

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ**  
**Архитектонски факултет**

*Мр Радивој П. Соларов, дипл. грађ. инж.*

**ПРИЛОГ ТЕОРИЈИ СПРЕЗАЊА ДРВЕНИХ  
ЛАМЕЛИРАНИХ НОСАЧА КАРБОНСКИМ  
ВЛАКНИМА**

*-докторска дисертација -*

**Београд, 2014.**

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF ARCHITECTURE

*Radivoj P. Solarov*

CONTRIBUTION TO THE THEORY OF  
COUPLING OF WOODEN LAMINATED  
GIRDERS BY CARBON FIBERS

*Doctoral Dissertation*

Belgrade, 2014.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
Архитектонски факултет

*Мр Радивој П. Соларов, дипл. грађ. инж.*

ПРИЛОГ ТЕОРИЈИ СПРЕЗАЊА ДРВЕНИХ  
ЛАМЕЛИРАНИХ НОСАЧА КАРБОНСКИМ ВЛАКНИМА

*-докторска дисертација -*

**Ментор:**

Проф. др. Милан Глишић, дипл. инж. арх, члан комисије,  
редовни професор, Архитектонског факултета, Универзитета у Београду

**Чланови комисије:**

1. Проф. др. Милан Глишић, дипл. инж. арх, **члан комисије**,  
редовни професор, Архитектонског факултета, Универзитета у Београду

---

2. др. Ружа Окрајинов Бајић, дипл. грађ. инж, **председник комисије**,  
доцент, Архитектонског факултета, Универзитета у Београду и

---

3. Проф. др. Сузана Копривица, дипл. грађ. инж, **члан комисије**,  
редовни професор, Факултет за градитељски менаџмент-грађевина, Универзитета  
УНИОН „НИКОЛА ТЕСЛА“ у Београду.

---

Датум одбране докторске дисертације: \_\_\_\_\_

Током вишегодишњег рада на пројектовању и извођењу грађевинских објеката, али и у образовању, учио сам од људи са којима сам радио и које сам подучавао. Искуство које сам стекао помогло ми је да се одлучим за примену нових материјала и метода у свом послу. То ме је одвело у истраживање за које је било потребно доста времена, стрпљења, али и разумевања оних са којима сам живео. Овај рад, настао као потреба да се одговори на знатижељу која ме је и увела у истраживање, уједно је и разлог што осећам жељу да на почетку захвалим породици, ментору, члановима комисије, својим бившим и садашњим ђацима и колегама, свима онима који су ми директно или индиректно помогли.

*Аутор*

## ПРИЛОГ ТЕОРИЈИ СПРЕЗАЊА ДРВЕНИХ ЛАМЕЛИРАНИХ НОСАЧА КАРБОНСКИМ ВЛАКНИМА

### Резиме:

Предмет истраживања је понашање статички оптерећених ламелираних дрвених греда ојачаних карбонским тракама. Циљ истраживања је развој методологије за санацију и ојачање ламелираних (*GluLam – Glued Laminated*) и стандардних дрвених носача спрезањем карбонским влакнима (*FRP – Fiber Reinforcement Polymer*) и указивање на предности таквог поступка у односу на уобичајене „класичне“ начине санације. Поред тога, у резултате истраживања спада и формулисање МКЕ (метода коначних елемената) нумеричког модела за анализу и прорачун оваквих конструкцијских елемената.

Карбонске траке, као производ од карбонских влакана, имају изузетне перформансе носивости и еластичности, чак вишеструко веће од челичних трака истих попречних пресека. Експериментална истраживања у овој дисертацији спроведена су на девет различитих узорака дрвених носача подељених у три групе, који се разликују по облику попречног пресека, положају и величини употребљене карбонске траке. У нумеричким истраживањима понашање ојачаних греда је моделирано применом МКЕ софтвера AxisVM. Резултати проистекли из овог истраживања могу да буду основа за развој концепта и других видова ојачања код дрвених лепљених ламелираних носача.

Комерцијални аспект истраживања јесте стварање могућности за масовнију употребу карбонских трака у санацији и ојачању стандардних и ламелираних дрвених носача, склопова и конструкција у целини. У том смислу урађена је и технолошко-економска анализа поступака ојачања.

Резултати истраживања презентовани у раду би требало да буду интересантни показатељи на основу којих ће пројектанти и извођачи приступати ојачању дрвених конструкција.

У закључцима рада се на основу изведених анализе на узорцима указује се на предности које су уочене на ојачаним узорцима које чине носачи од лепљеног ламелираног дрвета.

Примена поступака ојачања дрвених носача коришћењем карбонских трака даје највећи економски учинак код санација објеката који садрже деформисане дрвене носаче.

**Кључне речи:** ојачање, FRP карбонске траке, GLULAM-дрвени лепљени ламелирани носачи, испитивање узорака, рачунски модел, технолошко-економска анализа.

**Научна област:** АРХИТЕКТУРА И УРБАНИЗАМ

**Ужа научна област:** ДРВЕНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

**УДК(UDK):624.011.1(043.3)**

Title:       **CONTRIBUTION TO THE THEORY OF Coupling of  
WOODEN laminated girders by CARBON fibers**

**Summary:**

The research presented in this dissertation is about the behavior of statically loaded laminated wooden beams reinforced with carbon strips. The aim of the research is to develop methodologies for the rehabilitation and reinforcement of laminated (Glulam - Glued Laminated) and standard wooden beam coupling with carbon fiber (FRP - Fiber Reinforcement Polymer) and to prove advantages over the usual "classical" methods of rehabilitation. Beside this, the result of research is creation of FEM (Finite Element) numerical model for the analysis and calculation of these structural elements.

Carbon strips, which product of the carbon fibers, have excellent flexibility and capacity performance, even several times higher than the corresponding steel strips of the same cross section. Experimental studies in this thesis were carried out on nine different models of wooden beams divided into three groups, which differ in cross-sectional shape and the position and size of the used carbon-fiber reinforcement tape. In numerical studies the behavior of strengthened beams is modeled by FEM software AxisVM. Results emerged from this research can be the basis for developing the concept of calculation and design of timber-reinforced composite structures in general.

Commercial goal of research is to create opportunities for mass production of carbon fiber in the repair and reinforcement of standard and laminated wooden structures, components and whole structures. In this sense, an tehnological economic analysis of reinforcement procedures is done.

Research results presented in this study should be interestig indicators for designers and constructors in strengthening of wooden constructions.

Conclusions of this research based on derived analysis of samples show the benefits which have been observed on reinforced samples which include carriers of laminated wood.

Application of reinforced wooden carriers and the use of carbon strips give the most economic benefit in reconstruction of buildings which contain deformed wooden carriers.

**Keywords:** strengthening, FRP composites, wood-GLULAM glued, laminated beams, testing of samples, computational model, tehnological-economic analysis.

**Science field:** Architecture and urban planning

**Field of research:** Timber structures

## **1. Предговор**

Угљенична влакна су готово савршен материјал за примену код ојачања оптерећених конструкција. Настала су усавршавањем процеса полимеризације у производњи пластичних маса. Овом материјалу обликованом у виду танких влакана, добар распоред и повољна молекуларна структура дају изразито високу чврстоћу на затезање. Да би се од ових влакана добили производи који се могу користити у ојачању конструкција, она се најчешће повезују епоксидном смолом. У таквом саставу угљенична влакна имају улогу арматуре, а епоксидна смола улогу пуниоца. Тако се добија композитни производ комбинацијом више различитих материјала слојевито спојених у целину, изванредних механичких карактеристика. Такав производ лак је за транспортовање, обраду и уграђује се без већих захтева. Квалитет израде у погледу концентрације влакана и захтевана носивост утичу на цену композитног производа. Највишу цену имају композитни носачи пуног профила, а она се смањује у зависности од разуђености облика попречног пресека. Носачи разуђених пресека израђују се пресовањем у калупима који им дају најразличитије облике: квадратни, правоугаони, кружни, сандучасти, L, T, П. Произвођачи за сваки наведени пресек дају механичке карактеристике и потврде о испитаном квалитету. Поред тога, разуђени пресеци могу се испунити и мање квалитетнијим материјалом, на местима која нису изложена великим напрезањима. То знатно смањује цену израде, а утицај на носивост је занемарљив. Још рационалнија примена композитних производа може се добити ако се од њих изради арматура којом се врши ојачање носача израђених од традиционалних материјала: бетона, дрвета или челика. Оптерећења којем је изложен носач условљава количину и положај ојачања. Тако се сваком конструктивном елементу мора прилагодити адекватан избор ојачања. За ојачања се користи композитна арматура у чијем саставу су карбонска влакна, обликована у виду шипки, трака или платна. Ови облици арматуре су изразито лаки, савитљиви и омогућавају једноставну уградњу лепљењем.

Да би се сагледао учинак ојачања композитном арматуром, одабрани су носачи израђени од лепљеног ламелираног дрвета, од којих се већ низ година израђују савремене архитектонске конструкције, смелих облика и великих распона. У ту сврху било је потребно извршити низ лабораторијских испитивања на узорцима. Сваки узорак је састављени од дрвених ламела-дасака са влакнима подужне оријентације, подједнаке дебљине, постављених једно преко других и слепљених у пресама. Они су произведени у радионици и на квалитет носача највећи утицај има квалитет дрвета који је употребљен за ламеле. Носачи од лепљеног ламелираног дрвета, ако се упореде са носачима израђеним од масивног дрвета, имају боље и

уједначеније механичке карактеристике. Производња носача од лепљеног ламелираног дрвета строго је контролисан поступак у којем се морају поштовати стандарди прописани за ову област. Савремена архитектура у многоме прихвата обликовање конструкција где су носачи израђени од лепљеног ламелираног дрвета због тога што се тако могу извести најзахтевније просторне форме. Поред тога овако изграђени објекти истичу се лепим изгледом и топлином ентеријера. Производња квалитетних лепкова којима се спајају ламеле од којих се формира носач и оних којима се повезује ојачање, утиче на то да се израђују конструкције већих распона. На тај начин се изводе гредне конструкције распона и преко 50 m, а лучни носачи распона преко 100 m. Производња ових носача омогућава да висине попречног пресека могу бити од десет центиметара до неколико метара. Тако израђених носачи примењују се код изградње спортских дворана, индустријских и јавних објеката, мостова, пасарела, спиралних степеница, надстрешница, модерних црквених објеката и др. Уколико се носећа конструкција изводи од лепљеног ламелираног дрвета, имаће предности у односу на друге материјале због следећих карактеристика:

- потребно је краће време градње у односу на друге конструкције израђене од природних материјала, јер се готови носачи довозе из радионице и одмах се могу монтирати;
- поседује дуготрајност, уколико је извршена комплетна заштита од влаге површина носача;
- конструкција је мање тежине у односу на оне од других материјала, што смањује димензије темеља, пратећих конструктивних елемената, а тиме и укупну цену објекта;
- отпорност на пожар је задовољена с обзиром на то да гори само површински слој носача;
- отпорност конструкције на агресивне хемијске средине значајна је код примене у индустрији;
- могућност демонтаже носача из конструкције и дислокација по потреби;
- могућност да се при монтажи формирају отвори, рупе, засеци и да се изврше скраћивања;
- дрвена лепљена ламелирана конструкција је еколошки производ, погодан за рециклажу;
- дрво као материјал у конструкцији спада у најбоље топлотне изолације, а тиме је прихватљиво код извођења енергетски ефикасних објеката.

Поред наведених добрих карактеристика дрвених лепљених ламелираних носача, може се постићи напредак и у погледу увећања носивости уколико се они адекватно ојачају у зонама већих напрезања. У том смислу анализирано је ојачање гредног носача изложеног савијању и при томе је установљена већа носивост. Ојачање носача се најчешће изводи у затегнутој зони греде на доњој дрвеној ламели где се очекује лом. Такође, може се вршити и ојачање у притиснутој зони, при чему се повећава носивост притиснуте зоне. То доводи до



одлагања пластичних деформација. Поред наведеног разлога за повећањем носивости носача на савијање, ојачањем се постиже и отпорност греде на смицање и увртање пресека.

Ојачање нема већи утицај на крутост носача. Код испитиваних узорака, због мале количине армирања, крутост се може занемарити. Међутим, ако се пресек ојача у већој мери, крутост се узима у обзир. Испитивања спроведена последњих година дала су значајне резултате о томе на које се све начине композитни материјали израђени на бази карбонских влакана могу користити за ојачање дрвених лепљених ламелираних носача. Карбонске FRP траке су висококвалитетни производ чија је израда представљала монопол високоразвијених земаља, али онедавно оне се производе и у земљама које имају нагли економски развој, а то су Кина и Индија [63].

Код ојачања носача најчешће су рађена подужна армирања челичним шипкама, алуминијумским тракама, пластичним тракама и челичним жицама високе отпорности. Ови видови ојачања мало су доприносили носивости носача, али су изазивали доста техничких проблема при уградњи и повезивању са носачима. Из тих разлога поменута ојачања нису наишла на широку примену. Усавршавањем облика арматуре израђене од карбонских влакана настале су карбонске FRP траке које представљају квалитетну арматуру за ојачање дрвених лепљених ламелираних носача. Ојачањем се постиже спрезање дрвених лепљених ламелираних носача са карбонским тракама чиме се добија компактност попречног пресека. Код носача изложених чистом савијању такав компактни пресек може да прихвати знатно веће унутрашње силе: затезања, притиска и смицања. Расподела тих сила по висини није у истој мери заступљена, што доприноси још једном значајном фактору, а то је могућност да се код израде дрвених лепљених ламелираних греда може употребити за ламеле и дрво нижег квалитета. У делу где карбонске FRP траке примају силе затезања, дрвене ламеле су мање напрегнуте. Економска оправданост примене ојачања карбонских тракама постаје већа јер се досадашња висока цена њихове производње валоризује учинком којим се повећава носивост, односно којим се смањују димензије носача. Збир свих фактора проистеклих ојачањем карбонским тракама даје дрвеним лепљеним ламелираним носачима и следеће карактеристике:

- висок степен еластичности доводи до појаве великих угиба;
- висок степен садејства између дрвета и арматуре омогућује прихват сила смицања;
- знатно се повећава носивост на затезање;
- делимично се повећава носивост на притисак;
- јасно су дефинисана места лома.

**Садржај:**

Реч аутора.....	iv
Резиме .....	v
Summary .....	vi
Предговор .....	vii
Садржај .....	x
Примена националних докумената .....	xiii
Скраћенице, ознаке симболи .....	xiii
Речник термина .....	xiv
Попис слика .....	xv
Попис табела .....	xxi
1. УВОД	
1.1. Истраживања .....	22
1.2. Предмет истраживања .....	24
1.3. Циљ истраживања .....	25
1.4. Програм истраживања .....	26
2. МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА	
2.1. ЛЕПЉЕНИ ЛАМЕЛИРАНИ НОСАЧИ	
2.1.1. О дрвету .....	28
2.1.2. Формирање носача од лепљеног ламинираног дрвета .....	29
2.1.3. Израда и примена носача од лепљеног ламинираног дрвета .....	31
2.1.4. Отпорност дрвених лепљених ламелираних носача на пожар .....	33
2.2. КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ ЗА ОЈАЧАЊЕ	
2.2.1. Карактеристике композитних материјала .....	34
2.2.2. Облици FRP композитне арматуре на тржишту .....	34
2.2.3. FRP траке .....	35
2.2.3.1. Заштита FRP трака .....	39
2.3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА	
2.3.1. Израда и димензије узорака .....	40
2.3.2. Поступак ојачања узорака .....	41
2.3.3. ПРЕТХОДНА ИСПИТИВАЊА	
2.3.3.1. Испитивање атхезије подлоге .....	42

2.3.3.2. Испитивање лепила за спајање дрвених ламела .....	44
2.3.3.3. Карактеристике FRP трака .....	45
2.3.3.4. Испитивање лепила за спајање дрвене ламеле и FRP траке .....	46
2.3.3.5. Одређивање модула еластичности дрвета .....	47
2.3.4. Испитивање узорка .....	49
2.3.4.1. Испитивање узорка серије 1 .....	
2.3.4.1.1. Узорак бр. 10 .....	51
2.3.4.1.1. Узорак бр. 11 .....	52
2.3.4.1.1. Узорак бр. 12 .....	54
2.3.4.1.1. Узорак бр. 13 .....	55
2.3.4.1.1. Узорак бр. 14 .....	57
2.3.4.2. Испитивање узорка серије 2 .....	
2.3.4.1.1. Узорак бр. 20 .....	59
2.3.4.1.1. Узорак бр. 21 .....	61
2.3.4.1.1. Узорак бр. 22 .....	62
2.3.4.3. Испитивање узорка серије 3 .....	
2.3.4.1.1. Узорак бр. 31 .....	64
2.3.4.2. Резултати мерења .....	68
2.3.4.3. Стање деформација испитиваних узорка .....	71
2.3.4.3.1. Опис механизма лома .....	88
2.4. Прорачун модела .....	91
2.4.1. Резултати нумеричке анализе .....	
2.4.1.1. Серија 1, Модел 10 .....	93
2.4.1.2. Серија 1, Модел 11 .....	95
2.4.1.3. Серија 1, Модел 12 .....	96
2.4.1.4. Серија 1, Модел 13 .....	97
2.4.1.5. Серија 1, Модел 14 .....	98
2.4.1.6. Серија 2, Модел 20 .....	99
2.4.1.7. Серија 2, Модел 21 .....	100
2.4.1.8. Серија 2, Модел 22 .....	101
2.4.1.9. Серија 3, Модел 30 .....	102
2.4.1.8. Серија 3, Модел 31 .....	103

3. ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА	
3.1. Поређење експерименталних и рачунских резултата	105
3.2. Анализа механизма лома узорака	111
3.3. Анализа носивости ојачаних узорака у односу на неојачане	111
3.4. Анализа процента армирања, места и положаја FRP трака	112
3.5. Анализа контактне дужине ојачања	113
3.6. Анализа резултата по групама	113
3.7. Анализа трошкова	115
4. ЗАКЉУЧЦИ	
4.1. Закључци истраживања	117
4.2. Нагласак на нове проблеме и могуће правце даљих истраживања	119
5. ЛИТЕРАТУРА	121
6. ПРИЛОЗИ	
6.1. Прилог А: Пробни подаци за испитивање	
6.1.1. Контрола угиба	127
6.1.2. Контрола на избочавање	128
6.2. Прилог Б: Записници са испитивања узорака	
6.2.1.1. Серија 1, Узорак бр. 10	130
6.2.1.2. Серија 1, Узорак бр. 11	131
6.2.1.3. Серија 1, Узорак бр. 12	132
6.2.1.4. Серија 1, Узорак бр. 13	133
6.2.1.5. Серија 1, Узорак бр. 14	134
6.2.1.6. Серија 2, Узорак бр. 20	135
6.2.1.7. Серија 2, Узорак бр. 21	135
6.2.1.8. Серија 2, Узорак бр. 22	137
6.2.1.9. Серија 3, Узорак бр. 31	138
6.3. Прилог В: Анализа трошкова	139
7. БИОГРАФИЈА АУТОРА	140
Прилог 1: Изјава о ауторству	142
Прилог 2: Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада	143
Прилог 3: Изјава о коришћењу	144

**Примена националних докумената:**

**Немачки стандарди:**

DIN 4074: Грађевинско дрво. Класе чврстоће

DIN 68140: За слабљење пресека код зупчастог споја

**Стандарди европске уније:**

ЕС - 5 (Design of timber structures): Прорачун дрвених конструкција

EN 335: Грађевинско дрво. Класе чврстоће

EN 385: Зупчато настављени дрвени елементи

EN 1194: Дрвене конструкције. Лепљено ламелирано дрво

EN 1480:2000: Производња лепљеног ламелираног дрвета

**Скраћенице, ознаке и симболи**

t – (tension) : Затезање

c – (compression) : Притисак

b – ( bending) : Савијање

s – (shear) : Смицање

R<sub>k</sub> – Карактеристична вредност носивости тј. напрезања

J<sub>x</sub> – Моменат инерције активног пресека дрвеног носача

J<sub>pr</sub> – Моменат инерције са утицајем процента армирања, једноструко армираног пресека у доњој зони носача

ℓ<sub>e</sub> – Дужина избочавања

C<sub>s</sub> – Коефицијент бочне стабилности

C<sub>k</sub> – Фактор стабилности дрвета

h<sub>o</sub> – Статичка висина од тежишта арматуре до горње ивице носача

b – Ширина носача

f<sub>m,g,k</sub> – Чврстоћа GL на савијање

f<sub>t,0,g,k</sub> – Чврстоћа GL на затезање паралелно влакнима

f<sub>t,90,g,k</sub> – Чврстоћа GL на затезање управно влакнима

f<sub>c,0,g,k</sub> – Чврстоћа GL на притисак паралелно влакнима

f<sub>c,90,g,k</sub> – Чврстоћа GL на притисак управно влакнима

f<sub>v,g,k</sub> – Чврстоћа GL на смицање

E<sub>0,mean,g</sub> – Средња вредност модула еластичности GL паралелно влакнима

E<sub>0,05</sub> – Фрактил од 5% модула еластичности GL паралелно са влакнима

$G_{\text{mean}}$  – Средња вредност модула смицања  
 $\rho_{g,k}$  – Запреминска маса GL  
 $f_{k,s}$  – Торзиона чврстоћа  
 $\tau$  – Напони смицања  
 $\tau_{gr}$  – Гранични напони смицања  
 $\sigma_c$  – Нормални напони притиска  
 $\sigma_{c, gr}$  – Гранични нормални напони притиска  
 $\sigma_t$  – Нормални напони затезања  
 $\sigma_{t, gr}$  – Гранични нормални напони затезања  
 $\sigma_{t, frp}$  – Нормални напони затезања у FRP траци  
 $\sigma_G$  – Мерени нормални напони на горњем влакну  
 $\sigma_D$  – Мерени нормални напони на доњем влакну  
 $\delta$  – Укупан угиб, померање еластичне линије на средини носача  
 $\delta_{\sigma_m}$  – Угиб од нормалних напона савијања  
 $\delta_{\tau_m}$  – Угиб од смичућих напона које изазивају трансверзалне силе  
 $\delta_{\tau_{tm}}$  – Угиб од смичућих напона које изазива моменат торзије  
 $u$  – Померање тачке по x-оси  
 $v$  – Померање тачке по y-оси  
 $\varphi$  – Нагиб, угао нагиба тангенте на еластичну линију носача  
 $E_d$  – Модул еластичности за дрво  
 $E_s$  – Модул еластичности за FRP траке, класе S  
 $E_m$  – Модул еластичности за FRP траке, класе M  
 $n_s$  – Однос модула еластичности за FRP траке, класе S и модула еластичности за дрво  
 $n_m$  – Однос модула еластичности за FRP траке, класе M и модула еластичности за дрво

### Речник термина

AFRP (Aramid Fiber Reinforcement Polymer) – Арматура састављена од араמידних полимерних влакана

CFRP (Carbon Fiber Reinforcement Polymer) – Полимер армиран карбонским влакнима

FLAH-KANT – Поступак испитивање узорка

FRP (Fiber Reinforcement Polymer) – Влакнима армиран полимер

FTN – Факултет Техничких наука у Новом Саду

HCВ (Hybrid-Composite Beams) – Хибридна композитна греда

GL – Лепљено ламелирано дрво

GLULAM (Glued laminated timber) – Дрвени лепљени ламелирани носачи (GL)

GFRP (Glass Fiber Reinforcement Polymer) – Полимер армиран стакленим влакнима

GRF – Грађевински Факултет Универзитета у Београду

LLD-I (Класификација по SPRS стандарду) – Лепљено ламелирано дрво I класе

LLD-II (Класификација по SPRS стандарду) – Лепљено ламелирано дрво II класе

MD (Класификација по SPRS стандарду) – Масивно дрво II класе

MKE – Метода коначних елемената

ReLAM (Reinforced Laminated beams) – Ојачање ламелираних греда, специјализован софтвер који се заснива на нелинеарној математичкој анализи модела

SLS (Serviceability limit states) – Гранично стање употребљивости

ULS (Ultimate limit states) – Гранично стање носивости

TIMBER ( Wood Timber ) – Дрвени носач (грађа)

### **Попис слика**

Слика 1. Попречни пресеци узорака сврстани у три серије

Слика 2. Приказ хоризонталног зупчастог наставка на ламели [1]

Слика 3. Примери за могуће формирање пресека лепљеног ламелираног носача од више ламела различитог квалитета дрвета [19]

Слика 4. Технолошки процес производње [32]

Слика 5. Изведени објекти: а. Музеј аутомобила Li Меј, Тахома, Сједињене Америчке државе (2012), ([http://www.tripadvisor.com/Attraction\\_Review-g58775-d3203900-Reviews-LeMay\\_America\\_s\\_Car\\_Museum-Tacoma\\_Washington.html](http://www.tripadvisor.com/Attraction_Review-g58775-d3203900-Reviews-LeMay_America_s_Car_Museum-Tacoma_Washington.html), or <http://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-t/02/88/27/bb/lemay-museum-at-marymount.jpg>) , б. Мост Tynset, Hendmark,

Норвешка (2001), ([http://www.go-explore-trans.org/wp-content/uploads/images/tynset\\_glulam\\_bridge.jpg](http://www.go-explore-trans.org/wp-content/uploads/images/tynset_glulam_bridge.jpg))

Слика 6. Изглед дрвеног и челичног носача после пожара [75]

Слика 7. Пресек који је изложен пожару [5]

Слика 8. Одређивање заштитног противпожарног слоја [5]

Слика 9. Приказ новог хибридног носача компаније HC Bridge [28]

Слика 10. Производи од композитних влакана који се користе као FRP арматура за ојачања

([http://www.alibaba.com/product-detail/Composite-FRP-fiberglass-rebar\\_567649592.html](http://www.alibaba.com/product-detail/Composite-FRP-fiberglass-rebar_567649592.html))

- Слика 11. а. Приказ GFRP шипкасте арматуре типа Marerod G, б. Приказ уградње арматуре у формиране уторе на дрвеном носачу [33]
- Слика 12. а. Схема састава FRP траке [12], б. Пресек кроз FRP траку [23]
- Слика 13. Тренутак појаве кртог лома FRP траке, кидање по влакнима уз прасак [50]
- Слика 14. Модул еластичности за више типова FRP трака [64]
- Слика 15. Поступак примене FRP трака на ојачању разних врста конструктивних елемената [12]
- Слика 16. Израда узорка, лепљење ламела на писти помоћу механичких стега
- Слика 17. Ојачање узорка, лепљење FRP траке на доњој ламели
- Слика 18. Израда модела, ручне стеге за накнадно лепљење доње ламеле
- Слика 19. Уређај за мерење силе адхезије лепила и подлоге узорка
- Слика 20. Испитивани отисци „pull off“ методом
- Слика 21. Преса за испитивање силе смицања са уређајем за цртање радног дијаграма
- Слика 22. Узорак у тренутку лома
- Слика 23. Резултати мерења презентовани у виду графика
- Слика 24. Преса при оптерећењу узорка
- Слика 25. Зацепљење дрвене ламеле
- Слика 26. Уређај за савијање дрвеног узорка
- Слика 27. Дијаграми за однос сила/померање, добијени на основу табеле 7
- Слика 28. Распоред мерних места на греди-узорку
- Слика 29. Почетна фаза испитивања узорка бр. 10
- Слика 30. Почетна закривљеност пресека
- Слика 31. Детаљ ваљкастог ослањања узорка
- Слика 32. Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона узорка бр. 10
- Слика 33. Почетна фаза испитивања узорка бр. 11
- Слика 34. Пукотина на горњој ламели пре испитивања
- Слика 35. Почетна нагнутост пресека носача
- Слика 36. Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона узорка бр. 11
- Слика 37. Почетна фаза испитивања узорка бр. 12
- Слика 38. Чвор као слабљење у средњој ламели
- Слика 39. Накнадно спојена ламела за носач
- Слика 40. Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона узорка бр. 12
- Слика 41. Почетна фаза испитивања узорка бр. 13
- Слика 42. Слабљење носача код ослонаца



- Слика 43. Накнадно додата ламела са FRP тракама
- Слика 44. Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона греде бр. 13
- Слика 45. Почетна фаза испитивања, мерење 1, узорка бр. 14
- Слика 46. Почетна фаза испитивања, мерење 2, узорка бр. 14
- Слика 47. Детаљ FRP траке на накнадно залепљеној ламели
- Слика 48. Прслине попречног пресека
- Слика 49. Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона греде бр. 14
- Слика 50. Почетна фаза испитивања узорка бр. 20
- Слика 51. Идеално равно налегање
- Слика 52. Положај постављених мерних трака на греди
- Слика 53. Челична плочица као подметач, који спречава гњечење дрвених влакана
- Слика 54. Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона греде бр. 20
- Слика 55. Почетна фаза испитивања, мерење 1, узорка бр. 21
- Слика 56. Почетна фаза испитивања, мерење 2, узорка бр. 21
- Слика 57. Унос силе преко челичних подметача
- Слика 58. Челични ваљци на месту уноса сила
- Слика 59. Почетна фаза испитивања узорка бр. 22
- Слика 60. Унос силе хидрауличном пресом
- Слика 61. Мерне траке са лењиром на средини распона
- Слика 62. Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона греде бр. 22
- Слика 63. Почетна фаза испитивања, мерење 1, узорка бр. 31
- Слика 64. Почетна фаза испитивања, мерење 2, узорка бр. 31
- Слика 65. Мерна трака на горњој ивици греде
- Слика 66. Мерна трака на доњој ивици греде
- Слика 67. Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона греде бр. 31
- Слика 68. Угиби серија 1, средина распона узорка, U3
- Слика 69. Дилатације на горњој ивици серија 1, средина распона узорка, T1
- Слика 70. Дилатације на доњој ивици серија 1, средина распона узорка, T2
- Слика 71. Угиби серија 2, средина распона узорка, U3
- Слика 72. Дилатације на горњој ивици серија 2, средина распона узорка, T1
- Слика 73. Дилатације на доњој ивици серија 2, средина распона узорка, T2
- Слика 74. Угиби серија 3, средина распона узорка, U3
- Слика 75. Дилатације на горњој ивици серија 3, средина распона узорка, T1

- Слика 76. Дилатације на доњој ивици серија 3, средина распона узорка, T2
- Слика 77. Приказ прслина и деформација на узорку бр. 10
- Слика 78. Гњечење дрвета код ослонца
- Слика 79. Прслина настала код израде узорка
- Слика 80. Гњечење дрвета код уноса силе
- Слика 81. Подужне пукотине у доњој ламели
- Слика 82. Приказ прслина и деформација узорка бр. 11
- Слика 83. Деформисани изглед узорка
- Слика 84. Неравномерно гњечење дрвета код левог ослонца
- Слика 85. Неуједначено гњечење дрвета код десног ослонца
- Слика 86. Појава подужних пукотина у горњој ламели
- Слика 87. Приказ прслина и деформација узорка бр. 12
- Слика 88. Одвајање FRP траке од доње ламеле
- Слика 89. FRP траке смањује гњечење дрвета
- Слика 90. Зацепљење FRP траке
- Слика 91. Претурање апаратуре услед избочавања
- Слика 92. Приказ прслина и деформација узорка бр. 13
- Слика 93. Деформисани облик носача
- Слика 94. Проширење подужне пукотине
- Слика 95. Појава пукотина на месту чворова
- Слика 96. Неравномерно гњечење дрвета код ослонца
- Слика 97. Гњечење дрвета код уноса силе
- Слика 98. Лом доње ламеле на месту чвора
- Слика 99. Приказ прслина и деформација узорка бр. 14
- Слика 100. Деформисани облик носача
- Слика 101. Гњечење влакана код уноса силе-лево
- Слика 102. Гњечење влакана код уноса силе-десно
- Слика 103. Гњечење влакана код ослонаца
- Слика 104. Вертикалне пукотине у дрвеним ламелама
- Слика 105. Гњечење влакана код ослонаца
- Слика 106. Гњечење влакана код ослонаца са површинским зацепљењем
- Слика 107. Приказ прслина и деформација узорка бр. 20
- Слика 108. Деформисани облик носача

- Слика 109. Гњечење влакана код левог ослонаца
- Слика 110. Гњечење влакана код десног ослонаца
- Слика 111. Проширење пукотине на месту чвора
- Слика 112. Лом пресека на месту зупчастог споја
- Слика 113. Приказ прслина и деформација узорка бр. 21
- Слика 114. Деформисани облик носача
- Слика 115. Чворови у суседним ламелама као могућност слабљења пресека
- Слика 116. FRP трака смањује гњечење дрвета на месту ослањања
- Слика 117. Локално зацепљење доње дрвене ламеле
- Слика 118. Локално зацепљење поред FRP траке
- Слика 119. Дужина локалног зацепљења
- Слика 120. Приказ прслина и деформација узорка бр. 22
- Слика 121. Деформисани облик носача
- Слика 122. Формирање лома је настало испод силе у доњој ламели
- Слика 123. Лом доње ламеле се проширио ка средини пресека и на друге ламеле
- Слика 124. На месту лома лепак је издржао али са FRP трака раслојила
- Слика 125. Приказ прслина и деформација узорка бр. 31
- Слика 126. Деформисани облик носача
- Слика 127. Гњечење дрвета на месту ослонца
- Слика 128. Лом по чвору у доњој ламели
- Слика 129. Изглед лома са једне стране
- Слика 130. Изглед лома са супротне стране
- Слика 131. Фазе пластификације дрвеног пресека
- Слика 132. Положај оптерећење код свих узорка са статичким утицајима
- Слика 133. Рендеровани приказ 3D МКЕ модела типичне испитиване ламелиране дрвене греде
- Слика 134. МКЕ модел испитиваних греда са местима деловања оптерећења
- Слика 135. Детаљ оптерећења МКЕ модела, "shell" и "link" КЕ
- Слика 136. Еластична линија угиба модела бр. 10
- Слика 137. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 10
- Слика 138. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 10
- Слика 139. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 10
- Слика 140. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 11
- Слика 141. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 11

- Слика 142. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 11
- Слика 143. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 12
- Слика 144. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 12
- Слика 145. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 12
- Слика 146. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 13
- Слика 147. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 13
- Слика 148. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 13
- Слика 149. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 14
- Слика 150. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 14
- Слика 151. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 14
- Слика 152. Еластична линија угиба модела бр. 20
- Слика 153. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 20
- Слика 154. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 20
- Слика 155. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 20
- Слика 156. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 21
- Слика 157. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 21
- Слика 158. Дијаграм нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 21
- Слика 159. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 22
- Слика 160. Дијаграм нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 22
- Слика 161. Дијаграм нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 22
- Слика 162. Еластична линија угиба модела бр. 30
- Слика 163. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 30
- Слика 164. Дијаграм нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 30
- Слика 165. Дијаграм нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 30
- Слика 166. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 31
- Слика 167. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 31
- Слика 168. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 31
- Слика 169. Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак бр. 10, серије 1
- Слика 170. Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак бр. 11, серије 1
- Слика 171. Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак бр. 12, серије 1
- Слика 172. Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак бр. 13, серије 1
- Слика 173. Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак бр. 14, серије 1
- Слика 174. Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак бр. 20, серије 2

- Слика 175. Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак бр. 21, серије 2  
Слика 176. Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак бр. 22, серије 2  
Слика 177. Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак бр. 30 и узорак бр. 31, серије 3  
Слика 178. Положај арматуре у пресецима узорка серије 1  
Слика 179. Положај оптерећења и дијаграм угиба  
Слика 180. Теоријски приказ избочавања дрвене греде

#### **Попис табела**

- Табела 1.** Ознаке које се користе код класификације дрвене грађе [19]  
**Табела 2.** Класе носача од лепљеног ламелираног дрвета по DIN 4071  
**Табела 3.** Механичке карактеристике носача од лепљеног ламелираног дрвета по EN 1194  
**Табела 4.** Приказ механичких карактеристика за FRP траке [64]  
**Табела 5.** Преглед резултата мерења силе адхезије за подлогу  
**Табела 6.** Резултати мерених померања на испитиваним узорцима  
**Табела 7.** Резултати испитивања два узорка, система простих греда оптерећених на савијање  
**Табела 8.** Технички подаци испитиваних узорка са положајем и количином арматуре  
**Табела 9.** Упоредба мерених и рачунских угиба и напона и њихова разлика  
**Табела 10.** Рачунске вредности угиба на средини распона свих узорка  
**Табела 11.** Записници са испитивања узорка бр. 10  
**Табела 12.** Записници са испитивања узорка бр. 11  
**Табела 13.** Записници са испитивања узорка бр. 12  
**Табела 14.** Записници са испитивања узорка бр. 13  
**Табела 15.** Записници са испитивања узорка бр. 14  
**Табела 16.** Записници са испитивања узорка бр. 20  
**Табела 17.** Записници са испитивања узорка бр. 21  
**Табела 18.** Записници са испитивања узорка бр. 22  
**Табела 19.** Записници са испитивања узорка бр. 31  
**Табела 20.** Преглед трошкова израде узорака

## 1. УВОД

### 1.1. Истраживања

Конструкцијска санација дрвених носача примењује разне видове ојачања, када стање конструкције не задовољава потребну сигурност. Предност санацији FRP тракама у односу на челичну арматуру дају већа отпорност на електрохемијску корозију, висок проценат односа чврстоћа/тежина, неосетљивост на магнетизам и трајност. Једноставност и брзина постављања на конструкцију лепљењем захтева само употребу лаких покретних скела. Траке пружају могућност да се уграде на спољне стране носача или да се поставе у жљебове и тако остану скривене. Естетски услови представљају значајан фактор, а постављањем композитног ојачања не нарушава се изглед санираних конструкција. Следећа предност FRP трака је у томе што оне и у условима хемијски агресивне средине не мењају носивост. Отпорност FRP трака на топлоту може се повећати ако се заштите ватроотпорном облогом или премазима. Најзначајнију улогу код постављања FRP траке има лепак који омогућује добро спрезање и са другим материјалима као што су челик, бетон, опека и камен. Ако су FRP траке постављене на носачима који су изложене механичком удару, онда их је потребно заштити плочама које могу да буду и украсне. Њихов задатак је да амортизују ударе и спрече оштећење влакана траке, па се у ту сврху могу употребити: плута, гипс-картон плоче, стиродур и сл.

Прва ојачања дрвених носача вршена су челиком и тај историјски развој документовао је Дагхер (Dagher). За ојачање носача користио се челик, што је приказао Гранхолм (Granholm), 1954. године. Он је користио квадратне челичне шипке постављене у доњој зони уметнуте у жљебове дрвеног носача. Марк (Mark) је проучавао 1961. ојачање алуминијумском арматуром постављеном у притиснутој и затегнутој зони. Сликер (Sliker) је 1962. ојачавао дрвени ламелирани носач тако што га је обавијао алуминијумским листићима између различитих слојева ламела. Године 1970. Лантош (Lantos) је ојачавао греде од правоугаоног ламинатног дрвета челичним шипкама. Стем (Stem) и Кумар (Kumar) су 1973. проучавали ојачање челичним тракама на вертикално ламелираним дрвеним гредама. Нарочито је проучавана појава која се често дешавала код залепљењих челичних трака за носаче. То је одвајање које се догађа на местима лепљења и познато је као термин „деламинација“. Тада се у највећем броју изведених експеримената посебно анализирао издржљивост везе [10].

Ојачањем носача карбонским FRP тракама тај проблем је успешно је решен. Траке су еластичније, а за повезивање са носачем користе се квалитетни лепкови, чији је квалитет

знатно повећан. Тако се лепљењем добија добра адхезија, монолитност везе, носач је лакши и носивост носача се значајно увећава. Постављањем ојачања у зону затезања може да се постигне економичност, тако што ће се за израду дрвеног лепљеног ламелираног носача користити грађа нижих класа. Та могућност довела је до низа експерименталних студија. Вангард (Wangaard) 1964. и Библис (Biblis) 1965. године, проучавали су ефекат везивања једноосног ојачања притиснуте и затегнуте ивице носача за разне врсте дрвета. Тексон (Theakston) је 1965. проучавао оправданост ојачања и издржљивост дрвених греда армираних стакленим влакнима. Кругер (Kueger) и Сандберг (Sandberg) су 1974. године проучавали дрвене ламелиране лепљене носаче армиране у затегнутој зони композитом од високовредне жице у епоксиду. Кругер и Еди (Eddy) 1974. су извели слична истраживања, али они поређењем резултата истраживања анализирају учинак ојачања. Спан (Spaun) је 1981. проучавао наставак са зупчастом везом ојачан стакленим влакнима. Деведесетих година се интензивирају истраживања која проучавају понашање дрвене греде ојачане карбонским FRP влакнима. Плевирс (Plevris) и Триантафило (Triantafillou) 1992. су проучавали утицај армирања дрвета јеле карбон/епоксидним влакнима. Триантафило и Десковић су 1992. проучавали ефекат преднапрезања са FRP (CFRP) арматуром на тврдом дрвету. Давалос (Davalos), Салим (Salim) и Мунипале (Munipalle) су 1992. проучавали лепљене ламелиране греде састављене од дрвета тополе, ојачане у затегнутој зони стакло/естер и FRP арматуром. Тинглеј (Tingley) и Лехти (Leichti) 1993. су испитивали носаче од лепљених ламела изведених од дрвета лошијег квалитета, и за то су користили бор-пандерос, који су ојачавали у затегнутој зони тракама од кевлара и карбона. Абдел Магид (Abdel-Magid), Дагхер (Dagher) и Кибал (Kimball), 1994. године су проучавали греде канадске тополе ојачане на затезање тракама од кевлара и карбона. Сонти (Sonti), Давалос (Davalos), Хернандез (Hernandez), Муди (Moody) и Ким (Kim) 1995. проучавали су лепљене ламелиране носаче од тополе ојачане стакленим FRP винилестером. 2009. године Гиамбачо (Giambanco) је вршио анализу вертикалног ојачања дрвених лепљених ламинатних греда FRP шипкама.

У нашем окружењу прва ојачања FRP тракама успешно су изведена на армираним бетонским гредама старих бетонских мостова у Македонији [31]. Ојачање дрвених конструкција је вршено у Словенији [74] и у Хрватској [5][27]. Код нас, после 1999. године на оштећеним објектима од ратних разарања примењују се ојачања FRP тракама на армирано-бетонским конструкцијама [4]. Услед потребе да се често на постојећим објектима врше санације и реконструкције, ова истраживања постају интересантна. На нашем тржишту може се пронаћи велики асортиман квалитетних материјала за ојачање, као и лепила. Последњих година

објављено је неколико научних радова о примени FRP трака [20][56]. Ојачање дрвених конструкција посебно је обрађено у радовима [40] [68].

## 1.2. Предмет истраживања

Предмет истраживања у овом раду јесте понашање статички оптерећених дрвених лепљених ламелираних греда ојачаних карбонским тракама. Као што је познато, карбонске траке, као производ од карбонских влакана, имају изузетно добре перформансе носивости и жилавости, чак вишеструко веће од одговарајућих челичних трака.

Избор ојачања на узорцима извршен је у циљу да се при извођењу реконструкција носача добије положај ојачања који задовољава услове веће носивости, естетског изгледа и економичности. Да би се то реализовало извршена су лабораторијска експериментална испитивања са малим бројем узорка који су израђени од дрвених лепљених ламелираних греда. Узорци су израђени по истим критеријумима, од материјала добрих механичких карактеристика. Да би се остварио циљ истраживања, испитивање је обављено на девет узорка дрвених ламелираних греда истих дужина. Коришћен је статички систем просте греде и греде су оптерећиване са две концентрисане силе на трећини распона. У односу на димензије попречног пресека издвојене су три групе узорка (Слика 1):

– прву групу чине пет греда-узорка, димензија 10x19,2cm (пресек са 6 ламела). Један узорак је неојачан, док су остали ојачани са подужно оријентисаним FRP карбонским тракама постављеним хоризонтално на доњој зони узорка. Узорак бр. 11 је ојачан постављањем FRP карбонске траке између две ламеле у доњем појасу, узорак бр. 12 има ојачање постављено на доњој ивици носача по целом распону, као у истраживању [6]. Друга два узорка садрже и вертикална ојачања. Узорак бр. 13 је ојачан са две FRP карбонске траке постављене у вертикалном положају у доњој ламели. Узорак бр. 14 садржи вертикалано и хоризонталано ојачање у доњој ламели, као у истраживању [30].

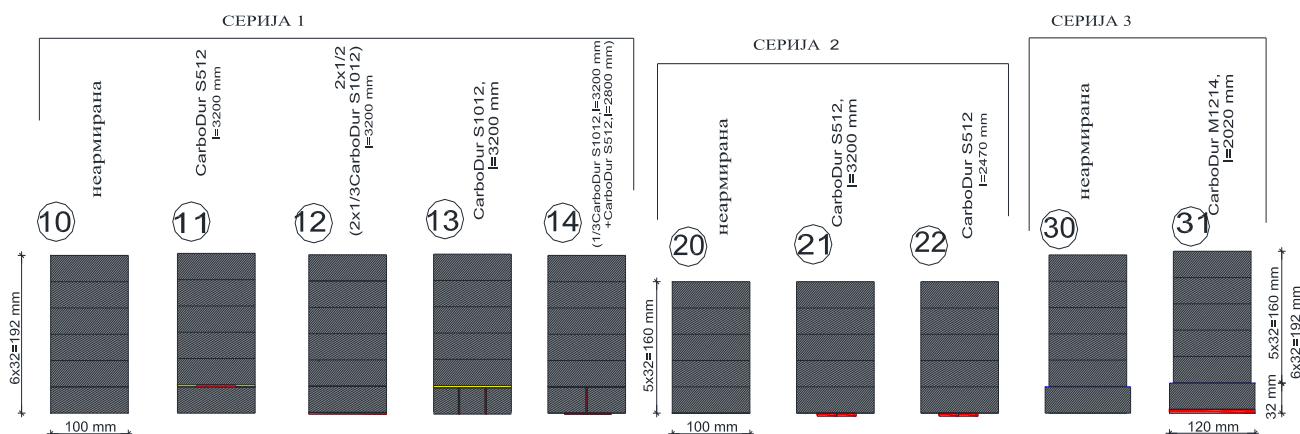
– другу групу чине три узорка, димензије 10x16cm (пресек са 5 ламела). И у овој групи је један узорак бр. 20 неојачан, а друга два су хоризонтално ојачана на исти начин постављањем ојачања испод доње ламеле али са различитим дужинама FRP карбонских трака (Узорак бр. 21 и бр. 22).

– трећу групу чини само један узорак бр. 31, димензије 10x19,2cm (пресек са 5 ламела ширине 10cm и једне додатне ламеле ширине 12cm), којем је додата ламела на доњем појасу, веће ширине да би могло да стане ојачање у виду FRP карбонске траке, ширине 12cm. Ојачање је изведено FRP карбонском траком класе М, већег модула еластичности у односу



на остала ојачања код којих је употребљена класа S. Дужина ојачања у овом случају краћа него код других узорака.

### Попречни пресеци узорака



Слика 1. Попречни пресеци узорака груписани у три серије

Основа за истраживање представља испитивање узорака при дејству краткотрајног оптерећења и растерећења и при томе се мере деформације и напони. Запажања са испитивања и мерени подаци биће дати прегледно у раду и они ће послужити за анализу понашања узорака који ће бити упоређени са вредностима добијеним аналитичком методом на прорачунском моделу.

Нумеричко истраживање помоћу прорачунског модела представља понашање ојачаних греда моделирано применом софтвера AxisVM. Модели проистекли из овог истраживања могу да буду основа за развој концепта прорачуна дрвених лепљених ламелираних ојачаних носача и спрегнутих конструкција [62].

### 1.3. Циљ истраживања

Циљ истраживања је развој методологије за санацију и ојачање дрвених лепљених ламелираних носача и носача од пуног дрвета, ојачаних карбонским FRP тракама са настојањем да се докажу предности у односу на уобичајене класичне начине санације. Поред тога резултат истраживања је и формулисање МКЕ (метода коначних елемената), нумеричког модела за анализу и прорачун оваквих конструкцијских елемената.

Комерцијални циљ истраживања јесте стварање могућности за масовнију употребу ојачања у виду карбонских FRP трака у санацији и ојачању пуних и ламелираних дрвених носача, склопова и конструкција у целини. У том смислу је урађена и технолошко-економска анализа поступака ојачања.

Резултати овог истраживања требало би да буду прилог развоју примењивих метода које могу користити пројектанима и извођачима на санацијама конструкција од дрвета.

Одабир адекватног материјала за избор конструкције је увек велика дилема код пројектанта. Често у том случају велики распони захтевају и велике висине дрвених носача. И после израде идејних решења остаје дилема да ли због великих пресека дрво заменити челиком, или пресек носача од двета смањити, тако што ће се носачи ојачати на начине који су у раду приказани. Поред тога, за извођење ојачања данас постоји велики избор карбонских FRP трака које се разликују по квалитету, облику, носивости и цени. За избор и даљу примену ојачања на конструкцијама овај рад може да да оговор на сва та питања.

#### 1.4. Програм истраживања

Реализација овог истраживања започета је почетком 2006. године. И ранијих година се на територији Србије јављала потреба за санацијом дрвених конструкција. Такви радови су специфични јер захтевају кратко време извођења и могућност да конструкција одмах прими потпуно оптерећење. Методе које су раније коришћене нису могле да испуне ове захтеве. Захваљујући примени карбонских FRP трака и брзовезујућих епоксидних лепила, ови захтеви су успешно решени. Највећа примена ојачања FRP тракама постигнута је код армирано-бетонских конструкција, које су раније због оштећења биле рушене. Тада се поставило питање да ли је ојачање карбонским FRP тракама могуће применити и на дрвене ламелиране лепљене носаче и носаче од пуног дрвета.

Да би се спровела таква проучавања, прибављен је велики број научних радова, каталога FRP производа и слично. Осмишљен је начин испитивања узорака. Број од девет узорака одабраних за испитивање довољан је да се утврди допринос ојачања карбонским FRP тракама приликом санације носача. У предмету истраживања, поглавље 1.2, приказани су попречни пресеци узорака са положајем и дужином ојачања. Мора се истаћи да се у свакој серији налазио контролни узорак који није ојачан, а који је служио за упоређење мерених вредности са узорцима који су ојачани FRP тракама.

