

Универзитет у Београду
Грађевински факултет

Марија Г. Тодоровић

**ОЈАЧАЊЕ ДРВЕНИХ НОСАЧА У ЗОНИ
РЕДУКЦИЈЕ ВИСИНЕ ПРЕСЕКА**

докторска дисертација

Београд, 2019.

University of Belgrade
Faculty of Civil Engineering

Marija G. Todorović

**STRENGTHENING OF NOTCHED
TIMBER BEAMS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2019.

Универзитет у Београду
Грађевински факултет

Марија Г. Тодоровић, маг. инж. грађ.

ОЈАЧАЊЕ ДРВЕНИХ НОСАЧА У ЗОНИ РЕДУКЦИЈЕ ВИСИНЕ ПРЕСЕКА
докторска дисертација

Ментор:

Проф. др Бошко Стевановић, дипл. грађ. инж.

Грађевински факултет Универзитета у Београду

Комисија:

1. Проф. др Бошко Стевановић, дипл. грађ. инж.

Грађевински факултет Универзитета у Београду

2. Проф. др Драгослав Стојић, дипл. грађ. инж.

Грађевинско-архитектонски факултет Универзитета у Нишу

3. В. проф. др Иван Глишовић, дипл. грађ. инж.

Грађевински факултет Универзитета у Београду

Датум одбране:

ОЈАЧАЊЕ ДРВЕНИХ НОСАЧА У ЗОНИ РЕДУКЦИЈЕ ВИСИНЕ ПРЕСЕКА

Резиме:

Потреба за редукцијом висине дрвених носача најчешће се јавља код ослонаца, када архитектонски услови обликовања конструкције захтевају смањену висину на овом месту. Као последица редукције висине, а услед сложеног напонског стања (затезање управно на влакна и смицање), на засеченим деловима носача формирају се хоризонталне пукотине. Пропагација пукотине може довести до лома носача. Разматрајући проблеме који се јављају са редукцијом висине дрвених носача, овај рад има за циљ да утврди могућности примене ојачања и предложи методе прорачуна носача са редукованом висином пресека код ослонаца. Акцент је стављен на примену савремених материјала као што су GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*) шипке за ојачање.

У оквиру овог рада извршена су експериментална испитивања на савијање до лома неојачаних и ојачаних носача од лепљеног ламелираног дрвета са редукованом висином пресека код ослонаца. Као ојачање су коришћени завртњеви и GFRP шипке. Понашање носача је описано кроз дијаграме сила - угиб, расподелу напона и деформација, облике лома и вредности граничне носивости. Поред наведеног, анализирани су различите конфигурације ојачања на месту редукције висине пресека како би се дошло до оптималног распореда с аспекта максималног побољшања носивости у односу на неојачане носаче. Добијени резултати експерименталних испитивања неојачаних и ојачаних засечених носача су послужили као основа за дефинисање аналитичких метода прорачуна и нумеричких модела на бази методе коначних елемената развијених у *Abaqus*-у.

На основу теоријских разматрања и експерименталних испитивања утврђено је да GFRP шипке представљају ефикасно средство ојачања дрвених носача са редукованом висином пресека код ослонаца. Адекватно постављање ојачања може обезбедити пуну носивост носача на савијање, као да нема слабљења пресека.

Кључне речи: лепљено ламелирано дрво, носач, редукција висине пресека, ојачање, завртњеви, GFRP шипке, експериментално испитивање, аналитички прорачун, МКЕ.

Научна област: Грађевинарство

Ужа научна област: Дрвене конструкције

УДК број:

STRENGTHENING OF NOTCHED TIMBER BEAMS

Abstract:

Notches in timber beams are usually made at the supports, as a consequence of architectural design requirements that ask for a reduction in height at these positions. As a result of height reduction, and due to a complex stress state (tensile stress perpendicular to grain and shear stress), horizontal cracks are formed at the notches. Crack propagation can lead to beam failure in the notch area. Considering the problems that occur in notched beams, this thesis aims to determine the possibilities of reinforcement techniques and to propose design methods of end-notched beams. The emphasis is placed on the application of modern materials such as GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer) rods as a reinforcement.

In this thesis, bending tests on unreinforced and reinforced end-notched glulam beams were carried out until the point of failure. Screws and GFRP rods were used as reinforcement. Behaviour of tested beams is described through load-deflection diagrams, distribution of stresses and deformations, failure modes and ultimate loads. In addition, different reinforcement schemes of notches have been analysed in order to determine an optimal configuration from the aspect of ultimate load improvement in relation to the unreinforced beams. The obtained results of experimental investigations on unreinforced and reinforced end-notched beams served as a basis for defining analytical design methods and numerical models based on the finite element method developed in Abaqus.

Based on theoretical and experimental analysis it was determined that GFRP rods represent an effective method of end-notched beams reinforcement. Adequate reinforcement technique can restore the full load carrying capacity of end-notched beams, as if there were no notches at the supports.

Keywords: glulam, beam, notch, reinforcement, screws, GFRP rods, experimental investigation, analytical design, FEM.

Scientific field: Structural engineering

Scientific subfield: Timber structures

UDC number:

Садржај

Резиме	i
Abstract.....	ii
Садржај.....	iii
Попис слика.....	vi
Попис табела	xiii
1 Увод	1
1.1 Предмет истраживања	1
1.2 Циљ истраживања.....	3
2 Дрвени носачи са редукованом висином пресека	5
2.1 Општа разматрања	5
2.2 Механичко понашање носача са редукованом висином пресека.....	7
2.2.1 Напонско стање на месту редукације висине пресека	7
2.2.2 Облици лома носача са редукованом висином пресека.....	8
2.3 Ојачање носача са редукованом висином пресека	15
2.4 Метод прорачуна носача са редукованом висином пресека	16
2.4.1 Прорачун према стандарду Еврокод 5.....	16
2.4.2 Прорачун према стандарду СРПС.....	19
2.5 Закључци	20
3 GFRP шипке	21
3.1 Општа разматрања	21
3.1.1 FRP композити	21
3.2 Механичке карактеристике GFRP шипки	24
4 Преглед литературе	26
4.1 Неојачани носачи са редукованом висином пресека код ослонца.....	26
4.2 FRP шипке – примена код ојачања дрвених носача изложених савијању ...	32
4.3 Ојачање носача са редукованом висином пресека код ослонца	46
4.4 Закључци	55
5 Експериментална испитивања	57
5.1 Физичке и механичке карактеристике дрвета.....	57
5.1.1 Запреминска маса дрвета	58
5.1.2 Чврстоћа дрвета на савијање и модул еластичности	60

5.1.3	Чврстоћа дрвета на смицање	65
5.1.4	Чврстоћа дрвета на затезање управно на влакна	68
5.2	Физичке и механичке карактеристике завртњева.....	71
5.2.1	Чврстоћа завртњева на затезање	71
5.2.2	Чврстоћа завртњева на чупање управно на влакна дрвета	71
5.3	Физичке и механичке карактеристике GFRP шипки	74
5.3.1	Чврстоћа GFRP шипки на затезање	75
5.3.2	Испитивање GFRP шипки на чупање из дрвета	79
5.4	Физичке и механичке карактеристике епоксидног лепка.....	81
5.5	Испитивање неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца	83
5.5.1	Припрема и ојачање носача	87
5.5.2	Експериментално испитивање носача	92
5.5.3	Влажност дрвета	95
6	Анализа резултата експерименталних испитивања	98
6.1	Механичко понашање неојачаних носача – Серија U.....	98
6.1.1	Дијаграми оптерећење - угиб и облик лома.....	98
6.1.2	Носивост, деформабилност и крутост носача.....	100
6.2	Механичко понашање носача ојачаних завртњевима – Серије R-s90 и R-s45	102
6.2.1	Дијаграми оптерећење - угиб и облик лома.....	102
6.2.2	Носивост, деформабилност и крутост носача.....	108
6.3	Механичко понашање носача ојачаних GFRP шипкама – Серије R-f90 и R-f45.....	112
6.3.1	Дијаграми оптерећење - угиб и облик лома.....	112
6.3.2	Носивост, деформабилност и крутост носача.....	123
6.4	Закључци	130
7	Аналитички прорачун	132
7.1	Поређење експерименталних и аналитичких резултата	133
7.1.1	Неојачани носачи – Серија U	133
7.1.2	Носачи ојачани завртњевима – Серије R-s90 и R-s45	135
7.1.3	Носачи ојачани GFRP шипкама – Серије R-f90 и R-f45	136

7.2	Прорачун ојачања за експлоатационо оптерећење.....	141
7.3	Дискусија резултата.....	145
8	Нумеричка анализа	148
8.1	Опис нумеричког модела	148
8.1.1	Геометријске карактеристике нумеричког модела.....	148
8.1.2	Карактеристике материјала у нумеричком моделу	149
8.1.3	Гранични услови у нумеричком моделу	151
8.1.4	Оптерећење у нумеричком моделу	151
8.1.5	Нумеричко моделирање ојачања.....	152
8.1.6	Избор коначних елементата у нумеричком моделу	153
8.1.7	Нумеричко моделирање кохезивне зоне	154
8.1.8	Нумерички прорачун.....	158
8.2	Резултати нумеричке анализе	158
8.2.1	Неојачани носачи – Серија U	158
8.2.2	Носачи ојачани завртњевима – Серије R-s90 и R-s45	161
8.2.3	Носачи ојачани GFRP шипкама – Серије R-f90 и R-f45	167
8.3	Дискусија резултата.....	176
9	Закључак	179
	Литература	186
	Биографија аутора	191
	Изјава о ауторству	192
	Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада	193
	Изјава о коришћењу	194

Попис слика

Слика 2.1 Примери редуkcије висине пресека дрвених носача.....	6
Слика 2.2 Геометријске карактеристике редукованог дела пресека дрвеног носача код ослонца.....	6
Слика 2.3 Напони на месту редуkcије висине носача [1].....	8
Слика 2.4 Пукотина и напони који узрокују њено отварање и пропагацију	9
Слика 2.5 Напони који се јављају на врху пукотине [2].....	9
Слика 2.6 Облици лома засечних носача [4].....	11
Слика 2.7 Оријентација пукотине у односу на правац пружања влакана дрвета [2]	12
Слика 2.8 Најчешће конфигурације узорака за тестирање облика лома I [2].....	13
Слика 2.9 Најчешће конфигурације узорака за тестирање облика лома II [2]	14
Слика 2.10 Узорак за тестирање комбинованог облика лома [2]	15
Слика 2.11 Ојачање постављено са спољне стране пресека.....	16
Слика 2.12 Ојачање постављено унутар пресека	16
Слика 2.13 Носач са редукованом висином пресека код ослонца.....	17
Слика 2.14 Вертикално ојачање носача са редукованом висином пресека код ослонца	18
Слика 3.1 Типови FRP шипки	23
Слика 3.2 GFRP (<i>Glass Fibre Reinforced Polymer</i>) шипке.....	24
Слика 3.3 Дијаграм напон - дилатација GFRP шипки [15].....	25
Слика 4.1 Диспозиција експерименталног испитивања – <i>Gustafsson</i> [16].....	28
Слика 4.2 Диспозиција експерименталног испитивања – <i>Asiz & Smith</i> [17].....	29
Слика 4.3 Диспозиција експерименталног испитивања – <i>Rautenstrauch</i> и група аутора [18].....	30
Слика 4.4 Диспозиција експерименталног испитивања – <i>Toussaint</i> и група аутора [19].....	31
Слика 4.5 Попречни пресеци испитаних ојачаних и неојачаних узорака – <i>Gentile, Svecova & Rizkalla</i> [20].....	35
Слика 4.6 Шеме ојачања греда CFRP шипкама – <i>Borri, Corradi & Grazini</i> [22]	38
Слика 4.7 Шеме ојачања носача CFRP шипкама – <i>Micelli, Scialpi & La Tegola</i> [23]	39

Слика 4.8 Шеме ојачања носача CFRP шипкама – <i>Johnsson, Blanksvard & Carolin</i> [24]	40
Слика 4.9 Шеме ојачања греда GFRP шипкама – <i>Yusof</i> [25]	41
Слика 4.10 Шеме ојачања носача GFRP шипкама – <i>Raftery & Whelan</i> [26].....	42
Слика 4.11 Шеме ојачања носача BFRP шипкама – <i>Raftery & Kelly</i> [11].....	43
Слика 4.12 Шеме ојачања носача GFRP шипкама – <i>Yang</i> и група аутора [27]	44
Слика 4.13 Шеме ојачања носача CFRP шипкама – <i>Yang</i> и група аутора [28].....	45
Слика 4.14 Диспозиција испитивања носача са редукованом висином пресека код ослонца – <i>Coureau</i> и група аутора [30].....	48
Слика 4.15 Диспозиција испитивања носача са редукованом висином пресека код ослонца – <i>Blaß & Bejtka</i> [31]	49
Слика 4.16 Диспозиција испитивања ојачаних носача – <i>Gomez & Svecova</i> [33]	52
Слика 4.17 Ојачање носача са редукованом висином пресека код ослонца – <i>Franke, Franke & Harte</i> [34]	55
Слика 5.1 Узорци за мерење запреминске масе дрвета	58
Слика 5.2 Диспозиција испитивања чврстоће дрвета на савијање и модула еластичности.....	61
Слика 5.3 Дијаграми оптерећење - угиб при испитивању чврстоће на савијање....	64
Слика 5.4 Карактеристични лом узорка при испитивању чврстоће на савијање	64
Слика 5.5 Диспозиција узорка за испитивање чврстоће дрвета на смицање паралелно влакнима	65
Слика 5.6 Испитивање чврстоће дрвета на смицање	66
Слика 5.7 Типичан лом узорка при испитивању чврстоће дрвета на смицање	66
Слика 5.8 Диспозиција узорка за испитивање чврстоће дрвета на затезање управно на влакна	68
Слика 5.9 Испитивање чврстоће дрвета на затезање управно на влакна.....	69
Слика 5.10 Типичан лом узорка при испитивању чврстоће дрвета на затезање управно на влакна.....	69
Слика 5.11 Завртњеви за ојачање.....	71
Слика 5.12 Шематски приказ узорка за испитивање чврстоће завртњева на чупање управно на влакна дрвета.....	72

Слика 5.13 Узорци за испитивање чврстоће завртњева на чупање управно на влакна дрвета.....	72
Слика 5.14 Испитивање чврстоће завртњева на чупање управно на влакна дрвета	73
Слика 5.15 Узорак за испитивање чврстоће на затезање GFRP шипки	75
Слика 5.16 Испитивање чврстоће на затезање GFRP шипки	76
Слика 5.17 Дијаграми напон - дилатација GFRP шипки	77
Слика 5.18 Типичан облик лома при испитивању чврстоће на затезање GFRP шипки.....	77
Слика 5.19 Диспозиција узорка за испитивање носивости споја GFRP шипки и дрвета [45]	80
Слика 5.20 Облици лома споја GFRP шипки и дрвета [45].....	80
Слика 5.21 Диспозиција носача – Серија U	84
Слика 5.22 Диспозиција носача – Серија R-s90 и Серија R-s45	84
Слика 5.23 Диспозиција носача – Серија R-f90.....	85
Слика 5.24 Диспозиција носача – Серија R-f45.....	86
Слика 5.25 Минимална растојања средстава за ојачање [48].....	88
Слика 5.26 Носачи пре ојачања и испитивања	89
Слика 5.27 Узорак са рупама за завртњева	89
Слика 5.28 Постављање завртњева.....	89
Слика 5.29 Носач са уграђеним завртњевима.....	89
Слика 5.30 Припрема рупа за постављање GFRP шипки	90
Слика 5.31 Припрема лепка.....	90
Слика 5.32 Испуњавање рупа епоксидним лепком.....	91
Слика 5.33 Постављање GFRP шипки.....	91
Слика 5.34 Носачи са уграђеним GFRP шипкама	92
Слика 5.35 Носач постављен у рам за испитивање	93
Слика 5.36 Диспозиција експерименталног испитивања носача.....	93
Слика 5.37 Димензије плочица на местима уношења оптерећења.....	93
Слика 5.38 Елементи за наношење оптерећења	94
Слика 5.39 Ослоначки детаљи – покретан и непокретан ослонац.....	95
Слика 5.40 Угибомер у средини и угибомер на месту засека	95

Слика 5.41 Одређивање процента влажности дрвета влагомером	96
Слика 6.1 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију U.....	98
Слика 6.2 Карактеристичан лом неојачаних носача – Серија U, носач U6	99
Слика 6.3 Облик лома I и путања пукотине – Серија U, носач U9.....	99
Слика 6.4 Промена правца пукотине на месту дефекта грађе дрвета – Серија U, носач U7	99
Слика 6.5 Дијаграм оптерећење - размицање тачака код ослонаца за Серију U, носач U7	100
Слика 6.6 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-s90	103
Слика 6.7 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-s45	103
Слика 6.8 Карактеристичан лом носача ојачаних вертикалним завртњевима – Серија R-s90, носачи R2-s90 и R4-s90.....	104
Слика 6.9 Карактеристичан лом носача ојачаних косим завртњевима – Серија R-s45, носачи R1-s45 и R5-s45	104
Слика 6.10 Иницирање пукотине на месту нагле промене висине код носача ојачаних завртњевима, носач R3-s90	105
Слика 6.11 Нестабилан раст пукотине код носача ојачаних завртњевима, носач R2-s90.....	105
Слика 6.12 Чупање завртњева – Серија R-s	105
Слика 6.13 Промена правца пукотине на месту дефекта грађе дрвета – Серија R-s, носач R4-s90	106
Слика 6.14 Деформисни завртњеви након лома – Серија R-s.....	106
Слика 6.15 Дијаграм оптерећење - размицање тачака код ослонаца за Серију R-s90, носач R1-s90	107
Слика 6.16 Дијаграм оптерећење - размицање тачака код ослонаца за Серију R-s45, носач R5-s45	108
Слика 6.17 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f90 (R1 - R5)	113
Слика 6.18 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f90 (R6 - R10).....	113
Слика 6.19 Лом услед савијања носача ојачаних вертикалним GFRP шипкама – Серија R-f90, носачи R2-f90 и R3-f90.....	114
Слика 6.20 Лом услед смицања носача ојачаних вертикалним GFRP шипкама – Серија R-f90, носач R4-f90	114

Слика 6.21 Лом носача услед затезања у доњој зони на месту кврга у дрвету – Серија R-f90, носач R2-f90	115
Слика 6.22 Извлачење GFRP шипки – Серија R-f90, носач R4-f90.....	115
Слика 6.23 Лом услед савијања носача ојачаних вертикалним GFRP шипкама – Серија R-f90, носач R10-f90	116
Слика 6.24 Лом услед смицања носача ојачаних вертикалним GFRP шипкама – Серија R-f90, носач R8-f90	116
Слика 6.25 Пропагација пукотине целом дужином носача, без извлачења шипки, носач R8-f90	116
Слика 6.26 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f45 (R1 - R5).....	117
Слика 6.27 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f45 (R6 - R10).....	117
Слика 6.28 Лом услед смицања носача ојачаних косим GFRP шипкама – Серија R-f45, носачи R2-f45 и R3-f45	118
Слика 6.29 Лом услед савијања носача ојачаних косим GFRP шипкама – Серија R-f45, носач R5-f45	118
Слика 6.30 Комбиновани лом носача R4-f45.....	118
Слика 6.31 Лом носача R1-f45 услед чвора близу ослонца.....	119
Слика 6.32 Трагови пластификације притиснуте зоне носача R2-f45.....	119
Слика 6.33 Нестабилан раст пукотине код носача ојачаних GFRP шипкама – Серија R-f45, носач R3-f45	120
Слика 6.34 Извлачење GFRP шипки – Серија R-f45, носач R2-f45.....	120
Слика 6.35 Лом носача услед затезања у доњој зони на месту кврга у дрвету – носач R5-f45	120
Слика 6.36 Лом услед савијања носача ојачаних косим GFRP шипкама – Серија R-f45, носачи R6-f90 и R7-f90	121
Слика 6.37 Лом услед смицања носача ојачаних косим GFRP шипкама – Серија R-f45, носач R9-f45	121
Слика 6.38 Лом носача услед затезања у доњој зони на месту кврга у дрвету – носач R10-f45	121
Слика 6.39 Дијаграм оптерећење - размицање тачака код ослонаца за Серију R-f90, носач R1-f90	122

Слика 6.40 Дијаграм оптерећење - размицање тачака код ослонаца за Серију R-f90, носач R8-f90	122
Слика 6.41 Дијаграм оптерећење - размицање тачака код ослонаца за Серију R-f45, носач R5-f45	123
Слика 6.42 Дијаграм оптерећење - размицање тачака код ослонаца за Серију R-f45, носач R6-f45	123
Слика 8.1 Изглед модела неојачаног носача формираног у <i>Abaqus</i> -у.....	149
Слика 8.2 Правци главних оса.....	149
Слика 8.3 Гранични услови модела	151
Слика 8.4 Оптерећење задато у моделу.....	152
Слика 8.5 МКЕ модел – Серија R-s90	153
Слика 8.6 МКЕ модел – Серија R-s45	153
Слика 8.7 МКЕ модел – Серија R-f90 (R1 - R5)	153
Слика 8.8 МКЕ модел – Серија R-f90 (R6 - R10)	153
Слика 8.9 МКЕ модел – Серија R-f45 (R1 - R5)	153
Слика 8.10 МКЕ модел – Серија R-f45 (R6 - R10)	153
Слика 8.11 Подела модела на коначне елементе.....	154
Слика 8.12 Дијаграми напон - померање за кохезивну зону.....	155
Слика 8.13 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију U (експериментални и нумерички резултати).....	159
Слика 8.14 Облик лома носача Серије U – отварање пукотине.....	159
Слика 8.15 Тренутак отварања пукотине носача Серије U при напону затезања управно на влакна $\sigma_n = 1,15 \text{ N/mm}^2$	161
Слика 8.16 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-s90 (експериментални и нумерички резултати).....	162
Слика 8.17 Облик лома носача Серије R-s90 – МКЕ (расподела σ_n напона).....	162
Слика 8.18 Смичући напони у носачу са вертикалним завртњевима, тренутак пропагације пукотине преко другог завртња $\sigma_s = 5,85 \text{ N/mm}^2$	162
Слика 8.19 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-s45 (експериментални и нумерички резултати).....	165
Слика 8.20 Облик лома носача Серије R-s45 – МКЕ (расподела σ_n напона).....	165

Слика 8.21 Смичући напони у носачу са косим завртњевима, тренутак пропагације пукотине преко другог завртња $\sigma_s = 5,85 \text{ N/mm}^2$	165
Слика 8.22 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f90 (R1 - R5) (експериментални и нумерички резултати)	168
Слика 8.23 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f90 (R6 - R10) (експериментални и нумерички резултати)	168
Слика 8.24 Тренутак лома за носаче R1-f90 до R5-f90 – МКЕ (расподела σ_n напона).....	169
Слика 8.25 Тренутак лома за носаче R6-f90 до R10-f90 – МКЕ (расподела σ_n напона).....	169
Слика 8.26 Лом носача услед прекорачења носивости на савијање у доњим затегнутим влакнима за носаче R1-f90 до R5-f90 – МКЕ.....	169
Слика 8.27 Лом носача услед прекорачења носивости на савијање у доњим затегнутим влакнима за носаче R6-f90 до R10-f90 – МКЕ.....	169
Слика 8.28 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f45 (R1 - R5) (експериментални и нумерички резултати)	172
Слика 8.29 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f45 (R6 - R10) (експериментални и нумерички резултати)	172
Слика 8.30 Тренутак лома за носаче R1-f45 до R5-f45 – МКЕ (расподела σ_n напона).....	173
Слика 8.31 Тренутак лома за носаче R6-f45 до R10-f45 – МКЕ (расподела σ_n напона).....	173
Слика 8.32 Лом носача услед прекорачења носивости на савијање у доњим затегнутим влакнима за носаче R1-f45 до R5-f45 – МКЕ.....	174
Слика 8.33 Лом носача услед прекорачења носивости на савијање у доњим затегнутим влакнима за носаче R6-f45 до R10-f45 – МКЕ.....	174

Попис табела

Табела 2.1 Облици лома пукотина [3]	10
Табела 2.2 Измерене вредности критичног фактора интензитета напона K_{IC} [2] ...	13
Табела 2.3 Измерене вредности критичног фактора интензитета напона K_{IIC} [2] ..	14
Табела 3.1 Карактеристике влакана [10–13]	22
Табела 3.2 Карактеристике матрица [10]	23
Табела 3.3 Основне механичке карактеристике GFRP арматуре [15]	24
Табела 4.1 Експериментална испитивања носача са редукованом висином пресека код ослонца	27
Табела 4.2 Експериментална испитивања дрвених носача ојачаних FRP шипкама	33
Табела 4.3 Програм експерименталног испитивања – <i>Svecova & Eden</i> [21].....	36
Табела 4.4 Експериментална испитивања ојачања носача са редукованом висином пресека код ослонца	47
Табела 4.5 Програм експерименталног испитивања – <i>Amy & Svecova</i> [32].....	51
Табела 4.6 Експериментално испитивање неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека – <i>Jockwer</i> [4]	53
Табела 5.1 Резултати испитивања запреминске масе дрвета	59
Табела 5.2 Резултати испитивања чврстоће дрвета на савијање и модула еластичности	63
Табела 5.3 Резултати испитивања чврстоће дрвета на смицање.....	67
Табела 5.4 Резултати испитивања чврстоће дрвета на затезање управно на влакна	70
Табела 5.5 Карактеристике завртњева класе чврстоће 5.6	71
Табела 5.6 Резултати испитивања чврстоће завртњева на чупање управно на влакна дрвета.....	74
Табела 5.7 Основне механичке карактеристике GFRP арматуре (према техничком листу произвођача) [43]	74
Табела 5.8 Резултати испитивања чврстоће GFRP шипки на затезање	78
Табела 5.9 Поређење експерименталних резултата са техничким листом произвођача за GFRP шипке.....	79

Табела 5.10 Карактеристике лепка <i>Sikadur-30</i> узете према техничком листу произвођача [47]	82
Табела 5.11 Програм експерименталног испитивања.....	83
Табела 5.12 Резултати мерења процента влажности дрвета	96
Табела 6.1 Експериментални резултати испитивања Серије U	101
Табела 6.2 Експериментални резултати испитивања Серије R-s90.....	109
Табела 6.3 Експериментални резултати испитивања Серије R-s45.....	110
Табела 6.4 Експериментални резултати испитивања Серије R-f90 (R1 - R5).....	125
Табела 6.5 Експериментални резултати испитивања Серије R-f90 (R6 - R10).....	126
Табела 6.6 Експериментални резултати испитивања Серије R-f45 (R1 - R5).....	127
Табела 6.7 Експериментални резултати испитивања Серије R-f45 (R6 - R10).....	128
Табела 7.1 Поређење експерименталних и аналитичких резултата – Серија U	134
Табела 7.2 Поређење експерименталних и аналитичких резултата – Серија R-s .	136
Табела 7.3 Поређење експерименталних и аналитичких резултата – Серија R-f90 (R1 - R5).....	140
Табела 7.4 Поређење експерименталних и аналитичких резултата – Серија R-f90 (R6 - R10).....	140
Табела 7.5 Поређење експерименталних и аналитичких резултата – Серија R-f45 (R1 - R5).....	140
Табела 7.6 Поређење експерименталних и аналитичких резултата – Серија R-f45 (R6 - R10).....	141
Табела 8.1 Карактеристике дрвета као материјала примењене у нумеричкој анализи.....	150
Табела 8.2 Параметри кохезивне зоне	158
Табела 8.3 Поређење експерименталних и нумеричких резултата – Серија U	160
Табела 8.4 Поређење експерименталних и нумеричких резултата – Серија R-s90	163
Табела 8.5 Поређење експерименталних и нумеричких резултата – Серија R-s45	166
Табела 8.6 Поређење експерименталних и нумеричких резултата – Серија R-f90 (R1 - R5).....	170

Табела 8.7 Поређење експерименталних и нумеричких резултата – Серија R-f90 (R6 - R10).....	170
Табела 8.8 Поређење експерименталних и нумеричких резултата – Серија R-f45 (R1 - R5).....	175
Табела 8.9 Поређење експерименталних и нумеричких резултата – Серија R-f45 (R6 - R10).....	175

1 УВОД

1.1 Предмет истраживања

Дрво представља важан грађевински материјал због карактеристика као што су: велика чврстоћа наспрам мале тежине, лака обрада, велика могућност обликовања, једноставна монтажа и атрактиван изглед. Поред тога, дрво је обновљив и биоразградив материјал са минималним енергетским захтевима у процесу производње, обраде и примене. Захтеви савременог грађевинарства као што су трајност, енергетска ефикасност и естетика изискују оптимално коришћење традиционалних грађевинских материјала и употребу савремених материјала, уз примену нових технологија у процесу производње и техничких иновација у процесу изградње. У циљу постизања захтеваних карактеристика конструктивних елемената, данас је све чешћа појава комбиновања дрвета са различитим типовима савремених материјала.

