećenja na ojačanje.

7.3 Teorijski model

Inspirisani rafiniranim računskim modelima za armirani beton, mnogi autori su predložili različite računске modele za ojačane drvene nosače [3, 15, 36, 38, 42, 47, 51]. Većina ovih modela uzima u obzir realno ponašanje materijala, a kapacitet nosivosti se određuje u zavisnosti od mogućih oblika loma. Na osnovu datih istraživanja, teorijski model je razvijen u cilju predviđanja ponašanja kako ojačanih, tako i neojačanih nosača. Analitički rezultati su zatim upoređeni sa eksperimentalnim.

Osnovne pretpostavke i uprošćenja usvojenog modela:

- Efekti smicanja se zanemaruju, samo efekti savijanja se razmatraju. Poprečni preseči pri deformaciji ostaju ravni;

- Ostvareni spojevi lepkom su idealni. Nema klizanja između lepka i susednih drvenih lamela, kao i između karbonske trake, lepka i drveta;
- Elastična svojstva lepka se zanemaruju;
- Sve drvene lamele imaju isti modul elastičnosti;
- Ponašanje drveta je linearno-elastično pri zatezanju i elasto-idealno plastično pri pritisku (model 1, tabela 7.1);
- Ponašanje karbonske trake pri zatezanju je linearno-elastično (tabela 7.2);
- Lom nastaje kada ivična vlakna dostignu graničnu vrednost napona ili dilatacija; Uticaj slabljenja poprečnog preseka usled plastičnog tečenja na kapacitet nosivosti se zanemaruje;
- Prisustvo kvrga i drugih imperfekcija u drvetu se ne uzima u obzir;
- Deformacije van ravni i efekat trajanja opterećenja se zanemaruju.

Eksperimentalna ispitivanja su pokazala da je najčešći mehanizam loma onaj pri kome se javlja lom drveta u zategnutoj zoni, sa ili bez delimične plastifikacije pritisnute zone, kako za neojačane, tako i za ojačane nosače. Lom u zategnutoj zoni nastaje kada ivična drvena vlakna dostignu graničnu čvrstoću f_t , odnosno graničnu dilataciju ε_{tu} . Dilatacije u pritisnutoj zoni su ograničene graničnom dilatacijom pritiska ε_{cu} . Drvo se ponaša linearno-elastično do dostizanja dilatacije ε_{cy} . Lom u CFRP ojačanju nije razmatran zbog visoke čvrstoće na zatezanje karbonske trake, kao i zbog izostanka ovog tipa loma u eksperimentalnom istraživanju.

Model u osnovi simulira globalno ponašanje pri postepenom prirastu dilatacija. Za određenu dilataciju ivičnih zategnutih vlakana drveta, stanje napona/dilatacija se računa i poredi sa njihovim graničnim vrednostima, uzimajući u obzir efekat plastifikacije drveta. Ako stanje napona/dilatacija ne vodi ka lomu, mali inkrement dilatacije se dodaje. Ova procedura se nastavlja do pojave loma. Na osnovu raspodele napona i dilatacija u okviru poprečnog preseka, moment savijanja se određuje koristeći uslov ravnoteže unutrašnjih sila u odnosu na, recimo, neutralnu osu.

U svrhu pojednostavljenja, modeliranje je izvršeno kroz dve faze, zavisno od toga da li je došlo do plastifikacije drvenog preseka:

1. Linearno-elastična faza. U okviru ove faze svi materijali u poprečnom preseku su u linearno-elastičnom stanju bez ikakve plastifikacije. Globalno ponašanje nosača je

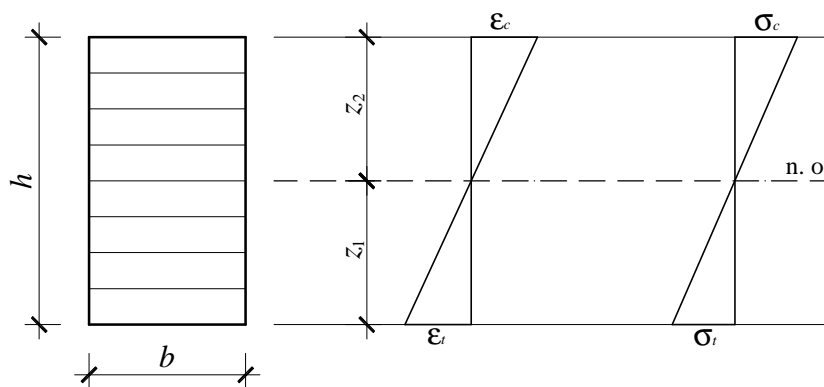
linearno. Položaj neutralne ose se može odrediti koristeći konvencionalni metod transformisanog poprečnog preseka.

2. Plastična faza. U okviru ove faze drvo je u plastičnoj fazi. Dilatacije pritiska u drvetu su iznad granice elastičnosti, ali ispod granične vrednosti. Kao što je definisano konstitutivnim modelom, kada dilatacije pritiska pređu granicu elastičnosti javlja se plastifikacija pritisnute zone i naponi pritiska ne mogu više rasti. Ovo prouzrokuje pomeranje neutralne ose tako da uslovi ravnoteže budu zadovoljeni.

7.3.1 Neojačani nosači

Linearno-elastična faza

Ponašanje neojačanog nosača je linearno-elastično do dostizanja dilatacije plastičnog tečenja ε_{cy} na gornjoj ivici preseka, ukoliko pre toga nije došlo do loma usled dostizanja granične vrednosti napona zatezanja na donjoj ivici preseka σ_{tu} . Idealizovana raspodela dilatacija i napona po visini neojačanog nosača pravougaonog preseka, visine h i širine b , prikazana je slici 7.1.



Slika 7.1 - Raspodela dilatacija i napona u okviru elastične faze

Kada je nosač u linearnoj oblasti, položaj neutralne ose je u sredini poprečnog preseka, tj:

$$z_1 = z_2 = h/2, \quad (7.5)$$

gde je:

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice nosača;

z_2 - udaljenje neutralne ose od gornje ivice nosača;

h - visina nosača.

Ivični naponi se mogu odrediti prema izrazu:

$$s_t = s_c = \frac{M}{W} = \frac{6M}{bh^2}, \quad (7.6)$$

gde je:

s_t - napon zatezanja na donjoj ivici nosača;

s_c - napon pritiska na gornjoj ivici nosača;

M - moment savijanja;

W - otporni moment poprečnog preseka;

b - širina nosača;

h - visina nosača.

Poznavajući dilataciju ε_t , odgovarajuća vrednosti napona σ_t se može izračunati prema usvojenoj vezi između napona i dilatacija:

$$s_t = E_w \cdot e_t, \quad (7.7)$$

gde je:

s_t - napon zatezanja na donjoj ivici nosača;

E_w - modul elastičnosti drveta;

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici nosača.

Koristeći izraz (7.6) moment savijanja M se može izračunati prema izrazu:

$$M = \frac{bh^2}{6} \cdot s_t, \quad (7.8)$$

gde je:

b - širina poprečnog preseka nosača;

h - visina nosača;

s_t - napon zatezanja na donjoj ivici nosača.

Krivina se može izračunati prema izrazu:

$$f = e_t / z_1, \quad (7.9)$$

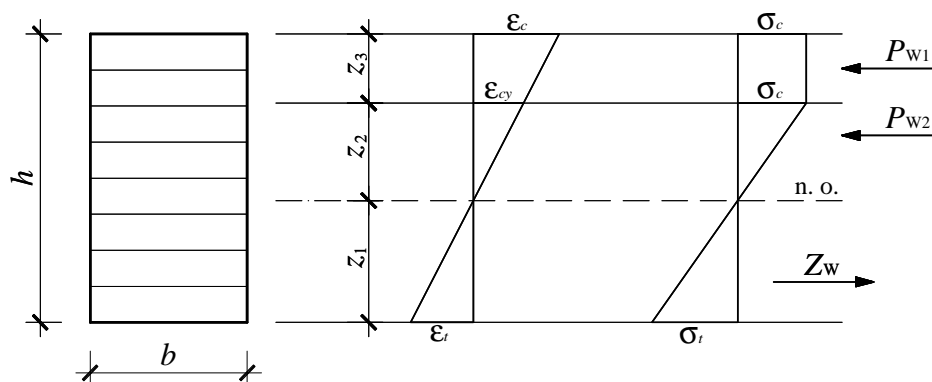
gde je:

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici nosača;

z_1 - visina zategnute zone.

Plastična faza

Ponašanje neojačanog nosača je plastično od dostizanja dilatacije tečenja drveta ϵ_{cy} na gornjoj ivici preseka do loma dostizanjem granične vrednosti napona zatezanja na donjoj ivici preseka σ_{lu} . Idealizovana raspodela dilatacija i napona po visini neojačanog nosača pravougaonog preseka, visine h i širine b , prikazana je slici 7.2.



Slika 7.2 - Raspodela dilatacija i napona u okviru plastične faze

Poznavajući dilatacije ϵ_t i ϵ_{cy} iz uslova kompatibilnosti može se odrediti dilatacija ϵ_c :

$$e_c = (z_3 + z_2) / z_2 \cdot e_{cy} \quad (7.10)$$

sa

$$z_2 = (e_{cy} / e_t) \cdot z_1, \quad (7.11)$$

$$z_3 = h - (z_1 + z_2), \quad (7.12)$$

gde je:

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici nosača;

e_{cy} - dilatacija plastičnog tečenja drveta;

e_c - dilatacija pritiska na gornjoj ivici nosača;

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice nosača;

z_2 - udaljenje neutralne ose od zone plastifikacije drvenog preseka;

z_3 - visina zone plastifikacije drvenog preseka;

h - visina nosača.

Za poznate vrednosti dilatacija, odgovarajuće vrednosti napona u poprečnom preseku se mogu izračunati prema usvojenim vezama napon-dilatacija:

$$s_t = E_w \cdot e_t, \quad (7.13)$$

$$s_c = E_w \cdot e_{cy} = f_c, \quad (7.14)$$

gde je:

s_t - napon zatezanja na donjoj ivici nosača;

s_c - napon pritiska u okviru zone plastifikacije drvenog preseka;

E_w - modul elastičnosti drveta;

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici nosača;

e_{cy} - dilatacija plastičnog tečenja drveta;

f_c - čvrstoća drveta na pritisak.

Položaj neutralne ose određuje se iz uslova ravnoteže unutrašnjih sila u pravcu podužne ose nosača:

$$P_{w1} + P_{w2} = Z_w, \quad (7.15)$$

pri čemu su unutrašnje sile definisane u skladu sa dijagramom napona u poprečnom preseku, i to sile u pritisnutoj zoni kao:

$$P_{w1} = (z_3 \cdot b) \cdot s_c, \quad (7.16)$$

$$P_{w2} = (0,5 \cdot z_2 \cdot b) \cdot s_c, \quad (7.17)$$

a sila u zategnutoj zoni kao:

$$Z_w = (0,5 \cdot z_1 \cdot b) \cdot s_t, \quad (7.18)$$

gde je:

z_1 - visina zategnute zone;

z_2 - visina pritisnute zone umanjena za visinu zone plastifikacije drvenog preseka;

z_3 - visina zone plastifikacije drvenog preseka;

b - širina nosača;

S_t - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

S_c - napon pritiska u okviru zone plastifikacije drvenog preseka.

Rezultujući moment savijanja M može se izračunati kao suma momenata unutrašnjih sila oko neutralne ose:

$$M = \left(\frac{2}{3} z_1\right) \cdot Z_w - \left(z_2 + \frac{z_3}{2}\right) \cdot P_{w1} - \left(\frac{2}{3} z_2\right) \cdot P_{w2}, \quad (7.19)$$

gde je:

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice drvenog preseka;

z_2 - udaljenje neutralne ose od zone plastifikacije drvenog preseka;

z_3 - visina zone plastifikacije drvenog preseka; a

P_{w1} , P_{w2} , Z_w su unutrašnje sile definisane izrazima (7.16) - (7.18).

Krivina se može izračunati prema izrazu:

$$f = e_t / z_1, \quad (7.20)$$

gde je:

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici nosača;

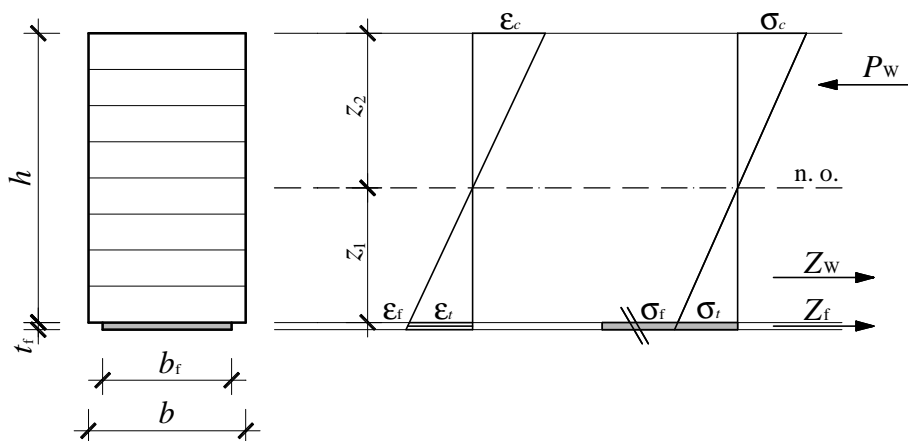
z_1 - visina zategnute zone.

7.3.2 Nosači ojačani karbonskom trakom postavljenom sa spoljašnje strane

Linearno-elastična faza

Ponašanje ojačanog nosača je linearno-elastično do dostizanja dilatacije plastičnog tečenja drveta ε_{cy} na gornjoj ivici preseka, ukoliko pre toga nije došlo do loma usled dostizanja granične vrednosti napona zatezanja na donjoj ivici drvenog

preseka σ_{tu} . Idealizovana raspodela dilatacija i napona po visini neojačanog nosača pravougaonog preseka, visine h i širine b , prikazana je slici 7.3.



Slika 7.3 - Raspodela dilatacija i napona u okviru elastične faze

Poznavajući dilataciju ϵ_f , iz uslova kompatibilnosti mogu se odrediti karakteristične dilatacije u poprečnom preseku:

$$e_c = z_2 / z_1 \cdot e_f, \quad (7.21)$$

$$e_f = (z_1 + t_f / 2) / z_1 \cdot e_t, \quad (7.22)$$

sa

$$z_2 = h - z_1, \quad (7.23)$$

gde je:

e_f - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

e_c - dilatacija pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka;

e_f - dilatacija zatezanja u karbonskoj traci;

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice drvenog preseka;

z_2 - udaljenje neutralne ose od gornje ivice drvenog preseka;

t_f - debljina karbonske trake;

h - visina nosača.

Za poznate vrednosti dilatacija, odgovarajuće vrednosti napona u poprečnom preseku se mogu izračunati prema usvojenim vezama napon-dilatacija:

$$s_t = E_w \cdot e_t, \quad (7.24)$$

$$s_c = E_w \cdot e_c, \quad (7.25)$$

$$s_f = E_f \cdot e_f, \quad (7.26)$$

gde je:

s_t - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

s_c - napon pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka;

s_f - napon zatezanja u karbonskoj traci;

E_w - modul elastičnosti drveta;

E_f - modul elastičnosti karbonske trake;

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

e_c - dilatacija pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka;

e_f - dilatacija zatezanja u karbonskoj traci.

Položaj neutralne ose određuje se iz uslova ravnoteže unutrašnjih sila u pravcu podužne ose nosača:

$$P_w = Z_w + Z_f, \quad (7.27)$$

pri čemu su unutrašnje sile definisane u skladu sa dijagramom napona u poprečnom preseku, i to sila u pritisnutoj zoni kao:

$$P_w = (0,5 \cdot z_2 \cdot b) \cdot s_c, \quad (7.28)$$

a sile u zategnutoj zoni kao:

$$Z_w = (0,5 \cdot z_1 \cdot b) \cdot s_t, \quad (7.29)$$

$$Z_f = (b_f \cdot t_f) \cdot s_f, \quad (7.30)$$

gde je:

z_1 - visina zategnute zone;

z_2 - visina pritisnute zone;

b - širina nosača;

b_f - širina karbonske trake;

t_f - debljina karbonske trake;

s_t - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

s_c - napon pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka;

s_f - napon zatezanja u karbonskoj traci.

Rezultujući moment savijanja M može se izračunati kao suma momenata unutrašnjih sila oko neutralne ose:

$$M = \left(\frac{2}{3} z_1\right) \cdot Z_w + \left(z_1 + \frac{t_f}{2}\right) \cdot Z_f - \left(\frac{2}{3} z_2\right) \cdot P_w, \quad (7.31)$$

gde je:

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice drvenog preseka;

z_2 - udaljenje neutralne ose od gornje ivice drvenog preseka;

t_f - debljina karbonske trake; a

P_w , Z_w , Z_f su unutrašnje sile definisane izrazima (7.28) - (7.30).

Krivina se može izračunati prema izrazu:

$$f = e_t / z_1, \quad (7.32)$$

gde je:

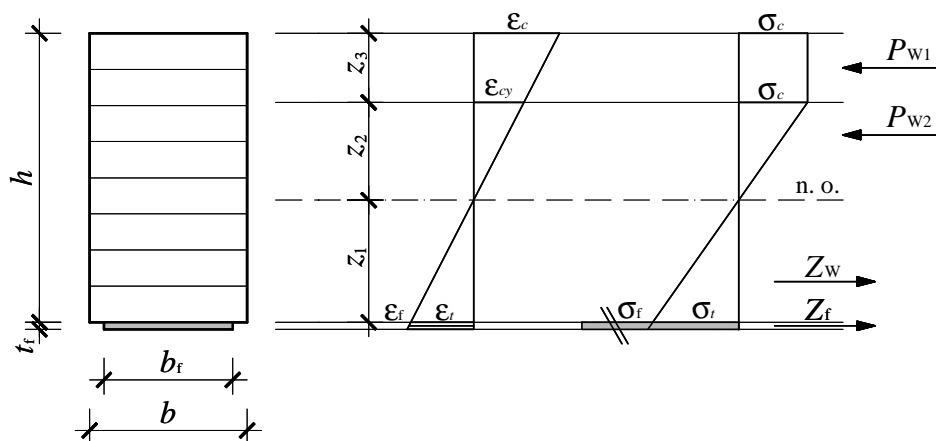
e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

z_1 - visina zategnute zone.

Plastična faza

Ponašanje ojačanog nosača je plastično od dostizanja dilatacije tečenja drveta ε_{cy} na gornjoj ivici preseka do loma dostizanjem granične vrednosti napona zatezanja na donjoj ivici preseka σ_{tu} , ukoliko pre toga nije došlo do loma usled dostizanja granične dilatacije pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka ε_{cu} . Idealizovana raspodela dilatacija

i napona po visini neojačanog nosača pravougaonog preseka, visine h i širine b , prikazana je slici 7.4.



Slika 7.4 - Raspodela dilatacija i napona u okviru plastične faze

Poznavajući dilatacije ε_t i ε_{cy} , iz uslova kompatibilnosti mogu se odrediti karakteristične dilatacije u poprečnom preseku:

$$e_c = (z_3 + z_2) / z_2 \cdot e_{cy}, \quad (7.33)$$

$$e_f = (z_1 + t_f / 2) / z_1 \cdot e_t \quad (7.34)$$

sa:

$$z_2 = (e_{cy} / e_t) \cdot z_1, \quad (7.35)$$

$$z_3 = h - (z_1 + z_2), \quad (7.36)$$

gde je:

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

e_{cy} - dilatacija plastičnog tečenja drveta;

e_c - dilatacija pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka;

e_f - dilatacija zatezanja u karbonskoj traci;

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice drvenog preseka;

z_2 - udaljenje neutralne ose od zone plastifikacije drvenog preseka;

z_3 - visina zone plastifikacije drvenog preseka;

t_f - debljina karbonske trake;

h - visina nosača.

Za poznate vrednosti dilatacija, odgovarajuće vrednosti napona u poprečnom preseku se mogu izračunati prema usvojenim vezama napon-dilatacija:

$$s_t = E_w \cdot e_t, \quad (7.37)$$

$$s_c = E_w \cdot e_{cy} = f_c, \quad (7.38)$$

$$s_f = E_f \cdot e_f, \quad (7.39)$$

gde je:

s_t - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

s_c - napon pritiska u okviru zone plastifikacije drvenog preseka;

s_f - napon zatezanja u karbonskoj traci;

E_w - modul elastičnosti drveta;

E_f - modul elastičnosti karbonske trake;

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

e_{cy} - dilatacija plastičnog tečenja drveta;

e_f - dilatacija zatezanja u karbonskoj traci;

f_c - čvrstoća drveta na pritisak.

Položaj neutralne ose određuje se iz uslova ravnoteže unutrašnjih sila u pravcu podužne ose nosača:

$$P_{w1} + P_{w2} = Z_w + Z_f, \quad (7.40)$$

pri čemu su unutrašnje sile definisane u skladu sa dijagramom napona u poprečnom preseku, i to sile u pritisnutoj zoni kao:

$$P_{w1} = (z_3 \cdot b) \cdot s_c, \quad (7.41)$$

$$P_{w2} = (0,5 \cdot z_2 \cdot b) \cdot s_c, \quad (7.42)$$

a sile u zategnutoj zoni kao:

$$Z_w = (0,5 \cdot z_1 \cdot b) \cdot S_t, \quad (7.43)$$

$$Z_f = (b_f \cdot t_f) \cdot S_f, \quad (7.44)$$

gde je:

z_1 - visina zategnute zone;

z_2 - visina pritisnute zone umanjena za visinu zone plastifikacije drvenog preseka;

z_3 - visina zone plastifikacije drvenog preseka;

b - širina nosača;

b_f - širina karbonske trake;

t_f - debljina karbonske trake;

S_t - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

S_c - napon pritiska u okviru zone plastifikacije drvenog preseka;

S_f - napon zatezanja u karbonskoj traci.

Rezultujući moment savijanja M može se izračunati kao suma momenata unutrašnjih sila oko neutralne ose:

$$M = \left(\frac{2}{3} z_1 \right) \cdot Z_w + \left(z_1 + \frac{t_f}{2} \right) \cdot Z_f - \left(z_2 + \frac{z_3}{2} \right) \cdot P_{w1} - \left(\frac{2}{3} z_2 \right) \cdot P_{w2}, \quad (7.45)$$

gde je:

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice drvenog preseka;

z_2 - udaljenje neutralne ose od zone plastifikacije drvenog preseka;

z_3 - visina zone plastifikacije drvenog preseka;

t_f - debljina karbonske trake; a

P_{w1} , P_{w2} , Z_w , Z_f su unutrašnje sile definisane izrazima (7.41) - (7.44).

Krivina se može izračunati prema izrazu:

$$f = e_t / z_1, \quad (7.46)$$

gde je:

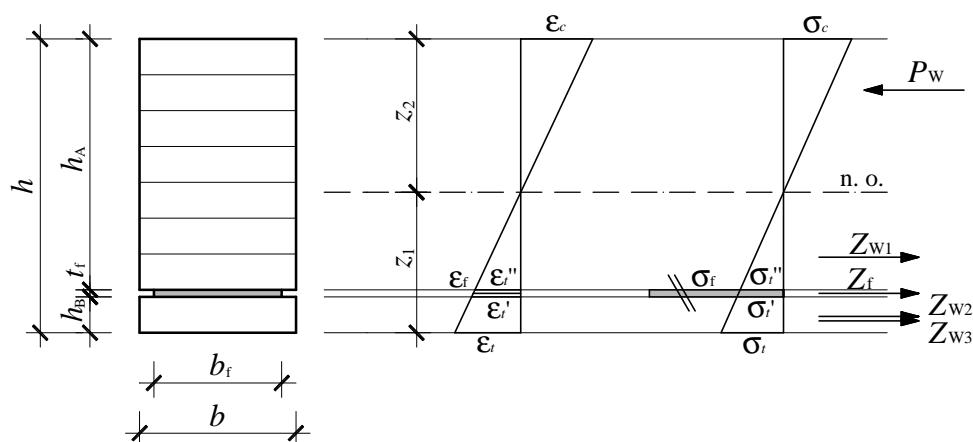
e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

z_1 - visina zategnute zone.

7.3.3 Nosači ojačani karbonskom trakom postavljenom između drvenih lamela

Linearno-elastična faza

Ponašanje ojačanog nosača je linearno-elastično do dostizanja dilatacije plastičnog tečenja drveta ε_{cy} na gornjoj ivici preseka, ukoliko pre toga nije došlo do loma usled dostizanja granične vrednosti napona zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake σ_{tu} . Idealizovana raspodela dilatacija i napona po visini ojačanog nosača pravougaonog preseka, ukupne visine h i širine b , prikazana je slici 7.5.



Slika 7.5 - Raspodela dilatacija i napona u okviru elastične faze

Poznavajući dilataciju ε_{ct} , iz uslova kompatibilnosti mogu se odrediti karakteristične dilatacije u poprečnom preseku:

$$e_t' = (z_1 - h_B) / z_1 \cdot e_t, \quad (7.47)$$

$$e_t'' = (z_1 - h_B - t_f) / z_1 \cdot e_t, \quad (7.48)$$

$$e_c = z_2 / z_1 \cdot e_t, \quad (7.49)$$

$$e_f = (z_1 - h_B - t_f / 2) / z_1 \cdot e_t, \quad (7.50)$$

sa:

$$z_2 = h - z_1, \quad (7.51)$$

gde je:

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

e_t' - dilatacija zatezanja na gornjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

e_t'' - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake;

e_c - dilatacija pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake;

e_f - dilatacija zatezanja u karbonskoj traci;

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice drvenog preseka ispod karbonske trake ;

z_2 - udaljenje neutralne ose od gornje ivice drvenog preseka iznad karbonske trake;

h_B - visina drvenog preseka ispod karbonske trake;

t_f - debljina karbonske trake;

h - visina nosača.