Сви узорци за испитивање су израђени као греде спајањем дрвених лепљених континуалних ламела настављених зупчастим спојевима. Необрађена дужина узорка после лепљења и пресовања износила је 4,00m, али је после обраде скраћена на дужину за испитивање од 3,20m. На обрађеним узорцима су вршена ојачања тако што су лепљене карбонске FRP траке помоћу двокомпонентног епоксидног лепка. У случају када се дрвена ламела налази испод ојачања и у случају када су карбонске FRP траке вертикално постављене у ламеле, онда су те ламеле накнадно додаване на претходно припремљене носаче. Поступак лепљења и спајања ламела је обављен у производној хали где је

температура варира од 20 до 25 °С. Испуњен је и услов за формирање носача од лепљеног ламелираног дрвета пошто је мерена влажност дрвета била занемарљива.

Неколико дана после одлежавања узорци су транспортовани у лабораторију за испитивање материјала и конструкција Департамента за грађевинарство, ФТН-а у Новом Саду. Узорци су ускладиштени на равној подлози и у условима суве климе и уједначене температуре.

Само испитивање је обављено у периоду од фебруара до априла 2011. године. Резултати испитивања су дати у другом, трећем и четвртом поглављу, а записници мерења у прилогу В. Узорци су излагани краткотрајним оптерећењима од 5,0kN. Мерени су угиби и праћене деформације на узорцима. Оптерећење је вршено поступно у првом мерењу до границе еластичности, све до појаве малих угиба и прслина. Поновна испитивања су урађена након неколико дана на исти начин увећањем силе. Последица тог оптерећења је била видна, јер је долазило до појаве прслина, а онда и до лома у доњој ламели или избочавања греде, и прекидом рада опреме за мерење.

Подаци мерења и запажања са испитивања предмет су детаљне анализе и у раду ће бити представљени на следећи начин:

- у *Уводу* је изложен предмет, циљ и програм истраживања;
- поглавље *Опис материјала и метода истраживања* садржи опис карактеристика дрвених лепљених ламелираних носача, композитног материјала који се користи за ојачање, опис истраживања, претходних испитивања, резултата мерења и прорачунског модела;
- у поглављу *Приказ резултата* упоређени су резултати добијени експерименталним путем и рачунски резултати и извршена је анализа резултата;
- у поглављу *Закључци* даје се кратак преглед истраживања, с акцентом на могуће правце даљих истраживања;
- на крају су *Прилози*.

## 2. МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

### 2.1. ЛЕПЉЕНИ ЛАМЕЛИРАНИ НОСАЧИ

#### 2.1.1. О дрвету

Дрво које се користи за конструкције природни је материјал. Производи од дрвета који се користе у изради конструкција могу се сврстати у две групе:

1. Производи ограничених димензија пресека – монолитно дрво и
2. Производи са проширеним могућностима пресека – услојено дрво од кога се израђују: ламелиране лепљене греде, даске и плоче.

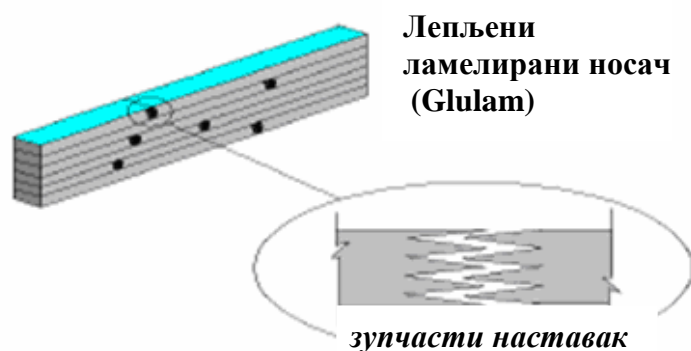
Квалитет дрвета одређује се визуелним или машинским сортирањем и на основу тога издаје се ознака класе. Класе дрвета у зависно од примењених стандарда могу се обележавати ознакама (Табела 1). Словна ознака указује на начин сортирања, а бројна вредност означава чврстоћу на притисак паралелно са влакнима дрвета, исказана у (N/mm<sup>2</sup>).

**Табела 1.** Ознаке које се користе код класификације дрвене грађе [19]

<b>ВИЗУЕЛНО КЛАСИРАЊЕ ДРВЕТА</b>		
JUS-Klase	EN 338	DIN 4074-1
III	C16	S7
II	C24	S10
I	C30	S13
	C35, C40, C45, C50	
<b>МАШИНСКО КЛАСИРАЊЕ ДРВЕТА</b>		
	C16	MS7
	C24	MS10
	C35	MS13
	C40	MS17

У процесу класификације грађе, један део дрвених елемената се избацује из производње носача индентификацијом недостатака који смањују носивост дрвету, а то су:

- Трулеж, смањује запреминску тежину, слаби носач, а такви елементи су непоуздани.
- Нагњечена влакана дрвета, слабе носивост и смањују његову трајност.
- Рупе и пукотине дрвета које су видљиве смањују носивост носачу, изазивају превремени лом.
- Чворови уколико су мањег пречника и урасли, не утичу на носивост, али већи, пречника преко 30mm, поготово ако су испадајући, изазивају изненадни лом дрвета.
- Уздужни зупчасти спојеви којим се спајају ламеле не слабе носач. Важно је да се избегне поклапање зупчастих спојева у суседним ламелама и да се ти размаци изведу према препорукама[76].



Слика 2. Приказ хоризонталног зупчастог наставка на ламели [1]

Зупчасти наставци омогућавају квалитетну везу код настављања дрвене ламеле неограничене дужине (Слика 1). Машинским путем се врши урезивање крајева дасака тако да се формирају „виљушке“ на обе стране споја, а затим се врши спајање везе после нанетог лепка и пресовање. Поступак је детаљно дат у стандарду EN 385. Лепити се могу само дрвене ламеле ниске влажности. Припремљени лепкови се морају употребити у кратком временском року и при томе треба да задовоље екстремне климатске утицаје. Зупчаста веза се испитује на затезање на узорцима. Слабљење зупчасте везе се може израчунати [58], или се не узима у обзир ако се наставци изведу међусобно на прописаном растојању [77].

Обрадом дрвета добија се даска, дебљине 4cm и формира се ламела за израду дрвене ламелиране греде. Такве ламеле се излажу контроли на затезање, помоћу уређаја за развлачење „proof loading“. Овим поступком се производ од дрвета који је изрезан на дужину за транспорт, затеже у трајању од око 15 секунди и региструје се његово понашање [73]. Тек на основу мерених резултата који потврђују квалитет класе дрвене ламеле, може да се настави процес формирања носача.

### 2.1.2. Формирање носача од лепљеног ламинираног дрвета

Лепљени ламелирани дрвени носач састоји се од најмање три слоја обострано залепљених ламела, са оријентацијом паралелних влакана у подужном правцу [41]. Дрвене ламеле од којих се формира носач треба да задовоље следеће критеријуме:

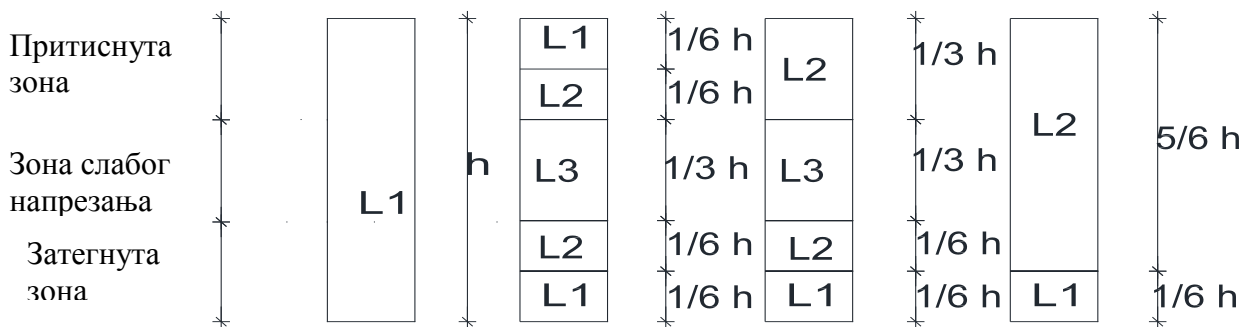
- влажност технички сушеног дрвета за израду носача мора бити  $15\% \pm 3\%$ ,
- дебљина ламеле утиче на еластичност носача и креће се од 20 до 40mm.

Производња лепљеног ламинатног дрвета и формирање дрвених лепљених носача стандардизована је на европском тржишту и дата је у стандарду EN 1480.

Први експерименти са ламелираним дрветом изведени су оријентационо пре 100 година. Током протеклих година усавршена су лепила за везу између дрвених ламела, машине за обраду дрвета и тако је створена могућност за производњу квалитетних дрвених

носача, а тиме и могућности за пројектовање и дизајнирање најразличитијих архитектонских форми.

У даљем тексту ће бити дат поступак формирања узорака за испитивање од ламелираног лепљеног дрвета. Носачи могу да се формирају од ламела истог квалитета или од ламела различитих квалитета дрвета како је дато на слици 3. Носачи сложеног састава имају дефинисане класе (Табела 2), а обележавају се са BS  $k(n_1L_1, n_2L_2, \dots)$ . Увођење ламела слабијег квалитета дрвета примењује се само у мање напрегнутој зони, око средине пресека, чиме се не утиче на целокупни квалитет носача, а при томе се смањује цена производње.



Слика 3. Примери за могуће формирање пресека лепљеног ламелираног носача од више ламела различитог квалитета дрвета [19]

Табела 2. Класе носача од лепљеног ламелираног дрвета по DIN 4071

Класе носача према DIN 4071	BS 11	BS 14		BS 16		BS 18	
Спољне ламеле	S 10	S 13	S 13	MS 13	MS 13	MS 17	MS 17
Унутрашње ламеле		S 10		MS 10		MS 13	
Напомена: Код спољашњих ламела у обе зоне, најмањи број ламела је две на делу од $1/3h$							

У табели 3, дате су класе за дрвене лепљене ламелиране носаче по европским прописима које се примењују и код нас. Број уз ознаку класе представља његову чврстоћу на притисак при савијању паралелно са влакнима. Поред декларације о квалитету дрвета мора поседовати и атест о испитивању квалитета лепка. Лепила треба да формирају везу између ламела са таквом адхезијом (чврстоћом) и трајношћу, да се та компактност споја одржава у одговарајућој експлоатационој класи током очекиваног века трајања конструкције. Европски стандарди за везе дати су у EN301.

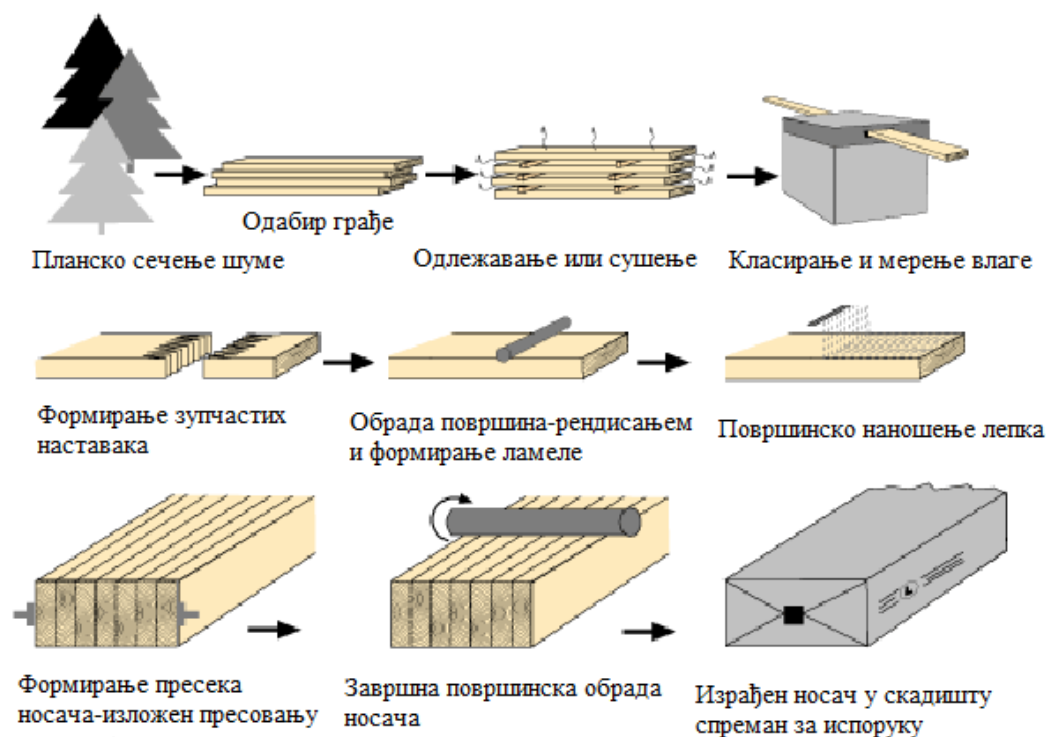
Важан фактор је и поступак справљања лепка, јер се он испоручује као двокомпонентни или трокомпонентни производ. Правилно изведен поступак мешања компонената лепила и примена произвођачке рецептуре везане за дозирање масе, наношење на припремљену подлогу, пресовање и неговање изведеног споја треба да гарантује квалитет везе.

**Табела 3.** Механичке карактеристике носача од лепљеног ламелираног дрвета по EN 1194

Класе за конструктивно лепљено ламелирано дрво			GL20	GL24	GL28	GL32	GL36
Савијање	$f_{m,g,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	20,0	24,0	28,0	32,0	36,0
Затезање паралелно	$f_{t,0,g,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,0	18,0	21,0	24,0	27,0
Затезање управно	$f_{t,90,g,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,35	0,35	0,45	0,45	0,45
Притисак паралелно	$f_{c,0,g,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	21,0	24,0	27,0	29,0	31,0
Притисак управно	$f_{c,90,g,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	5,0	5,5	6,0	6,0	6,3
Смицање	$f_{v,g,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,8	2,8	3,0	3,5	3,5
Модул елатичности	$E_{0,mean,g}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	10 000	11 000	12 000	13 500	14 500
Фрактил модула елатичности	$E_{0,05}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	8 000	8 800	9 600	10 800	11 600

### 2.1.3. Израда и примена носача од лепљеног ламинираног дрвета

Технолошки процес производње дрвених лепљених ламелираних носача приказан је на слици 4. Крајњи производ у том процесу је квалитетно израђена дрвена ламела-даска. Битна особина танке ламеле је савитљивост, те се она због тога користи у обликовању носача. После наношења лепила, ламеле су још више савитљиве, па се на платоу са шаблонима и помоћу стега обликују у носаче најразличитијих облика. Коначан пројектовани облик носач добија када се на радној температури заврши процес очвршћавања лепка. Формирани компактни носач се транспортује на прецизну обраду, где се обрадом спољних површина и сечењем добија његов завршни облик. У зависности да ли ће експлоатација носача бити у спољашњој или унутрашњој средини, врши се његова површинска заштита тако што се наноси заштитна боја за дрво или ватроотпорни премаз. Посебну пажњу треба обратити на везе са другим носачима јер се због концентрације напона код лепљених ламелираних носача на површинама код ослонаца и код зглобова јављају оштећења дрвета у виду гњечења влакана дрвених ламела. Да би се спречила ова појава, контактне површине се ојачавају челичним плочицама, а за спојна средства се користе завртњи. Код складиштења готових носача обавезно их је поставити на равну подлогу и обезбедити проветраван простор, без влаге. Детаљи наведених поступака описани су у домаћој литератури [26].



Слика 4. Технолошки процес производње [32]

Транспорт носача великих распона представља потешкоћу, и због безбедности у саобраћају он се мора вршити специјалним возилима за превоз већих терета и уз привремену обуставу саобраћаја. Монтажа дрвених лепљених ламелираних носача захтева коришћење дизалица и тачно припремљених места за њихово захватање и подизање на висину. Конструкције израђене од дрвених лепљених ламелираних носача истичу се изванредним могућностима обликовања. Из тог разлога у великој мери примењују се при изградњи савремених репрезентативних угоститељских и црквених објеката, надстрешница на стадионима, лучним носачима спортских хала, фабричких хала и естетски дизајнираних мостова (Слика 5).



Слика 5. Изведени објекти: а. Музеј аутомобила Li Меј, Тахома, Сједињене Америчке државе (2012), ([http://www.tripadvisor.com/Attraction\\_Review-g58775-d3203900-Reviews-LeMay\\_Americas\\_Car\\_Museum-Tacoma\\_Washington.html](http://www.tripadvisor.com/Attraction_Review-g58775-d3203900-Reviews-LeMay_Americas_Car_Museum-Tacoma_Washington.html), or <http://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-t/02/88/27/bb/lemay-museum-at-marymount.jpg>), б. Мост Тунсет, Хендмарк, Норвешка (2001), ([http://www.go-explore-trans.org/wp-content/uploads/images/tvnset\\_glulam\\_bridge.jpg](http://www.go-explore-trans.org/wp-content/uploads/images/tvnset_glulam_bridge.jpg))



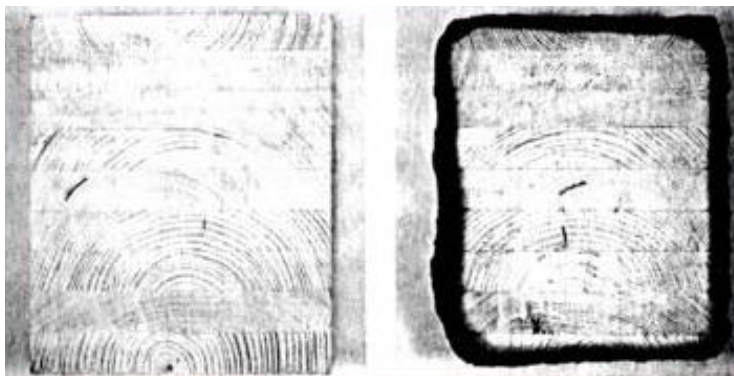
2.1.4. Отпорност дрвених лепљених ламелираних носача на пожар

Анализом последица пожара са слике 6, види се да је дрво издржљивије на пожар од челичних носача, наравно, ако се ватра угаси за време које је потребно за евакуацију људи. Дрво је запаљиво и површине изложене пожару бурно сагоревају. Језгро дрвеног носача је способно да и даље носи, док се око омотача ствара заштитни угљенисани слој који штити средиште пресека (Слика 7).

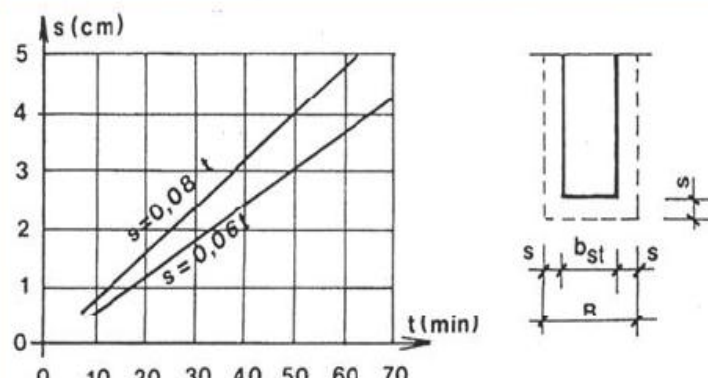


Слика 6.  
Изглед дрвеног и челичног носача после пожара [75]

Противпожарна отпорност обезбеђује време трајања пожара од 30 и 60 min. и на основу тога се одређују минималне димензије пресека [22] [78]. Дрвеним ламелираним лепљеним носачима који се налазе у просторијама где је могућа појава пожара на основу рачунски добијених пресека додаје се заштитни слој који је дат дијаграмом ( Слика 8).



Слика 7. Пресек који је изложен пожару [5]



Слика 8. Одређивање заштитног противпожарног слоја [5]

## 2.2. КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ ЗА ОЈАЧАЊЕ

### 2.2.1. Карактеристике композитних материјала

Са композитним материјалима постижу се веће носивости ако се од њих израде монолитни носачи, ливени разуђени профили, или ако се користе као арматура за ојачање носача од челика, армираног бетона и дрвета. Најновији пример представља примену различитих хибридних композита на изради главних носача моста на ауто-путу преко реке Long Run Creek, у Lokportu, држава Illinois, SAD. Оно што нови мост разликује од свих који су икада изграђени јесте прва примена FRP материјала у комбинацији са челиком и другим материјалима велике издржљивости. Систем се заснива на хибрид-композитним гредама тј. **НСВ** (Hybrid-Composite Beams). Приказани хибридни насач (Слика 9), представља последње достигнуће на пољу примене избора материјала високе издржљивости, најповољнијег положаја и геометрије обликовања [28]. Такође, у последње време у великој употреби у мостоградњи су ливени I профили израђени од FRP влакана и за њих су израђени посебни наставци и везе, што представља засебну област за истраживање [43].



Слика 9. Приказ новог хибридног носача компаније HC Bridge [28]

### 2.2.2. Облици FRP композитне арматуре на тржишту

Код примене FRP материјала исплативије је да се уместо пуних ливених монолитних носача састављених од композитних влакана великих димензија, користе носачи малих разуђених пресека. Код употребе носача сачињених од класичних материјала (бетона, дрвета и челика) оправдано је да се ојачавају FRP композитном арматуром. FRP арматура се производи у неколико карактеристичних облика: шипке (bars), траке (strips) и платна (wrap). Избор начина и облика који ће се употребити за ојачање носача зависиће од напрезања које арматура треба да пренесе. То ће бити и критеријум за одређивање површине арматуре и места на носачу где је треба поставити. На слици 10 приказани су композитни монолитни FRP профили у облику шипке кружног пресека, разуђеног пресека I и пратећи елементи који се користе за ојачање.



**Слика 10.** Производи од композитних влакана који се користе као FRP арматура за ојачања ([http://www.alibaba.com/product-detail/Composite-FRP-fiberglass-rebar\\_567649592.html](http://www.alibaba.com/product-detail/Composite-FRP-fiberglass-rebar_567649592.html))

На слици 11 приказана је шипкаста FRP арматура, слична челичној ребрастој арматури која се поставља у жљебове носача при ојачању и није видљива на површини носача. Код овог вида ојачања арматура се налази унутар заштитног слоја [8]. Формирање жљебова за постављање арматуре врши се накнадно и простор у жљебу се попуњава житком масом. Ова маса има задатак да обезбеди адхезију између носача и арматуре. Место где се налазе жљебови представља зону великог смицања у којој најпре долази до појаве лома [33].

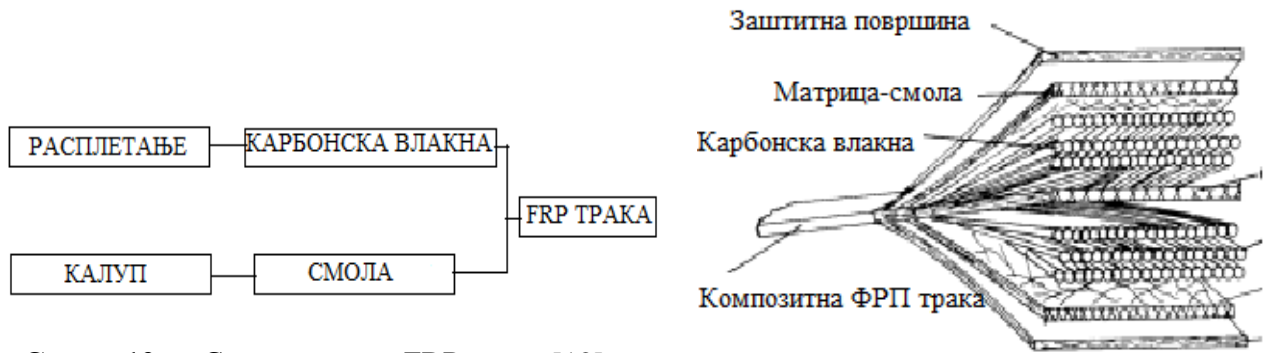


**Слика 11. а.** Приказ GFRP шипкасте арматуре типа Marperod G

б. Приказ уградње арматуре у формиране уторе на дрвеном носачу [33]

### 2.2.3. FRP траке

Основа за израду FRP трака је велики број финих танких влакана ( $v_l$ ), малих пречника 0,01-0,10mm, великих механичких отпорности на затезање. Повезивање влакана се врши епоксидним везивом (матрицом –  $m$ ). Трећи састојак траке је пунилац, ситно млевено камено брашно, којим се врши попуна састава, без утицаја на носивот траке. Састав компонената које чине FRP траку и изглед њеног попречног пресека приказан ја на слици 12.



Слика 12. а. Схема састава FRP траке [12],  
 б. Пресек FRP траке [23]

Код композитне FRP траке, две компоненте од којих је сачињена утичу на вредност модула еластичности [52]. Та вредност се може одредити у зависности од процента заступљености запремине компонената:

$$E_f = E_{vl} * V_{vl} + E_m * V_m \dots\dots\dots (2.1)$$

На сличан начин одређује се и чврстоћа траке на затезање:

$$f_f = f_{vl} * V_{vl} + f_m * V_m \dots\dots\dots (2.2)$$

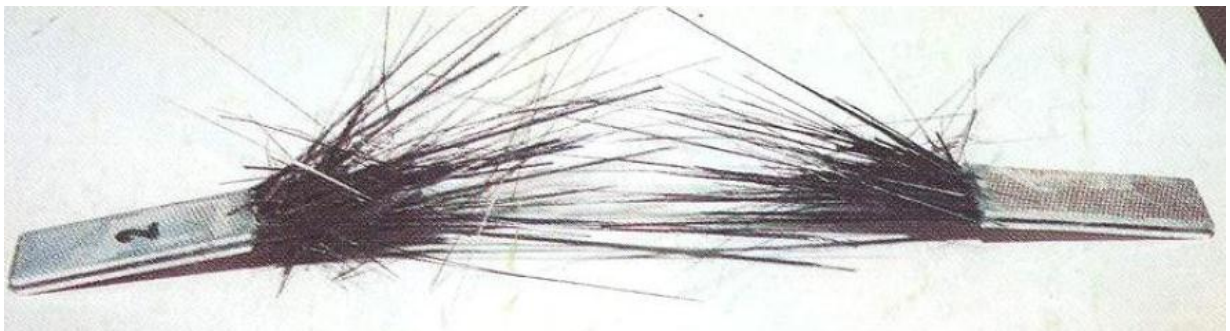
$E_f, f_f$  – модул еластичности и чврстоћа траке на затезање,

$E_{vl}, f_{vl}$  – модул еластичности и чврстоћа на затезање карбонских влакана,

$E_m, f_m$  – модул еластичности и чврстоћа на затезање везива-матрице,

$V_{vl}, V_m$  – запремина удела карбонских влакана и везива-матрице.

FRP траке могу да прихвате само напрезање у правцу пружања влакана. FRP-тканине су платна која су тања од FRP трака, али су код њих влакна постављена у правцу две управне осе, а некад су и дијагонално оријентисана. FRP платнима се обавијају пресеци стубова и греда са задатком да се приме напрезања у правцима постављених карбонских влакана. Носивост FRP трака је велика, при томе нема великих издужења, али када се постигне гранична сила, она доводи до кртог лома. У том тренутку долази до прекида траке уз прасак, при чему се карбонска влакна распрше у виду лепезе (Слика 13).

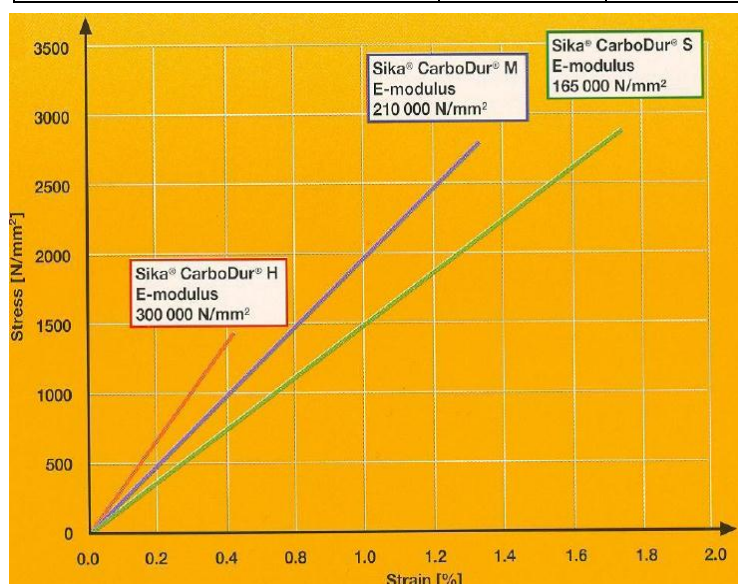


Слика 13. Тренутак појаве кртог лома FRP траке, кидање по влакнима уз прасак [50]

Избор FRP трака које су коришћене у овом раду направљен је од истог произвођача, а оне се разликују само по површини попречног пресека и по механичким карактеристикама. Једна FRP трака се разликује по модулу еластичности, а њихове механичке карактеристике су дате у табели 4.

**Табела 4.** Приказ механичких карактеристика за FRP траке [64]

Карактеристике трака	Ознаке за траке		
	Sika CarboDur S	Sika CarboDur M	Sika CarboDur H
Дебљина (mm)	1,2 и 1,4	1,4	1,4
Ширина (mm)	50-150	50-120	50
Модул еластичности (MPa)	165000	210000	300000
Чврстоћа при затезању (MPa)	2800	2400	1300
Гранична чврстоћа при лому-кидању	>1,7 %	>1,2 %	>0,45 %

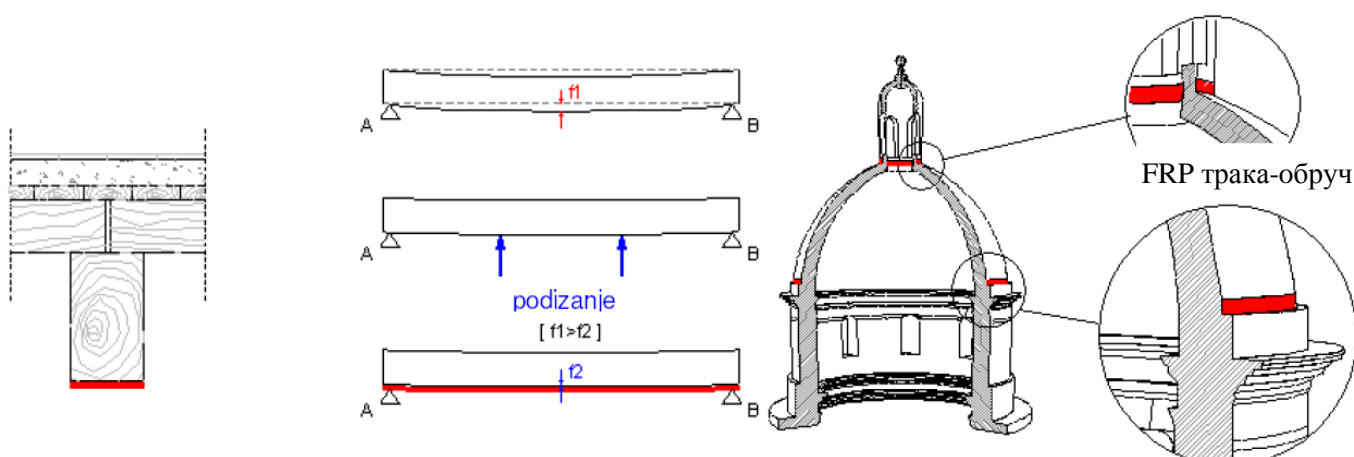


**Слика 14.** Модул еластичности за више типова FRP трака [64]

Траке типа **S** су највише коришћене у овом експерименту и имају најбоље карактеристике у погледу носивости, али им је крутост најмања. Сличних особина, али већег модула еластичности су траке типа **M**, које имају мању носивост, али већу крутост. Овај тип траке је коришћен само код ојачања једног узорка. Sika-траке типа **H** имају највећи модул еластичности и највећу крутост, али су знатно мање носивости. Из тог разлога се ређе користе, па се заправо и не могу наћи на нашем тржишту. Произвођач FRP трака даје њихове карактеристике у виду радног дијаграм напона и дилатација за поменути три типа ( Слика 14). Ове вредности су у сагласности са техничким карактеристикама датим у табели 4. Линеје дијаграма су добијене експериментално у специјализованим страним институтима, а испоручилац трака је за потребе коришћења на нашем тржишту обавио и пробне тестове на нашем институту [50].

Да би добре перформансе трака биле у потпуности искоришћене, потребно их је што боље повезати са носачем. У ту сврху се користе одговарајући епоксидни лепкови изванредних адхезионих својстава. Специјалне лепкове заједно са тракама испоручује произвођач уз упутство за примену. Пре nanoшења лепила потребно је извршити припрему површина FRP трака које се спајају, односно проверити квалитет подлоге, што ће бити детаљно објашњено у поглављу 2.3.3.1.

Све већа потреба примене ојачања FRP тракама илустрована је примерима санације дрвених греда и конструкције куполе кровова (Слика 15). Код ојачања греда треба пре самог поступка извршити надвишење. Код ојачања купола врши се кружно опасивање лепљењем преклопљених крајева трака. Велику примену FRP траке имају код санације носача на мостовима [16]. У извођењу санација на конструкцијама користе се и траке састављене од влакана израђених и од других високоиздржљивих материјала. Експериментално је утврђено да траке од карбонских полимера CFRP имају већу носивост од трака израђених од стаклених полимера GFRP и арамидних полимера AFRP [21].



**Слика 15.** Поступак примене FRP трака на ојачању разних врста конструктивних елемената [12]

Производња композитних трака врши се машинским путем, процесом који се назива *пултрација (pultrusion)*. У процесу производње трака, танка влакна се затежу по дужини и смештају у калупе. Преко њих се улива компонента од епоксидне смоле у течном стању, а затим се врши пресовање. Производња FRP трака се одвија континуално. Формиране траке умотавају се у котуре. Добијене FRP траке су уједначене дебљине 1-2mm, ширине 2-20cm. Носећа влакана од којих су траке састављене чине веома издржљиви пластични полимери који могу бити од карбона, стакла, арамида-кевлара и др. Носивост траке при ојачању носача зависи првенствено од правца пружања влакана и тада се постиже њихова потпуна искоришћеност.

У другим правцима носивост траке зависи од угла деловања силе у односу на правац пружања влакана и зависи од носивости епоксидне смоле па је знатно мања. На еластичност траке поред концентрације влакана у пресеку утиче и квалитет епоксидне смоле. FRP траке су показала у експериментима још једну значајну карактеристику. У случају да се оствари добар спој траке са насачем, добија се и знатна чврстоћа на притисак, нарочито код кратких елемената, када се не узима у обзир извијање.

Поступак ојачања носача подразумева монолитну везу између FRP траке и носача, која се остварује најчешће лепљењем или механичким спојним средствима. Да би носивост оствареног ојачања била потпуно искоришћена, веза мора да задовољи два услова. Прво, подлога која је део носача за коју се лепи трака треба да је идеално равна и довољно отпорна на затезање (чупање). Лепило после наношења треба да попуни поре материјала и оствари потребну адхезију која се испитује „pull off“ уређајем. Уколико се овом методом постигне сила затезања преко 15MPa, онда је задовољен први услов. Други услов се односи на појаву лома носача који не сме да се догоди на местима лепљења. Ово се постиже тако што се пре коришћења одабраног лепила испитује његова отпорност на смицање. Овај поступак је потребно извести на најмање три узорка изложених смицању. Ако се они оптерећују до граничног стања носивости, а на њима не дође до лома на местима лепљења, онда је задовољен и други услов.

Да би се добили поуздани резултати приликом експериментисања потребно је квалитетно израдити узорке и поуздано извршити ојачања. Припрема за ојачање узорака изводи се поступно. Прво се мешањем компоненти справља лепило према упутству произвођача. Затим се помоћу алатке врши наношење лепила на све површине које се спајају. Приликом справљања и наношења лепила обавезно је коришћење заштитних рукавица и повеза за нос. Сједињавањем компоненти лепила развија се јак мирис који изазива сметње у раду. Лепило у року од сат времена очвршћава, па је одмах по извршеном послу потребно очистити кожу, одело и алат уколико су остали трагови лепила на њима. После очвршћавања лепило је немогуће хемијски уклонити.

### 2.2.3.1 Заштита FRP трака

За греде ојачане FRP тракама максимална дозвољена температура експлоатације је до +50 °C. Када се користе заштите Sika® CarboHeater, заједно са Sikadur®-om 30LP, онда се отпорност на температуру може повећати до максимално +80 °C.

Ако се захтева већа противпожарна отпорност, Sika® CarboDur® траке могу се заштитити ватроотпорним материјалом у виду обложних ватроотпорних плоча или заштитних слојева.

После ојачања узорака потребно је извршити контролу постављених FRP трака на споју изведеним лепилом Sikadur®-30. Провера се врши у циљу откривања шупљина у слоју лепка које би смањиле силу пријањања. Најједноставнија је проба куцкањем по површини траке чекићем, или ако се захтева већа поузданост, тада се врши снимање пресека споја помоћу импулсне термографије [48].

У затвореним просторима ојачане површине носача могу бити само обојене или премазане материјалима као што је Sikagard®-550W Elastic или Sikagard®-ElastoColor W. На овај начин се образује заштитни слој који је отпоран на механички удар и утицај од хемијски агресивне средине.

### 2.3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

#### 2.3.1. Израда и димензије узорака

Узорци за испитивање израђени су према „FLAH-KANT“ препоруци, где је распон носача апроксимативно 15 пута већи у односу на висину носача, а оптерећени су са две једнаке концентрисане силе које изазивају савијање [19]. За потребе испитивања израђено је девет узорака, носача који су сврстани у три серије у зависности од геометрије попречног пресека (Слика 1). Узорци су дрвене лепљене ламелиране греде које су израђене у радионицама Д.О.О. „Пирамида“ у Сремској Митровици и приказане су три фазе израде узорака на фотографијама (Слике 16, 17 и 18). Греде за испитивање су формиране од ламеладасака које су испоручене од фирме „ММ Holz Leoben“, и декларисане као дрво European whitewood „НТ“, квалитета LBB. За формирање узорака одабране се суве даске-ламеле, дебљине 40mm и дужине око 4,0m. Свака од њих пролази кроз уређај за подужно спајање где се образује зупчаста веза. Тако настаје континуална ламела која иде у процес обраде, на уређају за рендисање, где се постиже дебљина од 32mm. У даљем ланчаном поступку производње носача наноси се обострано лепак на површину ламела машинским путем у уједначеном слоју. Ламеле се транспортују у просторију за пресовање, полажу се на писту где се формира облик носача. Приликом њиховог спајања ламела потребно је водити рачуна о оријентацији влакана дрвета у пресеку и контролисати дебљине слоја нанетог лепка. Ламеле које се постављају на горњу и доњу ивицу носача немају нанос лепка. Слојевити носач који је састављен од ламела представља „пакет“ који се утеже металним стегама силом од најмање 0,50MP, постављеним на растојању од 30-40 cm. Сила којим се узорак стеже не сме да изазове гњечење влакана дрвене ламеле, али је потребно да истисне вишак лепила. После 24 часа пресовања, узорак је слепљен и између ламела је остварена чврста веза.



Када се стеге одстране, носач се преноси у погон где се наставља процес завршне обраде дрвета. У том процесу се врши обликовање носача резањем на тачно пројектоване димензије, а са ивица рендисањем се одстрањују очврсле грануле лепка и формирају се равне спољашње површине [42].

Могућности преса су прилагођене и за формирање великих пресека ламелираних лепљених носача, који су и великих распона. Код израде узорка за ово истраживање само је мањи део уређаја за пресовање био искоришћен, тако да је у једном пресовању формирано по три узорка ( Слика 16).



**Слика 16.** Израда узорка, лепљење ламела на писти помоћу механичких стега

### 2.3.2. Поступак ојачања узорка

Поступак ојачања дрвених лепљених ламелираних носача подразумева следеће фазе:

- Припреме дрвене греде (мерење влаге, равнање површине, чишћење и „pull-off“ тест);
- Припреме FRP траке (чишћење, сечење, исправљање и привремено фиксирање);
- Лепљење FRP траке је приказано на слици 17. Састоји се од наношење епоксидног лепка у слоју од 3,0mm на траку и на подлогу специјалним алатом. За сваку ширину траке користи се метални шаблон за уношење лепка који обезбеђује да се нанети слој не расипа. Уједначено налегање спојних површина, истискивањем ваздуха и вишка лепка ради се гуменим ваљком (Слика 17).
- Накнадно пресовање додавањем доње ламеле помоћу ручних стега приказано је на слици 18. То се односи само на вертикално изведена ојачања која су вршена на два узорка бр. 13 и бр. 14. У овим случајевима је једна дрвена ламела лепљењем придодата носачу који је раније формиран. На тај начин су накнадно додате доње ламеле код узорка бр. 11, испод изведеног ојачања и код узорка бр. 30, где је доња ламела нешто шира.



Слика 17. Ојачање узорка, лепљење FRP траке на доњој ламели



Слика 18. Израда модела, ручне стеге за накнадно лепљење доње ламеле

### 2.3.3. ПРЕТХОДНА ИСПИТИВАЊА

#### 2.3.3.1. Испитивање адхезије подлоге

Ојачање композитима може се применити само на подлоге које су израђене од компактног материјала довољне чврстоће. Код бетона та чврстоћа зависи од квалитета бетона (МВ), а код дрвета од врсте и класе дрвета. Површина на коју се поставља ојачање треба да је глатка, са неравнинама од највише  $\pm 1\text{mm}$ , без флека од масноћа и без остатака лепила.

Други битан фактор за адхезију јесте квалитет лепила који треба да обезбеди што већу силу затезања између дрвене ламеле и траке за ојачање. Да би се обезбедила сила пријањања за подлогу, лепак треба да има такву вискозност да продре у поре дрвета.

Пре наношења ојачања на узорке прво је обављен визуелни преглед површина које се спајају. Када је установљено да је квалитет дрвета у том смислу задовољавајући, изведено је испитивање исправности подлоге за спајање. Експеримент је изведен на узорцима дрвета помоћу теста на „чупање“ (**Pull off adhesion testing**). Узорци су формирани од дасака-ламела које су добијене скраћивањем ламела. На површину узорка је залепљен кружни клип уређаја за чупање са лепилом за FRP траке. Помоћу уређаја приказаног на слици 19, мерена је сила затезања-атхезије.



Слика 19. Уређај за мерење силе атхезије лепила и пологе узорка

При тесту су коришћени:

Везиво, лепило: Sikadur®-30, двокомпонентални, епоксидни лепак;

Подлога, дрво: European whitewood „HT“, тип LS и LBB, произвођач: Mayer-Merinhof Holz

Leoben GmbH, Austria, влажност дрвета: 0%, температура у просторији: 25°C

Уређај којим је извршено мерење је типа: DYNA proceq (Слика 19).



Слика 20. Испитивани отисци „pull off“ методом

Резултати испитивања добијени „pull off“ методом приказани су на слици 20 где су дате вредности сила затезања које су изазвале лом по лепилу. У сва три случаја ова сила је достигла вредност већу од минималне која износи  $1,50 \text{ N/mm}^2$ . Нумеричке вредности које су измерене при овом испитивању са описом лома приказане су у табели 5. Разлог због којег је узорак S-2 имао мању вредност, јесте траг нечистоће на површини узорка.

Табела 5. Преглед резултата мерења силе адхезије за подлогу

Ознака тела	Старост везе(дана)	Опис лома	Сила затезања ( $\text{N/mm}^2$ )	Средња вредност силе затезања ( $\text{N/mm}^2$ )
S-1	385	3/4 круга	2,28	2,33
S-2	385	Пун круг	1,75	
S-3	385	3/4 круга	2,96	

### 2.3.3.2. Испитивање лепила за спајање дрвених ламела

Произвођач лепљених ламелираних конструкција користи квалитетна увозна лепила. Поред тога што су ова лепила испитана у земљи из које долазе, урађени су и домаћи атести [51]. При формирању модела, за спајање дрвених ламела коришћене су две врсте лепила:

а. увозно лепило произвођача BASF Aktiengesellschaft, Kauramin® Leim 681 flussig mit Kauramin Harter 686 flussig im Holzeimbau; атестирано од стране Turmerleim GmbH, 67061 Ludwigshafen, Amulfstrasse 43, april 1998. и

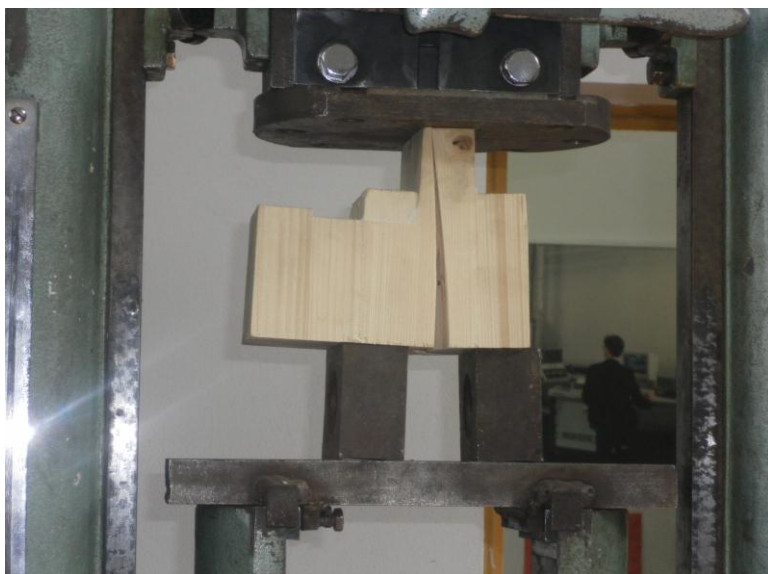
б. лепило шведског произвођача Casco Adhesives AB, SE-10061 Sttockolm, Sweden, naziv: MELAMINE-UREA ADHESIVE 1247 HARDENER 2526.

Поред доступних страних и домаћих атеста за квалитет лепила, за потребе овог истраживања извршено је пробно испитивање лепила на смицање на три узорка. Дрвени узорци за испитивање су кратке ламеле које су узете непосредно од дрвених ламела када ја вршено њихово скраћење. Ламеле су међусобно слепљене BASF лепилом. Испитивање је изведено у лабораторији за испитивање материјала ФТН-а, Департмана за производно машинство. Уређај за испитивање на смицања је механичка преса код које се врши поступно уношење силе уз мерење померања и цртање дијаграма који то стање описује ( Слика 21).



Слика 21. Преса за испитивање силе смицања са уређајем за цртање радног дијаграма

У поступку испитивања узорак је вршено уношење вертикалне сила која је притискала ламелу у правцу пружања влакана дрвета. Сила се даље преноси на везу између ламела, остварену лепилом и изазива смицање у вези. Испитивањем је утврђена велика отпорност на смицање везе, а лом је настао кроз дрво, што је и видљиво са фотографије (Слика 22). Сила притиска која је изазвала лом код свих посматраних узорак кретала се у интервалу од 24,40 до 25,00kN.



**Слика 22.** Узорак у тренутку лома

#### 2.3.3.3. Карактеристике FRP трака

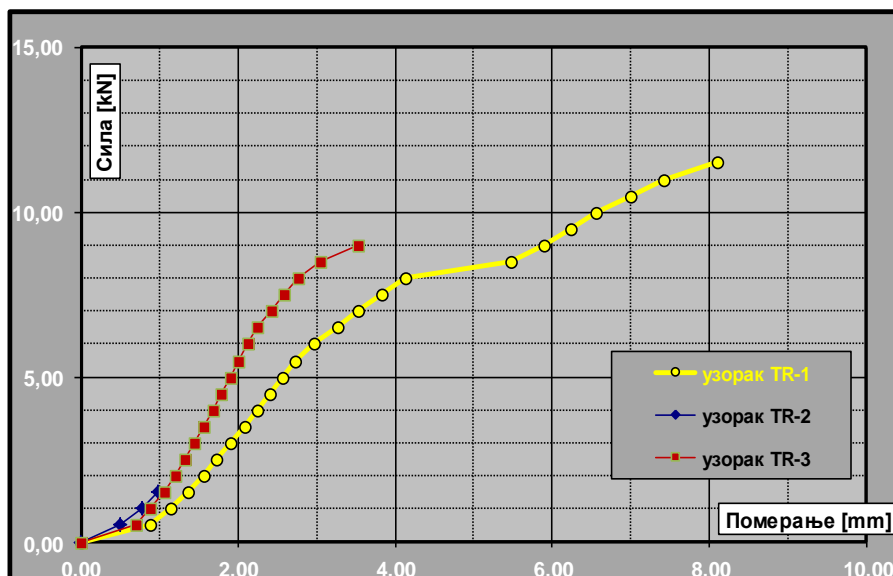
Карбонске FRP траке које су коришћене за ојачање дрвених лепљених ламелираних греда испоручила је „SIKA“. При ојачању узорак примењени су типови карбонских FRP трака S и M, које се разликују по носивости (Табела 4, Слика 14 ). Њихове ознаке су: Sika®CarboDur®S512, Sika®CarboDur®S1012 и Sika®CarboDur®M1214. Прве две врсте трака типа S, разликују се по ширини, а тип M се разликује од њих по квалитету, ширини и дебљини. Испорука FRP трака је извршена у котуровима. Потребно их је неко време држати исправљене како не би на њима остале деформације настале услед савијања. Скраћење трака врши се алатом за сечење метала, а приликом сечења се ствара црни прах са оштрим танким нитима, па је неопходно при раду користити заштитна средства. Површине FRP трака се пре наносења лепила морају очистити меком крпом натопљеном средством Sika®Colma Cleaner-ом. Код узорак бр. 13 и бр. 14 у првој серији, који се вертикално ојачавају, коришћена је једна FRP трака типа Sika®CarboDur®S1012, која је по висини подељена на три траке ширине 32mm, што одговара дебљини дрвене ламеле.