Редукција висине дрвених носача се врши из разлога ограничења висине код ослонаца, ради остваривања веза, побољшања бочне стабилности, постављања инсталација итд. Носивост дрвених носача на местима нагле промене висине пресека, на засеченим деловима, знатно је умањена. Поред смањене површине попречног пресека, на овом месту се јављају велике концентрације напона. Досадашња испитивања носача са редукованом висином пресека оптерећених на савијање су показала појаву напона затезања управно на влакна на месту нагле промене висине попречног пресека. Како дрво има малу чврстоћу на затезање управно на влакна, а услед скупљања дрвета баш на месту нагле промене висине, на деловима носача где је редукована висина попречног пресека могу да се формирају хоризонталне пукотине. Пропагација пукотина услед пораста оптерећења може довести до лома носача.

Редукција висине попречног пресека дрвених носача не препоручује се без адекватног ојачања. За постизање жељене носивости дрвених носача на местима редукције висине пресека могу се користити како спољашње постављени конструктивни елементи ојачања, тако и они који се постављају унутар попречног пресека. Као ојачање најчешће се примењују: плочасти производи на бази дрвета

(подвезице од шперплоча), челичне траке, класични завртњеве за дрво и самоуграђујући завртњеве (*Self-tapping screws*), профилисане челичне шипке (*Glued-in rods*), полимери ојачани влакнима (FRP - *Fibre Reinforced Polymer*) итд. FRP материјали могу бити у форми трака, шипки и тканина, а могу бити на бази различитих влакана: карбонских, стаклених, араמידних, базалтних итд.

У прошлости, различите технике ојачања, са различитим степеном ефикасности, тестиране су са циљем повећања носивости и крутости дрвених носача на месту редуције висине попречног пресека. Истраживања су углавном била фокусирана на примену завртњева за дрво и профилисаних шипки постављених у припремљене рупе испуњене лепком. Све ове технике ојачања постижу значајне и корисне резултате, али само неке од њих су развијене и/или комерцијализоване и скоро ниједна није достигла статус да буде универзално препозната и прихваћена. Резултати интервенције ојачања зависе од квалитета дрвета, величине и облика редуције висине попречног пресека носача, начина постављања ојачања итд. И поред постојања одређеног броја испитивања, системи ојачања применом FRP композита су недовољно истражени, а нарочито употреба FRP шипки.

У оквиру Еврокода 5 дат је поступак за прорачун смичућег напона на месту редуције висине попречног пресека, без израза за прорачун евентуалних ојачања. Као допуна Еврокоду 5, Немачки национални анекс предлаже поступак прорачуна ојачања на месту редуције висине пресека носача. Метод прорачуна дат у оквиру Еврокода 5 и Немачког националног анекса узима у обзир само напон затезања управан на влакна дрвета, док занемарује појаву смичућих напона у правцу влакана. Као последица тога, до појаве пукотина на месту редуције висине попречног пресека долази и пре него што то овај прорачун предвиђа. Јасно је да овај метод прорачуна није на страни сигурности, јер не узима у обзир сложено напонско стање које се јавља на месту нагле промене висине пресека. Сходно томе, даља испитивања треба да буду усмерена ка теоријској и експерименталној анализи дрвених носача са редукованом висином пресека, са и без ојачања, ради утврђивања адекватног метода прорачуна.

Предмет истраживања у оквиру ове докторске дисертације биће понашање лепљених ламелираних дрвених носача са редукованом висином пресека ојачаних

GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*) шипкама и завртњевима за дрво при експлоатационом и граничном оптерећењу, односно, утврђивање њиховог напонског и деформацијског стања за различите фазе оптерећења све до лома. Понашање носача ће бити описано кроз дијаграме сила - угиб, расподелу напона и деформација, облике лома и вредности граничне носивости. Поред наведеног, анализираће се различите конфигурације ојачања на месту редукације висине попречног пресека како би се дошло до оптималног распореда с аспекта максималног побољшања носивости у односу на неојачане носаче. Такође, поред сопствених експерименталних истраживања, проблем ће се симулирати и анализирати нумеричким моделима. Рад има за циљ да предложи аналитичку методу за одређивање носивости дрвених носача са редукованом висином попречног пресека, извођењем новог прорачунског модела или корекцијом постојећих прорачунских модела.

1.2 Циљ истраживања

Постоји више проблема који се јављају са редукацијом висине попречног пресека дрвених носача, те их је потребно анализирати и истражити како би се омогућила адекватна и оптимална примена овог типа носача. Као најбитнији истичу се: познавање сложеног напонског стања на местима редукације висине, затим одабир адекватног ојачања носача, извођење процедуре ојачања и утврђивање одговарајуће аналитичке методе прорачуна.

Добијени резултати и подаци из овог рада треба да дају допринос у сагледавању и проучавању горе наведених проблема, али и да послуже као основа за дефинисање методе прорачуна, чиме би се олакшала и проширила примена ојачања дрвених носача са редукованом висином пресека у свакодневној инжењерској пракси.

На основу претходно изнетих чињеница, циљеви овог истраживања су:

- Преглед и анализа досадашњих истраживања у области ојачања дрвених носача са редукованом висином пресека;
- Експериментална, нумеричка и аналитичка анализа дрвених носача са редукованом висином пресека и њихово ојачање различитим системима са

циљем утврђивања правила и законитости у понашању ових носача. Као ојачања употребљени су завртњеве за дрво и GFRP шипке.

- Анализа различитих конфигурација и положаја ојачања са циљем оптимизације примене ових носача у пракси;
- Формулисање аналитичке методе прорачуна, уз прихватљиву рачунску сложеност, чиме би дата метода била прикладна за практичну инжењерску употребу.

2 ДРВЕНИ НОСАЧИ СА РЕДУКОВАНОМ ВИСИНОМ ПРЕСЕКА

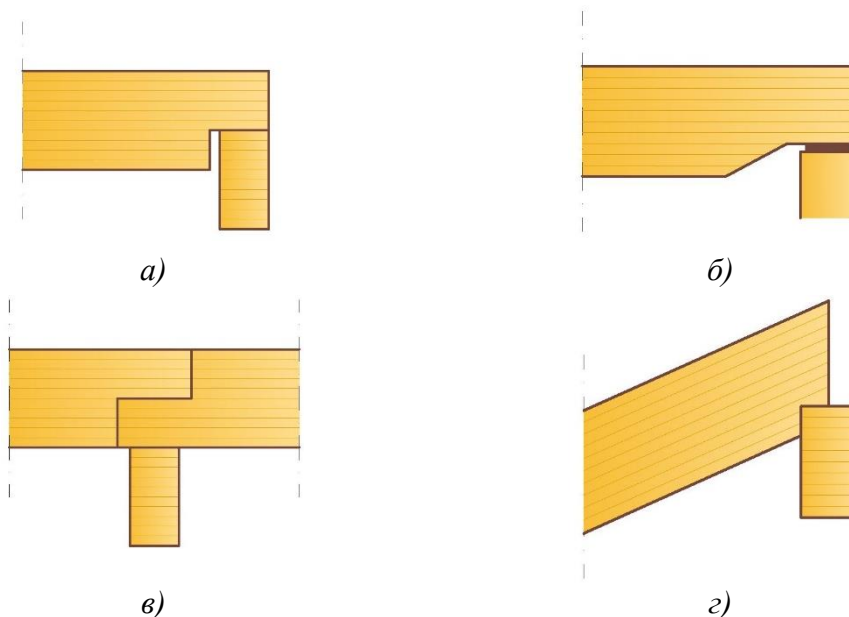
2.1 Општа разматрања

Редукција висине пресека (засецање) монолитних дрвених носача или носача од лепљеног ламелираног дрвета је неповољна са становишта сложених напонских стања која се јављају на местима нагле промене висине. У зависности од положаја редукције висине, напон који се јавља може бити притисак управан на влакна дрвета или затезање управно на влакна дрвета. Како дрво као материјал има малу чврстоћу на затезање управно на влакна, ако се јави овај вид напрезања он најчешће доводи до лома носача. Зато је препоручљиво да се редукција висине носача избегава, а када то није могуће да се носач ојача адекватним средствима за ојачање на местима редукције висине.

Разлози за редукцију висине пресека дрвених носача могу бити различити, а у пракси се најчешће срећу следећи:

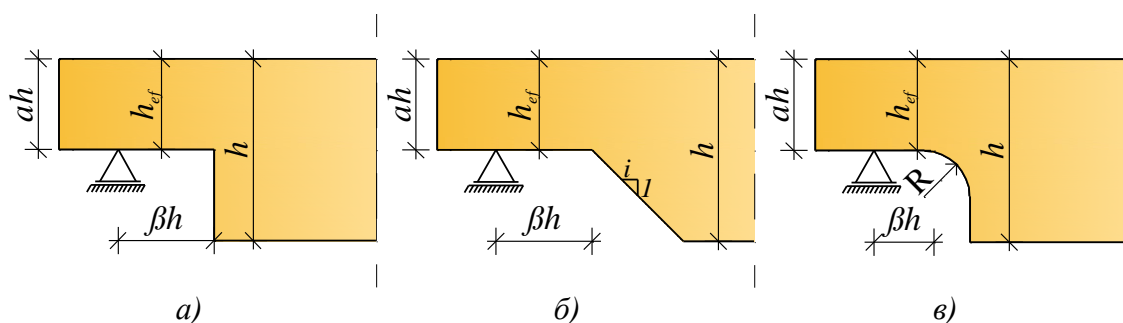
- ограничење висине код ослонаца (слика 2.1 а) и б)),
- остваривање веза између носача (слика 2.1 в)),
- побољшање бочне стабилности носача (слика 2.1 г)),
- постављање инсталација и сл.

Потреба за редукцијом висине дрвених носача најчешће се јавља код ослонаца, када архитектонски услови обликовања конструкције захтевају смањену висину пресека на овом месту. У оквиру ове дисертације, испитивање је усмерено управо на лепљене ламелиране дрвене носаче са редукованом висином пресека код ослонаца, а сва разматрања ће се односити на засецање извршено под правим углом. Даље, пошто је најнеповољнији вид напрезања за дрво затезање управно на влакна, говориће се конкретно о појави овог напонског стања узрокованог наглом променом висине попречног пресека носача.



Слика 2.1 Примери редуције висине пресека дрвених носача

Начин редуције висине је одређен условима ослањања носача. Основне геометријске карактеристике правога носача су b/h као ширина и висина попречног пресека и l као распон носача. Поред тога, код носача са редукованом висином пресека се уводе и коефицијенти α и β којима се описују геометријске карактеристике редукованог дела пресека. На слици 2.2 су приказане геометријске карактеристике редукованог дела попречног пресека код ослоња за различите облике редуције висине пресека.



Слика 2.2 Геометријске карактеристике редукованог дела пресека дрвеног носача код ослоња

Коефицијент α представља однос редуковане висине h_{ef} и пуне висине носача h (слика 2.2 а)). У случају носача који имају постепену промену висине пресека са косим или радијалним засецањем, овај коефицијент је однос минималне висине попречног пресека управно на осу носача h_{ef} и пуне висине носача h

(слика 2.2 б) и в)). Дужина редукованог дела пресека βh представља однос момента и трансверзалне силе и мери се од ослонаца до места засецања (слика 2.2).

На слици 2.2 б) и в) су приказане коса и радијална промена висине пресека носача које, ако су изведене правилно, могу знатно смањити концентрацију напона у односу на редуције висине изведене под правим углом. Извођење радијалне промене висине носача захтева прецизност и пажљив одабир радијуса због нехомогене структуре дрвета и могућег присуства пукотина.

2.2 Механичко понашање носача са редукованом висином пресека

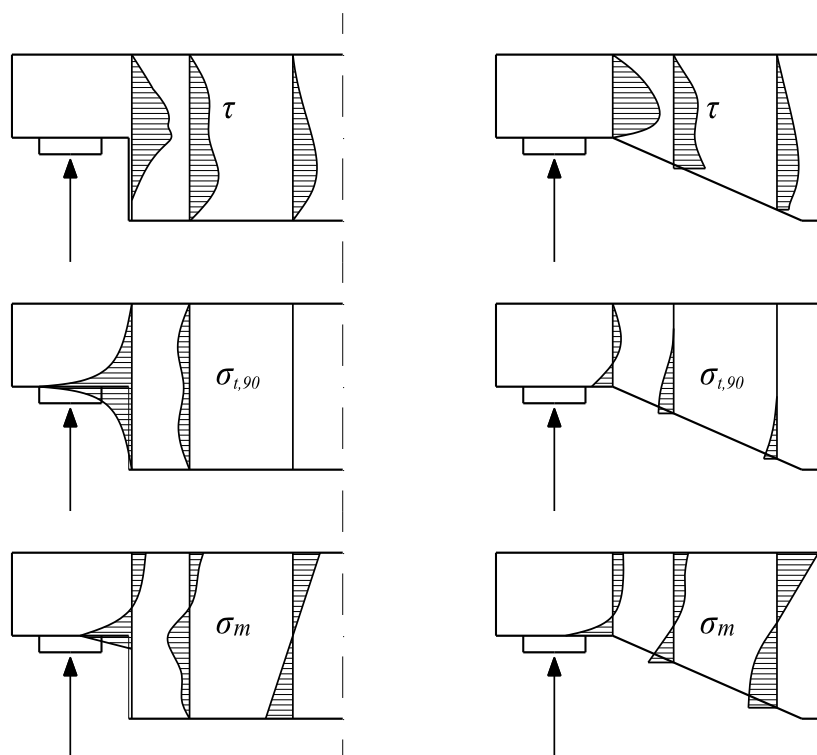
2.2.1 Напонско стање на месту редуције висине пресека

Када се ради о класичним елементима оптерећеним на савијање, као последица редуције висине попречног пресека носача код ослонаца, поред постојећих напона смицања и савијања, јављају се напони управно на влакна дрвета на местима нагле промене висине носача. У зависности од оптерећења и статичког система оваквих носача, може се јавити притисак или затезање управно на влакна. На слици 2.3 су приказани напони који се јављају у попречном пресеку услед редуције висине носача код ослонаца. Као што се види из дијаграма напона повољније је када се смањење висине пресека врши постепено са косим засецањем носача.

Као што је већ поменуто, дрво има малу чврстоћу на затезање управно на влакна и малу смичућу чврстоћу. Такође, ове вредности доста варирају као последица нехомогености дрвета као материјала, те је лом који настаје услед појаве ових напона непредвидив. Поред тога што не постоје упозорења (попут великих деформација) да ће доћи до лома, он је и крте природе. Зато се најчешће препоручује избегавање редуције висине носача или ојачање носача на овом месту. Када редуцију висине није могуће избећи, мора се посветити посебна пажња прорачуну оваквих носача.

Различити параметри попут карактеристика материјала, геометрије и услова средине могу бити од утицаја на носивост носача са редукованом висином пресека код ослонаца. Свакако као најзначајнији параметар се истиче коефицијент α , јер се са већом редуцијом висине више смањује носивост попречног пресека. Дужина

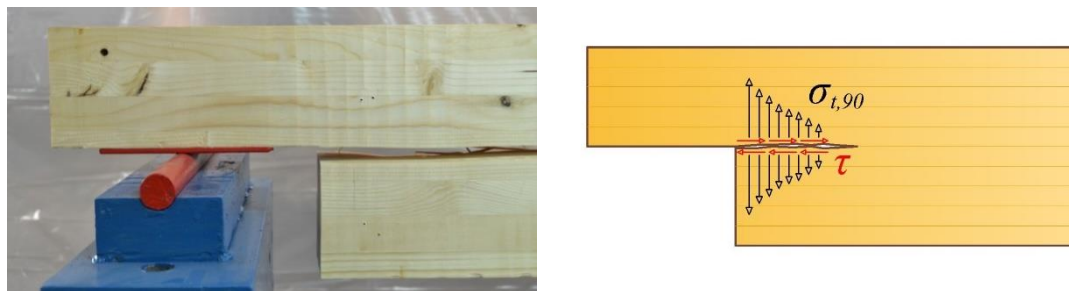
редукованог дела пресека βh такође има значајан утицај, јер се повећањем момента при константној трансверзалној сили смањује капацитет носивости носача на месту редуције висине пресека. Обликовање самог угла засецања је од изузетног значаја јер се заобљавањем или закошењем постиже блажи прелаз са пуне висине на редуковану, па се тако смањује и концентрација напона на месту нагле промене висине пресека. Даље, познато је да промена влажности у дрвеним елементима утиче на чврстоћу дрвета, па је тако и у случају носача са редукованом висином пресека, нарочито зато што су ивице редукованог дела изложене утицајима спољашње средине, а тиме и промени влажности.



Слика 2.3 Напони на месту редуције висине носача [1]

2.2.2 Облици лома носача са редукованом висином пресека

Као последица редуције висине носача, а услед сложеног напонског стања (пре свега затезања управно на влакна) и услед скупљања дрвета баш на месту нагле промене висине, на засеченим деловима носача формирају се хоризонталне пукотине [1], као што је приказано на слици 2.4. Пукотина одваја носач на два дела и тиме смањује висину попречног пресека. Поред тога што је појава пукотина неповољна са естетске стране, пропација пукотине може довести до лома носача у зони ослабљеног попречног пресека.

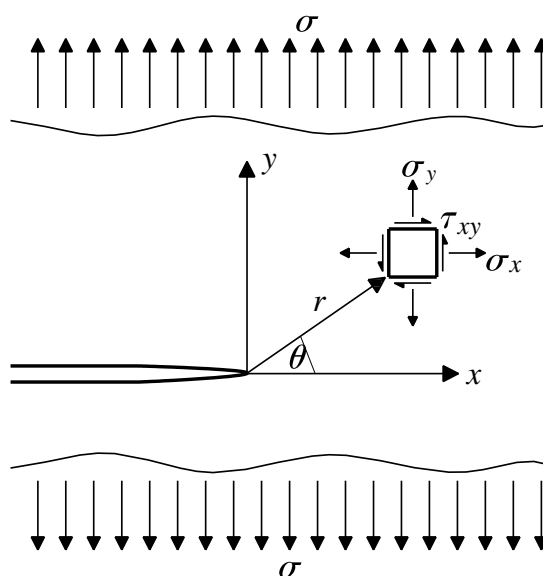


Слика 2.4 Пукотина и напони који узрокују њено отварање и пропацију

Концентрација напона управно на влакна, на месту нагле промене висине попречног пресека, слична је сингуларитету напона који се јавља на врху оштрих пукотина. Како је реч о сложенем напонском стању, не могу се користити класичне чврстоће дрвета, те је неопходно применити теорију енергије лома како би се описала носивост дрвета у овом случају. Како је ово сложен и непрактичан процес за конструкцијско дрво, механика лома уводи критеријум лома базиран на напонском стању на врху пукотине [2]. Уводи се фактор интензитета напона K који представља величину сингуларитета напона на врху пукотине и за познато напонско стање и геометрију има вредности:

$$\begin{pmatrix} K_I \\ K_{II} \\ K_{III} \end{pmatrix} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \begin{pmatrix} \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix}, \text{ за } \theta = 0 \quad (2.1)$$

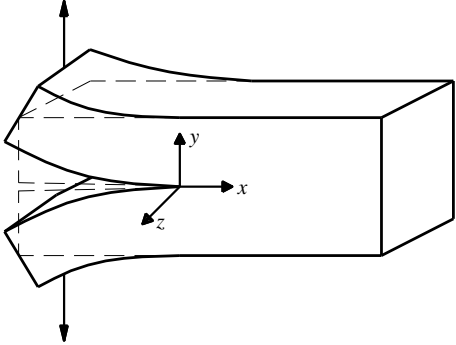
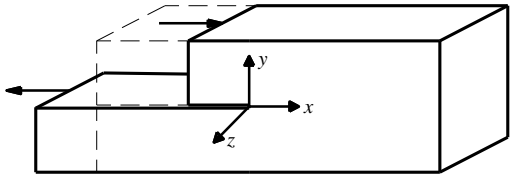
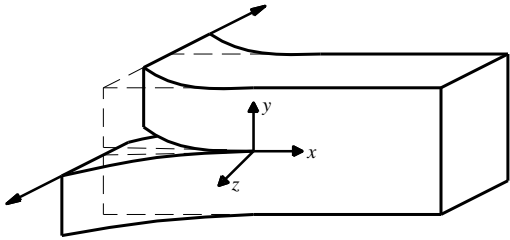
Објашњење напона и геометријских величина која фигуришу у изразу 2.1 дато је на слици 2.5.



Слика 2.5 Напони који се јављају на врху пукотине [2]

Механика лома дефинише три облика (мода) лома пукотина, која су приказана у табели 2.1. У зависности од положаја пукотине, може бити присутан један, два или чак сва три облика лома.

Табела 2.1 Облици лома пукотина [3]

	<p>Облик лома I Отварање пукотине</p> $K_I \neq 0, K_{II} = 0, K_{III} = 0$ $u_y \neq 0, u_x = u_z = 0$
	<p>Облик лома II Смицање у равни (клизање)</p> $K_I = 0, K_{II} \neq 0, K_{III} = 0$ $u_x \neq 0, u_y = u_z = 0$
	<p>Облик лома III Смицање изван равни</p> $K_I = 0, K_{II} = 0, K_{III} \neq 0$ $u_z \neq 0, u_x = u_y = 0$

Како фактор K дефинише интензитет напона на врху пукотине, он може послужити као параметар за одређивање критичног стања пукотине (стање напона када се њен раст више не може зауставити). У случају облика лома I, за познато напонско стање, геометрију узорка и дужину пукотине, фактор K_I се изражава као:

$$K_I = \gamma \sigma \sqrt{a} \quad (2.2)$$

где је:

γ – бездимензионални геометријски коефицијент;

σ – напон у околини пукотине;

a – дужина пукотине.

Критични фактор интензитета напона пукотине K_{IC} је карактеристика материјала којом се дефинише отпорност материјала на отварање пукотине. Када се ова вредност превазиђе напрезањем, долази до критичног раста пукотине. Напон при коме долази до пропагације пукотине и на крају до лома материјала се изражава у облику:

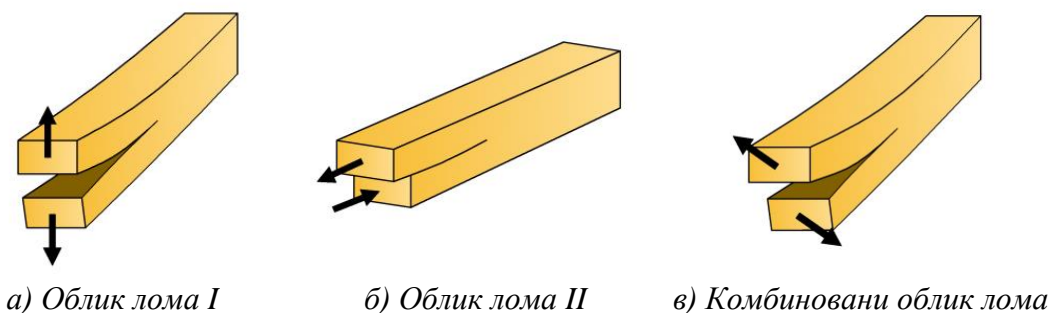
$$\sigma_f = \frac{K_{IC}}{\gamma\sqrt{a}} \quad (2.3)$$

На сличан начин се могу одредити и критични фактори интензитета напона пукотине за облике лома II и III – K_{IIC} и K_{IIIC} .

У случају редуције висине пресека носача код дрвених конструкција могу се јавити следећи доминантни облици лома:

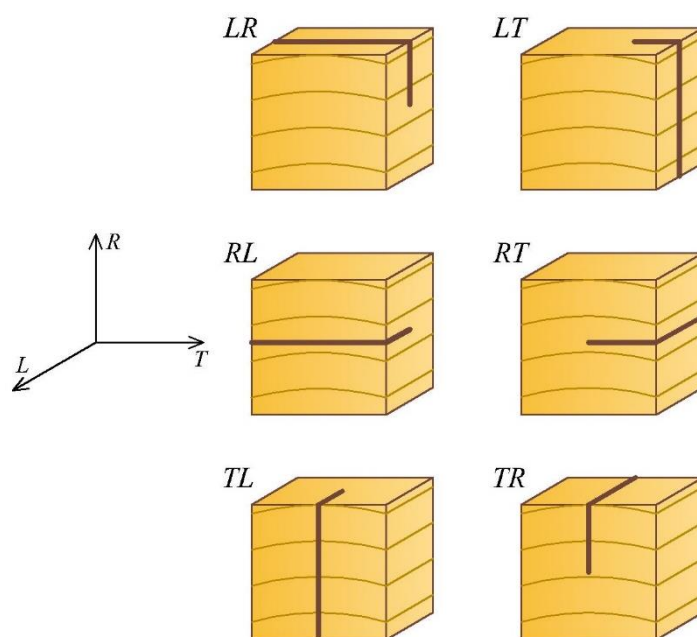
- Ако је пукотина проузрокована затезањем управно на влакна дрвета то је облик лома I као што је приказано на слици 2.6 а).
- Лом проузрокован смицањем представља облик лома II (слика 2.6 б)).
- Комбинација претходна два облика лома представља комбиновани облик лома, као што је приказано на слици 2.6 в).

Отварање пукотина је очигледан механизам лома у случају неојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонца, па је зато усвојено да је облик лома I доминантан код оваквих носача. Како ће бити приказано у наставку рада, облик лома II је честа појава код ојачаних носача са редукованом висином пресека заједно са обликом лома I. Облик лома III се ретко јавља у пракси када је реч о дрвеним конструкцијама, а свакако није релевантан за ово испитивање.



Слика 2.6 Облици лома засечних носача [4]

Тип лома у многоме зависи од правца пружања пукотине у односу на влакна дрвета. Дефинише се шест различитих оријентација пукотина (слика 2.7), где прво слово означава правац управан на раван пукотине, а друго слово правац пружања пукотине. Словима L , R и T су означени лонгитудинални, радијални и тангенцијални правац влакана, редом. Узимајући у обзир различите облике лома који се могу јавити, постоји велики број могућих комбинација. Међутим, због природних карактеристика дрвета пропација пукотина је најчешће у правцу влакана, па се разматрају само RL и TL оријентације пукотине.