Za poznate vrednosti dilatacija, odgovarajuće vrednosti napona u poprečnom preseku se mogu izračunati prema usvojenim vezama napon-dilatacija:

$$s_t = E_w \cdot e_t, \quad (7.52)$$

$$s_t' = E_w \cdot e_t', \quad (7.53)$$

$$s_t'' = E_w \cdot e_t'', \quad (7.54)$$

$$s_c = E_w \cdot e_c, \quad (7.55)$$

$$s_f = E_f \cdot e_f, \quad (7.56)$$

gde je:

s_t - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

s_t' - napon zatezanja na gornjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

s_t'' - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake;

s_c - napon pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake;

s_f - napon zatezanja u karbonskoj traci;

E_w - modul elastičnosti drveta;

E_f - modul elastičnosti karbonske trake;

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

e_t' - dilatacija zatezanja na gornjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

e_t'' - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake;

e_c - dilatacija pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake;

e_f - dilatacija zatezanja u karbonskoj traci.

Položaj neutralne ose određuje se iz uslova ravnoteže unutrašnjih sila u pravcu podužne ose nosača:

$$P_w = Z_{w1} + Z_{w2} + Z_{w3} + Z_f, \quad (7.57)$$

pri čemu su unutrašnje sile definisane u skladu sa dijagramom napona u poprečnom preseku, i to sila u pritiskutoj zoni kao:

$$P_w = (0,5 \cdot z_2 \cdot b) \cdot s_c, \quad (7.58)$$

a sile u zategnutoj zoni kao:

$$Z_{w1} = (0,5 \cdot (z_1 - h_B - t_f) \cdot b) \cdot s_t'', \quad (7.59)$$

$$Z_{w2} = (h_B \cdot b) \cdot s_t', \quad (7.60)$$

$$Z_{w3} = (0,5 \cdot h_B \cdot b) \cdot (s_t - s_t'), \quad (7.61)$$

$$Z_f = (b_f \cdot t_f) \cdot s_f, \quad (7.62)$$

gde je:

z_1 - visina zategnute zone;

z_2 - visina pritiskute zone;

b - širina nosača;

h_B - visina drvenog preseka ispod karbonske trake;

b_f - širina karbonske trake;

t_f - debljina karbonske trake;

S_t - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

S_t' - napon zatezanja na gornjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

S_t'' - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake;

S_c - napon pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake;

S_f - napon zatezanja u karbonskoj traci.

Rezultujući moment savijanja M može se izračunati kao suma momenata unutrašnjih sila oko neutralne ose:

$$M = \left(\frac{2}{3} (z_1 - h_B - t_f) \right) \cdot Z_{w1} + \left(z_1 - \frac{h_B}{2} \right) \cdot Z_{w2} + \left(z_1 - \frac{h_B}{3} \right) \cdot Z_{w3} + \left(z_1 - h_B - \frac{t_f}{2} \right) \cdot Z_f - \left(\frac{2}{3} z_2 \right) \cdot P_w, \quad (7.63)$$

gde je:

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice drvenog preseka ispod karbonske trake;

z_2 - udaljenje neutralne ose od gornje ivice drvenog preseka iznad karbonske trake;

h_B - visina drvenog preseka ispod karbonske trake;

t_f - debljina karbonske trake; a

$P_w, Z_{w1}, Z_{w2}, Z_{w3}, Z_f$ su unutrašnje sile definisane izrazima (7.58) - (7.62).

Krivina se može izračunati prema izrazu:

$$f = e_t / z_1, \quad (7.64)$$

gde je:

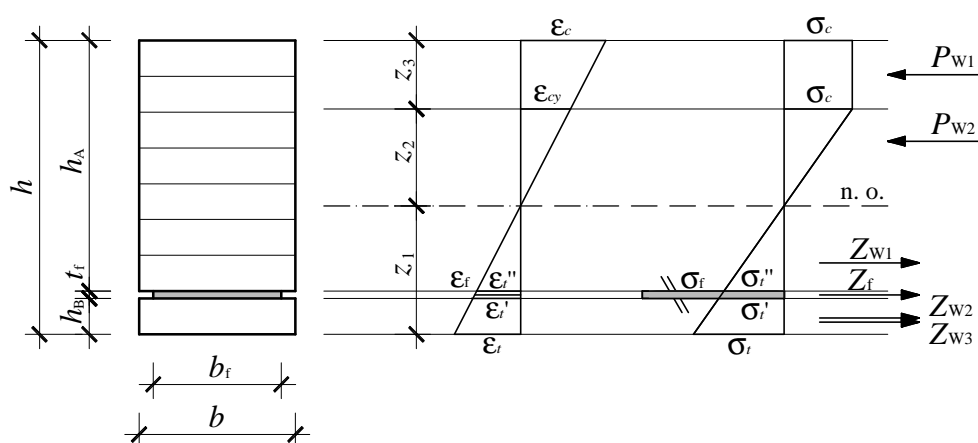
e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

z_1 - visina zategnute zone.

Plastična faza

U okviru ove faze modelom se razmatra prvo lom drvenog preseka ispod karbonske trake i potom konačan lom drvenog preseka iznad karbonske trake. Plastična faza ponašanja ojačanog nosača počinje dostizanjem dilatacije plastičnog tečenja na

gornjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake ε_{cy} . Lom u drvenom preseku ispod karbonske trake nastaje dostizanjem granične vrednosti napona zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake σ_{tu} . Konačan lom nosača predstavlja dostizanje granične vrednosti napona zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake σ_{tu} , ukoliko pre toga nije došlo do loma usled dostizanja granične dilatacije pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka ε_{cu} . Idealizovana raspodela dilatacija i napona po visini ojačanog nosača pravougaonog preseka, ukupne visine h i širine b , do pojave loma u drvenom preseku ispod karbonske trake, prikazana je slici 7.6.



Slika 7.6 - Raspodela dilatacija i napona u okviru plastične faze

Poznavajući dilatacije ε_t i ε_{cy} , iz uslova kompatibilnosti mogu se odrediti karakteristične dilatacije u poprečnom preseku:

$$e_t' = (z_1 - h_B) / z_1 \cdot e_t, \quad (7.65)$$

$$e_t'' = (z_1 - h_B - t_f) / z_1 \cdot e_t, \quad (7.66)$$

$$e_c = (z_3 + z_2) / z_2 \cdot e_{cy}, \quad (7.67)$$

$$e_f = (z_1 - h_B - t_f / 2) / z_1 \cdot e_t \quad (7.77)$$

sa:

$$z_2 = (e_{cy} / e_t) \cdot z_1, \quad (7.78)$$

$$z_3 = h - (z_1 + z_2), \quad (7.79)$$

gde je:

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

e_t' - dilatacija zatezanja na gornjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

e_t'' - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake;

e_{cy} - dilatacija plastičnog tečenja drveta;

e_c - dilatacija pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake;

e_f - dilatacija zatezanja u karbonskoj traci;

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice drvenog preseka ispod karbonske trake;

z_2 - udaljenje neutralne ose od zone plastifikacije drvenog preseka iznad karbonske trake;

z_3 - visina zone plastifikacije drvenog preseka iznad karbonske trake;

h_B - visina drvenog preseka ispod karbonske trake;

t_f - debljina karbonske trake;

h - visina nosača.

Za poznate vrednosti dilatacija, odgovarajuće vrednosti napona u poprečnom preseku se mogu izračunati prema usvojenim vezama napon-dilatacija:

$$s_t = E_w \cdot e_t, \quad (7.80)$$

$$s_t' = E_w \cdot e_t', \quad (7.81)$$

$$s_t'' = E_w \cdot e_t'', \quad (7.82)$$

$$s_c = E_w \cdot e_{cy} = f_c, \quad (7.83)$$

$$s_f = E_f \cdot e_f, \quad (7.84)$$

gde je:

s_t - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

s_t' - napon zatezanja na gornjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

s_t'' - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake;

s_c - napon pritiska u okviru zone plastifikacije drvenog preseka iznad karbonske trake;

s_f - napon zatezanja u karbonskoj traci;

E_w - modul elastičnosti drveta;

E_f - modul elastičnosti karbonske trake;

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

e_t' - dilatacija zatezanja na gornjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

e_t'' - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake;

e_{cy} - dilatacija plastičnog tečenja drveta;

e_f - dilatacija zatezanja u karbonskoj traci;

f_c - čvrstoća drveta na pritisak.

Položaj neutralne ose određuje se iz uslova ravnoteže unutrašnjih sila u pravcu podužne ose nosača:

$$P_{w1} + P_{w2} = Z_{w1} + Z_{w2} + Z_{w3} + Z_f, \quad (7.85)$$

pri čemu su unutrašnje sile definisane u skladu sa dijagramom napona u poprečnom preseku, i to sile u pritisnutoj zoni kao:

$$P_{w1} = (z_3 \cdot b) \cdot s_c, \quad (7.86)$$

$$P_{w2} = (0,5 \cdot z_2 \cdot b) \cdot s_c, \quad (7.87)$$

a sile u zategnutoj zoni kao:

$$Z_{w1} = (0,5 \cdot (z_1 - h_B - t_f) \cdot b) \cdot s_t'', \quad (7.88)$$

$$Z_{w2} = (h_B \cdot b) \cdot s_t', \quad (7.89)$$

$$Z_{w3} = (0,5 \cdot h_B \cdot b) \cdot (s_t - s_t'), \quad (7.90)$$

$$Z_f = (b_f \cdot t_f) \cdot s_f, \quad (7.91)$$

gde je:

z_1 - visina zategnute zone;

z_2 - visina pritisnute zone umanjena za visinu zone plastifikacije drvenog preseka;

z_3 - visina zone plastifikacije drvenog preseka;

b - širina nosača;

h_B - visina drvenog preseka ispod karbonske trake;

b_f - širina karbonske trake;

t_f - debljina karbonske trake;

S_t - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

S_t' - napon zatezanja na gornjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

S_t'' - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka iznad karbonske trake;

S_c - napon pritiska u okviru zone plastifikacije drvenog preseka iznad karbonske trake;

S_f - napon zatezanja u karbonskoj traci.

Rezultujući moment savijanja M može se izračunati kao suma momenata unutrašnjih sila oko neutralne ose:

$$M = \left(\frac{2}{3} (z_1 - h_B - t_f) \right) \cdot Z_{w1} + \left(z_1 - \frac{h_B}{2} \right) \cdot Z_{w2} + \left(z_1 - \frac{h_B}{3} \right) \cdot Z_{w3} + \left(z_1 - h_B - \frac{t_f}{2} \right) \cdot Z_f - \left(z_2 + \frac{z_3}{2} \right) \cdot P_{w1} - \left(\frac{2}{3} z_2 \right) \cdot P_{w2}, \quad (7.92)$$

gde je:

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice drvenog preseka ispod karbonske trake;

z_2 - udaljenje neutralne ose od zone plastifikacije drvenog preseka iznad karbonske trake;

z_3 - visina zone plastifikacije drvenog preseka iznad karbonske trake;

h_B - visina drvenog preseka ispod karbonske trake;

t_f - debljina karbonske trake; a

P_{w1} , P_{w2} , Z_{w1} , Z_{w2} , Z_{w3} , Z_f su unutrašnje sile definisane izrazima (7.86) - (7.91).

Krivina se može izračunati prema izrazu:

$$f = e_t / z_1, \quad (7.93)$$

gde je:

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka ispod karbonske trake;

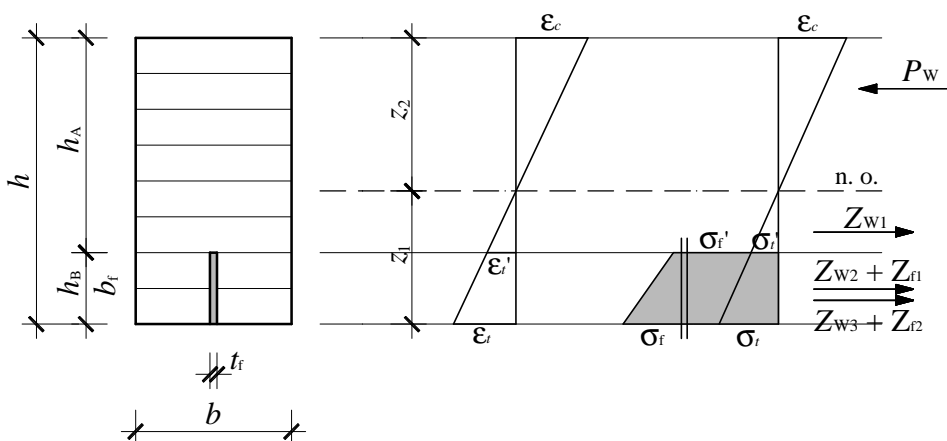
z_1 - visina zategnute zone.

Posle loma drvenog preseka ispod karbonske trake, nosač nastavlja da „radi“ do konačnog loma. Dalji proračun se sprovodi kao za plastičnu fazu nosača ojačanog karbonskom trakom sa donje strane, samo sa redukovanom visinom $h = h_A$. Početni položaj neutralne ose „noviformiranog“ nosača određuje se iz uslova jednakosti krivine.

7.3.4 Nosači ojačani karbonskom trakom postavljenom u vertikalni prorez

Linearno-elastična faza

Ponašanje ojačanog nosača je linearno-elastično do dostizanja dilatacije plastičnog tečenja drveta ε_{cy} na gornjoj ivici preseka, ukoliko pre toga nije došlo do loma usled dostizanja granične vrednosti napona zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka σ_{tu} . Idealizovana raspodela dilatacija i napona po visini ojačanog nosača pravougaonog preseka, visine h i širine b , prikazana je slici 7.7.



Slika 7.7 - Raspodela dilatacija i napona u okviru elastične faze

Poznavajući dilataciju ε_t , iz uslova kompatibilnosti mogu se odrediti karakteristične dilatacije u poprečnom preseku:

$$e_t' = (z_1 - h_B) / z_1 \cdot e_t, \quad (7.94)$$

$$e_c = z_2 / z_1 \cdot e_t \quad (7.95)$$

sa

$$z_2 = h - z_1, \quad (7.96)$$

gde je:

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

e_t' - dilatacija zatezanja u nivou gornje ivice karbonske trake;

e_c - dilatacija pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka;

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice drvenog preseka;

z_2 - udaljenje neutralne ose od gornje ivice drvenog preseka;

h_B - visina drvenog preseka do gornje ivice karbonske trake;

h - visina nosača.

Za poznate vrednosti dilatacija, odgovarajuće vrednosti napona u poprečnom preseku se mogu izračunati prema usvojenim vezama napon-dilatacija:

$$s_t = E_w \cdot e_t, \quad (7.97)$$

$$s_t' = E_w \cdot e_t' \quad (7.98)$$

$$s_c = E_w \cdot e_c, \quad (7.99)$$

$$s_f = E_f \cdot e_t, \quad (7.100)$$

$$s_f' = E_f \cdot e_t' \quad (7.101)$$

gde je:

s_t - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

s_t' - napon zatezanja u drvenom preseku u nivou gornje ivice karbonske trake;

s_c - napon pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka;

s_f - napon zatezanja na donjoj ivici karbonske trake;

s_f' - napon zatezanja na gornjoj ivici karbonske trake;

E_w - modul elastičnosti drveta;

E_f - modul elastičnosti karbonske trake;

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

e_t' - dilatacija zatezanja u nivou gornje ivice karbonske trake;

e_c - dilatacija pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka.

Položaj neutralne ose određuje se iz uslova ravnoteže unutrašnjih sila u pravcu podužne ose nosača:

$$P_w = Z_{w1} + Z_{w2} + Z_{w3} + Z_{f1} + Z_{f2}, \quad (7.102)$$

pri čemu su unutrašnje sile definisane u skladu sa dijagramom napona u poprečnom preseku, i to sila u pritisnutoj zoni kao:

$$P_w = (0,5 \cdot z_2 \cdot b) \cdot s_c, \quad (7.103)$$

a sile u zategnutoj zoni kao:

$$Z_{w1} = (0,5 \cdot (z_1 - h_B) \cdot b) \cdot s_t', \quad (7.104)$$

$$Z_{w2} = (h_B \cdot (b - t_f)) \cdot s_t', \quad (7.105)$$

$$Z_{w3} = (0,5 \cdot h_B \cdot (b - t_f)) \cdot (s_t - s_t'), \quad (7.106)$$

$$Z_{f1} = (b_f \cdot t_f) \cdot s_f', \quad (7.107)$$

$$Z_{f2} = (0,5 \cdot b_f \cdot t_f) \cdot (s_f - s_f'), \quad (7.108)$$

gde je:

z_1 - visina zategnute zone;

z_2 - visina pritisnute zone;

b - širina nosača;

h_B - visina drvenog preseka do gornje ivice karbonske trake;

b_f - širina karbonske trake;

t_f - debljina karbonske trake;

s_t - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

s_t' - napon zatezanja u drvenom preseku u nivou gornje ivice karbonske trake;

s_c - napon pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka;

s_f' - napon zatezanja na gornjoj ivici karbonske trake;

s_f - napon zatezanja na donjoj ivici karbonske trake.

Rezultujući moment savijanja M može se izračunati kao suma momenata unutrašnjih sila oko neutralne ose:

$$M = \left(\frac{2}{3}(z_1 - h_B)\right) \cdot Z_{w1} + \left(z_1 - \frac{h_B}{2}\right) \cdot Z_{w2} + \left(z_1 - \frac{h_B}{3}\right) \cdot Z_{w3} + \left(z_1 - \frac{h_B}{2}\right) \cdot Z_{f1} + \left(z_1 - \frac{h_B}{3}\right) \cdot Z_{f2} - \left(\frac{2}{3}z_2\right) \cdot P_w, \quad (7.109)$$

gde je:

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice drvenog preseka;

z_2 - udaljenje neutralne ose od gornje ivice drvenog preseka;

h_B - visina drvenog preseka do gornje ivice karbonske trake; a

$P_w, Z_{w1}, Z_{w2}, Z_{w3}, Z_{f1}, Z_{f2}$ su unutrašnje sile definisane izrazima (7.103) - (7.108).

Krivina se može izračunati prema izrazu:

$$f = e_t / z_1, \quad (7.110)$$

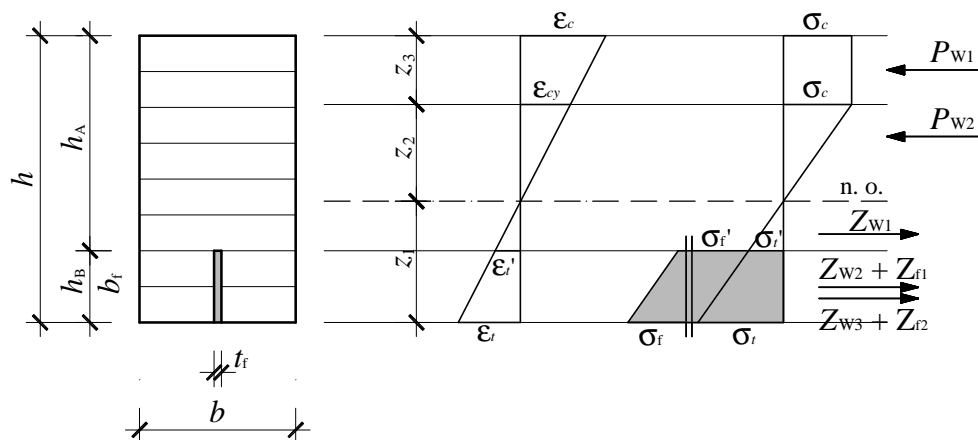
gde je:

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici nosača;

z_1 - visina zategnute zone.

Plastična faza

Ponašanje ojačanog nosača je plastično od dostizanja dilatacije tečenja drveta ε_{cy} na gornjoj ivici preseka do loma dostizanjem granične vrednosti napona zatezanja na donjoj ivici preseka σ_{tu} , ukoliko pre toga nije došlo do loma usled dostizanja granične dilatacije pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka ε_{cu} . Idealizovana raspodela dilatacija i napona po visini ojačanog nosača pravougaonog preseka, visine h i širine b , prikazana je slici 7.8.



Slika 7.8 - Raspodela dilatacija i napona u okviru plastične faze

Poznavajući dilatacije ε_t i ε_{cy} , iz uslova kompatibilnosti mogu se odrediti karakteristične dilatacije u poprečnom preseku:

$$e_t' = (z_1 - h_B) / z_1 \cdot e_t, \quad (7.111)$$

$$e_c = (z_3 + z_2) / z_2 \cdot e_{cy} \quad (7.112)$$

sa

$$z_2 = (e_{cy} / e_t) \cdot z_1, \quad (7.113)$$

$$z_3 = h - (z_1 + z_2), \quad (7.114)$$

gde je:

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

e_t' - dilatacija zatezanja u nivou gornje ivice karbonske trake;

e_{cy} - dilatacija plastičnog tečenja drveta;

e_c - dilatacija pritiska na gornjoj ivici drvenog preseka;

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice drvenog preseka;

z_2 - udaljenje neutralne ose od zone plastifikacije drvenog preseka;

z_3 - visina zone plastifikacije drvenog preseka;

h_B - visina drvenog preseka do gornje ivice karbonske trake;

h - visina nosača.

Za poznate vrednosti dilatacija, odgovarajuće vrednosti napona u poprečnom preseku se mogu izračunati prema usvojenim vezama napon-dilatacija:

$$s_t = E_w \cdot e_t, \quad (7.115)$$

$$s_t' = E_w \cdot e_t', \quad (7.116)$$

$$s_c = E_w \cdot e_{cy} = f_c, \quad (7.117)$$

$$s_f = E_f \cdot e_t, \quad (7.118)$$

$$s_f' = E_f \cdot e_t', \quad (7.119)$$

gde je:

s_t - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

s_t' - napon zatezanja u drvenom preseku u nivou gornje ivice karbonske trake;

s_c - napon pritiska u okviru zone plastifikacije drvenog preseka;

s_f - napon zatezanja na donjoj ivici karbonske trake;

s_f' - napon zatezanja na gornjoj ivici karbonske trake;

E_w - modul elastičnosti drveta;

E_f - modul elastičnosti karbonske trake;

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

e_t' - dilatacija zatezanja u nivou gornje ivice karbonske trake;

e_{cy} - dilatacija plastičnog tečenja drveta;

f_c - čvrstoća drveta na pritisak.

Položaj neutralne ose određuje se iz uslova ravnoteže unutrašnjih sila u pravcu podužne ose nosača:

$$P_{w1} + P_{w2} = Z_{w1} + Z_{w2} + Z_{w3} + Z_{f1} + Z_{f2}, \quad (7.120)$$

pri čemu su unutrašnje sile definisane u skladu sa dijagramom napona u poprečnom preseku, i to sile u pritisnutoj zoni kao:

$$P_{w1} = (z_3 \cdot b) \cdot s_c, \quad (7.121)$$

$$P_{w2} = (0,5 \cdot z_2 \cdot b) \cdot s_c, \quad (7.122)$$

a sile u zategnutoj zoni kao:

$$Z_{w1} = (0,5 \cdot (z_1 - h_B) \cdot b) \cdot s_t', \quad (7.123)$$

$$Z_{w2} = (h_B \cdot (b - t_f)) \cdot s_t', \quad (7.124)$$

$$Z_{w3} = (0,5 \cdot h_B \cdot (b - t_f)) \cdot (s_t - s_t'), \quad (7.125)$$

$$Z_{f1} = (b_f \cdot t_f) \cdot s_f', \quad (7.126)$$

$$Z_{f2} = (0,5 \cdot b_f \cdot t_f) \cdot (s_f - s_f'), \quad (7.127)$$

gde je:

z_1 - visina zategnute zone;

z_2 - visina pritiskute zone umanjena za visinu zone plastifikacije drvenog preseka;

z_3 - visina zone plastifikacije drvenog preseka;

b - širina nosača;

h_B - visina drvenog preseka do gornje ivice karbonske trake;

b_f - širina karbonske trake;

t_f - debljina karbonske trake;

s_t - napon zatezanja na donjoj ivici drvenog preseka;

s_t' - napon zatezanja u drvenom preseku u nivou gornje ivice karbonske trake;

s_c - napon pritiska u okviru zone plastifikacije drvenog preseka;

s_f - napon zatezanja na donjoj ivici karbonske trake;

s_f' - napon zatezanja na gornjoj ivici karbonske trake.

Rezultujući moment savijanja M može se izračunati kao suma momenata unutrašnjih sila oko neutralne ose:

$$M = \left(\frac{2}{3} (z_1 - h_B) \right) \cdot Z_{w1} + \left(z_1 - \frac{h_B}{2} \right) \cdot Z_{w2} + \left(z_1 - \frac{h_B}{3} \right) \cdot Z_{w3} + \left(z_1 - \frac{h_B}{2} \right) \cdot Z_{f1} + \left(z_1 - \frac{h_B}{3} \right) \cdot Z_{f2} - \left(z_2 + \frac{z_3}{2} \right) \cdot P_{w1} - \left(\frac{2}{3} z_2 \right) \cdot P_{w2}, \quad (7.128)$$

gde je:

z_1 - udaljenje neutralne ose od donje ivice drvenog preseka;

z_2 - udaljenje neutralne ose od zone plastifikacije drvenog preseka;

z_3 - visina zone plastifikacije drvenog preseka;

h_B - visina drvenog preseka do gornje ivice karbonske trake; a

$P_{w1}, P_{w2}, Z_{w1}, Z_{w2}, Z_{w3}, Z_{f1}, Z_{f2}$ su unutrašnje sile definisane izrazima (7.121) - (7.127).

Krivina se može izračunati prema izrazu:

$$f = e_t / z_1, \tag{7.129}$$

gde je:

e_t - dilatacija zatezanja na donjoj ivici nosača;

z_1 - visina zategnute zone.

7.4 Proračunski postupak

Za prikazanu teorijsku analizu, proračunski postupak je definisan i implementiran u jednostavan Microsoft Excel program. Osnovni cilj primene programa je određivanje analitičkih rezultata i njihovo poređenje sa eksperimentalnim. Takođe, program se može primeniti za sprovođenje parametarske studije radi određivanja optimalnog položaja i površine ojačanja u okviru poprečnog preseka, za različitu geometriju nosača.