2.3.3.4. Испитивање лепила за повезивање FRP траке и дрвене ламеле

Ојачање модела се изводи лепљењем карбонских FRP трака на носач уз коришћење двокомпонентног епоксидног лепка Sikadur-30. Узорци за потребе овог истраживања израђени су од две слеplјене дрвене ламеле, које су истог квалитета као и ламеле од којих су изведени и носачи. Димензија узорака су 30x10x3,5cm. Лепак је нанет са обе стране карбонске траке типа Sika®CarboDur®S1012 и на површину ламела. Ламеле су подужно смакнуте за 5,0cm у односу на осу у којој делује сила. Управно на спој између ламела и карбонске траке извршен је притисак на везу. Узорци су испитивани у лабораторију за испитивање материјала ФТН-а, Департмана за производно машинство. Апаратура за испитивање је преса помоћу које се уноси и читава сила притиска, односно сила која изазива смицање. Померање ламеле услед наношења силе читавано је механичким угибомером (Слика 24). На основу отпорности на смицање одређује се дужина сидрења карбонских FRP трака, што је опсежније дато у раду [3].

**Табела 6.** Резултати мерених померања на испитиваим узорацима

Сила[kN]	0	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	
Издужење узорка у mm	TR1	0	0.88	1.13	1.36	1.57	1.73	1.90	2.09	2.24	2.40	2.56	2.73	2.97	3.25
	TR2	0	0.49	0.49	0.78	0.97	Одвајање траке од ламеле на месту уноса силе. Узорак се у том тренутку лом								
	TR3	0	0.70	0.87	1.06	1.20	1.33	1.45	1.57	1.68	1.78	1.90	2.01	2.12	2.25
Сила[kN]	7,0	7,5	8,00	8,50	9,00	9,50	10,0	10,5	11,0	11,5	лом по дрвету.				
Издужење узорка у mm	TR1	3.52	3.82	4.13	5.48	5.90	6.24	6.56	7.00	7.42	8.50				
	TR2	неравномерно гњечење површина налегања изазива скраћење дрвеног узорка, док карбонска трака прима оптерећење и долази до локалног зацепљења дрвене ламеле													
	TR3	2.43	2.58	2.76	3.04	3.53	лом по дрвету, паралелно са везом између ламела								



**Слика 23.**

Графички приказ резултата мерења

За потребе овог рада приказаним поступком је испитивано смицање на три означена узорка: TR-1, TR-2 и TR-3, а резултати су приказани у табели 6 и у виду дијаграма који је дат на слици 23. Запажено је да FRP трака има значајну отпорност и на притисак уколико је дужина споја мала, и уколико се не узима утицај извијања.

У огледу је дужина дрвоног узорка већа од траке, па се при уносу вертикалне силе она дели на две компоненте. Део силе која се преноси на дрвену ламелу изазива смицање, односно померање везе, а други део силе који делује на карбонску FRP траку делује као аксијални притисак. Код првог узорка TR-1, целокупна сила притиска пренела се на дрвену ламелу где је измерена максимална вредност од 11,5kN. Приликом поступног наношења силе мерена су померања све до појаве лома по дрвету. Код друга два узорка TR-2 и TR-3, вертикална сила притиска се преноси на карбонску FRP траку која на малој дужини и због везе са дрвеном ламелом има значајну крутост. Због тога се лом раније догодио у виду зацепљења дрвене ламеле у доњој зони (Слика 25). То наводи на закључак да лепак има добру отпорност на силу смицања, јер се увек догађао лом по дрвету. Слични огледи су вршени и са уносом силе затезања управно на везу, односно на развлачење две залепљене ламеле [9] [72].



Слика 24. Преса при оптерећењу узорка



Слика 25. Зацепљење дрвене ламеле

#### 2.3.3.5. Одређивање модула еластичности дрвета

Битан података код срачунавања рачунског модел носача јесте унос модула еластичности за дрво. Он је у овом раду одређен помоћу два узорка на ламелама означеним са G1 и G2, од којих су сачињене греда. Стандардно испитивање врши се на простој греди оптерећеној на савијање и оно је изведено у лабораторији за испитивање материјала ФТН-а, Департмана за производно машинство са апаратуром за уношење и мерење силе која изазива

савијање узорка (Слика 26). Дужина узорка за испитивање је 80cm, а распон између ослонаца је 70cm, са препустом код оба ослонаца од 5,0cm. Са овим препустима се остварује равномерно налегање на подлогу носача (систем просте греде). На исти начин, коришћењем подметача, решен је и унос концентрисане силе. У експерименту је уношено краткотрајно оптерећења, поступно у кораку од 100kN, мерени су угиби греде у средини распона све док сила није изазвала лом дрвене ламеле (Табела 7). Описан поступак испитивања је стандардизован [77], али је током временом допуњен и унапређен за примену пуног и ламинатног дрвета [36].



Слика 26. Уређај за савијање дрвеног узорка

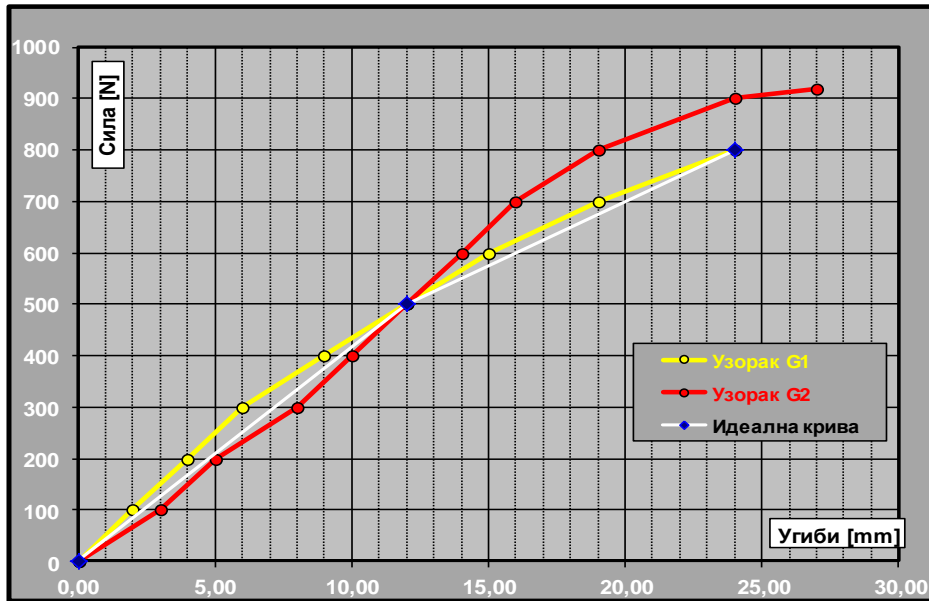
Приликом анализе испитивања запажа се да је код узорка G1 лом настао на средини распона носача у доњем влакну при мањој сили. У другом случају на узорку G2, да би се спречило гњечење влакана дрвета на месту уноса силе и код ослонаца постављене су металне плочице. То је допринело да греда пре лома прими већу силу, али су и угиби већи. Подаци овог испитивања су дати у табели 7, и презентовани дијаграмима (Слика 27).

Табела 7. Резултати испитивања два узорка, система простих греда оптерећених на савијање

Сила [N]		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	920
Угиб у средини распона узорка у mm	G-1	0.00	2.00	4.00	6.00	9.00	12.0	15.0	19.0	24.0		
	G-2	0.00	3.00	5.00	8.00	10.0	12.0	14.0	16.0	19.0	24.0	27.0

Приказани резултати мерења су послужили за добијање стварног модула еласичности. За анализу понашања модула еластичности посматран је дијаграм у еластичној области где се може применити теорија еластичности и Хуковог закона, да су *напони пропорционални дилатацијама*.





Слика 27. Дијаграми за однос сила/померање, добијени на основу табеле 7

На основу израза за угиб греде правоугаоног попречног пресека оптерећене концентрисаном силом у средини распона, срачунат је модул еластичности за дрво [17].

$$f = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot J} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$E = \frac{4 \cdot P \cdot l^3}{f \cdot b \cdot h^3} \dots\dots\dots(2.4)$$

Из дијаграма ( Слика 27) су за анализу узете две тачке на криви у еластичној области:

**Тачка 1.** Сила  $P=400\text{N}$ , угиб  $f=10\text{mm}$ , геометрија носача:  $l=700\text{mm}$ ,  $b=100\text{mm}$ ,  $h=32\text{mm}$ ,

$$E_1 = \frac{4 \cdot 400 \cdot 700^3}{10 \cdot 100 \cdot 32^3} = 16.748 \text{ N/mm}^2 = 1,67 \text{ kN/mm}^2$$

**Тачка 2.** Сила  $P=800\text{N}$ , угиб  $f=20\text{mm}$ , геометрија носача:  $l=700\text{mm}$ ,  $b=100\text{mm}$ ,  $h=32\text{mm}$ ,

$$E_2 = \frac{4 \cdot 800 \cdot 700^3}{20 \cdot 100 \cdot 32^3} = 16.748 \text{ N/mm}^2 = 1,67 \text{ kN/mm}^2$$

Како се за различита силе добијају исте вредности модула еластичности, то потврђује линеарно понашање узорка, те се испитиване криве могу заменити једном правом линијом константног нагиба у односу на хоризонталну осу.

### 2.3.4. Испитивање узорка

Претходно извршена испитивања компонента од којих су узорци састављени била су неопходна да би се могло предвидети понашање самог узорка при оптетрећењу. Поред ових припремних радњи, извршене су и рачунске провере у циљу добијања очекиваних резултата,

како би се одабрала опрема за испитивање и направио план испитивања. Рачунске провере су урађене на основу теорије дозвољених напона[76], и односе се на следеће:

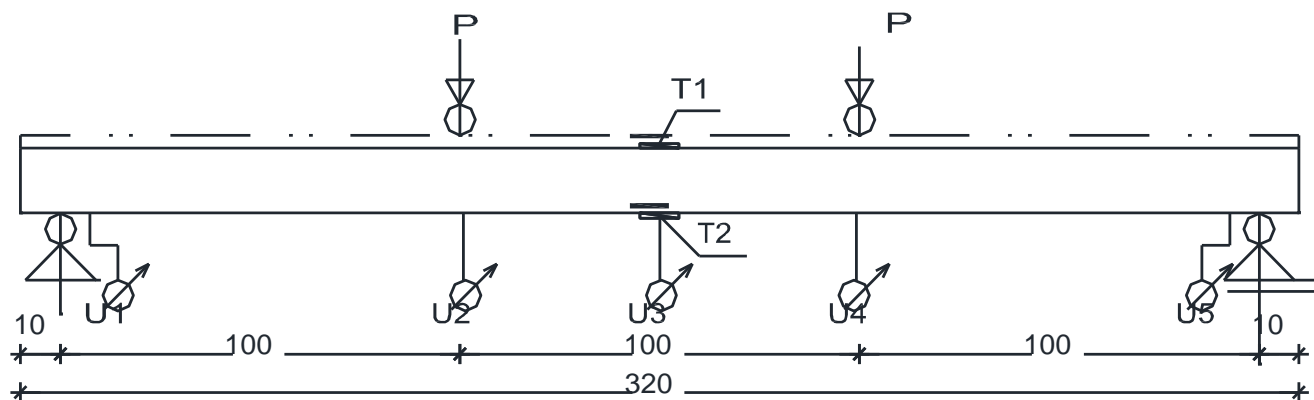
1. Одређивање максималне вредности угиба у средини распона за сваки узорак, при чему је унето садејство дрвених ламела и карбонске траке преко модула еластичности. Прорачун је дат у прилогу А: 6.1.1. и
2. Провера напона на појаву избочавања-увртања дрвених греда. Прорачун је дат је у прилогу А: 6.1.2.

Рачунске вредности угиба на средини распона носача коришћене су за одабир опреме за унос силе и мерење угиба. Сила се уноси помоћу хидрауличне пресе која ће имати померање до 80mm. Тај податак указује да за ово испитивање не одговара опрема која је коришћена за испитивања бетонских греда, где су угиби мањи. Помоћу хидрауличног уређаја се уноси сила, која се помоћу челичне траверзе дели на две једнаке силе које делују на трећине распона носача.

Код дрвених греда за одређене односе геометрије пресека и распона, постоји могућност избочавања. За податке попречног пресека испитиваних узорака и изабраног распона, рачун је показао да до избочавања неће доћи, те не треба радити корекцију напона.

На слици 28 је дат статички систем прости греде узорка, са положајем мерних места. За мерење померања користе се угибомери-компаратери типа А6 TGL7207, произвођача ВЕВ-Немачка. Поред померања сталних пет тачака коришћени су и контролни угибомери У6 и У7. Контролни угибомери су постављени на средини распона и код десног ослонца. Угибомер У3 је постављен тако да региструје померања на средини распона греде, а угибомери У1 и У2 су постављени да мере угибе непосредно код ослонца. Познато је да су код ослонца угиби најмањи, али они су ипак регистровани јер је дошло до појаве гњечења дрвених влакана доње ламеле на контактної површини са ослонцима. Контрола симетричног наносење спољне силе вршена је тако што су мерени угиби испод сила на левом и десном делу греде. Када су они имали приближно исте вредности, онда је био испуњен услов о симетрији оптерећења.

Дилатације су мерене на средини носача на крајњем притиснутом и крајњем затегнутом влакну носача са мерним тракама LY41 20/120, произвођача НВМ, Немачка. Мерне траке су постављене 24 часа пре испитивања лепљењем, и заштићене премазом NG 150. Сва мерења су читавана на вишеканалном мерном мосту типа „UPM60, Hotinger Baldwin Messtechnik“. Подаци о испитивању узорака су презентовани као записници, детаљно у Прилогу Б.



Слика 28. Распоред мерних места на греди-узорку

### 2.3.4.1. ИСПИТИВАЊЕ УЗОРАКА СЕРИЈЕ 1

#### 2.3.4.1.1 УЗОРАК бр. 10



Слика 29. Почетна фаза испитивања узорка бр. 10



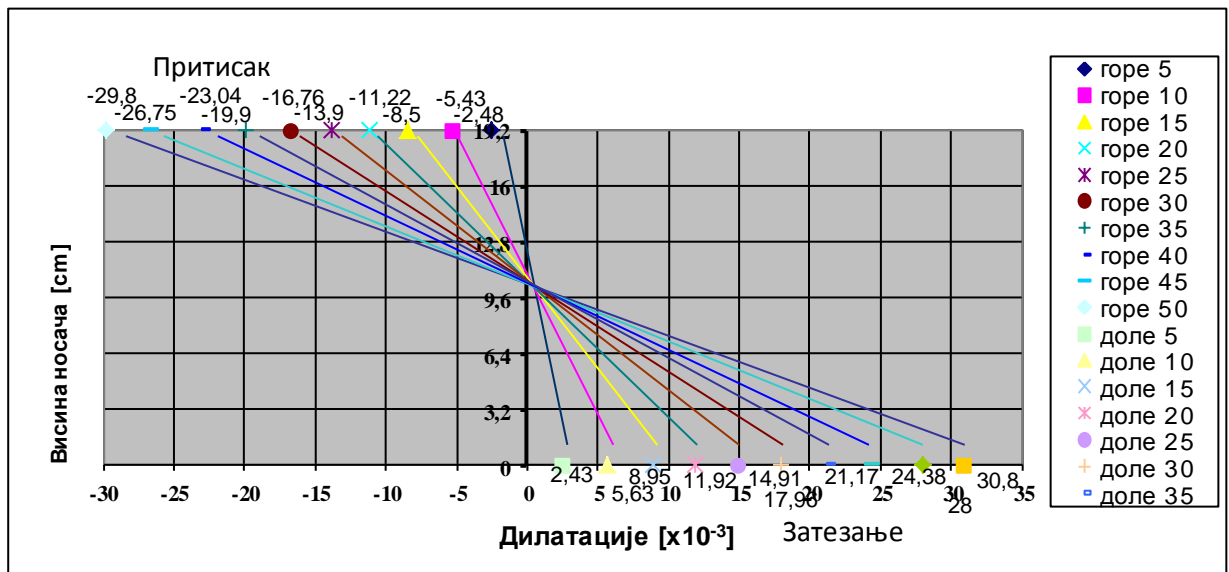
Слика 30. Почетна закривљеност пресека



Слика 31. Детаљ ваљкастог ослањања узорка

У оквиру испитивања узорка бр. 10, вршено је оптерећење греде приказано на слици 29, и том приликом регистрована су мерења угиба и дилатација. Ови подаци су приказани у записнику (Табела 11). Детаљи ослањања носача приказани су на слици 30 и слици 31.

Испитивања су обухватила четири мерења. Прва три мерења су контролисала понашања греде и мерне опреме. Вредности унетих сила су изазивале деформацију носача у еластичној области. После растерећења, праћено је враћање угиба и дилатација на нулто стање. Сва мерења су послужила за даљу анализу и приказ резултата мерених дилатација по висини носача (Слика 32), што је поступак који је рађен и код истраживања [13].



Слика 32. Вредности дилатација у поперечном пресеку, на средини распона узорка бр. 10

### 2.3.4.1.2. УЗОРАК бр. 11



Слика 33. Почетна фаза испитивања узорка бр. 11

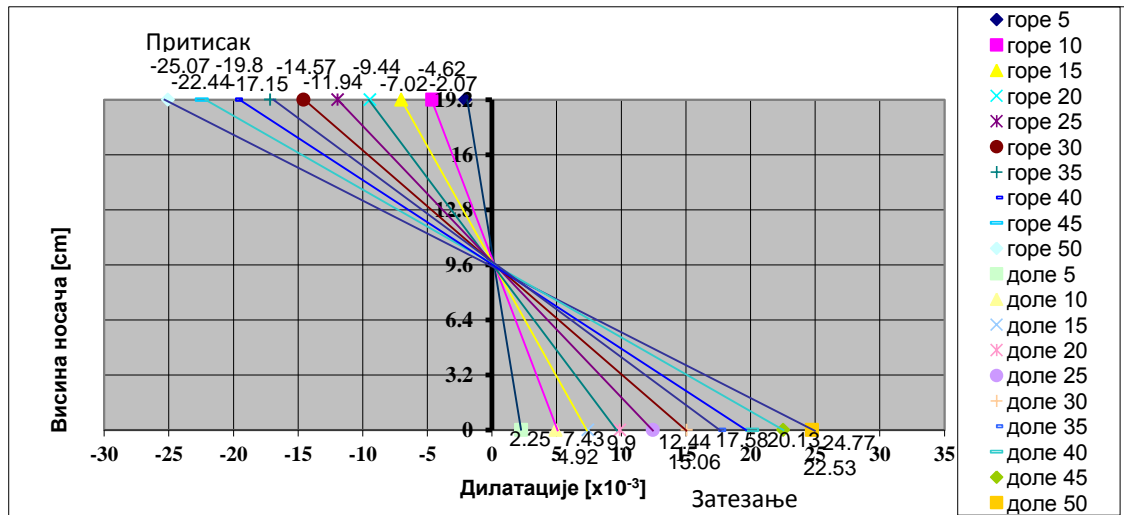
У оквиру испитивања узорка бр. 11, вршено је оптерећење носача приказаног на слици 33, и том приликом регистрована су мерења угиба и дилатација. Ови подаци су приказани у записнику (Табела 12). Детаљи пре оптерећења узорка приказани су на слици 34 и слици 35.



Слика 34. Пукотина на горњој ламели пре испитивања

Слика 35. Почетна нагнутост пресека носача

Испитивање узорка бр. 11 је обухватило једно мерење. Вредности унетих сила су изазивале угибе и дилатације носача у еластичној области. После растерећења праћено је враћање угиба и дилатација на нулто стање. Мерења мерним тракама постављеним на горњој и доњој ивици узорка су послужила за приказ вредности дилатација по висини носача (Слика 36).



Слика 36. Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона узорка бр. 11

2.3.4.1.3 УЗОРАК бр. 12



Слика 37. Почетна фаза испитивања узорка бр. 12

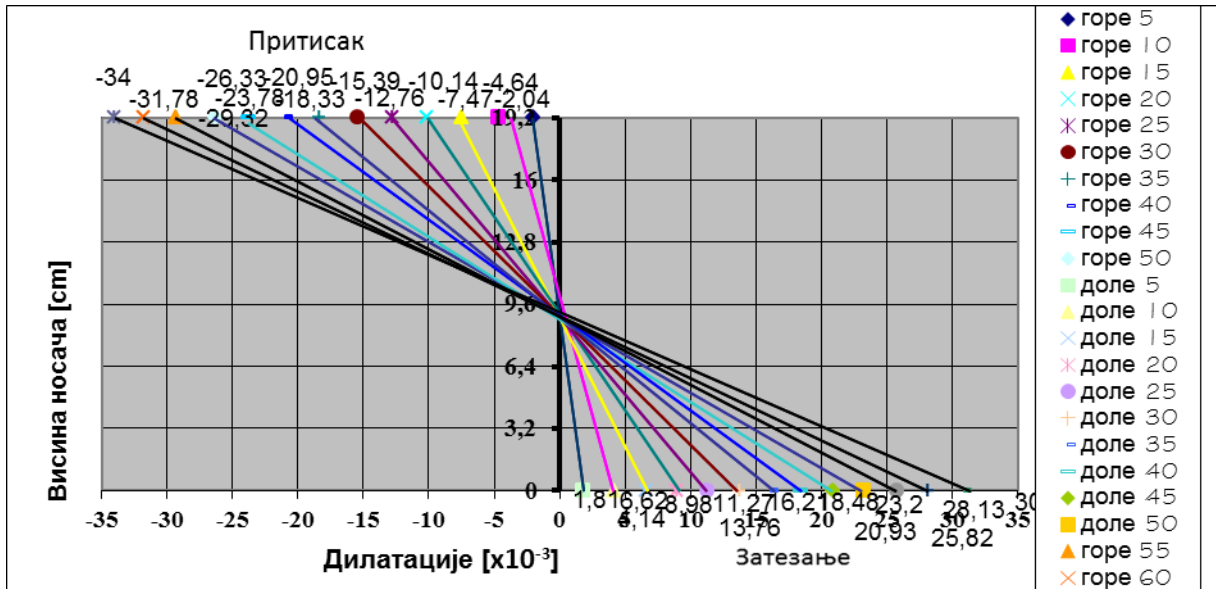
У оквиру испитивања узорка бр. 12, вршено је оптерећење носача приказаног на слици 37, и регистрована су мерења угиба и дилатација. Ови подаци су приказани у записнику (Табела 13). Детаљи деформација носача где се могу запазити слабљења и накнадно спојена ламела приказани су на слици 38 и слици 39.



Слика 38. Чвор као слабљење у средњој ламели

Слика 39. Накнадно спојена ламела за носач

Испитивање узорка бр. 12 је обухватило два мерења. Вредности унетих сила су изазивале деформацију носача у еластичној области. После растеређења праћено је враћање угиба и дилатација и напона на нулто стање. Мерења извршена мерним тракама постављеним на горњој и доњој ивици носача послужила су за приказ резултата дилатација по висини носача (Слика 40).



Слика 40. Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона узорка бр. 12

#### 2.3.4.1.4. УЗОРАК бр. 13

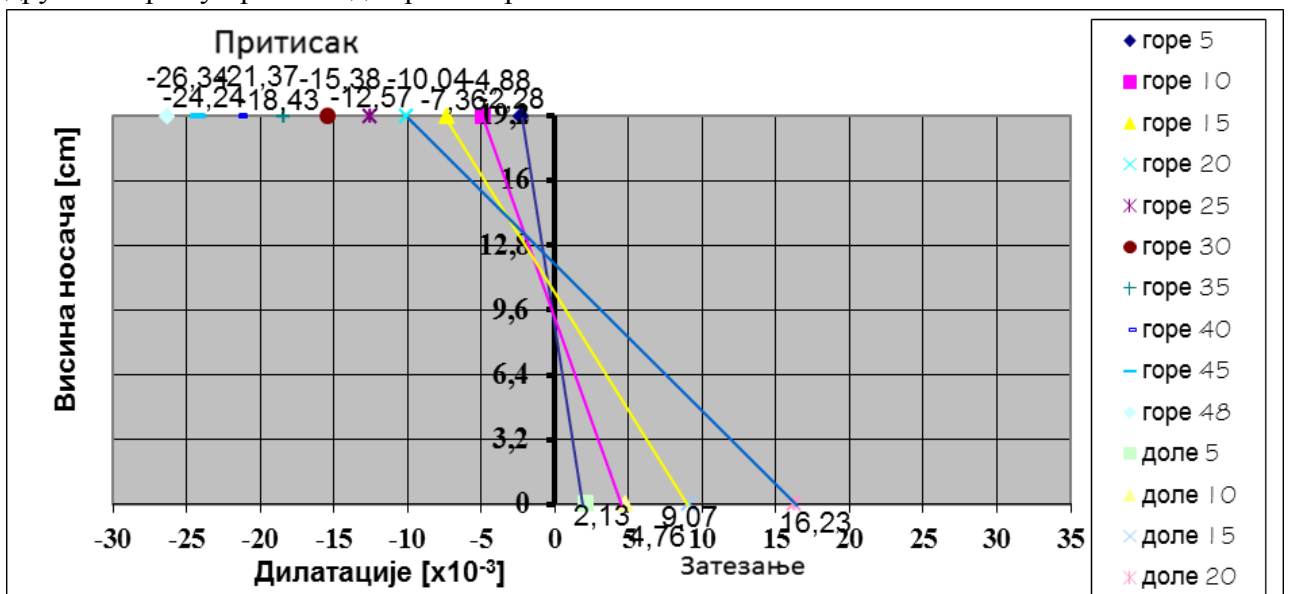


Слика 41. Почетна фаза испитивања узорка бр. 13

У оквиру испитивања узорка бр. 13, вршено је оптерећење носача приказаног на слици 41, и том приликом регистрована су мерења угиба и дилатација. Ови подаци су приказани у записнику (Табела 14). Детаљи израде носача где се могу запазити слабљење попречног пресека услед пукотина и накнадно спојена ламела, приказани су на слици 42 и слици 43.



**Слика 42.** Слабљење носача код ослонаца **Слика 43.** Накнадно додата ламела са FRP тракама  
Испитивање узорка бр. 13 је обухватило два мерења. Вредности унетих сила су изазивале деформацију носача у еластичној области. После растеређења праћено је враћање угиба и дилатација на нулто стање. Мерења извршена мерним тракама постављеним на горњој и доњој ивици носача послужила су за приказ резултата дилатација по висини носача (Слика 44). Подаци су регистровани до силе од 20 kN, пошто је горња трака у првом, а доња трака у другом мерењу престала да врши мерење.



**Слика 44.** Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона греде бр. 13



2.3.4.1.5. УЗОРАК бр. 14

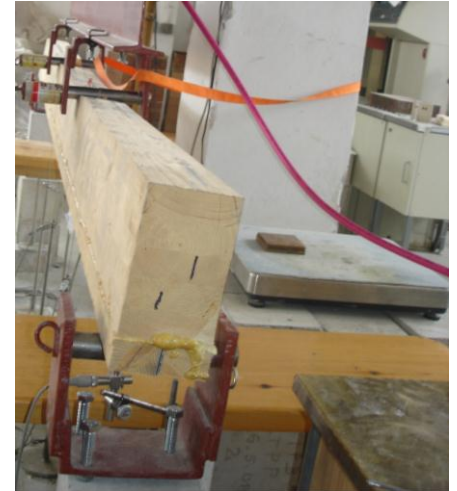


Слика 45. Почетна фаза испитивања, мерење 1, узорка бр. 14



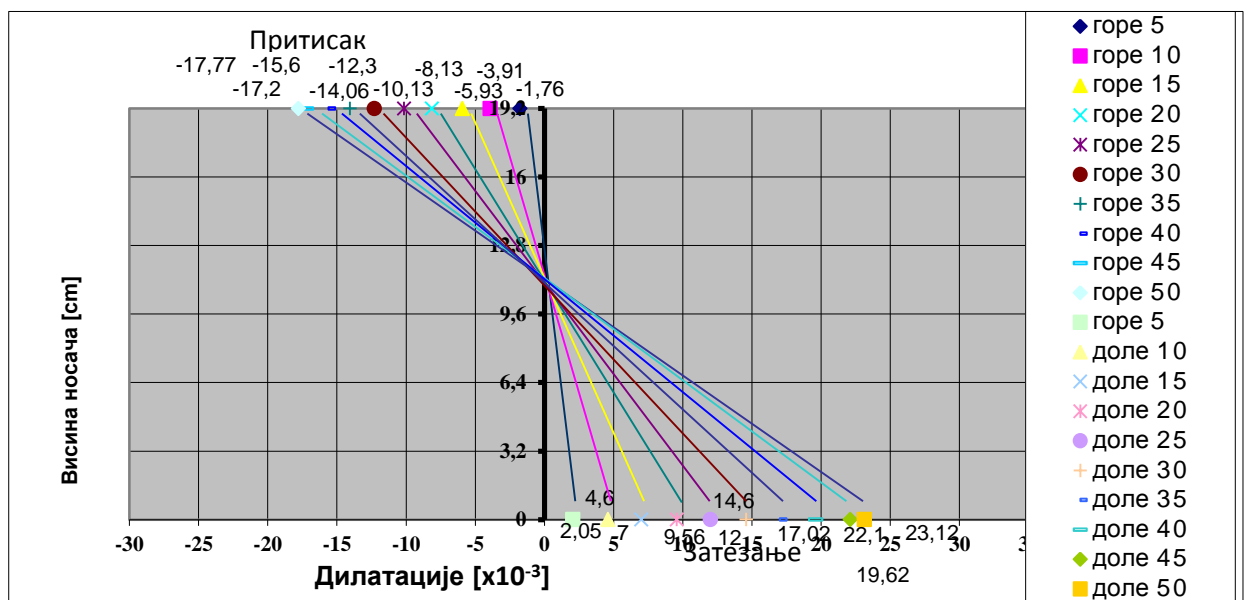
Слика 46. Почетна фаза испитивања, мерење 2, узорка бр. 14

У оквиру испитивања узорка бр. 14, вршено је оптерећење носача и прво мерење је приказано на слици 45. Затим је вршено друго мерење са изменом начина уношења силе, што је приказано на слици 46. Том приликом регистрована су мерења угиба и дилатација. Ови подаци су приказани у записнику (Табела 15). Детаљи деформације носача могу се запазити на FRP траци у вертикалном положају на накнадно спојеној ламели и приказани су на слици 47. Слабљење попречног пресека услед пукотина приказано је на слици 48.



Слика 47. Детал FRP траке на накнадно залепљеној ламели Слика 48. Прслине попречног пресека

Испитивање узорка бр. 14 је обухватило два мерења. Вредности унетих сила су изазивале деформацију носача у еластичној области. После растерећења праћено је враћање угиба и дилатација на нулто стање. Мерења извршена мерним тракама постављеним на горњој и доњој ивици носача су послужила за приказ резултата дилатација по висини носача (Слика 49).



Слика 49. Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона греде бр. 14

### 2.3.4.2 ИСПИТИВАЊЕ УЗОРАКА СЕРИЈЕ 2

#### 2.3.4.2.1 УЗОРАК бр. 20

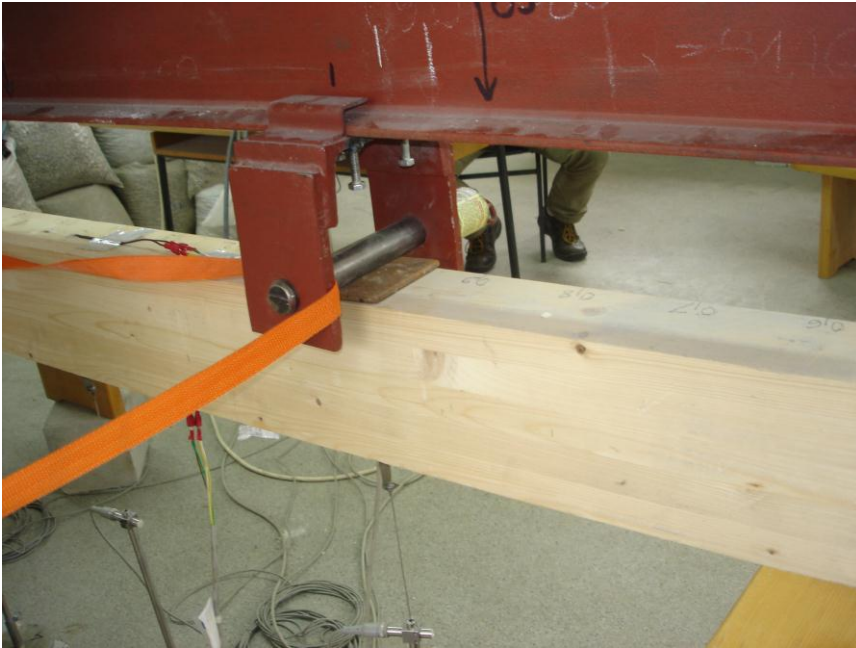


**Слика 50.** Почетна фаза испитивања узорка бр. 20

У оквиру испитивања узорка бр. 20, вршено је оптерећење носача приказаног на слици 50, и том приликом регистрована су мерења угиба и дилатација. Ови подаци су приказани у записнику (Табела 16). Детаљи израде носача где се могу запазити идеално равна налегања греде на ослонцу дати су на слици 51. Постављене мерне траке за мерење дилатација на горњој и доњој ивици попречног пресека на средини распона носача дати су на слици 52. Да би се спречило гњечење дрвених влакана на местима уноса сила постављају се челичне плочице – подметачи, што се види на слици 53.

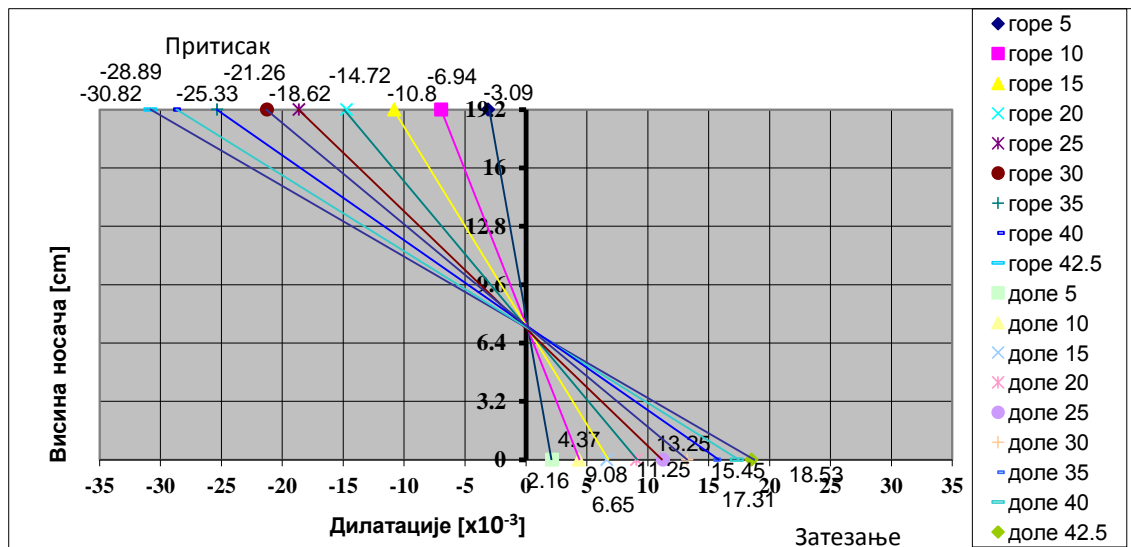


**Слика 51.** Идеално равно налегање    **Слика 52.** Положај постављених мерних трака на греди



Слика 53. Челична плочица као подметач, који спречава гњечење дрвених влакана

Испитивање узорка бр. 20 обухватило је једно мерење. Вредности унетих сила изазивале су деформацију носача у еластичној области. После растерећења праћено је враћање угиба и дилатација на нулто стање. Мерења извршена мерним тракама постављеним на горњој и доњој ивици носача послужила су за приказ резултата дилатација по висини носача (Слика 54).



Слика 54. Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона греде бр. 20

2.3.4.2.2 УЗОРАК бр. 21



**Слика 55.** Почетна фаза испитивања, мерење 1, узорка бр. 21



**Слика 56.** Почетна фаза испитивања, мерење 2, узорка бр. 21

У оквиру испитивања узорка бр. 21, вршено је оптерећење носача и прво мерење је приказано на слици 55. Затим су вршена и следећа три мерења са измењеним механизмом за уношења силе, што је приказано на слици 56. Том приликом регистрована су мерења угиба и дилатација. Ови подаци су приказани у записнику (Табела 17). Уношење сила и њихово преношење на ослонце вршено је помоћу челичних ваљака, што је приказано на слици 58. У оновљеним мерењима, да би се спречило гњечење влакана, на овим местима су постављане челичне плочице, што је приказано на слици 57. Због отказивања мерне траке у притиснутој ивици током мерења, није дат дијаграм дилатација у попречном пресеку.



Слика 57. Унос силе преко челичних подметача Слика 58. Челични ваљци на месту уноса сила

### 2.3.4.2.3. УЗОРАК бр. 22



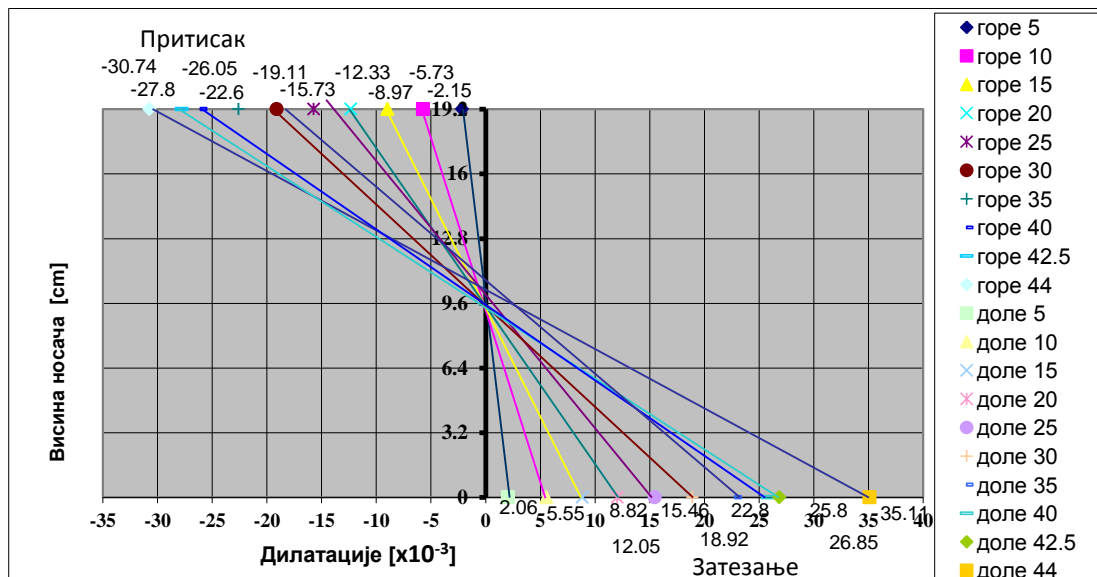
Слика 59. Почетна фаза испитивања узорка бр. 22

У оквиру испитивања узорка бр. 22, вршено је оптерећење носача приказано на слици 59, и том приликом регистрована су мерења угиба и дилатација. Ови подаци су приказани у записнику (Табела 18). У другом мерењу је сила уношена помоћу друге хидрауличне пресе, што је приказано на слици 60. Поред тога дат је детаљ постављања мерних трака на горњој и доњој ивици попречног пресека на средини распона носача и траверза (челични носач) за унос две силе на узорак, што је приказано на слици 61.



Слика 60. Унос силе хидрауличном пресом Слика 61. Мерне траке са лењиром на средини распона

Испитивање узорка бр. 22 обухватило је два мерења. Вредности унетих сила изазивале су деформацију носача у еластичној области. После растерећења праћено је враћање угиба и дилатација на нулто стање. Мерења извршена мерним тракама постављеним на горњој и доњој ивици носача послужила су за приказ резултата дилатација по висини носача (Слика 62).



Слика 62. Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона греде бр. 22

### 2.3.4.3. ИСПИТИВАЊЕ УЗОРАКА СЕРИЈЕ 3

#### 2.3.4.3.1 УЗОРАК бр. 31



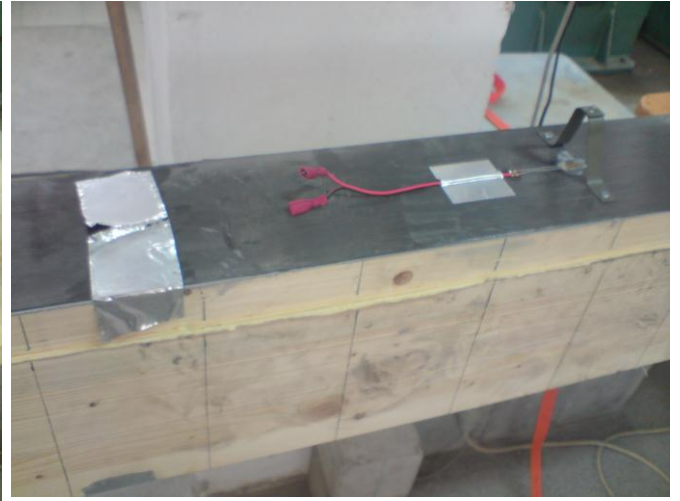
Слика 63. Почетна фаза испитивања, мерење 1, узорка бр. 31



Слика 64. Почетна фаза испитивања, мерење 2, узорка бр. 31

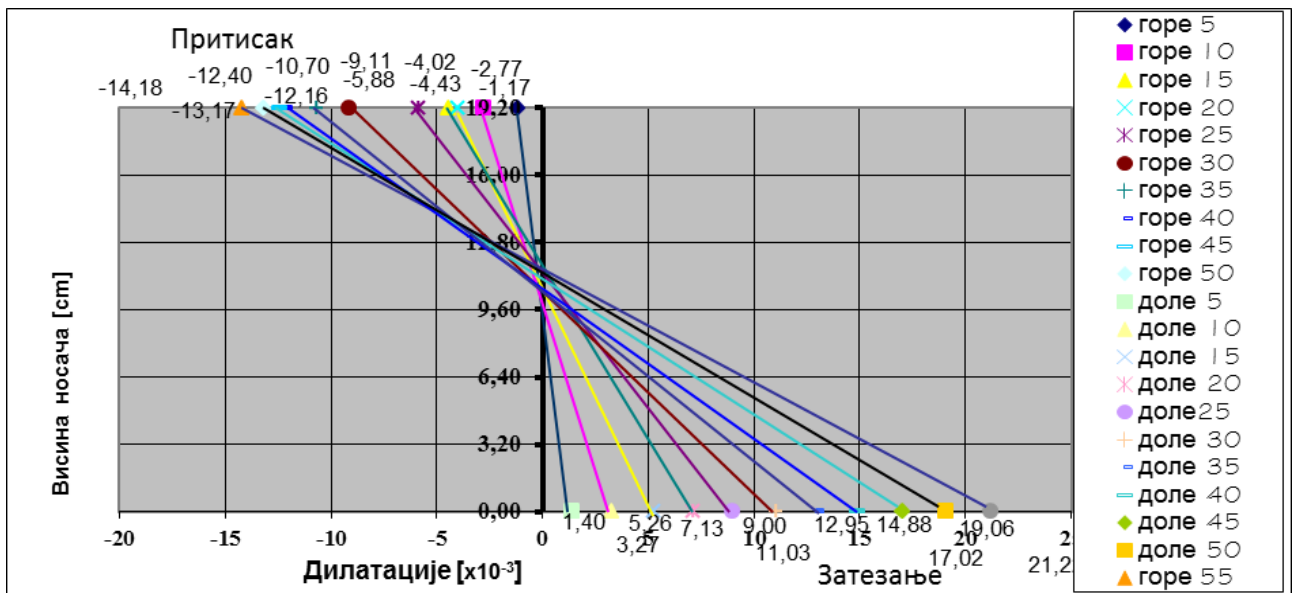
У оквиру испитивања узорка бр. 31, вршено је оптерећење носача, где је прво мерење приказано на слици 63. Затим су вршена и следеће мерење са измењеним механизмом за уношења силе, што је приказано на слици 64. Том приликом регистрована су мерења угиба и напона. Ови подаци су приказани у записнику (Табела 19). На слици 65 и слици 66, дат је детаљ постављања мерних трака на горњој и доњој ивици попречног пресека на средини распона.





Слика 65. Мерна трака на горњој ивици греде    Слика 66. Мерна трака на доњој ивици греде

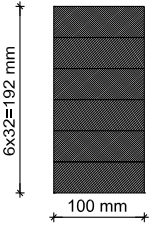
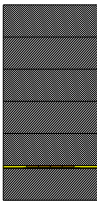
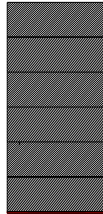
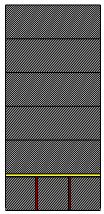
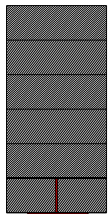
Испитивање узорка бр. 31 обухватило је два мерења. Вредности унетих сила изазивале су деформацију носача у еластичној области. После растерећења праћено је враћање деформација и дилатација на нулто стање. Мерења извршена мерним тракама постављеним на горњој и доњој ивици носача послужила су за приказ резултата дилатација по висини носача (Слика 67).

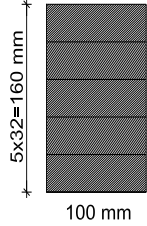
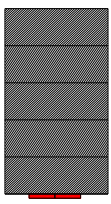
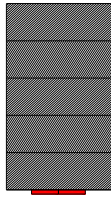
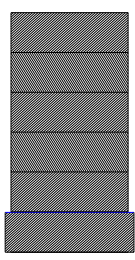
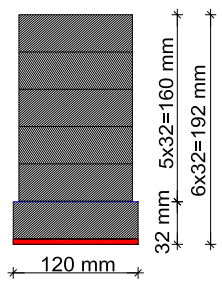


Слика 67. Вредности дилатација у попречном пресеку, на средини распона греде бр. 31

У даљем тексту ће бити дат табеларни приказ испитиваних узорка са начином ојачања (Табела 8), а у поглављу 2.3.4.4. преглед измерених вредности преко радних дијаграма (сила/дилатација).