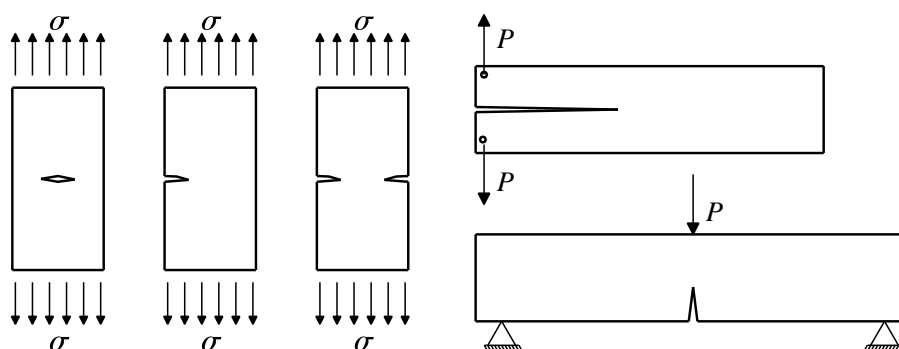
Слика 2.7 Оријентација пукотине у односу на правац пружања влакана дрвета [2]

2.2.2.1 Облик лома I и вредности фактора K_{IC}

За већину материјала је најкритичнији управо облик лома I. Ова чињеница посебно важи за дрвене конструкције с обзиром на велике разлике у чврстоћама дрвета у различитим правцима (последича оријентације влакана) – чврстоћа у тангенцијалном и радијалном правцу је 10 - 30% чврстоће у правцу влакана.

Као што је већ речено, критични фактор интензитета напона пукотине K_{IC} је мера отпорности материјала на отварање пукотине. У књизи [2] су дате вредности фактора K_{IC} и параметра γ за најчешће случајеве у пракси, одређене за изотропан материјал. Експериментална и аналитичка испитивања критичног фактора интензитета напона пукотине K_{IC} су показала да је разлика за изотропан и

ортотропан материјал занемарљива, те се ове вредности могу користити и за дрво [5]. Предност фактора интензитета напона у односу на ослобођену енергију при отварању пукотине је у томе што се за познату геометрију и оптерећење може лако одредити. Узорци на којима се експериментално одређује вредност критичног фактора интензитета напона су приказани на слици 2.8.



Слика 2.8 Најчешће конфигурације узорака за тестирање облика лома I [2]

У табели 2.2 су дате измерене вредности критичног фактора интензитета напона K_{IC} различитих врста дрвета за RL и TL оријентације пукотине.

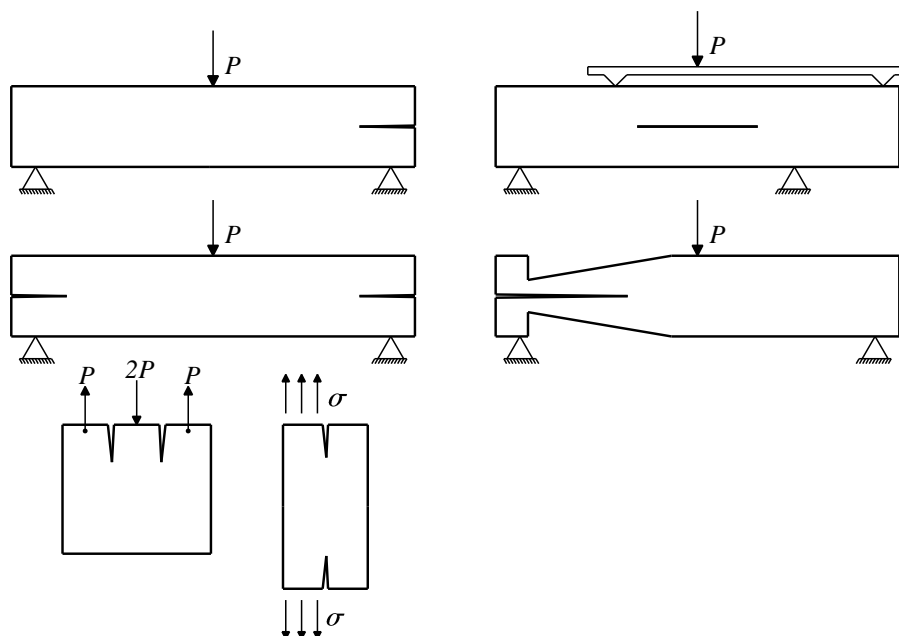
Табела 2.2 Измерене вредности критичног фактора интензитета напона K_{IC} [2]

Врста дрвета	K_{IC} (kNm ^{-3/2})	
	TL	RL
Дугласова јела (<i>Douglas-fir</i>)	320	360
Западни бели бор (<i>Westren white pine</i>)	250	260
Шкотски бор (<i>Scots pine</i>)	440	500
Јужни бор (<i>Southern pine</i>)	375	/
Црвена смрека (<i>Red spruce</i>)	420	/
Црвени храст (<i>Red oak</i>)	410	/
Јавор (<i>Maple</i>)	480	/

2.2.2.2 Облик лома II и вредности фактора K_{IC}

Облик лома II је значајан за дрвене конструкције јер се могућност појаве облика лома I скоро увек избегава због изузетно мале носивости дрвета на затезање управно на влакна, док се често превиди могућност отварања пукотина услед смицања. У овом раду значај се даје овом облику лома јер до њега често долази код ојачаних носача са редукованом висином попречног пресека.

Одређивање критичног фактора интензитета напона K_{IIc} је компликовано јер се чисто смицање тешко постиже, поготову код анизотропног материјала као што је дрво. Узорци на којима се експериментално одређује вредност критичног фактора интензитета напона K_{IIc} су приказани на слици 2.9.



Слика 2.9 Најчешће конфигурације узорака за тестирање облика лома II [2]

У табели 2.3 су дате измерене вредности критичног фактора интензитета напона K_{IIc} различитих врста дрвета за RL и TL оријентације пукотине.

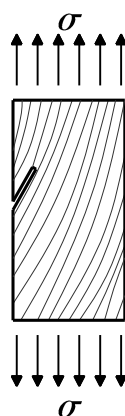
Табела 2.3 Измерене вредности критичног фактора интензитета напона K_{IIc} [2]

Врста дрвета	K_{IIc} (kNm ^{-3/2})	
	TL	RL
Дугласова јела (<i>Douglas-fir</i>)	1370	2230
Шкотски бор (<i>Scots pine</i>)	2050	/
Јужни бор (<i>Southern pine</i>)	2070	/
Црвена смрека (<i>Red spruce</i>)	2190	/

2.2.2.3 Комбиновани облик лома

Комбиновани облик лома је посебно занимљив јер је честа појава у реалним конструкцијама. Генерално, требало би да се познавањем критичних фактора интензитета напона K_{Ic} и K_{IIc} могу предвидети и услови при којима долази до

комбинованог лома. Најчешће се до вредности критичног напона за комбиновани облик лома долази тестирањем узорка приказаног на слици 2.10.



Слика 2.10 Узорак за тестирање комбинованог облика лома [2]

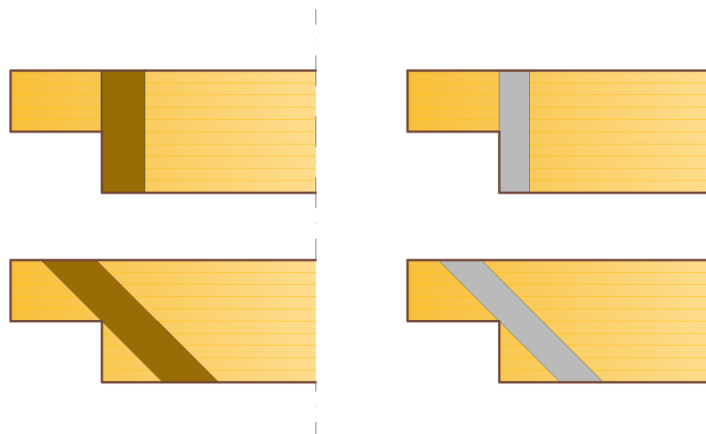
За тачно одређивање критичног напона комбинованог облика лома није довољно само познавање вредности K_{IC} и K_{IIC} , већ је неопходно знати и корелацију ова два фактора. На основу експерименталних резултата у раду [6] дат је израз за интеракцију облика лома I и II:

$$\frac{K_I}{K_{IC}} + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIC}} \right)^2 = 1 \quad (2.4)$$

2.3 Ојачање носача са редукованом висином пресека

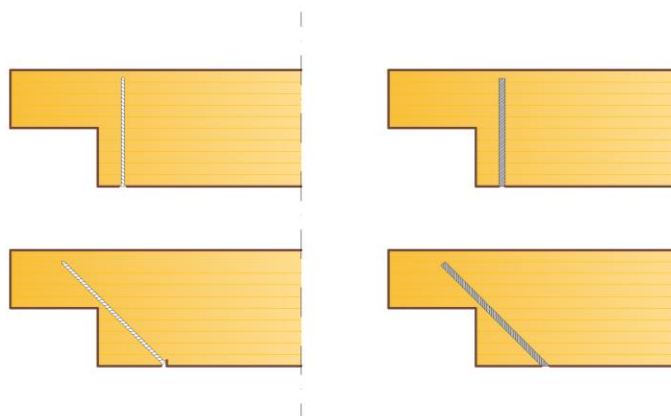
Како је већ напоменуто дрво као материјал има изузетно малу чврстоћу на затезање управно на влакна, а управо ово напрезање се јавља код носача са редукованом висином пресека код ослонаца, у комбинацији са смицањем. У случају да се редуција висине носача не може избећи, препорука је да се примени нека од метода ојачања на том месту. Ова ојачања могу бити постављена са спољне стране или унутар попречног пресека.

На слици 2.11 приказано је ојачање постављено са спољне стране пресека. Као спољашње ојачање могу се користити плочасти производи на бази дрвета, челичне траке и FRP (*Fibre Reinforced Polymer*) траке и тканине, које представљају актуелно и модерно решење.



Слика 2.11 Ојачање постављено са спољне стране пресека

Ојачање постављено унутар попречног пресека носача приказано је на слици 2.12. Профилисане челичне шипке постављене у припремљене рупе испуњене лепком (*Glued-in rods*), FRP шипке (CFRP - *Carbon Fibre Reinforced Polymer*, GFRP - *Glass Fibre Reinforced Polymer*, BFRP - *Basalt Fibre Reinforced Polymer*) и завртњеве за дрво (*Self-tapping screws*) се најчешће употребљавају као овај вид ојачања. Унутрашње постављено ојачање има предности у односу на спољашње јер је повољније са естетске стране и са аспекта заштите ојачања од утицаја спољашње средине, али је често компликованије за извођење.



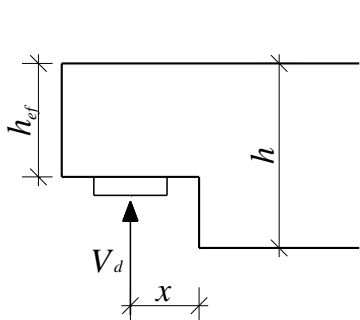
Слика 2.12 Ојачање постављено унутар пресека

2.4 Метод прорачуна носача са редукованом висином пресека

2.4.1 Прорачун према стандарду Еврокод 5

Еврокод 5 [7] даје смернице за прорачун носача правоугаоног попречног пресека, чија се влакна пружају лонгитудинално, са редукованом висином код

ослонца. Смичући напон на редукованом делу пресека носача се рачуна користећи ефективну (редуковану) висину попречног пресека (слика 2.13).



Слика 2.13 Носач са редукованом висином пресека код ослонца

Израз за проверу граничног стања носивости за смичући напон гласи:

$$\tau_d = \frac{1,5V_d}{b_{ef} h_{ef}} \leq k_v f_{v,d} \quad (2.5)$$

где је:

V_d – прорачунска вредност трансверзалне силе;

τ_d – прорачунска вредност смичућег напона;

$f_{v,d}$ – прорачунска вредност чврстоће на смицање;

h_{ef} – редукована висина носача;

b_{ef} – ефективна ширина носача: $b_{ef} = k_{cr} b$;

$k_{cr} = 0,67$ за правоугаони попречни пресек;

k_v – фактор редуције којим се узима у обзир концентрација напона на месту нагле промене висине попречног пресека:

$k_v = 1$ – за редуковану висину на супротној страни од ослонца;

$$k_v = \frac{k_n}{\sqrt{h \left(\sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0,8 \frac{x}{h} \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)}} \leq 1 \text{ – за редуковану висину} \quad (2.6)$$

на истој страни ослонца;

где је:

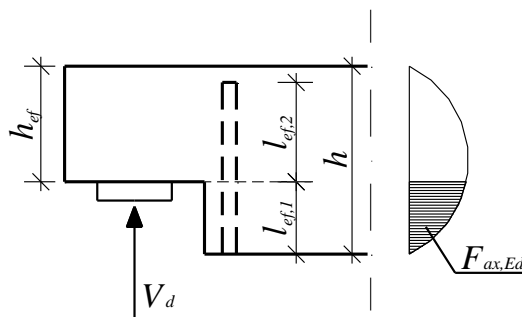
h – висина носача;

x – растојање реакције ослонца до места редуције висине пресека;

$$\alpha = \frac{h_{ef}}{h} \quad (2.7)$$

$$k_n = \begin{cases} 5 & \text{за монолитно дрво} \\ 6,5 & \text{за лепљено ламелирано дрво.} \end{cases}$$

Поступак прорачуна смичућег напона на месту редуције висине пресека дат у оквиру Еврокода 5 не предвиђа изразе за прорачун евентуалних ојачања. Као допуна Еврокоду 5, Немачки национални анекс [8] предлаже поступак прорачуна ојачања на месту редуције висине пресека носача (слика 2.14). Овај метод прорачуна узима у обзир напон затезања управан на влакна, док занемарује појаву смичућих напона у правцу влакана. Приказани приступ је базиран на идеји да се напон који се јавља на месту нагле промене висине носача расподељује између ојачања и дрвета путем фактора k_α .



Слика 2.14 Вертикално ојачање носача са редукованом висином пресека код ослонца

Део силе који преузима ојачање се може срачунати као:

$$F_{ax,Ed} = k_\alpha V_d \quad (2.8)$$

уз услов да је:

$$F_{ax,Ed} \leq n F_{ax,Rd} \quad (2.9)$$

где је:

V_d – прорачунска вредност смичуће силе;

$$k_\alpha = 1,3 \left[3(1-\alpha)^2 - 2(1-\alpha)^3 \right] \quad (2.10)$$

$F_{ax,Ed}$ – прорачунска вредност аксијалне силе у једном средству за ојачање;

n – број средстава за ојачање;

$F_{ax,Rd}$ – прорачунска вредност капацитета носивости средства за ојачање на чупање.

Дубина забијања средства за ојачање (односно дужина сидрења у случају шипки) дефинише се као $l_{ef} = l_{ef,2}$ према слици 2.14., тј. представља дубину продора средства за ојачање у пресек изнад линије засека.

Фактор редуције k_v , којим се узима у обзир концентрација напона на месту нагле промене висине пресека, елиминише се додавањем ојачања. Односно, код ојачаних носача са редукованом висином пресека може се узети се да је $k_v = 1$ при прорачуну носивости. Према томе, максимална прорачунска смичућа сила, коју дрвени део пресека ојачаног носача на месту редуције висине може да прихвати, износи:

$$\max V_d = \frac{2}{3} b_{ef} h_{ef} f_{v,d} \quad (2.11)$$

2.4.2 Прорачун према стандарду СРПС

Величина смичућег напона на месту редуције висине попречног пресека према СРПС-у [1,9] се може срачунати преко обрасца:

$$\tau_{m||} = \frac{1,5V}{bh_{ef}} \frac{1}{k} \leq \tau_{m||d} \quad (2.12)$$

где је:

V – смичућа сила;

$\tau_{m||}$ – вредност смичућег напона;

$\tau_{m||d}$ – вредност допушеног смичућег напона;

h_{ef} – редукована висина носача;

h – висина носача;

b – ширина носача;

k – корекциони коефицијент који има вредност:

$$k = 1 - 2,8 \frac{h - h_{ef}}{h_{ef}} \quad \left(\text{за } \frac{h - h_{ef}}{h_{ef}} > 0,25 \rightarrow k = \text{const.} = 0,30 \right).$$

Како овај стандард није одговарајући јер не даје метод прорачуна ојачања, аналитички прорачун ће бити вршен према граничним стањима, односно у складу са Еврокодом 5.

2.5 Закључци

Из претходних теоријских разматрања су изведени следећи закључци:

- Редукација висине попречног пресека дрвених носача изазива појаву сложених напонских стања и концентрацију напона на местима нагле промене висине носача.
- Као последица концентрације напона, пре свега напона затезања управно на влакна дрвета, на месту редукације висине пресека формирају се хоризонталне пукотине.
- Пропагација пукотине услед пораста оптерећења може довести до лома носача у зони ослабљеног попречног пресека.
- Најчешћи облик лома носача са редукованом висином пресека код ослонаца је облик лома I, односно отварање пукотине.
- Редукацију висине носача треба избегавати, а ако то није могуће неопходно је ојачати носач на месту нагле промене висине попречног пресека.
- Постоји доста недостатака у постојећим методама прорачунима, како неојачаних тако и ојачаних носача са редукованом висином пресека, јер не узимају све факторе у обзир, па је неопходно унапредити аналитичке изразе који се баве овом проблематиком.

3 GFRP ШИПКЕ

3.1 Општа разматрања

Последњих година, примена полимера ојачаних влакнима (FRP) у области санација и ојачања грађевинских конструкција могућа је захваљујући великој доступности и све нижој цени. FRP материјали су композити састављени од влакана високих механичких карактеристика (најчешће стаклена или карбонска влакна) повезаних чврстом, трајном и хемијски отпорном матрицом (синтетичком смолом). Ови композитни материјали су доступни као готови фабрички производи најчешће у форми трака, тканина или шипки. Повезивање FRP ојачања за конструкцијске елементе изводи се углавном лепљењем уз примену одговарајућих полимерних лепкова. FRP композити су идеално ојачање за дрвене елементе због њихових изузетних карактеристика, као што су одлична механичка својства, мала сопствена тежина, изузетна трајност и велика могућност обликовања.

3.1.1 FRP композити

FRP композити се производе од различитих типова влакана и полимерних матрица. Захваљујући томе могу бити модификовани да обезбеде жељено механичко понашање које ће одговорати материјалу са којим се комбинују. У оквиру готовог FRP производа, влакна и матрица задржавају свој физичке и хемијске карактеристике, али у садејству унутар композита имају својства која не могу бити достигнута самостално [10].

3.1.1.1 Влакна

Механичка, физичка и хемијска својства изабраних влакана, поред својстава матрице, дефинишу карактеристике готовог композита. У грађевинској индустрији се најчешће употребљавају вештачка влакна попут карбонских, стаклених и араמידних, а у последње време примену налазе и природна базалтна влакна. Избор влакана зависи од намене, жељених својстава композита и економских параметара.

Иако имају различите карактеристике, сва влакна имају претежно велики капацитет носивости и линеарно еластично понашање до лома. У табели 3.1 су приказана основна својства влакана.

Табела 3.1 Карактеристике влакана [10–13]

Влакна	Запреминска маса (g/cm ³)	Модул еластичности (GPa)	Чврстоћа на затезање (MPa)
Стаклена	2,6	70 - 80	2000 - 3500
Карбонска	1,75 - 1,95	240 - 760	2400 - 5100
Арамидна	1,45	62 - 180	3600 - 3800
Базалтна	2,8	90	4800

Стаклена влакна поред добрих механичких карактеристика, имају високу хемијску отпорност и добра изолациона својства, као и ниску цену у поређењу са другим типовима влакана. Њихови највећи недостаци су релативно низак модул еластичности, мала отпорност на замор, осетљивост на хабање и на влагу и склоност ка деформацијама течења. [10]

Карбонска влакна се одликују високим механичким карактеристикама у правцу влакана и знатно нижим механичким карактеристикама у попречном правцу. Основне предности ових влакана су добар однос између чврстоће и тежине, велика трајност, добра реолошка својства и отпорност на замор. Највећа мана карбонских влакана је висока цена. [10]

Арамидна влакна имају најмању тежину и највећу чврстоћу на затезање наспрам тежине, у односу на стаклена и карбонска влакна. Композити са арамидним влакнима имају добру отпорност на динамичка и ударна оптерећења. Ова влакна имају високу термичку стабилност и добру хемијску отпорност. Недостаци арамидних влакана су непостојаност на повишеним температурама, као и осетљивост на влагу и UV зрачење. [10]

Базалтна влакна имају одличну отпорност на корозију и хемијске утицаје. По свом понашању су најсличнија стакленим влакнима па се често користе као замена за њих. Највећа предност овог типа влакана је у томе што су природан материјал, па су негативни утицаји на животну средину током производње и употребе ових влакана сведени на минимум. [11]

3.1.1.2 Матрица

Матрица је везивни материјал, која влакна држи заједно, чувајући њихову оријентацију и штитећи их од утицаја средине и механичког хабања. Веома је важно да матрица да буде хемијски и термички компатибилна са влакнима, као и

да има малу запреминску масу како не би повећавала тежину композита [14]. Најчешће коришћени полимери за матрице FRP композита у грађевинској индустрији су епоксид, полиестер или винилестер. У табели 3.2 су приказане основне карактеристике матрица.

Табела 3.2 Карактеристике матрица [10]

Материјал	Запреминска маса (g/cm ³)	Модул еластичности (GPa)	Чврстоћа на затезање (MPa)
Епоксид	1,1 - 1,4	2,0 - 6,0	35 - 130
Полиестер	1,1 - 1,5	1,2 - 4,5	40 - 90
Винилестер	1,5	3,0 - 4,0	65 - 90

3.1.1.3 Композит

Композити се производе сједињавањем влакана и матрице. Ако су влакана постављена само у једном правцу, композит је моноаксијалан. Постављањем влакана у два правца формирају се би-аксијалне тканине, или у више праваца – мулти-аксијалне тканине. У случају шипки влакна се постављају у једном, подужном правцу. Физичке, хемијске и механичке карактеристике влакана и матрица, као и оријентација и запремински удео влакана дефинишу својства готовог FRP композита. Адекватним одабиром влакана и матрице се постижу жељена својства FRP материјала.

Пултрузија је технологија која се углавном користи за производњу FRP шипки. Оне могу бити кружног или квадратног попречног пресека, глатке или ребрасте, као и пескарене (слика 3.1).



Слика 3.1 Типови FRP шипки

3.2 Механичке карактеристике GFRP шипки

GFRP шипке коришћене у оквиру експерименталних испитивања у овом раду представљају материјал у виду ребрастих шипки израђених од стаклених влакана и епокси смоле као матрице (слика 3.2). Генерално, GFRP шипке имају очекивану затезну чврстоћу од 1200 МПа, која је око два пута већа од чврстоће челичне арматуре квалитета 500/560 [15]. Такође, ове шипке су близу четири пута лакше од челика, са запреминском масом од 2200 kg/m³. Највећи недостатак GFRP шипки је низак модул еластичности, што је неопходно узети у обзир при њиховој примени. При употреби у бетонским конструкцијама, GFRP шипке представљају економичније решење у поређењу са стандардном челичном арматуром, али је њихова основна предност висока отпорност на корозију и агресивне агенсе, те су зато јако погодне када се говори о трајности конструкција у којима се примењују.



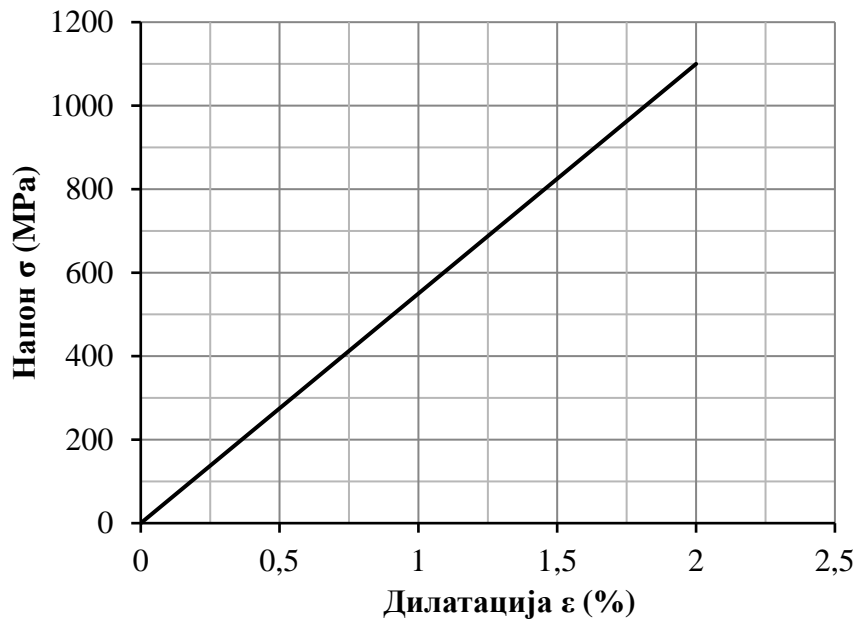
Слика 3.2 GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer) шипке

GFRP шипке се најчешће користе у армиранобетонским конструкцијама уместо традиционалне арматуре, међутим у овом испитивању су употребљене за ојачање дрвених носача. За потребе ове дисертације извршено је сопствено испитивање чврстоће на затезање и модула еластичности GFRP шипки произвођача „Композит Арматура“ из Крагујевца, приказано у поглављу 5.3. Иста арматура је испитана и у оквиру приручника [15] како би се утврдиле могућности њене примене у бетонским конструкцијама. Добијени резултати су приказани у табели 3.3.

Табела 3.3 Основне механичке карактеристике GFRP арматуре [15]

Карактеристика	Вредност
Чврстоћа на затезање (граница киданја) f_t (МПа)	1100
Чврстоћа на притисак f_c (МПа)	700
Чврстоћа на смицање f_v (МПа)	300
Модул еластичности E (GPa)	55

При истом лабораторијском испитивању GFRP шипки на затезање добијени су дијаграми напон - дилатација из којих се види да је реч о кртом материјалу (слика 3.3). Шипке су имале линеарно еластично понашање до лома. Ово доводи до закључака да се при примени ових композитних шипки не може рачунати на њихово пластично понашање, па је гранична дилатација око 2% (односно 20%).



Слика 3.3 Дијаграм напон - дилатација GFRP шипки [15]

4 ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

У овом поглављу прво је дат преглед досадашњих испитивања извршених на неојачаним носачима са редукованом висином пресека код ослонца. Након тога, представљена су испитивања која су се бавила FRP шипкама као ојачањем дрвених носача изложених савијању. На крају је дат преглед истраживања која су анализирали могућности ојачања носача који имају редуковану висину пресека код ослонца. Циљ овако конципираног прегледа литературе је да се стекне увид о могућностима примене GFRP шипки као ојачања на местима нагле промене висине пресека код ослонца дрвених носача, што је тежиште експерименталних испитивања у оквиру ове дисертације.