Ulazni podaci zahtevaju poznavanje geometrijskih karakteristika drvenog nosača i karbonskog ojačanja, kao i njihovih materijalnih karakteristika potrebnih za definisanje usvojenih konstitutivnih modela. U okviru teorijske analize prikazane dalje u radu korišćene su geometrijske karakteristike nosača obuhvaćenih eksperimentalnom analizom. Vrednosti napona i dilatacija koje definišu konstitutivne modele usvojene su na osnovu rezultata ispitivanja mehaničkih karakteristika materijala (o ovome će biti reči u delu 7.6).

U skladu sa prikazanim teorijskim modelom program računa moment savijanja M i krivinu f u najopterećenijem preseku za svaki nivo dilatacije zatezanja ivičnih drvenih vlakana ε_t . Nelinearna veza M - f se, dakle, analizira inkrementalno nanoseći propisanu vrednost dilatacije zatezanja u presek, počevši od $\varepsilon_t = 0$. Kao inkrement

dilatacije usvojena je vrednost $\Delta\varepsilon = 10 \mu\varepsilon$. Dilatacija zatezanja ivičnih drvenih vlakana ε_t se povećava sve dok ne dostigne graničnu vrednost ε_{tu} , odnosno dok ivični napon zatezanja σ_t ne dosegne graničnu vrednost. Ako dilatacija pritisnutih ivičnih vlakana ε_c dostigne vrednost dilatacije plastičnog tečenja ε_{cy} , pre nego σ_t dosegne svoju graničnu vrednost, javlja se plastifikacija i neutralna osa se spušta ka dole. Položaj neutralne ose se određuje iz uslova ravnoteže u pravcu podužne ose nosača. Konačno, reaktivni momenta savijanja se izračunava iz uslova ravnoteže oko neutralne ose.

Generalno, proračunski postupak se odvija na sledeći način:

- (1) U i -tom koraku, unosi se konstantna dilatacija $\varepsilon_{t(i)}$ na zategnutoj strani drvenog preseka;
- (2) Iz uslova kompatibilnosti u zavisnosti od $\varepsilon_{t(i)}$ definišu se karakteristične dilatacije u preseku;
- (3) Prema definisanim dilatacijama odgovarajući naponi se izražavaju u skladu sa ranije usvojenim vezama napon-dilatacija za materijale;
- (4) Položaj neutralne ose u odnosu na zategnutu ivicu određuje se iz uslova ravnoteže unutrašnjih sila, definisanih dijagramom napona;
- (5) Izračunavanjem sume momenata unutrašnjih sila oko neutralne ose određuje se moment savijanja $M_{(i)}$ prouzrokovan dilatacijom $\varepsilon_{t(i)}$;
- (6) Izračunavanjem nagiba dijagrama dilatacija po visini poprečnog preseka određuje se krivina $f_{(i)}$ prouzrokovana dilatacijom $\varepsilon_{t(i)}$;
- (7) Prelazak na sledeći korak i utvrđivanje sledeće vrednosti dilatacije kao $\varepsilon_{t(i+1)} = \varepsilon_{t(i)} + \Delta\varepsilon$. Zatim, ponavljanje koraka (1)-(6).

Na osnovu sračunatih vrednosti momenta savijanja i krivine u najopterećenijem preseku, dalje se izračunavaju odgovarajuće vrednosti opterećenja i ugiba. Ove vrednosti zavise od statičkog sistema i opterećenja nosača.

Dispozicija ispitivanja nosača i odgovarajući dijagram momenta savijanja, određen iz uslova statičke ravnoteže, prikazani su na slikama 7.9(a i b). Za poznatu vrednost momenta savijanja u sredini nosača, vrednost opterećenja se određuje prema izrazu:

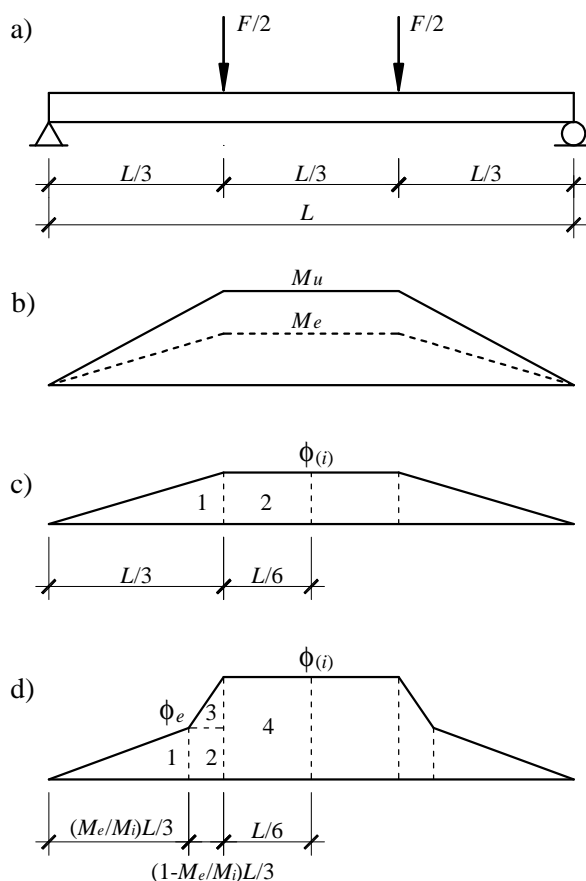
$$F_{(i)} = \frac{6M_{(i)}}{L}, \quad (7.130)$$

gde je:

$F_{(i)}$ - opterećenje nosača koje izaziva dilataciju $\varepsilon_{t(i)}$;

$M_{(i)}$ - moment savijanja, koji odgovara dilataciji $\varepsilon_{t(i)}$;

L - raspon nosača.



Slika 7.9 - Ispitivanje nosača na savijanje: a) dispozicija; b) dijagram momenta; c) dijagram krivine pre pojave plastifikacije pritiskute zone; d) dijagram krivine posle pojave plastifikacije pritiskute zone

Primenjujući metod moment-površina na pojednostavljeni bilinearni dijagram moment-krivina, ugib u sredini nosača se može odrediti eksplicitno [79]. Dva oblika dijagrama krivine, prikazana na slikama 7.9(c i d), je potrebno razmatrati pri izvođenju izraza za izračunavanje vrednosti ugiba. Do pojave plastifikacije pritiskute zone dijagram krivine ima isti oblik kao dijagram momenta (slika 7.9c). Kada dođe do plastifikacije moment nastavlja kontinualno da raste, što je prikazano punom linijom na

slici 7.9b. Krivina se takođe povećava, ali oblik dijagrama se menja u skladu sa plastifikacijom preseka duž podužne ose nosača. Pojednostavljeni dijagram krivine posle pojave plastifikacije pritisnute zone prikazan je na slici 7.9d. Prema metodu moment-površina, dijagrami krivine na slikama 4.10(c i d) u okviru polovine raspona nosača podeljeni su na nekoliko površina u skladu sa oblikom. Ugib u sredini nosača određen je računanjem momenta površina dijagrama krivine oko levog oslonca. Za razmatranu dispoziciju ispitivanja, vrednosti ugiba u sredini nosača za linearno-elastičnu fazu, odnosno plastičnu fazu date su sledećim izrazima:

$$d_{(i)} = \frac{23}{216} L^2 f_{(i)} \quad \text{za } 0 < f_{(i)} \leq f_e, \quad (7.131)$$

$$d_{(i)} = \frac{L^2}{216 M_{(i)}^2} \left[(23M_{(i)}^2 - 4M_{(i)}M_e - 4M_e^2) f_{(i)} + (4M_{(i)}^2 + 4M_{(i)}M_e) f_e \right] \quad \text{za } f_e < f_{(i)} \leq f_u, \quad (7.132)$$

gde je:

$d_{(i)}$ - ugib u sredini nosača, koji odgovara dilataciji $\varepsilon_{t(i)}$;

$f_{(i)}$ - krivina nosača, koji odgovara dilataciji $\varepsilon_{t(i)}$;

f_e - krivina nosača, koji odgovara dilataciji ε_{cy} ;

f_u - krivina nosača, koji odgovara dilataciji ε_{tu} ;

$M_{(i)}$ - moment savijanja, koji odgovara dilataciji $\varepsilon_{t(i)}$;

M_e - moment savijanja, koji odgovara dilataciji ε_{cy} ;

L - raspon nosača.

7.5 Model za proračun krutosti

Početni položaj neutralne ose i krutost na savijanje ojačanih nosača se mogu izračunati koristeći analizu transformisanog poprečnog preseka, prema teoriji kruto spregnutih preseka za linearno-elastično stanje. Plastične deformacije se ne razmatraju, jer se krutost koristi za verifikaciju graničnog stanja upotrebljivosti.

Položaj neutralne ose transformisanog preseka u odnosu na zategnutu ivicu, z_{no} , se računa prema izrazu:

$$z_{no} = \frac{nA_f \bar{z}_f + A_w \bar{z}_w}{nA_f + A_w}, \quad (7.133)$$

gde je:

n - parametar koji predstavlja odnos modula elastičnosti kompozitnog materijala i modula elastičnosti drveta, tj. $n = E_f / E_w$;

A_f - površina ojačanja u okviru celovitog poprečnog preseka;

A_w - površina drvenog dela u okviru celovitog poprečnog preseka;

\bar{z}_f - rastojanje od zategnute ivice celovitog poprečnog preseka do težišne ose ojačanja;

\bar{z}_w - rastojanje od zategnute ivice celovitog poprečnog preseka do težišne ose drvenog dela.

Moment inercije, I , ojačanog nosača se računa prema izrazu:

$$I = nI_f + I_w + nA_f z_f^2 + A_w z_w^2, \quad (7.134)$$

gde je:

n - parametar koji predstavlja odnos modula elastičnosti kompozitnog materijala i modula elastičnosti drveta, tj. $n = E_f / E_w$;

I_f - sopstveni moment inercije ojačanja u okviru celovitog poprečnog preseka;

I_w - sopstveni moment inercije drvenog dela u okviru celovitog poprečnog preseka;

A_f - površina ojačanja u okviru celovitog poprečnog preseka;

A_w - površina drvenog dela u okviru celovitog poprečnog preseka;

z_f - rastojanje od neutralne ose transformisanog preseka do težišne ose ojačanja, tj

$$z_f = |z_{no} - \bar{z}_f|;$$

z_w - rastojanje od neutralne ose transformisanog preseka do težišne ose drvenog dela poprečnog preseka, tj. $z_w = |z_{no} - \bar{z}_w|$.

Krutost na savijanje, EI , ojačanog nosača se zatim određuje množenjem momenta inercije, I , sa modulom elastičnosti drveta, E_w , s obzirom da je poprečni presek transformisan kao da je ceo od drveta.

7.6 Kalibracija modela

Za primenu teorijskog modela neophodno je poznavati vrednosti napona i dilatacija koji definišu konstitutivne modele materijala. Upravo, kritična tačka proračunskog postupka je izbor najadekvatnije vrednosti za granične vrednosti napona za drvo. Činjenica da je granični napon zatezanja pri savijanju veći od graničnog napona pri aksijalnom zatezanju treba da bude uzeta u obzir kalibracijom modela u odnosu na ispitivanja na savijanje neojačanih nosača. Granični napon zatezanja može efektivno biti povećan primenom CFRP ojačanja. Kako bi se uzeo u obzir ovaj efekat, model treba modifikovati i kalibrisati sa ispitivanjima na savijanje ojačanih nosača.

Uzimajući u obzir efekat raspodele napona (videti deo 2.7), usvojeno je da maksimalni napon u zategnutoj zoni drvenih nosača izloženih savijanju umesto čvrstoći na zatezanje odgovara čvrstoći na savijanje. Prisustvo karbonskih ojačanja sprečava otvaranje pukotina, ograničava lokalna oštećenja i premošćava lokalne defekte u drvetu, pa na taj način omogućava drvenom delu bolje ponašanje i da izdrži veće opterećenje. Tabela 6.7 pokazuje povećanje dilatacije zatezanja u drveta pri lomu ojačanih u odnosu na neojačane nosače. Veće dilatacije pri lomu ukazuju na veće napone u drvetu pri lomu. U odsustvu informacija vezanih za čvrstoću na zatezanje ojačanog drveta, proračunski postupak je modifikovan povećanjem čvrstoće drveta na savijanje faktorom α_m . Na osnovu povećanja u dilatacijama, usvojena vrednost $\alpha_m = 1,25$ predstavlja povećanje čvrstoće kojim se uzima u obzir efekat horizontalno postavljene karbonske trake u zategnutoj zoni, dok usvojena vrednost $\alpha_m = 1,15$ odgovara dispoziciji sa vertikalno postavljenim ojačanjem. Za model kojim se razmatra ojačanje karbonskom trakom između drvenih lamela, u situaciji loma lamele ispod ojačanja modifikacioni faktor je usvojen kao $\alpha_m = 1$.

Mehaničke karakteristike za drvo i CFRP ojačanje korišćene u analitičkom proračunu date su u tabeli 7.3. Korišćene vrednosti su bazirane na dobijenim eksperimentalnim rezultatima ispitivanja materijala. Mada dilatacije pri lomu konstrukcijskog drveta izloženog pritisku nisu date u okviru normi i standarda, literatura ukazuje da su bliske vrednostima dilatacija za slučaj ispitivanja na malim „čistim“ drvenim uzorcima, za koje većina autora predlaže vrednost 10-12 ‰ [47].

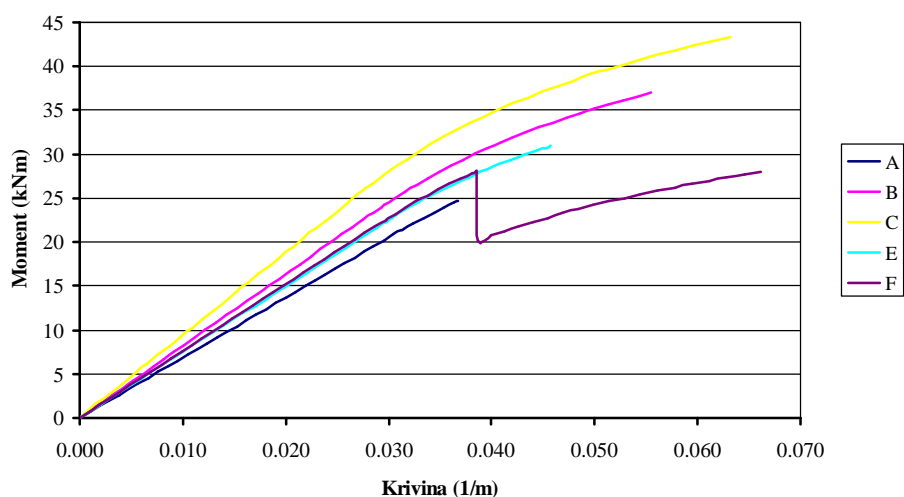
Tabela 7.3 - Mehaničke karakteristike korišćene u analitičkom proračunu

Karakteristika		Vrednost
f_m	Čvrstoća drveta na savijanje	42,5 MPa
f_c	Čvrstoća drveta na pritisak	36,3 MPa
ε_{cy}	Dilatacija na granici tečenja za drvo	3,3‰
ε_{cu}	Granična dilatacija pritiska za drvo	10‰
E_w	Modul elastičnosti drveta	11080 MPa
E_f	Modul elastičnosti karbonske trake	165543 MPa

7.7 Rezultati analitičkog proračuna

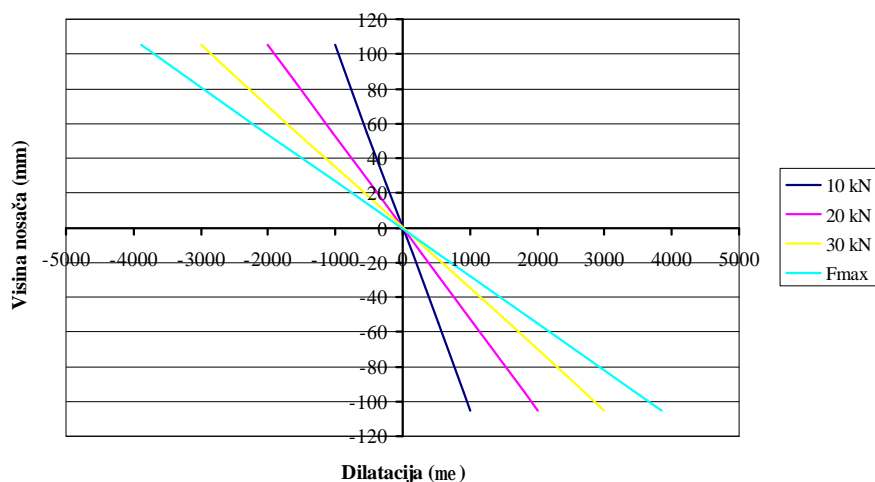
Koristeći prikazanu proceduru, izvršena je procena mehaničkih karakteristika eksperimentalno ispitanih nosača ojačanih karbonskim trakama. Nosači Serije D nisu razmatrani, jer teorijskim modelom se ne može uzeti u obzir postojanje karbonskih tkanina na krajevima nosača.

Ponašanje nosača izloženih savijanju se može najbolje analizirati preko veze momenta i krivine. Na slici 7.10 prikazani su dijagrami moment-krivina u najopterećenijem preseku za nosače ojačane na različite načine, kao i za neojačani nosač. Teorijska analiza je potvrdila da dodavanje ojačanja vodi ka poboljšanju krutosti, nosivosti i duktilnosti.



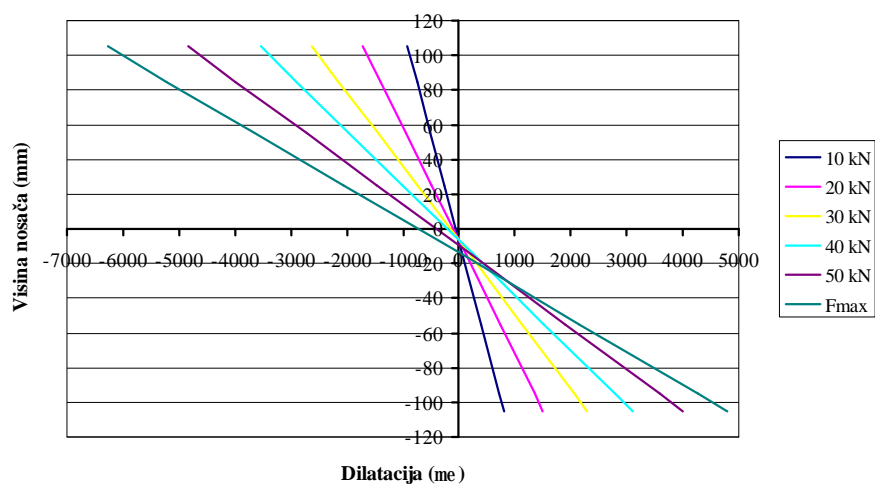
Slika 7.10 - Dijagrami moment-krivina za neojačane nosače (Serija A) i ojačane nosače (Serije B, C, E i F)

Prikaz raspodele dilatacija po visini poprečnog preseka za sve analizirane nosače dat je na slikama 7.11-7.15. Analizajući date dijagrame može se jasno uočiti da su pri istom nivou opterećenja dilatacije na zategnutoj ivici ojačanih nosača niže u odnosu na neojačani nosač. S druge strane, primenom ojačanja dostižu se znatno veće granične dilatacije pritisnute ivice, što pokazuje bolju iskorišćenost drvenog preseka.

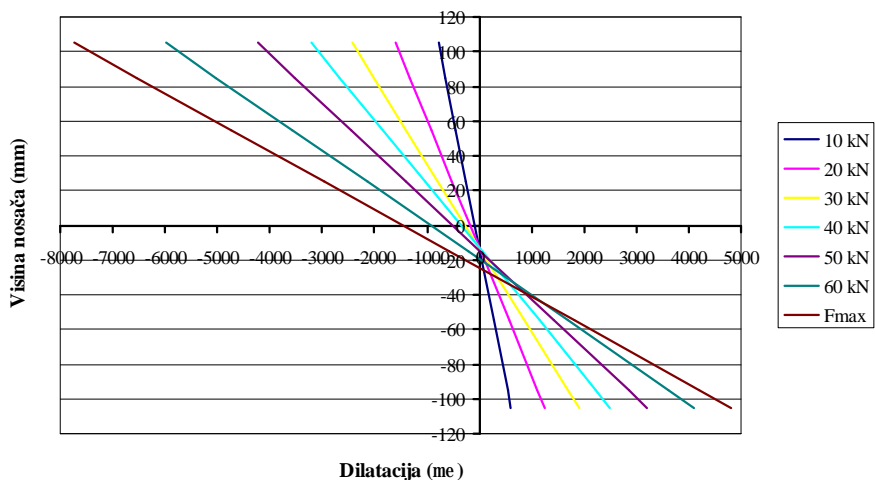


Slika 7.11 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za neojačani nosač

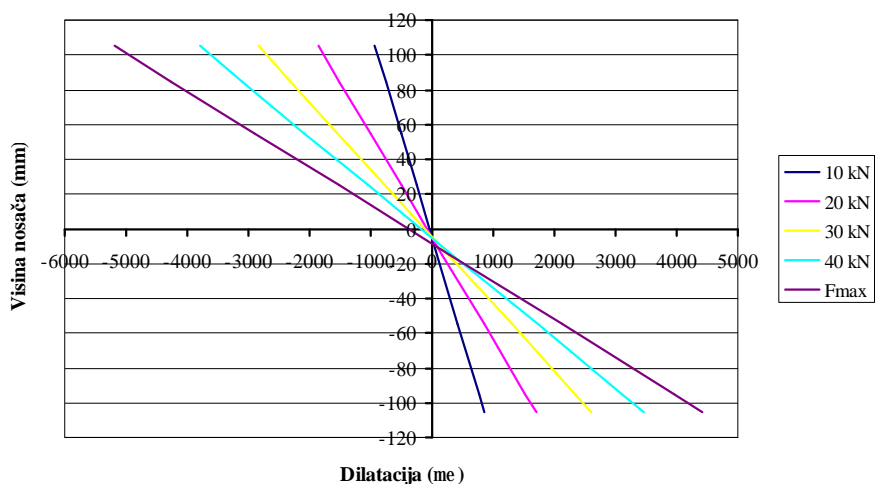
Serijs A



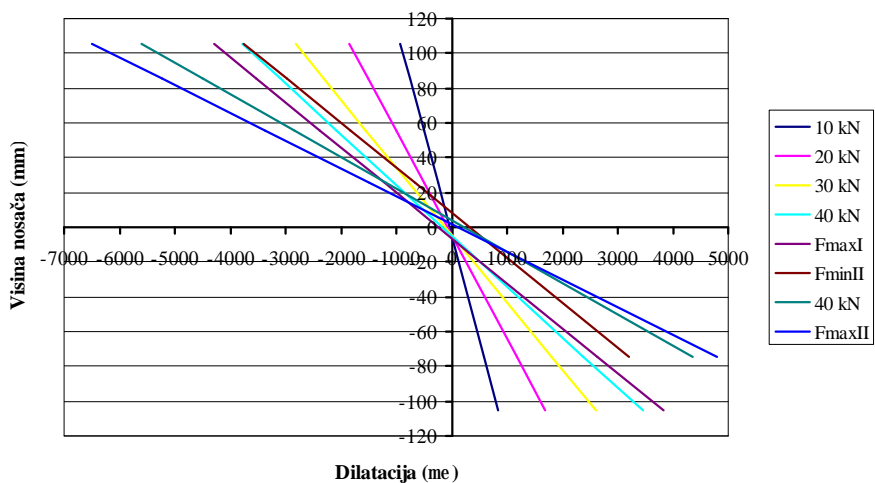
Slika 7.12 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za ojačani nosač Serije B



Slika 7.13 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za ojačani nosač Serije C

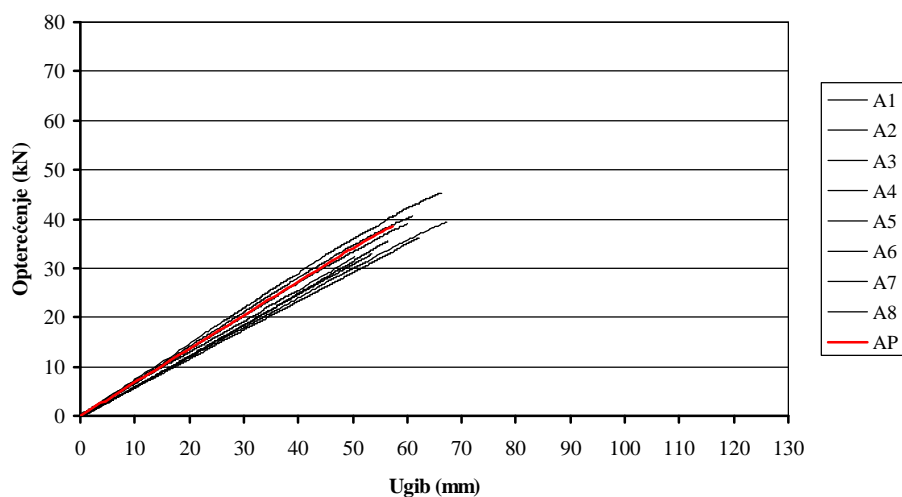


Slika 7.14 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za ojačani nosač Serije E

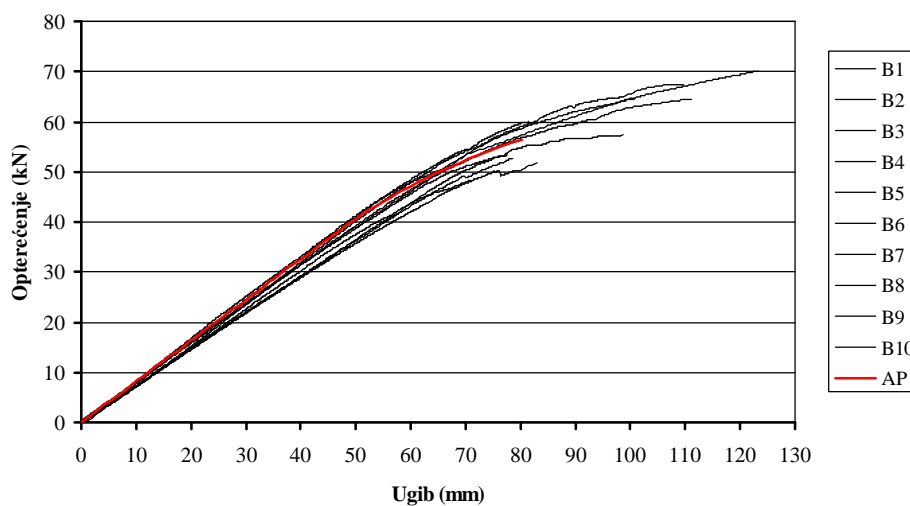


Slika 7.15 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za ojačani nosač Serije F

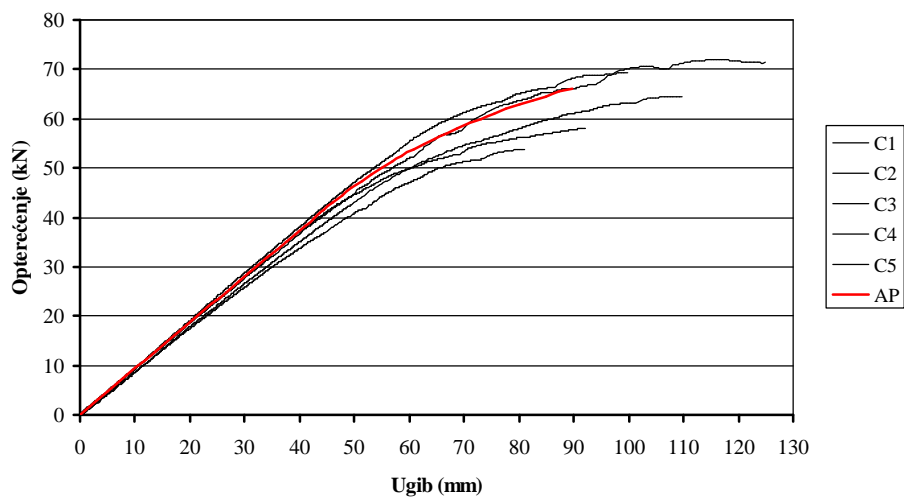
U cilju primene teorijskog modela u realnoj inženjerskoj praksi, potrebno je verifikovati model poređenjem rezultata analitičkog proračuna sa eksperimentalnim rezultatima. Na slikama 7.16-7.20 prikazano je poređenje između dijagrama opterećenje-ugib određenih eksperimentalnim ispitivanjem i teorijskim predviđanjem. Razmatrajući date dijagrame može se generalno zaključiti da se primenom teorijskog modela može realno proceniti ponašanje nosača.