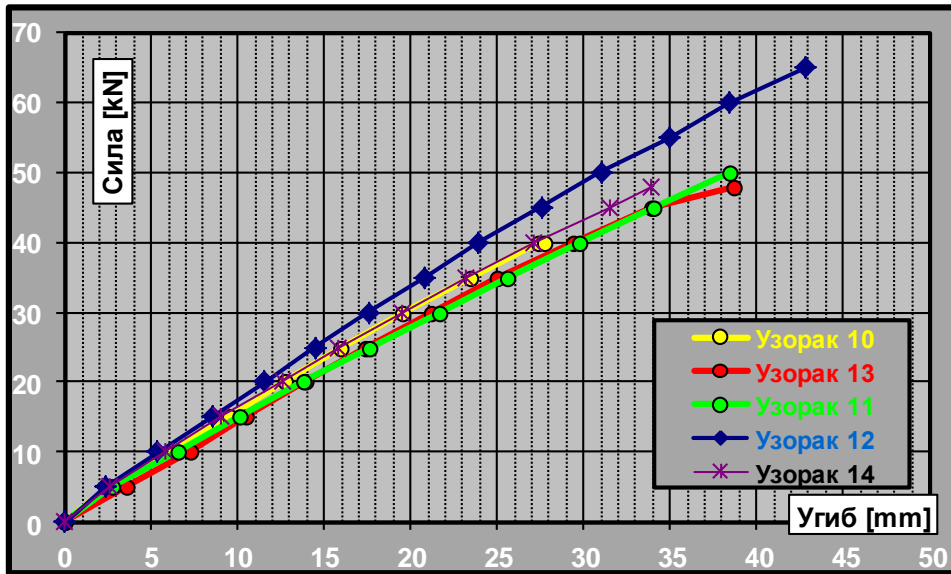
Табела 8. Технички подаци испитиваних узорка са положајем и количином арматуре

СЕРИЈА	ОЗНАКЕ	ГЕОМЕТРИЈА НОСАЧА		ОЈАЧАЊЕ		Положај арматуре	Број мерења	Број узорка
		ПОПРЕЧНИ ПРЕСЕК УЗОРКА	Квалитет: Површина (A) Отп. моменат (W) Тежина (g) Зап. маса (γ)	Ознака ојачања и попречни пресек траке (A <sub>T</sub> )	Процент армирања (%) тежина (g)			
Серија 1	10		<b>C24/GL24</b>  A=19200 mm <sup>2</sup> W= 614400 mm <sup>3</sup> g =29,705 kg, γ= 4,83 kN/m <sup>3</sup>	неојачана	<b>0,00 %</b>		4	1
	11		<b>C24/GL24</b>  A=19200 mm <sup>2</sup> W= 614400 mm <sup>3</sup> g =29,705 kg, γ= 4,83 kN/m <sup>3</sup>	<b>CarboDur S512</b>  ℓ=3200 mm A <sub>T</sub> = 60 mm <sup>2</sup>	<b>0,3125 %</b>  <b>тежина 307,20 g</b>	хоризонтална изме у пете и шесте лмеле	2	2
	12		<b>C24/GL24</b>  A=19200 mm <sup>2</sup> W= 614400 mm <sup>3</sup> g =29,705 kg, γ= 4,83 kN/m <sup>3</sup>	<b>CarboDur S1012</b>  ℓ=3200 mm A <sub>T</sub> = 120mm <sup>2</sup>	<b>0,625 %</b>  <b>тежина 614,40 g</b>	хор. испод доње ивице носача	1	3
	13		<b>C24/GL24</b>  A=19200 mm <sup>2</sup> W= 614400 mm <sup>3</sup> g =29,705 kg, γ= 4,83 kN/m <sup>3</sup>	<b>2x1/3 CarboDur S1012</b>  ℓ=3200 mm A <sub>T</sub> = 76,80 mm <sup>2</sup>	<b>0,400 %</b>  <b>тежина 393,22 g</b>	две вертикалне 1/3 доње лмеле	2	4
	14		<b>C24/GL24</b>  A=19200 mm <sup>2</sup> W= 614400 mm <sup>3</sup> g =29,705 kg, γ= 4,83 kN/m <sup>3</sup>	<b>1/3 CarboDur S1012, ℓ=3,2m + CarboDur S512, ℓ=2,8m</b>  A <sub>T</sub> = 98,40 mm <sup>2</sup>	<b>0,5125%</b>  <b>тежина 268,80 g</b> <b>196,61 g</b>	верт. на 1/2 доње лмеле и хор. испод доње лмеле лмеле носача	2	5

Серија 2	20		<b>C24/GL24</b> A=16000 mm <sup>2</sup> W= 42667 mm <sup>3</sup> g =24,715 kg, γ= 4,83 kN/m <sup>3</sup>	неојачана	<b>0,00 %</b>		<b>1</b>	<b>6</b>
	21		<b>C24/GL24</b> A=16000 mm <sup>2</sup> W= 42667 mm <sup>3</sup> g =24,715 kg, γ= 4,83 kN/m <sup>3</sup>	<b>CarboDur S512</b> ℓ=3200 mm A <sub>T</sub> = 60 mm <sup>2</sup>	<b>0,375 %</b> <b>тежина</b> <b>307,20 g</b>	хор. испод доње ламеле посаба- ДУЖА	<b>4</b>	<b>8</b>
	22		<b>C24/GL24</b> A=16000 mm <sup>2</sup> W= 42667 mm <sup>3</sup> g =24,715 kg, γ= 4,83 kN/m <sup>3</sup>	<b>CarboDur S512</b> ℓ=2470 mm A <sub>T</sub> = 60 mm <sup>2</sup>	<b>0,375 %</b> <b>тежина</b> <b>237,12 g</b>	хор. испод доње ламеле-краћа	<b>2</b>	<b>9</b>
Серија 3	30		<b>Прорачунски модел</b> <b>C24/GL24</b> A=19840 mm <sup>2</sup> Wg= 639084mm <sup>3</sup> Wd= 674383mm <sup>3</sup> g =30,665 kg, γ= 4,83 kN/m <sup>3</sup>	неојачана	<b>0,00 %</b>			
	31		<b>C24/GL24</b> A=19840 mm <sup>2</sup> Wg= 639084mm <sup>3</sup> Wd= 674383mm <sup>3</sup> g =30,665 kg, γ= 4,83 kN/m <sup>3</sup>	<b>CarboDur M1214</b> ℓ=2020 mm A <sub>T</sub> = 168 mm <sup>2</sup>	<b>0,875 %</b> <b>тежина</b> <b>542,98 g</b>	хор. испод доње ламеле	<b>2</b>	<b>7</b>
<b>Укупно ламинатног носача</b>			<b>253,34 kg</b>	<b>CFRP трака</b>	<b>2.867,53 g</b>	мерања		<b>21</b>

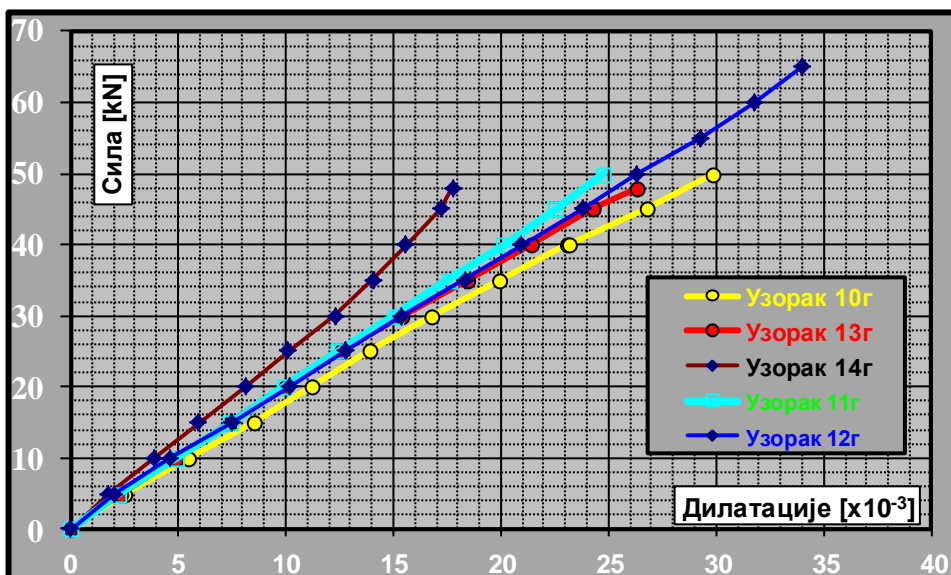
2.3.4.2 Резултати мерења

Приказ мерених вредности дат по испитаним серијама



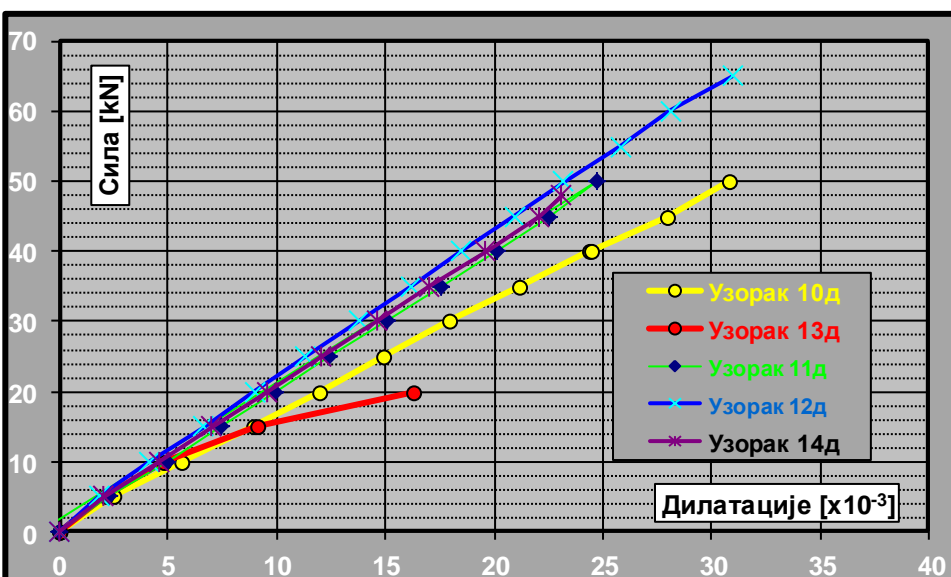
Слика 68.

Угиби серија 1, средина распона узорка, U3



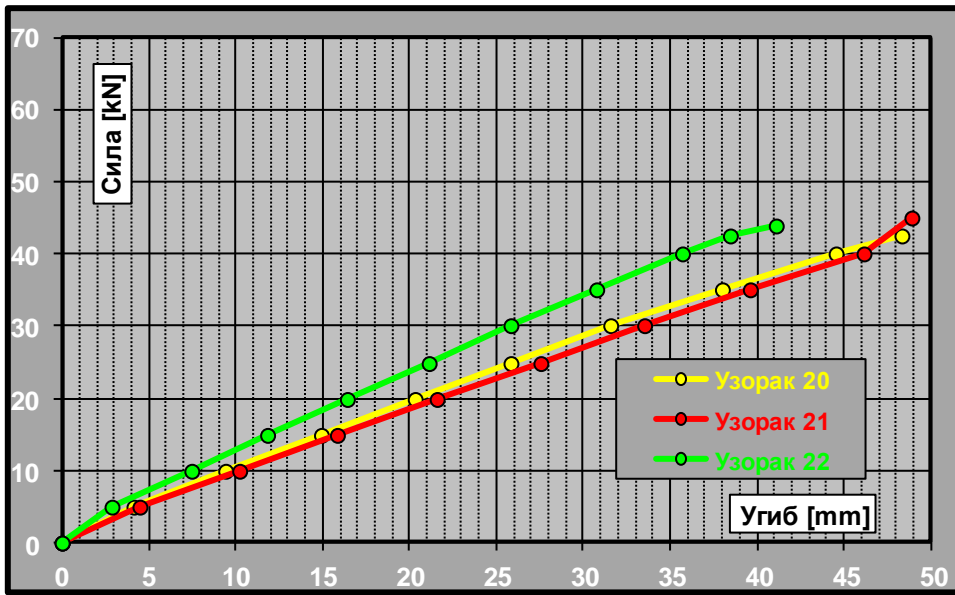
Слика 69.

Дилатације на горњој ивици серија 1, средина распона узорка, T1



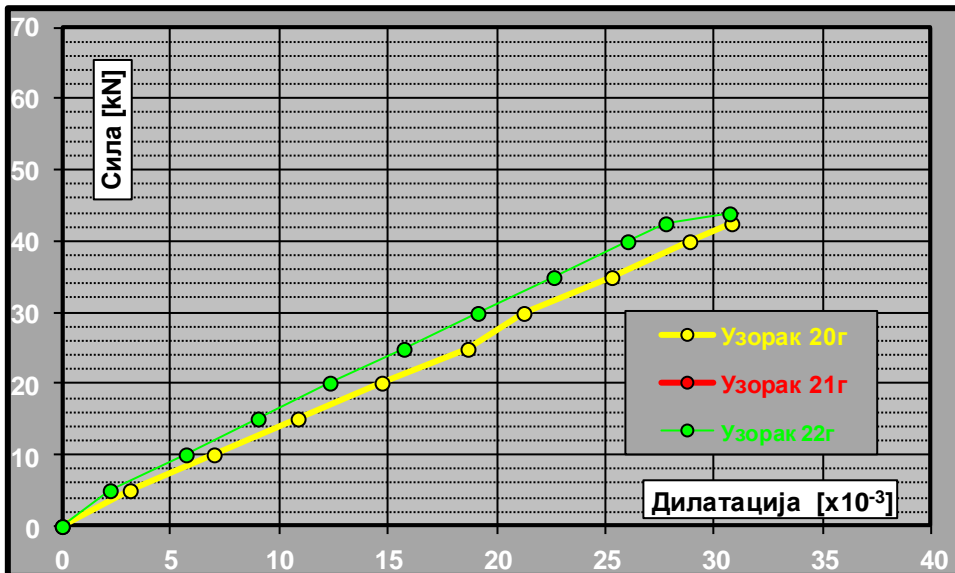
Слика 70.

Дилатације на доњој ивици серија 1, средина распона узорка, T2



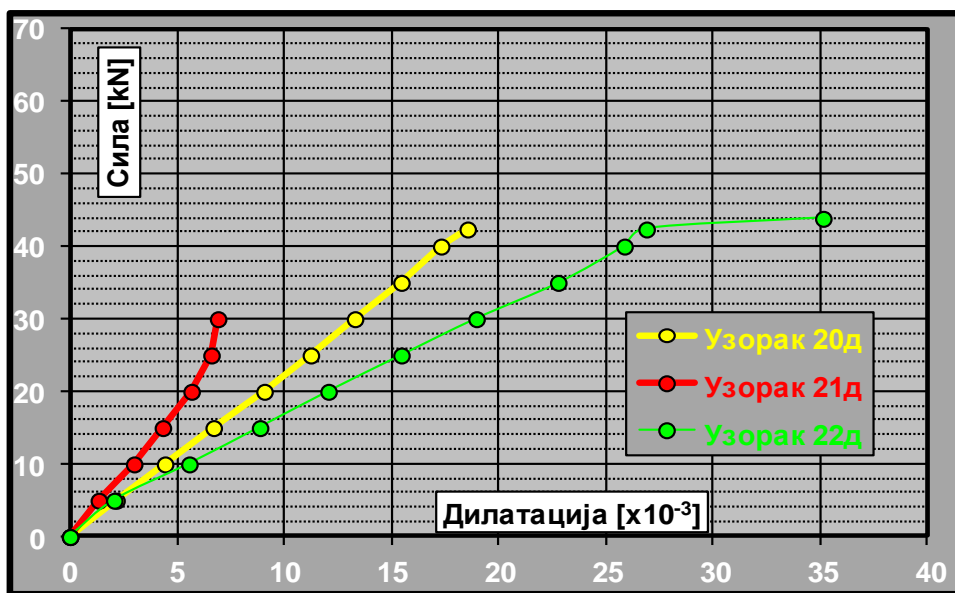
Слика 71.

Угиби серија 2, средина распона узорка, У3



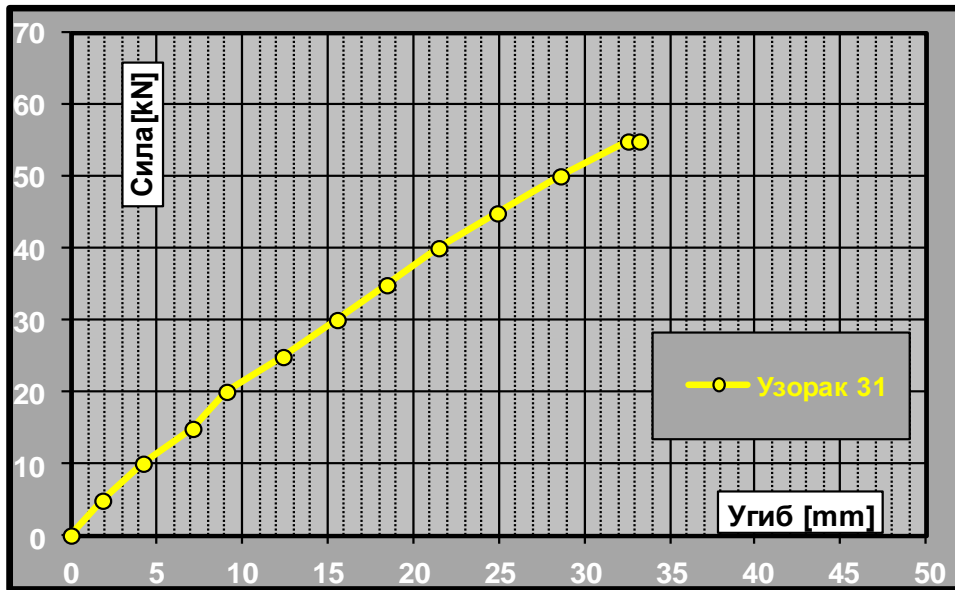
Слика 72.

Дилатације на горњој ивици серија 2, средини распона узорка, Т1

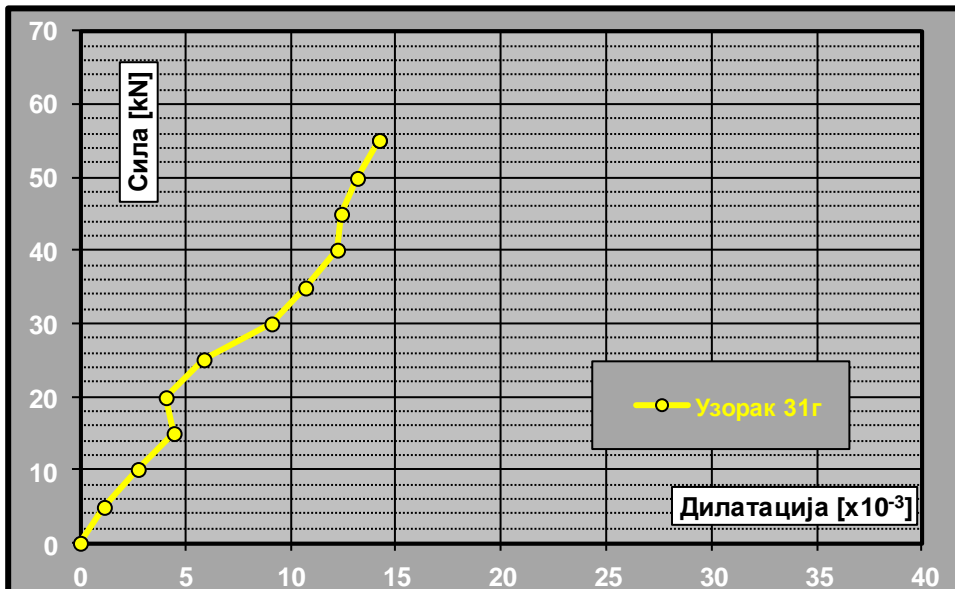


Слика 73.

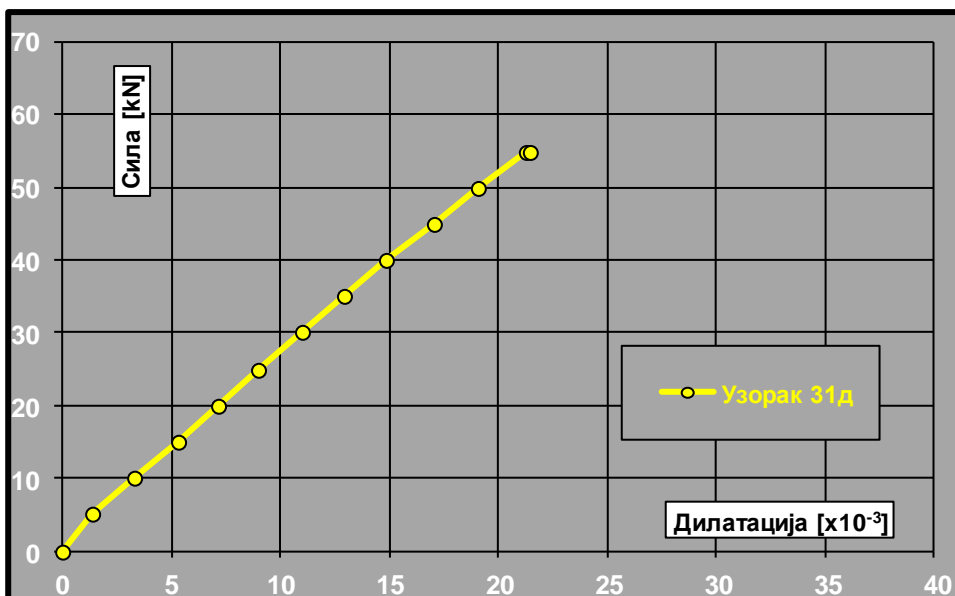
Дилатације на доњој ивици серија 2, средина распона узорка, Т2



**Слика 74.**  
Угиби серија 3,  
средина распона  
узорка, U3



**Слика 75.**  
Дилатације на  
горњој ивици серија  
3, средини распона  
узорка, T1



**Слика 76.**  
Дилатације на доњој  
ивици серија 3,  
средина распона  
узорка, T2

Приказани дијаграми груписани су по серијама у којима се налазе узорци са истом геометријом попречних пресека, а различитим положајем арматуре и различитим процентом армирања. На овај начин груписани резултати мерења биће касније погодни за поређења. Прву серији чини пет узорака, од тога је један (контролни) неојачан, а остали су ојачани. Другу серију чине три узорка, од тога је један (контролни) неојачан, док су остала два ојачана. У трећој серији је само један узорак који је ојачан и он ће код прорачуна бити упоређиван са рачунским моделом који је неојачан.

На дијаграмима прве две серије, може се запазити допринос ојачања карбонским FRP тракама на ојачаним узорцима у односу на контролни узорак. То се може уочити код вредности угиба и код нормалних напона, мерених у горњој и доњој ивици носача. Криве ојачаних узорака су већег нагиба и дуже су, а то указује на већу носивост. Изузеци се јављају само у случајевима када се на узорцима појављују недостаци дрвета (чворови и некавалитетни зупчasti наставци), што ће детаљно бити објашњено на сваком узорку.

У прилогу Б приказани су записници свих мерења на узорцима и дати су табеларно. У даљем тексту ће бити тачно уочене промене на гредама које су се догодиле услед дејства оптерећења на сваком од испитиваних узорака.

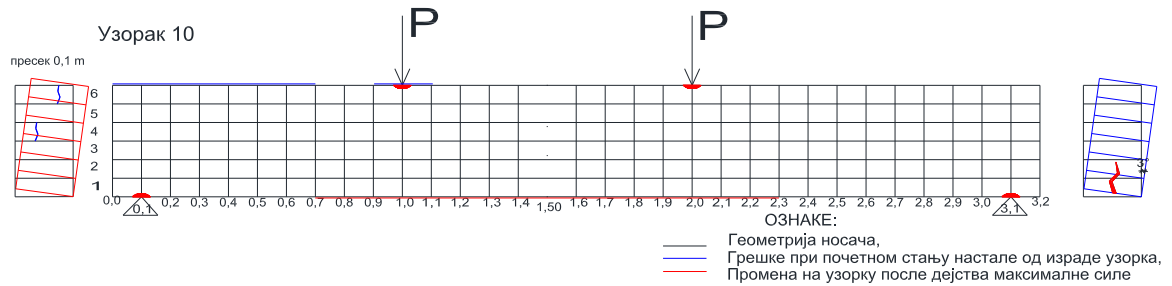
#### 2.3.4.3. Стање деформација испитиваних узорака

Опис лома у литератури дефинисан је као тренутак када једна од компонената напона достигне максималну вредност [76]. Ова дефиниција допуњена је констатацијом да кључну улогу код лома има максимални смичући напон. Међутим, термин лома најчешће подразумева прелом носача или по дрвету, или по FRP арматури. Други аутори под термин лома сврставају појаву прслина или наглог избочавања и ротације узорка по својој подужној оси, што је и овде био чест случај. Анализом испитивања обухваћено је понашања узорка при оптерећењу у еластичној области, а вредности деформација су оне које изазива сила од  $P=20\text{kN}$  ( $2 \times 10\text{kN}$ ). У даљем прегледу анализе деформација биће за сваки модел описано стање које је настало оптерећивањем узорка у граници еластичности, као и преко границе еластичности, односно код појединих узорака до стања лома, по методологији која је коришћена и при сличним испитивањима [7].

#### **Серија 1: Узорак бр. 10,**

Од четири извршена мерења узорка изложеног краткотрајном дејству концентрисаних сила, за анализу је узето прво и четврто мерење. Оптерећење се наноси постепено у трајању од 10 до 15 минута силом од 5kN. После уноса силе, када се мерене вредности на уређајима не мењају, врши се читавање. Истовремено се врши и опажање промена на узорку и те

промене се снимају и уцртавају. Ако нису настале веће деформације, или уколико нема избочавања греде, поступно се повећава сила.



Слика 77. Приказ прслина и деформација на узорку бр. 10

При дејству унете силе од  $P=60\text{kN}$  ( $2 \times 30\text{kN}$ ), запажене су следеће промене:

- Гњечење подужних влакана доње ламеле код оба ослонца износи 3-6mm (Слика 78).
- Проширење пукотине у горњој ламели која је настала приликом израде узорка (Слика 79).
- Гњечење подужних влакана горње ламеле на месту уноса сила износи 3-6mm (Слика 80).
- Проширење подужне пукотина у доњој ламели од 0,7 до 2,3m (Слика 81).



Слика 78. Гњечење дрвета код ослонца



Слика 79. Прслина настала код израде узорка



Слика 80. Гњечење дрвета код уноса силе

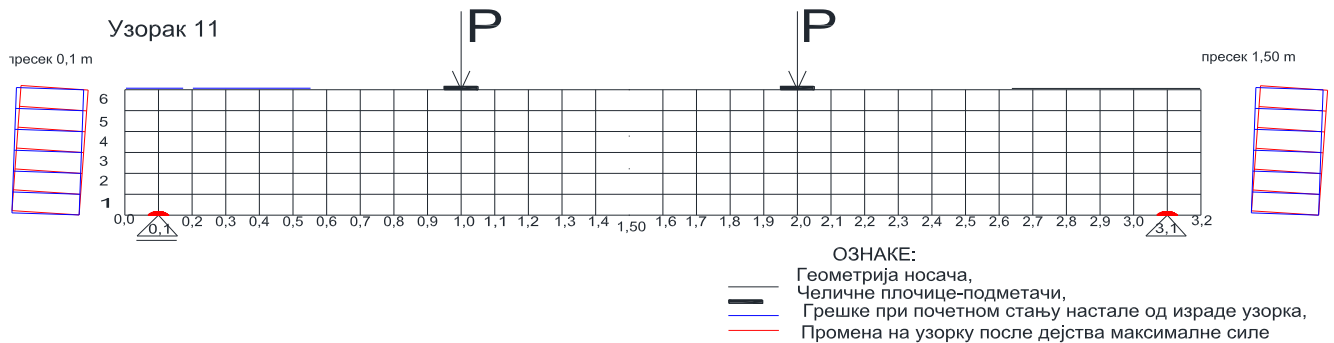


Слика 81. Подужне пукотине у доњој ламели



**Узорак бр. 11,**

На овом узорку извршено је једно мерење под краткотрајним дејством концентрисаних сила и оно је узето за анализу. Оптерећење се наноси постепено у трајању од 10 до 15 минута силом од 5kN. После уноса силе, када се мерене вредности на уређајима не мењају, врши се читавање. У исто време се врши и опажање промена на узорку и те промене се снимају и учртавају. При дејству највеће силе, носач се увртао, па се одустало од даљег оптерећења.



**Слика 82.** Приказ прслина и деформација узорка бр. 11

При дејству унете силе од  $P=50\text{kN}$  ( $2 \times 25\text{kN}$ ), запажене су следеће промене:

- Код десног ослонца делимично одвајање FRP траке на кратком делу (Слика 83).
- Гњечење подужних влакана доње ламеле код оба ослонца и горње ламеле на месту уноса сила, које се креће од 2 до 7mm (Слика 85).
- Подужна пукотина у горњој ламели од 0,2 до 0,7 m (Слика 86).
- При повећању силе долази до избочавања, обртања пресека, па се прекинуло испитивање.



**Слика 83.** Деформисани изглед узорка

**Слика 84.** Неравномерно гњечење дрвета код левог ослонца



Слика 85.

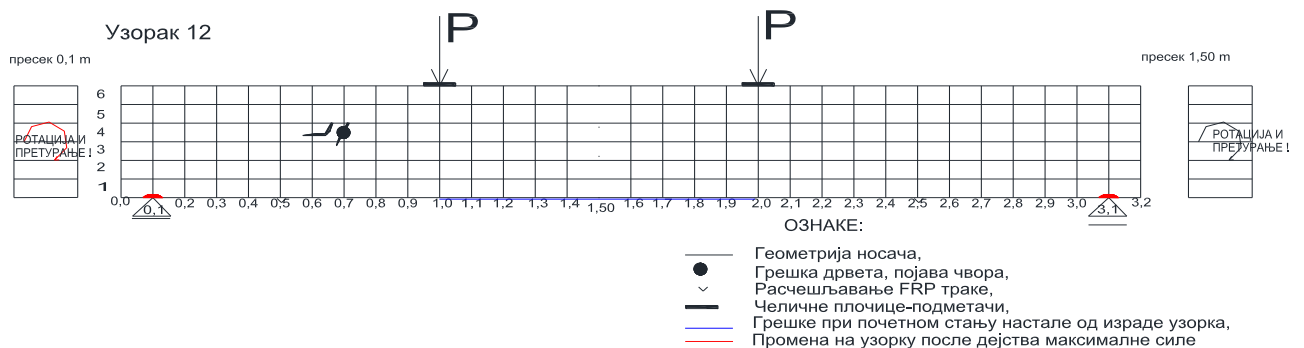
Неуједначено гњечење дрвета код десног ослонца

Слика 86.

Појава подужних пукотина у горњој ламели

**Узорак бр. 12,**

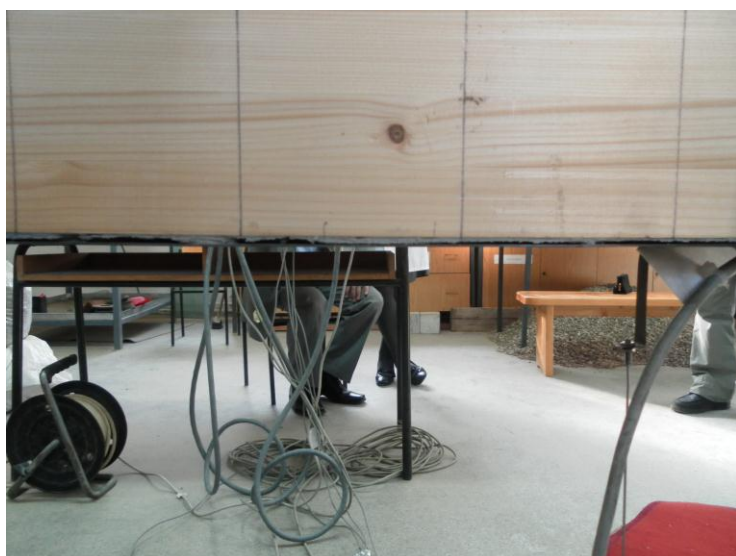
Од два извршена мерења на овом узорку изложеном краткотрајном дејству концентрисаних сила, за анализу су узета оба мерења. Оптерећење се наноси постепено у трајању од 10 до 15 минута силом од 5kN. После уноса силе, када се мерене вредности на уређајима не мењају, врши се читавање. Опажају се промена на узорку и те промене се снимају и уцртавају. Ако нису настале веће деформације, или уколико нема избочавања греде, сила се повећава.



Слика 87. Приказ прслина и деформација узорка бр. 12

При дејству унете силе од  $P=65\text{kN}$  ( $2 \times 32,5\text{kN}$ ), запажене су следеће промене:

- Одвајање FRP траке од доње ламеле само по ивици споја (Слика 88).
- Гњечење подужних влакана доње ламеле код оба ослоња је смањено пребацивањем FRP траке преко места ослањања и оно износи око 2mm (Слика 89).
- Подужна пукотина у горњој ламели од 0,2 до 0,7 m.
- Делимично рашчешљавање влакана FRP траке на 2,5 m (Слика 90).
- Претурање греде услед ротације и наглог избочавања (Слика 91).



**Слика 88.** Одвајање FRP траке од доње ламеле **Слика 89.** FRP траке смањује гњечење дрвета

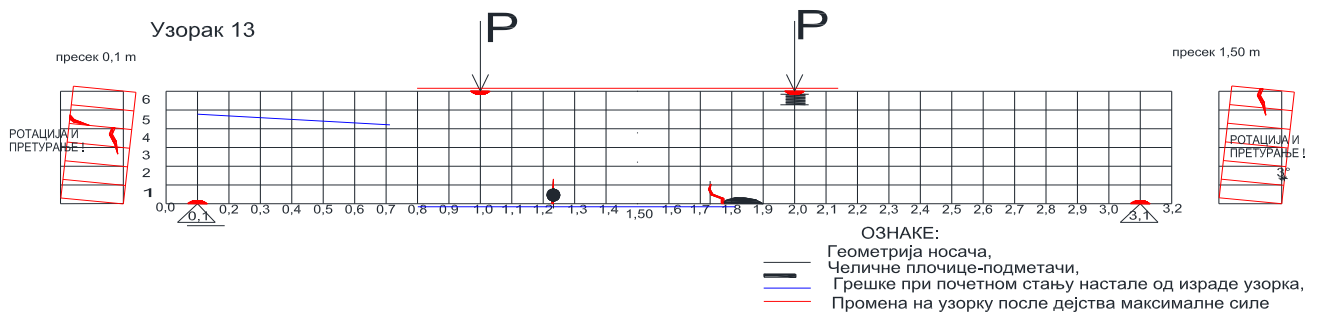


**Слика 90.** Зацепљење FRP траке

**Слика 91.** Претурање апаратуре услед избочавања

**Узорак бр. 13,**

На овом узорку извршена су два мерења тако што је излаган краткотрајном дејству концентрисаних сила. За анализу су узета оба мерења, а код другог мерења је отказала мерна трака на горњој ламели. Оптерећење се наноси постепено у трајању од 10 до 15 минута силом од 5kN. После уноса силе, када се мерене вредности на уређајима не мењају, врши се читавање. У исто време се врши и опажање промена на узорку и те промене се снимају и уцртавају. Ако нису настале веће деформације, или ако нема избочавања греде, сила се повећава.



**Слика 92.** Приказ прслина и деформација узорка бр. 13

При дејству унете силе од  $P=48\text{kN}$  ( $2 \times 24\text{kN}$ ), запажене су следеће промене:

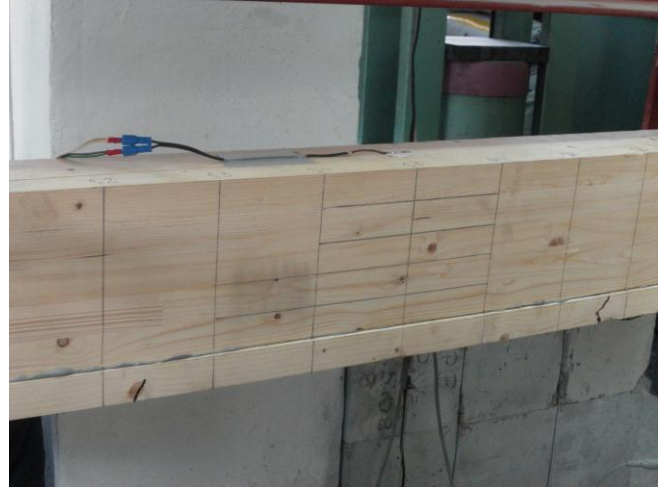
- Појава подужне пукотине у горњој ламели дрвета од 0,8 до 2,15m (Слика 94).
- Проширење пукотина у доњој дрвеној ламели на месту чворова (Слика 95).
- Гњечење подужних влакана доње дрвене ламеле код оба ослонца, неравномерно (Слика 96), и на месту уноса сила у горњој ламели, равномерно (Слика 97).
- Локални лом у доњој дрвеној ламели на месту чворова на 1,22m и 1,77 m (Слика 98).



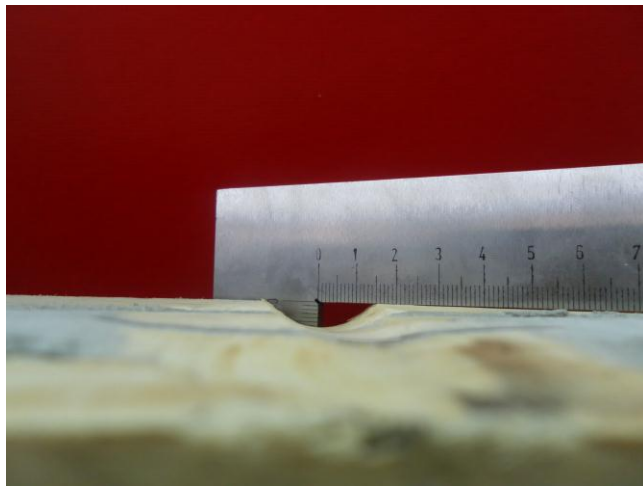
**Слика 93.** Деформисани облик носача



Слика 94. Проширење подужне пукотине



Слика 95. Појава пукотина на месту чворова



Слика 96. Неравномерно гњечење дрвета код ослонца



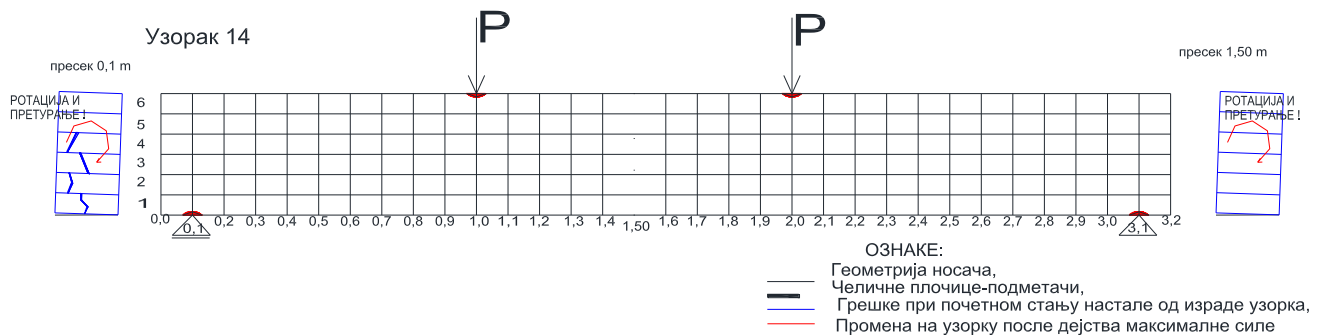
Слика 97. Гњечење дрвета код уноса силе



Слика 98. Лом доње ламеле на месту чворова

**Узорак бр. 14,**

На овом узорку су извршена два мерења тако што је излаган краткотрајном дејству концентрисаних сила. За анализу се могу узети оба мерења, пошто су мерене вредности уједначене. Оптерећење се наноси постепено у трајању од 10 до 15 минута силом од 5kN. После уноса силе, када се мерене вредности на уређајима не мењају, врши се читавање. У исто време се врши и опажање промена на узорку и те промене се снимају и уцртавају. Ако нису настале веће деформације, или уколико нема избочавања греде, сила се повећава. Силе већег интензитета нису наносене због тога што је постојала опасност да се греда претури.



**Слика 99.** Приказ прслина и деформација узорка бр. 14

При дејству унете силе од  $P=55\text{kN}$  ( $2 \times 27,5\text{kN}$ ), запажене су следеће промене:

- Гњечење дрвета горње ламеле на местима уноса сила, лево (Слика 101) и десно (Слика 102).
- Гњечење подужних влакана доње ламеле код оба ослонца (Слика 103).
- Вертикалне пукотине у ламелама на месту левог ослонца (Слика 104).
- На месту уноса силе догађа се гњечење влакана дрвета и зацепљење површинског слоја (Слика 105 и Слика 106).



**Слика 100.**

Деформисани облик носача



Слика 101. Гњечење влакана код уноса силе-лево Слика 102. Гњечење влакана код уноса силе десно



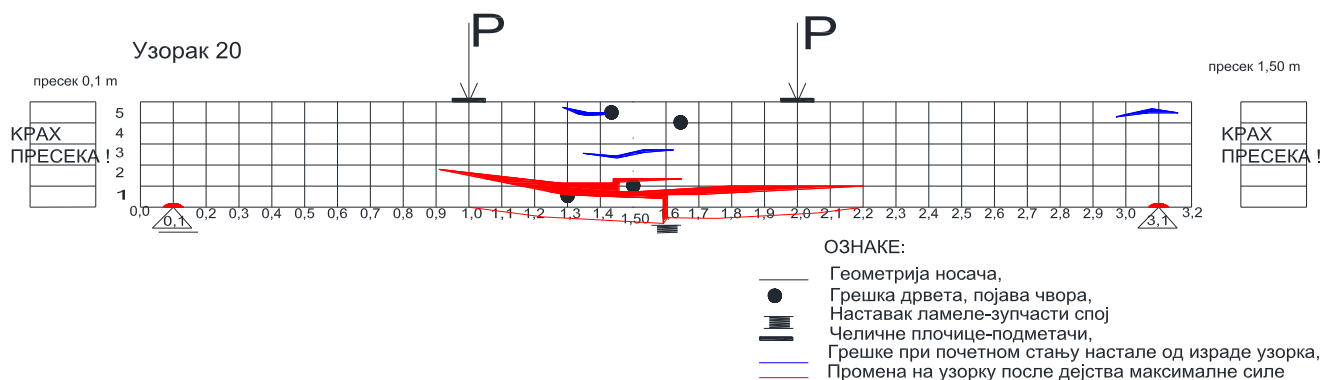
Слика 103. Гњечење влакана код ослонаца Слика 104. Вертикалне пукотине у дрвеним ламелама



Слика 105. Гњечење влакана код ослонаца Слика 106. Гњечење влакана код ослонаца са површинским зацепљењем

**Серија 2: Узорак бр. 20**

На овом узорку извршено је једно мерење под краткотрајним дејством концентрисаних сила и то је узето за анализу. Оптерећење се наноси постепено у трајању од 10 до 15 минута силом од 5kN. После уноса силе, када се мерене вредности на уређајима не мењају, врши се читавање. У исто време се врши и опажања промена на узорку и те промене се снимају и уцртавају. При дејству највеће силе носач се сломио по доњој ламели.



**Слика 107.** Приказ прелина и деформација узорка бр.20

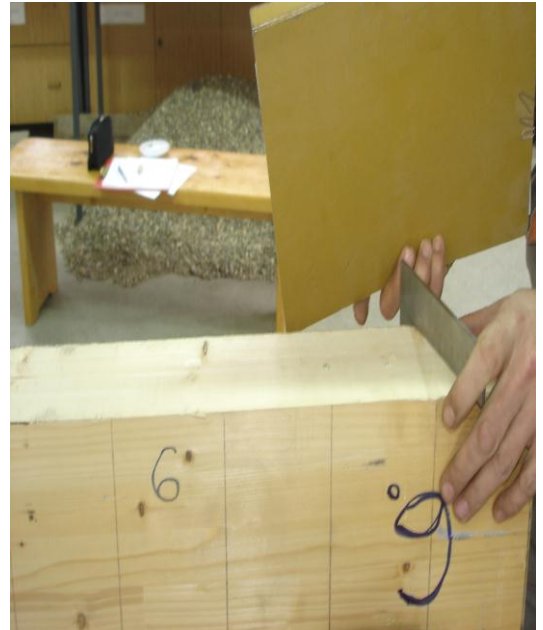
При дејству унете силе од  $P=55\text{kN}$  ( $2 \times 27,5\text{kN}$ ), запажене су следеће промене:

- Гњечење доње дрвене ламеле на местима ослонаца, лево (Слика 109) и десно (Слика 110).
- Формирање пукотине у доњој ламели на месту чвора (Слика 111).
- Локални лом доње ламеле на месту зупчастог споја на средини распона (Слика 112).



**Слика 108.** Деформисани облик носача





Слика 109. Гњечење влакана код левог ослонца Слика 110. Гњечење влакана код десног ослонца



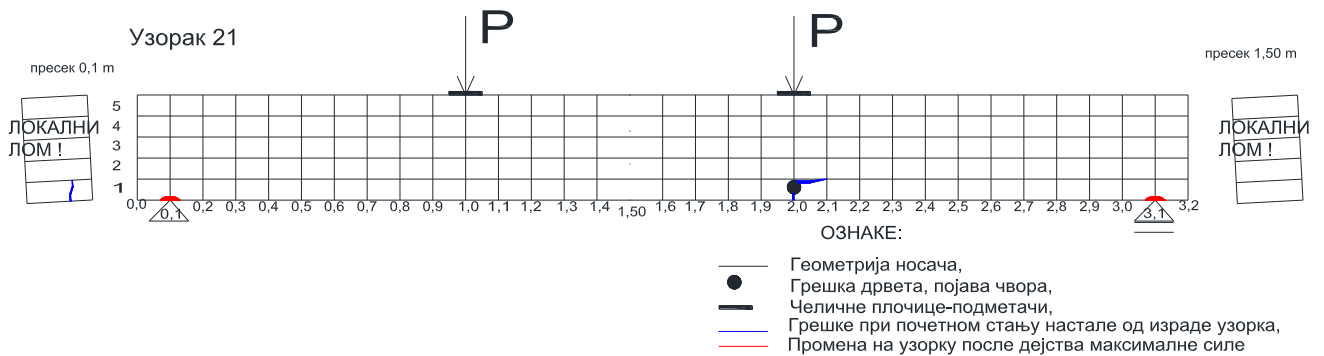
Слика 111. Проширење пукотине на месту чвора



Слика 112. Лом пресека на месту зупчастог споја

**Узорак бр. 21**

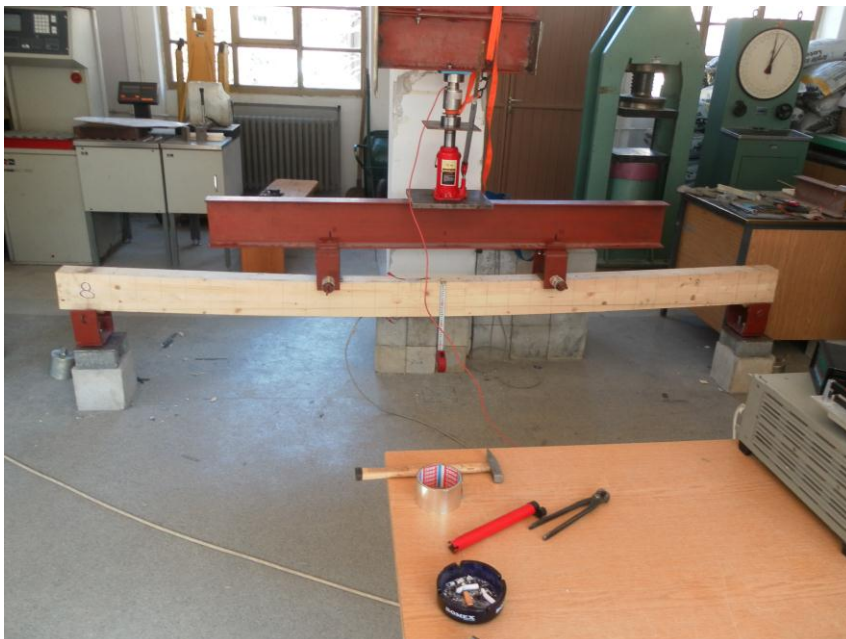
Од четири извршена мерења узорка изложеног краткотрајном дејству концентрисаних сила, за анализу су узета сва четири мерења. Оптерећење се наноси постепено у трајању од 10 до 15 минута силом од 5kN. После уноса силе, када се мерене вредности на уређајима не мењају, врши се читавање. У исто време се врши и опажање промена на узорку и те промене се снимају и уцртавају. Ако нису настале веће деформације, или ако нема избочавања греде, сила се повећава. У току рада мерна трака постављена на горњој ивици носача није била исправна.



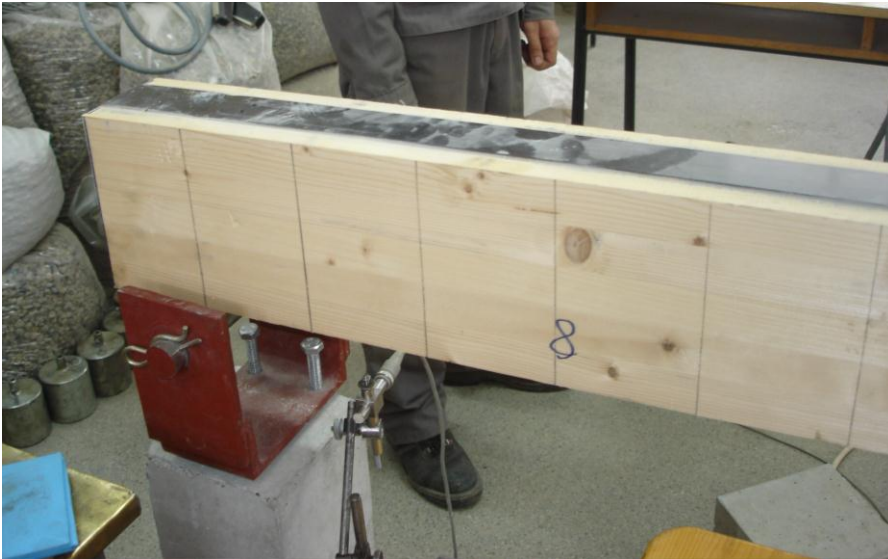
**Слика 113.** Приказ прслина и деформација узорка бр. 21

При дејству унете силе од  $P=45\text{kN}$  ( $2 \times 22,5\text{kN}$ ), запажене су следеће промене:

- Распоред чворова у суседним ламелама као може да ослаби пресек (Слика 115).
- Гњечење доње дрвене ламеле на месту ослонаца смањује се постављањем FRP траке (Слика 116).
- Формирање пукотине у доњој ламели поред FRP траке на месту испод уноса силе (Слика 117), са зацепљењем дрвета (Слика 118 и Слика 119).



**Слика 114.** Деформисани облик носача



**Слика 115.** Чворови у суседним ламелама као могућност слабљења пресека



**Слика 116.** FRP трака смањује гњечење дрвета на месту ослонца



**Слика 117.** Локално зацепљење доње дрвене ламеле





**Слика 121.** Деформисани облик носача



**Слика 122.** Формирање лома је настало испод места уноса силе у доњој ламели



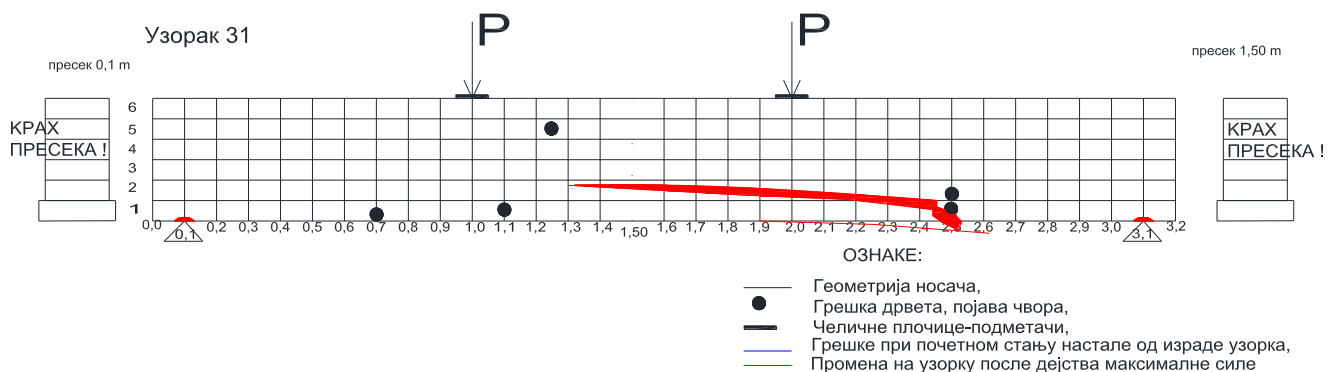
**Слика 123.** Лом доње ламеле се проширио ка средини пресека и на друге ламеле



**Слика 124.** На месту лома лепак је издржао, али се FRP трака раслојила

### Серија 3: Узорак бр. 31

На овом узорку су извршена два мерења тако што је излаган краткотрајном дејству концентрисаних сила. За анализу се могу узети оба мерења пошто дају уједначене величине. Оптерећење се наноси постепено у трајању од 10 до 15 минута силом од 5kN. После уноса силе, када се мерене вредности на уређајима не мењају, врши се читавање. У исто време се врши и опажања промена на узорку и те промене се снимају и уцртавају. Ако нису настале веће деформације, или ако нема избочавања греде, сила се повећава. У току повећања силе догодио се лом доње ламеле на месту где се налази чвор и где престаје ојачање FRP траке.