4.1 Неојачани носачи са редукованом висином пресека код ослонца

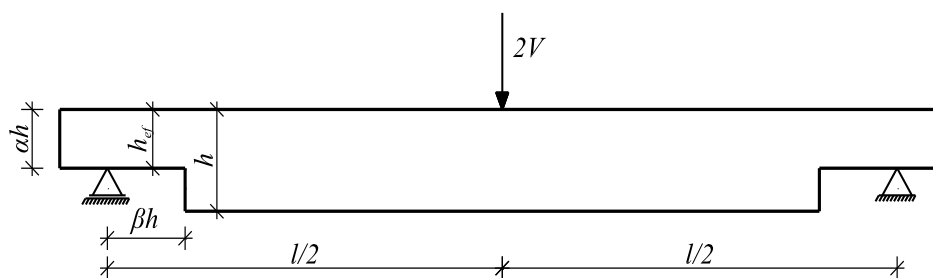
Теоријска разматрања и експериментална испитивања која су до сада извршена на носачима са редукованом висином пресека код ослонца углавном су се бавила испитивањем тачности постојећих аналитичких израза или дефинисањем нових метода прорачуна. Поред тога, аутори су вршили различите параметарске анализе које су укључивале варирање геометријских карактеристика (попречног пресека, распона носача, ефективне висине, дужине редукованог дела, итд.) и облика редукације висине пресека како би се дошло до закључака о носивости оваквих носача.

Табела 4.1 даје преглед значајнијих експерименталних испитивања спроведених у претходним годинама на неојачаним дрвеним носачима са редукованом висином пресека код ослонца. У табели 4.1, коефицијент α представља однос редуковане висине h_{ef} и пуне висине носача h (слика 2.2). Коефицијентом β се дефинише зависност пуне висине носача h и дужине редукованог дела пресека. Дакле, βh представља дужину засека и мери се од ослонца до места редукације висине пресека (слика 2.2).

Табела 4.1 Експериментална испитивања носача са редукованом висином пресека код ослоња

Аутор	Број узорака	Материјал	Димензије попречног пресека (mm)	Распон (mm)	Коефицијент α	Коефицијент β
<i>Gustafsson</i> (1988)	12	Монолитно дрво	44 x 192 44 x 48 44 x 12	1152 288 72	0,75	0,5
<i>Asiz & Smith</i> (2008)	12	ЛЛД	175 x 656 80 x 532	7295 6219	0,9 0,92	0,16 0,12
<i>Rautenstrauch</i> и група аутора (2008)	42	Монолитно дрво	40 x 80	600	0,5 / 0,625 / 0,75 / 0,875	0,438 0,469
	31	ЛЛД	80 x 160 80 x 200 100 x 200	1600	0,5 / 0,625 / 0,688 / 0,875	0,375
<i>Jockwer</i> (2014)	8	ЛЛД	90 x 315	/	0,65	0,48
<i>Toussaint</i> и група аутора (2016)	28	Монолитно дрво	30 x 70	345	0,5	0,2

Gustafsson [16] је вршио параметарску анализу на носачима са редукацијом висине изведеном под правим углом, као што је приказано на слици 4.1. У овом раду представљен је једноставан израз за израчунавање носивости носача са редукованом висином пресека код ослонца, базиран на резултатима експерименталних испитивања и теорији механике лома.

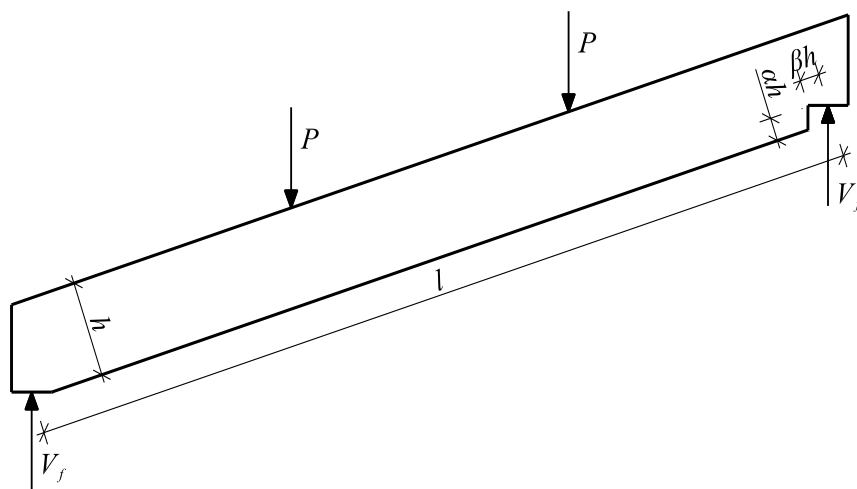


Слика 4.1 Диспозиција експерименталног испитивања – Gustafsson [16]

Донети су следећи закључци:

- Резултати испитивања једногласно показују значајан утицај величине редукованог дела пресека на носивост носача.
- Редукација висине код ослонца се може анализирати применом механике лома, а на основу ове теорије и сопствених испитивања изведен је израз за прорачун носивости засека у форми V_f / bh_{ef} . Овај израз даје резултате који су сагласни испитивањима и може служити као полазна основа за различите аналитичке приступе овом проблему.
- Крутост дрвета као материјала и енергија лома су од великог значаја за носивост испитиваних носача.
- Чврстоћа на затезање управно на влакна дрвета није од пресудног значаја за понашање носача са редукованом висином код ослонца, већ се морају узети у обзир и друге карактеристике материјала.
- Удаљеност засека од ослонца βh је од изузетног значаја за укупну носивост носача.
- Висина редукованог дела пресека доста утиче на носивост носача за вредности коефицијента α у области $1 > \alpha > 0,7$, док је за вредности α мање од 0,7 и овај утицај знатно мањи.
- Конвенционални израз $f_v = 1,5V_f / bh_{ef}$ у неким случајевима прецењује носивост носача на месту редукације висине пресека код ослонца.

Asiz & Smith [17] су испитивали утицај висине редукованог дела пресека код ослонаца у случају лепљених ламелираних носача под нагибом. Резултати добијени испитивањем су упоређени са прорачунским вредностима добијеним на основу постојећих прописа. Диспозиција испитивања је приказана на слици 4.2.

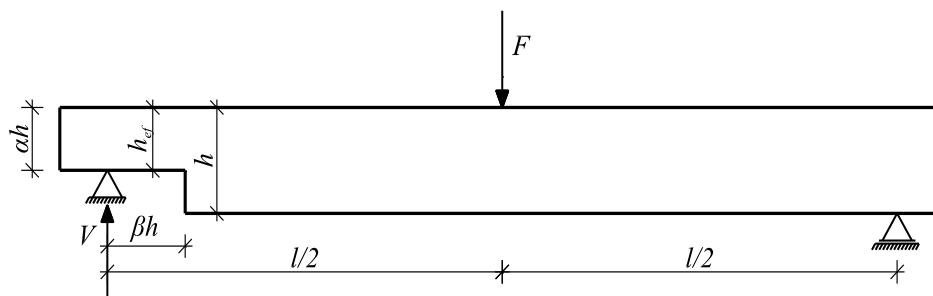


Слика 4.2 Диспозиција експерименталног испитивања – Asiz & Smith [17]

Као закључци овог рада дате су следеће препоруке:

- У случају да је редуција висине попречног пресека носача мања од 8%, утицаји концентрације напона се могу занемарити.
- За редуције висине попречног пресека носача веће од 8%, напони који се јављају на месту нагле промене висине се не смеју занемарити, већ се мора извршити како провера смичућег напона, тако и анализа механике лома на овом месту.

Rautenstrauch и група аутора [18] су спровели истраживање које је обухватло велики број носача са редукованом висином пресека код ослонца. Варирали су како димензије попречног пресека и распона носача, тако и димензије редукованог дела пресека носача. Испитивања су вршили и на носачима од монолитног дрвета и на лепљеним ламелираним носачима. Диспозиција испитивања приказана је на слици 4.3. Циљ испитивања био је да се утврди тачност постојећих аналитичких израза за овакав вид носача који се углавном базира на идеји да је доминантан облик лома I (дефинисан у поглављу 2.2.2). Поред експерименталног дела, извршена је и нумеричка анализа.



Слика 4.3 Диспозиција експерименталног испитивања – Rautenstrauch и група аутора [18]

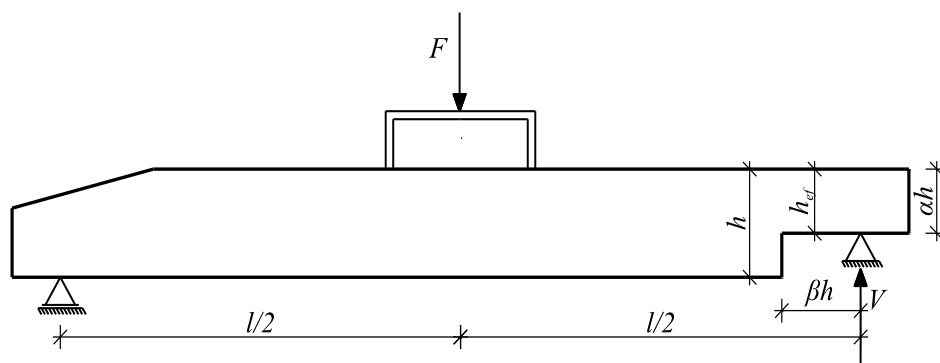
Као закључак овог рада, а на основу експерименталних и нумеричких резултата, аутори су дали предлог аналитичког израза којим се израчунава капацитет носивости носача са редукованом висином пресека код ослонаца. Израз узима у обзир облик лома I и облик лома II (дефинисани у поглављу 2.2.2), а могуће је применити га и на друге случајеве концентрације напона, када се јавља сингуларитет. Више речи о овоме ће бити у оквиру поглавља 7 које се бави аналитичким прорачуном носача са редукованом висином пресека код ослонаца.

Jockwer [4], између осталог, у свом докторату даје и резултате експерименталног испитивања извршеног у лабораторијама LNU Växjö на неојачаним носачима са редукованом висином пресека код ослонаца. Димензије попречног пресека носача су биле 9 x 31,5 cm. Укупно је испитано 8 узорака на савијање до лома. Носачи су били оптерећени концентрисаном силом, која је аплицирана на растојању од 115 cm мерено од ослонаца. Сила је нанета тако да само једна страна носача са редукованом висином пресека буде оптерећена на затезање управно на влакна, како би се на овом месту јавила највећа могућа смичућа сила.

Закључци изведени из овог испитивања су следећи:

- Лом носача је био изазван отварањем пукотине услед прекорачења носивости носача на затезање управно на влакна дрвета.
- Крти лом услед отварања пукотина и њихове нестабилне пропагације доводи до закључка да је доминантан облик лома управо облик лома I.
- Са повећањем дужине пукотине, расте и смичућа компонента напона на месту нагле промене висине пресека.
- На основу нумерике и аналитике извршене у овом докторату закључује се да се облик лома II не може занемарити посебно у случају носача који имају вредност коефицијента $\beta > 1$.

Toussaint и група аутора [19] су испитивали понашање витких дрвених елемената са редукованом висином попречног пресека само код једног ослонца. У овом раду акценат је стављен на оријентацију година дрвених носача који су тестирани на савијање до лома. Поред експерименталног испитивања, спроведена је и нумеричка анализа ових носача. Такође, извршено је поређење резултата добијених експерименталним испитивањем са резултатима аналитичког прорачуна датог у оквиру Еврокода 5 [7]. Диспозиција експерименталног испитивања дата је на слици 4.4.



Слика 4.4 Диспозиција експерименталног испитивања – *Toussaint* и група аутора [19]

Закључци овог рада су:

- Лом испитаних дрвених носача са редукованом висином пресека био је крте природе.
- Сила при којој долази до лома одговара сили која се добија аналитичким прорачуном датим у Еврокоду 5 [7].
- Услед уведених претпоставки при моделирању материјала, не поклапају се вредности дилатација испитаних дрвених носача на местима редуције висине пресека добијене експерименталном анализом и нумеричком симулацијом.
- Препорука аутора је да се изврше додатна испитивања носача са редукованом висином пресека.

4.2 FRP шипке – примена код ојачања дрвених носача изложених савијању

Код дрвених носача напрегнутих на савијање, иницијални лом настаје углавном у затегнутој зони и то најчешће у близини кврга, дефекта или на местима попречног наставка ламела код лепљених ламелираних носача. Лом услед затезања дрвета изложеног савијању је крт, насумичан и тешко предвидив. Зато се дрвени носачи углавном ојачавају на затегнутој страни, чиме се повећава њихова носивост и крутост на савијање и постиже знатно дуктилнији лом у притиснутој зони пресека.

У прошлости, ојачање дрвених носача је најчешће вршено применом челичних елемената, било шипки или плоча. Спрегнутим дејством дрвета и челика добијани су добри резултати, али главни недостатак оваквих интервенција на побољшању носивости и дуктилности дрвених елемената је некомпатибилност ова два материјала. Зато се у последње време прибегло испитивању могућности ојачања и санације дрвених носача применом савремених материјала попут различитих типова FRP композита. Постоји велики број испитивања, као и примера употребе ових материјала у пракси. Као ојачање користе се траке, тканине и шипке на бази FRP композита са карбонским, стакленим, арамидним, базалтним и, све чешће, са другим природним влакнима.

Будући да је тема овог рада ојачање применом шипки, дат је преглед литературе који се тиче ојачања дрвених носача изложених савијању применом FRP шипки. Ојачање постављањем шипки близу доње или горње површине носача у припремљене прорезе не мења висину носача док истовремено штити шипке од спољашњих утицаја, чинећи овај метод оптималним како са естетске стране, тако и са стране механичког понашања материјала. У радовима више различитих аутора, до сада је испитано понашање при савијању монолитних и лепљених ламелираних дрвених носача ојачаних FRP шипкама. У наставку су приказана нека од спроведених истраживања.

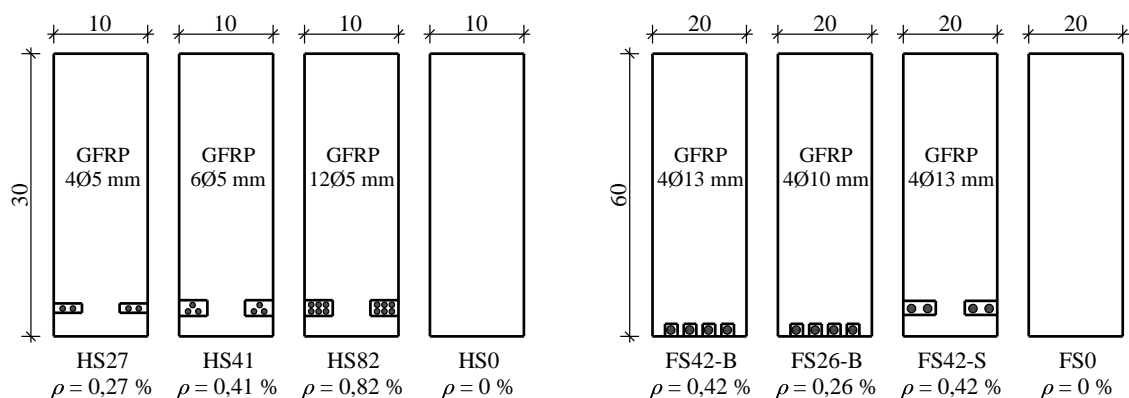
Табела 4.2 Експериментална испитивања дрвених носача ојачаних FRP шипкама

Аутор	Број узорака	Материјал	Димензије попречног пресека (mm)	Распон (mm)	Ојачање	Тип ојачања
<i>Gentile, Svecova & Rizkalla (2002)</i>	22 4	Монолитно дрво	100 x 300 200 x 600	4000 10000	GFRP шипке	Савијање
<i>Svecova & Eden (2004)</i>	50	Монолитно дрво	100 x 300	1800	Челичне шипке GFRP шипке	Смицање Савијање и смицање
<i>Borri, Corradi & Grazini (2005)</i>	20	Монолитно дрво	200 x 200	3600	CFRP тканине CFRP шипке	Савијање
<i>Micelli, Scialpi & La Tegola (2005)</i>	6	ЛЛД	120 x 200	4700	CFRP шипке	Савијање
<i>Johnsson, Blanksvard & Carolin (2006)</i>	10	ЛЛД	90 x 225	3300	CFRP шипке	Савијање
<i>Yusof (2010)</i>	7	Монолитно дрво	100 x 200	2700	GFRP шипке	Савијање

Наставак табеле 4.2

<i>Raftery & Whelan</i> (2014)	25	ЛЛД	96 x 190	3420	GFRP шипке	Савијање
<i>Raftery & Kelly</i> (2015)	30	ЛЛД	96 x 190	3420	BFRP шипке	Савијање
<i>Yang</i> и група аутора (2016)	46	ЛЛД	75 x 300	5700	GFRP шипке Челичне шипке GFRP траке CFRP траке	Савијање
<i>Yang</i> и група аутора (2016)	12	ЛЛД	75 x 300	5700	CFRP шипке	Савијање

Gentile, Svecova & Rizkalla [20] спровели су експериментално испитивање на старим дрвеним носачима (Дугласова јела) ојачаним шипкама на бази стаклених влакана (GFRP). Укупно 22 греде исечене из главних носача старог дрвеног моста су изложене савијању. Од укупног броја, 15 греда је ојачано GFRP шипкама постављеним у затегнутој зони са бочних страна. Димензије попречног пресека греда биле су 10 x 30 cm, дужина 430 cm, док је распон био 400 cm. Разматран је утицај површине ојачања у попречном пресеку, те су усвојени проценти ојачања од 0,27; 0,41 и 0,82%. Ефекат величине узорка је посматран кроз испитивање четири цела главна носача, од којих су три била ојачана GFRP шипкама, које су постављене у затегнутој зони са доње стране пресека или са бочних страна. Димензије попречног пресека биле су 20 x 60 cm, док је распон био 1000 cm. Проценти ојачања код главних носача моста су били 0,26 и 0,42%. Попречни пресеци греда (Серија HS) и главних носача (Серија FS) дати су на слици 4.5.



Слика 4.5 Попречни пресеци испитаних ојачаних и неојачаних узорака – *Gentile, Svecova & Rizkalla* [20]


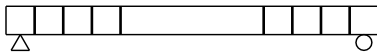
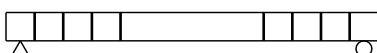
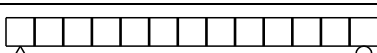
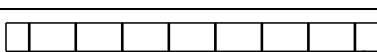
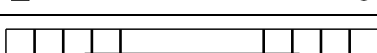
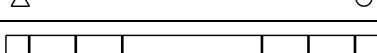
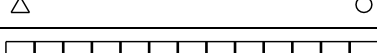
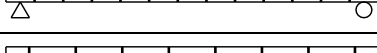
Истраживање је показало да:

- GFRP шипке представљају ефикасну технику ојачања на савијање монолитних дрвених носача.
- Није евидентиран никакав ефекат величине узорка, јер је слично понашање забележено код обе групе испитаних узорака у смислу облика лома, дијаграма оптерећење - угиб, расподеле дилатација и чврстоће.
- За проценте ојачања између 0,27 и 0,82%, носивост носача се повећала између 18 и 46% у односу на неојачане греде.

- У случају ојачаних носача просечна вредност граничне дилатације затезања дрвета се повећала за 64% у односу на неојачане носаче. Ово показује да присуство ојачања знатно умањује утицај дефеката у дрвету.
- Дуктилни лом у притиснутој зони је постигнут код 60% ојачаних узорака.

Svecova & Eden [21] су истраживали могућности ојачања постојећих дрвених мостова применом GFRP шипки. Циљ је био да се уместо замене старих и оштећених дрвених мостова ојачају постојеће конструкције и на тај начин им се продужи употребни век, а при томе уштеде значајна финансијска средства. Програм експерименталног испитивања дат је у табели 4.3.

Табела 4.3 Програм експерименталног испитивања – Svecova & Eden [21]

Серија	Диспозиција ојачања	Број узорака
C		9
SS150 (S)		5
S-S150		5
S-C150		6
S-C300		5
SF-S150		5
SF-S300		5
SF-C150		5
SF-C300		5

Укупно 50 дрвених греда (Дугласова јела), исечених из главних носача дрвених мостова је испитано на савијање до лома. Попречни пресек греда је био димензија 10 x 30 cm, дужина 200 cm, а распон 180 cm. Две шеме ојачања су примењене у оквиру програма испитивања. Група S је обухватила 21 греду које су ојачане само на смицање. У оквиру ове серије 5 греда је ојачано челичним шипкама пречника 12 mm, док је 16 греда ојачано вертикалним GFRP шипкама пречника 16 mm. Група SF је имала 20 греда које су поред вертикално постављених GFRP шипки имала и ојачања у виду две хоризонталне шипке пречника 5 mm са бочних

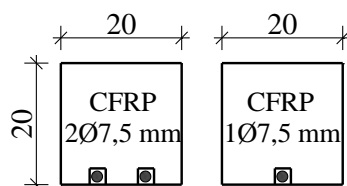
страна које су служиле као ојачање на савијање, те се може рећи да се овде радило о комбинованом ојачању. У оквиру експерименталног испитивања варирано су положај и растојање вертикалних шипки, као и дужина хоризонталних шипки. Такође, испитано је 9 неојачаних греда (Група С) како би резултати служили за поређење са ојачаним гредама.

Експериментално испитивање довело је до следећих закључака:

- Употреба GFRP шипки се показала као ефикасан метод ојачања дрвених греда.
- Челичне шипке нису показале добру адхезију са примењеним лепком, и њихова употреба се не препоручује.
- Оптимално растојање вертикално постављених шипки за повећање смичуће носивости треба да буде једнако ширини попречног пресека.
- Греде ојачане само на смицање су показале повећање носивости од 33%, док су комбиновано ојачане греде показале повећање од 47% до 52%.
- Употреба комбинованог ојачања доводи до лома у притиснутој зони, коме претходе велике деформације што може представљати упозорење пре лома греде.
- Примена ојачања смањује природну варијабилност механичких карактеристика дрвета у различитим правцима.
- Везе између GFRP шипки, лепка и дрвета нису показале знаке попуштања пре наступања лома читаве греде.
- Дијаграми оптерећење - угиб комбиновано ојачаних греда су показали дуктилно понашање, при чему је 60% греда имало два пута веће угибе при лому у односу на неојачане гредe.

Borri, Corradi & Grazini [22] испитивали су ојачање постојећих дрвених греда изложених савијању помоћу различитих облика FRP материјала. Кроз свој рад су, поред експерименталних резултата, дали и теоријску анализу оваквог вида интервенције на дрвеним елементима. Испитано је укупно 20 греда попречног пресека 20 x 20 cm дужине 400 cm и распона 360 cm. Гредe су биле оптерећене на савијање двама концентрисаним силама у трећинама распона ради утврђивања крутости, носивости и дуктилности. Све гредe су након детаљног прегледа класификоване као друга класа дрвета. Три гредe су испитане неојачане како би

служиле као контролна серија. 12 греда је ојачано карбонским тканинама од којих је 4 греде ојачано преднапрегнутим карбонским тканинама. Осталих 5 дрвених греда ојачано је карбонским шипкама (CFRP) постављеним у доњој затегнутој зони. По две греде су имале постављене једну или две шипке, пречника 7,5 mm, док је једна греда ојачана са две преднапрегнуте карбонске шипке. Шеме ојачања греда шипкама приказане су на слици 4.6.

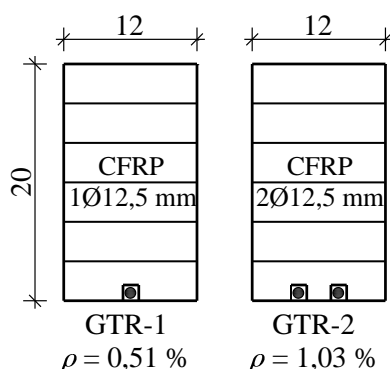


Слика 4.6 Шеме ојачања греда CFRP шипкама – Borri, Corradi & Grazini [22]

Након анализе резултата изведени су следећи закључци:

- Резултати ојачања карбонским тканинама су показали знатно повећање носивости и дуктилности у односу на неојачане узорке, као и повећање крутости. Носивост у случају ових греда је зависила од шеме ојачања, а увећана је и до 60,3% у односу на контролну серију.
- Код свих греда ојачаних карбонским шипкама забележено је повећање носивости и крутости у односу на неојачане узорке. Греде са једном шипком имале су повећање носивости од 28,9% и повећање крутости од 22,0%, док су греде са две шипке имале повећање носивости од 52,0% и повећање крутости од 25,5%.
- Греда са преднапрегнутим шипкама имала је повећање носивости од 42,3% и повећање крутости од 30,3% у поређењу са неојачаним гредама.
- Греде ојачане карбонским шипкама показале су мање дуктилно понашање од греда ојачаних карбонским тканинама. Иако је носивост повећана у поређењу са неојачаним гредама, шипке нису биле довољне да превазиђу локална оштећења и локалне дефекте дрвета.
- Преднапрезање CFRP тканина и шипки није показало боље резултате у поређењу са осталим ојачаним узорцима.
- Како се радило о малом броју узорака, аутори препоручују даља испитивања са различитим врстама дрвета и већим бројем греда.

Micelli, Scialpi & La Tegola [23] су извршили екпериментално испитивање на носачима од лепљеног ламелираног дрвета ојачаним са карбонским шипкама (CFRP). Испитано је укупно 6 носача од лепљеног ламелираног дрвета (смреке), од чега су два била неојачана, а четири ојачана CFRP шипкама. Греде су биле оптерећене на савијање двама концентрисаним силама. Попречни пресек узорака био је 12 x 20 cm, дужина 500 cm, док је распон износио 470 cm. Шипке су биле пречника 12,5 mm и постављене су у затегнутој зони. Два носача су имала по једну шипку, док су два имала по две шипке као што је приказано на слици 4.7.



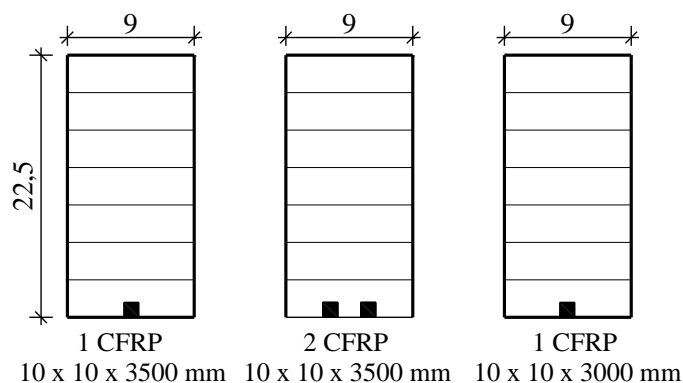
Слика 4.7 Шеме ојачања носача CFRP шипкама – Micelli, Scialpi & La Tegola [23]

Донети су следећи закључци:

- Постављање CFRP шипки у затегнуту зону доводи до побољшања носивости и крутости носача, али лом свакако зависи првенствено од чврстоће дрвета на затезање.
- Повећање момента савијања при лому у односу на неојачане носаче износило је 26% и 82% за узорке са процентима ојачања од 0,51% и 1,03%.
- Забележено је повећање крутости у односу на неојачане носаче од 8% и 19% за узорке са процентима ојачања од 0,51% и 1,03%.
- Што се тиче споја између дрвета и ојачања, резултати су показали одличну везу ова два елемента остварену епоксидним лепком.
- Аутори препоручују даља испитивања ради утврђивања аналитичких израза за прорачун дрвених носача ојачаних савременим материјалима попут карбонских шипки.