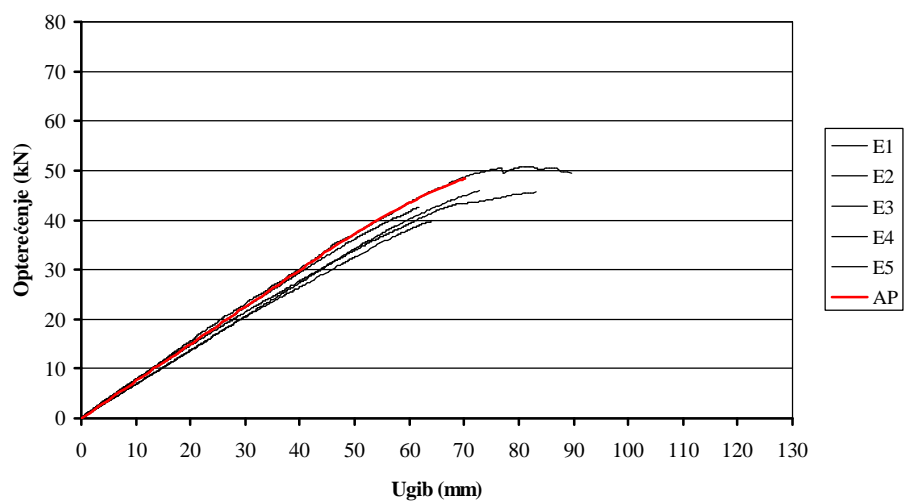
Slika 7.16 - Poređenje dijagrama opterećenje-ugib za neojačane nosače Serije A određenih na osnovu eksperimentalnog ispitivanja (A1-A8) i analitičkog proračuna (AP)



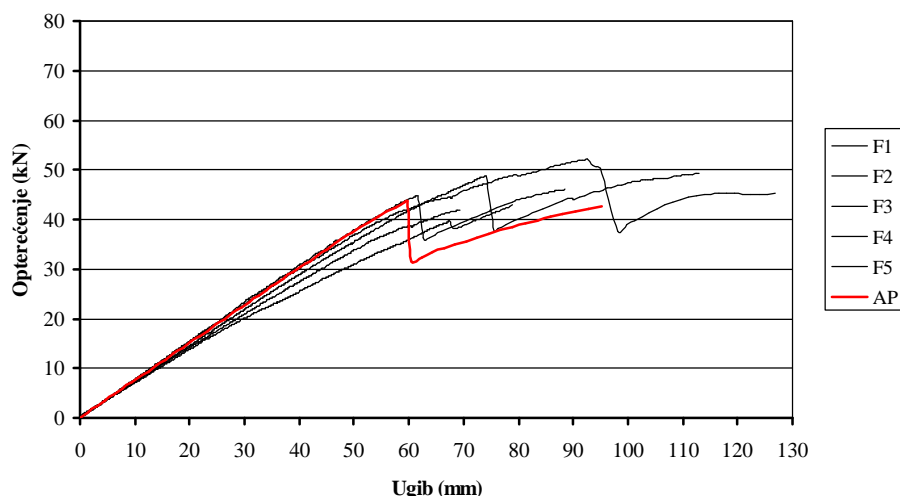
Slika 7.17 - Poređenje dijagrama opterećenje-ugib za ojačane nosače Serije B određenih na osnovu eksperimentalnog ispitivanja (B1-B10) i analitičkog proračuna (AP)



Slika 7.18 - Poređenje dijagrama opterećenje-ugib za ojačane nosače Serije C određenih na osnovu eksperimentalnog ispitivanja (C1-C5) i analitičkog proračuna (AP)



Slika 7.19 - Poređenje dijagrama opterećenje-ugib za ojačane nosače Serije E određenih na osnovu eksperimentalnog ispitivanja (E1-E5) i analitičkog proračuna (AP)



Slika 7.20 - Poređenje dijagrama opterećenje-ugib za ojačane nosače Serije F
određenih na osnovu eksperimentalnog ispitivanja (F1-F5)
i analitičkog proračuna (AP)

U tabeli 7.4 prikazane su prosečne vrednosti eksperimentalnih rezultata za maksimalno opterećenje, maksimalan ugib i krutost za savijanje, kao i vrednosti predviđanja datih veličina prema analitičkom proračunu. Razlike između eksperimentalne i teorijske analize su, takođe, date u tabeli.

Teorijske vrednosti granične nosivosti su određene lomom u zategnutoj zoni kao najkritičnijom situacijom. Poređenje vrednosti za maksimalno opterećenje pokazuje dobar odnos između eksperimentalnih i analitičkih rezultata. Ovi rezultati ukazuju na validnost teorijskog modela. U pogledu neojačanih nosača (Serija A) prosečan kapacitet nosivosti određen eksperimentalnim putem odlično se slaže sa teorijskim predviđanjem, dok se rezultati za ojačane nosače razlikuju zavisno od položaja ojačanja. Niža vrednosti graničnog opterećenja dobijena je analitičkim proračunom za nosač ojačan jednom karbonskom trakom sa donje strane (Serija B), a viša vrednost za nosač ojačan sa dve karbonske trake (Serija C). Razlika između eksperimentalne i teorijske vrednosti za nosače sa dve karbonske trake je posledica zabeleženog tipa loma. Eksperimentalno dominantan oblik loma je smicanje, a ne zatezanje kao što je prema teorijskom modelu. U slučaju ojačanja vertikalno postavljenom karbonskom trakom (Serija E) prosečna vrednost eksperimentalnih rezultata je nešto niža od analitičke vrednosti, što je posledica nemogućnosti uzimanja u obzir realnog slabljenja drvenog preseka usled

usecanja vertikalnog proreza. Eksperimentalni kapacitet nostivosti u slučaju nosača ojačanog karbonskom trakom između drvenih lamela (Serija F) je veći u odnosu na teorijsko predviđanje. Razlog leži u pretpostavci teorijskog modela da se pri lomu drvene lamele ispod trake javlja potpuna delaminacija te lamele, što ne odgovara realnoj situaciji.

Tabela 7.4 - Poređenje eksperimentalnih i analitičkih rezultata za neojačane nosače (Serija A) i ojačane nosače (Serije B, C, E i F)

	Serija A	Serija B	Serija C	Serija E	Serija F
<i>Maksimalno opterećenje (kN)</i>					
Eksperimentalno ispitivanje	37,9	59,1	63,5	45,0	46,4
Analitički proračun	38,6	56,5	66,2	48,4	43,8
Razlika (%)	1,8	-4,5	4,2	7,6	-5,7
<i>Maksimalni ugib (mm)</i>					
Eksperimentalno ispitivanje	59,9	93,8	101,5	74,4	95,3
Analitički proračun	57,4	80,2	89,7	70,2	95,2
Razlika (%)	-4,2	-14,5	-11,7	-5,6	-0,1
<i>Krutost na savijanje EI (kNm²)</i>					
Eksperimentalno ispitivanje	646,4	772,7	910,6	717,8	727,6
Analitički proračun	684,1	818,9	940,4	751,3	759,1
Razlika (%)	5,8	6,0	3,3	4,7	4,3

Izračunate vrednosti krutosti na savijanje primenom teorije krutog sprezanja usvajajući idealnu vezu između ojačanja i lepljenog lameliranog drveta pokazale su dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima. Prosečne vrednosti krutosti određene na osnovu eksperimentalnih merenja su niže u odnosu na analitičke vrednosti. Ovi rezultati su očekivani s obzirom na činjenicu da se u okviru teorijskog modela, radi maksimalnog pojednostavljenja, drvo praktično razmatra kao homogen izotropan materijal.

Što se tiče ugiba pri lomu, vrednosti su generalno veće kog eksperimentalnih istraživanja, pri čemu su najveća odstupanja zabeležena kod nosača ojačanih jednom

karbonskom trakom sa donje strane (Serija B). Veći ugib je u nekoj meri rezultat post efekata loma. Takođe, veća vrednost ugiba se može objasniti zanemarivanjem uticaja smičućih deformacija kod teorijskog modela.

Može se zaključiti da analitički proračun daje zadovoljavajuće predviđanje koje se dobro podudara sa eksperimentalnim rezultatima. To znači da model može biti primenjen u realnim proračunskim situacijama. Međutim, s obzirom na varijabilnost karakteristika drveta kao materijala, broj ispitanih uzoraka u ovom istraživanju nije dovoljan. Dodatna ispitivanja bi trebalo da kompletiraju postupak proračuna usvajanjem faktora sigurnosti, tako da se uspostavi siguran, pouzdan i tačan model koji se može primenjivati u svakodnevnoj inženjerskoj praksi.

8. NUMERIČKA ANALIZA

Numerička analiza sprovedena je primenom metode konačnih elemenata (MKE). Osnovni princip analize konačnim elementima je da kompleksne oblasti mogu biti podeljene i predstavljene kao skup jednostavnih elemenata konačne veličine. Ovo omogućava da se globalni problem opiše kroz sistem diferencijalnih jednačina koje uzimaju u obzir kompatibilnost između elemenata i zahteve graničnih uslova. MKE se može upotrebiti za modeliranje širokog spektra fizičkih situacija i procesa uključujući probleme u oblasti mehanike kontinuuma, transfera toplote i mase, kao i protoka fluida. Glavna prednost u kontekstu savremenog inženjerstva je da se modeli konačnih elemenata mogu koristiti u simulaciji stvarnih situacija, koje, ako se rade na konvencionalne načine (sa eksperimentima), mogu zahtevati prilično dosta testova, vremena i novca. Modeli MKE mogu se podjednako koristiti i za ekstrapolaciju izvan oblasti rezultata ispitivanja, na primer u slučaju dugotrajnih efekata kao što su tečenje, relaksacija i sl. Ipak, treba imati na umu da modeliranje nekog fenomena, uzimajući u obzir sve parametre koji su uključeni, može biti preglomazno i praktično teško izvodljivo. Stoga, analiza MKE i ostale tehnike numeričke analize ne mogu nikada potpuno zameniti eksperimentalna ispitivanja. One su moćan dodatak koji mora da bude u savezu sa eksperimentalnim opažanjima i karakteristikama materijala.

8.1 Numeričko modeliranje

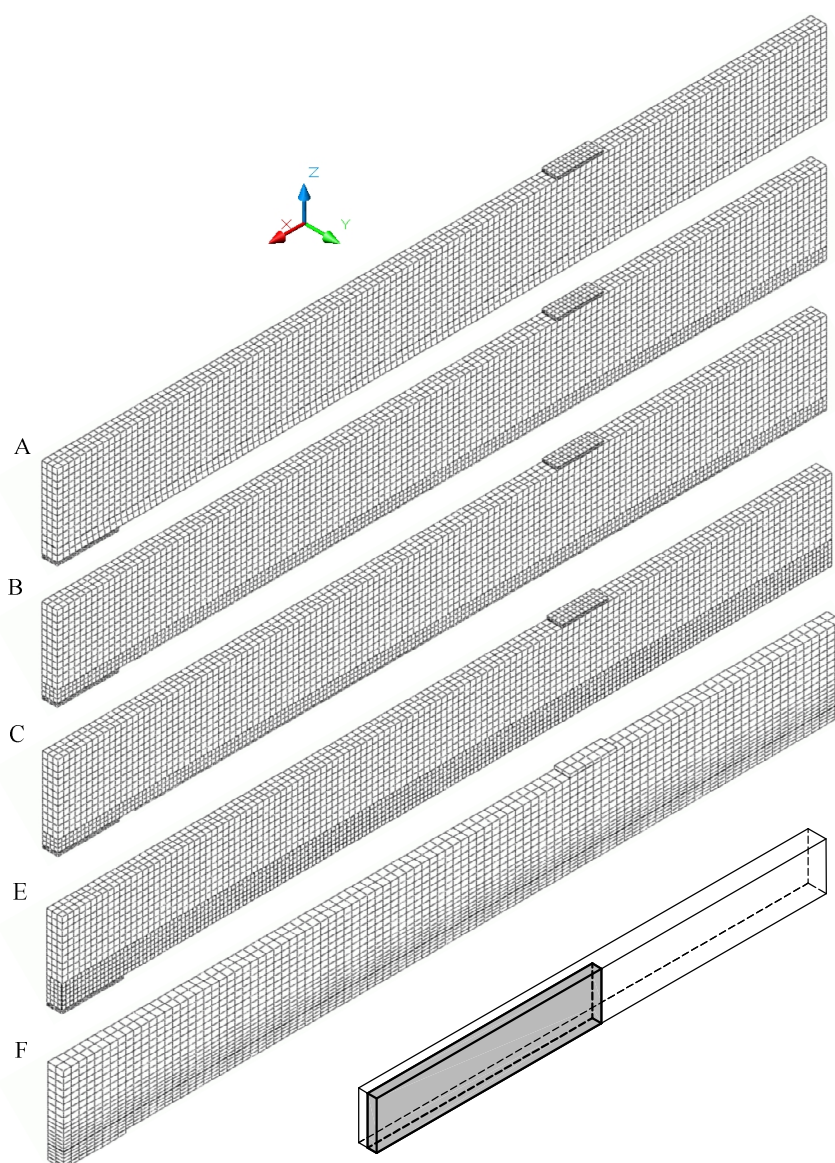
Model primenom konačnih elemenata je razvijen radi simuliranja ponašnja kako neojačanih nosača, tako i nosača ojačanih karbonskim trakama. Primarni cilj

numeričkog modeliranja je poređenje rezultata numeričke analize i rezultata dobijenih eksperimentalnim ispitivanjem. Numerički proračuni su izvršeni koristeći komercijalni programski paket ABAQUS ver. 6.12 [79]. Ovim programom omogućena je trodimenzionalna nelinearna analiza elemenata izrađenih od ortotropnih materijala, kao i analiza rešenja konstantnih problema.

Numerička analiza je sprovedena za neojačane nosače Serije A, kao i za ojačane nosače Serija B, C, E i F. Nosači ojačani jednom karbonskom trakom sa donje strane i tkaninama na krajevima (Serija D) nisu obuhvaćeni numeričkom analizom, jer prema eksperimentalnim rezultatima uticaj tkanina na mehaničke karakteristike i ponašanje nije vidljiv. Geometrija modela i raspored opterećenja u potpunosti odgovaraju proceduri sprovedenoj tokom eksperimentalnog ispitivanja. Usled simetrije u geometriji, opterećenju i graničnim uslovima, modelirna je samo 1/4 nosača (slika 8.1), dok su uklonjeni delovi zamenjeni sa ograničenjima odgovarajućih pomeranja i obrtanja. U poprečnoj ravni simetrije, postavljeni su granični uslovi tako da je sprečeno pomeranje u podužnom pravcu i obrtanje oko horizontalne i vertikalne ose ($u_x \neq 0$, $u_y \neq 0$, $u_z = 0$, $\varphi_x = 0$, $\varphi_y = 0$, $\varphi_z \neq 0$). Slično, u podužnoj ravni simetrije sprečeno je pomeranje u pravcu poprečne horizontalne ose i obrtanje oko podužne ose i poprečne vertikalne ose ($u_x = 0$, $u_y \neq 0$, $u_z \neq 0$, $\varphi_x \neq 0$, $\varphi_y = 0$, $\varphi_z = 0$). Oslonac na kraju nosača je modeliran kao valjkasti oslonac sprečavajući pomeranje nosača u vertikalnom pravcu. Pomeranje nosača u podužnom pravcu je dopušteno, kao što je to dopušteno u toku eksperimentalnog ispitivanja. Svaka drvena lamela u okviru lepljenog lameliranog nosača je modelirana kao poseban entitet, tako da se karakteristike materijala pojedinačnih lamela mogu ugraditi u model. Kako se lom po spoju lamela lepljenog lameliranog drvenog nosača generalno nije događao tokom ispitivanja, lepak između lamela nije uključen u model, a usvojeno je da postoji idealna veza. Idealna veza je usvojena i za spoj drvo/epoksidni lepak i epoksidni lepak/karbonska traka, shodno zadovoljavajućem kvalitetu spoja prikazanom kroz eksperimentalno istraživanje. Model, takođe, uključuje čelične pločice na mestu unosa sile i na mestu oslanjanja u cilju smanjenja koncentracije napona na tim mestima.

Svi elementi sistema su modelirani koristeći „solid“ konačne elemente (C3D8) - prostorni 3D konačni elementi sa 8 čvorova. Ovi elementi u svakom čvoru imaju 6 stepeni slobode, tri pomeranja i tri obrtanja. Analiza mrežne diskretizacije je sprovedena

s ciljem određivanja pogodne veličine elemenata, a usvojena mreža konačnih elemenata za neojačane nosače i ojačane nosače prikazana je na slici 8.1. Dva konačna elementa su korišćena po visini drvene lamele. Za karbonsko ojačanje i tanak sloj lepka, u svakom sistemu ojačanja, korišćen je jedan konačan element po debljini. Finija mreža je usvojena za drvene lamele koje su u kontaktu sa karbonskom trakom. Ovo je učinjeno zbog posebnog interesovanja razmatranja napona na kontaktu između drveta, lepka i trake. U skladu sa pretpostavkom idealne veze, usvojen je kontinuitet pomeranja na granicama između elemenata različitih materijala. Opcija „tie“, kojom se izjednačavaju pomeranja razmatranih kontaktnih površina, upotrebljena je za modeliranje kontakta.



Slika 8.1 - Podela u konačne elemente nosača Serija A, B, C, E i F

Numerička analiza je sprovedena sa malim pomeranjima, pri čemu su serije kontrolisanih inkremenata po pomeranju nanošene kao linijsko opterećenje preko širine nosača. Ugib u sredini nosača i reakcija oslonca su beleženi za svaki inkrement u cilju crtanja dijagrama opterećenje-ugib, koji najbolje oslikava ponašanje nosača. Shodno rezultatima eksperimentalnog ispitivanja, kriterijum loma je baziran na uslovu maksimalnog napona, odnosno kada napon zatezanja u podužnom (longitudijalnom) pravcu, u određenom koraku pomeranja, dostigne graničnu vrednost.

Proračun modela neojačanih nosača, nosača ojačanih karbonskom trakom sa donje strane i nosača ojačanih karbonskom trakom postavljenom u vertikalni preoz sproveden je statičkim proračunom (*Abaqus/Standard solver*).

Zbog mogućnosti primene modela loma, proračun modela nosača ojačanih karbonskom trakom između drvenih lamela je sproveden dinamičkim proračunom (*Abaqus/Explicit solver*). Statički proračun (*Abaqus/Standard solver*) u slučajevima izraženog nelinearnog ponašanja i pojave loma ima velike probleme sa konvergencijom. U okviru analize prikazane u ovom radu korišćen je duktilni model loma (*progressive ductile damage model*), baziran na principu redukcije modula elastičnosti elementa, odnosno efektivnog napona, koji je prevazišao granicu pojave loma. Granica pojave loma (*damage initiation criterion*) se definiše određenom vrednošću ekvivalentne plastične dilatacije, a razvoj loma (*damage evolution*) kao propagacija koeficijenta redukcije krutosti D (*damage variable*) u funkciji ekvivalentnog plastičnog pomeranja. Koeficijent redukcije krutosti D uzima vrednosti od 0 za stanje na početku do 1 za stanje na kraju loma.

8.2 Karakteristike materijala

Upotrebiti odgovarajući konstitutivni model za svaki materijal je ključno za postizanje tačnog predviđanja mehaničkih karakteristika nosača. Kod neojačanih nosača od lepljenog lameliranog drveta, lom se obično događa u zategnutoj zoni, pre nego što se ikakva plastifikacija javi u pritisnutoj zoni, tako da je linearno-elastični model sasvim odgovarajući. Međutim, ovo nije slučaj za ojačane nosače gde se, zavisno od položaja i procenta ojačanja, značajna plastifikacija može javiti. Linearno-elastičan idealno-plastičan model materijala je upotrebljen za ponašanje drveta pri pritisku, dok je

linearno-elastičan (krt) model upotrebljen za drvo izloženo zatezanju (model 1 iz tabele 7.1). Teorija anizotropne plastičnosti je primenjena u modelu kako bi se obuhvatilo plastično ponašanje drveta u tri gornje lamele u pritisnutoj zoni. Teorija obuhvata bi-linearno ponašanje za drvo u tri ortogonalna pravca, kao i u tri smičuće ravni. Kao uslov za prelazak materijala u plastičnu oblast korišćen je Hill-ov kriterijum [80]. Ovaj kriterijum je generalizovana verzija Mises-ovog uslova plastičnog tečenja, kojom se uzima u obzir anizotropija u čvrstoći materijala. Hill-ova funkcija potencijala se može izraziti preko komponentalnih napona kao:

$$f(\mathbf{s}) = \sqrt{F(\mathbf{s}_{22} - \mathbf{s}_{33})^2 + G(\mathbf{s}_{33} - \mathbf{s}_{11})^2 + H(\mathbf{s}_{11} - \mathbf{s}_{22})^2 + 2L\mathbf{s}_{23}^2 + 2M\mathbf{s}_{31}^2 + 2N\mathbf{s}_{12}^2}, \quad (8.1)$$

gde su F, G, H, L, M i N konstante koje se računaju na osnovu karakteristika čvrstoće materijala za različite pravce. Ove konstante su definisane kao:

$$F = \frac{(\mathbf{s}^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\mathbf{s}}_{22}^2} + \frac{1}{\bar{\mathbf{s}}_{33}^2} - \frac{1}{\bar{\mathbf{s}}_{11}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right), \quad (8.2)$$

$$G = \frac{(\mathbf{s}^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\mathbf{s}}_{33}^2} + \frac{1}{\bar{\mathbf{s}}_{11}^2} - \frac{1}{\bar{\mathbf{s}}_{22}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right), \quad (8.3)$$

$$H = \frac{(\mathbf{s}^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\mathbf{s}}_{11}^2} + \frac{1}{\bar{\mathbf{s}}_{22}^2} - \frac{1}{\bar{\mathbf{s}}_{33}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right), \quad (8.4)$$

$$L = \frac{3}{2} \left(\frac{\mathbf{t}^0}{\bar{\mathbf{s}}_{23}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{23}^2}, \quad (8.5)$$

$$M = \frac{3}{2} \left(\frac{\mathbf{t}^0}{\bar{\mathbf{s}}_{13}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{13}^2}, \quad (8.6)$$

$$N = \frac{3}{2} \left(\frac{\mathbf{t}^0}{\bar{\mathbf{s}}_{12}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{12}^2}, \quad (8.7)$$

gde su:

$\bar{\mathbf{s}}_{ii}, \bar{\mathbf{s}}_{ij}$ - naponi na granici tečenja u slučaju kada je samo komponenta napona \mathbf{s}_{ii} , odnosno \mathbf{s}_{ij} , različita od nule;

s^0 - referentna vrednost napona tečenja (referentna granica tečenja);

$$t^0 = s^0 / \sqrt{3}; \text{ a}$$

R_{ii}, R_{ij} - koeficijenti napona tečenja, definisani kao:

$$R_{ii} = \frac{\bar{S}_{ii}}{s^0}, \quad (8.8)$$

$$R_{ij} = \frac{\bar{S}_{ij}}{t^0}. \quad (8.9)$$

Iz svega navedenog, može se zaključiti da na ovaj način definisan model za drvo zahteva specifikaciju velikog broja materijalnih karakteristika.