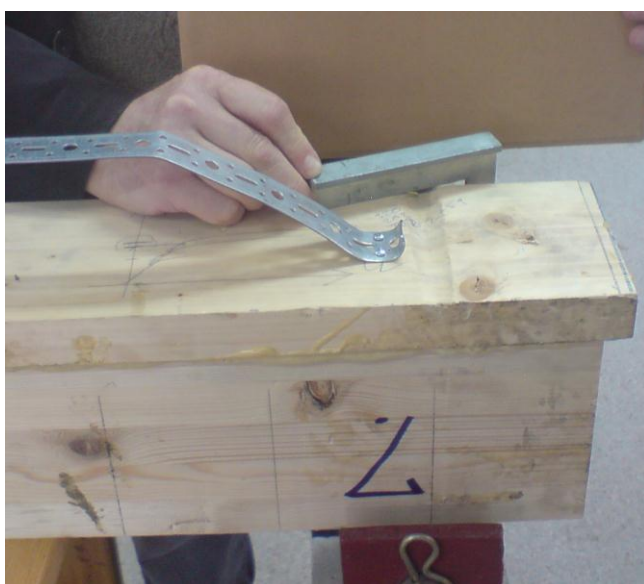
**Слика 125.** Приказ прлина и деформација узорка бр. 31

При дејству унете силе од  $P=45\text{kN}$  ( $2 \times 22,5\text{kN}$ ), запажене су следеће промене:

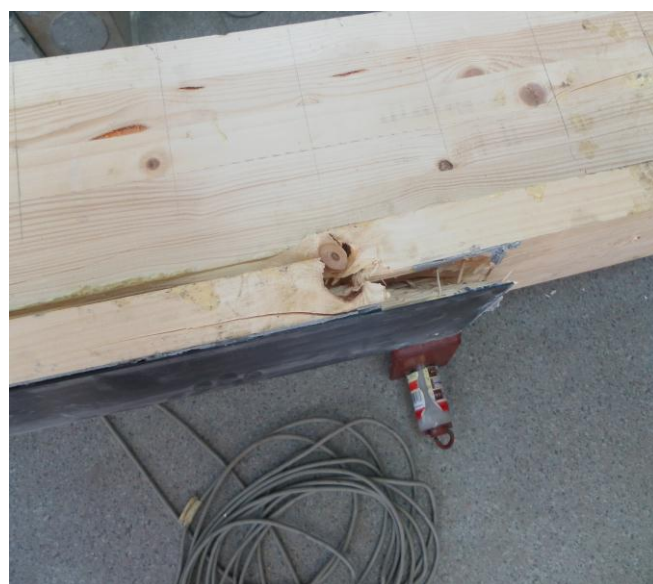
- Гњечење доње дрвене ламеле на местима ослонаца износи од 4 до 6mm (Слика 127).
- Формирање пукотине у доњој ламели на месту чвора, а испод FRP траке (Слика 128).
- Вертикални лом се са доње ламеле преноси на друге ламеле као хоризонтални и цепа претпоследњу ламелу (Слика 129 и Слика 130).



Слика 126. Деформисани облик носача



Слика 127. Гњечење дрвета на месту ослонца



Слика 128. Лом по чвору у доњој ламели



Слика 129. Изглед лома са једне стране



Слика 130. Изглед лома са супротне стране

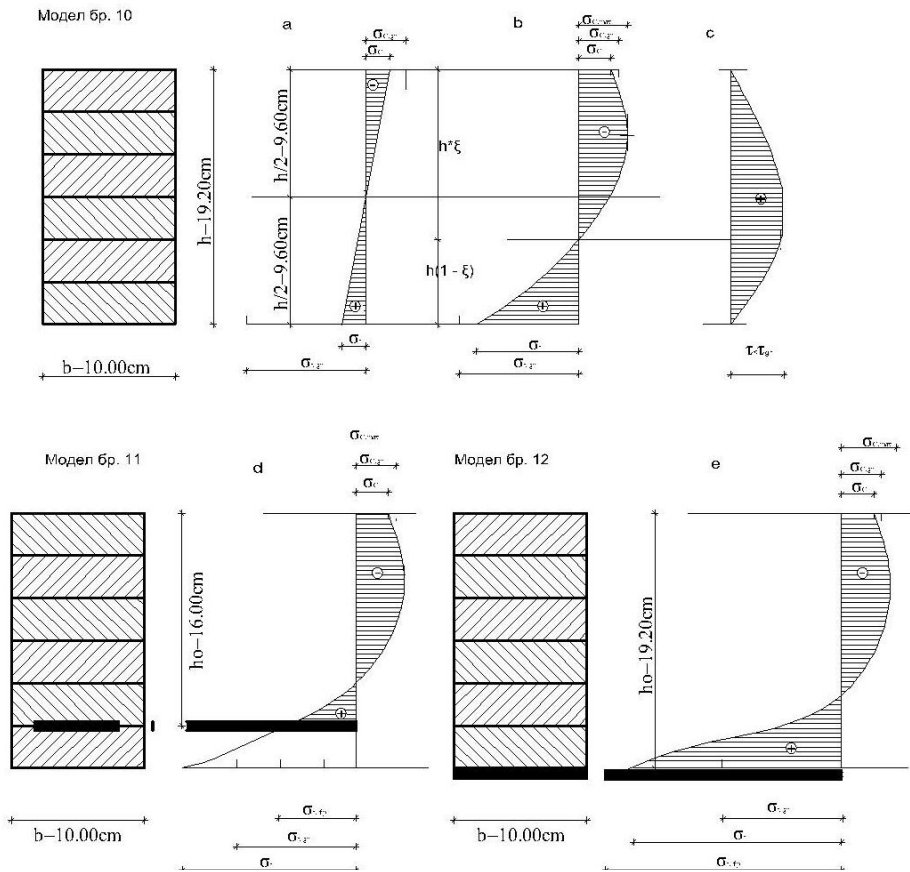
#### 2.3.4.3.1. Опис механизма лома

Лепљене ламелиране дрвене греде, неојачане, оптерећене на савијање, ломиле су се око средине распона у затегнутој зони. Могуће је и да се догоди локални лом на местима где постоје чворови, или на подужним спојевима ламела. Имајући то у виду, требало би спречити појаву лома ојачањем греде у зони затезања. Та ојачања се постављају паралелно у односу на влакна дрвета. На узорцима који су ојачани, око средине греде није долазило до лома у том делу, али се лом јављао одмах иза места где ојачање престаје. То указује да се од тачке где се врши прекид ојачања па до ослонаца, јавља већи утицај смичућих напона који изазивају лом доње ламеле. У почетној фази лом се јавља само као локална појава у виду прелина, преноси се ка средини распона и брзо прелази у лом целог пресека. Најефикаснији утицај ојачања запажен је у случају када се узорак ојача по целој дужини доње зоне носача, односно када су FRP траке продужене и преко места ослањања.

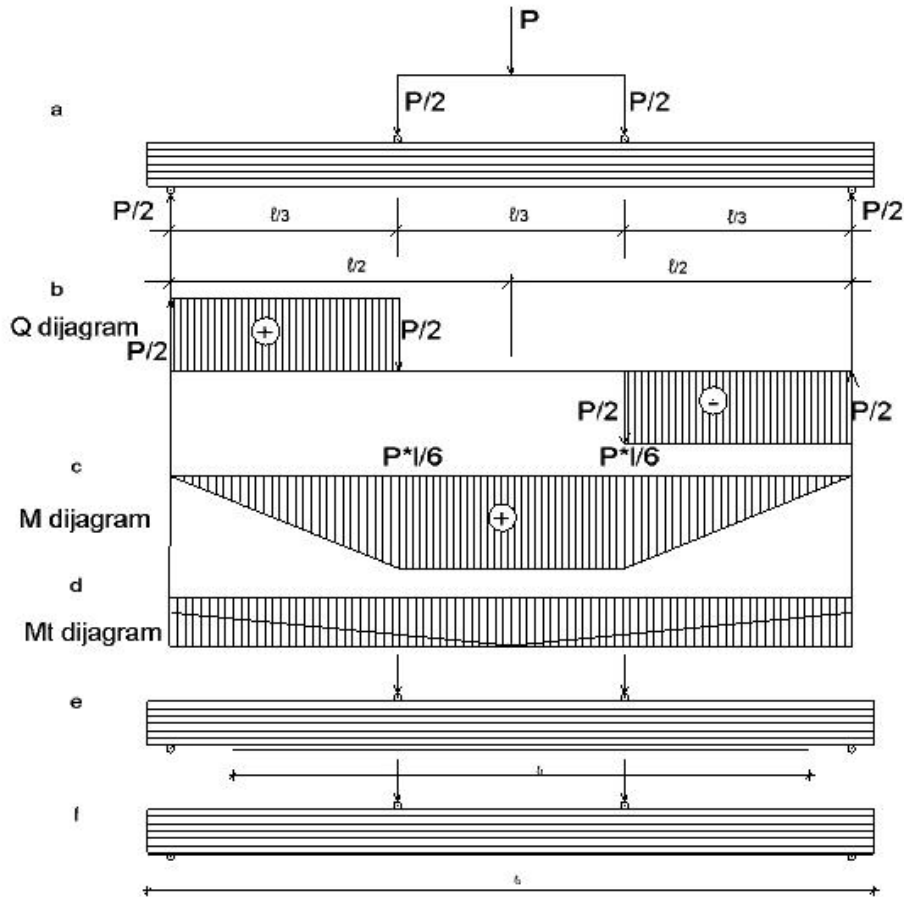
Према класичним законима Бернулија, Навијеа и Хука, попречни пресек узорка напрегнутог на савијање, остаје раван и после деформације, а нормални напони расту пропорционално удаљењу влакана од неутралне осе. То се односи на мале вредности нормалних напона, до границе еластичности, где су односи напона притиска и затезања пропорционални. Повећањем оптерећења, горња зона носача изложена притиску биће доведена пре у зону пластичних деформација. Максимални напон притиска се премешта од горње ивице ка доле, па је дијаграм напона нелинеаран и параболичан. Та појава нелинеарности утиче да се неутрална оса помера наниже, од средишта пресека ка доле. На тај начин напони притиска неће бити брзо искоришћени, већ ће доћи до много већег прираштаја напона у затегнутој зони. Због тога ће пре доћи до прекорачења напона затезања у доњој зони и до појаве лома у доњој ламели (Слика 131.a,b,c, фаза узорка бр.10). Ако се на месту затезања изврши ојачање, онда ће карбонске траке примити ове напоне затезања и одгодити појаву лома ( Слика 131.d,e, фаза узорка бр.11 и бр.12). Избором положаја FRP траке у првом примеру где се ојачање налази изнад доње ламеле, повећава се носивост на затезање, чак и у тренутку кад настаје лом у доњој ламели. Код другог примера ојачање је извршено испод доње ламеле и у том случају оно има већи ефекат јер може да прими највеће напоне затезања. Ојачање FRP траком, које је примало нормалне напоне затезања, уколико се продужи ка ослонцима, прима и напоне смицања. Уколико су напони смицања већи, онда се њихов пријем може извести и ојачањем у виду вертикално залепљених FRP трака [46].

Најопсежнија испитивања у овој бласти су изведена у Америци на Иституту Maine, где су вршена испитивања на моделима [44] [45], и на основу тога је сачињен програм ReLAM [57].





Слика 131.  
Фазе пластификације  
дрвеног пресека



Слика 132.  
Положај оптерећење на  
простој греди са  
статичким утицајима

Моменат савијања и трансверзалне силе, по теорији Журавског, у правцу дрвених влакана изазивају и смичуће напоне. Поред њих јављају се и моменти торзије, чији је смер управан на правац влакана (Слика 132.a,b,c,d). Поред положаја ојачања на узорцима у овом раду је анализирана и дужина ојачања. На дијаграму је приказано да утицај момента савијања прихвата дужина траке  $l_1$ , (Слика 132, e). Међутим, показало се да на месту где се FRP трака завршава долази до лома у дрвеној ламели. То је потврдило претпоставку да је ова неојачана зона изложена смичућим напонима који на том месту постају доминантни, па и та зона треба да буде ојачана. Дакле, дужину FRP траке треба продужити преко зоне смичућих напона, све до ослонаца. Али ту настаје још једна појава која је била присутна код испитивања узорака, а то је гњечење влакана дрвета на местима ослонаца, услед дејства вертикалне силе. Да би се то спречило, а у складу са свим што је претходно истакнуто, потребно је FRP траку обезбедити целом дужином распона греде  $l_2$ , (Слика 132, f). Овако продужење FRP траке не повећава много потрошњу, али утиче знатно на носивост и издржљивост. Оваквим начином ојачања је показано да оно утиче на појаву граничног стања лома, што ће бити детаљно описано у овом поглављу. Могуће је постићи лом и у притиснутој зони, али у овим експериментима то није било постигнуто. У току испитивања ојачаних и неојачаних узорака дошло се до потпуно нових запажања, у погледу експлоатационих и критичних стања носача.

Типична критична стања уочена на узорцима су:

- Вертикални лом услед савијања; настаје на средини неојачаног узорка (Узорак 20);
- Избочавање и ротација пресека; настају због гњечења влакана дрвета, због ексцентричног дејства силе или због несиметрије крутости пресека (Узорак бр. 11, 13 и 14);
- Лом са зацепљењем у доњој ламели; настаје бочно од ојачања (Узорак бр. 12, 21);
- Лом услед смичућих напона; настаје код ослонаца у зони где се завршава FRP трака (Узорак бр. 22, 31);
- Локални лом код доње ламеле; настаје уколико постоје грешке дрвета у виду чворова (Узорак бр. 22, 31), или услед некавалитетног зупчастог наставка ламеле (Узорак бр. 13, 20).

Продужавањем зоне ојачања, од средине узорка ка ослонцима, смањује се могућност за појаву лома од утицаја савијања (Слика 132.e). Уколико се ојачање продужи до ослонаца, онда се спечава појава лома од утицаја савијања и трансверзалних сила [47]. Ако су напони смицања већи, онда се њихов пријем може извести и ојачањем у виду вертикално залепљених FRP трака [46]. Појава која је се десила у притиснутој зони је проширење подужних прелина и гњечење влакана горње ламеле. Међутим, до лома у притиснутој зони

ипак није дошло, иако је у дрвеном носачу било и недостатака дрвета. Он се понашао као увезан пакет, код кога је могло да дође само до појаве избочавања (Слика 132,f).

#### 2.4. Прорачун модела

Просторни нумерички модел конструкције израђен је у програмском пакету AxisVM<sup>®</sup> који је заснован на методи коначних елемената.

AxisVM<sup>®</sup> има велике могућности моделирања прелазних и контурних услова применом специјалних коначних елемената везе (ткз. „link“ КЕ), што је детаљно описано у овом поглављу.

Греда је моделирана применом љуски (ткз. „shell“) КЕ, а спојеви елемената (ламела-ламела и ламела-карбон) применом „link“ КЕ.

Коришћени „shell“ КЕ има три трансляторна степена слободе померања (у правцу нормале на средњу раван и у ортогоналним равнима којима припада нормала на средњу раван) и три ротациона степена слободе померања (у средњој равни и у ортогоналним равнима којима припада нормала на средњу раван) у чвору коначног елемента. Тај коначни елемент апроксимира конбиновано стање напона услед аксијалног напрезања и савијања без занемарења утицаја смицања (Reissner-Mindlinova теорија дебелих плоча).

„Shell“ КЕ добијени „суперпозицијом“ КЕ за моделирање савијања плоче и равног стања напона мембране могу да буду оптерећени у својој равни и управно на своју раван. Дефинисање ових КЕ подразумева познавање карактеристика употребљених материјала, геометријских карактеристика и параметара оријентације и положаја КЕ у простору.

Карактеристични улазни подаци за коришћене материјале у формирању нумеричког модела су:

1. За **дрво**:  $E_x=1100\text{kN/cm}^2$ ,  $E_y=37\text{kN/cm}^2$ ,  $\nu=0,21$ ,  $\alpha_t=8\cdot 10^{-6}1/^\circ\text{C}$ ,  $\rho=420\text{kg/m}^3$ , дебљина  $d=32,0\text{mm}$ .
2. За карбонске траке **типа S**:  $E_x=16500\text{kN/cm}^2$ ,  $E_y=16500\text{kN/cm}^2$ ,  $\nu=0$ ,  $\alpha_t=4\cdot 10^{-7}1/^\circ\text{C}$ ,  $\rho=1800\text{kg/m}^3$ , дебљина  $d_S=1,2\text{mm}$ .
3. За карбонске траке **типа M**:  $E_x=21000\text{kN/cm}^2$ ,  $E_y=21000\text{kN/cm}^2$ ,  $\nu=0$ ,  $\alpha_t=4\cdot 10^{-7}1/^\circ\text{C}$ ,  $\rho=1800\text{kg/m}^3$ , дебљина  $d_M=1,4\text{mm}$ .

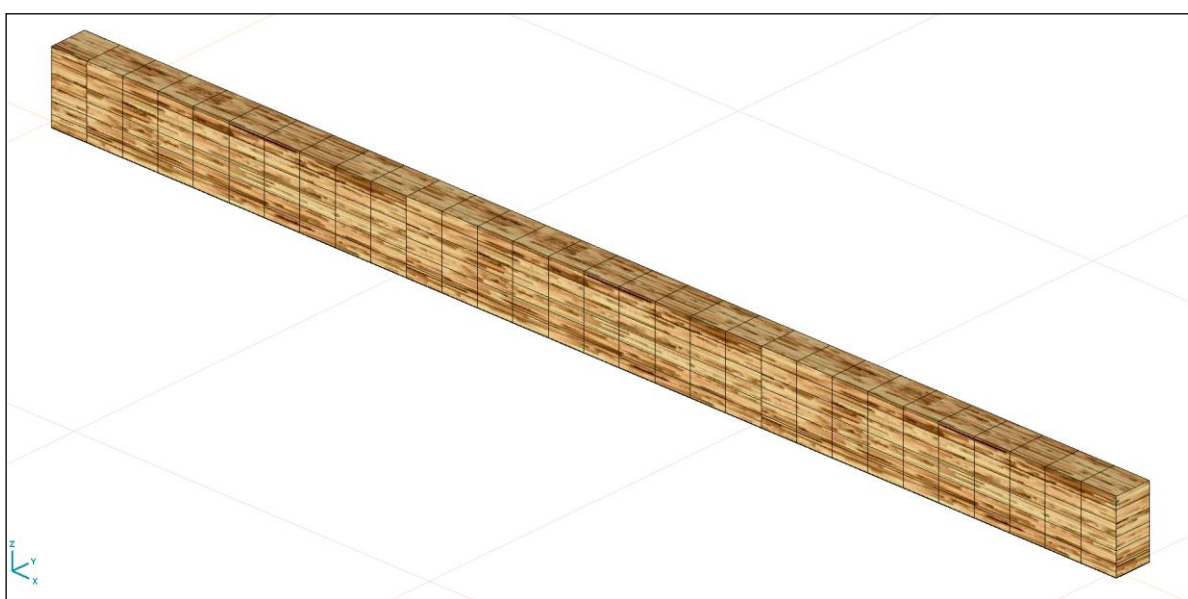
У циљу постизања довољне инжењерске тачности ламеле су подељене на КЕ дужине  $L=10,0\text{cm}$ , што одговара положају оптерећења и ојачања карбонским тракама.

Веза „ламела-ламела“ и „ламела-карбонска трака“ (изведена епоксидним лепком), моделирана је применом специјалних „link“ КЕ са шест степени слободе у сваком чвору. Избором величине компоненти крутости моделира се сваки тип везе од идеално глатке (слободно

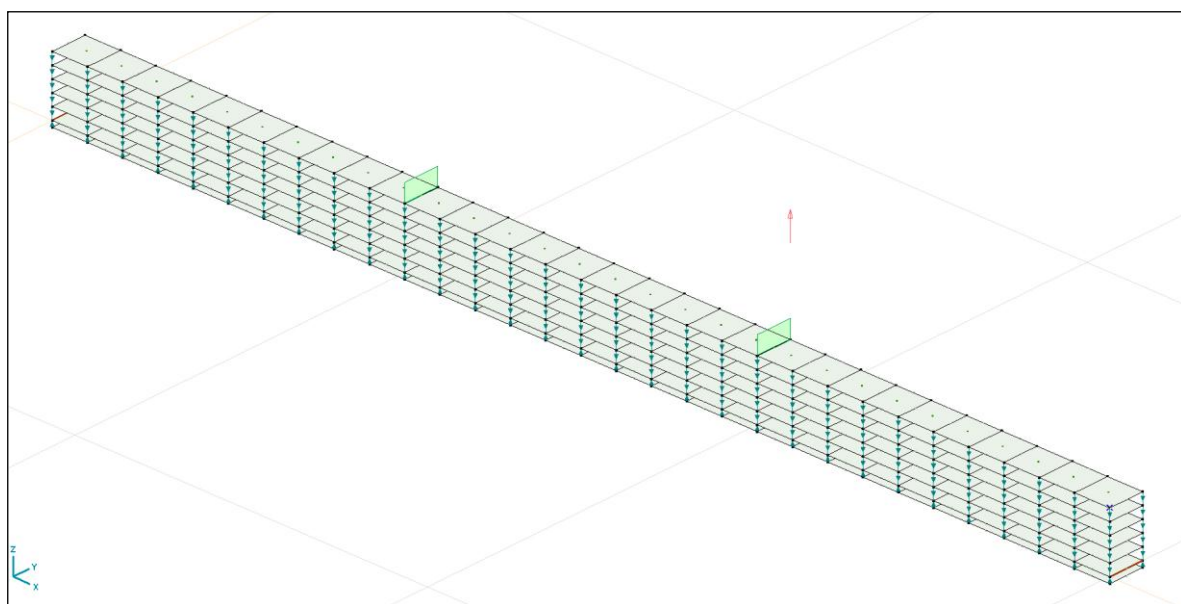
релативно померање), до идеално круте (нема релативног померања). У овим моделима је за пробно испитивање везе лепка узетао да су транслаторна и ротациона крутост  $10^7 \text{kN/m}$  и  $10^7 \text{kNm/rad}$ . Детаљи о специјалним КЕ дати су у [37] [38].

Ослонци су моделирани као линијски на одговарајућим ивицама доњих КЕ. Модел ослонаца омогућава еластично ослањање Винклеровог типа ивице површинског КЕ. Карактеристике ослањања су константе по дужини линијског ослонаца и исте су за притисак и затезање. Крутост ослонаца је усвојена са вредношћу  $10^5 \text{kN/m/m}$ .

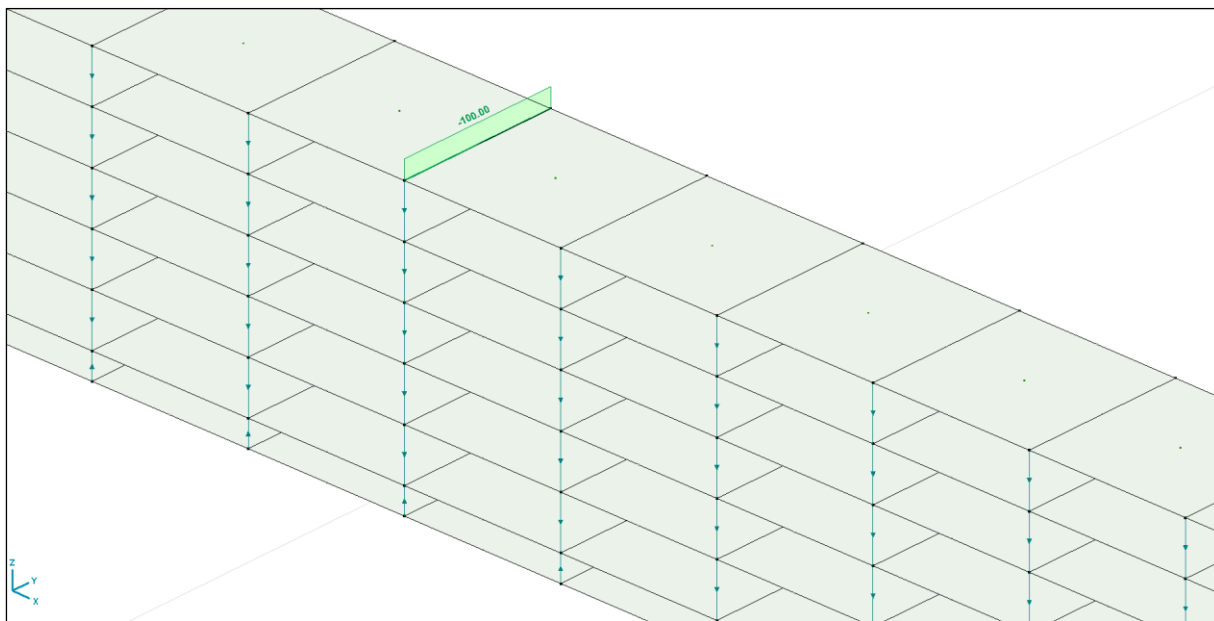
У трећинама распона су задата два линијска оптерећења од  $P_L=100 \text{kN/m}$  којима су апроксимирани две концентрисане силе од  $P_k=10,0 \text{kN}$ .



Слика 133. Рендеровани приказ 3D МКЕ модела типичне испитиване ламеле дрвене греде



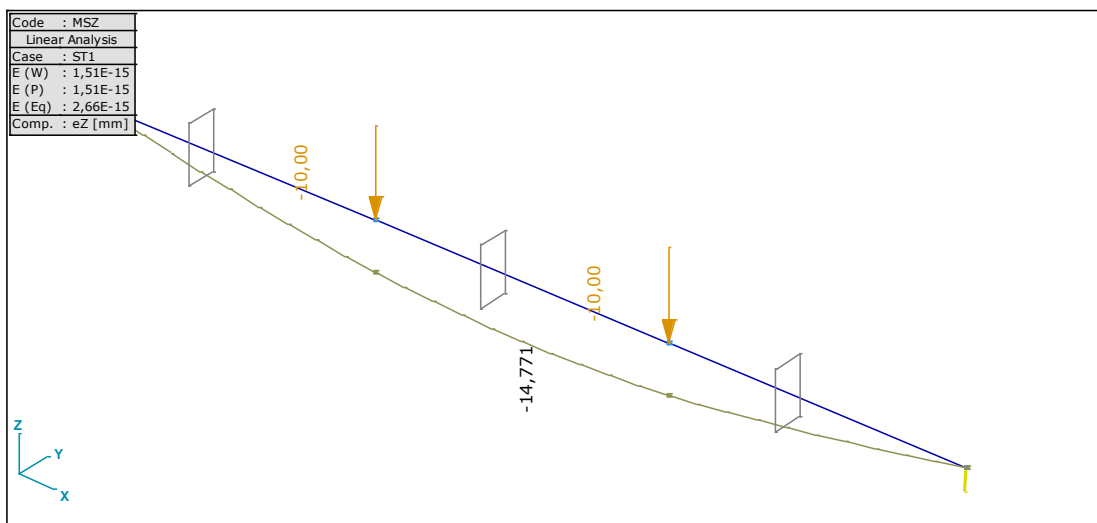
Слика 134. МКЕ модел испитиваних греда са оптерећењем



Слика 135. Детаљ оптерећења МКЕ модела, „shell“ и „link“ КЕ

#### 2.4.1 Резултати нумеричке анализе

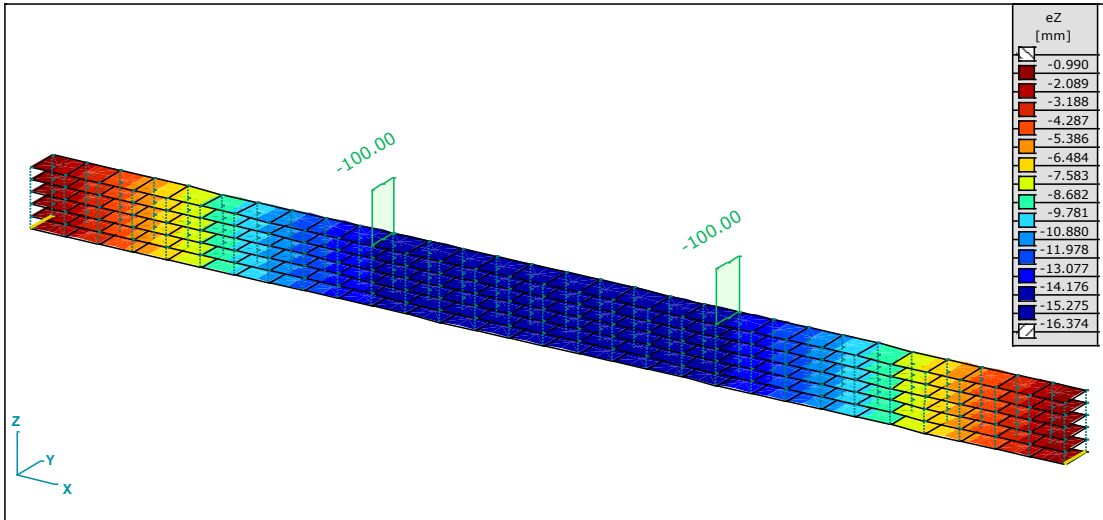
##### 2.4.1.1 СЕРИЈА 1, МОДЕЛ бр. 10



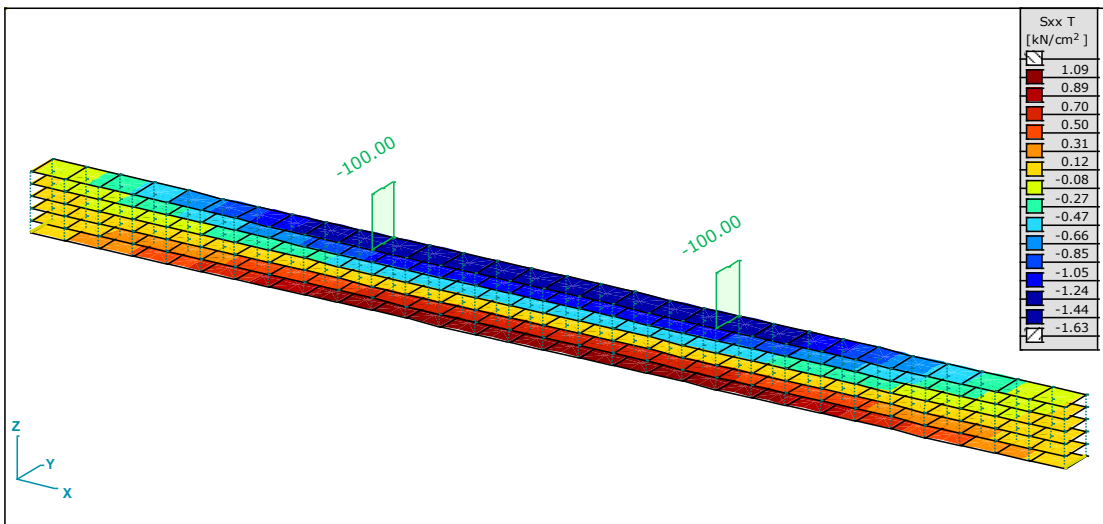
Слика 136. Еластична линија угиба модела бр. 10

Напомена:

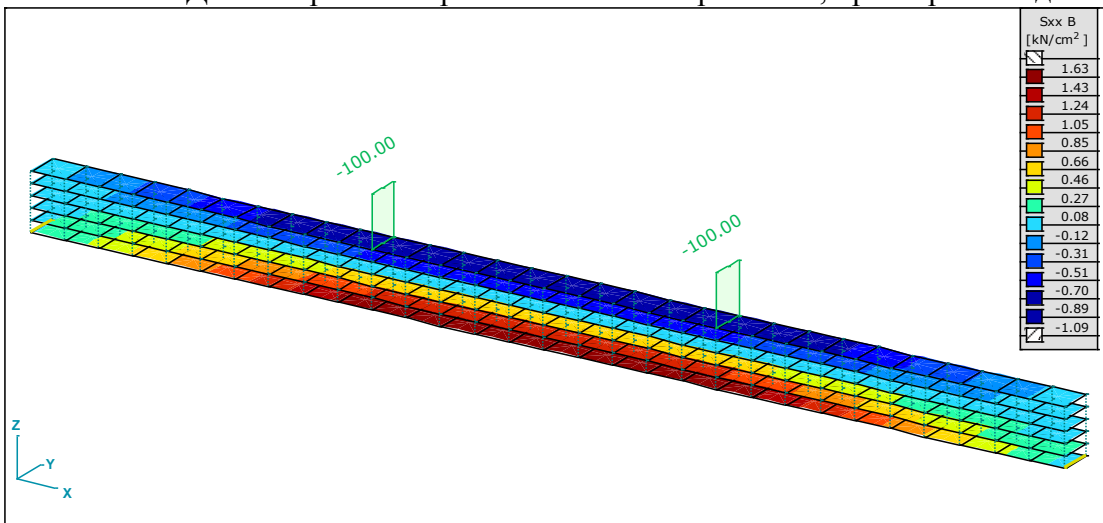
Код прорачуна угиба на средини распона неојачаних линијских модела добијене су вредности нешто мање него ако се модел посматра као просторни носач. На моделу бр. 10 прорачун угиба као линијског носача износи 14,771mm, док прорачун угиба као просторног носача износи 15,350mm. Ова разлика износи око 4%, што представља дозвољену толеранцију код прорачуна.



Слика 137. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 10

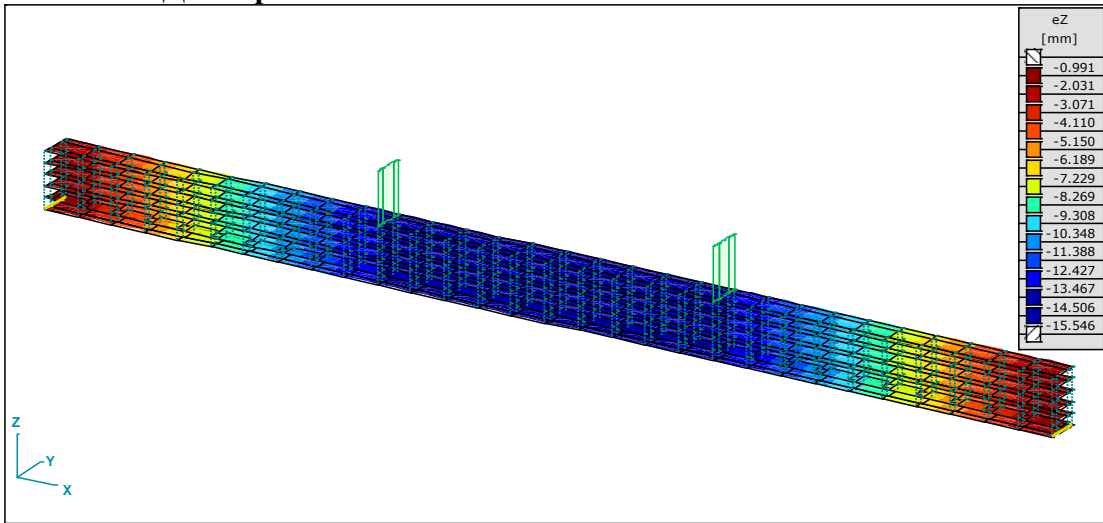


Слика 138. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 10

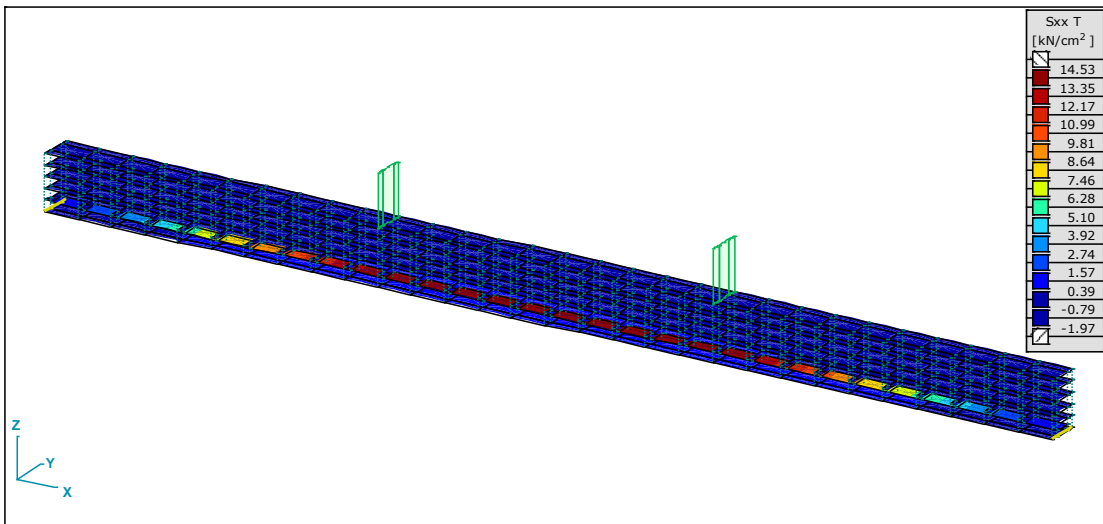


Слика 139. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 10

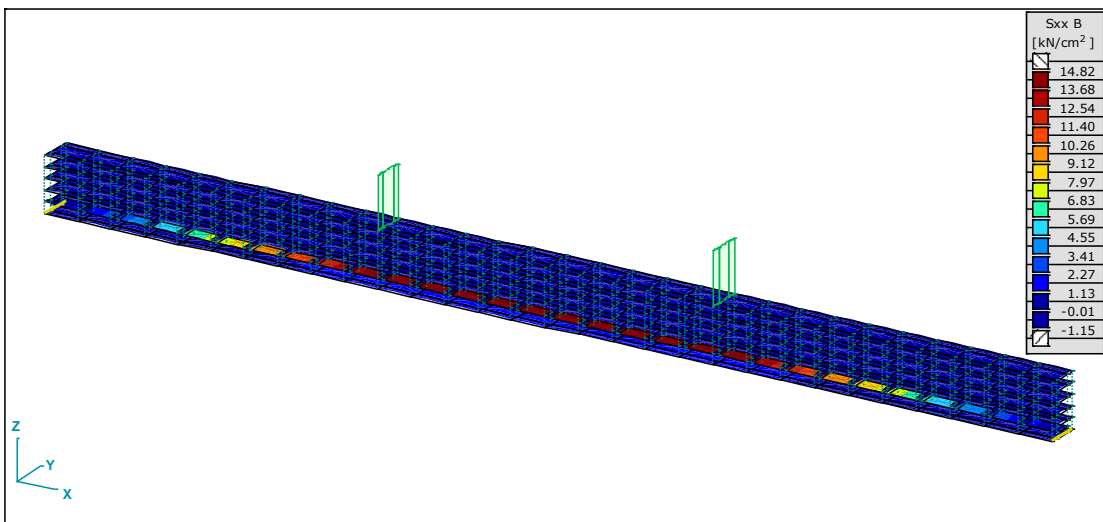
2.4.1.2. МОДЕЛ бр. 11



Слика 140. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 11

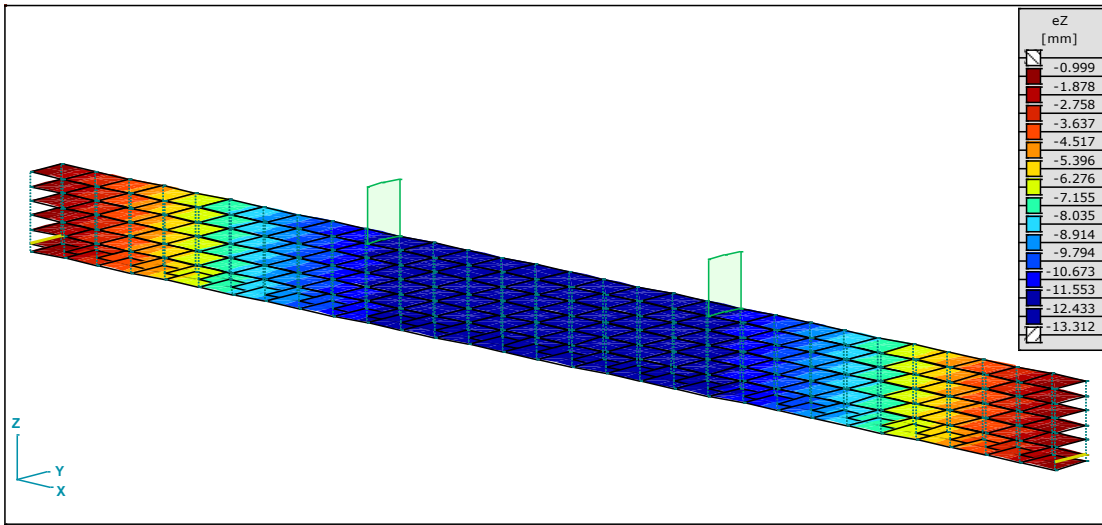


Слика 141. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 11

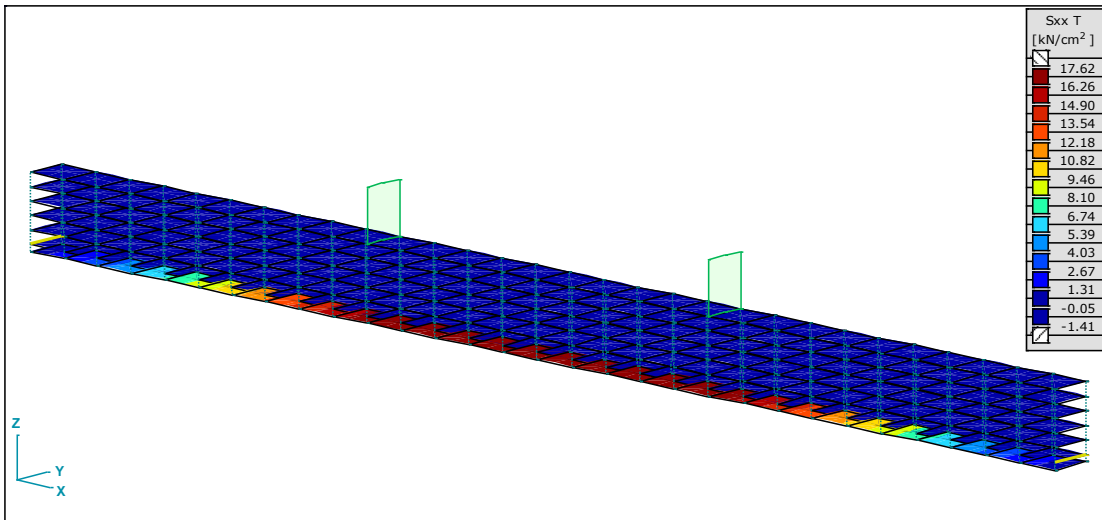


Слика 142. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 11

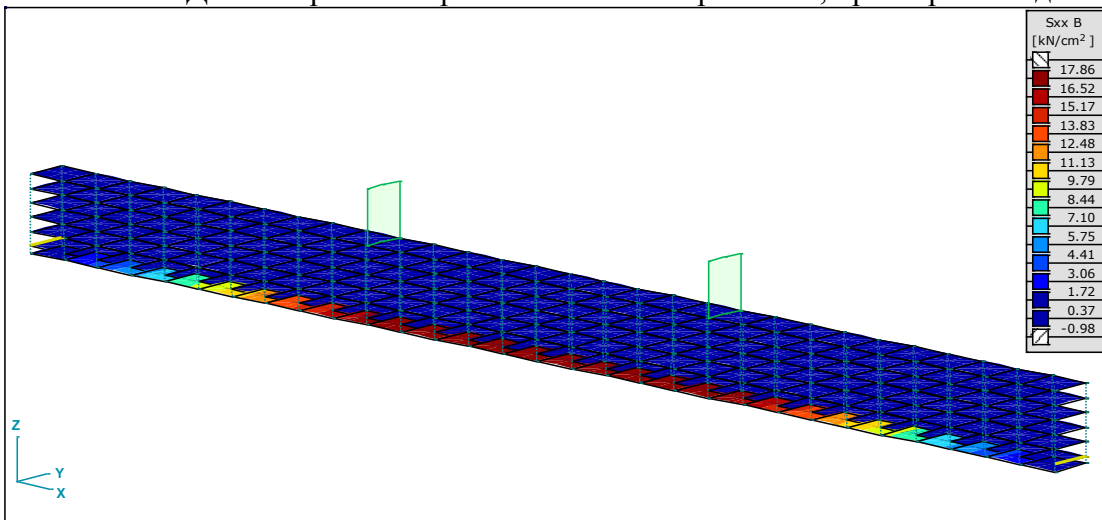
2.4.1.3. МОДЕЛ бр. 12



Слика 143. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 12



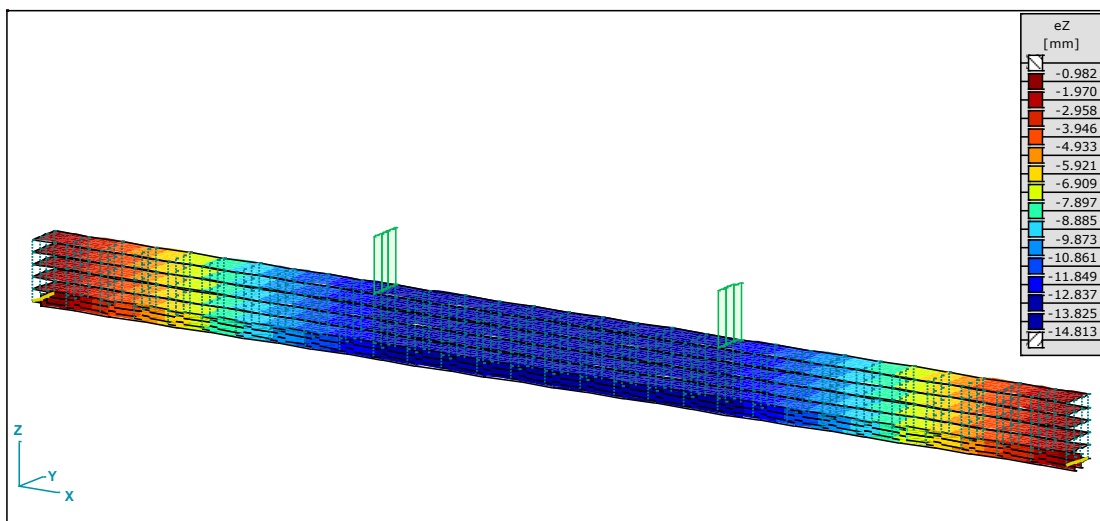
Слика 144. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 12



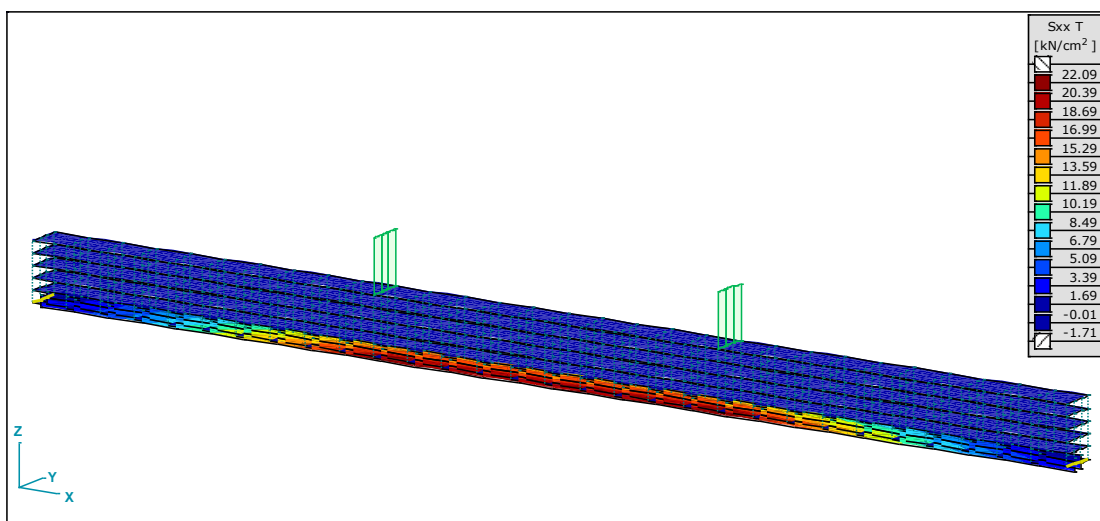
Слика 145. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 12