У оквиру свог испитивања, *Johnsson, Blanksvard & Carolin* [24] бавили су се ојачањем носача од лељеног ламелираног дрвета (смрека) помоћу CFRP шипки. Мотивација за ово истраживање се нашла у потреби да се површина попречног

пресека нових носача оптимизује. Поред самих ефеката ојачања, аутори су испитивали и потребне минималне дужине сидрења шипки, тако да не дође до превременог лома елемената. Испитано је укупно 10 носача. Носачи су били оптерећени на савијање двама концентрисаним силама у трећинама распона. Димензије узорака биле су 9 x 22,5 x 350 cm, док је распон износио 330 cm. Шипке су биле правоугаоног попречног пресека 10 x 10 mm и постављене су у затегнутој зони. Три носача су била неојачана, три носача су имала по једну шипку постављену целом дужином елемента, док су три носача имала по две шипке постављене целом дужином елемента. Поред тога, један носач је имао једну шипку краће дужине како би се рамотрио утицај дужине сидрења ојачања. Попречни пресеци испитаних носача са ојачањима приказани су на слици 4.8.



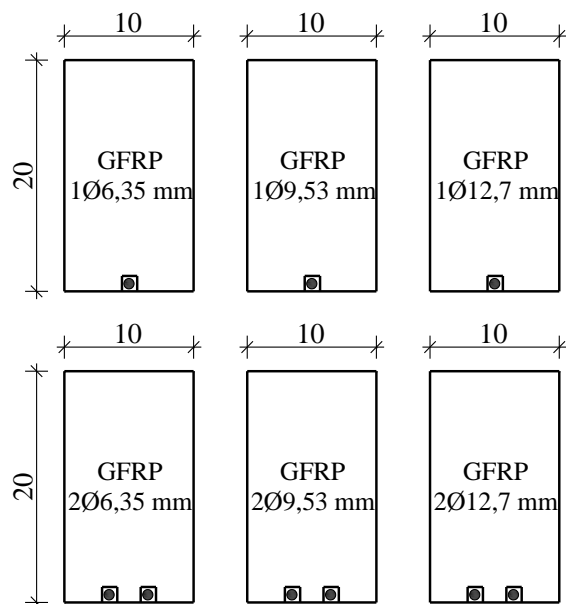
Слика 4.8 Шеме ојачања носача CFRP шипкама – *Johnsson, Blanksvard & Carolin [24]*

Резултати испитивања су довели до следећих закључака:

- Применом ојачања носивост на савијање је увећана 44 - 63%, док је крутост носача увећана 10% у поређењу са неојачаним узорцима.
- Битније од самог повећања носивости је промена облика лома из кртог у зони затезања у дуктилни лом у притиснутој зони.
- Угиб у средини носача при лому се повећао до 80%, услед дуктилнијег понашања.
- На основу теоријске и експерименталне анализе утврђена је минимална потребна дужина сидрења CFRP шипки од 150 mm.

Yusof [25] је испитивао понашање греда од тропског дрвета изложених савијању и ојачаних GFRP шипкама различитих пречника. Испитано је укупно 7 греда. Греде су биле оптерећене на савијање двама концентрисаним силама.

Димензије узорака биле су 10 x 20 x 300 cm, док је распон био 270 cm. Једна греда је испитана неојачана како би служила као контролни узорак, док је 6 греда имало ојачања у виду једне или две шипке постављене у затегнутој зони. Попречни пресеци испитаних ојачаних узорака приказани су на слици 4.9.



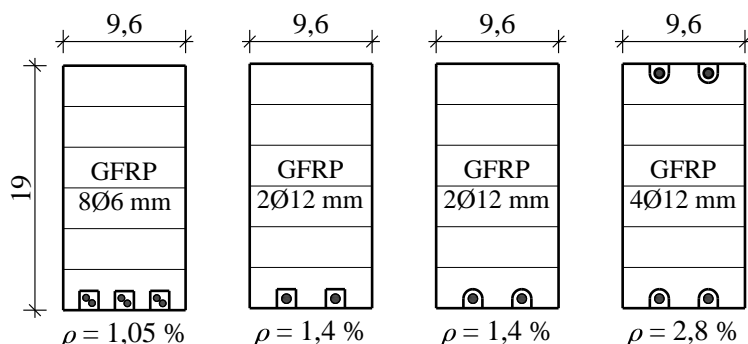
Слика 4.9 Шеме ојачања греда GFRP шипкама – Yusof [25]

Закључци овог испитивања су следећи:

- Ојачање греда GFRP шипкама довело је до повећања носивости од 20 до 30%, и повећања крутости од 24 до 60%, у односу на неојачани узорак.
- Није примећен губитак носивости споја дрвета и примењеног ојачања.
- Облик лома је промењен из кртог лома у затегнутој зони, настао услед прекорачења чврстоће дрвета на затезање, у дуктилни лом у притиснутој зони када је проценат ојачања износио више од 0,35%.
- Извршена је категоризација ојачаних греда: недовољно ојачане (процент ојачања мањи од 0,32%), оптимално ојачане (процент ојачања између 0,32 и 0,35%) и прекомерно ојачане (процент ојачања већи од 0,35%).

Raftery & Whelan [26] су у свом раду истраживали различите диспозиције ојачања лепљеног ламелираног дрвета ниже класе чврстоће са GFRP шипкама (слика 4.10). Испитано је 25 носача са распонем од 342 cm и димензијама попречног пресека 9,6 x 19 cm. Пет носача је остало неојачано, док је по пет носача у серији ојачано различитим процентима ојачања и распоредом шипки. Као што се може

видети на слици 4.10, испитиван је утицај примене више шипки мањег пречника наспрам мањег броја шипки већег пречника, затим утицај облика пресека у који се постављају шипке, као и могућност ојачања у обе зоне носача (притиснута и затегнута зона). Проценти ојачања су износили од 1,05 до 2,8%.



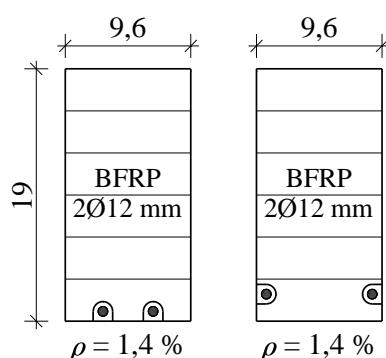
Слика 4.10 Шеме ојачања носача GFRP шипкама – Raftery & Whelan [26]

Закључци добијени експерименталним испитивањем су следећи:

- Већи капацитет носивости и већа крутост се постиже применом кружних у односу на квадратне пресеке за постављање шипки, услед смањења концентрације напона на ивицама пресека.
- Употреба више шипки мањих пречника није показала побољшање у носивости и крутости без обзира на повећање површине пријањања између лепка и шипки.
- Ојачани носачи су достигли дуктилни лом у притиснутој зони за разлику од неојачаних који су крти лом достигали у затегнутој зони.
- Са већим процентом ојачања се постиже и веће искоришћење механичких својстава дрвета у притиснутој зони.
- Употреба процента ојачања од 1,4% у затегнутој зони довела је до повећања крутости од 11,2% и носивости од 68%, док је обострано ојачање од 1,4% у затегнутој и 1,4% у притиснутој зони довело до повећања крутости од 22% и носивости од 98,5% у поређењу са неојачаним носачима.

Raftery & Kelly [11] су истраживали примену полимерних шипки на бази базалтних влакана (BFRP). Испитано је 30 носача са распоном од 342 cm и димензијама попречног пресека 9,6 x 19 cm. Пет носача је остало неојачано како би служили као контролна серија. Десет носача је имало ојачање постављено у доњој затегнутој зони у кружним пресезима. Поред постављања ојачања на доњој ивици

носача (пет узорака), испитано је и постављање шипки у прорезе са стране (пет узорака), што је повољније са естетске стране. Поред испитивања нових узорака, испитани су и узорци са оштећењем које је изведено попречно у средини распона, кроз последњу ламелу са доње стране. Циљ овог испитивања је процена могућности санације оштећених елемената. И у овом случају је пет носача било неојачано, док су остали санирани са истим распоредом и процентом ојачања као и нови носачи (пет узорака са шипкама на доњој ивици и пет узорака са шипкама постављеним са стране). Процент ојачања је у свим случајевима износио 1,4%. Диспозиција ојачања дата је на слици 4.11.



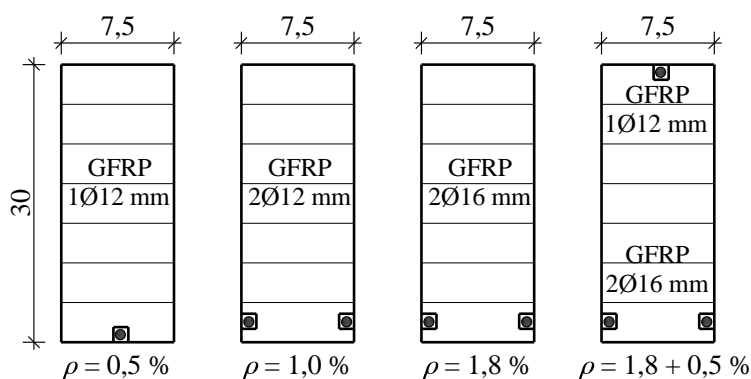
Слика 4.11 Шеме ојачања носача BFRP шипкама – Raftery & Kelly [11]

Изведени су закључци:

- BFRP шипке имају нешто боље механичке карактеристике од GFRP шипки када се говори о њиховој примени за ојачање и санацију дрвених елемената.
- Ојачање BFRP шипкама од 1,4% доприноси повећању носивости од 23% и крутости од око 10%.
- Као мера санације, показано је да BFRP шипке могу ефикасно да премосте оштећења настала у дрвету и да омогуће пуну носивост и крутост носача.
- Постављање ојачања на доњој ивици носача даје веће повећање носивости у поређењу са ојачањем постављеним у прорезе са стране, где положај шипки није оптималан у односу на неутралну осу попречног пресека и шипке су удаљене од најзатегнутијих влакана дрвета.
- Ојачањем и санацијом је постигнуто дуктилније понашање носача, са видљивим траговима пластификације у форми збијања дрвених влакана у горњим притиснутим ламелама.

- Ојачањем се постиже веће искоришћење механичких својстава дрвета у притиснутој зони.
- Интегритет споја дрвета и примењеног ојачања није нарушен током испитивања до лома.

Yang и група аутора [27] су истраживали ојачање лепљених ламелираних носача са GFRP шипкама, GFRP и CFRP тракама и челичним шипкама. Носачи димензија попречног пресека 7,5 x 30 cm су испитани на савијање до лома, а оптерећени су двома концентрисаним силама у трећинама распона. Укупно 46 носача дужине 6 m и распона 5,7 m је експериментално тестирано. Пет неојачаних носача је служило као контролна серија. Конфигурација ојачања шипкама је приказана на слици 4.12. Вариран је положај и пречник шипки, као и проценти ојачања. Добијени резултати су упоређени са аналитички одређеним вредностима.

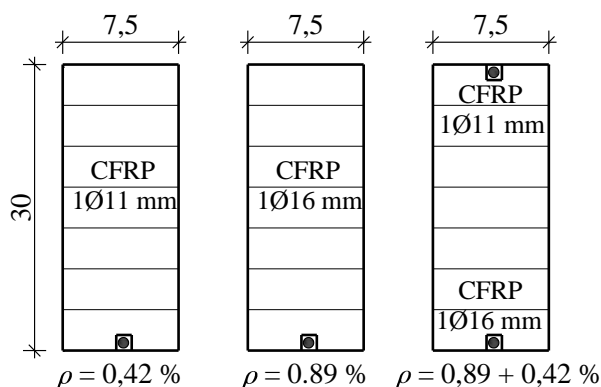


Слика 4.12 Шеме ојачања носача GFRP шипкама – Yang и група аутора [27]

Експерименталним испитивањем је утврђено следеће:

- Са повећањем процента ојачања расте носивост, крутост, максимални угиб при лому у средини носача, као и дуктилност носача.
- Повећање процента ојачања може довести до промене облика лома из кртог у затегнутој зони у дуктлан лом у притиснутој зони.
- Додавање ојачања и у притиснуту зону умањује дуктилност и нелинеарно понашање у поређењу са носачима ојачаним само у затегнутој зони.
- Такође, постављање ојачања и у притиснуту зону доводи до врло малог повећања капацитета носивости у односу на исте носаче ојачане само у затегнутој делу пресека.
- Ако је циљ повећање крутости носача предлаже се преднапрезање ојачања.

Yang и група аутора [28] су вршили теоријско и експериментално испитивање на лепљеним ламелираним дрвеним носачима ојачаним карбонским шипкама и преднапрегнутим карбонским шипкама. Укупно 12 носача димензија попречног пресека 7,5 x 30 cm су оптерећени на савијање двама концентрисаним силама у трећинама распона. Дужина носача је била 6 m, док је распон износио 5,7 m. Три узорка су тестирана неојачана. Три носача су имала по једну CFRP шипку пречника 11 mm у доњој затегнутој зони, три су имала по једну преднапрегнуту шипку пречника 16 mm у доњој зони, док су три носача имала једну преднапрегнуту шипку пречника 16 mm у доњој зони и једну обичну шипку пречника 11 mm у горњој зони. Попречни пресеци ових узорака су приказани на слици 4.13.



Слика 4.13 Шеме ојачања носача CFRP шипкама – Yang и група аутора [28]

Резултати овог испитивања су показали да:

- Ојачање CFRP шипкама изазива дуктилније понашање носача и промену места настанка лома из затегнуте зоне код неојачаних носача у притиснуту зону код ојачаних.
- У случају неких ојачаних носача је дошло до комбинованог лома услед смицања и савијања. Овакав лом се може избећи ако се смањи проценат ојачања у попречном пресеку, тако да дође до лома само услед савијања.
- Серија носача са процентом ојачања од 0,42% је имала повећање носивости од 64,8% и повећање крутости од 18,7% у односу на неојачане носаче. Серија са преднапрегнутим шипкама, која је имала проценат ојачања 0,89%, показала је повећање носивости од 93,3% и повећање крутости од 33,2% у односу на неојачане носаче. Серија носача са комбинованим ојачањем у горњој и доњој

зони пресека је имала повећање носивости од 131% и повећање крутости од 42% у односу на неојачане носаче.

- Као резултат преднапрезања шипки, при истом угибу од 1/250 распона, повећано је оптерећење носача за 211% у односу на неојачане носаче.
- Очуван је интегритет споја између шипки и дрвета јер је обезбеђено адекватно сидрење и лепљење шипки целом дужином носача.
- Ојачањем носача се постижу и знатно веће дилатације затезања (повећање од 77,6%) у оквиру попречног пресека носача.
- Теоријски модел предложен у овом раду потврђује резултате добијене експерименталним испитивањем да се носивост носача може знатно повећати применом ојачања Поред тога, овај модел је адекватан за прорачун ојачаних лепљених ламелираних носача, јер показује добро поклапање са аналитичким и експерименталним резултатима више различитих испитивања.

4.3 Ојачање носача са редукованом висином пресека код ослонца

Иако сви аутори препоручују ојачање носача са редукованом висином попречног пресека, постоји јако мали број експерименталних испитивања на ову тему. Испитивања коју су спроведена се углавном баве ојачањима у виду трака или тканина од различитих материјала и у виду завртњева или челичних шипки. Ојачање са стаклопластичним GFRP шипкама на местима редуције висине пресека носача је експериментално испитано само у једном истраживању и то у комбинацији са ојачањем носача на савијање.

Преглед испитивања ојачања носача са редукованом висином попречног пресека код ослонца дат је у табели 4.4. Присуство редуције висине пресека, као што је поменуто, знатно умањује носивост елемента, те се различитим методама ојачања тежи избегавању очекиваног локалног лома услед прекорачења чврстоће дрвета на затезање управно на влакна или на смицање и постизању лома услед губитка носивости на савијање, као да носач није ослабљен. Сва досадашња испитивања су јасно показала да увођење ојачања на месту нагле промене висине носача знатно повећава капацитет носивости. При анализирању резултата ових испитивања треба узети у обзир шта је био циљ ојачавања носача.

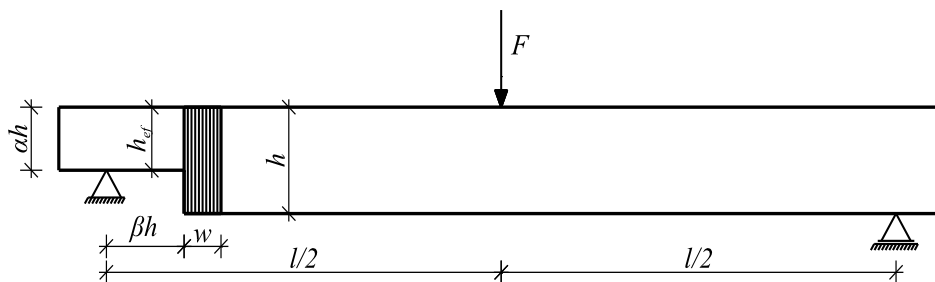
Табела 4.4 Експериментална испитивања ојачања носача са редукованом висином пресека код ослоња

Аутор	Број узорака	Материјал	Димензије попречног пресека (mm)	Распон (mm)	Коефицијент α	Коефицијент β	Ојачање
<i>Möhler & Mistler</i> (1978)	20	/	100 x 600	/	0,475	0,417	Завртњеви Челичне шипке Челичне плоче Дрвене плоче
<i>Coureaux</i> и група аутора (2001)	15	Монолитно дрво	90 x 310	2575	0,5	1,0	FRP тканине
<i>Blaß & Bejtka</i> (2003)	50	Монолитно дрво	100 x 160	1000	0,5 / 0,6 / 0,688 / 0,813	0,375	Завртњеви
<i>Amy & Svecova</i> (2004)	26	Монолитно дрво	100 x 400	3400	0,05	0,288	GFRP шипке
<i>Gomez & Svecova</i> (2008)	9	Монолитно дрво	100 x 400	3400	0,05	0,288	GFRP тканине
<i>Jockwer</i> (2014)	20 24 8	ЛЛД	140 x 600 90 x 315 140 x 600	/	0,633 0,65 0,8	0,333 0,48 0,25	Завртњеви Челичне шипке CFRP тканине Шперплоче

Möhler & Mistler [4,29] су испитивали различите технике ојачања у свом раду. Користили су завртњеве М16, затим челичне шипке пречника 16 mm (једна или две), металне плоче, дрвене плоче (закуцане ексерима и лепљене). Попречни пресек испитаних носача био је 10 x 60 cm.

Лом у случају неојачаних греда се догодио услед прекорачења чврстоће на затезање управно на влакна. Предвиђено је да се постављањем ојачања носивост засеченог дела носача повећа 1,7 до 2,2 пута. Међутим, ојачани носачи су достигли лом много раније, достижући само вредност носивости на смицање ослабљеног попречног пресека. Најлошије резултате су дали завртњеве. Како је испитан мали број узорак по серији, не могу се извести јасни закључци о примењеним методама ојачања у овом раду.

Coirreau и група аутора [30] су испитивали отварање пукотина на месту редуције висине носача услед концентрације напона. Димензије попречног пресека носача су биле 9 x 31 cm, док је распон био 257,5 cm, висина носача изнад једног ослоња је редукована на пола, док је дужина засеченог дела била једнака висини носача. Пет неојачаних узорак је служило као контролна серија. По пет носача је ојачано FRP тканинама ширина 43 и 85 mm. Носачи су испитани на савијање, а оптерећени су једном концентрисаном силом у средини распона. Диспозиција испитивања дата је на слици 4.14. Током испитивања мерено је отварање пукотине на месту редуције висине пресека носача.



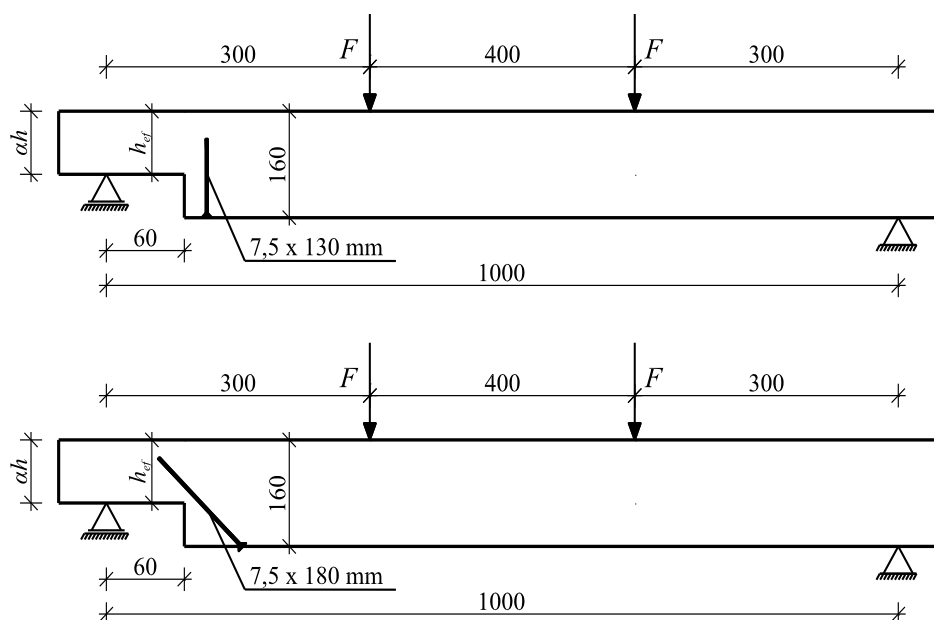
Слика 4.14 Диспозиција испитивања носача са редукованом висином пресека код ослоња – Coirreau и група аутора [30]

Закључци донети овим испитивањем су следећи:

- Пукотина се иницијално отвара при истом оптерећењу за ојачане узорке као и за неојачане. Међутим, ојачање премошћава пукотину и значајно повећава капацитет носивости носача – 103% и 187% за FRP тканине ширина 43 и 85 mm, редом.

- При лому, ојачани носачи су доживели до 2,5 пута веће отварање пукотина од неојачаних носача, доказујући повећање дуктилности.
- При лому ојачаних носача дошло је до одлепљивања примењених тканина, али не и до њиховог цепања.
- Примена ојачања није променила облик лома услед прекорачења чврстоће дрвета на затезање управно на влакна и чврстоће дрвета на смицање, у лом услед губитка носивости на савијање.

Blaß & Vejtko [31] у свом раду су испитали 50 носача са редукованом висином попречног пресека код ослонца. У оквиру испитивања неојачани носачи су служили као контролна серија за ојачане. Носачи су испитани на савијање, а оптерећени су двама концентрисаним силама као што је приказано на слици 4.15.



Слика 4.15 Диспозиција испитивања носача са редукованом висином пресека код ослонца – *Blaß & Vejtko* [31]

Попречни пресек носача је био 10 x 16 cm, док је распон био 100 cm. Испитано је четири различите висине засека тако да су ефективне висине ослабљених пресека износиле 8; 9,5; 11 и 13 cm, док је дужина редукованог дела пресека била 6 cm. Као ојачање су употребљени завртњеве за дрво пречника 7,5 mm са навојем целом дужином. Носачи су ојачани са по једним завртњем, с тим што је вариран угао ојачања у односу на подужну осу носача (90° и 45°). Завртњеве постављени под правим углом су били дужине 130 mm, док су завртњеве постављени под углом од

45° били дужине 180 mm. Током испитивања мерено је отварање пукотине на месту редукације висине носача у три позиције.

На основу резултата испитивања су донети следећи закључци:

- Лом ојачаних носача је уследио услед прекорачења чврстоће на затезање управно на влакна и чврстоће на смицање. Дошло је до иницијалног отварања пукотине, а затим до њене стабилне пропагације све до лома када је дошло до извлачења завртњева.
- Предложени аналитички израз за прорачун ојачања носача са редукованом висином пресека дат изразом у Немачком националном анексу Еурокода 5 [8] даје 50 - 60% вредности силе добијене овим експерименталним испитивањем. Ово се објашњава конзервативним претпоставкама на којима је аналитички прорачун заснован. Само за носаче са $\alpha = 0,813$, дакле за мањи засек, је израз у Немачком националном анексу Еурокода 5 дао тачније резултате. Међутим, и у случају ових носача се лом догодио услед смицања, пре достизања очекиване носивости ојачаног редукованог дела пресека.
- Није примећена значајнија разлика у резултатима када су завртњеви постављени под углом од 90° или под углом од 45°.

Amy & Svecova [32] су наставили раније приказано експериментално испитивање ојачања главних носача старих дрвених мостова GFRP шипкама [21]. За разлику од претходног испитивања ови носачи су имали редуковану висину код ослонаца. Висина је редукована за 2 cm, док је дужина редукованог дела пресека код ослонаца, са обе стране носача, износила 11,5 cm. Димензије попречног пресека носача биле су 10 x 40 cm, док је распон износио 340 cm. Испитано је укупно 26 носача на савијање до лома, оптерећених једном концентрисаном силом у средини распона. 8 неојачаних узорак (Група C) је служило као контролна серија. Група F је имала 12 ојачаних носача са хоризонталним GFRP шипкама пречника 12 mm у доњој затегнутој зони. Трећа серија – Група FD је имала и ојачање постављено на засеченим деловима како би се премостио проблем концентрације напона на месту редукације висине попречног пресека. Ова серија је обухватила 6 носача са хоризонталним GFRP шипкама пречника 12 mm постављеним у затегнутој зони и са косим GFRP шипкама пречника 12 mm, под углом од 60° према подужној оси носача, постављеним код ослонаца. Диспозиције ојачања дате су у табели 4.5.

Табела 4.5 Програм експерименталног испитивања – Ату & Svecova [32]

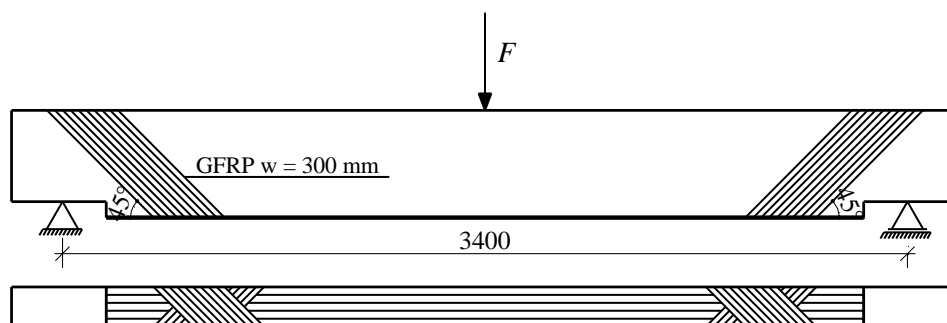
Серија	Диспозиција ојачања	Број узорака
С		8
F		12
FD		6

Донети су следећи закључци:

- Очекивано, код носача са редукованом висином пресека неопходна је примена ојачања на местима засека, јер је доминантан лом услед затезања управно на влакна и смицања на ослабљеном делу пресека, те није довољно само ојачање на савијање.
- Када је примењено комбиновано ојачање дошло је до повећања граничног оптерећења од 22%, али треба имати у виду да су узорци ове серије знатно ниже класе чврстоће дрвета у односу на неојачане носаче.
- Код комбиновано ојачаних носача је дошло до промене облика лома у лом услед притиска управно на влакна дрвета у притиснутој зони. Отварање пукотина је уочено и код ових носача, али је ојачање спречило њихову пропагацију и лом услед смицања.
- Применом GFRP ојачања повећана је и дуктилност испитаних носача, при чему је ово повећање знатно веће код носача ојачаних и на савијање и на смицање у односу на носаче ојачане само на савијање.