Karakterizacija ostalih materijala je znatno jednostavnija. Karbonska traka je modelirana kao linearno-elastičan transversalno izotropni materijal, dok su lepak i čelik tretirani kao linearno-elastični izotropni materijali.

Karakteristike materijala korišćene u numeričkim modelima određene su na osnovu ispitivanja materijala (poglavlje 5) i na osnovu dobro utvrđenih relacija i objavljenih podataka u literaturi. Usvojeno je da su karakteristike materijala nezavisne od brzine nanošenja opterećenja. Prisustvo kvrga i drugih imperfekcija u drvetu nije uzeto u obzir. Efekti okruženja, kao što su vlažnost i temperatura, na ponašanje drveta, takođe, nisu razmatrani.

Drvo je razmatrano kao ortotropni materijali, prema tome ima nezavisne mehaničke karakteristike u tri međusobno upravna pravca (tj. longitudinalni pravac, paralelno drvenim vlaknima, i dva pravca upravna na longitudinalni pravac). Pravci glavnih osa su prikazani na slici 8.2. Dvanaest elastičnih konstanti (devet od njih su nezavisne) je potrebno da okarakteriše elastično ponašanje drveta. Ove konstante su tri modula elastičnosti (E_i), tri modula klizanja (G_{ij}) i šest Poisson-ovih koeficijenata (ν_{ij}). Modul elastičnosti (E_1) u pravcu drvenih vlakana je određen eksperimentalno. Ostali moduli: $E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23}$ su izračunati prema sledećim relacijama datih od strane Bodig i Jayne -a [8]:

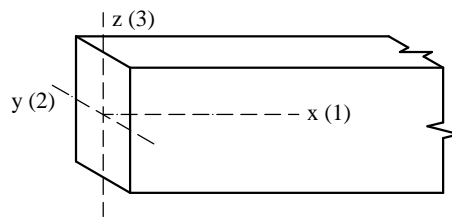
$$E_1 : E_2 : E_3 \approx 20 : 1,6 : 1, \quad (8.10)$$

$$G_{12} : G_{13} : G_{23} \approx 10 : 9,4 : 1, \quad (8.11)$$

$$E_1 : G_{12} \approx 14 : 1. \quad (8.12)$$

Vrednosti Poisson-ovih koeficijenata ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} , usvojene su prema Bodig i Jayne -u [8] za meko drvo.

Elastične konstante za karbonsku traku su usvojene na osnovu eksperimentalnih istraživanja (E_1), vrednosti datih od strane proizvođača, kao i radu [59]. Shodno usvojenom materijalnom modelu, karakteristike u pravcu debljine karbonske trake su uzete da su iste kao u drugom poprečnom pravcu (u pravcu širine trake). Parametri za lepak su usvojeni prema tehničkom listu proizvođača i prema radu [81].



Slika 8.2 - Pravci glavnih osa ispitanih uzoraka

Materijalne konstante korišćene u numeričkoj analizi su date u tabeli 8.1. Drvo pri zatezanju, pritisku i savijanju ima različit modul elastičnosti u pravcu i upravno na pravac vlakana. Ipak, razlike su male i iz praktičnih razloga usvojeno je da moduli elastičnosti drveta imaju iste vrednosti nezavisno od vrste naprezanja.

Tabela 8.1 - Pregled karakteristika materijala korišćenih u MKE simulaciji

	Drvo	CFRP materijal	Epoksidni lepak	Čelik
<i>Moduli elastičnosti E (MPa)</i>				
E_1	11080	165543	4500	210000
E_2	886	10000	4500	210000
E_3	554	10000	4500	210000
<i>Poisson-ovi koeficijenti ν (-)</i>				
ν_{12}	0,37	0,3	0,35	0,3
ν_{13}	0,42	0,3	0,35	0,3
ν_{23}	0,47	0,03	0,35	0,3
<i>Moduli klizanja G (MPa)</i>				
G_{12}	791	5000	-	-
G_{13}	744	5000	-	-
G_{23}	79	500	-	-

Usvojeni naponi na granici tečenja neophodni za definisanje plastičnog ponašanja drveta prikazani su u tabeli 8.2. Vrednosti su određene eksperimentalno ($\bar{s}_{11}, \bar{s}_{12}$) i na osnovu podataka dostupnih u literaturi. Za potrebe proračuna uzeto je da su čvrstoće u poprečnim pravcima (radijalnom i tangencijalnom) iste. Inače, čvrstoća u radijalnom pravcu je nešto veća, zbog povećane otpornost usled prisustva brojnih sržnih zraka. Koristeći date napone tečenja i izraze (8.8)-(8.9) koeficijenti napona tečenja su izračunati i usvojeni kao: $R_{11} = 1$; $R_{22} = R_{33} = 0,14$; $R_{12} = R_{13} = 0,29$; $R_{23} = 0,14$.

Tabela 8.2 - Granice tečenja usvojene u numeričkoj analizi

Naponi tečenja (MPa)						
\bar{s}_{11}	\bar{s}_{22}	\bar{s}_{33}	\bar{s}_{12}	\bar{s}_{13}	\bar{s}_{23}	s^0
36,3	5,0	5,0	6,1	6,1	3,0	36,3

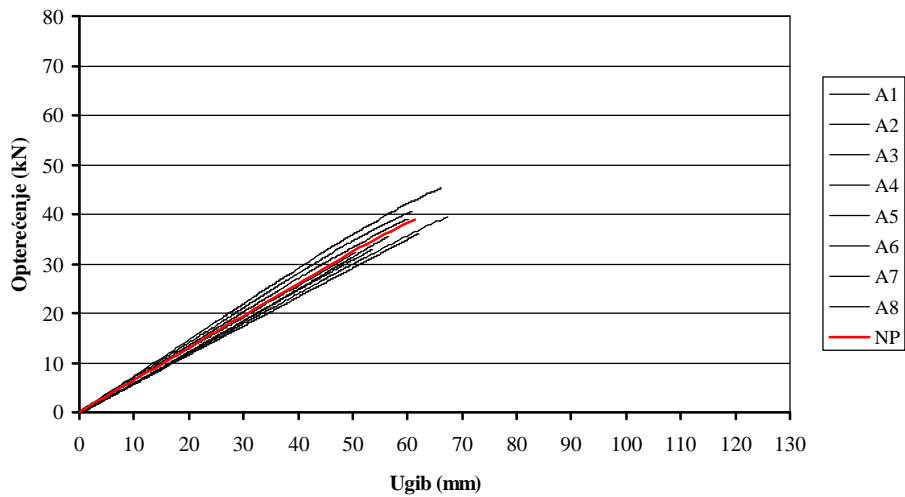
8.3 Kalibracija modela

Isti princip kalibracije primenjen kod analitičkih modela (deo 7.6) važi i za numerčke modele. Činjenica da je granični napon zatezanja pri savijanju veći od graničnog napona zatezanja pri aksijalnom zatezanju uzeta je u obzir usvajanjem da do loma u zategnutoj zoni dolazi pri dostizanju čvrstoće drveta na savijanje. Kod ojačanih nosača prisustvo karbonske trake uvećava čvrstoću drveta na savijanje. Shodno rezultatima analize merenih dilatacija, razmatrano je povećanje čvrstoće drveta na savijanje za 15%, usled prisustva verikalno postavljene karbonske trake, i povećanje za 25%, usled prisustva horizontalno postavljene karbonske trake. Za model nosača ojačanog karbonskom trakom između drvenih lamela, u situaciji loma lamele ispod ojačanja, čvrstoća drveta na savijanje nije modifikovana.

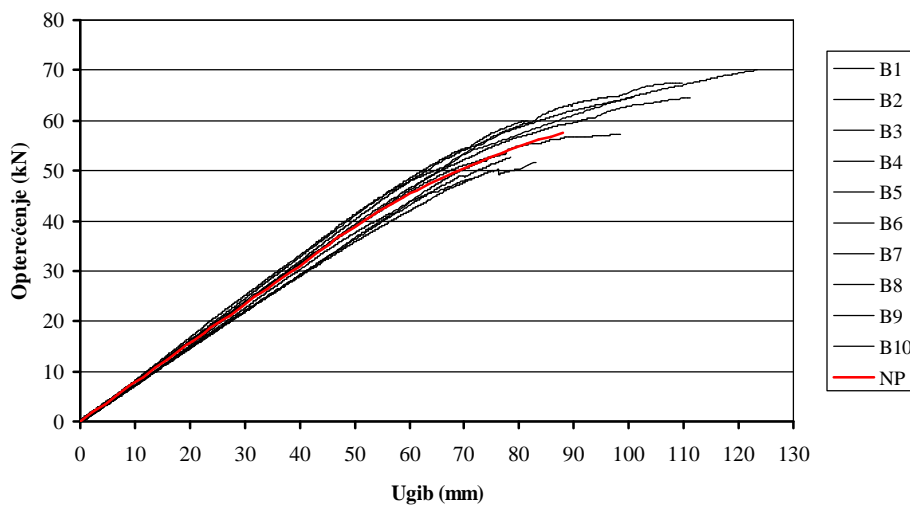
8.4 Rezultati numeričke analize

Numerička analiza, na prethodno opisanim modelima formiranih konačnim elementima, izvršena je za serije neojačanih i ojačanih nosača obuhvaćene eksperimentalnim ispitivanjem. Modeli su inkrementalno opterećivani do dostizanja graničnog opterećenja.

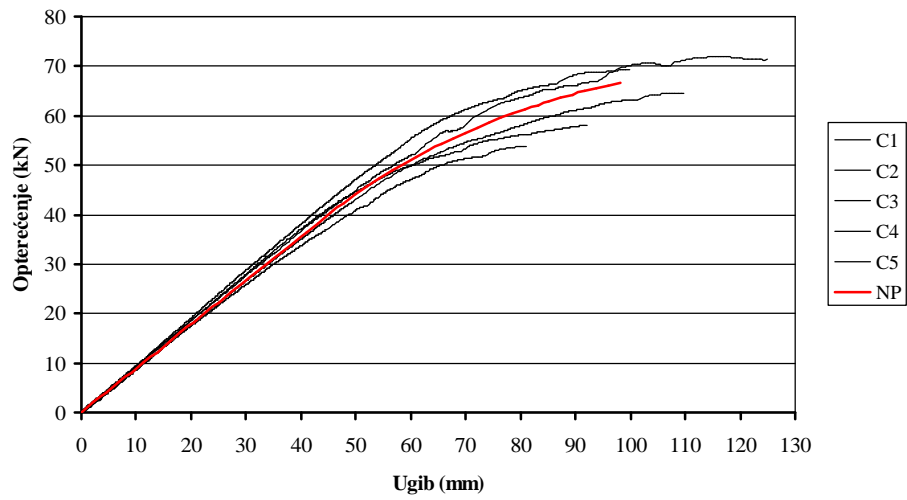
Verifikacija numeričkog modeliranja izvršena je kroz poređenje sa eksperimentalnim rezultatima. Dijagrami opterećenje-ugib određeni modeliranjem konačnim elementima zajedno sa dijagramima dobijenim eksperimentalnim ispitivanjem nosača prikazani su na slikama 8.3-8.7.



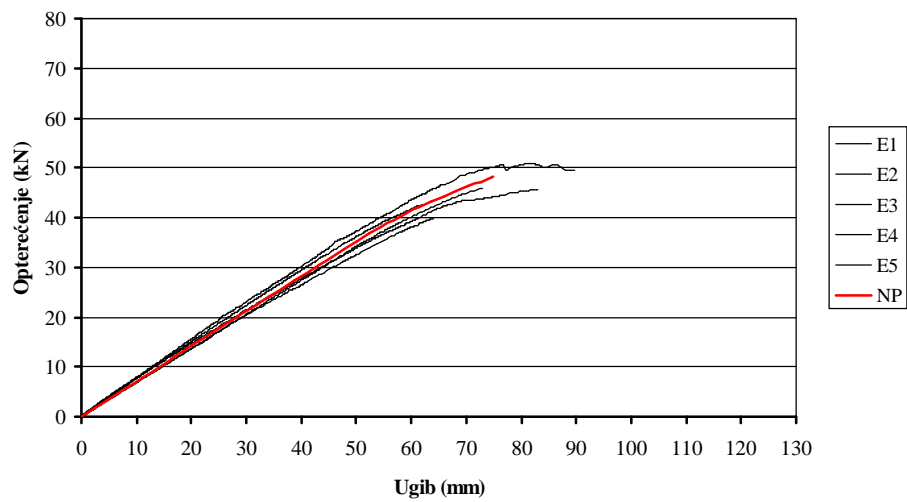
Slika 8.3 - Poređenje dijagrama opterećenje-ugib za neojačane nosače Serije A određenih na osnovu eksperimentalnog ispitivanja (A1-A8) i numeričkog proračuna (NP)



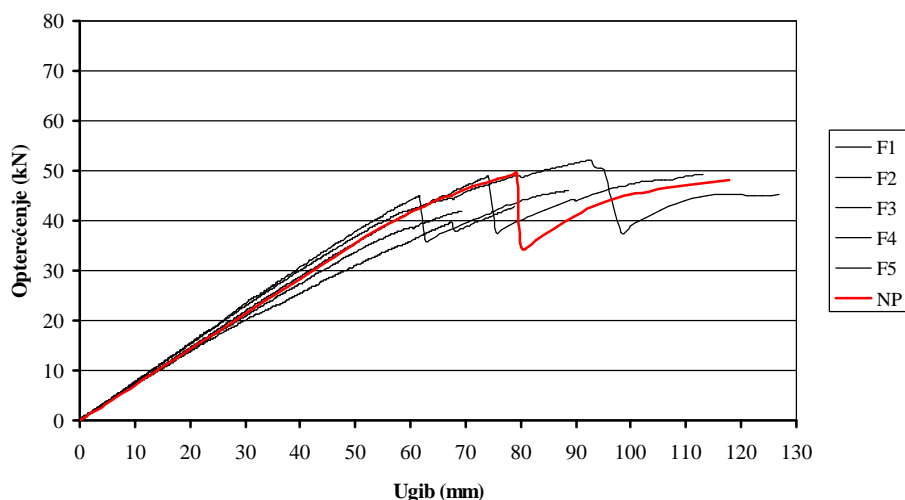
Slika 8.4 - Poređenje dijagrama opterećenje-ugib za ojačane nosače Serije B određenih na osnovu eksperimentalnog ispitivanja (B1-B10) i numeričkog proračuna (NP)



Slika 8.5 - Poređenje dijagrama opterećenje-ugib za ojačane nosače Serije C određenih na osnovu eksperimentalnog ispitivanja (C1-C5) i numeričkog proračuna (NP)



Slika 8.6 - Poređenje dijagrama opterećenje-ugib za ojačane nosače Serije E određenih na osnovu eksperimentalnog ispitivanja (E1-E5) i numeričkog proračuna (NP)



Slika 8.7 - Poređenje dijagrama opterećenje-ugib za ojačane nosače Serije F određenih na osnovu eksperimentalnog ispitivanja (F1-F5) i numeričkog proračuna (AP)

Na osnovu datih dijagrama može se zaključiti da postoji dobro slaganje između numeričkih i eksperimentalnih rezultata za neojačane nosače sa linearno-elastičnim ponašanjem do loma. Takođe, numerički modeli su pokazali dobru saglasnost sa eksperimentalnim ispitivanjem za predviđanje duktilnog ponašanja ojačanih nosača.

U tabeli 8.3 prikazane su prosečne vrednosti eksperimentalnih rezultata za maksimalno opterećenje, maksimalan ugib i krutost za savijanje, kao i vrednosti datih veličina određene prema numeričkom proračunu.

Poređenje vrednosti za maksimalno opterećenje pokazuje dobar odnos između eksperimentalnih i numeričkih rezultata. U slučaju neojačanih nosača (Serija A) nešto viša vrednost kapaciteta nosivosti je dobijena numeričkom analizom. Nešto niža vrednost graničnog opterećenja je određena numeričkim proračunom za nosače ojačane jednom karbonskom trakom sa donje strane (Serija B), dok je za nosače ojačane sa dve karbonske trake (Serija C) proračunski dobijena veća vrednost. Razlika između eksperimentalne i numeričke vrednosti maksimalnog opterećenja za nosače sa dve karbonske trake je posledica neslaganja oko oblika loma. Dok je u eksperimentalno ispitanim uzorcima dominantno do loma dolazilo usled dostizanja graničnog smičućeg napona, u numeričkom modelu lom je posledica prekoračenja graničnog napona zatezanja pri savijanju. O vrednostima smičućih napona zabeleženih u okviru numeričke analize biće reči kasnije. Kao i kod analitičkog proračuna, najveće odstupanje između

upoređenih rezultata zabeleženo je kod nosača ojačanih karbonskom trakom postavljenom u vertikalni prorez (Serija E). Razlog leži u činjenici da se podužnim prorezom za smeštaj karbonske trake dodatno slabi nosač remećenjem drvenih vlakana u zoni usecanja, što nije uzeto u obzir pri modeliranju. Prosečna vrednost kapaciteta nostivosti eksperimentalno ispitanih nosača ojačanih karbonskom trakom između drvenih lamela (Serija F) je niža u odnosu na numeričko predviđanje. Međutim, ako se poređenje uradi za prosečnu vrednost eksperimentalnih rezultata nosača F1, F4 i F5, koji su pokazali karakteristično ponašanje za ovaj slučaj ojačanih nosača (najpre lom drvene lamele ispod karbonske trake, a zatim globalni lom nosača), dobijeni numerički rezultat je nešto niži od eksperimentalnog, sa dobrim slaganjem (razlika -2,0%).

Tabela 8.3 - Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata za neojačane nosače (Serija A) i ojačane nosače (Serije B, C, E i F)

	Serija A	Serija B	Serija C	Serija E	Serija F
<i>Maksimalno opterećenje (kN)</i>					
Eksperimentalno ispitivanje	37,9	59,1	63,5	45,0	46,4
Numerički proračun	39,0	57,5	66,7	48,1	49,4
Razlika (%)	3,0	-2,7	4,9	7,1	6,4
<i>Maksimalni ugib (mm)</i>					
Eksperimentalno ispitivanje	59,9	93,8	101,5	74,4	95,3
Numerički proračun	61,7	88,1	98,1	74,9	117,9
Razlika (%)	2,5	-6,1	-3,4	0,7	23,6
<i>Krutost na savijanje EI (kNm²)</i>					
Eksperimentalno ispitivanje	646,4	772,7	910,6	717,8	727,6
Numerički proračun	652,7	781,7	894,3	707,8	712,1
Razlika (%)	1,0	1,2	-1,8	-1,4	-2,1

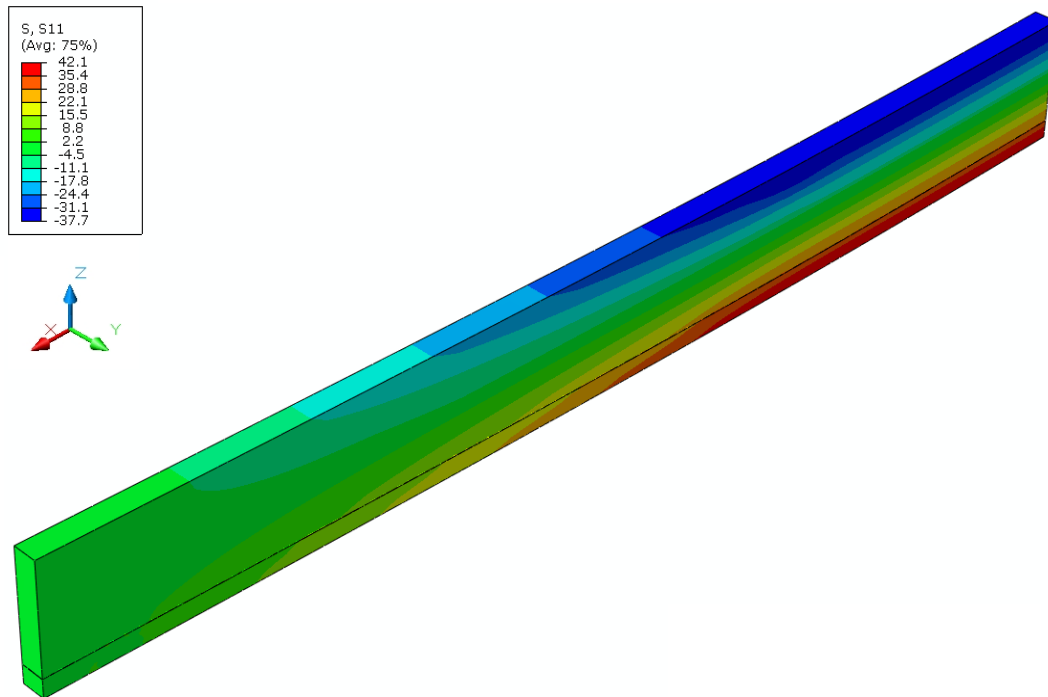
Izračunate vrednosti krutosti na savijanje primenom numeričkog modeliranja pokazale su odlično slaganje sa eksperimentalnim rezultatima. Ovi rezultati pokazuju da se drvo može uspešno modelirati modelom ortogonalne anizotropije. Takođe, dobijeni

rezultati su potvrdili da važi pretpostavka o idealnoj vezi između drveta, lepka i karbonske trake.

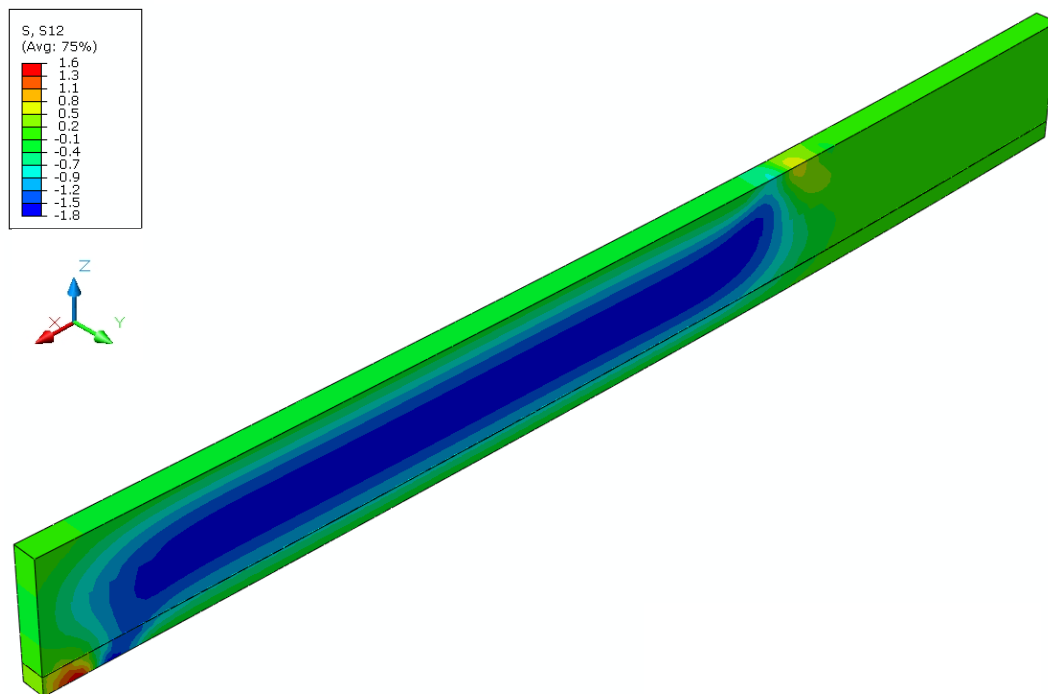
Vrednosti ugiba pri lomu određene numeričkim proračunom su generalno u dobroj saglasnosti sa prosečnim vrednostima dobijenim eksperimentalnim putem, osim u slučaju ojačanja karbonskom trakom postavljenom između drvenih lamela (Serija F). Uzrok odstupanja u slučaju Serije F je varijabilnost u eksperimentalno zabeleženim oblicima loma nosača. Ako se napravi novo poređenje, slično kao što je urađeno za poređenje rezultata maksimalnog opterećenja, razlika se smanjuje na prihvatljivih 8,5%.

Numerička analiza, takođe, može biti veoma korisna u tumačenju eksperimentalnih rezultata i boljem razumevanju mehaničkog ponašanja nosača. Na slikama 8.8-8.19 prikazani su normalni i smičući naponi u drvetu pri graničnom opterećenju za sve razmatrane serije nosača. Podužni presek u osi simetrije omogućava jednostavno praćenje promene napona duž nosača, kao i u poprečnim presecima. Na osnovu datih prikaza normalnih napona može se jasno uočiti oblast maksimalnih napona, kao i oblast plastifikacije drvenog preseka između tačaka apliciranog opterećenja. Analizom prikazanih smičućih napona, može se uočiti pružanje oblasti smičućih napona, shodno dijagramu transverzalnih sila, od oslonca do mesta unosa sile. Sa povećanjem opterećenja, usled deformisanja preseka ispod čelične pločice preko koje se nanosi opterećenje, maksimalni smičući naponi se koncentrišu u oblasti unosa sile u nosač. Ovim se može objasniti pojava kombinovanog loma zatezanje/smicanje kod nekoliko ispitanih ojačanih nosača. Kod nosača ojačanih sa karbonskom trakom postavljenom sa donje strane (Serije B i C), zabeležena je koncentracija napona u zoni sidrenja trake, ali vrednosti ovih napona nisu dovoljno velike da izazovu smičući lom nosača. Objašnjenje dominantnog oblika loma nosača ojačanih sa dve karbonske trake sa donje strane je da se znatno veći napon smicanja javlja u nekoj kosoj ravni, koju nije moguće analizirati datim numeričkim modelom.