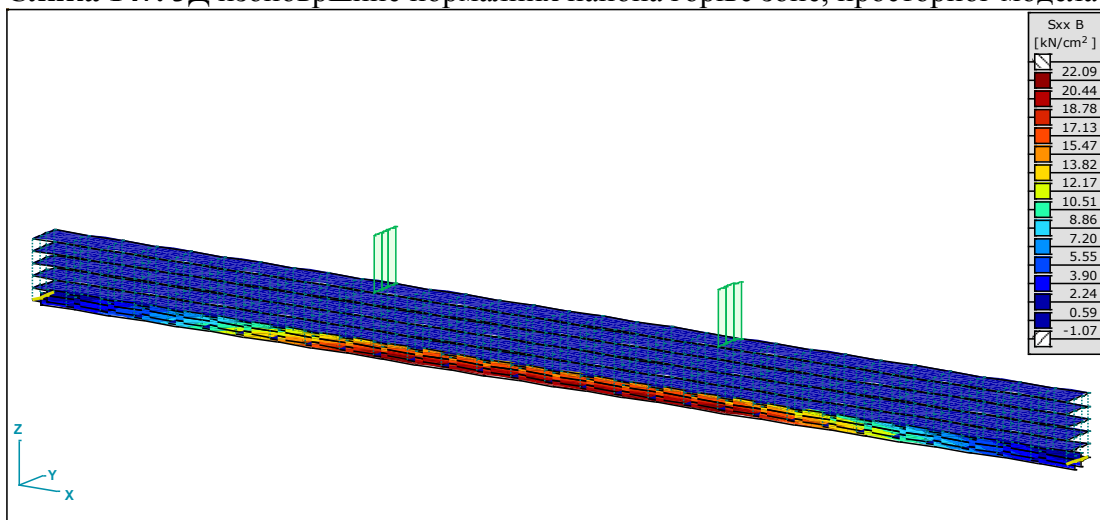
## 2.4.1.4. МОДЕЛ бр. 13



Слика 146. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 13

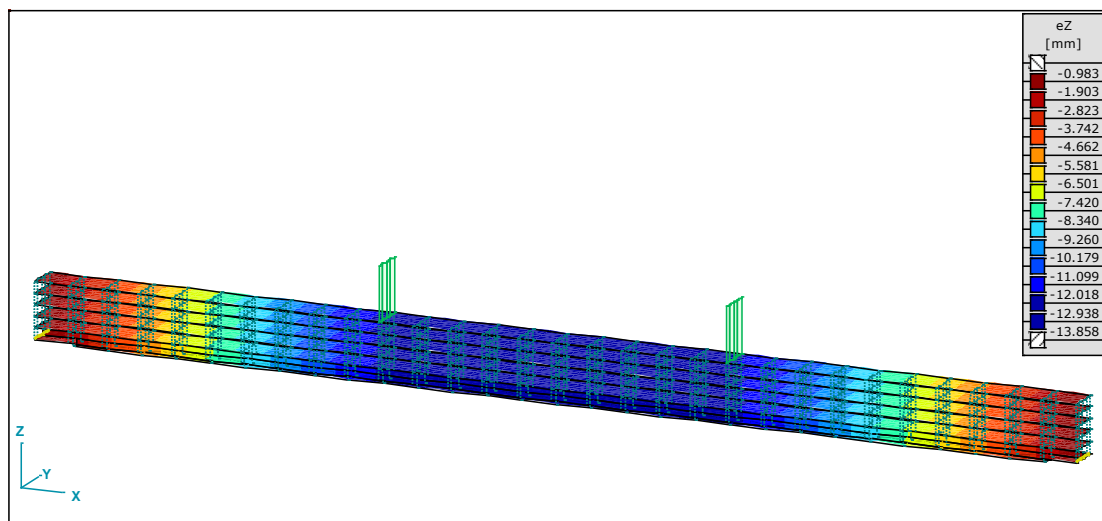


Слика 147. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 13

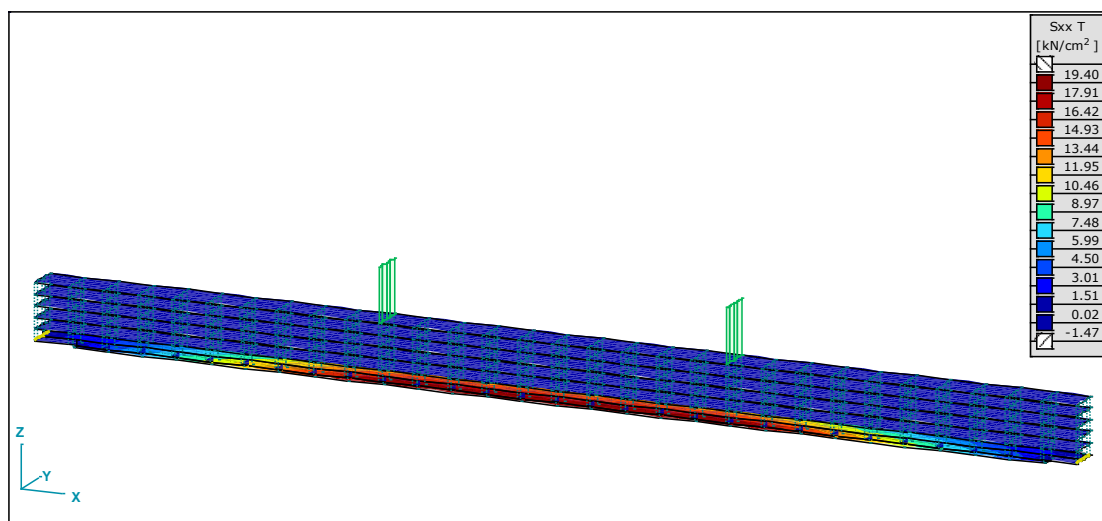


Слика 148. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр.13

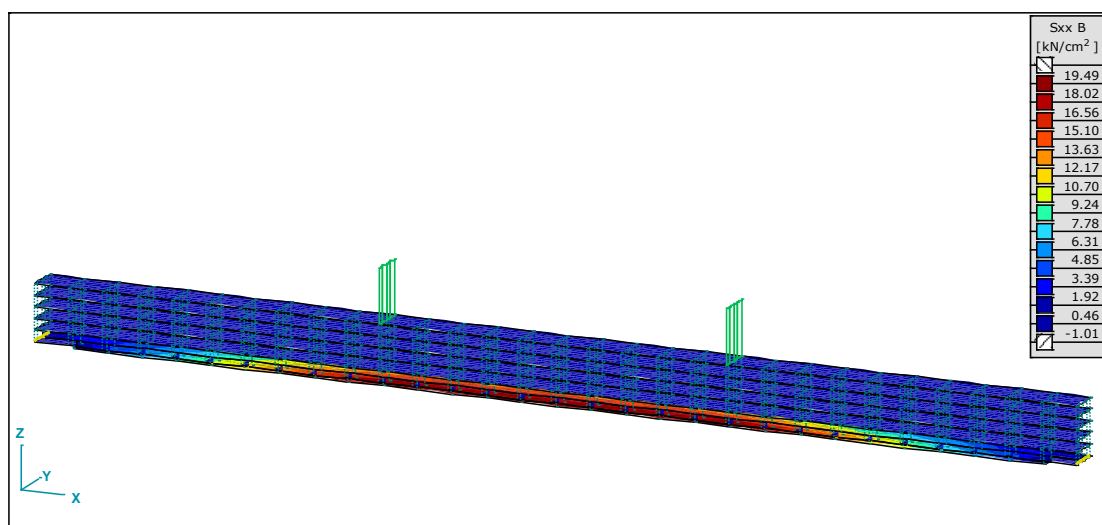
## 2.4.1.5. МОДЕЛ бр. 14



Слика 149. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 14

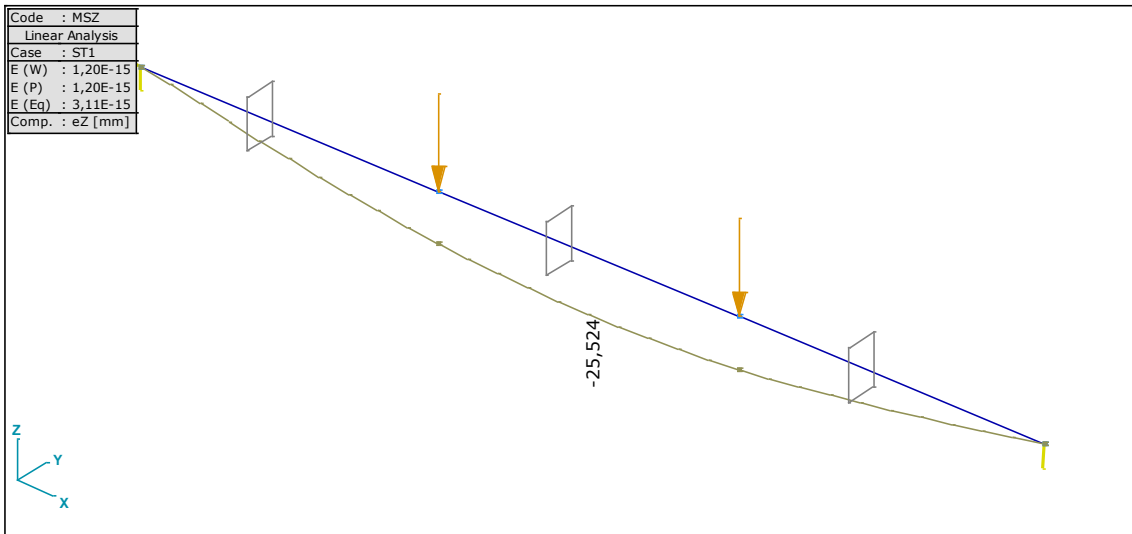


Слика 150. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 14

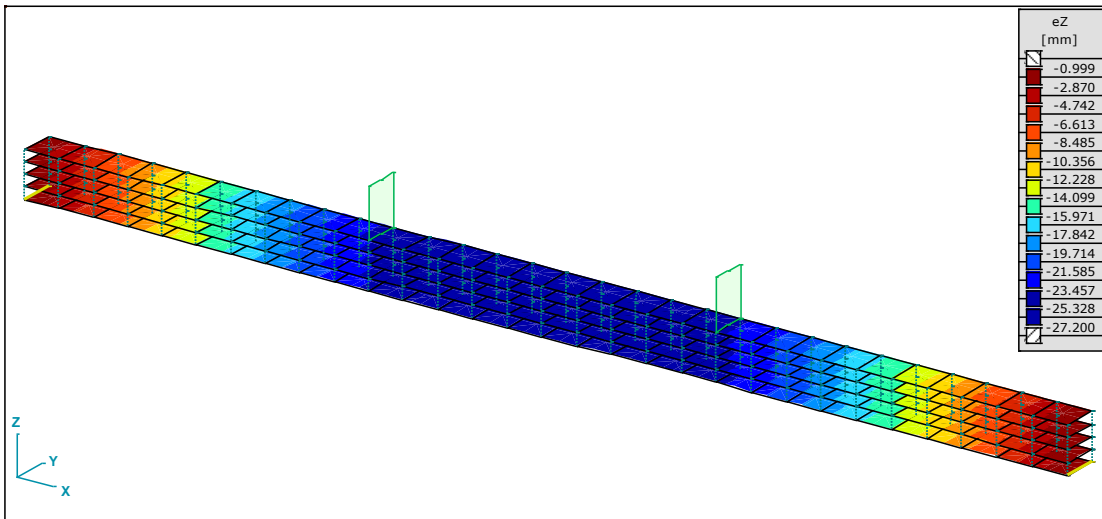


Слика 151. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 14

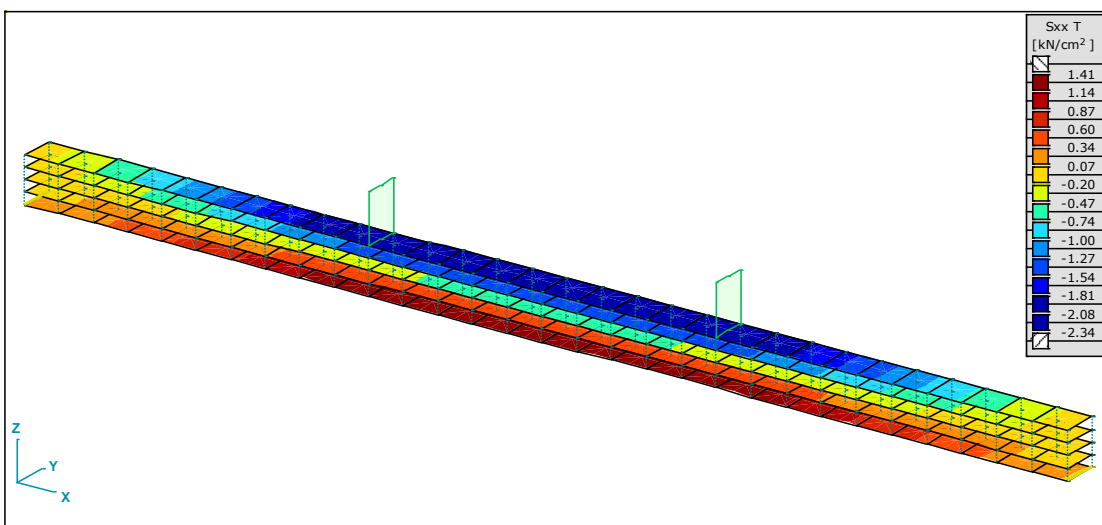
2.4.1.6. СЕРИЈА 2, МОДЕЛ бр. 20



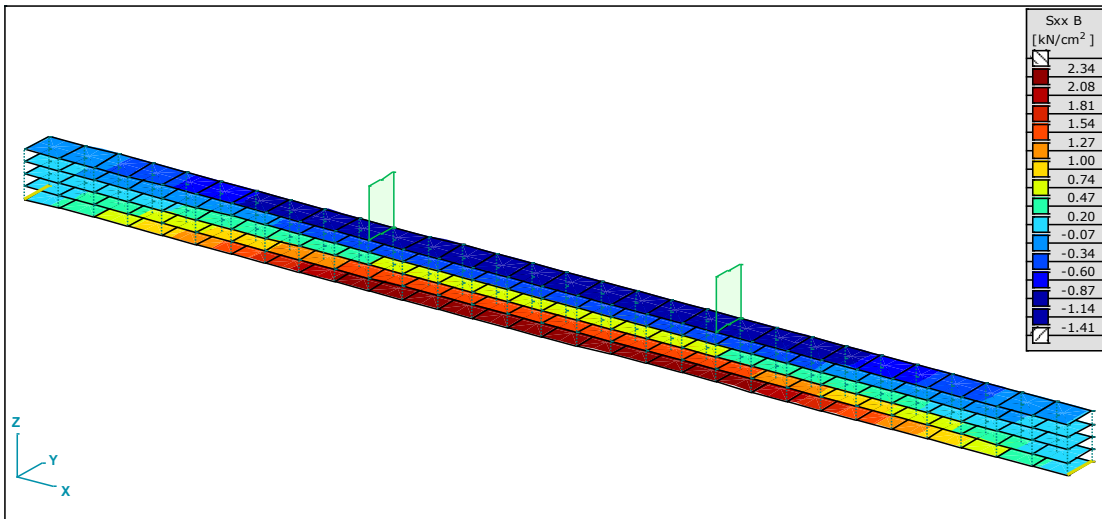
Слика 152. Еластична линија угиба модела бр. 20



Слика 153. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 20

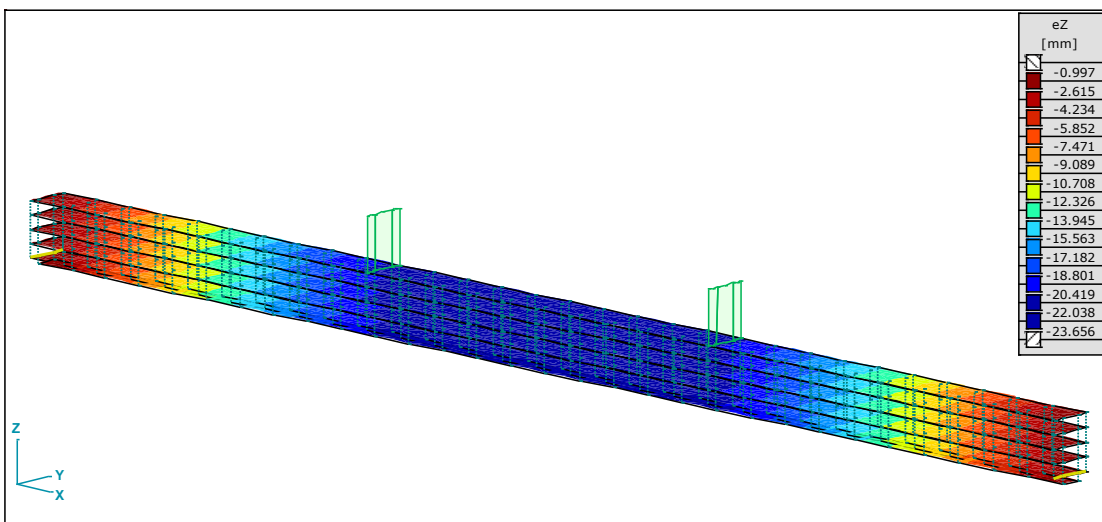


Слика 154. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 20

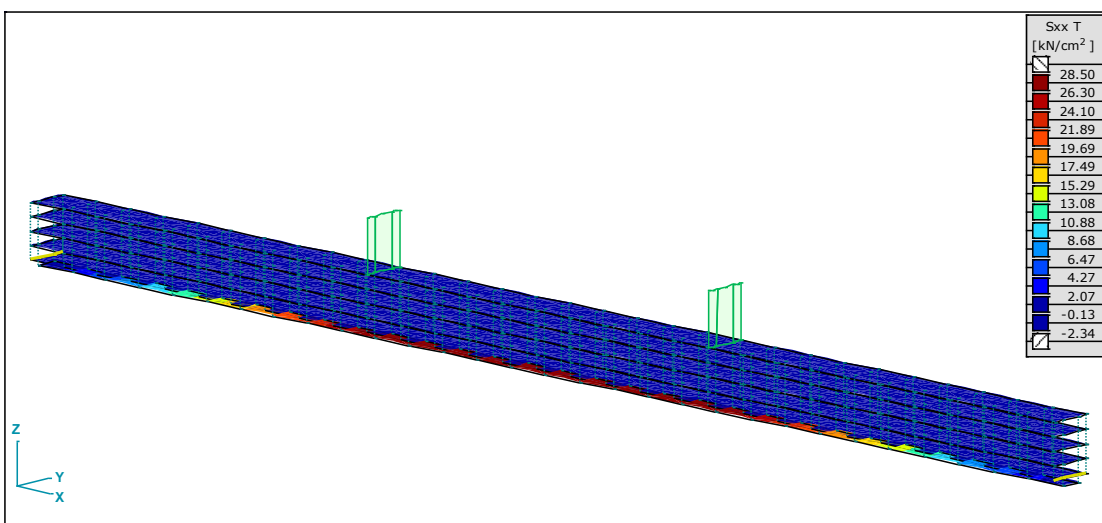


Слика 155. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 20

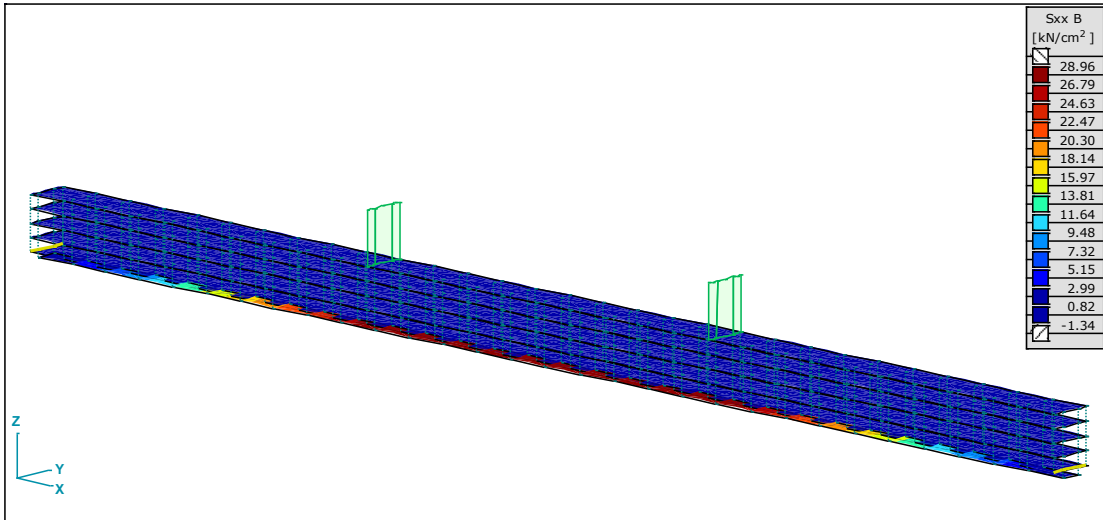
#### 2.4.1.7. МОДЕЛ бр. 21



Слика 156. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 21

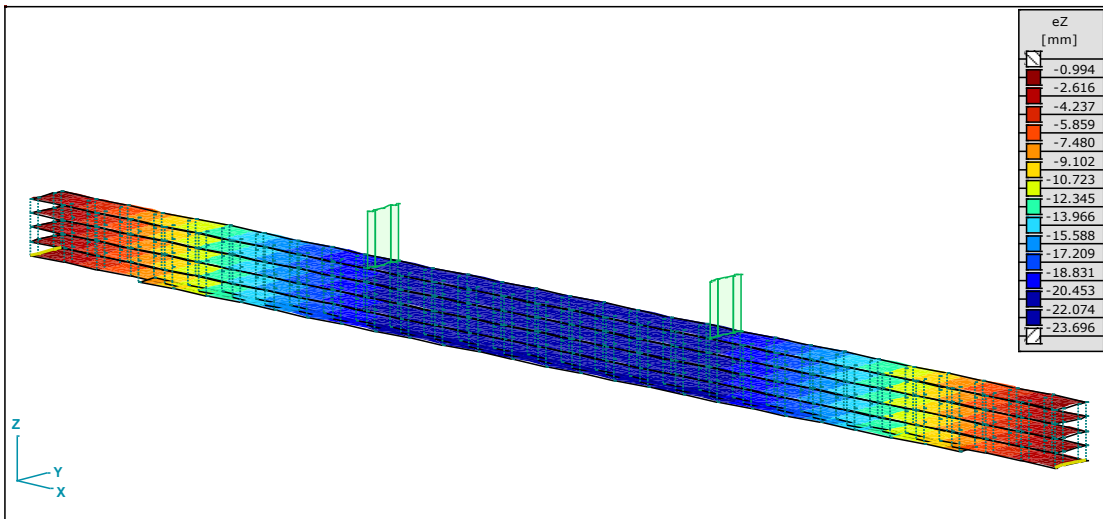


Слика 157. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 21

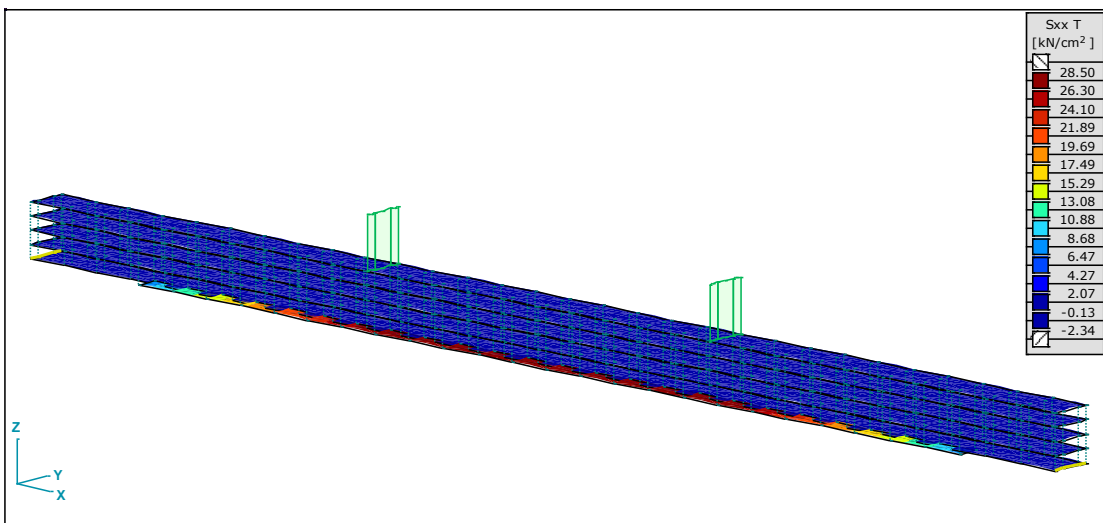


Слика 158. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 21

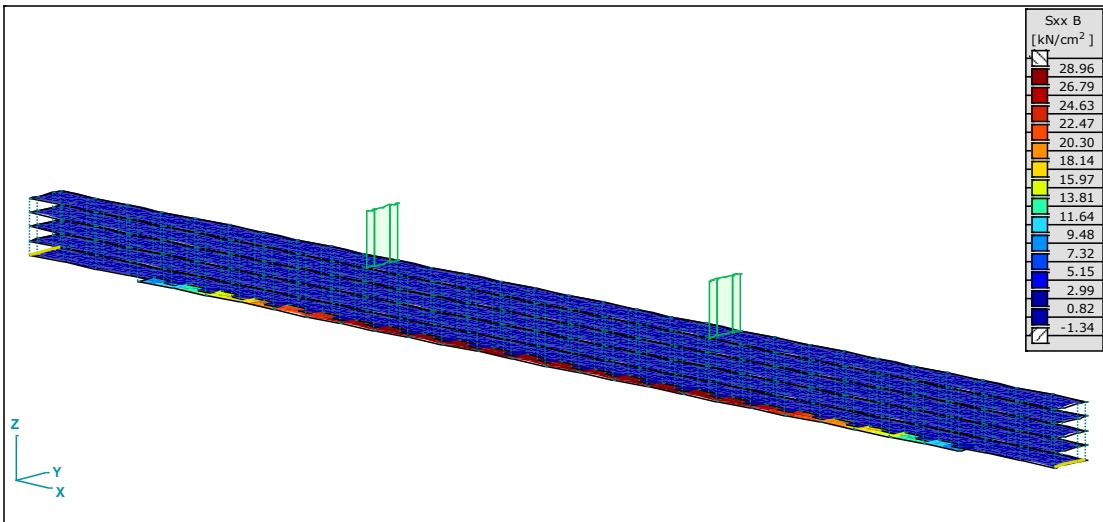
#### 2.4.1.8. МОДЕЛ бр. 22



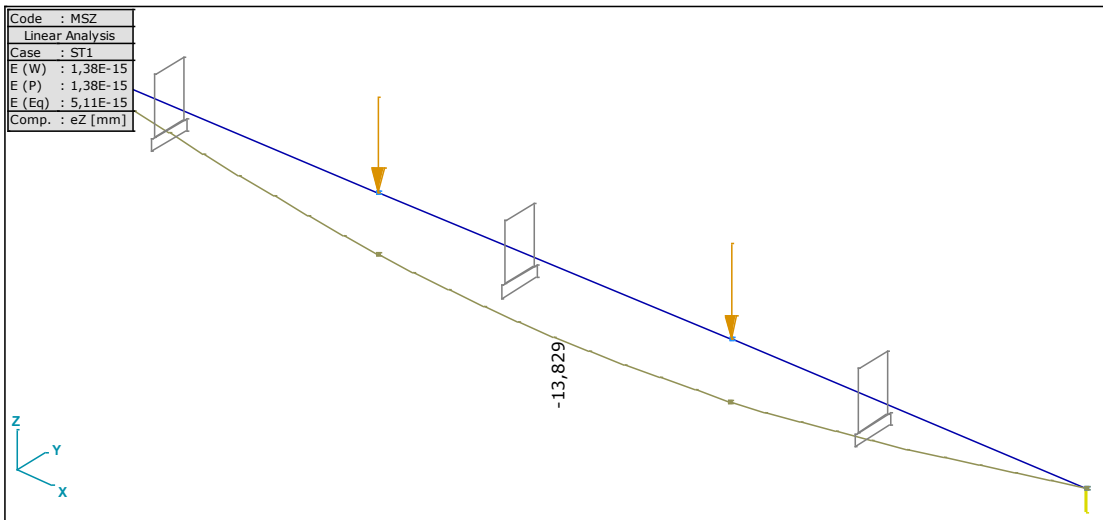
Слика 159. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 22



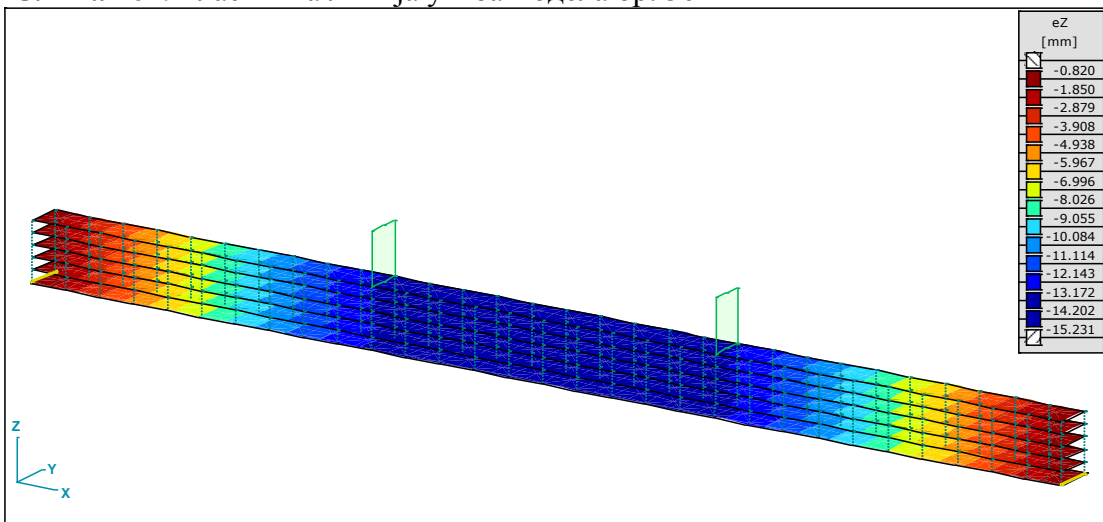
Слика 160. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 22



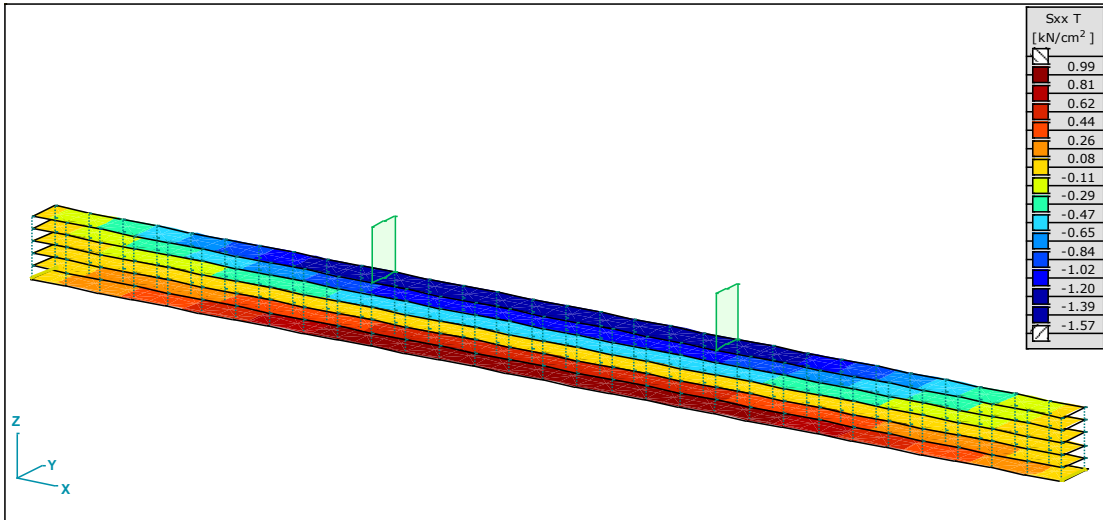
Слика 161. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 22  
2.4.1.9 СЕРИЈА 3, МОДЕЛ бр. 30



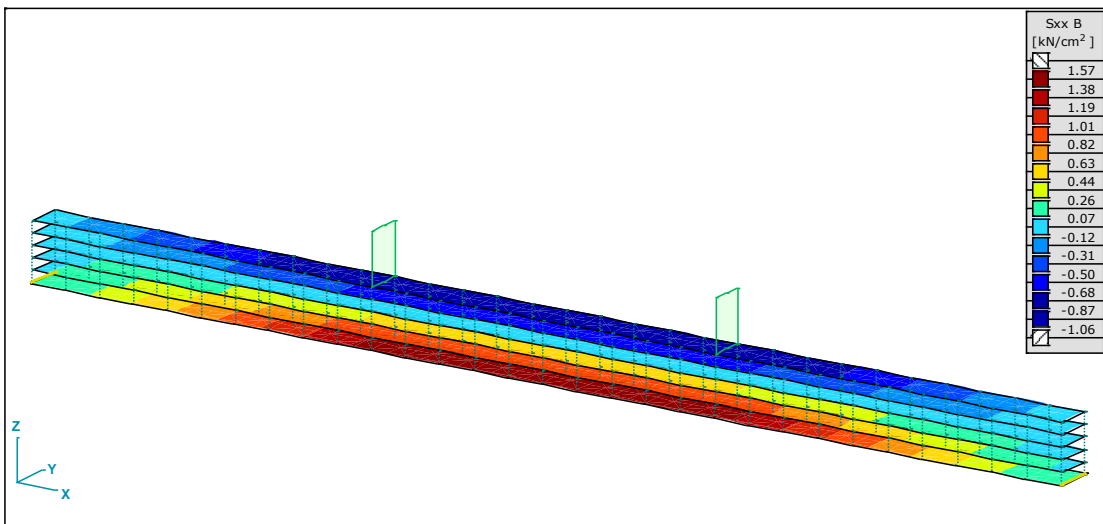
Слика 162. Еластична линија угиба модела бр. 30



Слика 163. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 30

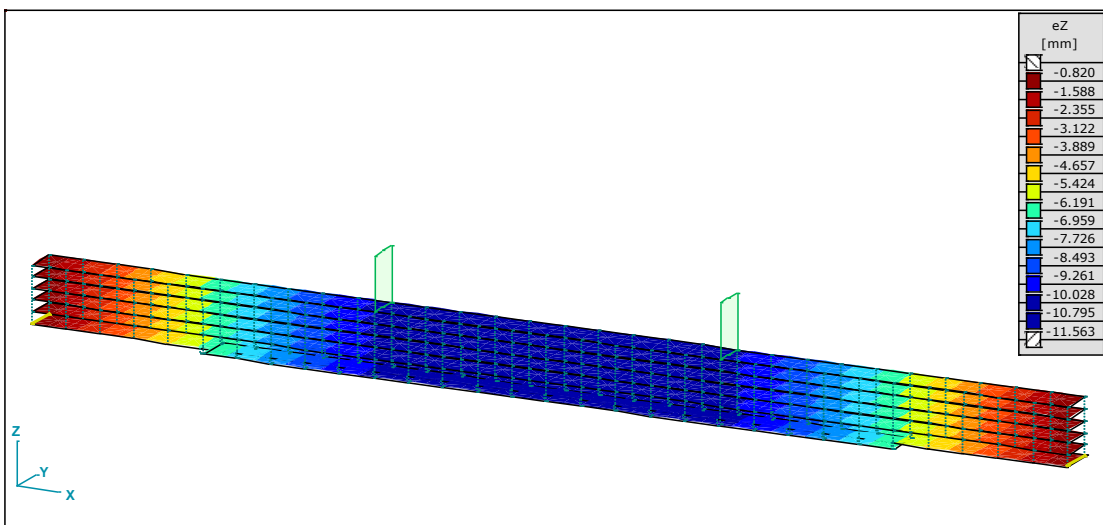


Слика 164. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 30

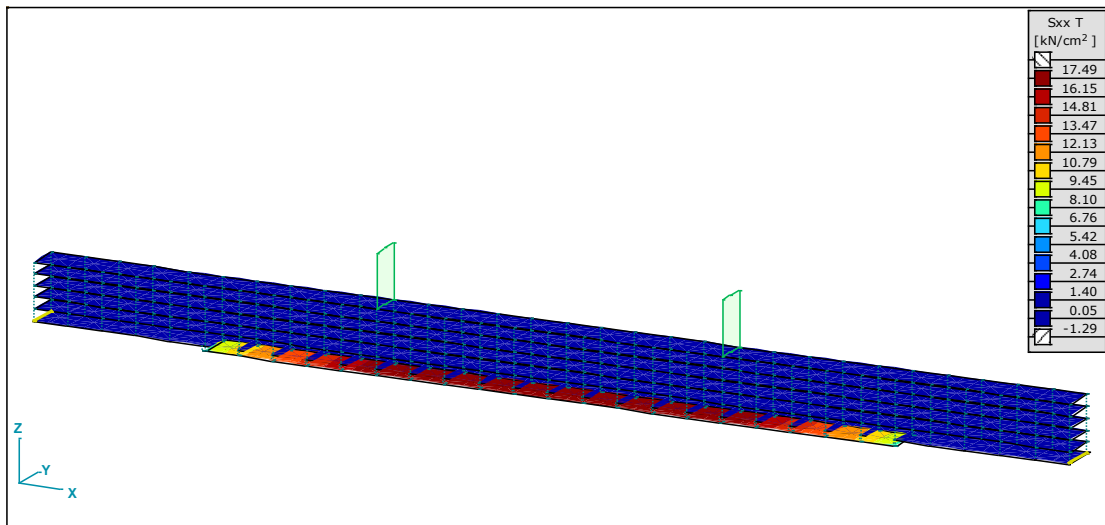


Слика 165. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 30

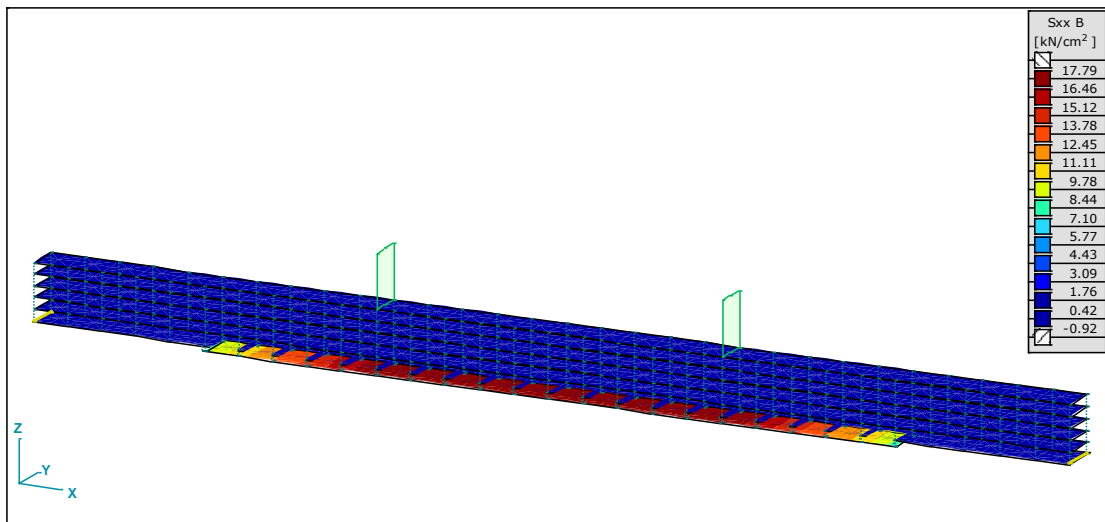
#### 2.4.1.10 МОДЕЛ бр. 31



Слика 166. 3Д изоповршине угиба просторног модела бр. 31



Слика 167. 3Д изоповршине нормалних напона горње зоне, просторног модела бр. 31



Слика 168. 3Д изоповршине нормалних напона доње зоне, просторног модела бр. 31



## 3. ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА

## 3.1. Поређење експерименталних и рачунских резултата

У овом одељку извршено је поређење свих резултата који су током рада измерени, срачунати и обрађени тако да се на основу тога могу извести важни закључци. У табели 9, прегледно су приказане мерене и рачунске вредности за угибе и напоне. Преко мерених угиба а на основу израза б.6. срачунате су крутости на савијање. У истој табели у последњој колони дата је разлика између мерених и рачунских вредности. Из тих података се може закључити да се вредности добијене на рачунском моделу у границама толеранције у односу на резултате добијене из експерименталног мерења на узорцима.

Табела 9. Упорјеђење мерених и рачунских угиба и напона и њихова разлика

ГРЕДА Бр. 10(1)		100/192 mm		неармирана		армирање 0% <sup>10</sup>					
мерење број	параметри	ознаке	мерене вредности		рачун. вред.		Крутост на савијање (kNm <sup>2</sup> )	разлике [%]			
			угиби, дилатације	напони		угиби и напони		E=1,1	E=1,6		
Сила 20kN				дрво1	дрво2	дрво1	дрво2				
IV	угиб[mm]	U <sub>3</sub>	-10,31			-16,254	-11,043	1859	58	7	
II	напон[MPa]	σ <sub>D</sub>	11,92	13,112	19,964	16,300	16,300		24	-18	
II	напон[MPa]	σ <sub>G</sub>	-11,22	-12,342	-18,791	-16,300	-16,300		32	-13	
Максим. сила 60kN			U <sub>3</sub>	<b>-44,00</b>	-39,630	38,22	<b>-48,76</b>	<b>-33,13</b>	<b>1307</b>	<b>11</b>	<b>-25</b>
	напон[MPa]	σ <sub>D</sub>		<b>42,04</b>	<b>64,01</b>	<b>48,800</b>	<b>48,800</b>		<b>16</b>	<b>-24</b>	
	напон[MPa]	σ <sub>G</sub>		<b>-43,59</b>	<b>-66,37</b>	<b>-48,800</b>	<b>-48,800</b>		<b>12</b>	<b>-26</b>	

ГРЕДА Бр. 11(3)		100/192 mm		CarboDur S512, l=3200 mm		armiranje 0,312% <sup>11</sup>					
мерење број	параметри	ознаке	мерене вредности		рачун. вред.		Крутост на савијање (kNm <sup>2</sup> )	разлике [%]			
			угиби, дилатације	напони		угиби и напони		E=1,1	E=1,6		
Сила 20kN				дрво1	дрво2	дрво1	дрво2				
I	угиб[mm]	U <sub>3</sub>	-10,285			-15,324	-10,609	1864	49	3	
I	напон[MPa]	σ <sub>D</sub>	9,900	10,890	16,581	14,900	15,300		37	-8	
I	напон[MPa]	σ <sub>G</sub>	-9,440	-10,384	-15,810	-15,800	-16,000		52	1	
Максим. сила 50kN			U <sub>3</sub>	<b>-38,480</b>	-25,07	24,770	<b>-38,310</b>	<b>-26,525</b>	<b>1245</b>	<b>-0,4</b>	<b>-31</b>
	напон[MPa]	σ <sub>D</sub>		<b>27,25</b>	<b>41,48</b>	<b>37,300</b>	<b>38,300</b>		<b>37</b>	<b>-8</b>	
	напон[MPa]	σ <sub>G</sub>		<b>-27,58</b>	<b>-41,99</b>	<b>-39,500</b>	<b>-39,900</b>		<b>43</b>	<b>-5</b>	

ГРЕДА Бр. 12(4)		100/192 mm		CarboDur S1012, l=3200 mm		armiranje 0,625 % <sup>12</sup>				
мерење број	параметри	ознаке	мерене вредности		рачун. вред.		Крутост на савијање (kNm <sup>2</sup> )	разлике [%]		
			угиби, дилатације	напони		угиби и напони		E=1,1	E=1,6	
Сила 20kN				дрво1	дрво2	дрво1	дрво2			
I	угиб[mm]	U <sub>3</sub>	-9,250			-13,150	-9,550	2072	42	3
I	напон[MPa]	σ <sub>D</sub>	8,980	9,878	15,040	11,900	13,100		20	-13
I	напонS[MPa]	σ <sub>D</sub>		148,170		177,600	128,900		20	-13

I	напон[MPa]	$\sigma_G$	-10,140	-11,154	-16,982	-14,100	-14,700		26	-13
Максим. сила 65kN		$U_3$	-42,800	-34,00	30,950	<b>-42,540</b>	<b>-31,030</b>	<b>1455</b>	-0,6	-28
	напон[MPa]	$\sigma_D$		<b>34,05</b>	<b>51,84</b>	<b>38,700</b>	<b>42,600</b>		14	-18
	напонS[MPa]	$\sigma_D$		<b>561,00</b>	<b>561,00</b>	<b>577,300</b>	<b>418,800</b>		3	-25
	напон[MPa]	$\sigma_G$		<b>-37,40</b>	<b>-56,94</b>	<b>-45,700</b>	<b>-47,700</b>		22	-16

## ГРЕДА Бр. 13(2) 100/192 mm

armiranje 0,400 %  
2x1/2 (2x1/3CarboDur S1012), l=3200 mm

13

мерење број	параметри	ознаке	мерене вредности		рачун. вред.		Крутост на савијање (kNm <sup>2</sup> )	разлике [%]		
			угиби, дилатације	напони	угиби и напони			E=1,1	E=1,6	
Сила 20kN			дрво1	дрво2	дрво1	дрво2				
I	угиб[mm]	$U_3$	-11,635		-14,610	-10,289	1647	26	-12	
I	напон[MPa]	$\sigma_D$	16,230	17,853	27,182	13,900	14,600	-22	-46	
I	напон[MPa]	$\sigma_G$	-10,040	-11,044	-16,815	-15,200	-15,500	38	-8	
Максим. сила 40kN		$U_3$	-29,000	-21,37	21,800	<b>-29,224</b>	<b>-20,578</b>	<b>1322</b>	0,8	-29
I	напон[MPa]	$\sigma_D$		<b>23,98</b>	<b>36,51</b>	<b>27,700</b>	<b>29,200</b>		16	-20
I	напон[MPa]	$\sigma_G$		<b>-23,51</b>	<b>-35,79</b>	<b>-30,400</b>	<b>-31,100</b>		29	-13

## ГРЕДА Бр. 14(5) 100/192 mm

armiranje 0,5125 %  
(1/3CarboDur S1012, l=3200mm+CarboDur S512, l=2800 mm)

14

мерење број	параметри	ознаке	мерене вредности		рачун. вред.		Крутост на савијање (kNm <sup>2</sup> )	разлике [%]		
			угиби, дилатације	напони	угиби и напони			E=1,1	E=1,6	
Сила 20kN			дрво1	дрво2	дрво1	дрво2				
I	угиб[mm]	$U_3$	-9,390		-13,645	-9,770	2041	45	4	
I	напон[MPa]	$\sigma_D$	9,560	10,516	16,011	12,700	13,800	21	-14	
I	напонS[MPa]	$\sigma_D$		157,74		192,40	136,50	21,97	-13,47	
I	напон[MPa]	$\sigma_G$	-8,130	-8,943	-13,616	-14,600	-15,100	63	11	
Максим. сила 55kN		$U_3$	-38,000	-20,85	28,320	<b>-37,518</b>	<b>-26,875</b>	<b>1387</b>	-1,3	-29
I	напон[MPa]	$\sigma_D$		<b>31,15</b>	<b>47,43</b>	<b>35,000</b>	<b>37,9</b>		12	-20
I	напонS[MPa]	$\sigma_D$		<b>344,03</b>	<b>344,03</b>	<b>529,200</b>	<b>375,4</b>		54	9
I	напон[MPa]	$\sigma_G$		<b>-22,94</b>	<b>-34,92</b>	<b>-40,100</b>	<b>-41,5</b>		75	19

## ГРЕДА Бр. 20(6) 100/160 mm

неармирана армирање 0 %

20

мерење број	параметри	ознаке	мерене вредности		рачун. вред.		Крутост на савијање (kNm <sup>2</sup> )	разлике [%]		
			угиби, дилатације	напони	угиби и напони			E=1,1	E=1,6	
Сила 20kN			дрво1	дрво2	дрво1	дрво2				
I	угиб[mm]	$U_3$	-16,77		-27,058	-18,136	1143	61	8	
I	напон[MPa]	$\sigma_D$	9,08	9,988	15,207	23,400	23,400	134	54	
I	напон[MPa]	$\sigma_G$	-14,72	-16,192	-24,653	-23,400	-23,400	45	-5	
Максим. сила 43kN		$U_3$	-61,89	-27,85	0,00	<b>-58,18</b>	<b>-38,99</b>	<b>666</b>	-6	-37
I	напон[MPa]	$\sigma_D$		<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>50,400</b>	<b>50,4</b>			
I	напон[MPa]	$\sigma_G$		<b>-30,64</b>	<b>-46,64</b>	<b>-50,400</b>	<b>-50,4</b>		65	8

ГРЕДА Бр. 21(8) 100/160 mm CarboDur S512, l=3200 mm armiranje 0,3750 %

мерење број	параметри	ознаке	мерене вредности		рачун. вред.		Крутост на савијање (kNm <sup>2</sup> )	разлике [%]			
			угиби, дилатације	напони		угиби и напони		E=1,1	E=1,6		
Сила 20kN				дрво1	дрво2	дрво1	дрво2				
I	угиб[mm]	U <sub>3</sub>	-18,080			-23,440	-16,460	1060	30	-9	
I	напон[MPa]	σ <sub>D</sub>	17,200	18,920	28,807	19,100	20,400		1	-29	
I	напонS[MPa]	σ <sub>D</sub>		283,800		288,500	202,300		2	-29	
I	напон[MPa]	σ <sub>G</sub>				-21,300	-21,900				
Максим. сила 40kN			U <sub>3</sub>	-54,000	0,00	25,500	<b>-46,888</b>	<b>-32,920</b>	<b>710</b>	-13	-39
I	напон[MPa]	σ <sub>D</sub>		<b>28,05</b>	<b>42,71</b>	<b>38,100</b>	<b>40,7</b>		36	-5	
I	напонS[MPa]	σ <sub>D</sub>		<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>576,900</b>	<b>404,6</b>				
I	напон[MPa]	σ <sub>G</sub>		<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-42,500</b>	<b>-43,8</b>				

ГРЕДА Бр. 22(9) 100/160mm CarboDur S512, l=2470 mm armiranje 0,3750 %

мерење број	параметри	ознаке	мерене вредности		рачун. вред.		Крутост на савијање (kNm <sup>2</sup> )	разлике [%]			
			угиби, дилатације	напони		угиби и напони		E=1,1	E=1,6		
Сила 20kN				дрво1	дрво2	дрво1	дрво2				
I	угиб[mm]	U <sub>3</sub>	-13,595			-23,484	-16,479	1410	73	21	
I	напон[MPa]	σ <sub>D</sub>	12,050	13,255	20,181	19,100	20,400		44	1	
I	напонS[MPa]	σ <sub>D</sub>		198,825		288,500	202,300		45	2	
I	напон[MPa]	σ <sub>G</sub>	-12,330	-13,563	-20,650	-21,300	-21,900		57	6	
Максим. сила 44kN			U <sub>3</sub>	-41,070	-30,74	35,110	<b>-51,665</b>	<b>-36,254</b>	<b>1027</b>	26	-12
I	напон[MPa]	σ <sub>D</sub>		<b>38,62</b>	<b>58,80</b>	<b>41,900</b>	<b>44,80</b>		8	-24	
I	напонS[MPa]	σ <sub>D</sub>		<b>507,21</b>	<b>507,21</b>	<b>634,600</b>	<b>445,00</b>		25	-12	
I	напон[MPa]	σ <sub>G</sub>		<b>-33,81</b>	<b>-51,48</b>	<b>-46,800</b>	<b>-48,20</b>		38	-6	

ГРЕДА Бр. 30 100/160+120/32 mm неармирана армирање 0 %

мерење број	параметри	ознаке	мерене вредности		рачун. вред.		Крутост на савијање (kNm <sup>2</sup> )	разлике [%]		
			угиби, дилатације	напони		угиби и напони		E=1,1	E=1,6	
Сила 20kN				дрво1	дрво2	дрво1	дрво2			
	угиб[mm]	U <sub>3</sub>				-15,106	-10,232			
	напон[MPa]	σ <sub>D</sub>				14,800	14,800			
	напон[MPa]	σ <sub>G</sub>				-15,600	-15,600			
Максим. сила 55kN			U <sub>3</sub>			-41,510	-28,136			
	напон[MPa]	σ <sub>D</sub>				40,800	40,800			
	напон[MPa]	σ <sub>G</sub>				-43,000	-43,000			

ГРЕДА Бр. 31(7)

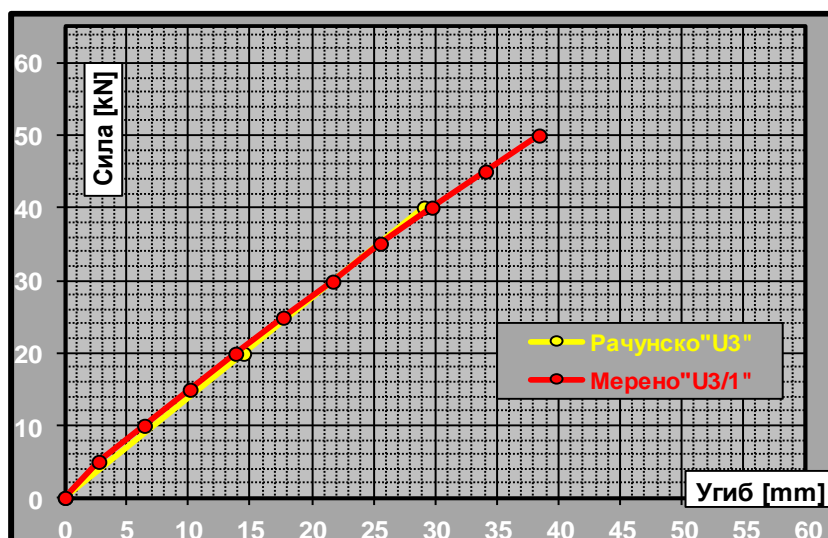
100/160+120/32 mm

CarboDur M1214, l=2020 mm

armiranje 0,8470 %

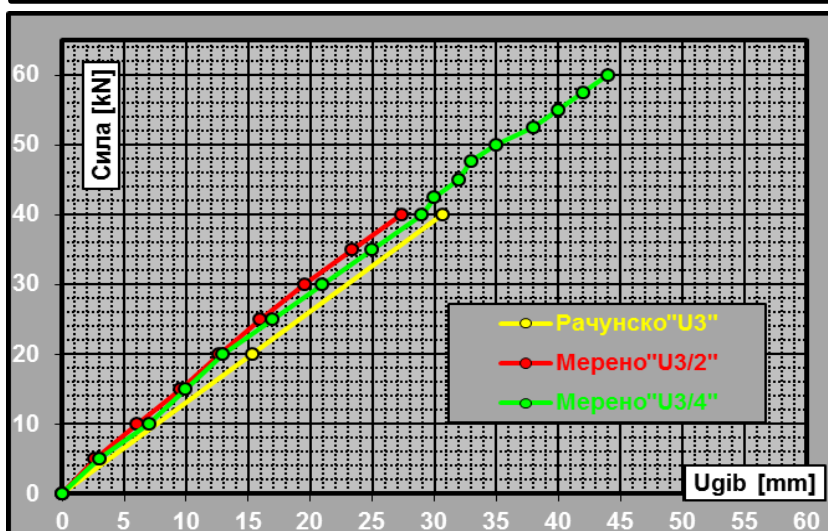
мерење број	параметри	ознаке	мерене вредности			рачун. вред.		Крутост на савијање (kNm <sup>2</sup> )	разлике [%]		
			угиби, дилатације	напони		угиби и напони			E=1,1	E=1,6	
Сила 20kN				дрво1	дрво2	дрво1	дрво2				
I	угиб[mm]	U <sub>3</sub>	-7,555			-11,402	-8,390	2537	51	11	
II	напон[MPa]	σ <sub>D</sub>	7,890	8,679	13,214	9,400	10,800		8	-18	
II	напонM[MPa]	σ <sub>D</sub>		165,690		176,500	133,200		7	-20	
II	напон[MPa]	σ <sub>G</sub>	-6,380	-7,018	-10,685	-12,800	-13,500		82	26	
Максим. сила 55kN			U <sub>3</sub>	-33,260	-14,17	21,410	<b>-31,360</b>	<b>-23,070</b>	<b>1585</b>	-6	-31
II	напон[MPa]	σ <sub>D</sub>		<b>23,55</b>	<b>35,86</b>	25,900	29,600		10	-17	
II	напонM[MPa]	σ <sub>D</sub>		<b>297,57</b>	<b>297,57</b>	<b>485,300</b>	<b>366,400</b>		63	23	
II	напон[MPa]	σ <sub>G</sub>		<b>-15,59</b>	<b>-23,73</b>	<b>-35,300</b>	<b>-37,200</b>		126	57	

Поређење угиба мерених и рачунских вредности за сваки узорак/модел приказано је на сликама 169-177, ако се узме дрво класа GL 24(Табела 3). Криве добијене на основу мерених вредности угиба стрмије су од рачунских вредности, а у неким случајевима се и поклапају. Дијаграми рачунских угиба су дати за две карактеристичне тачке у еластичној области.