Gomez & Svecova [33] су наставили испитивања старих главних носача дрвених мостова описаних у радовима [21,32]. Како се радило о главним носачима са редукованом висином пресека код ослонаца (исто као у раду [32]) носачи су ојачани и на смицање и на савијање. Испитано је укупно 9 носача димензија попречног пресека 10 x 40 cm и распона 340 cm. Носачи су испитани на савијање пре и после ојачања оптерећивањем са једном концентрисаном силом у средини распона. Пре ојачања је нането радно оптерећење како би се одредила крутост носача, док су ојачани носачи оптерећени до лома. Као контролна серија служили су узорци испитани у раду [32] – Серија С. Два слоја GFRP тканина на доњој затегнутој страни, постављена целом дужином и ширином елемената, су

представљала ојачање на савијање. Ојачање на смицање, на местима редуције висине носача, су биле GFRP тканине ширине 300 mm постављене под углом од 45°, које су опшивале пресек и са доње стране. Битно је напоменути да су носачи већ били испуцали и оштећени услед старости и употребе током протеклих година. Диспозиција испитивања је приказана на слици 4.16.



Слика 4.16 Диспозиција испитивања ојачаних носача – Gomez & Svecova [33]

Из овог испитивања су донети следећи закључци:

- Примена ојачања на савијање је довела до повећања крутости носача од 5,5 до 52,8% у односу на контролну серију, а у зависности од степена оштећења самих узорака пре интервенција.
- У случају носача са пукотинама позиционираним близу средине висине елемента, дужине веће од висине носача, долазило је до лома услед смицања и одлепљивања ојачања на смицање. Када су пукотине ближе ивицама, овакав лом код ојачаних носача је мање вероватан.
- Предложени теоријски модел прорачуна хоризонталних смичућих сила које прихвата ојачање је показао добро слагање са експерименталним резултатима овог испитивања.

Lockwer [4] је у оквиру своје докторске дисертације дао резултате испитивања спроведених на *ETH Zurich*, *LNU Växjö*, и *Empa Dübendorf*. Испитане су различите димензије носача, затим различите геометрије редукованог дела пресека, као и типови ојачања. Као спољашње ојачање су коришћене шперплоче и тканине на бази карбонских влакана, док су се за унутрашње ојачање користили самоуграђујући завртњевци са целом дужином у навоју и челичне шипке са навојем. При томе су варирани и углови под којима је постављено ојачање – 45°, 60° и 90° у односу на подужну осу носача. Сумиран преглед испитивања носача дат је у табели 4.6.

Табела 4.6 Експериментално испитивање неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека – Jockwer [4]

Серија	Број узорака	Димензије попречног пресека (mm)	α	β	Ојачање	Угао ојачања
<i>ETH Zurich</i>						
1	4	140 x 600	0,633	0,333	/	/
2	4				2 завртња $d = 9$ mm	90°
3	2				2 завртња $d = 13$ mm	90°
4	4				2 завртња $d = 13$ mm	45°
5	2				2 шипке $d = 16$ mm	90°
6	4				2 шипке $d = 16$ mm	45°
<i>LNU Växjö</i>						
7	8	90 x 315	0,65	0,48	/	/
8	8				1 завртањ $d = 13$ mm	90°
9	8				1 завртањ $d = 13$ mm	45°
10	/				CFRP тканине	45°/90°
11	/				шперплоча $d = 10$ mm	45°/90°
<i>Empa Dübendorf</i>						
12	4	140 x 600	0,8	0,25	1 завртањ $d = 13$ mm	60°
13	4				1 завртањ $d = 13$ mm	45°

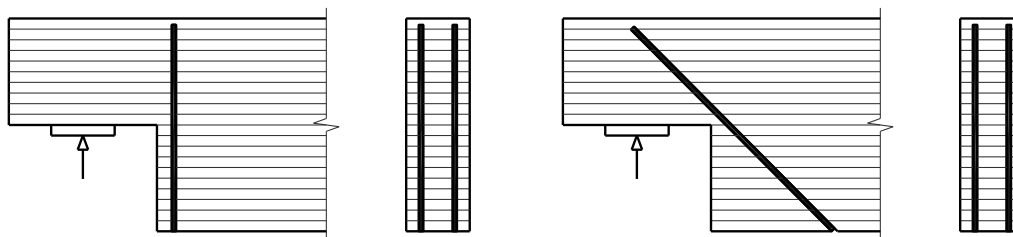
Закључци донети на основу спроведених испитивања су следећи:

- Евидентирано је значајно повећање носивости ојачаних у односу на неојачане носаче, али постоје разлике у зависности од врсте и положаја ојачања.
- Код неојачаних носача лом се догодио услед отварања пукотине на месту редуције висине пресека, што одговара облику лома I.
- Крти лом на месту засека је уочен и код ојачаних носача. Прво долази до отварања пукотине, које је ограничено примењеним ојачањем. Након тога пукотина пропагира и долази до смицања у равни пукотине. Коначни лом је изазван смицањем, јер се на већим удаљеностима од засека не може уочити даље отварање пукотине већ само њена пропација и смицање у равни, дакле ради се о облику лома II.

- Што се тиче капацитета носивости, најбоље резултате је дало ојачање постављено под углом од 45° .
- Ојачања чији је пречник $d \geq 13$ mm су имала довољну носивост да спрече одвајање доњег сегмента носача при лому, без обзира на појаву пукотине и њен нестабилан раст.
- Како је отварање пукотине спречено ојачањем, пре наступања лома је чак примећено и затварање исте, што се може објаснити „ефектом ужета“ – појава додатне носивости услед трења између делова пресека одвојених пукотином, као последица појаве аксијалног затезања у ојачању.
- Што се тиче испитивања са спољашње постављеним ојачањем у виду тканина на бази карбонских влакана, при лому је долазило до одлепљивања и одвајања ојачања од дрвета. У случају ојачања под углом од 90° , одлепљивање је било последица недовољне дужине споја дрвета и тканине. Код ојачања под углом од 45° , разлика у дилатацијама у дрвету и тканини је изазвала губитак носивости на споју ова два материјала.

Локално ојачање дрвених носача различитим врстама завртњева и шипки су теоријски приказали *Franke, Franke & Harte* [34] анализирајући претходна експериментална испитивања. У случају када се ослањање носача изводи са редукованом висином носача код ослонца, концентрације напона које се јављају у углу доводе до отварања пукотина на том месту и њихове брзе пропагације кроз попречни пресек елемента, што може довести до лома. Поред смичућих напона, јављају се и напони затезања управни на влакна. Као додатак спољашњим методама ојачања у форми плоча, трака и тканина од различитих материјала, предложено је ојачање у виду завртњева или различитих типова шипки постављених управно на влакна или под углом од 45° . Диспозиције предложених ојачања у овом раду дате су на слици 4.17.

Очекује се да примена ојачања под углом од 45° даје знатно боље резултате, пре свега због великих смичућих напона који се јављају поред напона затезања управно на влакна. Поред повећања носивости, ојачање овог типа треба да омогући и дуктилнији лом носача. Истраживања показују да унутрашња ојачања треба да буду постављена што ближе месту редуције висине пресека, при чему је веома важно да услов о минималним растојањима од ивице буде задовољен.



Слика 4.17 Ојачање носача са редукованом висином пресека код ослоња – Franke, Franke & Harte [34]

4.4 Закључци

Из досадашњих испитивања неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослоња, као и испитивања FRP шипки као ојачања дрвених носача изложених савијању, могу се извести следећи закључци:

- Код неојачаних носача са редукованом висином пресека код ослоња лом се догађа услед отварања пукотине на месту концентрације напона, када дође до прекорачења чврстоће дрвета на затезање управно на влакна, што одговара облику лома I.
- Како дрво има најмању носивост у случају напрезања управно на влакна, неопходно је ојачати носаче који имају редуковану висину пресека.
- Ојачање носача са редукованом висином пресека код ослоња доводи до повећања носивости оваквих елемената, али ово повећање, као и облик лома доста зависе од врсте и крутости примењеног ојачања.
- У случају завртњева и челичних шипки са навојем као ојачања најчешће је долазило до лома услед смицања, што одговара облику лома II. Код ових испитивања је уочено отварање пукотина, њихова пропација и смицање у равни пукотине. Ојачање је ограничило неконтролисано отварање пукотине, али није обезбедило промену облика лома у лом услед савијања.
- Аналитички прорачун дат у Немачком анексу Еврокода 5 даје задовољавајуће резултате за прорачун силе у ојачању, али не и за носивост самог носача са редукованом висином пресека код ослоња. Неопходно је ревидирати овај израз за различите врсте и положаје ојачања.
- FRP шипке као ојачање дрвених носача на савијање, постављене у затегнутој зони су показале одличне резултате у смислу повећања носивости и добру компатибилност са дрветом.

На основу резултата и закључака претходних истраживања, у оквиру ове дисертације испитани су носачи са редукованом висином пресека код ослонаца ојачани завртњевима и GFRP шипкама. Акцент је стављен на носаче ојачане шипкама на бази стаклених влакана (GFRP шипке), јер постоји недостатак оваквих експерименталних испитивања. Поред тога, циљ је и побољшање постојећих аналитичких метода прорачуна неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца, јер су досадашња истраживања показала одређене недостатке ових метода.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

Сва експериментална испитивања су спроведена у лабораторијама Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Испитане су физичке и механичке карактеристике свих употребљених материјала (дрво, завртњеви, GFRP шипке), а затим је извршено главно експериментално испитивање на неојачаним и ојачаним носачима од лепљеног ламелираног дрвета са редукованом висином пресека код ослонаца.

Одређивање физичких и механичких карактеристика дрвета и примењених средстава за ојачање битно је са становишта познавања понашања појединачних материјала, како би се могло предвидети и објаснити њихово понашање при заједничком дејству и оптерећењу. Поред тога, при аналитичким и нумеричким прорачунима неопходно је познавати карактеристике материјала, јер су управо оне улазни параметри сваке анализе.

Главни експеримент у овом докторату се састојао од испитивања носача од лепљеног ламелираног дрвета на савијање до лома. Сви испитани носачи су имали редуковану висину попречног пресека код оба ослонца. Испитане су различите серије неојачаних и ојачаних носача. Различите врсте ојачања (завртњеви и GFRP шипке), као и различите диспозиције ојачања су примењене у овом експерименту. Експериментално испитивање презентовано у овом раду је део ширег програма испитивања где је, поред ојачавања, одређени број узорака саниран и поново испитан на савијање до лома.

5.1 Физичке и механичке карактеристике дрвета

Носачи од лепљеног ламелираног дрвета, који су тестирани у овом докторату су били донације фирме „Пирамида“ из Сремске Митровице. Сви носачи су израђени од четинара (смрека), а према произвођачу су класирани као GL22h у складу са EN 14080 [35].

На малим „чистим“ узорцима, који су исечени из великих носача након извршених екперименталних испитивања, утврђене су вредности запреминске масе, модула еластичности, чврстоће на савијање, чврстоће на смицање паралелно влакнима и чврстоће на затезање управно на влакна дрвета. Сва испитивања карактеристика дрвета извршена су према важећим EN и ISO стандардима.

5.1.1 Запреминска маса дрвета

Запреминска маса дрвета је одређена у складу са стандардом EN 384 [36]. Испитано је укупно 50 узорака (слика 5.1) који су исечени из два насумично изабрана носача (по 25 узорака из сваког), а након њиховог испитивања на савијање до лома. Узорци су исечени из „чистог“ дрвета, тако да нису имали слојеве лепка у себи. Пет узорака је одбачено јер су имали чворове, а самим тим и већу масу у односу на остале узорке. Усвојене димензије попречног пресека узорака су биле 20 x 20 x 25 mm. Пре испитивања узорци су чувани на 20±2°C и релативној влажности ваздуха од 45±5%. Влажност узорака пре испитивања је износила 12%.



Слика 5.1 Узорци за мерење запреминске масе дрвета

Маса узорака је измерена вагом са тачношћу 0,0001 g. Димензије су измерене нонијусом прецизности 0,1 mm. Запреминска маса је срачуната према изразу:

$$\rho = \frac{m}{a \cdot b \cdot c} \quad (5.1)$$

где је:

m – маса узорка (g);

a, b, c – димензије попречног пресека узорка (mm).

Резултати испитивања запреминске масе су дати у табели 5.1.

Табела 5.1 Резултати испитивања запреминске масе дрвета

Узорак	Димензије узорка			Маса узорка m (g)	Запреминска маса ρ (kg/m ³)
	a (mm)	b (mm)	c (mm)		
1	20,0	19,9	25,0	3,9834	400,3
2	20,1	20,0	24,9	4,0987	409,5
3	19,6	20,1	25,0	3,9729	403,4
4	20,4	20,4	25,2	4,5591	434,7
5	20,4	20,0	25,1	4,5581	445,1
6	20,1	20,2	25,2	4,1181	402,5
7	19,7	20,0	25,1	3,9694	401,4
8	20,0	20,1	24,9	3,9951	399,1
9	20,0	19,5	25,0	3,9789	408,1
10	19,7	20,1	25,1	3,9811	400,6
11	20,2	20,0	25,3	4,2876	419,5
12	20,0	20,1	24,9	3,9829	397,9
13	20,1	19,8	25,0	3,9891	400,9
14	20,3	20,1	25,2	4,4547	433,2
15	20,4	20,0	25,3	4,5473	440,5
16	20,1	20,2	25,1	4,1302	405,3
17	20,4	20,1	25,2	4,5336	438,7
18	20,0	20,2	24,8	3,9812	397,4
19	19,8	20,1	25,2	4,0978	408,6
20	20,3	20,3	25,3	4,4119	423,2
21	20,2	20,0	25,3	4,0933	400,5
22	20,1	19,7	25,3	4,0661	405,9
23	20,1	20,1	25,0	4,1312	409,0
24	19,7	20,1	25,1	3,9779	400,2
25	20,3	20,2	25,2	4,3996	425,8
26	20,1	20,3	25,0	4,0613	398,1
27	20,2	19,8	25,1	4,0189	400,3
28	20,2	19,9	25,1	4,0191	398,3
29	19,9	20,0	24,9	3,9987	403,5

Наставак табеле 5.1

30	20,1	20,2	24,8	4,0072	398,0
31	20,2	19,7	25,1	3,99765	400,2
32	20,1	19,5	25,0	3,9717	405,3
33	20,1	19,8	24,9	3,9701	400,6
34	20,1	19,9	25,1	3,9913	397,6
35	20,1	20,4	25,1	4,3031	418,1
36	20,3	20,1	25,2	4,5462	442,1
37	20,1	20,5	25,5	4,4157	420,2
38	20,0	20,2	25,2	4,7627	467,8
39	20,4	20,6	25,3	4,2806	402,6
40	20,2	19,6	25,3	3,9809	397,4
41	19,9	20,2	25,1	4,0189	398,3
42	20,5	20,3	25,2	4,3336	413,2
43	20,6	20,4	24,4	4,243	413,8
44	19,9	20,3	24,8	3,9798	397,2
45	20,3	20,1	25,1	4,2458	414,6
Средња вредност					411,1
Стандардна девијација					16,3
Коефицијент варијације (%)					4,0

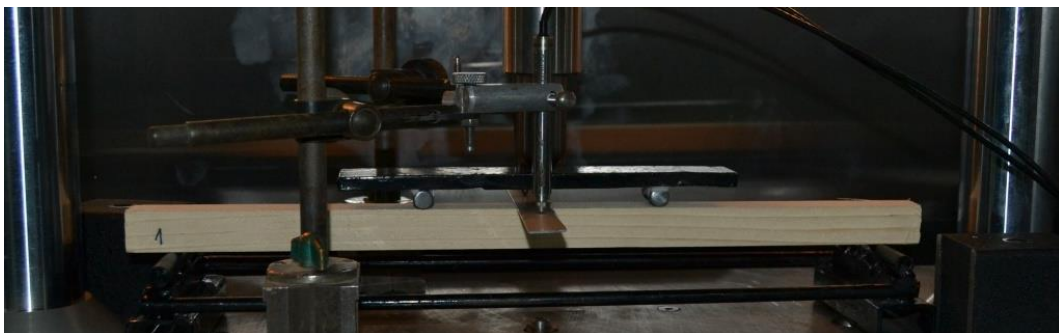
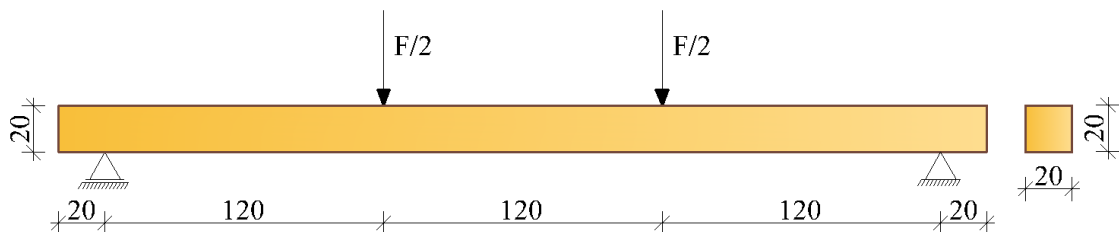
Средња вредност запреминске масе дрвета износила је $411,1 \text{ kg/m}^3$, што одговара класи дрвета С22 према EN 338 [37].

5.1.2 Чврстоћа дрвета на савијање и модул еластичности

Чврстоћа дрвета на савијање и модул еластичности су испитани према стандарду EN 408 [38]. Испитивање је извршено на малим узорцима статичког система просте греде, оптерећеним са две концентрисане силе у трећинама распона, у Лабораторији за коловозне конструкције Грађевинског факултета Универзитета у Београду на универзалној тест машини *UTM 25 IPC Global*, капацитета 25 kN.

Диспозиција и изглед испитаних узорака дати су на слици 5.2. Испитано је укупно 20 узорака који су исечени из два насумично изабрана носача (по 10 узорака из сваког), након њиховог испитивања на савијање до лома. Узорци су исечени од

„чистог“ дрвета, тако да нису имали слојеве лепка у себи. Димензије попречног пресека узорака су усвојене 20 x 20 mm, дужина у правцу влакана је била 400 mm, док је распон износио 360 mm. Дужина и распон узорака су одређени према стандарду EN 408 [38] тако да је распон био 18 пута већи од висине попречног пресека, а дужина је била 20 пута већа од висине попречног пресека (захтевана минимална дужина је 19 пута висина попречног пресека). Узорци су израђени са равним и глатким површинама и оштрим ивицама. Пре испитивања узорци су чувани на $20\pm 2^\circ\text{C}$ и релативној влажности ваздуха $45\pm 5\%$, а њихова влажност пре испитивања је износила 12%. Димензије попречног пресека су измерене нонијусом прецизности 0,1 mm, тако што је ширина мерена у тангенцијалном правцу, док је висина мерена у радијалном правцу.



Слика 5.2 Диспозиција испитивања чврстоће дрвета на савијање и модула еластичности

У току испитивања, оптерећење је помоћу челичног елемента расподељено са једне на две концентрисане силе. Испод тачака наношења оптерећења су постављене мале металне плочице како би се спречило утискивање челика у дрвени елемент, а самим тим и концентрација напона која би могла да доведе до лома испод тачака наношења оптерећења. Угиб је мерен у средини распона. Брзина наношења оптерећења је усвојена 0,04 mm/s тако да су задовољени услови дефинисани стандардом и за испитивање модула еластичности (максимална брзина $0,003h = 0,06$ mm/s) и за одређивање чврстоће на савијање (максимално оптерећење

треба да се достигне за време од 300 ± 120 s). Подаци о оптерећењу и угибу су регистровани током самог испитивања користећи аквизициони систем, читавањем на 0,1 s. На вредности сила добијених мерењем додата је сопствена тежина челичног елемента за прерасподелу оптерећења.

Резултати испитивања за сваки узорак приказани су у табели 5.2. Чврстоћа на савијање је срачуната према изразу:

$$f_m = \frac{M_{max}}{W} = \frac{F_{max} \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (5.2)$$

где је:

f_m – чврстоћа дрвета на савијање (N/mm^2);

M_{max} – максимални момент савијања (Nmm);

W – отпорни момент попречног пресека узорка (mm^3);

F_{max} – максимална сила (N);

l – размак између ослонаца (mm);

b – ширина попречног пресека узорка (mm);

h – висина попречног пресека узорка (mm).

Глобални модул еластичности је срачунат за еластичну област понашања према изразу:

$$E_{m,global} = \frac{23}{648} \cdot \frac{(F_2 - F_1) \cdot l^3}{2(w_2 - w_1) \cdot I} \quad (5.3)$$

где је:

$E_{m,global}$ – глобални модул еластичности дрвета при савијању (N/mm^2);

F_1 – сила која одговара 10% максималне силе (N);

F_2 – сила која одговара 40% максималне силе (N);

w_1 – угиб у средини узорка, измерен за силу F_1 (mm);

w_2 – угиб у средини узорка, измерен за силу F_2 (mm);

l – размак између ослонаца (mm);

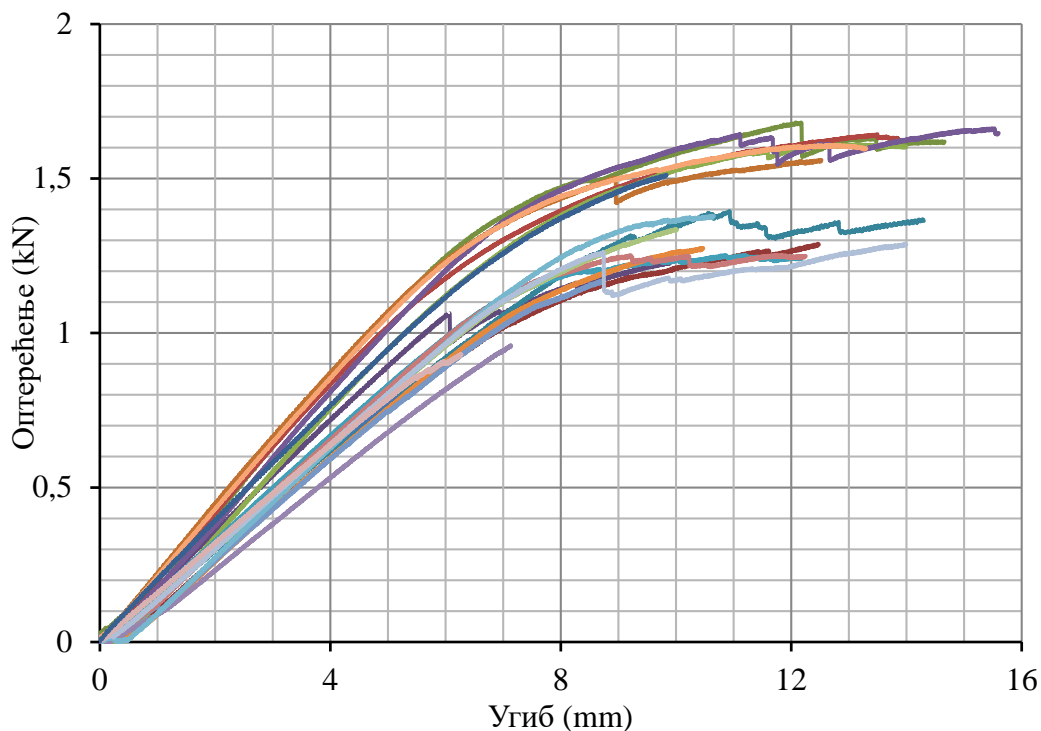
I – момент инерције попречног пресека узорка (mm^4).

Табела 5.2 Резултати испитивања чврстоће дрвета на савијање и модула еластичности

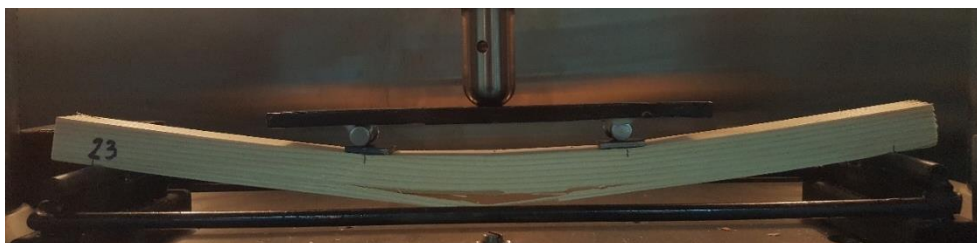
Узорак	Димензије узорка		Максимална сила F_{max} (kN)	Чврстоћа на савијање f_m (N/mm ²)	Модул еластичности $E_{m,global}$ (N/mm ²)
	b (mm)	h (mm)			
1	20,0	20,1	1,7	74,6	13231,5
2	20,3	20,2	1,6	70,7	12555,1
3	20,2	20,3	1,7	72,0	12302,7
4	20,1	20,4	1,3	54,0	10048,2
5	20,2	20,3	1,3	55,3	9928,1
6	20,2	20,3	1,2	51,5	9145,0
7	20,0	20,6	1,3	53,3	10244,1
8	20,0	20,4	1,3	57,9	9596,3
9	20,0	20,3	1,0	42,1	8714,1
10	20,2	20,2	1,4	60,4	10599,0
11	20,2	20,2	1,6	70,4	13058,4
12	20,1	20,4	1,3	55,6	9795,9
13	20,5	20,6	1,0	39,4	8958,1
14	20,4	20,4	1,6	68,4	10988,1
15	20,1	20,3	0,9	37,4	9453,4
16	20,0	20,4	1,6	68,2	13021,1
17	20,5	20,2	1,4	60,2	9534,0
18	20,1	20,3	1,3	55,3	10638,5
19	20,5	20,4	1,7	70,9	13197,3
20	20,1	20,2	1,3	57,0	9980,2
Средња вредност				58,7	10749,5
Стандардна девијација				11,0	1551,6
Коефицијент варијације (%)				18,7	14,4

Дијаграми оптерећење - угиб у средини су приказани на слици 5.3 Дрво је показало еластично понашање до одређеног степена оптерећења, што се види са линеарног дела дијаграма. Након тога је уследило пластично понашање, што се може видети на нелинеарном делу дијаграма. Генерално су сви узорци показали

слично понашање, а до лома је долазило у средњој трећини распона, између тачака наношења оптерећења (слика 5.4).



Слика 5.3 Дијаграми оптерећење - угиб при испитивању чврстоће на савијање



Слика 5.4 Карактеристични лом узорка при испитивању чврстоће на савијање

Средња чврстоћа на савијање износила је $58,7 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 18,7%. Како је ово испитивање спроведено на малим узорцима неопходно је одредити вредност корекционог фактора да би се добила чврстоћа на савијање конструкцијског дрвета. Овај фактор узима у обзир величину узорка, и према стандарду EN 384 [36] је дефинисан као:

$$k_h = (150 / h)^{0,2} \quad (5.4)$$

где је:

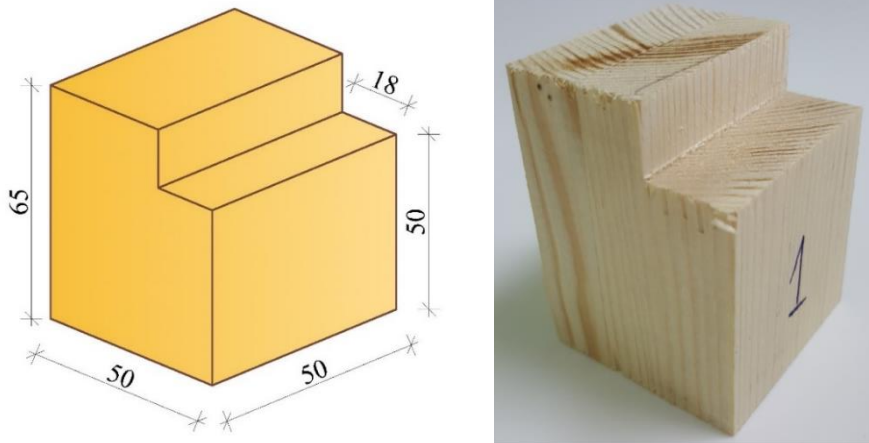
h – висина попречног пресека узорка (mm).