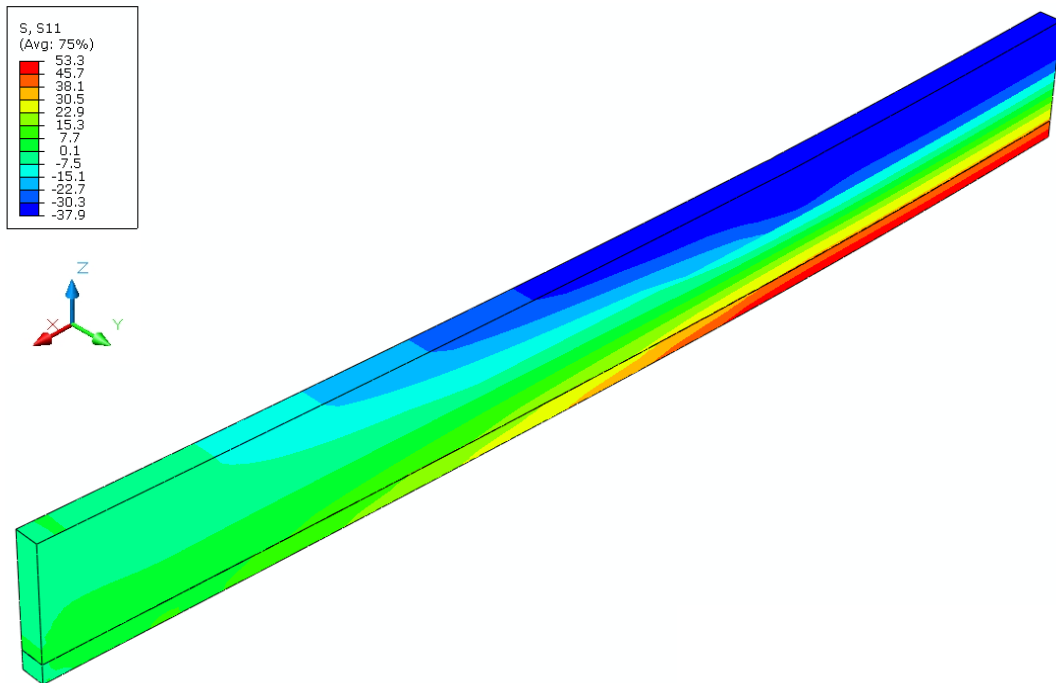
Normalni naponi u karbonskim trakama ojačanih nosača prikazani su na slikama 8.20-8.23. Numerički rezultati su potvrdili zaključak iz eksperimentalnog istraživanja da je kapacitet nosivosti karbonske trake generalno iskorišćen u malom stepenu. Pošto se poprečni presek drveta plastifikuje, stepen iskorišćenja poprečnog preseka trake je nešto veći, ali vrednosti maksimalnog napona su daleko ispod granične vrednosti u svim slučajevima ojačanja.



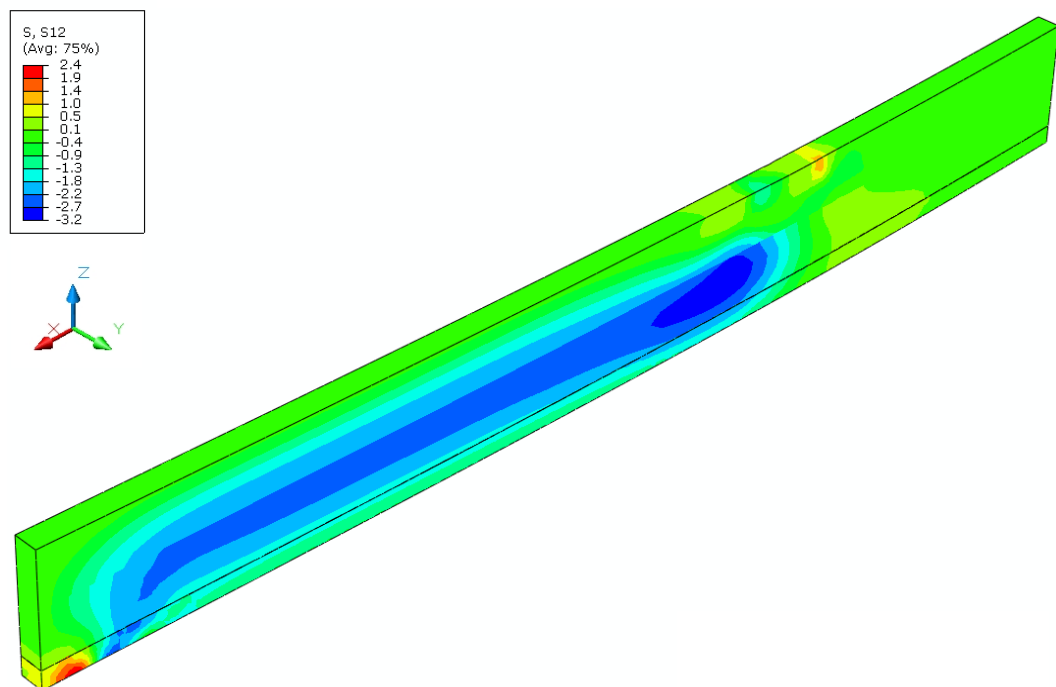
Slika 8.8 - Normalni napon σ_{11} (MPa) u drvetu za neojačani nosač Serije A pri
graničnom opterećenju $F = 39,0$ kN



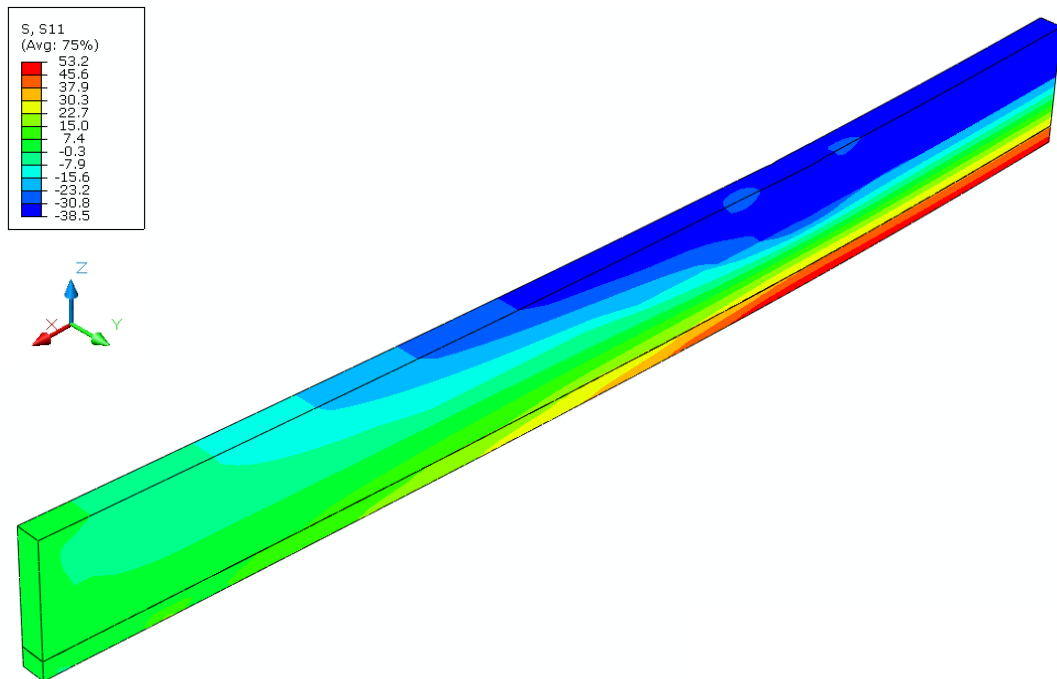
Slika 8.9 - Smičući napon τ_{12} (MPa) u drvetu za neojačani nosač Serije A pri graničnom
opterećenju $F = 39,0$ kN



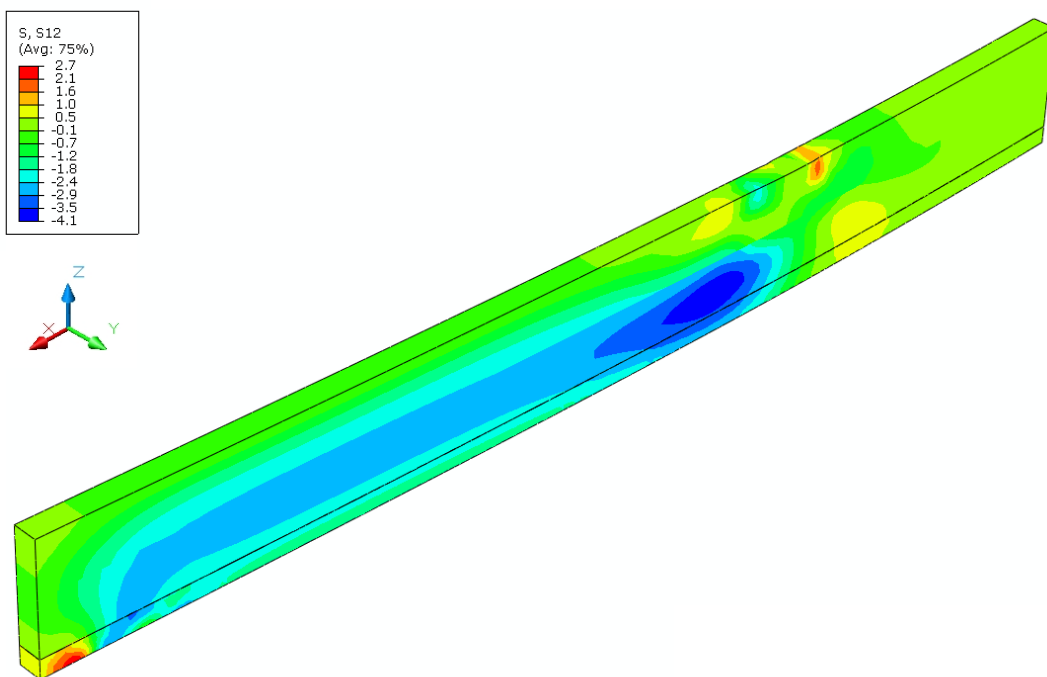
Slika 8.10 - Normalni napon σ_{11} (MPa) u drvetu za ojačani nosač Serije B pri graničnom opterećenju $F = 57,5$ kN



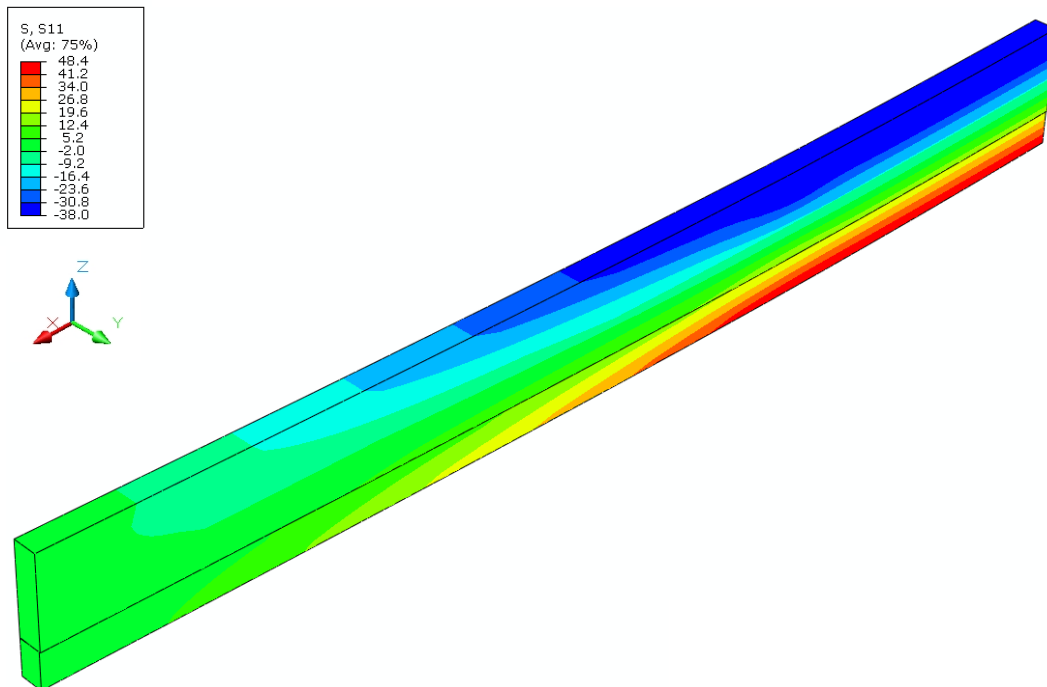
Slika 8.11 - Smičući napon τ_{12} (MPa) u drvetu za ojačani nosač Serije B pri graničnom opterećenju $F = 57,5$ kN



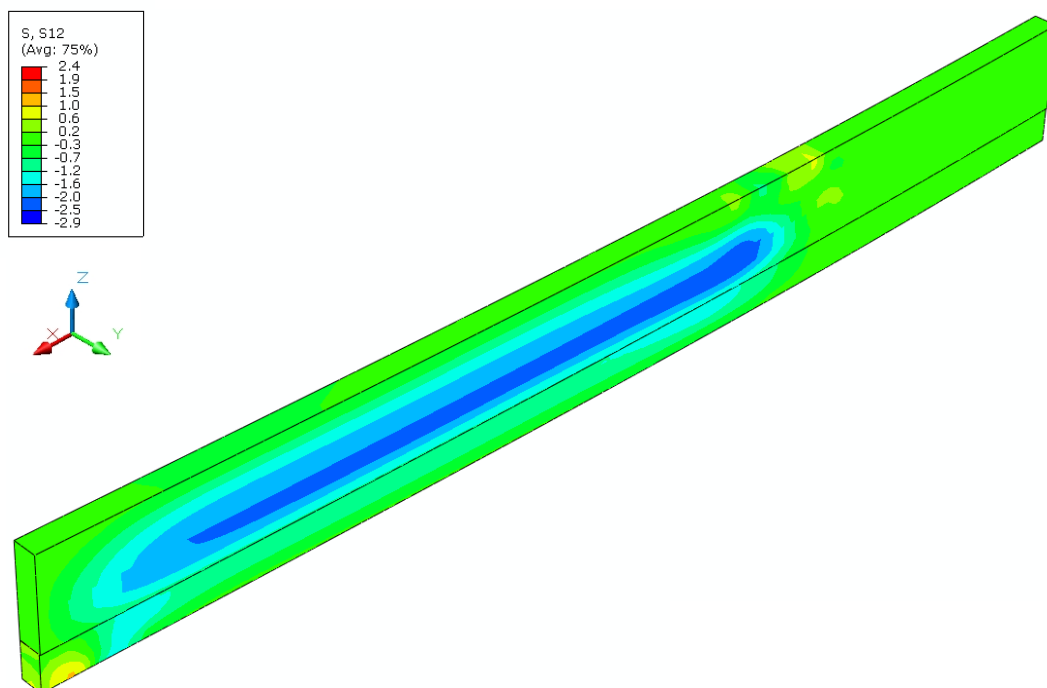
Slika 8.12 - Normalni napon σ_{11} (MPa) u drvetu za ojačani nosač Serije C pri graničnom opterećenju $F = 66,7$ kN



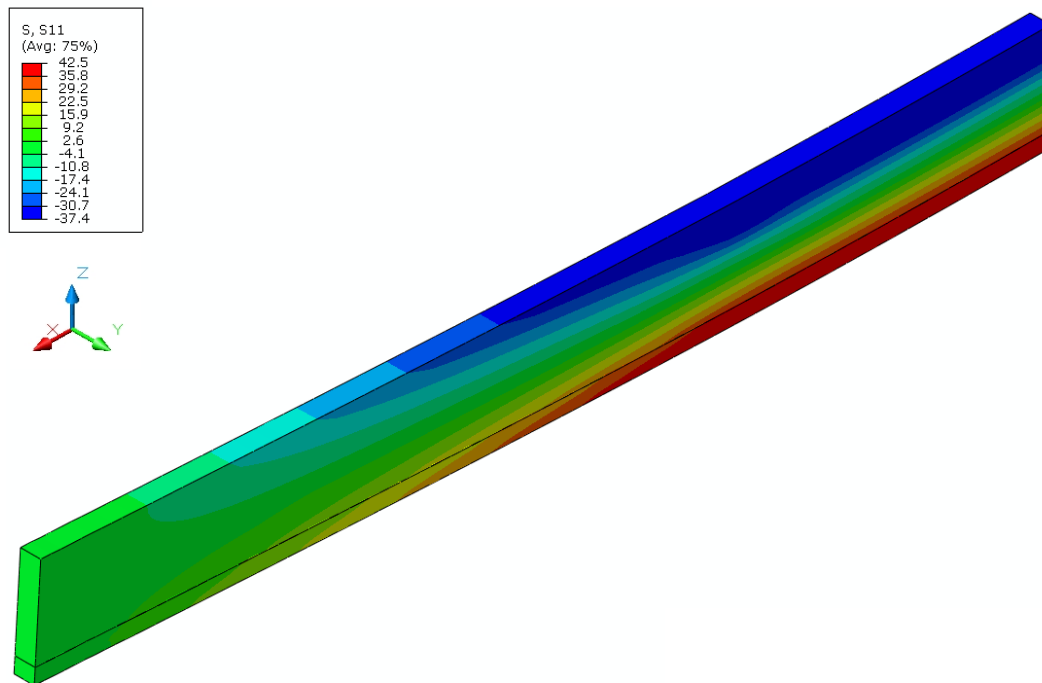
Slika 8.13 - Smičući napon τ_{12} (MPa) u drvetu za ojačani nosač Serije C pri graničnom opterećenju $F = 66,7$ kN



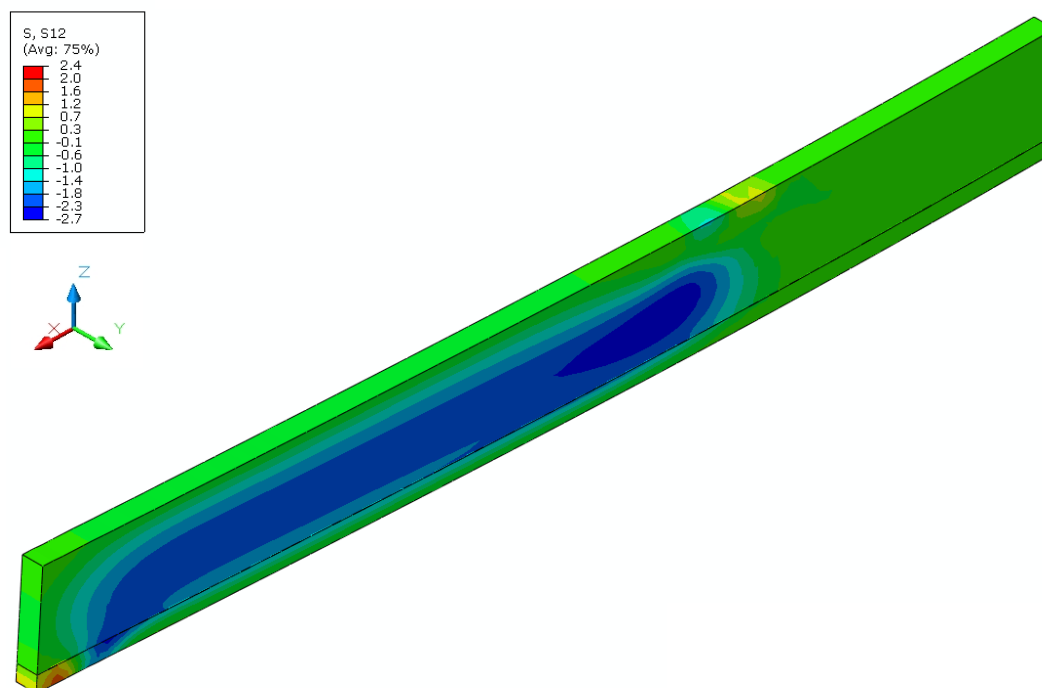
Slika 8.14 - Normalni napon σ_{11} (MPa) u drvetu za ojačani nosač Serije E pri graničnom opterećenju $F = 48,1$ kN



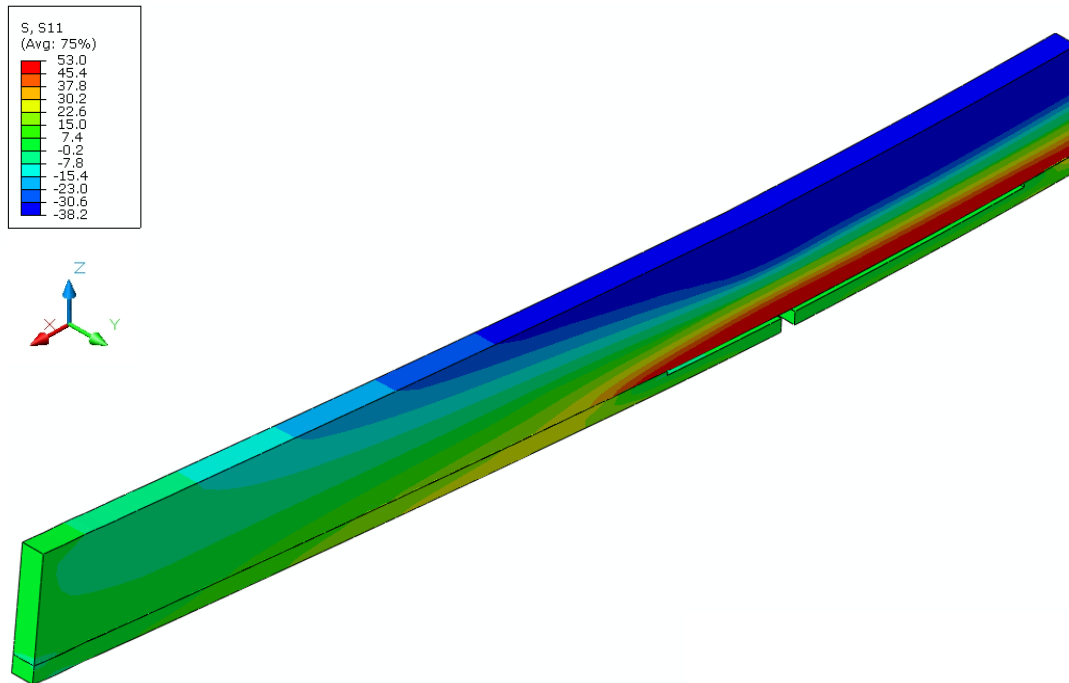
Slika 8.15 - Smičući napon τ_{12} (MPa) u drvetu za ojačani nosač Serije E pri graničnom opterećenju $F = 48,1$ kN



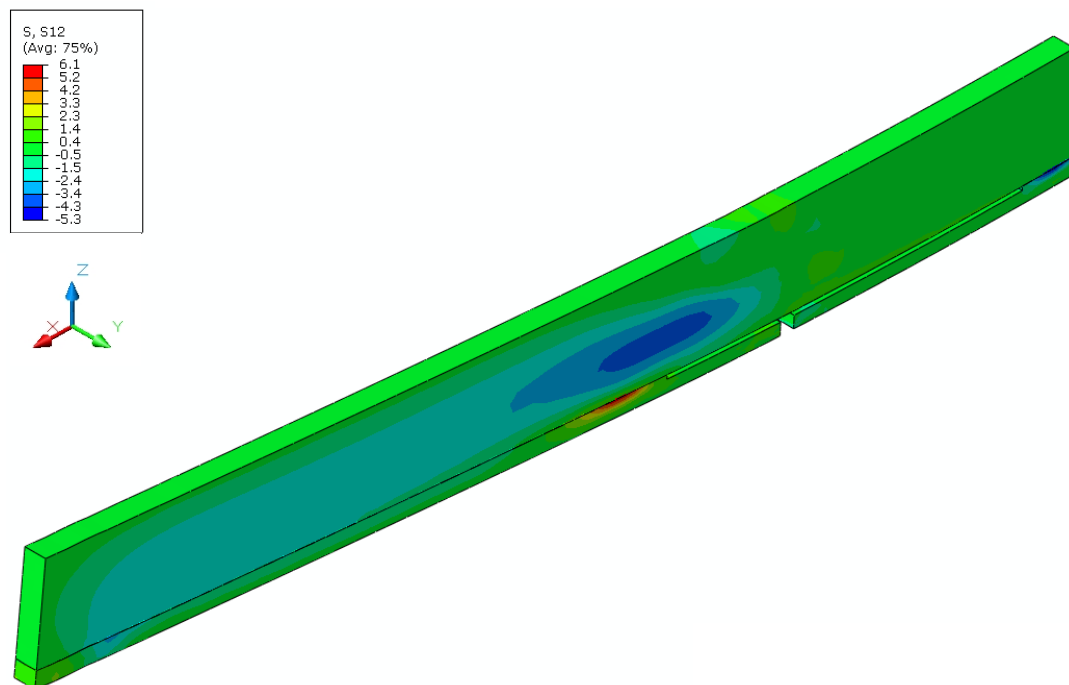
Slika 8.16 - Normalni napon σ_{11} (MPa) u drvetu za ojačani nosač Serije F pri opterećenju koje izaziva lom lamele ispod karbonske trake $F = 49,4$ kN