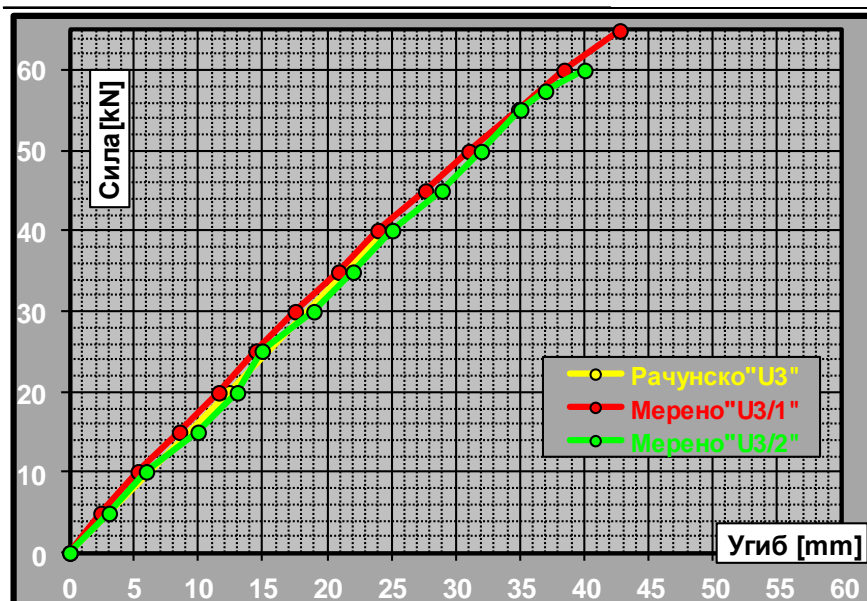
Слика 169.

Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак 10, серије 1



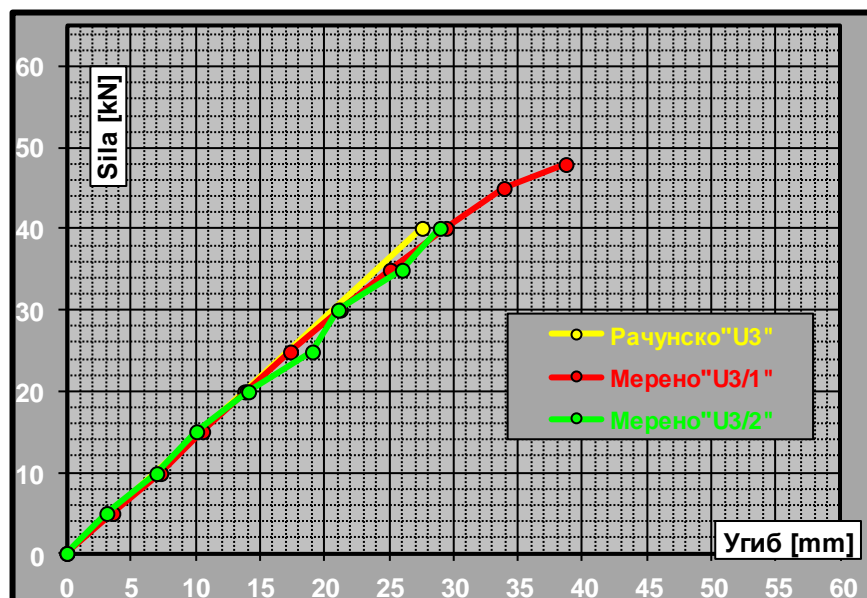
Слика 170.

Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак 11, серије 1



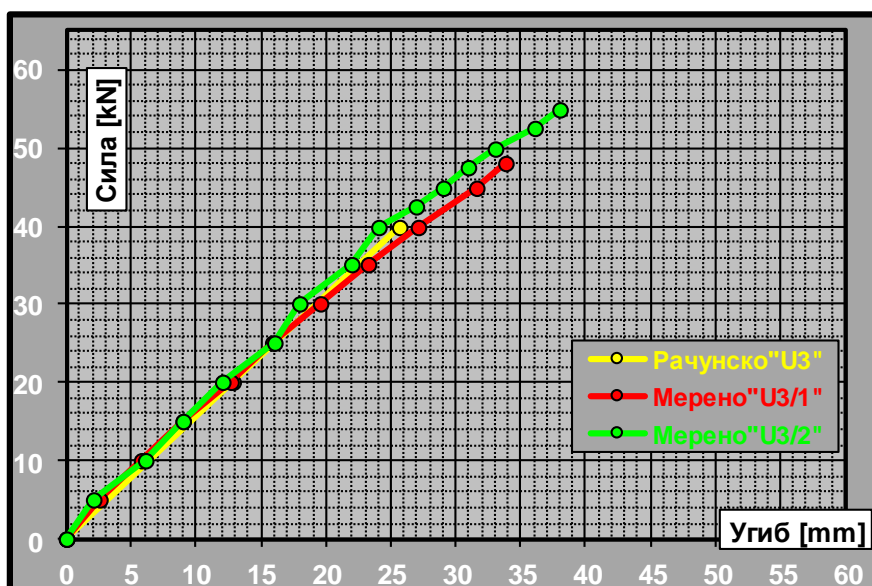
Слика 171.

Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак 12, серије 1



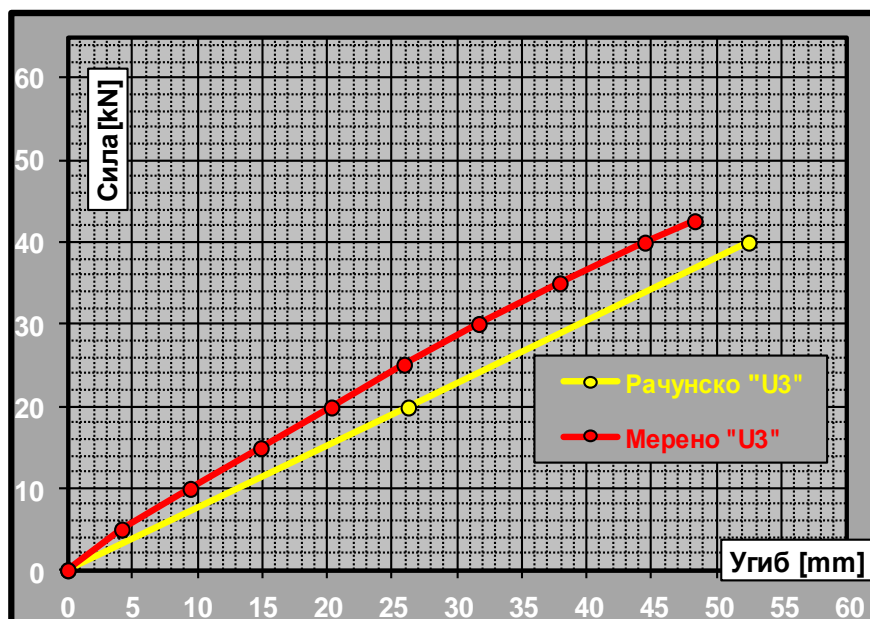
Слика 172.

Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак 13, серије 1



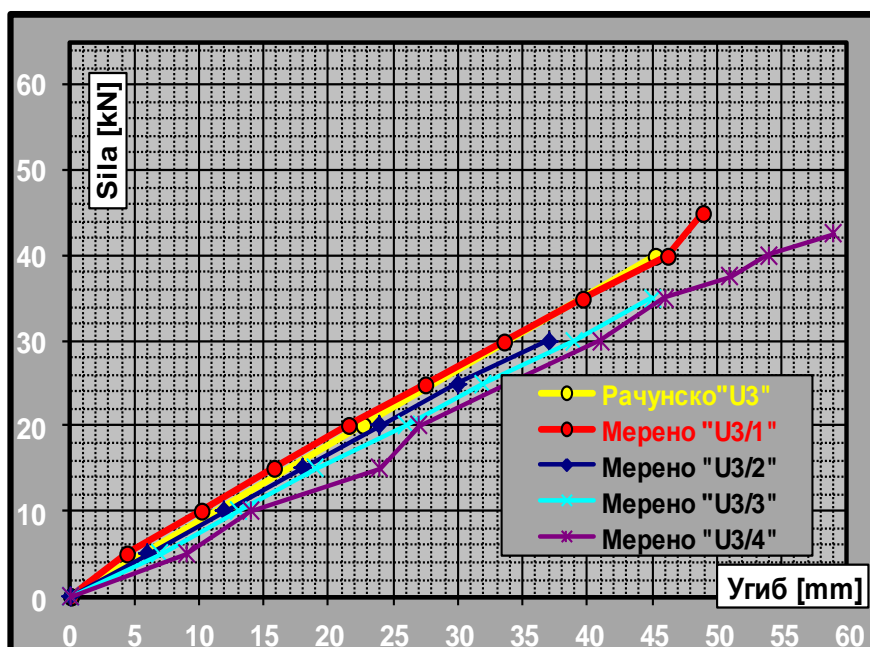
Слика 173.

Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак 14, серије 1



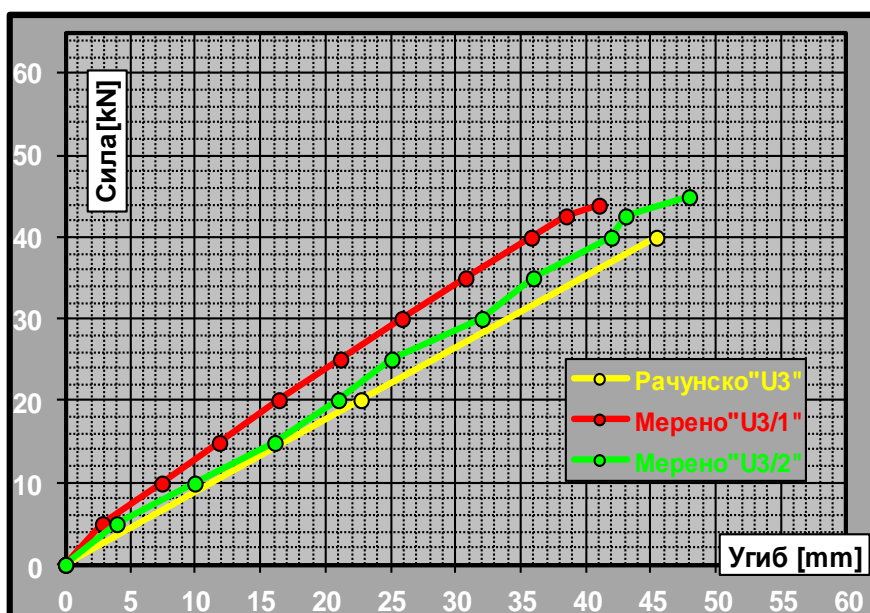
Слика 174.

Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак 20, серије 2



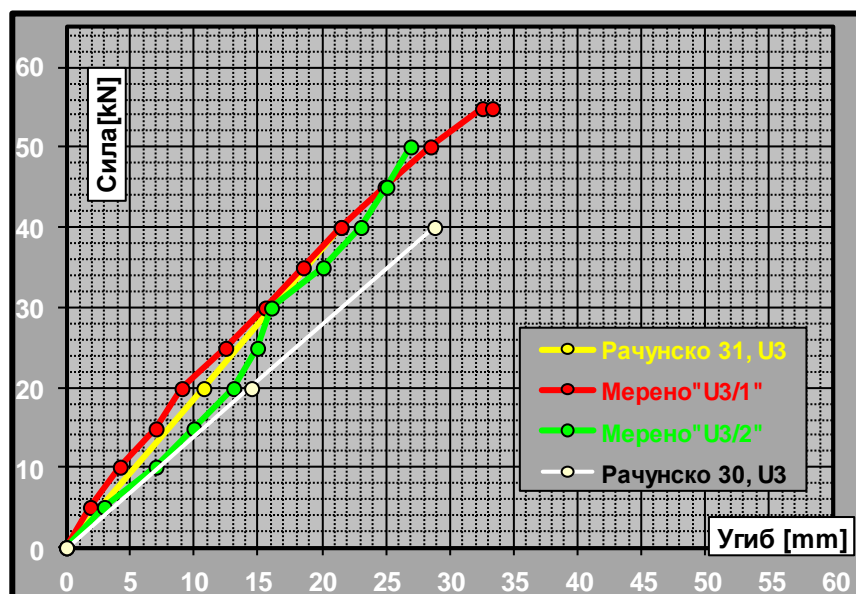
Слика 175.

Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак 21, серије 2



Слика 176.

Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак 22, серије 2



Слика 177.

Мерени и рачунски угиби на средини греде, узорак 30 и узорак 31, серије 3

### 3.2. Анализа механизма лома узорака

Циљ експерименталног исраживања на узорцима јесте да се проучи њихово понашање у току излагања краткотрајном оптерећењу. Из тог разлога се оптерећење више пута наносило, тако да силе не изазову велике деформације и да се при сваком мерењу може вршити упоређење. Када је утврђено стање угиба и дилатација при дејству сила истих вредности, онда се приступало повећању силе све док се нису догодиле трајне деформације, или оштећења видљива на површини узорка. Појава лома се догодила у пет описаних случајева (поглавље 2.3.4.3.1) Неки од добијених резултата били су очекивани [18], а неки су довели до нових закључака.

Да би се од почетка испитивања узорка могла пратити појава очекиваних и неочекиваних вредности, било је потребно да се пре ипитивање узорка изврши анализа понашања употребљеног материјала и да се теоријски прорачуна угиб и изврши контрола на избочавање. При одабиру угибомера и опреме за унос силе коришћена је претходно срачуната максимална вредност угиба.

Добијене мерене вредности угиба су мање од срачунатих, ако се рачуна са стандардним модулом еластичности. Међутим, ако се угиби срачунају са модулом еластичности добијеном у оквиру ових испитивања, тада се мерене и рачунске вредности готово идеално поклапају. Дешавало се да се на већини узорака и при повећању оптерећења пре било каквог лома у носачу догађало избочавање греде. Због ове појаве, експеримент је понављан више пута, уз стално подешавање опреме за оптерећење и пажљиво праћење бочног витоперења пресека. Избочавање или имперфекција се догађа због несавршености израде узорка, због неравномерног гњечења влакана на месту уноса силе и код ослонаца. Запажено је да се

препуштањем FRP траке преко места ослањања смањује угиб на том месту, а тиме и појава нагињања узорка. Друго запажање тиче се ширине FRP траке. Наиме, уколико је FRP трака ужа од ширине носача, то може да изазове локални лом доње ламеле, у виду зацепљења влакана дрвета. Зацепљење се појављује поред траке у зони највећег напона затезање.

### 3.3. Анализа носивости ојачаних узорка у односу на неојачане

Поређени су узорци истих попречних пресека који су ојачани постављањем FRP траке у различит положај и са различитим процентом ојачања. Код серије 1, поређењем неојачаног узорка бр. 10 и ојачаног узорка бр. 12, измерени угиби су код ојачаног мањи за 10%, крутост се повећала за 11,5%, а мерени напони су се смањили више, и то на затезање 25%, а на притисак за 10%. Анализом серије 2, код неојачаног узорка бр. 20 и ојачаног узорка бр. 22, мерени угиби су мањи за 19%, код ојачаног, крутост се повећала за 23,4%, док су се напони на затезање повећали за 33%, а напони на затезање смањени за 16%. Ојачања FRP арматуром има већи утицај код серије 2, а нешто мање код серије 1. Може се запазити да у просеку ојачање у зони еластичних дилатација смањује угибе за 15%.

Ако се зна да ламелирани дрвени носачи носе више од пуних дрвених носача, онда се на сличан начин утврђује и носивости пуних дрвених носача који су ојачани FRP тракама [25].

### 3.4. Анализа процента армирања, места и положаја FRP трака

За ову анализу посматрана је серија 1, узорак бр. 12 где је FRP трака постављена као ојачање испод доње ламеле у хоризонталном положају и узорак бр. 11 са хоризонталном траком између последње и претпоследње ламеле. Код првог узорка напоне затезања прихвата FRP трака, док код другог доња ламела. Када се пређе граница носивости дрвета, долази до лома доње ламеле, али је греда још увек у стању да прима оптерећење, јер га прихвата FRP трака. Код узорка бр. 12, веће оптерећење прима FRP трака, па је доња ламела мање напрегнута, тако да се угиби смањују и до 10%, крутост се повећала за 11,2%, а напони су мањи за 10% (Слика 131.d,e).

Утицај вертикалног армирања може се сагледати на узорку бр. 13, који садржи две вертикалне траке у доњој ламели и на узорку бр. 14, који садржи једну вертикалну траку у доњој ламели и једну хоризонталну траку испод доње ламеле. Ови видови ојачања су веома често у примени код ојачања греда старих међуспратних конструкција, када треба сакрити ојачање. Вредност угиба је за 19% мања на узорку бр. 14, крутост се повећала за 23,9%, пошто он садржи већи проценат армирања, а и хоризонтално постављену траку која даје већу крутост пресеку. Напони затезања су за 41%, а напони притиска за 21% мањи код узорка бр.14.



Из тога следи да је при избору ојачања носача веома је важно одредити положај и место постављања FRP траке.

У вези са тим и на основу претходних анализа дошло се до следећих закључака:

- Повећањем процента армирања код узорка бр. 12 у односу на узорак бр. 13 за 0,225%, угиби се смањују за 26%, крутост се повећава за 25,8%, напони затезања су мањи чак за 81%, док се напони притиска приближно поклапају. У испитивањима [55], дошло се до закључка да је оптимални проценат армирања око 3%, што значи да даље додавање FRP трака нема већег утицаја на носивост носача.
- Избором FRP траке већег модула еластичности где је уместо типа S коришћена трака типа M, узорак бр. 31 и већим армирањем, угиб је у односу на узорак бр.12, где се арматура налази на истој позицији, смањен за 18%, крутост се повећала за 22%, док су напони у дрвету смањују и то на затезање за 12%, а на притисак за 50%. Напони у карбонској траци типа M, код узорка бр. 31 је повећан за 12%.
- Носивост пресека се повећава, угиби се смањују 10%, крутост се повећава за 11,2%, а напони на затезање се смањују за 9%, ако се FRP трака постави на већој удаљености од неутралне осе, то јест, ако се ојачање постави између две крајње ламеле ( узорак бр.11) и испод доње ламеле ( узорак бр.12).

### 3.5. Анализа контактне дужине ојачања

За ову анализу посматране су све серије испитаних узорака. Када су FRP траке постављене по целом распону (узорак бр. 13 и бр. 21) и када су постављене на одређеној дужини носача (узорак бр. 22 и бр. 31), уочава се да дужина ојачања има значајан утицај при већим оптерећењима, а могућност лома помера се од средине носача ка ослонцима. Најбољи резултат ојачања се постиже када је дужина FRP траке максимална, јер се на тај начин смањује могућност избочавања. Ипак најбољи пример се запажа упоређењем узорка бр. 21 и узорка бр. 22, који имају исти положај и количину арматуре али различиту дужину ојачања. Њихова понашања у еластичној области је приближно исто, али када оптерећење доведе носаче у пластичну област онда преовладају напони смицања и код узорка бр. 22 пре долази до појаве лома, непосредно на месту прекида ојачања.

- Уколико се карбонске траке препусте и преко ослонаца, оне ће смањити гњечења влакана ламеле код ослонаца за половину угиба који настаје на том месту.

3.6. Анализа резултата по групама

**Група 1**

Сви ојачани узорци су постизали већу носивост у односу на неојачани узорак бр. 10. Узорак бр. 12 са положајем арматуре на доњој ивици носача има већу носивост од узорка бр. 11 код ког се арматура налази између две доње ламеле. Поред тога, на узорку бр. 11 дошло је до локалног лома у доњој ламели. Положај арматуре испод доње ламеле је бољи јер носач може да прими веће силе затезање. Код FRP траке која је скривена између ламела повољно је то што је она заштићена од спољне температуре и могућих оштећења. Тај захтев је најчешће испуњен код реконструкција греда које се налазе у просторијама репрезентативних здања, јер се изведено ојачање не може уочити.

Поређењем хоризонтално постављене арматуре, што је урађено на узорку бр. 12 и вертикално постављене арматуре на узорку бр. 13, долази се до закључка да је већа носивост хоризонталне арматуре, док им се крутости разликују у односу на два управна правца. Ефекат слабљења пресека код вертикално постављене арматуре је покушан да се избегне тако што је ојачање лепљено под притиском на делове доње ламе, а онда је она накнадно додата пресеку. На тај начин је избегнуто накнадно исецање прореза за постављање арматуре. И поред тога пресеку је смањена крутост за 25,8%. Међутим, ојачање на узорку бр. 13 је скривено, арматура је заштићена и овај случај ојачања је анализиран претходном истраживању [11]. Постављањем FRP траке на узорку бр. 14, у хоризонталан и вертикалан положај, добија се подједнако иста крутост у два управна правца уз смањење угиба. У овој групи узорак бр. 12 показао је најмање угибе и највећу носивост због тога што је ојачан највећим процентом армирања које је постављено на целој ширини доње ламеле узорка и дуж целог распона.

**Група 2**

Два ојачана узорка бр. 21 и бр. 22, постигла су већу носивост у односу на неојачани узорак бр. 20, који је при томе доживео лом по целом пресеку на средини распона. Оба ојачана узорка имају исти проценат ојачања и налазе се испод доње ламеле, али су дужине FRP траке различите. Узорак бр. 21 је ојачан по целом распону, може да прими утицаје од савијања, смицања и добар део торзије. Узорак бр. 22 је ојачан краћом FRP траком која може да прими само савијање, тако да у зонама смицања, непосредно на крају ојачања, долази до локалног лома доње ламеле. На основу дужина FRP трака које чине ојачања ових узорка може се утврдити и дужина сидрења арматуре, што је у закључку детаљно објашњено.

### **Група 3**

У овој групи израђен је само један узорак бр. 31, индентичне висине као што су узорци групе 1, али веће ширине доње ламеле да би се на њу могла поставити FRP трака ширине 12cm, те је због тога нешто веће површине и модула еластичности. Неојачан узорак бр. 30 није израђен, али је приказан као рачунски модел и по површини попречног пресека сличан узорку бр. 10. Поређењем рачунских резултата неојачаног узорка бр. 10 са ојачаним узорком бр. 31, уочавају се сличне појаве описане у групи 1. Због већег модула еластичности FRP траке, измерени су мањи угиби него што је било код свих других узорка. Код овог узорка се при већем оптерећењу догодио локални лом доње ламеле, због тога што је трака којом је извршено ојачање имала најмању дужину.

Најбољи резултат у погледу носивости постигнут је на узорку бр. 21 који је ојачан по целом распону испод доње ламеле када је FRP трака постављена и преко места ослањања. Овај модел има највећу носивост и поред значајних угиба. Карбонска трака је смањила гњечење дрвета код ослонаца и могућност витоперења пресека. Овај начин ојачања није до сада примењиван у експериментима из ове области, и представља најбољи начин ојачања FRP тракама.

#### **3.7. Анализа трошкова**

У прилогу В овог рада разматрана је економска оправданост примене ојачања дрвених лепљених ламелираних конструкција карбонским FRP тракама. Циљ анализе је био да се на основу одабраног произвођача FRP трака и одабраног извођача дрвених ламелираних конструкција добије одговор колико кошта израда ојачаних узорака. Затим, да се утврди колико се повећањем процента ојачања утиче на цену израде узорака. Ако посматрамо прва истраживања из ове области, можемо запазити да је цена FRP трака била висока али да се временом драстично смањује. Томе знатно доприноси серијска производња композитних материјала за ојачање која зависи и од технолошког напретка производње и од конкуренције произвођача на тржишту. Међутим, може се извести закључак да је ојачање носача карбонским тракама веома повољно, брзо изводљиво и да побољшава механичке карактеристике носача [2].

Поставља се на крају питање када користити ојачање FRP тракама? Одговор се налази у процени исплативост. Код израде нових конструкција, уколико нису у топлотном режиму преко 50 ° С, ојачањем се смањује попречни пресек носача. Мањим димензијама попречног пресека успешно се савлађују већи распони, или се могу избацити поједини

ослонци. Поред тога, постоји могућност да се појефтини израда носача ако се на местима мањег напрезања поставе ламеле од дрвете нижег квалитета. Уколико су нови носачи у топлотном режиму преко 50° С, онда се трошкови повећавају, пошто FRP траке треба заштити на начин описан у поглављу 2.2.1.

Свакако је економски најоправданије ојачање FRP тракама приликом санација и реконструкција постојећих греда, стубова и зидова, где се без рушења постојећи носачи доводе у експлоатациону функцију (Слика 15). Дато је неколико примера овакве примене ојачавања греда [67], међуспратних носача старих двораца-каштела [61] и санација мостова [53]. Из тога разлога очекује се да ће управо због све веће исплативости примене ојачања са FRP тракама потистиснути све досада коришћене методе [79]. Задњих година у грађевинарству је пријављен велики број патената у којима се користе композитна ојачања.

## 4. ЗАКЉУЧЦИ

### 4.1. Закључци истраживања

На основу анализе понашања експерименталних узорака и рачунских модела у еластичној области, а услед деловања краткотрајног оптерећења, могу се формулисати закључци:

- Примарни закључак који следи из анализе резултата добијених испитивањем на ојачаним и неојачаним узорцима јесте да се угиби код ојачаних узорака смањују за 19%, крутост на савијање се повећава за 23,4% а напони на затезање у просеку за 25%, (неојачани узорак бр. 20 и ојачани узорак бр 22).
- Анализом резултата добијених на узорцима са различитом површином ојачања, закључује се да ако се проценат ојачања повећа за 0,225% долази до смањења угиба за 26%, крутост се повећава за 25,8%, а напони на затезање за 80%, (узорак бр. 12 и узорак бр 13).
- Различити положај ојачања утиче на носивост пресека. Ако се трака уместо последње и предпоследње ламеле, стави испод последње ламеле, угиби се смањују 10%, крутост се повећава за 11,2%, а напони на затезање се смањују за 9%. ( узорак бр. 11 и узорак бр. 12). Ојачање постављено на најудаљенију позицију у односу на неутралну осу у затегнутој зони пресека има већу носивост.
- Анализа резултата добијених на узорцима са различитим правцем ојачања показује да уколико је проценат ојачања исти, увек хоризонтални положај траке даје мање угибе и већу носивост од траке постављене у вертикалан положај(узорак бр. 12 и узорак бр 13).
- Резултати испитивања добијени на узорцима са вертикалним ојачањем показују да се на тако добија мања крутост пресека у односу на хоризонтално постављено ојачање, али је у том случају повећан ризик од избочавања (узорак бр.13 и узорак бр.14).
- Ако се ојачање изведе траком чији је модул еластичности већи, угиби се смањују за 18%, крутост се повећава за 22%, док се напони на затезања смањују за 12%, а напони на притисак за 50% ( узорак бр. 31 и узорак бр 12).

Добијени резултати указују на следеће:

- Када је у питању дужина ојачања може се закључити да се ојачањем узорка испод доње ламеле FRP траком по целом распону и препуштањем преко ослонаца добија најбоља носивост носача, а на тај начин смањује се и гњечење влакана дрвета код ослонаца.

- Деформације на узорку догађају се и услед оптерећења у линеарно еластичној области и то у виду проширења подужних пукотина, гњечења влакана дрвета на местима уноса сила и код ослонаца. Нелинеарно пластично понашање догађа се код повећања оптерећења и оно је праћено карактеристичним звуком, а подразумева увећање подужних пукотина, гњечење влакана дрвета, подужно зацепљење дрвене ламеле, локално зацепљење влакана, рашчешљавање FRP траке или локални лом у доњој дрвеној ламели. Из овог стања се веома брзо прелази у критично стање лома, када носач не може да прима више оптерећење. Ово стање подразумева проширење локалног лома и лом целог пресека, може да дође и до избочавања греде.
- Лом са догађао искључиво у ламели и по дрвету. Треба напоменути да се одвајања по спојним површинама између ламела и споју ламеле са FRP траком нису појавила, што је доказ о употребљеним квалитетним лепковима. Лом у узорцима био је последица исцрпљења носивости дрвета.
- У горњој притиснутој ламели прслине нису биле изражене као у затегнутој зони. До појаве лома није долазило чак ни при максималном оптерећењу свих узорака.
- Метода ојачања дрвених лепљених ламелираних носача FRP тракама показала се оправданом, јер у поређењу са неојачаним носачима или другим методама за ојачање показује велике предности.
- Неповољна карактеристика смањене отпорности карбонског материјала на топлотно дејство може се побољшати постављањем заштитних слојева и на тај начин испунити услов који постоји за ламелиране дрвене носаче да могу да издрже дејство пожара у трајању од 30 и 60 минута.
- На основу анализе трошкова, уочено је да ојачање FRP тракама приликом израде нових носача не подиже значајно цену носача у односу на ојачање другим материјалима, а у случајевима санације и реконструкција, ова метода ојачања веома је ефикасна и исплатива. То доказује и велики број патентираних система који се примењују приликом ојачања дрвених конструкција [59] [60] [65].

Закључци везани за рачунарске моделе:

- Резултати добијени на рачунским моделима потврдили су исправност мерених вредности на узорцима у току истраживања. У прорачуну рачунског модела у првој колони (Табела 9), узет је модул еластичности који је дат за лепљено ламелирано дрво класе GL24 (Табела 3), и вредности рачунског угиба су 26-58% веће од мерених

угиба, напони затезања у дрвету су већи 20-37%, у карбону 0-46% и напони притиска у дрвету су већи 26-63%. Ако се узме модул еластичности за дрво који је добијен у овом раду (Поглавље 2.3.3.5) експериментално, разлике између рачунских и мерених вредности су знатно мање. Ове разлике су у табели 9, дате у суседној колони за упоређење и та разлика код угиба износи 3-12%, код напона затезања у дрвету 0-46% и код напона на притисак од 0-13%.

#### 4.2. Нагласак на нове проблеме и могуће правце даљих истраживања

Поузданост резултата мерења зависи од броја експеримената на истим моделима, али у овом истраживању је употребљен релативно мали број узорака исте серије. Поједина мерења која су одступала од рачунских вредности нису утицала на закључак који доказује све предности ојачања дрвених лепљених ламелираних носача FRP тракама. У овом раду је у потпуности проучено понашање узорака у еластичној области, као и њихово понашање у пластичној области са дефинисаним појавама лома, као граничним стањима.

Новина уочена током истраживања свакако јесте и то што се при коришћену различитих дужина FRP трака за ојачање, показало као најбоље решење оно код кога је ојачање постављено по целом распону са доње стране и препуштено преко места ослањања. У том случају се јављају велике силе затезања, напрегнута је само зона око карбонске траке, па се модел понаша као компактна целина „пакет“. То растеређује ламеле у средишту „пакета“ и представља могућност да се за такве ламеле употреби дрво нижег квалитета (према препорукама које су дате у поглављу 2.1.2). Ово је важан фактор код избора ојачања FRP тракама, јер се на тај начин појефтиније израда ламелираног дрвеног носача и постиже се већа искоришћеност дрвета (енергетска ефикасност) [74].

У овом раду су добијени значајни резултати који се могу користити при изради и усавршавању нових конструкција, ојачаних дрвени ламелирани носачи карбонским тракама. Ови резултати ће представљати иновацију у производњи, а свакако указују и на нове правце даљих истраживања. Код даљих истраживања остаје могућност да се повећа проценат ојачања, да се при ојачању користите и карбонска платна или попречне вертикалне траке у зони ослонаца и сл.

Друга идеја на основу које могу бити осмишљена будућа истраживања долази од потребе произвођача ламелираних лепљених конструкција која указује на нужност ојачања спојева и веза FRP тракама. На овима местима се најчешће појављују деформације код изведених конструкција, јер се јављају концентрације напона услед којих долази до гњечења влакана у дрвету. Ојачањем постављеним на та места могле би се примити велике силе

затезања и смањити могућност гњечења дрвета коришћењем композитног ојачања које би заменила челичне везе. Поред тога треба испитати могућност настављања FRP трака, одредити дужине сидрења и пречнике превијања око зглобова и могућности укотвљавања.

Будућа истраживања би требало усмерити и у правцу испитивања понашања носача и услед дејства дуготрајног оптерећења, које код пуног дрвета увећава напоне за 40%, али није познато шта се дешава код носача од лепљеног ламелираног дрвета ојачаног FRP тракама. Интересантна би била и истраживања носача од лепљеног ламелираног дрвета ојачаног FRP тракама који се преднапрежу. Поступци испитивања спрезања ова два материјала морају увек да буду добро осмишљени, мора се узети у обзир издржљивост конструкција при екстремним условима, па би ојачања требало изводити на терену, а не само у идеалним условима које подразумева лабораторија.

Да би примена композитних материјала постала заступљенија, потребно је подстицање усавршавања стручних кадрова и подстицање истраживачких активности на том пољу. У случају нових испитивања, потребно је извести знатно више експеримената на узорцима, а при томе користити савеменију опрему. Подразумева се вршење стандардизације и дефинисање критеријума за ојачање дрвених лепљених ламелираних конструкција.

Циљ овог истраживања свакако јесте подстицање грађевинске оперативе да сагледа шире могућности примене ојачања коришћењем FRP трака, а примена ове методе временом ће омогућити још боље резултате.



5. ЛИТЕРАТУРА:

- [1]. André A., „Strengthening of Timber Structures, with Flax Fibres“, Licentiate thesis Luleå University of Technology, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Sweden, Luleå, 2007.
- [2]. Babatunde O. F., Tann D. B., Delpak R., "Strengthening Glue Laminated (Gdlulam) Beams with FRP Components, Faculty of Advanced Technology, United Kingdom, University of Glamorgan, 2008.
- [3]. Balseiro-Resende A. M., Reutenstrauch, K., „Bond behaviour of CFRP to timber beams in the end-anchorage situation“, Department of Civil engineering, University of Coimbra, Portugal, maj 2007.
- [4]. Basler M., Gavrilović Z., „STRENGTHENING OF BRIDGES WITH SIKA CARBODUR COMPOSITE SYSTEMS“, «Савремена грађевинска пракса 2002», Нови Сад, pp. 41-52, 18 и 19 април 2002.
- [5]. Bjelanović, V. R., „Drvene konstrukcije prema europskim normama“, Hrvatska sveučilišna naklada, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, reizdanje, 2007.
- [6]. Blaß, H. J., Romani, M., „Reinforcement of glulam beams with FRP reinforcement“, University of Karlsruhe (TH), Germany, 2000.
- [7]. Blaß, H. J., Romani M., „Design model for FRP reinforced glulam beams“, University of Karlsruhe, CIB-W18 Meeting 34, 34-12-3, Venice, Italy, august 2001.
- [8]. Borri, A., Corradi, M., Grazini, A., „FRP REINFORCEMENT OF WOOD ELEMENTS UNDER BENDING LOADS“, University of Perugia, Dept of Civil & Environmental Engineering, School of Engineering, Italy, Perugia, juny 2003.
- [9]. Brunner, M., Schnueriger, M., „Timber beams strengthened by attaching prestressed carbon FRP laminates with a gradiented anchoring device“, Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour for FRP in Structures, pp. 465-471, Hong Kong, 2005.
- [10]. Camille, A. Issa and Kmeid, Z., „Advanced wood engineering: glulam beams“, Department of Civil Engineering, Lebanese American University, Lebanon, Byblos, 2004.
- [11]. Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F., Barreto, A. M. J. P., Morais, J. J. L., „Domingues J.J.M.S, „Experimental and numerical evaluation of composite repairs on wood beams damaged by cross-graining“, Departamento de Economia e Gestão, Universidade Lusófona do Porto, Rua Augusto Rosa n°24, Portugal, 4000-098 Porto, 2009.
- [12]. Carboniar sistem®, „AKROTERIJ“ doo., ZADAR, 2009.
- [13]. Chung, N. W., „NUMERICAL ANALYSIS OF STRENGTHENED TIMBER BEAM WITH FRP“, Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 2007.

- [14]. Dagher, H. J., Kimball, T. E., Shaler, S. M., „Effect of FRP Reinforcement on Low Grade Eastern Hemlock Glulams“, University of Maine, National conference on wood transportation Structures, 207-213, USA, Wisconsin, Madison, 1996.
- [15]. Davalos, J. F., Qiao, P., Barth, K., „Durability and Mode-I Fracture of Fiber-Reinforced Plastic (FRP)/Wood Interface Bond“, West Virginia, Morgantown, 1999.
- [16]. Davids, B., Dagher, H., Lindyberg, R., Lopez-Anido, R., „FRP-REINFORCED GLULAM BRIDGES: DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION“, The University of Maine, University of Maine, Bulletin 848, June 2000.
- [17]. Davids, W. G., Botting, J. K., „Design, Fabrication and Preliminary Testing of a Composite Reinforced Timber Guardrail“, The New England Transportation Consortium, NETCR39, Project No. 00-3, 2004.
- [18]. Desjarlais, J., Davids, W. G. and Landis, E. N., „CRITICAL CRACK LENGTHS IN FRP REINFORCED GLULAM BEAMS“, University of Maine, 26. Fracture Mechanics Characterization of Wood, 2010.
- [19]. EC5: EVROKOD 5, PRORAČUN DRVENIH KONSTRUKCIJA, Građevinski fakultet, Univerzitet u Nišu i Građevinski fakultet, Univerziteta u Beogradu, 1996.
- [20]. Filipović, M., „Beton sa karbonskim vlaknima“, Master rad, Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet u Subotici, Subotica, 2011.
- [21]. Fiorelli, J., Dias, A. A., „Analysis of the Strength and Stiffness of Timber Beams Reinforced with Carbon Fiber and Glass Fiber“, Material Research, vol. 6, No. 2, pp. 193-202, São Carlos, Brazil, 2003.
- [22]. „Fire Performance of Phenol Resorcinol Based Finger Jointed Structural Building Components“, Technical Notes, REPRESENTING THE STRUCTURAL BUILDING COMPONENTS INDUSTRY, WTCA, Enterprise Lane Madison, WI 53719, 2008.
- [23]. Gardner, D. J., Lopez-Anido, R., "Adhesion Between Wood and Fiber Reinforced Polymers: Bonding Issues", Civil Engineering University of Maine, Advanced Engineered Wood Composites Center, 2002.
- [24]. Giambanco, G., Turetta, T., Cottone, A., "Numerical analysis of the mechanical response of wood glulam beams reinforced through the thickness by FRP rods", Department of Structural, Aerospace and Geotechnical Engineering, University of Palermo, Italy, 2009.
- [25]. Gilham, C. P., Williamson, T., „NEW OPPORTUNITIES FOR FIBER REINFORCED GLUED-LAMINATED BEAMS“, Structure magazine, Vol. 57-59, Oregon, Tualatin, April 2007.
- [26]. Гојковић, М., „Дрвене конструкције“, Грађевински факултет Београд, Научна књига, Београд, 1983.
- [27]. Haiman, M., „POSSIBLE WAYS TAKING OVER PERPENDICULAR STRESSES“, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, CROATIA, ZAGREB, 2006.

- [28]. HC Bridge Company, LLC, HIBRID-COMPOSITE BEAMS, U. S. Patent No. 6,145,270, Build, 8. decembar 2008.
- [29]. Hernandez, R., Davalos, J. F., Sonti, S. S., Kim, Y., Moody, R.C., "Strength and Stiffness of Reinforced Yellow-Poplar Glued-Laminated Beams", United States, Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, Research Paper FPL-RP-554, USA, Wisconsin, Medison, 1997.
- [30]. Hideyuki, H., Akio, O., Akira, K., „LOADING TEST OF GLULAM BEAMS REINFOCED BY CFRP SHEETS AND PLATES“, Proceedings of the 8th World Conference of Timber Engineering, Vol. 3, pp. 413-416, 2004.
- [31]. Иванов, Д., Николовски, Т., „СТАРИ МОСТОВИ НА НАШИМ ПУТЕВИМА. СТАЊЕ, ПОТРЕБА И МЕТОДЕ ЗА ЊИХОВО ОЈАЧАЊЕ“, Конференција "Савремена грађевинска пракса 2003", pp. 33-49, Нови Сад, 27 и 28 март 2003.
- [32]. Jacob, J., Garzon-Barragan, O. L., "Flexural Strengthening of Glued Laminated Timber Beams width Steel and Carbon Fiber Reinforced Polymers", MSc thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, Göteborg, 2007.
- [33]. Jorge, M., Jorge, B., Sena-Cruz, J., Barros, J., Dalfre, G., "Response of FRP-glulam slab system under five-point bending load", programs: COMPLETE and FEDER, number PTDC/ECM/74337/2006.
- [34]. Kim, Y. J., Davalos, J. F., Barbero, E. J., „Progressive failure analysis of laminated composite beams“, Jurnal of Composite Materials, vol 30(5), pp: 536-560, 1996.
- [35]. Kim, Y. J., Davalos J. Julio&Barbero J. E., "Delamination bucking of FRP layer in laminated wood beams", Elsevier Sience Ltd., Compsite Structure, Vol.57, No.5/4, 511-520, 1997.
- [36]. Kočetov-Misulić, T., Stevanović, B., „TESTING PROCEDURES FOR DETERMINATION OF ELASTO-MACHANICAL TIMBER PROPERTIES ACCORDING JUS AND EC-5 STRENGTH CLASS SYSTEM“, Ninth national and third international scienific meeting iNDiS, pp. 283-290, Novi Sad, november 26-28, 2003.
- [37]. Kovačević, D., „MODELING OF BOUNDARY AND INTERFACE CONDITIONS BY LINK FINITE ELEMENTS“, PSU-UNS, International Conference on Engineering and Environment - ICEE-2007, Prince of Songkla University, Faculty of Engineering, 2007.
- [38]. Kovacevic, D., Budak, I., Antic, A., Kosec, B., „Special Finite Elements: Theoretical Background and Application“, Technical Gazette, ISSN 1330-3651, No. 4 18 649-655, UDC/UDK 519.61:624.046, 2011.
- [39]. Krueger, G. P., Sanberg, L. B., „Ultimate strength design of reinforced timber: moment-rotation characteristics“, Wood Science, vol. 6(4), pp. 330-344, 1974.
- [40]. Kujundžić, V., „DRVENE KONSTRUKCIJE U AKTUELNOJ ARHITEKTONSKOJ I GRAĐEVINSKOJ PRAKSI“, Nove tehnologije u gradnji drvetom, Beograd, 2008.
- [41]. Кујунџић, В., „Савремене дрвене конструкције“, Грађевинска књига, Београд, 1989 год.