Корекциони фактор k_h за висину узорака од 20 mm износи 1,5. Након дељења средње вредности добијене за мале узорке са k_h , чврстоћа испитаног дрвета на савијање износи 39,1 N/mm².

Средњи глобални модул еластичности је износио 10749,5 N/mm², са коефицијентом варијације 14,4%. Ова вредност глобалног модула еластичности одговара класи дрвета C22 према EN 338 [37].

5.1.3 Чврстоћа дрвета на смицање

Експериментална процедура за испитивање дрвета на смицање према стандарду EN 408 [38] предвиђа узорке који су залепљени између две металне плоче и оптерећени под углом од 14°. Услед компликованости ове процедуре испитивање чврстоће дрвета на смицање паралелно влакнима извршено је у складу са SRPS D.A1.053 [39], односно ASTM D143-09 [40]. Испитивање је извршено у Лабораторији за испитивање материјала Грађевинског факултета Универзитета у Београду на хидрауличкој преси *Amsler*, капацитета 250 kN. Диспозиција узорка за испитивање чврстоће на смицање дата је на слици 5.5.



Слика 5.5 Диспозиција узорка за испитивање чврстоће дрвета на смицање паралелно влакнима

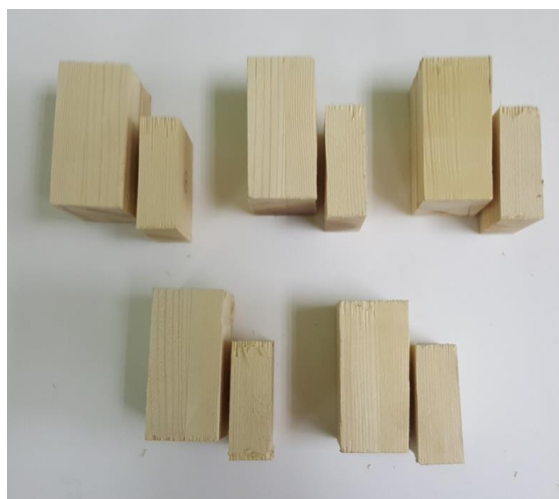
Испитано је укупно 20 узорака који су исечени из два насумично изабрана носача (по 10 узорака из сваког), а након њиховог испитивања на савијање до лома. Узорци су израђени са равним и глатким површинама и оштрим ивицама. Пре испитивања узорци су чувани на 20±2°C и релативној влажности ваздуха 45±5%. Влажност узорака пре испитивања је износила 12%. Димензије попречног пресека су измерене нонијусом прецизности 0,1 mm. Узорци су постављени у алат који је

специјално израђен за овај тип испитивања као што је приказано на слици 5.6. Силом притиска се деловало на узорке преко челичног елемента масе 0,6 kg. Брзина наношења оптерећења је била 8 kN/min, тако да до лома дође за 1,5 до 2 минута.



Слика 5.6 Испитивање чврстоће дрвета на смицање

Код свих узорака је дошло до лома по предвиђеној равни смицања, као што се види са слике 5.7. Вредности добијених чврстоћа дрвета на смицање паралелно влакнима приказане су у табели 5.3.



Слика 5.7 Типичан лом узорака при испитивању чврстоће дрвета на смицање

Чврстоћа дрвета на смицање паралелно влакнима одређена је према изразу:

$$f_v = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \quad (5.5)$$

где је:

f_v – чврстоћа дрвета на смицање паралелно влакнима (N/mm²);

F_{max} – максимална сила притиска (N);

A – смичућа површина узорка (mm^2);

a, b – димензије смичуће површине узорка (mm);

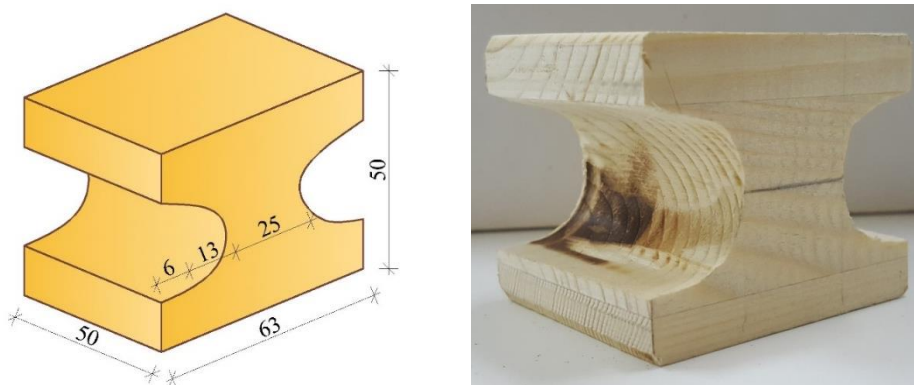
Табела 5.3 Резултати испитивања чврстоће дрвета на смицање

Узорак	Површина смицања		Максимална сила F_{max} (kN)	Чврстоћа дрвета на смицање f_v (N/mm ²)
	a (mm)	b (mm)		
1	49,3	50,9	15,3	6,10
2	49,7	50,8	13,6	5,39
3	49,0	51,1	16,1	6,44
4	49,2	50,9	13,9	5,57
5	49,3	51,0	13,1	5,23
6	49,1	50,5	12,9	5,14
7	49,5	50,9	14,5	5,83
8	49,2	51,0	16,7	6,63
9	49,4	51,0	15,6	6,23
10	49,2	50,6	15,3	6,07
11	49,2	51,2	16,2	6,49
12	49,2	51,3	15,6	6,19
13	48,6	51,2	14,3	5,66
14	48,2	51,2	14,3	5,74
15	48,3	51,1	16,4	6,65
16	48,5	50,7	11,2	4,55
17	48,4	50,8	15,6	6,34
18	48,5	50,9	16,3	6,58
19	48,6	51,0	14,7	5,98
20	48,7	50,9	11,4	4,60
Средња вредност				5,85
Стандардна девијација				0,58
Коефицијент варијације (%)				10,0

Средња вредност чврстоће дрвета на смицање паралелно влакнима износила је $5,85 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 10%. Ова вредност чврстоће дрвета на смицање испуњава услове класе дрвета C22 према EN 338 [37].

5.1.4 Чврстоћа дрвета на затезање управно на влакна

Експериментална процедура за испитивање дрвета на затезање управно на влакна према стандарду EN 408 [38] предвиђа узорке константног правоугаоног попречног пресека који нису ослабљени у средини, па је иницирање лома на том месту доста отежано. Због тога је испитивање чврстоће дрвета на затезање управно на влакна извршено у складу са SRPS D.A1.052 [41] на узорцима који су ослабљени у средини пресека. Испитивање је извршено у Лабораторији за испитивање материјала Грађевинског факултета Универзитета у Београду на универзалној тест машини *Shimadzu AG-X*, капацитета 300 kN. Диспозиција узорка за испитивање чврстоће на затезање управно на влакна дрвета дата је на слици 5.8.



Слика 5.8 Диспозиција узорка за испитивање чврстоће дрвета на затезање управно на влакна

Испитано је укупно 20 узорака који су исечени из два насумично изабрана носача (по 10 узорака из сваког), након њиховог испитивања на савијање до лома. Узорци су израђени са равним и глатким површинама и оштрим ивицама и исечени су тако да се затезање управно на влакна догоди на редукованом делу попречног пресека. Пре испитивања узорци су чувани на $20\pm 2^\circ\text{C}$ и релативној влажности ваздуха од $45\pm 5\%$. Влажност узорака пре испитивања је износила 12%. Димензије попречног пресека су измерене нонијусом прецизности 0,1 mm. Узорци су постављени у алат који је специјално израђен за овај тип испитивања као што је приказано на слици 5.9. Правац дејстава силе затезања је био управан на правац дрвених влакна. Брзина наношења оптерећења је била 0,4 kN/min, тако да до лома дође за 2 до 5 минута.



Слика 5.9 Испитивање чврстоће дрвета на затезање управно на влакна

Код свих узорка је дошло до лома на редукованом делу пресека (слика 5.10). Вредности добијених чврстоћа на затезање управно на влакна дрвета приказане су у табели 5.4.



Слика 5.10 Типичан лом узорка при испитивању чврстоће дрвета на затезање управно на влакна

Чврстоћа дрвета на затезање управно на влакна је одређена према изразу:

$$f_{t,90} = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \quad (5.6)$$

где је:

$f_{t,90}$ – чврстоћа дрвета на затезање управно на влакна (N/mm²);

F_{max} – максимална сила затезања (N);

A – површина редукованог дела попречног пресека узорка (mm^2);

a, b – димензије редукованог дела попречног пресека узорка (mm);

Табела 5.4 Резултати испитивања чврстоће дрвета на затезање управно на влакна

Узорак	Површина редукованог дела пресека		Максимална сила F_{max} (kN)	Чврстоћа дрвета на затезање управно на влакна $f_{t,90}$ (N/mm ²)
	a (mm)	b (mm)		
1	24,1	49,5	1,51	1,27
2	24,9	49,3	1,54	1,25
3	23,8	49,7	1,33	1,13
4	25,5	50,0	1,55	1,22
5	25,5	50,0	1,09	0,85
6	26	49,6	1,34	1,04
7	25,5	49,8	1,17	0,92
8	25,1	50,0	1,52	1,21
9	24,4	50,4	1,29	1,05
10	24,9	49,7	1,57	1,27
11	25,8	49,6	1,63	1,27
12	25,3	50,0	1,71	1,35
13	25,5	50,1	1,52	1,19
14	25,0	50,1	1,53	1,22
15	26,2	49,9	1,47	1,12
16	25,9	50,1	1,41	1,09
17	25,7	50,1	1,56	1,21
18	25,4	49,7	1,51	1,20
19	25,5	50,1	1,19	0,93
20	26,0	49,7	1,62	1,25
Средња вредност				1,15
Стандардна девијација				0,13
Коефицијент варијације (%)				11,7

Средња чврстоћа на затезање управно на влакна дрвета износила је $1,15 \text{ N/mm}^2$, са коефицијентом варијације 11,7%.

5.2 Физичке и механичке карактеристике завртњева

5.2.1 Чврстоћа завртњева на затезање

У оквиру експерименталних испитивања у овом раду, као ојачање, поред GFRP шипки, употребљени су и завртњеви. Серија носача ојачаних завртњевима је испитана ради поређења карактеристика са носачима који су као ојачање имали GFRP шипке. Завртњеви примењени у овом испитивању су били пречника 10 mm и дужина 200 mm и 250 mm – M10x200 и M10x250 и приказани су на слици 5.11. Завртњеви M10x200 су имали дужину навоја од 125 mm, док су завртњеви M10x250 имали дужину навоја од 160 mm.



Слика 5.11 Завртњеви за ојачање

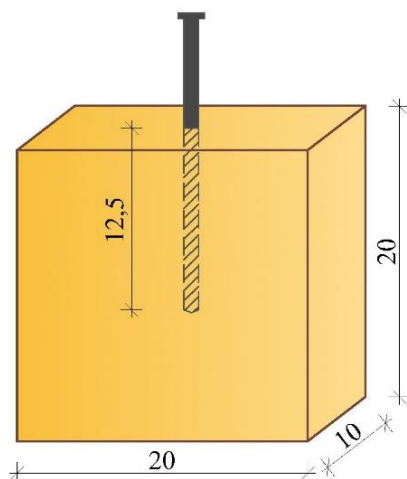
Карактеристике завртњева су усвојене према подацима датим од стране увозника „RU Metal Trade, doo“. Примењени завртњеви су били класе чврстоће челика 5.6., а њихове механичке карактеристике дате су у табели 5.5.

Табела 5.5 Карактеристике завртњева класе чврстоће 5.6

Карактеристика	Вредност
Чврстоћа на затезање f_u (MPa)	500
Граница развлачења f_y (MPa)	300
Дилатација при лому (%)	20

5.2.2 Чврстоћа завртњева на чупање управно на влакна дрвета

Испитивање чврстоће завртњева на чупање управно на влакна дрвета извршено је према EN 1382 [42]. Испитано је пет завртњева M10x200. Димензије дрвених узорак у које су постављени завртњеви износиле су 10 x 20 x 20 cm, у складу са захтевима наведеног стандарда. Дубина забијања завртњева износила је 125 mm, колико је износила и дужина навоја. Шематски приказ испитаних узорак приказан је на слици 5.12.



Слика 5.12 Шематски приказ узорка за испитивање чврстоће завртњева на чупање управно на влакна дрвета

Изглед испитаних узорка приказан је на слици 5.13. Испитивање је извршено у Лабораторији за испитивање материјала Грађевинског факултета Универзитета у Београду на универзалној тест машини *Amsler*, капацитета 800 kN.



Слика 5.13 Узорци за испитивање чврстоће завртњева на чупање управно на влакна дрвета

Узорци су постављени у алат за испитивање као што је приказано слици 5.14. Правац дејстава силе чупања је био паралелан правцу подужне осе завртња. Као мерени подаци добијене су вредности силе при којој је дошло до чупања завртња из дрвеног пресека.



Слика 5.14 Испитивање чврстоће завртњева на чупање управно на влакна дрвета

Чврстоћа вертикалног завртња на чупање управно на влакна дрвета рачуна се према [42]:

$$f_{ax,90} = \frac{F_{max}}{d \cdot l_{ef}} \quad (5.7)$$

где је:

$f_{ax,90}$ – чврстоћа завртња на чупање управно на влакна дрвета;

F_{max} – максимална вредност силе при којој је дошло до чупања завртња;

d – пречник завртња;

l_{ef} – дубина забијања дела завртња са навојем.

Резултати испитивања за сваки узорак су дати у табели 5.6, где су приказане вредности граничне силе при чупању завртња и чврстоће завртњева на чупање управно на влакна дрвета.

Средња вредност чврстоће завртњева на чупање управно на влакна дрвета износила је 9,5 N/mm² са коефицијентом варијације од 12,7%.

Табела 5.6 Резултати испитивања чврстоће завртњева на чупање управно на влакна дрвета

Узорак	Пречник завртња d (mm)	Дубина забијања l_{ef} (mm)	Максималана сила при чупању F_{max} (kN)	Чврстоће завртња на чупање $f_{ax,90}$ (N/mm ²)
1	10	125	13,5	10,8
2	10	125	11,4	9,1
3	10	125	12,5	10
4	10	125	9,5	7,6
5	10	125	12,2	9,8
Средња вредност				9,5
Стандардна девијација				1,2
Коефицијент варијације (%)				12,7

5.3 Физичке и механичке карактеристике GFRP шипки

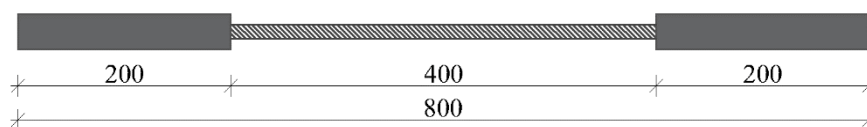
Поред завртњева, као ојачање носача са редукованом висином пресека код ослонаца употребљене су и GFRP шипке произвођача „Композит Арматура“ из Крагујевца. Ове шипке представљају полимере армиране стакленим влакнима са епоксидном матрицом, а користе се за пре свега као арматура бетонских конструкција. Запреминска маса овог композита је 1,95 - 2,10 g/cm³. Реч је монооксијалним шипкама сачињеним од влакана која се пружају само у подужном правцу. У табели 5.7 су приказане механичке карактеристике GFRP шипки дате од стране произвођача [43].

Табела 5.7 Основне механичке карактеристике GFRP арматуре (према техничком листу произвођача) [43]

Карактеристика	Вредност
Чврстоћа на затезање (граница кидања) f_t (MPa)	800
Чврстоћа на смицање f_v (MPa)	185
Модул еластичности E (GPa)	45

5.3.1 Чврстоћа GFRP шипки на затезање

Испитивање GFRP шипки на затезање извршено је према стандарду ISO 10406-1:2008 [44]. Минимални број узорака према стандарду је пет, а испитано је 8 шипки пречника $\varnothing 10$ mm, дужине 800 mm. Од укупне дужине узорака, испитивање је извршено на средњем делу дужине 400 mm, док је по 200 mm на крајевима остављено за сидрење шипки (слика 5.15). Према стандарду ISO 10406-1:2008 [44] део на коме се врши испитивање треба да буде већи од 300 mm или $40d$, где је d пречник шипке, па је усвојена дужина једнака 400 mm. Дужина сидрења је усвојена у складу са препорукама аутора рада [25] како не би дошло до извлачења шипки из чаура. Шипке су усидрене у челичне цеви, односно чауре, спољашњег пречника 26,8 mm и дебљине зидова 2,5 mm. Пре самог испитивања извршени су пробни тестови са чаурама мањег пречника, мање дебљине зида и мање дужине. Међутим, долазило је до гњечења чаура и извлачења шипки. Повезивање шипки и цеви остварено је помоћу епоксидног лепка *SikaDur-30* који се користи за повезивање шипки са дрвеним елементима, и који је примењен при експерименталним испитивањима у овом раду. Чауре су претходно очишћене од масноће и прашине и ошмирглане како би се обезбедила добра адхезија са лепком. Како би узорци били центрично постављени направљене су пластичне вођице које су држале шипке у пројектованом положају док лепак не очврсне. Након припреме, узорци су остављени да одстоје 7 дана на температури $20\pm 2^\circ\text{C}$, како би спој лепка и шипки достигао пуну чврстоћу.



Слика 5.15 Узорак за испитивање чврстоће на затезање GFRP шипки

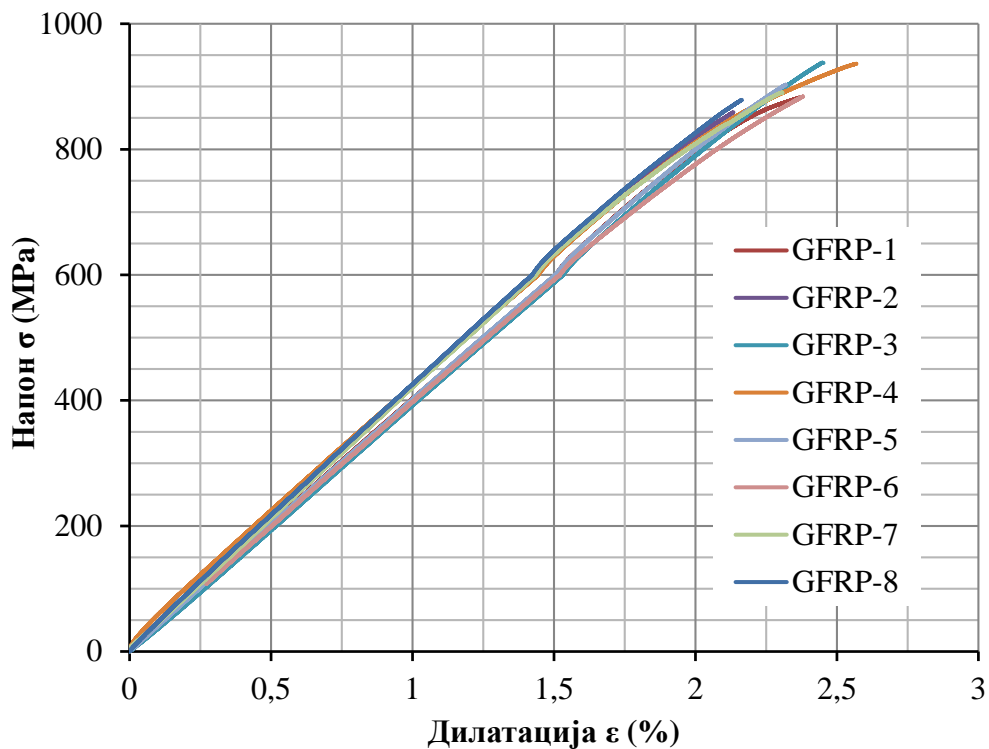
Испитивање је извршено у Лабораторији за испитивање материјала Грађевинског факултета Универзитета у Београду на универзалној тест машини *Shimadzu AG-X*, капацитета 300 kN. Димензије узорака су измерене нонијусом прецизности 0,1 mm. Узорци су постављени у алат као што је приказано на слици 5.16.



Слика 5.16 Испитивање чврстоће на затезање GFRP шипки

Правец дејстава силе затезања је био паралелан правцу стаклених влакана у шипкама. Брзина наношења оптерећења је задата преко дилатација 1 %/min до напона од 600 MPa, а након тога преко померања 6 mm/min, тако да до лома дође за мање од 5 минута, како је предвиђено стандардом. Како би се мериле дилатације, постављен је екстензометар са мерном базом од 100 mm у средњем делу дужине узорка. Као излазни подаци добијене су вредности силе, напона и дилатација.

Резултати испитивања су приказани на слици 5.17 где се са дијаграма напон - дилатација види линеарно еластично понашање узорака до лома.



Слика 5.17 Дијаграми напон - дилатација GFRP шипки

Лом шипки је наступао изненада, када су достигле вредност чврстоће на затезање. Лом је био крте природе и претежно се догађао у средњој трећини испитног дела узорка. Типични облик лома је приказан на слици 5.18. Генерално, није дошло до проклизавања шипки из челичних цеви, те се може закључити да је усвојена метода испитивања, као и дужина сидрења адекватана за одређивање затезне чврстоће овог материјала.



Слика 5.18 Типичан облик лома при испитивању чврстоће на затезање GFRP шипки

Резултати испитивања за сваки узорак су дати у табели 5.8, где су приказане вредности чврстоће на затезање, гранична дилатација и модул еластичности. Дилатација при лому је узета тако да одговара вредности чврстоће на затезање. Почетни нагиб дијаграма напон - дилатација је усвојен као модул еластичности

шипки. У складу са стандардом 10406-1:2008 [44], као референтне тачке за израчунавање модула еластичности су усвојене вредности напона у износу 20% и 50% од чврстоће на затезање шипки и дилатације које одговарају овим вредностима.

Модул еластичности је израчунат за еластичну област према изразу:

$$E_{GFRP} = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \quad (5.8)$$

где је:

E_{GFRP} – модул еластичности GFRP шипки (N/mm²);

σ_1 – напон који одговара 20% чврстоће на затезање – $0,2f_t$ (N/mm²);

σ_2 – напон који одговара 50% чврстоће на затезање – $0,5f_t$ (N/mm²);

ε_1 – дилатација измерена при напону $0,2f_t$ (%);

ε_2 – дилатација измерена при напону $0,5f_t$ (%).

Табела 5.8 Резултати испитивања чврстоће GFRP шипки на затезање

Узорак	Пречник шипке d (mm)	Чврстоћа на затезање f_t (N/mm ²)	Дилатација при лому (%)	Модул еластичности E_{GFRP} (N/mm ²)
1	10	882,4	2,37	40442
2	10	859,1	2,17	42560
3	10	937,9	2,46	39399
4	10	936,2	2,58	41687
5	10	903,0	2,55	40454
6	10	884,2	2,38	38292
7	10	890,4	2,34	41693
8	10	880,1	2,18	42573
Средња вредност		896,7	2,38	40888
Стандардна девијација		27,7	0,15	1524
Коефицијент варијације (%)		3,1	6,3	3,7

Средња вредност затезне чврстоће шипки је износила 896,7 МПа, при чему је коефицијент варијације 3,1%. Забележена средња дилатација при лому је износила 2,38%, са коефицијентом варијације од 6,3%. Средња вредност модула еластичности била је 40888 МПа, са коефицијентом варијације од 3,7%.

У табели 5.9 је дато поређење експериментално добијених вредности са оним које су дате у техничком листу произвођача. Као што се види из приказаног, добијене вредности се солидно слажу са декларисаним вредностима произвођача. Разлика од 12,1% у случају чврстоће на затезање се може објаснити чињеницом да су вредности дате од стране произвођача на страни сигурности, односно да је дата гарантована максимална чврстоћа на затезање.

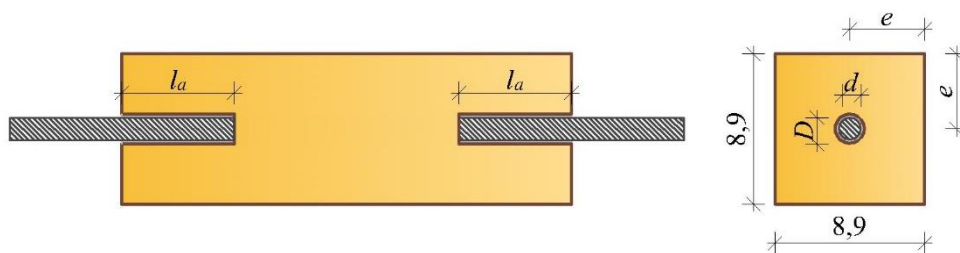
Табела 5.9 Поређење експерименталних резултата са техничким листом произвођача за GFRP шипке

	Чврстоћа на затезање f_t (N/mm ²)	Дилатација при лому (%)	Модул еластичности E_{GFRP} (N/mm ²)
Експериментални резултати	896,7	2,38	40888
Технички лист произвођача	800	2,34	45000
Разлика (%)	12,1	1,7	9,1

5.3.2 Испитивање GFRP шипки на чупање из дрвета

Спој GFRP шипки и дрвета, односно облик лома је анализиран кроз експериментално испитивање понашања шипки постављених у припремљене рупе испуњене лепком које су спровели *Zhu, Faghani* и *Tannert* [45] у свом раду. Начин лома строго зависи од примењених материјала, односно њихових механичких својстава и карактеристика везе између њих. Може се разликовати неколико облика лома споја GFRP шипки и дрвета.

У оквиру испитивања [45] коришћени су призматични лепљени ламелирани дрвени узорци димензија попречног пресека 8,9 x 8,9 cm. Пречници и дужине сидрења GFRP шипки су варирани како би се утврдио њихов утицај на понашање споја. Коришћене су шипке пречника 6,4; 9,5; 12,7; 15,9 и 19,1 mm и дужине сидрења 50, 100, 150, 200 и 250 mm. Шипке су постављене на обе стране дрвеног узорка, па је сваки од њих тестиран аксијалном силом на чупање два пута, до лома обе стране. Испитано је укупно 125 узорака, а њихова диспозиција је приказана на слици 5.19.



Слика 5.19 Диспозиција узорка за испитивање носивости споја GFRP шипки и дрвета [45]

Резултати испитивања су показали да, у зависности од дужине сидрења и ивичних растојања, може доћи до различитих облика лома који су приказани на слици 5.20. Најчешћи облик лома је било смицање по споју лепка и дрвета (112 од 125 узорака) – слика 5.20 а). Иако долази и до извлачења дела дрвеног пресека заједно са лепком и шипком, ово је знатно мање него у случају лома приказаног на слици 5.20 б), где је дошло до извлачења веће запремине дрвета. Овакав случај лома је чешћи када су примењене шипке већег пречника. Облик лома приказан на слици 5.20 в), где је дошло до појаве пукотина у дрвету, се догодио код узорака са највећим пречником шипке од 19,1 mm и најмањим ивичним растојањима. До лома GFRP шипки услед прекорачења затезне чврстоће (слика 5.20 г)) је долазило код узорака са најмањим пречником шипке од 6,4 mm и великим дужинама сидрења.