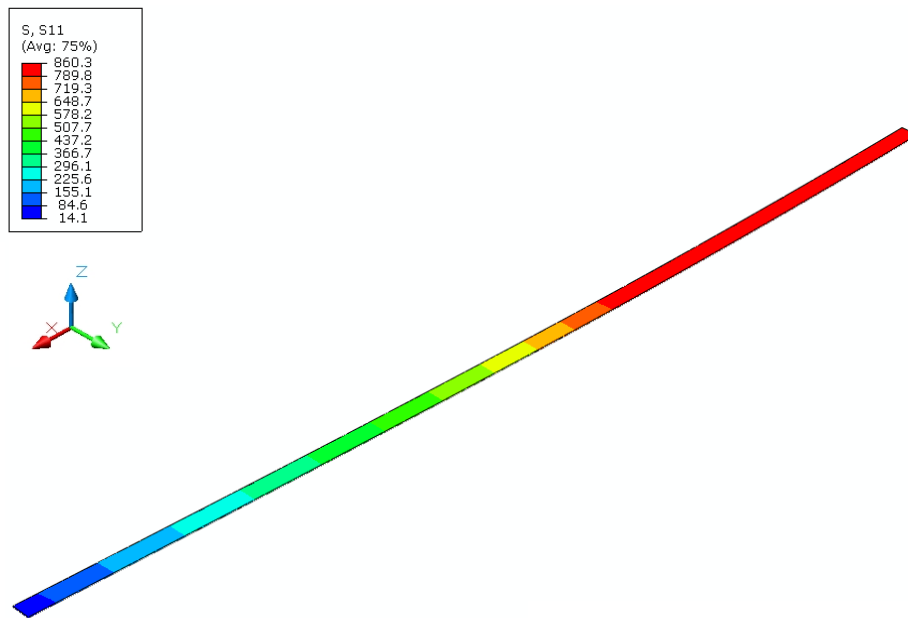
Slika 8.17 - Smičući napon τ_{12} (MPa) u drvetu za ojačani nosač Serije F pri opterećenju koje izaziva lom lamele ispod karbonske trake $F = 49,4$ kN



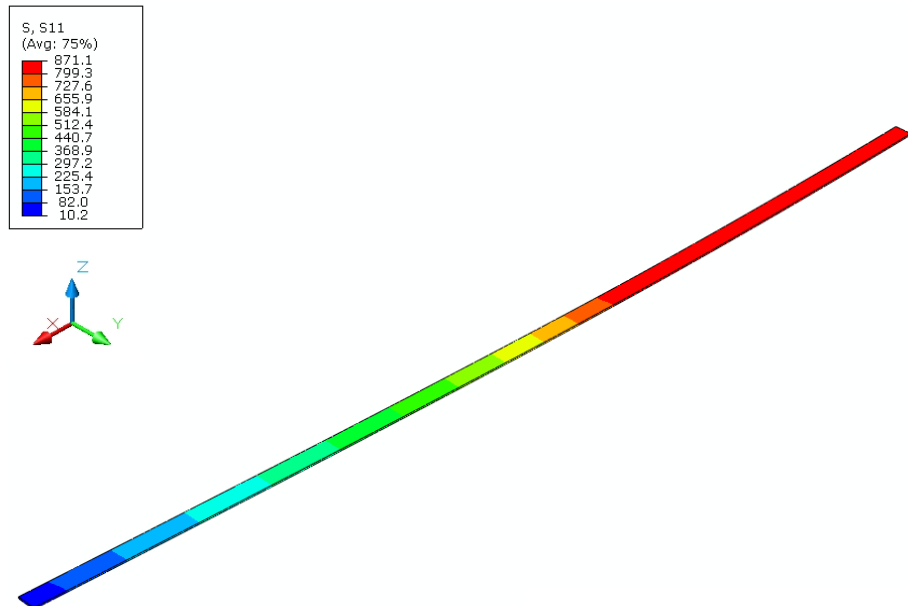
Slika 8.18 - Normalni napon σ_{11} (MPa) u drvetu za ojačani nosač Serije F pri opterećenju koje izaziva konačan lom nosača $F = 48,2$ kN



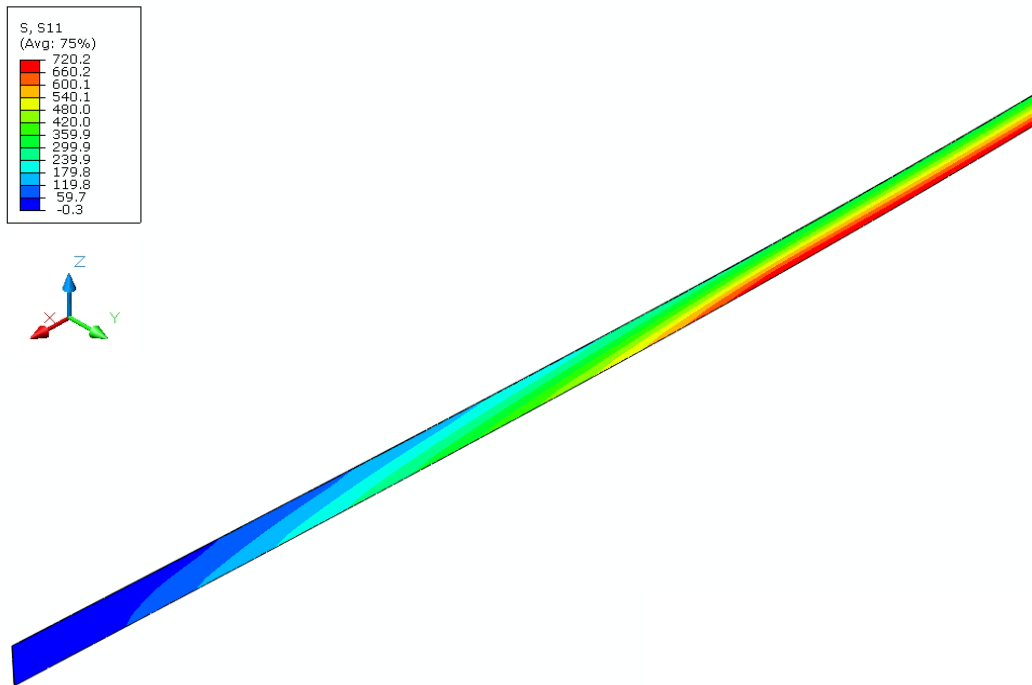
Slika 8.19 - Smičući napon τ_{12} (MPa) u drvetu za ojačani nosač Serije F pri opterećenju koje izaziva konačan lom nosača $F = 48,2$ kN



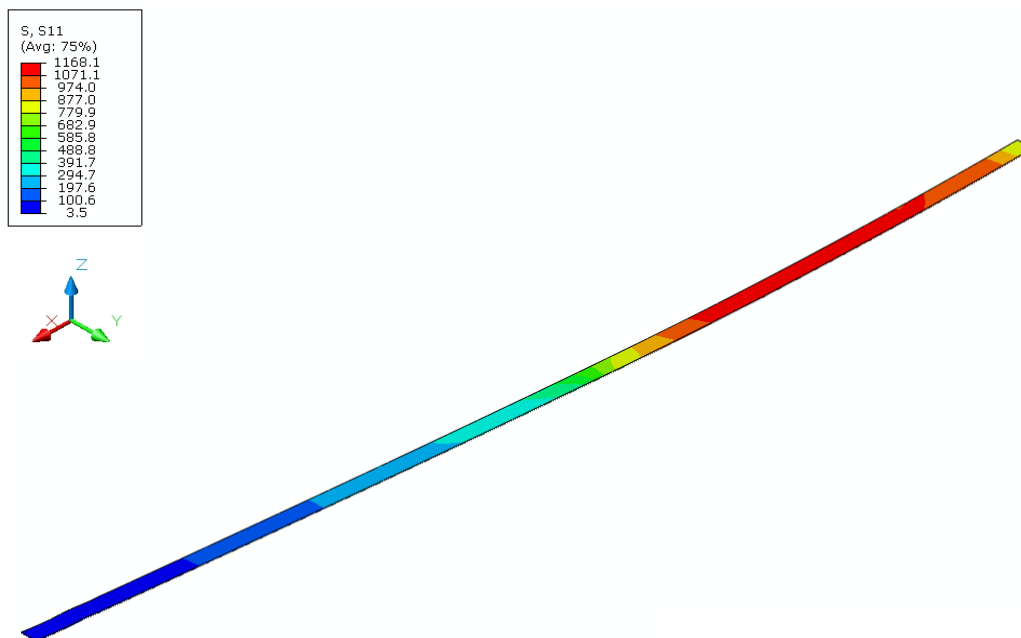
Slika 8.20 - Normalni napon σ_{11} (MPa) u karbonskoj traci za ojačani nosač Serije B pri graničnom opterećenju $F = 57,5$ kN



Slika 8.21 - Normalni napon σ_{11} (MPa) u karbonskoj traci za ojačani nosač Serije C pri graničnom opterećenju $F = 66,7$ kN

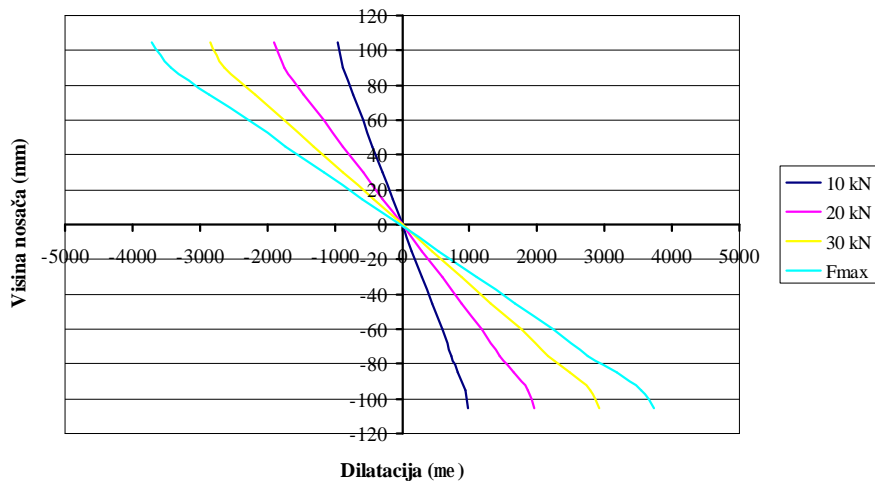


Slika 8.22 - Normalni napon σ_{11} (MPa) u karbonskoj traci za ojačani nosač Serije E pri graničnom opterećenju $F = 48,1$ kN

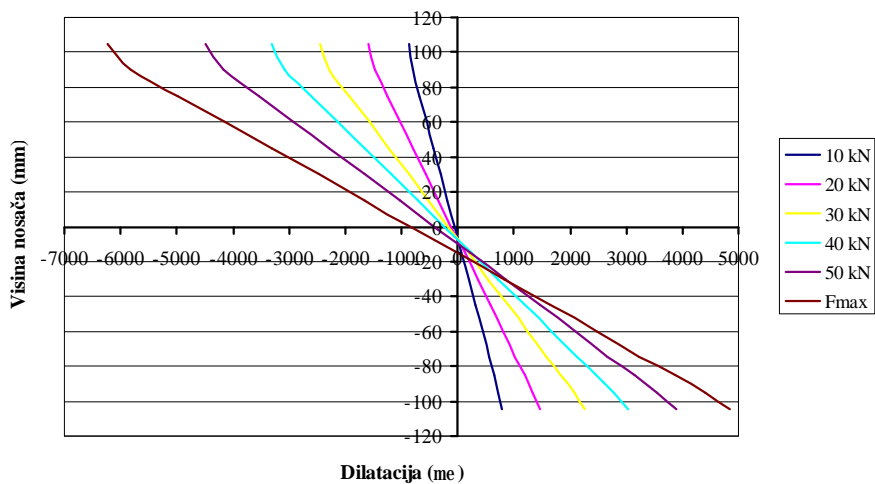


Slika 8.23 - Normalni napon σ_{11} (MPa) u karbonskoj traci za ojačani nosač Serije F pri opterećenju koje izaziva konačan lom nosača $F = 48,2$ kN

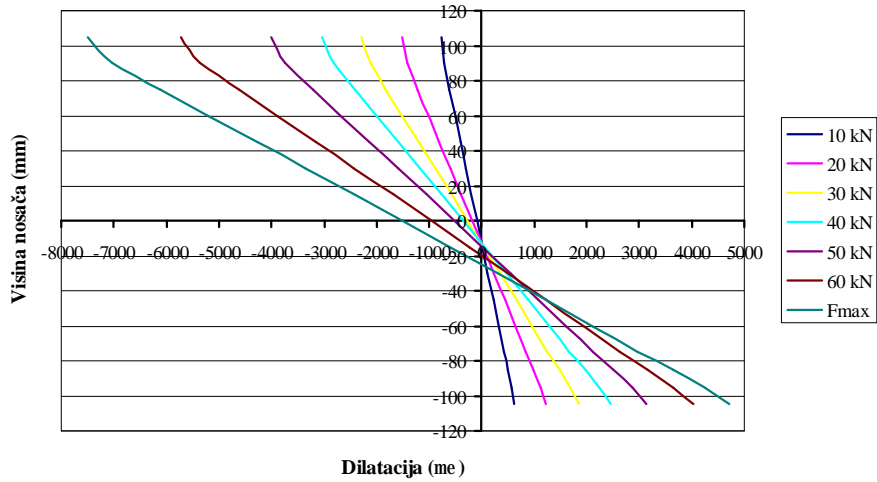
Prikaz raspodele dilatacija po visini poprečnog preseka u sredini raspona za sve analizirane nosače dat je na slikama 8.24-8.28. Poređenjem eksperimentalnih i numeričkih vrednosti može se primetiti da su vrednosti računskih dilatacija za ojačane nosače nešto veće. Prema numeričkom modelu, poprečni presek ostaje ravan i posle deformacije, dok su eksperimentalna merenja pokazala pri većim opterećenjima određeni stepen nelinearnosti. Ipak, modelom se može adekvatno opisati stanje deformacija preseka.



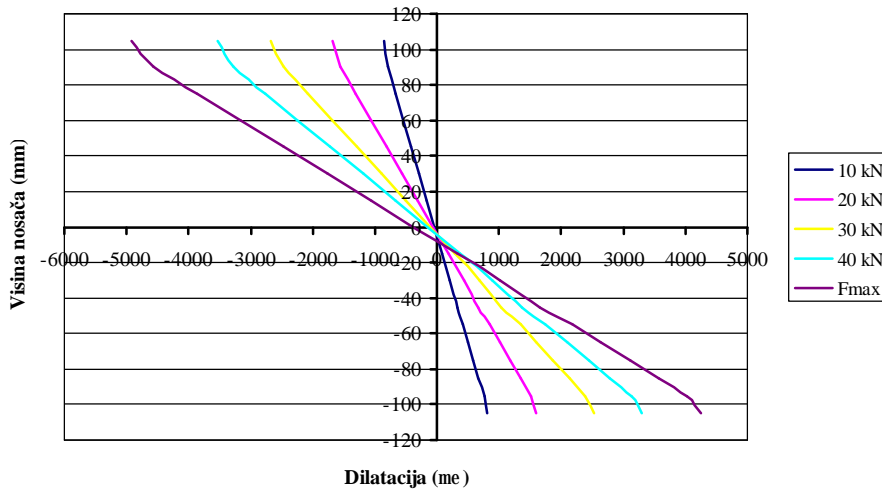
Slika 8.24 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za neojačani nosač Serije A



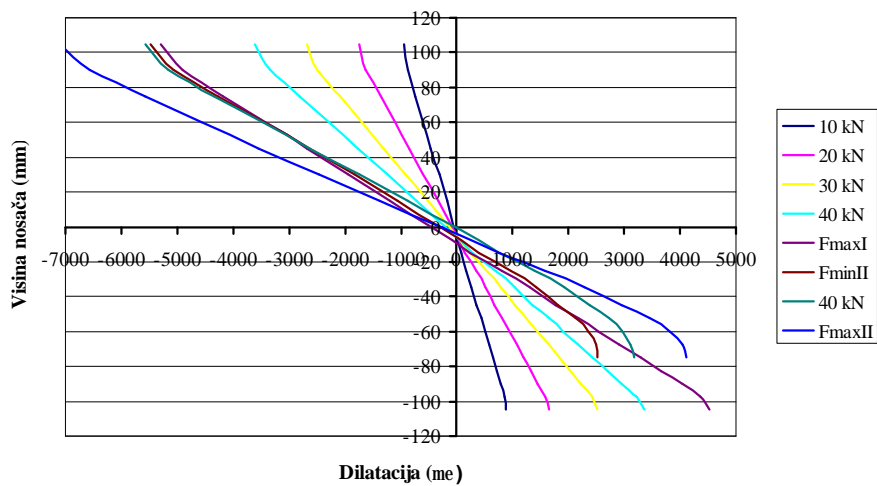
Slika 8.25 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za ojačani nosač Serije B



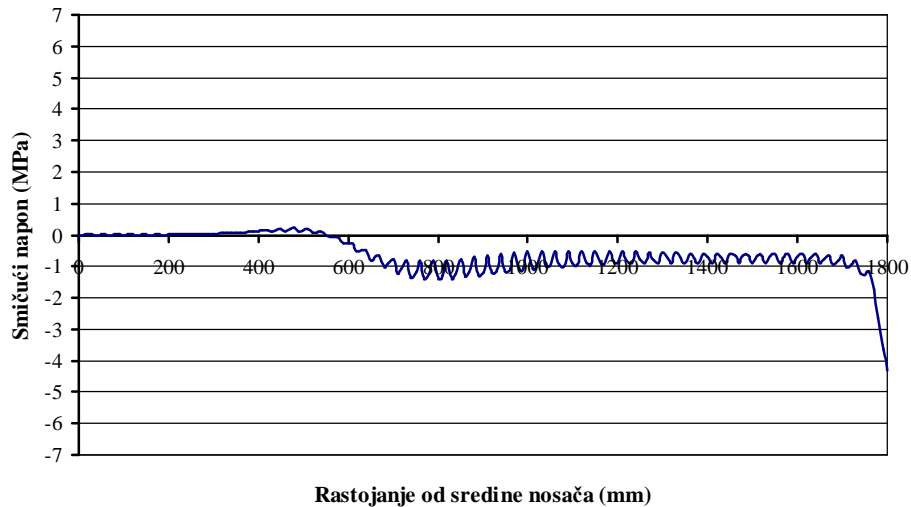
Slika 8.26 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za ojačani nosač Serije C



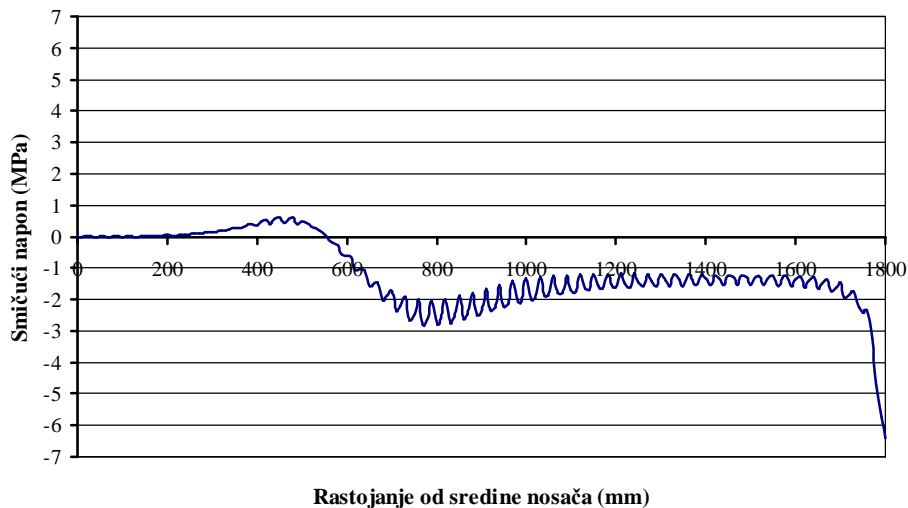
Slika 8.27 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za ojačani nosač Serije E



Slika 8.28 - Raspored dilatacija po visini poprečnog preseka za ojačani nosač Serije F



Slika 8.29 - Smičući napon τ_{12} u lepku duž linije spoja za ojačani nosač Serije B pri graničnom opterećenju $F = 57,5 \text{ kN}$



Slika 8.30 - Smičući napon τ_{12} u lepku duž linije spoja za ojačani nosač Serije C pri graničnom opterećenju $F = 66,7 \text{ kN}$

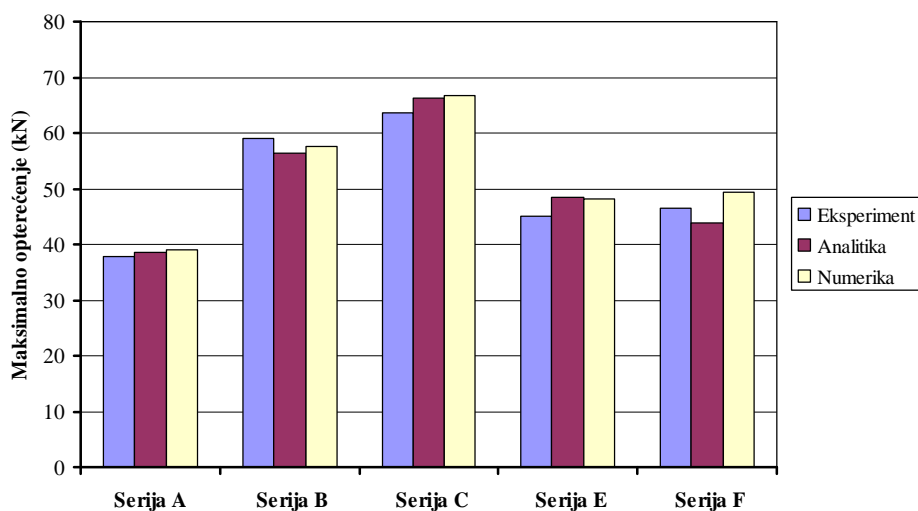
Numerička analiza omogućava praćenje ponašanja spoja između drveta i karbonske trake. Veoma je važno da smičući naponi koji se javljaju u spoju ne pređu graničnu vrednost, odnosno da ne dođe do delaminacije trake pri opterećenju. Pojava delaminacije je karakteristična za nosače ojačane karbonskom trakom postavljenom sa spoljašnje strane preseka. Raspodela smičućih napona duž linije lepljenja pri graničnom opterećenju za nosače ojačane sa jednom, odnosno sa dve karbonske trake postavljene sa donje strane (Serije B i C) prikazana je na slikama 8.29 i 8.30. Može se konstatovati da napon smicanja nije dovoljno veliki da izazove lom u lepku. Maksimalni zabeležen

smičući napon je 6,4 MPa (Serija C), što je daleko ispod granične vrednosti za lepak, koja iznosi oko 20 MPa.

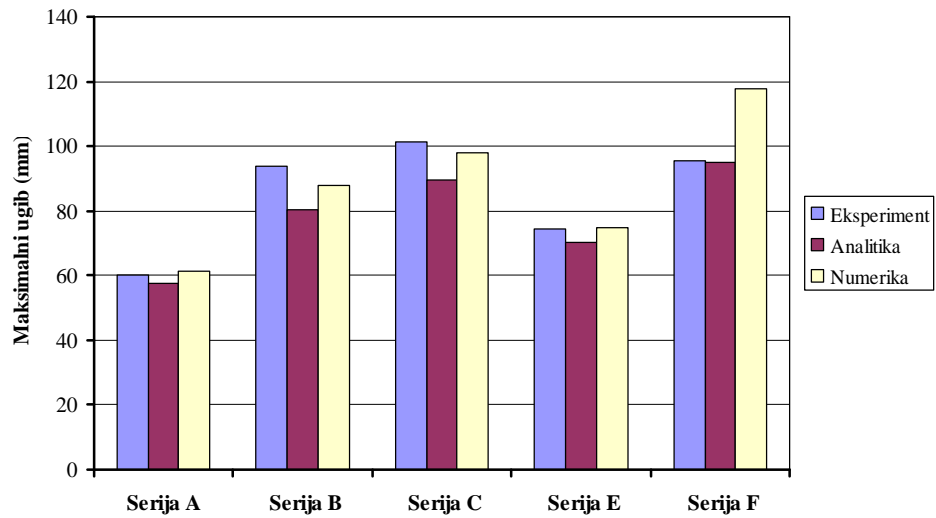
Na osnovu analize modela i rezultata dobijenih ovom numeričkom analizom može se zaključiti da je metod konačnih elemenata dobar alat za predviđanje ponašanja kako neojačanih, tako i ojačanih drvenih nosača. Dati koncept modeliranja se dalje može iskoristiti za sprovođenje opsežne parametarske studije u cilju određivanja optimalnog izbora sistema ojačanja.

8.5 Poređenje rezultata numeričke analize sa analitičkim rezultatima

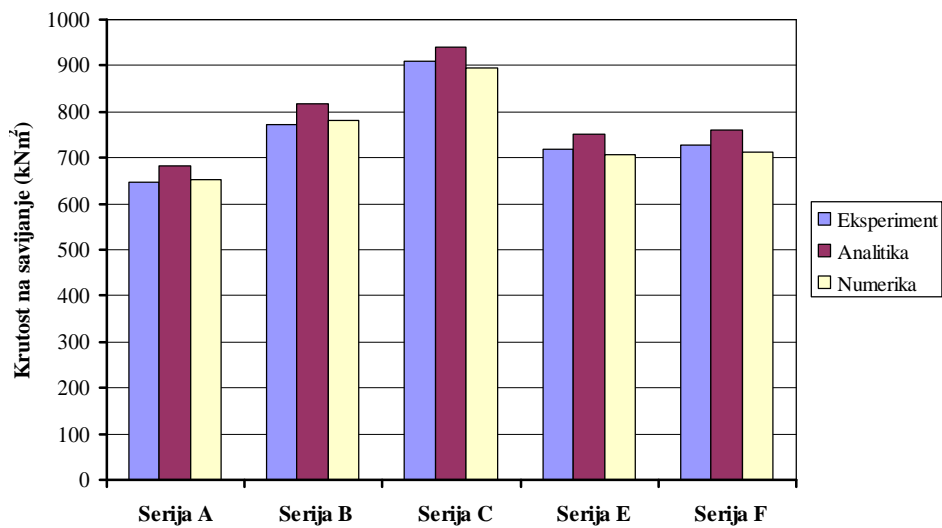
Rezultati numeričkog i analitičkog proračuna zajedno sa eksperimentalnim rezultatima u smislu maksimalnog opterećenja, maksimalnog ugiba i krutosti na savijanje prikazani su ilustrativno na slikama 8.31-8.33. Poređenjem računskih i merenih vrednosti može se zaključiti da postoji vrlo dobra saglasnost. Očekivano numerička analiza daje malo bolje predviđanje rezultata, jer je njom obuhvaćen veći broj parametara kojim se realnije može prikazati ponašanje neojačanih i ojačanih nosača.