- [42]. Laketić, S., "Lepljene lamelirane konstrukcije", PIRAMIDA doo., Nove tehnologije u gradnji drvetom, Sremska Mitrovica, 2008.
- [43]. Lawrence C. Bank, „COMPOSITES FOR CONSTRUCTION“: Structural Design with FRP Materials, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Published simultaneously in Canada, 2006.
- [44]. Lindyberg, R. F., Dagher, H. J., "Probabilistic nonlinear model for reinforced glulam beams", University of Maine, ME 04469, Orono, 2000.
- [45]. Lindyberg, R.F., Dagher, H.J., "FRP-Glulam Beams Modeling and Code Approval", AASHTO Technical Committee for Timber Structures (T-16), Wilmington, DE – July 10, 2007.
- [46]. Lopez-Anido, R. A., Muszynski, L., Gardner, D. J., Goodell, B., Herzog, B., „PERFORMANCE - BASED MATERIAL EVALUATION OF REINFORCED GLUED LAMINATED TIMBER (GLULAM) BEAMS“, 3rd International Conference on Advanced Engineered Wood Composites, USA, ME, Bar Harbor, July 10–14, 2005.
- [47]. Meier, U., Motavalli, M., "Strengthening and Stiffening of Historic Wooden Structures with CFRP" Swiss Federal Laboratories for Materials Research EMPA, JEC, 2003.
- [48]. Motavalli, M., "FRP Strengthening of wood", EMPA Report 115/23, 1992.
- [49]. Munipalle, U., „ANALYSIS AND TESTING OF WOOD-GLASS FIBER REINFORCED PLASTIC ADHESIVE INTERFACE“, Morgantown, WV: West Virginia University. M.S. thesis, 1992.
- [50]. Muravljev, M., Jevtić, D., Zakić, D., Savić, A., Gavrilović D., "ISPITIVANJE SVOJSTAVA KARBONSKIH TRAKA KOJE SLUŽE ZA OJAČANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA", Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Institut za ispitivanje materijala, Beograd, 2007.
- [51]. Najdanović, D., "IZVEŠTAJ O ISPITIVANJU UZORAKA OD LEPLJENOG LAMELIRANOG DRVETA RADI UTVRĐIVANJA NOSIVOSTI LEPLJENIH SPOJEVA", Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Institut za ispitivanje materijala, Beograd, 2008.
- [52]. Najdanović, D., SANACIJE, REKONSTRUKCIJE I ODRŽAVANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA U VISOKOGRADNJI, "Ojačanje AB konstrukcija primenom FRP vlakana", Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet, Odsek za konstrukcije, Beograd, 2009.
- [53]. Nishizaki, I., Nobufumi, T., Yoshio, I., Takumi, S., "A Case Study of Life Cycle Cost based on a Real FRP Bridge" Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006), Miami, Florida, USA, December 13-15, 2006.
- [54]. Plevris, N., Triantafillou, T. C., „GFRP-REINFORCED WOOD AN STRUCTURAL MATERIAL“, American Society of Civil Engineers, Journal of Materials in Civil Engineering-ASCE, vol 4, pp. 300-317, 1992.

- [55]. Poulin, P. J., Dagher, H. J., Shaler, S. M., Abdel-Magid, B., „BOND AND STATIC BENDING STRENGTH OF FRP-REINFORCED GLULAM BEAMS USING WESTERN WOOD SPECIES“, Volume I, Chapters 1 to 5, University of Maine, May 2001.
- [56]. Ranković, S., „EKSPERIMENTALNO-TEORIJSKA ANALIZA GRANIČNIH STANJA ARMIRANOBETONSKIH LINIJSKIH NOSAČA OJAČANIH SPREZANJEM SA NSM VLAKNASTIM KOMPOZITIMA“, Doktorska disertacija, UNIVERZITET U NIŠU, GRAĐEVINSKO-ARHITEKTONSKI FAKULTET, Niš, oktobar 2010.
- [57]. „ReLAM Computer Model“, Reinforced Laminated Beam Analyzer, Advanced Engineered Wood Composites Centar, University of Maine, USA, Orono, Jul 10-14, 2005.
- [58]. Reyer, E., Stojić, D., „DRVENE KONSTRUKCIJE“, Opšti deo, Noseće konstrukcije hala, Ruhr-Universität Bochum, DYNET projekat, Univerzitet u Nišu, 2001.
- [59]. Rotafix-resiwood systems, „Low Disturbance Restoration of Timbers“, Patent Number 2299828, Aberkraft, Swansea SA9 1UX, 2008.
- [60]. Scheda informativa: “Servizi integrati per il consolidamento delle strutture lignee”, Luglio 2005.
- [61]. Schober, K. U., Rautenstrauch, K., Jahreis, M., "Low Intrusion Techniques for Strengthening of Timber Structures in Reconstruction", Mainz University of Applied Sciences, Germany, 2009.
- [62]. Sekulović, M.: „Teorija konstrukcija-savremeni problemi nelinearne analize“, Građevinska knjiga, Beograd, 1992.
- [63]. Shrivastava, R., Uttamasha, G., Choubey, U. B., “FRP: Research, Education and Application in India and China in Civil Engineering”, International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol. 1, No. 6, May 2009.
- [64]. Sika Croatia d.o.o., „Sika CarboDur-Kompozitni sistemi za statičko ojačanje konstrukcija“, Zagreb, 2007.
- [65]. SINIT, „DESIGN GUIDE FOR CARBONFORCE®FRP SYSTEM“, Using S&P Reinforcement, Rovigo (Italy), Edition June 2000.
- [66]. Spaun, F. D., „Reinforcement of wood with fiberglass“, Forest Products Journal, vol. 31, pp. 26-33, 1981.
- [67]. Stevens, D. N., Criner, K. G., "Economic Analysis of Fiber-Reinforced Polymer Wood Beams", MAINE AGRICULTURAL AND FOREST EXPERIMENT STATION, University of Maine, Bulletin 848, June 2000.
- [68]. Stojić, D., Kajganović, T., "Composite timber-concrete road bridge structure", Facta Universitatis, Architecture and Engineering, vol. 5, No 2, pp. 141-148, Belgrade, november 2007.
- [69]. Theakston, F. H. „A feasibility study for strengthening timber beams with fibreglass“, Canadian Agriculture Engineering Journal, pp. 17-19, 1965.

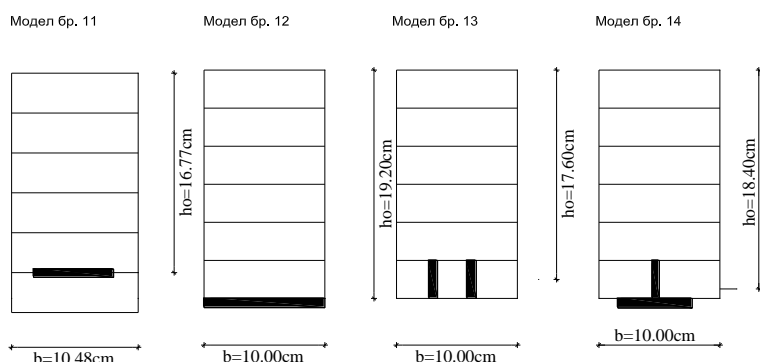
- [70]. Tingley, D. A., Gilham, P. C., Kent, S. M., "Long Term Load Performance of FRP Reinforced Glulam Bridge Girders", Wood Science & Technology Institute (N.S.), Nationalconference on wood transportation structures, WI. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-94, Madison, October 23-25, 1996.
- [71]. Trantofillou, T. C., Desković, N., „Prestressed GFRP sheets as external reinforcement of wood members“, American Society of Civil Engineering, Journal of Structural Engineering-ASCE, vol. 118, pp. 1270-1284, May 1992.
- [72]. Trimble, B. S., "Durability and Mode-I Fracture of Fiber-Reinforced Plastic (FRP)/Wood Interface Bond", Master of Science in Civil and Environmental Engineering, , West Virginia, Morgantown, 1999.
- [73]. Turkulin, H., Schihofer, G., „NOVI DRVNI PROIZVODI ZA GRADNJU“, Kongres: Nove tehnologije u gradnji drvetom, Beograd, 17.05.2011.
- [74]. Wallner, E., „VPLIV ARMIRANJA LESENIH LEPLJENIH NOSILCEV“, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, AR/1, pp. 70-73, april 2004.
- [75]. Wiliamson, T., "Fire performance of FRP reinforced glulam", APA-The Enginered Wood Association, 9th World Conference on timber engineering, pp. 69, USA, Oregon, Portland, 2006.
- [76]. Закић, Д. Б., „УВОД У МЕХАНИКУ ДРВЕТА“, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду и Институт за испитивање материјала СР Србије, Београд, 1985.
- [77]. ZBIRKA JUGOSLOVENSКИH PRAVILNIKA I STANDARDA ZA GRAĐEVINSKE KONSTRUKCIJE, (Knjiga 4/1 i 4/2–Drvene konstrukcije), Građevinski fakultet, Beograd, 1997.
- [78]. Zeno, A. M., Tingley, D. A., "Fire resistance of FRP reinforced glulam beams", Wood Science and Technology Institute (N.S.), Ltd., Oregon State University, Corvallis, Oregon, 2000.
- [79]. Zeno, A. M., Stith, J. K., Tingley, D. A., “Commercialization of FRP reinforced glulam beam technology”, Wood Science and Technology Institute (N.S.), Ltd., Oregon State University, Corvallis, Oregon, 2000.

## 6. ПРИЛОЗИ

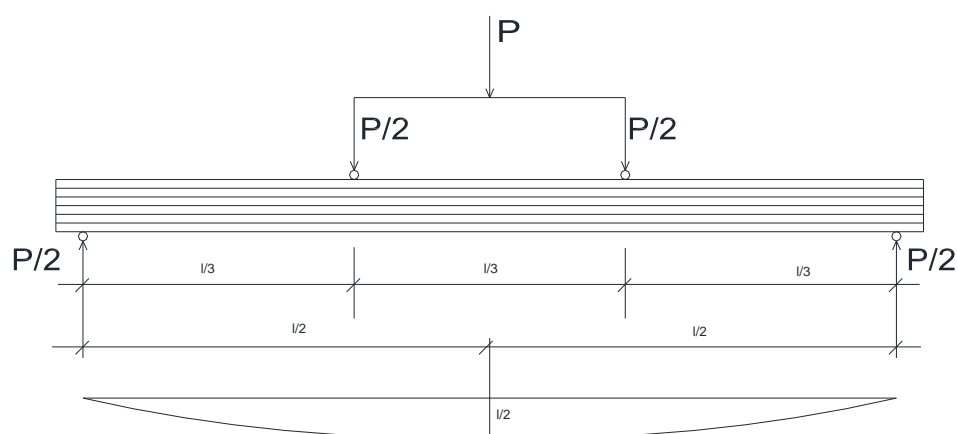
### 6.1. Прилог А: Пробни подаци за испитивање

#### 6.1.1. Контрола угиба

Прорачун угиба је вршен када се FRP трака налази на доњој ламели и то постављена у следеће положаје (Слика 178).



Слика 178. Положај арматуре у пресецима узорка серије 1



Дијаграм угиба греде

Слика 179. Положај оптерећења и дијаграм угиба.

Укупна вредност угиба  $\delta$  је збир компонената угиба:

$$\delta = \delta_{\sigma M} + \delta_{\tau Q} + \delta_{\tau M} \dots\dots\dots(6.1)$$

$\delta_{\sigma M}$  - од нормалних напона које изазива моменат савијања,

$\delta_{\tau Q}$  - од смичућих напона које изазивају трансверзалне силе и

$\delta_{\tau M}$ , од смичућих напона које изазива моменат торзије [40].

Однос модула еластичности дрвеног носача и FRP трака квалитета S:

$$n_s = \frac{E_s}{E_d} = \frac{160000}{10500} = 15,24 \dots\dots\dots(6.2)$$

Однос модула еластичности дрвеног носача и FRP трака квалитета М:

$$n_M = \frac{E_M}{E_d} = \frac{210000}{10500} = 20,00 \dots\dots\dots (6.3)$$

**Табела 10.** Рачунске вредности угиба на средини распона свих узорка

Серија број	Узорак број	Статичка висина h <sub>o</sub> [mm]	Ширина узорка b [mm]	Моменат инерције J <sub>x</sub> [cm <sup>4</sup> ]	Моменат инерције J <sub>pr</sub> [cm <sup>4</sup> ]	Процент армирања μ [%]	Однос два модула еластичности n	Модул еластичности за дрво E <sub>d</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Рачунски угиб δ [mm]	
									Услед дејства силе од P= 10 [kN]	Услед дејства силе од P= 20 [kN]
Серија 1	10	19.2	10	5,898	5,898	0.0000	15.24	10.500	15,47	30,95
	11	16.0	10	3,413	3,901	0.3125	15.24	10.500	23,40	46,79
	12	19.2	10	5,898	7,584	0.6250	15.24	10.500	12,04	24,07
	13	17.6	10	4,543	5,374	0.4000	15.24	10.500	16,98	33,97
	14	18.4	10	5,191	6,408	0.5125	15.24	10.500	14,24	28,49
Серија 2	20	16.0	10	3,413	3,413	0.0000	15.24	10.500	26,74	53,48
	21	16.0	10	3,413	3,999	0.3750	15.24	10.500	22,83	45,65
	22	16.0	10	3,413	3,999	0.3750	15.24	10.500	22,83	45,65
Серија 3	30	19.2	12	7,078	7,078	0.0000	20.00	10.500	12,90	25,79
	31	19.2	12	7,078	10,675	0.8470	20.00	10.500	8,55	17,10
l=	300	cm	P1=2x	10.00	kN	P2=2x	20.00	kN		

Моменат инерције активног пресека дрвеног носача:

$$I_x = \frac{b * h_o^3}{12} \dots\dots\dots (6.4)$$

Моменат инерције са утицајем процента армирања, једноструко армираног пресека у доњој зони:

$$I_{pr} = \frac{b * h_o^3}{12} (1 + n_s * \mu) \dots\dots\dots (6.5)$$

Израз за угибе код узорка просте греде оптерећене са две једнаке концентрисане силе, и ојачане у доњој зони, затезања:

$$\delta = \frac{23}{648} \frac{P * l^3}{E_d * I_{pr}} \dots\dots\dots (6.6)$$

### 6.1.2. Контрола на избочавање

Контрола дрвеног носача на избочавање[40] у подужној оси:

Podaci: σ<sub>s</sub>=16.000 MPa, E=10,50 N/mm<sup>2</sup>,



Дужина избочавања када делују две исте концентрисане силе на трећинама распона је дата:

$$l_e = 1,68 * l = 1,68 * 3,00 = 5,04m \quad \dots\dots\dots(6.7)$$

Коефицијент бочне стабилности:

$$C_S = \sqrt{\frac{l_e * h}{b^2}} = \sqrt{\frac{5,04 * 0,192}{0,1^2}} = 9,84 \quad \dots\dots\dots(6.8)$$

$$E_S = E * \sqrt{10 * \sigma_s} = 1050 * \sqrt{10 * 16,0} = 13.282,00 \text{ MPa} \quad \dots\dots\dots(6.9)$$

Фактор стабилности дрвета:

$$C_k = \sqrt{\frac{3 * E_S}{5 * \sigma_s}} = \sqrt{\frac{3 * 13282}{5 * 16,0}} = 22,32 \quad \dots\dots\dots(6.10)$$

Контрола услова:

1. ако је  $C_S \leq 10 \equiv \sigma_{dp} = \sigma_s$  - нема избочавања.....(6.11)

2. ако је

$$10 < C_S \leq C_k \equiv \sigma_{dp} = \sigma_s \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{C_S}{C_k} \right)^4 \right] \quad \dots\dots\dots(6.12)$$

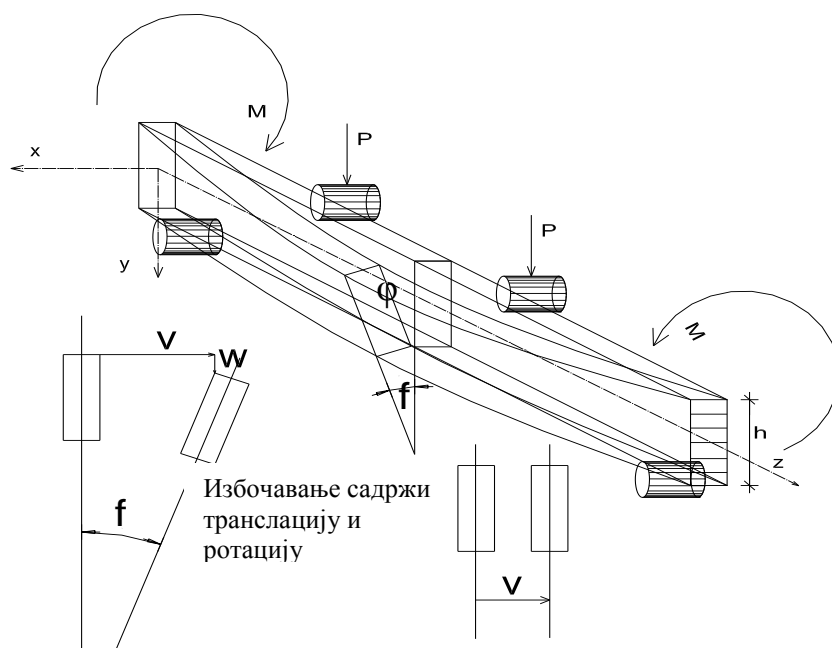
– ради се корекција напона на утицај избочавања,

3. ако је

$$C_k < C_S \leq 50 \equiv \sigma_{dp} = \frac{0,4 * E}{l^2} \quad \dots\dots\dots(6.13)$$

– ради се корекција напона на утицај избочавања,

У овом случају услов 1 је испуњен па нема појаве избочавања !



Слика 180. Теоријски приказ избочавања дрвене греде

## 6.2. Прилог Б: Записници са испитивања узорака

## 6.2.1. СЕРИЈА 1

## 6.2.1.1. УЗОРАК бр. 10

Табела 11. Записници са испитивања узорка бр. 10

<b>Ојачање:</b>		неојачана		<b>Димензије:</b>		10/19,2	cm		
<b>Датум:</b>		<b>15.02.2011 god.</b>							
<b>Тежина греде:</b>		29.71	kg	$\gamma=$	4.83	kN/m <sup>3</sup>			
<b>Мерење бр. 1</b>									
<b>Време[h]</b>	<b>Сила[kN]</b>	<b>U1[mm]</b>	<b>U2[mm]</b>	<b>U3[mm]</b>	<b>U4[mm]</b>	<b>U5[mm]</b>	<b>U6[mm]</b>	<b>T1[10<sup>-3</sup>]</b>	<b>T2[10<sup>-3</sup>]</b>
13.00	0	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05
13.25	5	0.53	2.52	2.86	2.75	0.55	2.92	2.78	2.65
13.26	10	1.22	5.65	6.43	6.18	1.21	6.54	6.00	6.03
13.27	15	2.11	8.95	10.16	9.80	2.06	10.35	9.25	9.41
13.30	20	3.22	12.67	14.31	13.91	3.27	13.14	12.62	13.01
13.32	20	3.39	12.95	14.59	14.22	3.47		12.80	13.22
	0	0.63	0.90	0.66	0.79	0.69		0.26	0.20
	0	0.50	0.72	0.47	0.60	0.52		0.37	0.06
13.40		0.52	-0.82	0.65	0.62	0.58		0.54	0.11
								прит. -	затез.+
<b>Мерење бр. 2</b>			<b>Датум: 16.02.2011.</b>						
<b>Време[h]</b>	<b>Сила[kN]</b>	<b>U1[mm]</b>	<b>U2[mm]</b>	<b>U3[mm]</b>	<b>U4[mm]</b>	<b>U5[mm]</b>	<b>U6[mm]</b>	<b>T1[10<sup>-3</sup>]</b>	<b>T2[10<sup>-3</sup>]</b>
8.45	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.48	5	0.53	2.34	2.65	2.53	0.45	2.68	2.48	2.43
8.50	10	1.28	5.37	6.06	5.82	1.21	6.17	5.43	5.63
8.52	15	2.02	8.47	9.56	9.19	1.92	9.72	8.50	8.95
8.53	20	2.66	11.20	12.70	12.23	2.56	12.55	11.22	11.92
8.55	25	3.45	14.13	15.97	15.41	3.32		13.90	14.91
8.56	30	4.43	17.61	19.53	18.90	4.34		16.76	17.96
8.57	35	5.58	21.79	23.40	22.77	5.39		19.90	21.17
	40	6.76	27.27	27.35	26.88	6.32		23.04	24.38
9.00	40	7.25	28.05	27.75	27.40	6.57		23.18	24.50
	45							26.75	28.00
	50							29.80	30.80
	0							0.90	1.50
								прит. -	затез.+
<b>Мерење бр. 3</b>			<b>Датум: 6.04.2011.</b>						
<b>Време[h]</b>	<b>Сила[kN]</b>	<b>U1[mm]</b>	<b>U2[mm]</b>	<b>U3[mm]</b>	<b>U4[mm]</b>	<b>U5[mm]</b>	<b>U6[mm]</b>	<b>T1[10<sup>-3</sup>]</b>	<b>T2[10<sup>-3</sup>]</b>
10.15	0			0.00				0.00	0.00
	5			3.00				2.45	2.58
	10			7.00				6.24	5.70
	15			10.00				9.24	8.77
								прит. -	затез.+

Мерење бр. 4									
Време[h]	Сила[kN]	U1[mm]	U2[mm]	U3[mm]	U4[mm]	U5[mm]	U6[mm]	T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]
10.30	0			0.00				0.00	0.00
	5			3.00				3.23	2.97
	10			7.00				6.34	5.92
	15			10.00				9.60	8.99
	20			13.00				12.82	12.05
	25			17.00				16.01	15.02
	30			21.00				19.20	18.05
	35			25.00				22.38	21.00
	40			29.00				25.68	24.08
	43			30.00				27.46	25.82
	45			32.00				29.12	27.43
	48			33.00				30.95	29.23
	50			35.00				32.62	30.93
	53			38.00				34.58	32.94
	55			40.00				36.20	34.50
	58			42.00				38.10	36.52
	60			44.00				39.63	38.22
	0			0.00				0.00	0.00
								прит. -	затез.+

## 6.2.1.2. УЗОРАК бр. 11

Табела 12. Записници са испитивања узорка бр.11

Ојачање FRP		0.3125	%	Димензије:		10/19,2 cm					Контролн о мерење U3
Датум:		17.02.2011.									
Тежина греде:		29.705	kg	γ=	4.83	kN/m <sup>3</sup>					
Мерење бр. 1											
Време[h]	Сила[kN]	U1[mm]	U2[mm]	U3[mm]	U4[mm]	U5[mm]	U6[mm]	T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]	U5'[mm]	
9.45	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04	0.00	0.00	0.00	
	5	0.68	2.54	2.76	2.76	0.45	3.84	2.07	2.25	0.57	
	10	1.82	5.98	6.47	6.42	1.21	7.69	4.62	4.92	1.56	
	15	3.04	9.33	10.11	9.96	2.00	11.42	7.02	7.43	2.55	
	20	4.25	12.71	13.81	13.50	2.80	15.19	9.44	9.90	3.50	
	25	5.46	16.18	17.62	17.15	3.63	19.00	11.94	12.44	4.55	
	30	6.81	19.90	21.69	21.01	4.57	23.06	14.57	15.06	5.63	
	35	7.95	23.40	25.56	24.70	5.49		17.15	17.58	6.65	
	40	9.33	27.18	29.70	28.68	6.43		19.80	20.13	7.82	
	45	10.70	31.09	34.01	32.74	7.39		22.44	22.53	9.05	
	50	12.18	35.05	38.48	37.15	8.56		25.07	24.77	10.47	
	0	3.22	3.11	3.13	3.29	1.92		0.05	-0.97	3.54	
								прит. -	затез.+		

## 6.2.1.3 УЗОРАК бр. 12

Табела 13. Записници са испитивања узорка бр. 12

Ојачање FRP: **0.625** %      Димензије: 10/19,2 cm  
 Датум: **18.02.2011.**  
 Тежина греде: 29.7 kg       $\gamma =$  4.83 kN/m<sup>3</sup>

<b>Мерење бр. 1</b>									
Време[h]	Сила[kN]	U1[mm]	U2[mm]	U3[mm]	U4[mm]	U5[mm]		T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]
9.05	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000		0.00	0.00
	5	0.37	2.06	2.31	2.29	0.495		2.04	1.81
	10	0.95	4.73	5.34	5.20	1.214		4.64	4.14
	15	1.52	7.57	8.54	8.24	1.932		7.47	6.62
	<b>20</b>	<b>1.99</b>	<b>10.22</b>	<b>11.54</b>	<b>11.09</b>	<b>2.582</b>		<b>10.14</b>	<b>8.98</b>
	25	2.50	12.85	14.49	13.89	3.231		12.76	11.27
	30	3.10	15.60	17.55	16.80	3.916		15.39	13.76
	35	3.67	18.55	20.85	19.93	4.692		18.33	16.21
	40	4.40	21.36	23.95	22.88	5.450		20.95	18.48
	45	5.70	24.71	27.59	26.41	6.640		23.78	20.93
	50	5.95	27.80	31.01	29.85	7.940		26.33	23.20
	55	6.80	31.37	34.94	33.77	9.340		29.32	25.82
	60	7.64	34.55	38.40	37.23	10.480		31.78	28.13
	65	8.78	38.55	42.80	41.70	11.920		34.00	30.95
	70	LOM !							
								прит. -	затез.+
<b>Датум:</b>		<b>6.04.2011.</b>							
<b>Мерење бр. 2</b>									
Време[h]	Сила[kN]	U1[mm]	U2[mm]	U3[mm]	U4[mm]	U5[mm]		T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]
10.30	0			0.00				0.00	0.00
	5			3.00				2.31	2.43
	10			6.00				4.77	5.18
	15			10.00				7.06	7.72
	<b>20</b>			<b>13.00</b>				<b>9.36</b>	<b>10.38</b>
	25			15.00				11.81	13.15
	30			19.00				14.16	15.80
	35			22.00				16.47	18.44
	40			25.00				18.92	21.20
	45			29.00				21.30	23.86
	50			32.00				23.60	26.45
	55			35.00				26.13	29.27
	57.5			37.00				27.23	30.35
	60			40.00				29.23	32.22
	0			0.00				0.00	0.00
								прит. -	затез.+

## 6.2.1.4. УЗОРАК бр. 13

Табела 14. Записници са испитивања узорка бр. 13

<b>Ојачање: FRP</b>		<b>0,4000</b>	%	<b>Димензије:</b>		10/19,2 cm			
<b>Датум:</b>		<b>16.02.2011.</b>							
<b>Тежина греде:</b>		29.7	kg	$\gamma=$	4.83	kN/m <sup>3</sup>			
<b>Мерење бр. 1</b>									
<b>Време[h]</b>	<b>Сила[kN]</b>	<b>U1[mm]</b>	<b>U2[mm]</b>	<b>U3[mm]</b>	<b>U4[mm]</b>	<b>U5[mm]</b>	<b>U6[mm]</b>	<b>T1[10<sup>-3</sup>]</b>	<b>T2[10<sup>-3</sup>]</b>
11.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11.03	5	0.39	2.53	3.55	2.75	0.48	1.84	2.28	2.13
11.05	10	0.94	5.51	7.21	5.90	1.03	5.27	4.88	4.76
11.06	15	1.55	8.51	10.44	9.07	1.68	8.70	7.36	9.07
11.07	20	2.23	11.78	13.91	12.52	2.32	12.35	10.04	16.23
11.08	25	2.93	14.97	17.33	15.87	3.01	16.95	12.57	3003.00
11.10	30	3.71	18.50	21.19	19.61	3.76	19.84	15.38	5440.00
11.14	35	4.52	21.94	25.00	23.40	4.53	11.21	18.43	8865.00
	40	5.98	25.82	29.37	27.53	5.38	11.05	21.37	15450.00
	45	6.58	30.10	33.96	32.23	6.49		24.24	
	48	7.36	34.30	38.63	37.05	7.58		26.34	
								прит. -	затез.+
<b>Мерење бр. 2</b>									
		<b>Датум:</b>			<b>6.04.2011.</b>				
<b>Време[h]</b>	<b>Сила[kN]</b>	<b>U1[mm]</b>	<b>U2[mm]</b>	<b>U3[mm]</b>	<b>U4[mm]</b>	<b>U5[mm]</b>	<b>U6[mm]</b>	<b>T1[10<sup>-3</sup>]</b>	<b>T2[10<sup>-3</sup>]</b>
10.00	0			0.00					0.00
	5			3.00					2.70
	10			7.00					5.45
	15			10.00					8.15
	20			14.00					10.78
	25			19.00					13.46
	30			21.00					16.27
	35			26.00					19.00
	40			29.00					21.80
								прит. -	затез.+

## 6.2.1.5. УЗОРАК бр. 14

Табела 15. Записници са испитивања узорка бр. 14

Ојчање: FRP		0.375	%	Димензије:		10/19,2 cm			
Датум:		22.02.2011.							
Тежина греде:		29.71	kg	$\gamma=$	4.83	kN/m <sup>3</sup>			
<b>Мерење бр. 1</b>									
Време[h]	Сила[kN]	U1[mm]	U2[mm]	U3[mm]	U4[mm]	U5[mm]	U6	T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]
9.45	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00
	5	0.66	2.37	2.60	2.50	0.53		1.76	2.05
	10	1.47	5.27	5.83	5.58	1.28		3.91	4.60
	15	2.34	8.16	9.04	8.69	2.23		5.93	7.00
	20	3.26	11.40	12.60	12.15	3.16		8.13	9.56
	25	4.14	14.34	15.84	15.30	4.02		10.13	12.00
	30	5.12	17.62	19.50	18.89	5.04		12.30	14.60
	35	6.15	20.98	23.20	22.64	6.12		14.06	17.02
	40	7.25	24.67	27.13	26.66	7.26		15.60	19.62
	45	8.40	28.70	31.53	31.33	8.70		17.20	22.10
	48	9.07	30.86	33.86	33.90	9.66		17.77	23.12
10.00	0	1.70	2.23	2.63	3.53	2.56		0.39	-0.10
								прит. -	затез.+
<b>Мерење бр. 2, 9.03.2011.</b>									
Време[h]	Сила[kN]	U3[mm]	T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]					
10	0	0.00	0.00	0.00					
	5	2.00	2.26	2.67					
	10	6.00	4.34	5.26					
	15	9.00	6.34	7.70					
	20	12.00	8.37	10.26					
	25	16.00	10.49	12.90					
	30	18.00	12.43	15.36					
	35	22.00	13.96	17.92					
	40	24.00	15.84	20.55					
	42.5	27.00	16.73	21.80					
	45	29.00	17.53	23.07					
	47.5	31.00	18.43	24.39					
	50	33.00	19.30	25.77					
	52.5	36.00	20.17	27.18					
	55	38.00	20.85	28.32					
	57.5		прит. -	затез.+					

## 6.2.2. СЕРИЈА 2

## 6.2.2.1. УЗОРАК бр. 20

Табела 16. Записници са испитивања узорка бр. 20

Ојчање: FRP		нема	%	Димензије:			10x16 cm		
Датум:		23.02.2011 god.							
Тежина греде:		29.705	kg	$\gamma=$	4.83	kN/m <sup>3</sup>			
Мерење бр. 1									
Време[h]	Сила[kN]	U1[mm]	U2[mm]	U3[mm]	U4[mm]	U5[mm]		T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]
9.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00
	5	0.85	3.78	4.16	3.92	0.34		3.09	2.16
	10	1.94	8.50	9.39	8.79	1.04		6.94	4.37
	15	3.16	13.49	14.90	13.95	1.92		10.80	6.65
	20	4.32	18.44	20.33	19.04	2.80		14.72	9.08
	25	5.55	23.49	25.84	24.21	3.75		18.62	11.25
	30	7.28	28.80	31.59	29.65	4.76		21.26	13.25
	35	9.72	34.64	37.93	35.63	5.87		25.33	15.45
	40	12.17	40.73	44.52	41.78	6.94		28.89	17.31
	43	13.56	44.27	48.36	45.33	7.54		30.82	18.53
	43	13.82	48.73	72.88	61.02	8.16		27.85	0.72
9.30	0	4.72	10.53	23.37	17.38	2.56		2.80	1.28
								прит. -	затез.+

## 6.2.2.2. УЗОРАК бр. 21

Табела 17. Записници са испитивања узорка бр. 21

Ојчање: FRP		0.3750	%	Димензије:			10x16 cm		
Датум:		24.02.2011 god.							
Тежина греде:		29.705	kg	$\gamma=$	4.83	kN/m <sup>3</sup>			
Мерење бр. 1									
Време[h]	Сила[kN]	U1[mm]	U2[mm]	U3[mm]	U4[mm]	U5[mm]		T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]
8.45	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.00
	5	0.77	4.04	4.42	4.06	0.64			1.29
	10	1.89	9.34	10.20	9.38	1.39			2.99
	15	2.87	14.47	15.79	14.51	2.19			4.33
	20	3.95	19.80	21.58	19.88	3.05			5.62
	25	5.10	25.24	27.48	24.45	4.16			6.61
	30	6.39	30.87	33.52	31.23	5.44			6.93
	35	7.61	36.52	39.56	36.97	6.64			6.40
	40	9.07	42.86	46.16	43.10	7.96			
	45	9.76	45.51	48.92	45.62	8.64			
9.00	0	0.94	2.07	2.23	2.26	1.80			
								прит. -	затез.+

<b>Мерење бр. 2, 8.03.2011.</b>				
Време[h]	Сила[kN]	U3[mm]	T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]
10	0	0.00		0.00
	5	6.00		7.00
	10	12.00		12.00
	15	18.00		17.00
	20	24.00		20.80
	25	30.00		23.50
	30	37.00		27.50

Напомена: Апаратура за уношење силе се кривила бочно, због неједнаког гњечења дрвених влакана код ослонаца.

			прит. -	затез. +
--	--	--	---------	----------

<b>Мерење бр. 3, 8.03.2011.</b>				
Време[h]	Сила[kN]	U3[mm]	T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]
11	0	0.00		0.00
	5	7.00		5.20
	10	13.00		9.50
	15	19.00		12.80
	20	26.00		17.20
	25	32.00		21.60
	30	39.00		25.80
	35	45.00		27.60
			прит. -	затез. +

Напомена: Изрезане су карбонске траке у дужини од 16cm, мерено од краја модела код ослонаца са обе стране и постављене су челичне плочице, да спрече гњечење дрвена влакана.

<b>Мерење бр.4, 9.03.2011.</b>				
Време[h]	Сила[kN]	U3[mm]	T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]
8	0	0.00		0.00
	5	9.00		4.90
	10	14.00		9.30
	15	24.00		13.10
	20	27.00		16.60
	25	34.00		19.80
	30	41.00		23.00
	35	46.00		25.20
	37.5	51.00		25.50
	40	54.00		25.50
	42.5	59.00		
			прит. -	затез. +



## 6.2.2.3. УЗОРАК бр. 22

Табела 18. Записници са испитивања узорка бр. 22

<b>Ојачање: FRP</b>		<b>0.3750</b>	%	<b>Димензија:</b>			10/16.00		
<b>Датум:</b>		<b>24.02.2011.</b>							
<b>Тежина греде:</b>		24.715	kg	$\gamma=$		kKN/m <sup>3</sup>			
<b>Мерење бр. 1</b>									
Време[h]	Сила[kN]	U1[mm]	U2[mm]	U3[mm]	U4[mm]	U5[mm]		T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]
10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00
	5.00	0.62	2.56	2.83	2.67	0.19		2.15	2.06
	10.00	1.54	6.79	7.47	7.04	0.70		5.73	5.55
	15.00	2.54	10.73	11.78	11.07	1.25		8.97	8.82
	20.00	3.71	14.95	16.39	15.38	1.88		12.33	12.05
	25.00	4.88	19.25	21.07	19.76	2.54		15.73	15.46
	30.00	6.08	23.61	25.80	24.21	3.32		19.11	18.92
	35.00	7.42	28.25	30.79	28.92	4.13		22.60	22.80
	40.00	8.74	32.86	35.73	33.66	4.95		26.05	25.80
	42.50	9.47	35.38	38.42	36.17	5.43		27.80	26.85
	44.00	10.25	37.70	41.07	28.56	5.95		30.74	35.11
11.00	0.00	2.16	1.85	1.69	1.52	1.06		6.00	1.12
								прит. -	затез.+
<b>Мерење бр. 2, 8.03.2011.</b>									
Време[h]	Сила[kN]	U3[mm]	T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]					
8,35	0	0.00	0.00	0.00					
	5	4.00	3.69	3.81					
	10	10.00	7.28	7.97					
	15	16.00	11.03	12.26					
	20	21.00	14.69	16.36					
	25	25.00	18.33	20.49					
	30	32.00	22.02	24.75					
	35	36.00	25.69	28.89					
	40	42.00	29.48	33.01					
	42.5	43.00	31.25	34.63					
	45	48.00	33.27	36.57					
			прит. -	затез.+					

## 6.2.3. СЕРИЈА 3

## 6.2.3.1. УЗОРАК бр. 31

Табела 19. Записници са испитивања узорка бр. 31

<b>Ојачање: FRP</b>		<b>0.875</b>	%	<b>Димензије:</b>			10/3,2 + 12/19,2 cm		
<b>Datum:</b>		25.02.2011.							
<b>Тежина греде:</b>			kg	$\gamma=$	4.83	kN/m <sup>3</sup>			
<b>Мерење бр. 1</b>									
Време[h]	Сила[kN]	U1[mm]	U2[mm]	U3[mm]	U4[mm]	U5[mm]		T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]
8.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00
	5.00	0.33	1.70	1.83	1.80	0.25		1.17	1.40
	10.00	0.69	3.92	4.26	4.14	0.56		2.77	3.27
	15.00	1.10	6.49	7.04	6.87	1.04		4.43	5.26
	<b>20.00</b>	<b>1.56</b>	<b>8.96</b>	<b>9.07</b>	<b>9.44</b>	<b>1.47</b>		<b>4.02</b>	<b>7.13</b>
	25.00	2.09	11.49	12.43	12.01	1.92		5.88	9.00
	30.00	2.57	14.44	15.58	15.16	2.62		9.11	11.03
	35.00	2.86	17.17	18.51	18.00	3.67		10.70	12.95
	40.00	3.02	19.99	21.51	20.50	4.45		12.16	14.88
	45.00	3.34	23.24	24.97	24.37	5.30		12.40	17.02
	50.00	3.53	26.65	28.55	27.97	6.55		13.17	19.06
	55.00	3.99	30.42	32.51	32.05	8.25		14.18	21.22
	55.00	4.19	31.18	33.26	32.88	9.52		14.17	21.41
9.00	0.00	1.00	3.89	3.36	3.89	3.84		-2.84	0.25
								прит. -	затез.+
<b>Мерење бр. 2, 9.03.2011.</b>									
Време[h]	Сила[kN]	U3[mm]	T1[10 <sup>-3</sup> ]	T2[10 <sup>-3</sup> ]					
9	0	0.00	0.00	0.00					
	5	3.00	1.68	2.11					
	10	7.00	3.30	4.06					
	15	10.00	4.91	6.02					
	<b>20</b>	<b>13.00</b>	<b>6.38</b>	<b>7.89</b>					
	25	15.00	8.00	9.85					
	30	16.00	9.60	11.84					
	35	20.00	11.25	13.92					
	40	23.00	12.75	15.80					
	45	25.00	14.40	17.88					
	50	27.00	15.88	19.77					
	52.5		прит.	затез.+					

## 6.3. Прилог В: Преглед трошкова

Табела 20. Преглед трошкова израде узорака

узорак бр.	О П И С Е Л Е М Е Н Т А	јединица мере	јединична цена (Eura)	КОЛИЧИНЕ				УКУПНО (Eura)
				Лепљено ламелирано дрво [m <sup>3</sup> ]	CarboDur S512 [m]	CarboDur S1012[m]	CarboDur M1214[m]	
10	Узорак од леп. лам. дрвета	m <sup>3</sup>	500	0,0614				30,72
11	Узорак од леп. лам. дрвета	m <sup>3</sup>	500	0,0614				30,72
	Карбонска трака S512	m	18,50		3,20			59,20
	Епоксид лепило SikaDur-30	kg	12,85				1,0	12,85
12	Узорак од леп. лам. дрвета	m <sup>3</sup>	500	0,0614				30,72
	Карбонска трака S1012(2/3)	m	43,25			3,20		92,16
	Епоксид лепило SikaDur-30	kg	12,85				1,0	12,85
13	Узорак од леп. лам. дрвета	m <sup>3</sup>	500	0,0614				30,72
	Карбонска трака S1012	m	43,20			3,20		138,24
	Епоксид лепило SikaDur-30	kg	12,85				1,0	12,85
14	Узорак од леп. лам. дрвета	m <sup>3</sup>	500	0,0614				30,72
	Карбонска трака 1/3S1012	m	43,5			3,20		46,40
	+ S512	m	18,50		2,80			51,80
	Епоксид лепило SikaDur-30	kg	12,85				1,0	12,85
20	Узорак од леп. лам. дрвета	m <sup>3</sup>	500	0,0512				25,6
21	Узорак од леп. лам. дрвета	m <sup>3</sup>	500	0,0512				25,6
	Карбонска трака S512	m	18,50			3,20		59,2
	Епоксид лепило SikaDur-30	kg	12,85				1,0	12,85
22	Узорак од леп. лам. дрвета	m <sup>3</sup>	500	0,0512				25,6
	Карбонска трака S512	m	18,50			2,47		45,70
	Епоксид лепило SikaDur-30	kg	12,85				1,0	12,85
31	Узорак од леп. лам. дрвета	m <sup>3</sup>	500	0,0635				31,74
	Карбонска трака M1014	m	49,53				2,02	100,0
	Епоксид лепило SikaDur-30	kg	12,85				1,0	12,85
Цена израде ојачаних узорака		205,82		Цена израде леп. лам. дрв. узорака				262,14
		1:	3	Цена ојачаних модела			682,70	

У цену није ушла уградња трака, транспорт узорака, обрачун ПДВ-а и рабат, однос 1:2,6

**Напомена:**

У табели бр.20 дате су тржишне цене за дрвене лепљене ламелиране носаче који се производе у D.O.O. „PIRAMIDA“ из Сремске Митровице и цене за карбонске FRP траке из каталога D.O.O. „SIKA“.

## 7. БИОГРАФИЈА

**Радивој Соларов**, рођен је 18. марта 1954. године у Тителу. Средњу грађевинску школу завршио 1973. Дипломирао је 1980. на Факултету техничких наука у Новом Саду, на предмету Испитивање конструкција.

На Природно-математичком факултету у Новом Саду одбранио је специјалистички рад 1995, а на смеру за програмирање, 1998. одбранио магистарски рад под насловом: „Објектно оријентисана спецификација информатичког система за прорачун темељних носача на еластичној подлози“. Државни испит у грађевинској струци положио је у Загреб 1983, а државни испит за рад у просвети у Новом Саду 1987. године.

Аутор је CARDS програма за реформу средњег стручног образовања у оквиру пројекта финансираног од стране ЕУ и Министарства просвете и спорта Републике Србије, бр: 03/SER01/12/2003.

Поседује лиценце Инжењерске коморе Србије: одговорног пројектант грађевинских конструкција, одговорног извођача грађевинских радова, одговорног пројектанта грађевинске геотехнике и одговорног извођача радова грађевинске геотехнике. Од јула 2011. године уписан је у регистар *Судских вештака – грађевинске струке*.

Члан је управног одбора Друштва грађевинских инжењера Новог Сада и у организационом одбору је међународне конференције „Савремена грађевинска пракса“, која се одржава сваке године и популарише истакнуте научне радове.

### **Радно искуство:**

- од 1. 9. 1980. до 2013. Техничка школа „Милева Марић Ајнштајн“, Нови Сад, Натавник теоријске наставе за стручне предмете: Мостове, Металне и дрвене конструкције, Статику, Механику тла са фундањем и др;
- од 1. 10. 2005 до 2007. „Виша грађевинско-геодетска школа“ у Београду, виши предавач за уже научну област Грађевинске конструкције, предмет Механика тла са фундањем.
- Од 1993. ради у више приватних фирми које се баве изградњом и пројектовањем објеката;
- Као одговорни пројектант израдио самостално 50 идејних пројеката, 80 главних пројеката, 150 техничких извештаја и извештаја и вештачења за легализацију објеката.
- Као одговорни пројектант геомеханике аутор је 250 геомеханичких елабората.
- Као одговорни извођач радова учествовао на извођењу 50 стамбених и индустријских објеката, а на 10 био надзорни орган.
- Као судски вештак урадио 20 процена некретнина и вештачио у два кривична случаја.

**Објављени научни радови и уџбеник:**

- [1] Соларов, Р., „ОБЈЕКТНО-ОРИЈЕНТИСАНА СПЕЦИФИКАЦИЈА ИНФОРМАЦИОНОГ СИСТЕМА ЗА ПРОРАЧУН ТЕМЕЉНИХ НОСАЧА НА ЕЛАСТИЧНОЈ ПОДЛОЗИ“, *магистарска теза*, Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Институт за математику, Нови Сад, 1998.
- [2] Solarov, R., Racković, M., Surla, D., „OBJECT-ORIENTED SPECIFICATION OF THE INFORMATION SYSTEM FOR CALCULATION OF THE FOUNDATION GIRDER“, XIII Conference on Applied Mathematics **PRIM '98**, pp. 53, Novi Sad, 1999.
- [3] Solarov, R., Racković, M., „THE APPLICATION OF STRUCTURAL SYSTEM ANALYSIS IN CALCULATION OF THE FOUNDATION GRID“, XII Conference on Applied Mathematics **PRIM '97**, pp. 165-171, Subotica, 1997.
- [4] Solarov, R., Racković, M., „OBJECT-ORIENTED SPECIFICATION OF THE CALCULATION OF THE CONCRETE FOUNDATION“, Abstract of the XIV Conference on Applied Mathematics PRIM 2000, pp. 25, Subotica, 2000.
- [5] Соларов, Р., „СТРУКТУРНА СИСТЕМ АНАЛИЗА У ПРОГРАМИРАЊУ ТЕМЕЉА“, Зимски семинар: ПРИМЕНА РАЧУНАРА У АРХИТЕКТУРИ, АНАЛИЗИ КОНСТРУКЦИЈА И ФУНДИРАЊУ, ДГИТНС и ФТН, пп. 61-68, Нови Сад, 1997.
- [6] Соларов, Р., „Презентација софтверског пакета за димензионисање неармираних темеља“, Примена рачунара у геодезији и грађевинарству, 3 Републички семинар за наставнике стручних предмета, Грађевински факултет у Београду 26-27.02.2000, Београд.
- [7] Solarov, R., „OBJECT ORIENTED ANALYSIS OF THE INFORMATION SYSTEM FOR CALCULATION OF THE FOUNDATION GRID IN ELASTIC GROUND“, DYNET Workshop, Modern Programming Concepts and Their Applications in Engineering, Session III, November 22-24, 2001, University of Niš, Niš.
- [8] Соларов, Р., Вуковић, Д., „ТЕХНИКА ИЗВОЂЕЊА ТЕМЕЉНЕ ЈАМЕ У ГРАДСКИМ УСЛОВИМА (Локација: Београд, Суботичка бр 23)“, Симпозијум: ПРОЦЕДУРЕ И ПРОБЛЕМАТИКА ИЗГРАДЊЕ ОБЈЕКТА, пп. 131-138, Врњачка Бања, 2006.
- [9] Соларов, Р., Ратковић, Д., „ИЗВОЂЕЊЕ ГЕОТЕХНИЧКИХ РАДОВА У ЦИЉУ ПРИКУПЉАЊА ПОДАКА ЗА ПРОЈЕКТОВАЊЕ СТАМБЕНО-ПОСЛОВНОГ ОБЈЕКТА Р+4-Р+8 (Локација: Београд, Угао 29. Новембра, Ђуре Ђаковића и Цвијићеве)“, Симпозијум: ПРОЦЕДУРЕ И ПРОБЛЕМАТИКА ИЗГРАДЊЕ ОБЈЕКТА, пп.143-152, Врњачка Бања, 2006.
- [10] Соларов, Р., Ковачевић, Д., Радоњанин, В., Глишић М., „АРМИРАЊЕ ДРВЕНИХ ЛАМЕЛИРАНИХ НОСАЧА СА КАРБОНСКИМ ТРАКАМА“, ДИМК-а, Међународни симпозијум о истраживањима и примени савремених достигнућа у грађевинарству у области материјала и конструкција, пп. 259-271, XXV Конгрес-Тара, 19-21. октобар 2011.
- [11] Соларов, Р., „ОСВРТ НА ПРИМЕНУ КАРБОНСКИХ ТРАКА ПРИ ОЈАЧАЊУ ГРАЂЕВИНСКИХ КОНСТРУКЦИЈА“, Девети и трећи међународни научни скуп iNDiS 2003, пп. 457-466, Новембар 2003, Нови Сад,
- [12] Соларов, Р., Нове технологије у грађевинарству, „ПРИМЕНА ФИБЕР-КАРБОНСКИХ ТРАКА“, АГ магазин, архитектура и грађевинарство бр. 18. пп. 76-79, март 2004, Београд.
- [13] Solarov, R., Glišić, M., „Glulam Beams Reinforced with FRP Strips and Their Application in Architecture“, SPATIUM International Review, No. 32, pp.28-35, December 2014.
- [14] Соларов, Р., „МЕХАНИКА ТЛА И ФУНДИРАЊЕ“, уџбеник за III разред грађевинске техничке школе (Техничар за: високоградњу, нискоградњу и хидроградњу), ЗАВОД ЗА УЏБЕНИКЕ И НАСТАВНА СРЕДСТВА, БЕОГРАД, 2004.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани: \_\_\_\_\_ мр. Радивој Соларов, дипл. инг. грађ.

број индекса \_\_\_\_\_

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

### **ПРИЛОГ ТЕОРИЈИ СПРЕЗАЊА ДРВЕНИХ ЛАМЕЛИРАНИХ НОСАЧА КАРБОНСКИМ ВЛАКНИМА**

- 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 ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанта



У Београду, 10. јануар 2014 год.



Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: мр Радивој Соларов, дипл. инг. грађ.

Број индекса \_\_\_\_\_

Студијски програм \_\_\_\_\_

Наслов рада: **ПРИЛОГ ТЕОРИЈИ СПРЕЗАЊА ДРВЕНИХ ЛАМЕЛИРАНИХ  
НОСАЧА КАРБОНСКИМ ВЛАКНИМА**

Ментор: проф. др Милан Глишић, дипл. инг. арх., редовни професор  
Архитектонског факултета, Универзитета у Београду

Потписани мр Радивој Соларов, дипл. инг. грађ.

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 докторанта**

У Београду, 10. Јануар 2014 год.



---



Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

### **ПРИЛОГ ТЕОРИЈИ СПРЕЗАЊА ДРВЕНИХ ЛАМЕЛИРАНИХ НОСАЧА КАРБОНСКИМ ВЛАКНИМА**

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао 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.

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 докторанта**

У Београду, 10. Јануар 2014 год.



---

1. Ауторство - Дозвољавање умножавања, 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 умножавања, 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 умножавања, 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 умножавања, 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 умножавања, 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 умножавања, 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.