Slika 8.31 - Poređenje merenih i računskih vrednosti maksimalnog opterećenja



Slika 8.32 - Poređenje merenih i računskih vrednosti maksimalnog ugiba



Slika 8.33 - Poređenje merenih i računskih vrednosti krutosti na savijanje

9. ZAKLJUČCI I PREPORUKE

Smatrajući primenu kompozitnih materijala u drvenim konstrukcijama izuzetno zanimljivom, aktuelnom i nedovoljno istraženom, ovaj rad ima za cilj da upozna naučnu i stručnu javnost sa mogućnostima karbonskih traka kao ojačanja na savijanje lepljenih lameliranih drvenih nosača i omogući njihovu širu primenu u domaćoj građevinskoj praksi.

Prezentovanim radom prikazane su, u sažetom obliku, tendencije izražene poslednjih godina u svetu vezane za istraživanje i primenu kompozitnih materijala za ojačanje drvenih elemenata, kao i pokušaj autora da se, kroz sprovedeno teorijsko-eksperimentalno istraživanje, priključi ovim tendencijama radi što potpunijeg slagledavanja date problematike.

Eksperimentalnim istraživanjima obuhvaćene su tri međusobno povezane grupe istraživanja:

- ispitivanje mehaničkih karakteristika upotrebljenih materijala (drveta, karbonske trake);
- ispitivanje karakteristika veze između drveta i karbonske trake ostvarene epoksidnim lepkom;
- ispitivanje nosača od lepljenog lameliranog drveta ojačanih karbonskim trakama za različite šeme ojačanja u okviru zategnute zone, kao i ispitivanje neojačanih nosača koji su poslužili kao reper za utvrđivanje efikasnosti intervencije.

Osnovni predmet ispitivanja bilo je praćenje ponašanja ojačanih i neojačanih nosača pri eksploatacionom i graničnom opterećenju, odnosno utvrđivanje naponskog i deformacijskog stanja za različite nivoe opterećenja sve do loma. U tu svrhu ispitano je

39 nosača, od kojih 8 neojačanih. Šeme ojačanja obuhvatile su različit položaj karbonskih traka u okviru poprečnog preseka (traka spolja ili unutra, horizontalno ili vertikalno postavljena) i različit procenat ojačanja (jedna ili dve trake u preseku).

Pored eksperimentalnog istraživanja data je i analitička metoda proračuna nosivosti i krutosti nosača po teoriji krutog sprezanja, kao i numerička analiza ponašanja nosača primenom metode konačnih elemenata i poređenje dobijenih rezultata.

Na osnovu teorijsko-eksperimentalne analize sprovedene u ovom radu mogu se formirati sledeći zaključci značajni sa teorijskog i praktičnog stanovišta:

- rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika korišćenih materijala (drvo, karbonske trake), koja su izvršena prema važećim EN standardima, predstavljaju osnovni podatak za analizu ponašanja ojačanih nosača, ali i za kvalitativnu komparativnu analizu ovih podataka sa podacima drugih istraživača, kao i sa podacima datim u propisima;
- primenom epoksidnih lepkova moguće je postići adekvatnu vezu između drveta i karbonskog ojačanja. Oblici loma i eksperimentalni rezultati pokazali su odlične karakteristike spoja drvo-karbonska traka, pri čemu su karakteristike drveta odgovorne za kritične događaje koji vode do loma. Ovo znači da je epoksidni lepak prilično uspešan u prenošenju opterećenja sa drveta na ojačanje;
- razmatrana tehnika ojačanja je veoma jednostavna za primenu. Ojačanje se može lako izvesti na terenu, bez neophodnog uklanjanja gornjih delova konstrukcije, i unutar kratkog vremena, koje zavisi od vremena potrebnog za izvođenje radova na ojačanju, kao i od vremena očvršćavanja lepka upotrebljenog za povezivanje karbonske trake i drveta;
- postavljanje karbonske trake u zategnutoj zoni ima veliki uticaj na globalno ponašanje nosača. Ojačanjem u zategnutoj zoni dolazi do pojave plastifikacije pritisnute zone, što je efekat koji uvodi veću plastičnost u globalno ponašanje nosača i omogućava duktilniji lom u odnosu na neojačane nosače. Inače, u datom slučaju plastično ponašanje nije toliko dominantno zbog niske čvrstoće drveta na zatezanje;
- granični lom ojačanih nosača događa se u zategnutoj zoni, izuzev u slučaju „jače“ ojačanih preseka, gde je moguće postići lom u pritisnutoj zoni, ukoliko se spreći moguća pojava loma usled smicanja;

- značajno poboljšanje nosivosti i krutosti se može postići kada su nosači ojačani u poređenju sa neojačanim. Povećanje graničnog opterećenja za 18,6-67,7% i povećanje krutosti za 11,1-40,9% zabeleženo je za različite razmatrane šeme ojačanja;
- najbolji položaj karbonske trake u poprečnom preseku razlikuje se u odnosu na specifične zahteve predočene slučajem opterećenja i projektnom situacijom. Prema rezultatima istraživanja, može se reći da je najoptimalniji profil onaj gde je karbonska traka smeštena na maksimalnom rastojanju od neutralne ose elementa;
- procenat ojačanja je veoma važan u pogledu krutosti, nosivosti i oblika loma ojačanih nosača. Sa povećanjem procenta ojačanja povećava se krutost nosača, jer povećanje površine karbonske trake suštinski znači uvođenje krućeg materijala u poprečni presek. Na drugoj strani, povećanje procenta ojačanja ne mora nužno da dovede do povećanja nosivosti, jer smicanje može postati dominantni oblik loma kod nosača sa većim procentom ojačanja;
- uvođenje karbonskih traka u poprečni presek generalno redukuje varijabilnost mehaničkih karakteristika. Ovim je potvrđena sposobnost karbonskih traka da redukuju efekat prirodnih defekata u drvetu;
- predloženi analitički model, zasnovan na bi-linearnoj vezi napon-dilatacija za ponašanje drveta pri pritisku i kriterijumu da lom nastaje pri dostizanju graničnog napona zatezanja u drvetu, može se primeniti za predviđanje nosivosti i krutosti ojačanih nosača. Povećanje vrednosti graničnog napona zatezanja faktorom 1,15 za nosače sa vertikalno postavljenom trakom i 1,25 za nosače sa horizontalno postavljenom trakom u odnosu na vrednosti graničnog napona zatezanja neojačanih nosača daje zadovoljavajuće slaganje sa eksperimentalnim rezultatima za lepljeno lamelirano drvo i karbonske trake korišćene u ovom istraživanju;
- primenom numeričkih modela može se sasvim dobro analizirati ponašanje lepljenih lameliranih nosača ojačanih karbonskim trakama. Nelinearna analiza sa elasto-plastičnim i ortotropnim karakteristikama drveta daje sasvim dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima.

Na osnovu dobijenih rezultata istraživanja, može se reći da je primena karbonskih traka za ojačanje (sanaciju) nosača od lepljenog lameliranog drveta efikasna sa mehaničke i tehnološke tačke gledišta. Međutim, u cilju postizanja potpunog

razumevanja ponašanja i šire praktične primene ojačanih konstrukcija neophodna su dodatna istraživanja. Neki od pravaca budućeg delovanja su:

- potvrđivanje rezultata istraživanja za različite materijalne karakteristke (drveta, karbonskih traka, kao i lepka) i za različite geometrije nosača;
- određivanje optimalne šeme ojačanja (položaja i procenta ojačanja) s aspekta ekonomske isplativosti, najbolji odnos cene prema dobiti ojačavanja nosača;
- utvrđivanje uticaja relevantnih faktora na sigurnost, upotrebljivost i trajnost ojačanih nosača u uslovima eksploatacije. Od ovih faktora posebno treba istražiti:
 - uticaj istorije (dužine trajanja) pojedinačnih opterećenja, odnosno ponašanje ojačanih nosača pod dugotrajnim opterećenjem;
 - uticaj klimatskih faktora (vlažnosti i temperature), koji imaju naročit uticaj na skupljanje i bubrenje drveta, a time i na celokupnu konstrukciju;
 - ponašanje ojačanih nosača pri cikličnim i dinamičkim opterećenjima;
 - uticaj požara;
- razvoj proračunskog postupka i njegovo implementiranje u standard. Za ovo je neophodno:
 - utvrđivanje standardizovanih tehničkih uslova za materijale koji će omogućiti korisnicima da odrede karakteristike materijala neophodne za proračun na racionalan i nedvojben način sa dobro poznatom pouzdanošću;
 - ispitivanje i kvantifikovanje povećanja efektivne čvrstoće na zatezanje drveta usled prisustva ojačanja;
 - definisanje funkcije graničnog kapaciteta nosivosti i upotrebljivosti, odnosno ponašanja pri lomu i uzroka loma;
- razvoj i usavršavanje numeričkih modela, potvrđenih eksperimentima, kojim se može opisati ponašanje i sračunati nosivost i krutost, odnosno naponi i deformacije ojačanih nosača. Unapređenim modelima bi se mogao proučavati mehanizam pojave pukotina i analizirati njihov raspored.

Iz svega iznetog očigledna je kompleksnost problematike konstruisanja, proračuna i primene karbonskih traka kao ojačanja drvenih nosača, ali sa druge strane, teorijsko-eksperimentalna analiza i primeri primene sa drugim materijalima (npr. beton) jasno ukazuju na prednosti koje se konstrukterima pružaju u ovoj oblasti.

LITERATURA

- [1] Gojković, M., Stojić, D. (1996). *Drvene konstrukcije*, Građevinski fakultet u Beogradu, Beograd.
- [2] Gustavsson, L., Sathre, R. (2006). "Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials." *Building and Environment*, 41, 940-951.
- [3] Gentile, C. (2000). "Flexural strengthening of timber bridge using FRP." MSc thesis, Department of Civil and Geological Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- [4] Muravljev, M., Jevtić, D., Zakić, D., Savić, A., Gavrilović, D. (2008). "Ispitivanje svojstava i primeri primene karbonskih traka za ojačanje betonskih konstrukcija." *Materijali i konstrukcije*, 51(4), 42-49.
- [5] CNR Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction. (2007). "Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Timber structures." *CNR-DT 201/2005*, Rome, Italy.
- [6] Andre, A. (2007). "Strengthening of timber structures with flax fibers." Licentiate thesis, Division of Structural Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- [7] Dinwoodie, J. M. (2000). *Timber: Its nature and behaviour*, E&FN Spon, London, UK.
- [8] Bodig, J., Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, USA.

-
- [9] Zakić, B. (1999). *Mehanika drveta*, Srpska akademija nauka i umetnosti, Beograd.
- [10] Isaksson, T. (2003). "Chapter 4: Structural timber - variability and statistical modelling." *Timber engineering*, S. Thelandersson and H. J. Larsen, eds., John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 45-66.
- [11] Gustafsson, P. J. (2003). "Chapter 7: Fracture perpendicular to grain - structural applications." *Timber engineering*, S. Thelandersson and H. J. Larsen, eds., John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 103-130.
- [12] Edlund, B. (1993). "Lecture B2: Tension and compression." *Timber Engineering Step 1*, Blass H.J., ed., Centrum Hout, Almere, The Netherlands, B2/1-B2/8.
- [13] Weibull, W. (1939). "Statistical theory of the strength of materials." *Proc. No. 151*, Royal Swedish Institute for Engineering Research, Stockholm, Sweden.
- [14] Serrano, E. (2003). "Chapter 5: Mechanical performance and modelling of glulam." *Timber engineering*, S. Thelandersson and H. J. Larsen, eds., John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 67-79.
- [15] Cai, Y. (2009). "Flexural study and design of timber beams reinforced with high modulus fibers." PhD thesis, The Graduate School-New Brunswick Rutgers, The State University of New Jersey, New Brunswick, New Jersey, USA.
- [16] European Committee for Standardization (CEN). (2004). "Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings" *EN 1995-1-1*, Brussels, Belgium.
- [17] Johns, K. C., Lacroix, S. (2000). "Composite reinforcement of timber in bending." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(5), 899-906.
- [18] European Committee for Standardization (CEN). (2009). "Structural timber - Strength classes." *EN 338*, Brussels, Belgium.
- [19] Thelandersson, S. (2003). "Chapter 2: Wood as a construction material." *Timber engineering*, S. Thelandersson and H. J. Larsen, eds., John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 15-22.
- [20] Falk, R. H., Colling, F. (1995). "Laminating effects in glued-laminated timber beams." *Journal of Structural Engineering*, 121(12), 1857-1863.
- [21] European Committee for Standardization (CEN). (1999). "Timber structures - Glued laminated timber - Strength classes and determination of characteristic values." *EN 1194*, Brussels, Belgium.

-
- [22] CNR Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction. (2004). "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Materials, RC and PC structures, masonry structures." *CNR-DT 200/2004*, Rome, Italy.
- [23] Carolin, A. (2003). "Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements." PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- [24] Muravljov, M. (2007). *Građevinski materijali*, Građevinska knjiga, Beograd.
- [25] Jacob, J., Garzon-Barragan, O. L. (2007). "Flexural strengthening of glued laminated timber beams with steel and carbon fiber reinforced polymers." MSc thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- [26] Streigher, R. (2004). "Bonding of carbon fibre reinforced plastics (CFRP) with wood." *Proc. of COST E34 conference Innovations in Wood Adhesives*, Biel, Switzerland, 33-55.
- [27] Theakston, F. H. (1965). "A feasibility study for strengthening timber beams with fiberglass." *Canadian Agriculture Engineering*, 1, 17-19.
- [28] Spaun, F. D. (1981). "Reinforcement of wood with fiberglass." *Forest Products Journal*, 31(4), 26-33.
- [29] van de Kuilen, J-W. G. (1991). "Theoretical and experimental research on glass fibre reinforced laminated timber beams." *Proc., International Timber Engineering Conf.*, London, UK, vol. 3, 226-233.
- [30] Plevris, N., Triantafillou, T. C. (1992). "FRP-reinforced wood as structural material." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4(3), 300-317.
- [31] Triantofillou, T. C., Deskovic, N. (1992). Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members." *Journal of Structural Engineering*, 118 (5), 1270-1284.
- [32] Dagher, H. J., Kimball, T., Abdel-Magid, B., Shaler, S. M. (1996). "Effect of FRP reinforcement on low-grade eastern hemlock glulams." *National Conf. on Wood Transportation Structures*, Medison, Wisconsin, USA, 207-213.

-
- [33] Galloway, T. L., Fogstad, C., Dolan, C. W., Puckett, J. A. (1996). "Initial tests of Kevlar prestressed timber beams." *National Conf. on Wood Transportation Structures*, Madison, Wisconsin, USA, 215-224
- [34] Hernandez, R., Davalos, J. F., Sonti, S. S., Kim, Y., Moody, R. C. (1997). "Strength and stiffness of reinforced yellow-poplar glued-laminated beams." *Res. Paper FPL-RP-554*, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, USA.
- [35] Blass, H. J., Romani M. (2000). "Load-carrying capacity and deformation behavior of FRP reinforced glulam composite beams." *Res. Report: Schlussbericht AiF-Vorhaben 11407/N*, Karlsruhe, Germany. (in German)
- [36] Blass, H. J., Romani M. (2001). "Design model for FRP reinforced glulam beams." *In: CIB-W18 Meeting 34*, Venice, Italy, 34-12-3.
- [37] Gentile, C., Svecova, D., Rizkalla, S. (2002). "Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications." *Journal of Composites for Construction*, 6(1), 11-20.
- [38] Fiorelli, J., Dias, A. A. (2003). "Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber." *Materials Research*, 6, 193-202.
- [39] Gilfillan, R. J., Gilbert, S. G., Patrick, G. R. H. (2003). "The use of FRP composites in enhancing the structural behavior of timber beams." *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22, 1373-1388.
- [40] Svecova, D., Eden, R. (2004). "Flexural and shear strengthening of timber beams using GFRP bars - experimental investigation." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(1), 45-55.
- [41] Amy, K., Svecova, D. (2004). "Strengthening of dapped timber beams using glass fibre reinforced polymer bars." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(6), 943-955.
- [42] Borri, A., Corradi, M., Grazini, A. (2005). "A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials." *Composites: Part B*, 36, 143-153.
- [43] Buell, T. W., and Saadatmanesh, H. (2005). "Strengthening timber bridge beams using carbon fiber." *Journal of Structural Engineering*, 131(1), 173-187.

-
- [44] Micelli, F., Scialpi, V., La Tegola, A. (2005). "Flexural reinforcement of glulam timber beams and joints with carbon fiber-reinforced polymer rods." *Journal of Composites for Construction*, 9(4), 337-347.
- [45] Issa, C. A., Kmeid, Z. (2005). "Advanced wood engineering: glulam beams." *Construction and Building Materials*, 19, 99-106
- [46] Guan, Z. W., Rodd, P. D., Pope, D. J. (2005). "Study of glulam beams prestressed with pultruded GRP." *Computers and Structures*, 83, 2476-2487.
- [47] Brunner, M., Schnuerige, M. (2005). "Timber beams strengthened by attaching prestressed carbon FRP laminates with a gradiented anchoring device." *Proc., International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, Hong Kong, 465-471.
- [48] Schober, K. U., Rautenstrauch, K. (2006). "Post-strengthening of timber structures with CFRP's." *Materials and Structures*, 40, 27-35.
- [49] Johnsson, H., Blanksvard, T., Carolin, A. (2006). "Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement." *Materials and Structures*, 40, 47-56.
- [50] Gomez, S., Svecova, D. (2008). "Behavior of split timber stringers reinforced with external GFRP sheets." *Journal of Composites for Construction*, 12(2), 202-211.
- [51] Li, Y-F., Xie, Y-M., Tsai, M-J. (2009). "Enhancement of the flexural performance of retrofitted wood beams using CFRP composite sheets." *Construction and Building Materials*, 23, 411-422.
- [52] Ribeiro, A. S., de Jesus, A. M. P., Lima, A. M., Lousada, J. L. C. (2009). "Study of strengthening solutions for glued-laminated wood beams of maritime pine wood." *Construction and Building Materials*, 23, 2738-2745.
- [53] Raftery, G. M., Harte, A. M. (2010). "Numerical modeling of FRP plate reinforced glulam." *Proc., 11th World Conference on Timber Engineering WCTE (CD-ROM)*, Trentino, Italy.
- [54] Raftery, G. M., Harte, A. M. (2011). "Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate." *Composites: Part B*, 42, 724-735.
- [55] Kim, Y. J., Harries, K. A. (2010). "Modeling of timber beams strengthening with various CFRP composites." *Engineering Structures*, 32, 3225-3234.

-
- [56] Yusof, A. (2010). "Bending behavior of timber beams strengthened using fiber reinforced polymer bars and plates." PhD thesis, Faculty of Civil Engineering, UTM, Skudai, Malaysia.
- [57] Silva-Henriquez, R., Gray, H., Dagher, H. J., Davids, W. G., Nader, J. (2010). "Strength performance of prestressed glass fiber-reinforced polymer, glued-laminated beams." *Forest Products Journal*, 60(1), 33-39.
- [58] Jankowski, L. J., Jasienko, J., Nowak, T. P. (2010). "Experimental assessment of CFRP beams by 4-point bending tests and photoelastic coating technique." *Materials and Structures*, 43, 141-150.
- [59] Nowak, T. P., Jasienko, J., Czepizak, D. (2013). "Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips". *Construction and Building Materials*, 40, 197-206.
- [60] Fiorelli, J., Dias, A. A. (2011). "Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation." *Materials and Structures*, 44, 1431-1440.
- [61] Yahyaei-Moayyed, M., Taheri, F. (2011). "Experimental and computational investigations into creep response of AFRP reinforced timber beams." *Composite Structures*, 93, 616-628.
- [62] de Jesus, A. M. P., Pinto, J. M. T., Morais, J. J. L. (2012). "Analysis of solid wood beams strengthened with CFRP laminates of distinct lengths." *Construction and Building Materials*, 35, 817-828.
- [63] International Organization for Standardization (ISO). (1975). "Wood - Determination of moisture content for physical and mechanical tests." *ISO 3130*, Geneva, Switzerland.
- [64] International Organization for Standardization (ISO). (1975). "Wood - Determination of density for physical and mechanical tests." *ISO 3131*, Geneva, Switzerland.
- [65] European Committee for Standardization (CEN). (2010). "Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties." *EN 408*, Brussels, Belgium.

-
- [66] European Committee for Standardization (CEN). (2010). "Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density." *EN 384*, Brussels, Belgium.
- [67] Institut za standardizaciju Srbije. (1979). "Ispitivanje drveta - Određivanje smicajne čvrstoće paralelno drvenim vlaknima." *SRPS D.A1.053*, Beograd.
- [68] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2009). "Standard test methods for small clear specimens of timber." *ASTM D143-09*, Philadelphia, USA.
- [69] Sika d.o.o. (2010). "Sika CarboDur Plates - Lamele od karbonskih vlakana za strukturna ojačanja." *Tehnički list proizvoda*, <www.sika.co.rs>.
- [70] Sika d.o.o. (2008). "SikaWrap-230 C - Pletena tkanina sa karbonskim vlaknima za strukturna ojačanja." *Tehnički list proizvoda*, <www.sika.co.rs>.
- [71] European Committee for Standardization (CEN). (2009). "Plastics - Determination of tensile properties. Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites." *EN ISO 527-5*, Brussels, Belgium.
- [72] Sika d.o.o. (2010). "Sikadur-30 - Dvokomponentni epoksidni lepak za lepljenje karbonskih lamela." *Tehnički list proizvoda*, <www.sika.co.rs>.
- [73] Sika d.o.o. (2006). "Sikadur-330 - Dvokomponentna epoksidna smola za lepljenje i impregnaciju karbonskih traka." *Tehnički list proizvoda*, <www.sika.co.rs>.
- [74] Raftery, G. M., Harte, A. M. (2009). "Bonding of FRP materials to wood using thin epoxy gluelines." *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, 580-588.
- [75] Juvandes, L. F. P., Barbosa, R. M. T. (2012). "Bond analysis of timber structures strengthened with FRP systems." *Strain*, 48, 124-135.
- [76] International Organization for Standardization (ISO). (2001). "Adhesives - Wood-to-wood adhesive bonds - Determination of shear strength by compressive loading." *ISO 6238*, Geneva, Switzerland.
- [77] European Committee for Standardization (CEN). (1999). "Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Measurement of bond strength by pull-off." *EN 1542*, Brussels, Belgium.

- [78] Soranakom, C., Mobasher, B. (2007). "Closed-form solutions for flexural response of fiber-reinforced concrete beams." *Journal of Engineering Mechanics*, 133 (8), 933-941.
- [79] Abaqus, Inc. (2012). Abaqus Version 6.12 Documentations Collection, Dassault Systems Simulia Corporation, Rhode Island, USA.
- [80] Abrate, S. (2008). "Criteria for yielding or failure of cellular materials." *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 10, 5-51.
- [81] Lehmann, M., Vallee, T., Rautrnstrauch, K. (2012). "Testing and modeling of prestressed timber beams using a multi surface plasticity model." *Proc., 12th World Conference on Timber Engineering WCTE (CD-ROM)*, Auckland, New Zealand.

Biografija autora

Ivan Glišović rođen je 1979. godine u Užicu, gde je završio osnovnu i srednju školu. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu upisao je 1998. godine, a diplomirao 2004. godine na Odseku za konstrukcije radom iz oblasti savremenih drvenih konstrukcija. Poslediplomske studije upisao je 2004. godine na Građevinskom fakultetu u Beogradu, a magistarski rad pod naslovom „Vibration analysis of timber floor systems“ (Analiza problema vibracija drvenih međuspratnih konstrukcija) odbranio je 2007. godine.

Na Građevinskom fakultetu u Beogradu zaposlen je od 2004. godine. Od 2007. godine radi u zvanju asistenta na grupi predmeta Drvene i zidane konstrukcije, u okviru Katedre za materijale i konstrukcije. U periodu od zaposlenja učestvovao je u realizaciji tri naučno-istraživačka projekta Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, a čiji je nosilac bio Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu. U publikacijama i na skupovima u zemlji i inostranstvu objavio je kao koautor 25 radova iz problematike drvenih i zidanih konstrukcija. Posebnu pažnju u naučnom istraživanju usmerio je ka metodama ojačanja i sanacije drvenih konstrukcija.

Pored nastavno-naučnog rada bavi se i stručnim radom. Učestvovao je kao saradnik u izradi idejnih i glavnih projekata, studija, revizija i stručnih mišljenja pre svega u oblasti drvenih i zidanih konstrukcija, ali i u oblasti betonskih i čeličnih konstrukcija.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани: мр Иван Р. Глишовић, дипл. грађ. инж.

број индекса: /

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ТЕОРИЈСКА И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА АНАЛИЗА НОСАЧА ОД ЛЕПЉЕНОГ ЛАМЕЛИРАНОГ ДРВЕТА ОЈАЧАНИХ КАРБОНСКИМ ТРАКАМА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 04.09.2013.



мр Иван Р. Глишовић, дипл. грађ. инж.

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Иван Р. Глишовић

Број индекса: /

Студијски програм: /

Наслов рада: Теоријска и експериментална анализа носача од лепљеног
ламелираног дрвета ојачаних карбонским тракама

Ментор: проф. др Бошко Стевановић, дипл. грађ. инж.

Потписани: мр Иван Р. Глишовић, дипл. грађ. инж.

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 04.09.2013.



мр Иван Р. Глишовић, дипл. грађ. инж.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ТЕОРИЈСКА И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА АНАЛИЗА НОСАЧА ОД ЛЕПЉЕНОГ ЛАМЕЛИРАНОГ ДРВЕТА ОЈАЧАНИХ КАРБОНСКИМ ТРАКАМА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 04.09.2013.



мр Иван Р. Глишовић, дипл. грађ. инж.

1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.