а) Смицање по равни споја лепка и дрвета



б) Смицање са извлачењем дела дрвеног пресека



в) Појава пукотина у дрвету



г) Лом GFRP шипке

Слика 5.20 Облици лома споја GFRP шипки и дрвета [45]

Понашање свих узорака је било у линеарно еластичној области до лома, који је увек био крте природе. Већа носивост споја је постигнута код већих дужина сидрења и већих пречника шипки. Зависност носивости споја од дужине сидрења је евидентна до вредности дужине сидрења од 200 mm, након тога није долазило до повећања носивости. Како је најчешћи облик лома било смицање по равни споја лепка и дрвета, може се рећи да носивост GFRP шипки на чупање највише зависи од квалитета и механичких карактеристика овог споја. Како би се избегао лом услед цепања дрвета треба водити рачуна о растојањима од ивице дрвеног пресека до GFRP шипке.

Поред приказаних облика лома, у литератури се наводе још два која се односе на достизање пластичне деформације шипке и на лом по чистом дрвеном пресеку услед прекорачења чврстоће на затезање [46]. Како се говори уопштено о шипкама од било ког материјала, а пластичне деформације у случају GFRP шипки нису могуће, лом достизањем пластификације GFRP шипки се не разматра. Лом услед прекорачења чврстоће на затезање дрвета се најчешће јавља ако је у питању напрезање управно на влакна дрвета.

5.4 Физичке и механичке карактеристике епоксидног лепка

Повезивање GFRP шипки и носача је остварено помоћу епоксидног лепка *Sikadur-30* произвођача „Сика“. *Sikadur-30* је структурни, двокомонентни, тиксотропни, епоксидни лепак без садржаја растварача, на бази комбинације епоксидних смола. Овај лепак је предвиђен за коришћење на температурама између +8°C и +35°C. *Sikadur-30* се користи за све врсте конструктивних ојачања, посебно код радова са карбонским тракама и то при лепљењу за бетон, циглу и дрво, као и за лепљење челичних плоча за бетон.

Sikadur-30 има следеће предности:

- лако се меша и наноси;
- није потребан основни слој (прајмер);
- велика отпорност на деформацију под сталним оптерећењем;
- добро приањање за бетон, зидане конструктивне елементе, камен, челик, ливено гвожђе, алуминијум, дрво;

- влажност ваздуха не утиче на очвршћавање;
- високе механичке карактеристике;
- тиксотропан: не цури код наношења на вертикалне површине и површине изнад главе (таванице);
- очвршћава без скупљања;
- компоненте су различитих боја (ради контроле мешања);
- висока почетна и крајња механичка чврстоћа;
- велика отпорност на абразију и на удар;
- не пропушта течности ни водену пару.

Лепак спреман за употребу се добија мешањем смоле (компонента А) и очвршћивача (компонента В) у тежинском односу 3:1. Техничке карактеристике лепка *Sikadur-30* дате од стране произвођача су приказане у табели 5.10.

Табела 5.10 Карактеристике лепка Sikadur-30 узете према техничком листу произвођача [47]

Карактеристика	Вредност
Густина (на 23°C)	1,65 ± 0,1 kg/l
Чврстоћа на притисак (након 7 дана, на 10°C)	70 - 80 N/mm ²
Чврстоћа на притисак (након 7 дана, на 35°C)	85 - 95 N/mm ²
Чврстоћа на смицање (након 7 дана, на 15°C)	14 - 17 N/mm ²
Чврстоћа на смицање (након 7 дана, на 35°C)	16 - 19 N/mm ²
Чврстоћа на затезање (након 7 дана, на 10°C)	24 - 27 N/mm ²
Чврстоћа на затезање (након 7 дана, на 35°C)	26 - 31 N/mm ²
Модул еластичности при притиску (након 7 дана, на 23°C)	9600 N/mm ²
Модул еластичности при затезању (након 7 дана, на 23°C)	11200 N/mm ²
Скупљање	0,04%
Коефицијент термичке експанзије (-20°C до 40°C)	2,5 x 10 ⁻⁵ 1/°C
„Радно време“ (на 20°)	90 min
„Радно време“ (на 35°)	20 min
„Отворено време“ (на 20°C)	110 min
„Отворено време“ (на 35°)	50 min

5.5 Испитивање неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца

Експериментално истраживање у оквиру овог рада се састојало из испитивања неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца. Неојачани носачи су испитани како би резултати служили за поређење са резултатима добијеним за ојачане носаче, односно да би се извршила процена ефикасности ојачања. Као ојачање су коришћене GFRP шипке и завртњевима. Носачи ојачани завртњевима су такође служили за процену ефикасности усвојене технике ојачања GFRP шипкама.

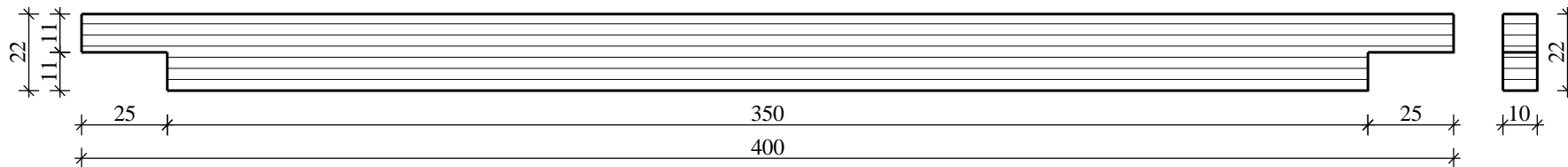
Испитано је укупно 35 носача – 5 неојачаних, 5 ојачаних завртњевима постављеним под углом од 90° у односу на подужну осу носача, 5 ојачаних завртњевима постављеним под углом од 45° у односу на подужну осу носача, 10 ојачаних GFRP шипкама постављеним под углом од 90° у односу на подужну осу носача и 10 ојачаних GFRP шипкама постављеним под углом од 45° у односу на подужну осу носача. Табела 5.11 приказује програм експерименталних испитивања, док су димензије носача, са шемама ојачања дате на сликама од 5.21 до 5.24.

Табела 5.11 Програм експерименталног испитивања

Серија	Опис	Ојачање	Број узорака
U	Неојачани носачи	/	5
R-s90	Носачи ојачани завртњевима под углом од 90°	2 x 2M10x200	5
R-s45	Носачи ојачани завртњевима под углом од 45°	2 x 2M10x250	5
R-f90	Носачи ојачани GFRP шипкама под углом од 90°	2 x 2Ø10x220	2 x 5
R-f45	Носачи ојачани GFRP шипкама под углом од 45°	2 x 2Ø10x311	2 x 5

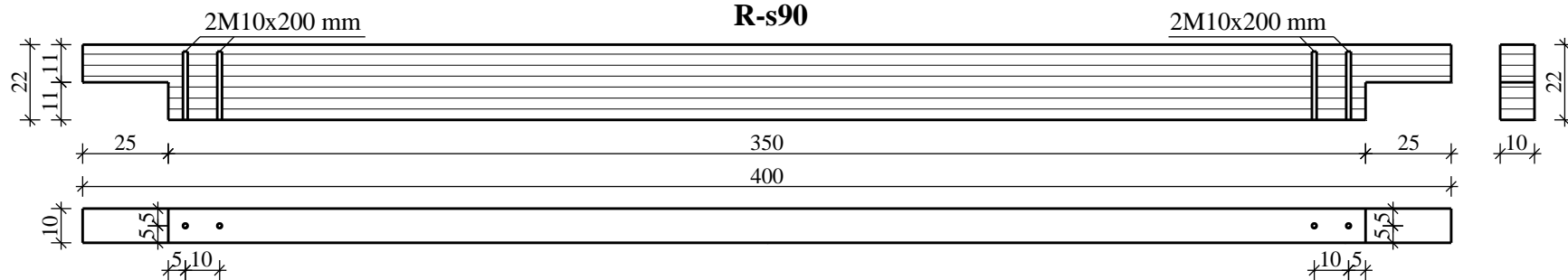
Испитивање је спроведено током септембра 2017. и фебруара 2018. године. Сви носачи су израђени, чувани и припремљени на идентичан начин.

U6 - U10

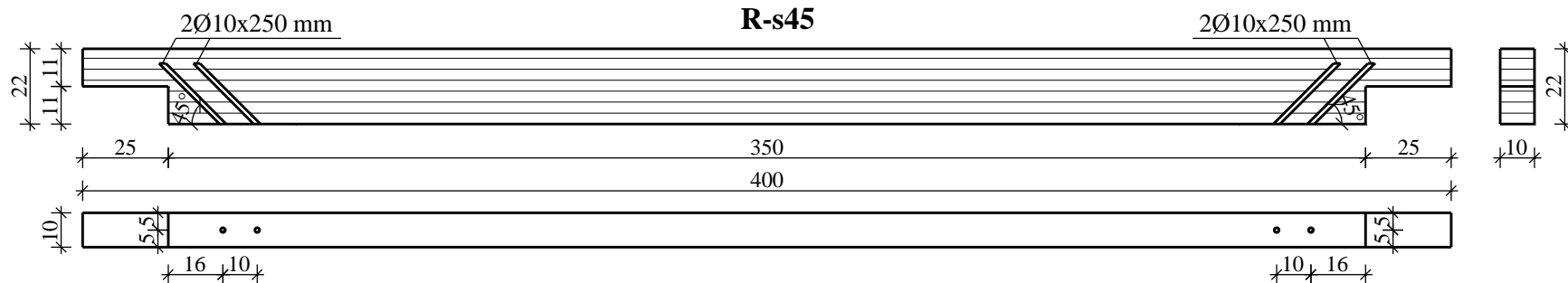


Слика 5.21 Диспозиција носача – Серија U

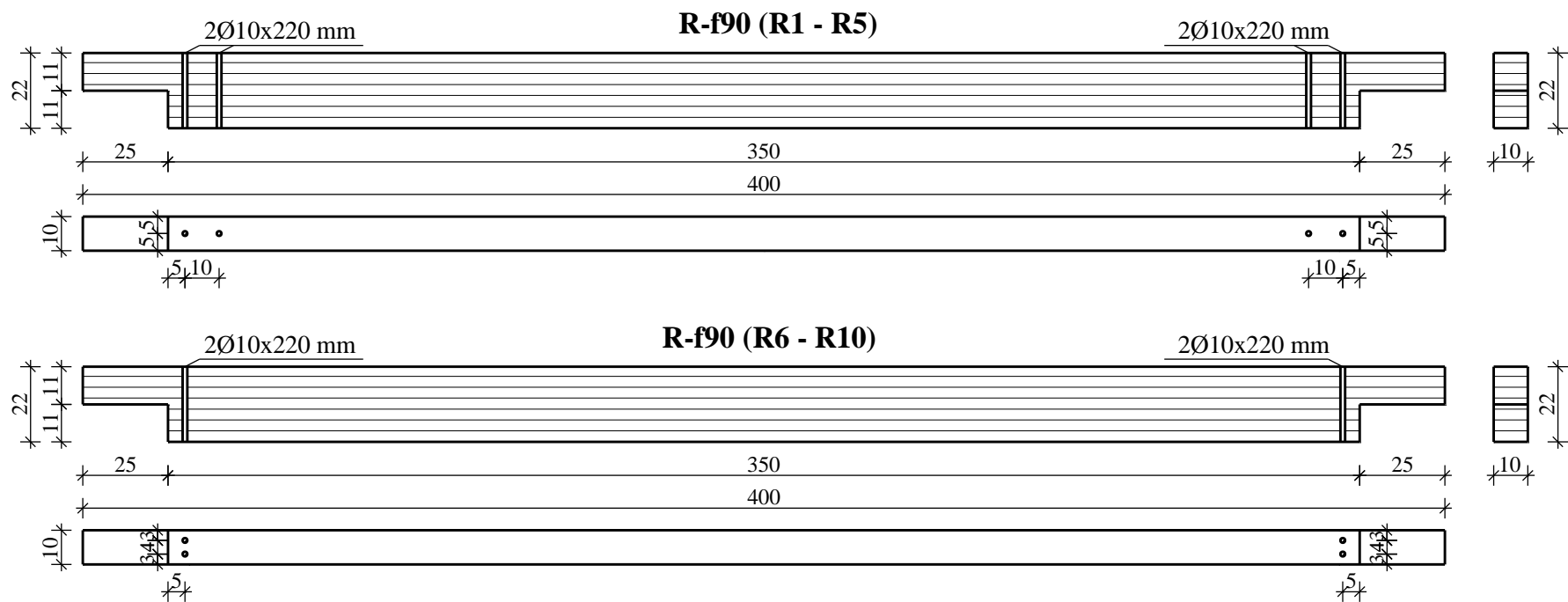
R-s90



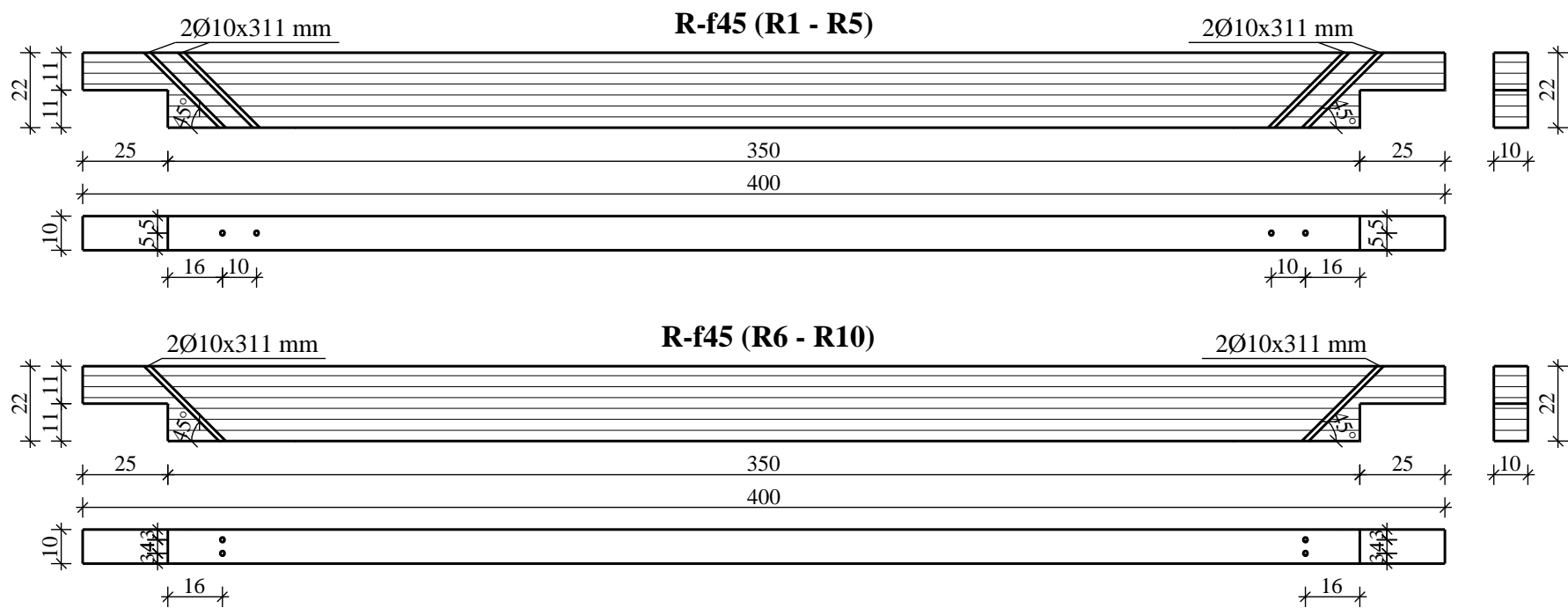
R-s45



Слика 5.22 Диспозиција носача – Серија R-s90 и Серија R-s45



Слика 5.23 Диспозиција носача – Серија R-f90



Слика 5.24 Диспозиција носача – Серија R-f45

Серија U представља неојчане носаче, чија је диспозиција приказана на слици 5.21. Серија R-s90 обухвата носаче ојчане са по два завртња код оба ослонца, постављена под углом од 90° у односу на подужну осу носача (слика 5.22). Серија R-s45 представља носаче ојчане са по два завртња код оба ослонца, постављена под углом од 45° у односу на подужну осу носача (слика 5.22). Серија R-f90 представља носаче ојчане са по две GFRP шипке код оба ослонца, постављене под углом од 90° у односу на подужну осу носача, с тим што је вариран положај шипки, као што је приказано на слици 5.23. Серија R-f45 обухвата носаче ојчане са по две GFRP шипке код оба ослонца, постављене под углом од 45° у односу на подужну осу носача, где је такође вариран положај шипки, као што је приказано на слици 5.24. Све димензије носача на сликама од 5.21 до 5.24 су дате у cm, док су димензије ојачања дате у mm.

5.5.1 Припрема и ојачање носача

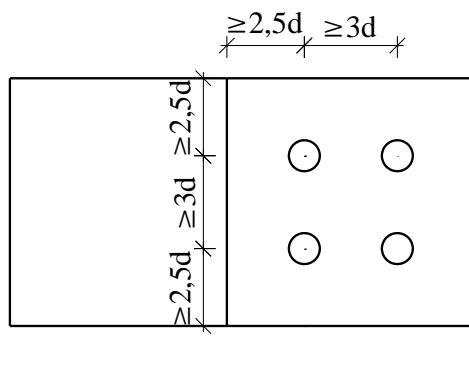
Носачи испитани у оквиру овог рада су произведени у фабрици „Пирамида“ у Сремској Митровици, док је процес ојачања носача извршен на Грађевинском факултету Универзитета у Београду.

Тестирани носачи су израђени од дрвета смреке, које је узето са истог подручја, како би карактеристике дрвета које зависе од услова раста биле идентичне. У фабричким условима, пристигла дрвена грађа је сушена до достизања процента влажности од 18%, како би након тога била кондиционирана три месеца на температури од $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ и релативној влажности ваздуха од $RH = 65 \pm 5\%$. Након овог периода измерени садржај влаге је износио 12%.

Укупна дужина свих носача је била 4 m, а попречни пресек 10 x 22 cm, те је испуњен услов да је дужина носача око 18 пута већа од висине попречног пресека, како је дефинисано у стандарду EN 408 [38], према коме је вршено испитивање. На крајевима носача висина је редукована на пола, па је висина овог дела била 11 cm, а дужина редукованог дела пресека 25 cm. Коефицијент α , који представља однос редуковане висине $h_{ef} = 11$ cm и пуне висине носача $h = 22$ cm, износи $\alpha = 0,5$. Носачи су формиран од 7 ламела ширине 10 cm и дебљине 32 mm. Последње ламеле са горње и доње стране носача су обрађене на дебљину од 30 mm како би висина носача била 22 cm. Ламеле нису имале попречне наставке, већ су све биле

из комада, како би се избегао утицај ових наставака на резултате експеримента. У зонама највећих напона су претежно стављене ламеле бољег квалитета да би се избегао утицај дефеката дрвета на носивост носача. Ламеле су међусобно спојене фенол-резорцин лепком. Спајање је извршено под притиском од 0,5 - 0,8 МПа током 12h, на температури од око 20°C.

Рупе за средства за ојачање су избушене у фабрици у складу са датим диспозицијама на сликама 5.21 до 5.24. Рупе за завртњеве М10 су усвојене пречника $\varnothing 8$, пошто је у Еврокоду 5 [7] препорука да претходно избушена рупа буде 70% пречника завртња, док је у СРПС-у [9] препорука да претходно избушена рупа буде 90% пречника завртња. Рупе за GFRP шипке су биле пречника $\varnothing 14$ како би остало довољно простора за остваривање слоја лепка дебљине 2 mm, чиме је била обезбеђена адхезија између шипки и лепка, као и лепка и дрвета. Усвојена минимална ивична и међусобна растојања средстава за ојачање су у складу са препорукама датим у [48] које се позивају на Еврокод 5 [7] и Немачки национални анекс Еврокода 5 [8] (слика 5.25).



Слика 5.25 Минимална растојања средстава за ојачање [48]

Након што су допремљени из фабрике, носачи су пре испитивања чувани у контролисаним условима на температури $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ и при релативној влажности ваздуха од $RH = 45 \pm 5\%$ у Лабораторији за испитивање конструкција, на Грађевинском факултету Универзитета у Београду. На слици 5.26 су приказани носачи пре уградње ојачања и пре испитивања.

Пре постављања завртњева и GFRP шипки рупе су пажљиво припремљене тако да буду чисте и суве, како би се остварила правилна и потпуна веза између дрвета и ојачања (слика 5.27). Чишћење рупа је извршено продувавањем помоћу ваздушног млаза.



Слика 5.26 Носачи пре ојачања и испитивања

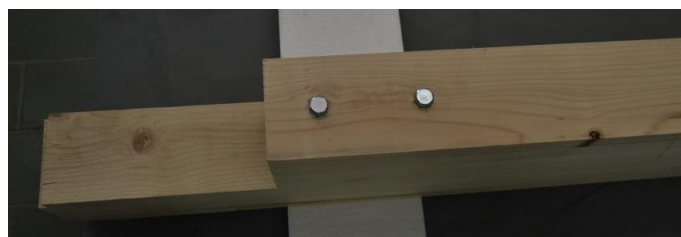


Слика 5.27 Узорак са рупама за завртњеве

Завртњеве су постављени ручно помоћу момент кључа, при чему се водило рачуна о томе да се држи правац рупе и да не дође до појаве пукотина у току ове процедуре (слика 5.28). На слици 5.29 је приказан крај носача након завршене процедуре уградње завртњева.



Слика 5.28 Постављање завртњева



Слика 5.29 Носач са уграђеним завртњевима

GFRP шипке су исечене на потребну дужину од 22 cm за носаче са ојачањем постављеним управно на подужну осу носача и на дужину од 31 cm за носаче са ојачањем под углом од 45° у односу на подужну осу носача. При постављању GFRP арматуре носачи су заштићени око рупа у случају да дође до процуривања лепка (слика 5.30).



Слика 5.30 Припрема рупа за постављање GFRP шипки

Као што је већ поменуто, лепак који је коришћен за постављање шипки унутар пресека носача је био епоксидни лепак *Sikadur-30* произвођача „Сика“. Пошто се ради о двокомпонентном лепку, његове компоненте А и В су помешане у тежинском односу 3:1, како је наведено у техничком листу произвођача. Након тога је извршено мешање у трајању од 3 минута, док материјал није постао гладак и једнообразне сиве боје. У складу са препоруком произвођача, ова мешавина је затим пресута у чисту и суву посуду и мешана 1 минут малом брзином како би се избегао улазак ваздуха. Отворено време лепка на температури од око 20°C је 90 минута, па се водило рачуна да увек буде измешана само она количина која се може употребити у предвиђеном року. Припрема лепка је приказана на слици 5.31.



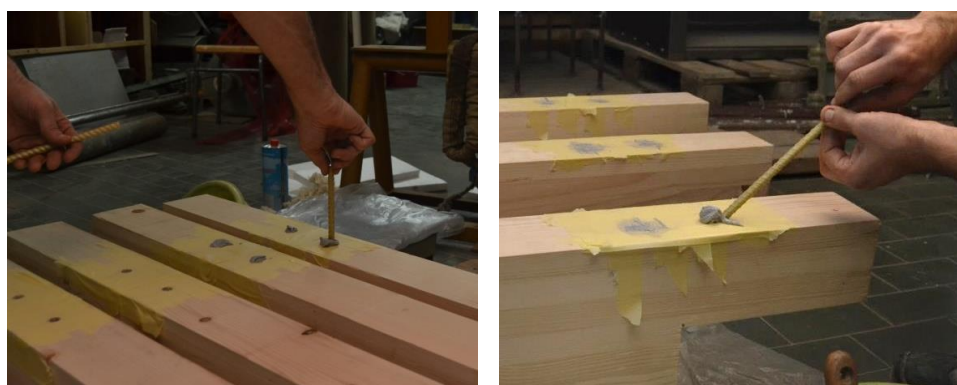
Слика 5.31 Припрема лепка

За потребе испуњавања рупа *Sikadur-30* епоксидним лепком коришћене су празне тубе за силикон - картуше, које су након завршеног процеса мешања напуњене лепком до врха. На картуше је постављено PVC цево како би се обезбедило уједначено и потпуно испуњавање рупа. Користећи пиштољ за силикон, епоксидни лепак је утиснут до отприлике $2/3$ висине припремљених рупа, као што је приказано на слици 5.32. Након тога су шипке постављене у најкраћем могућем року, пре почетка очвршћавања лепка.



Слика 5.32 Испуњавање рупа епоксидним лепком

GFRP шипке су постављене у пројектовани положај лаганим увртањем, тако да је вишак лепка истиснут из рупе и уклоњен шпаклом. Процедура постављања правих и косих шипки је приказана на слици 5.33. По завршетку процеса, ојачани носачи су остављени да одстоје 7 дана на температури од $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ да би лепак постигао своју пуну чврстоћу (слика 5.34).



Слика 5.33 Постављање GFRP шипки



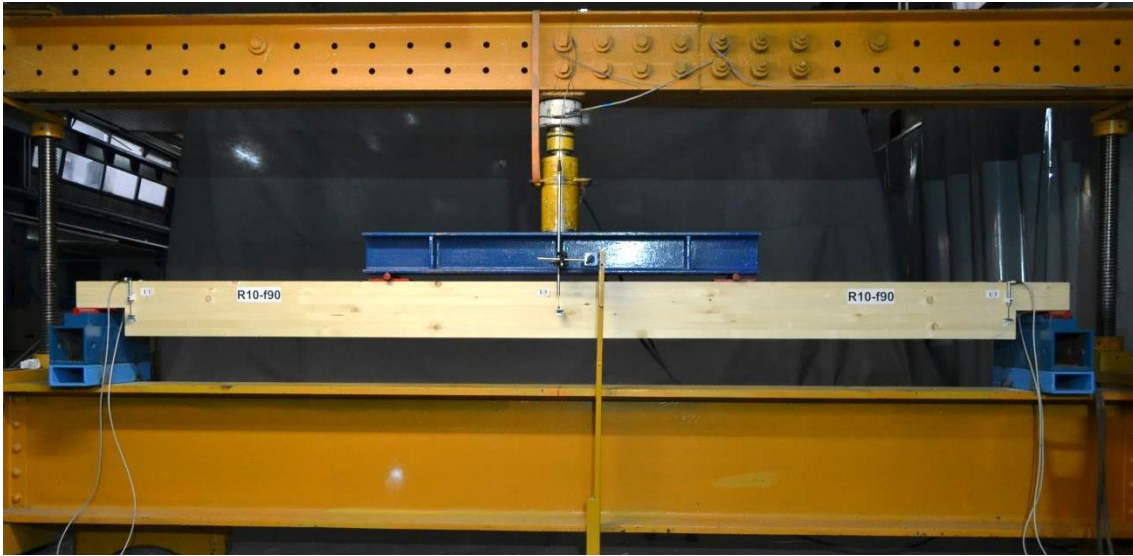
Слика 5.34 Носачи са уграђеним GFRP шипкама

5.5.2 Експериментално испитивање носача

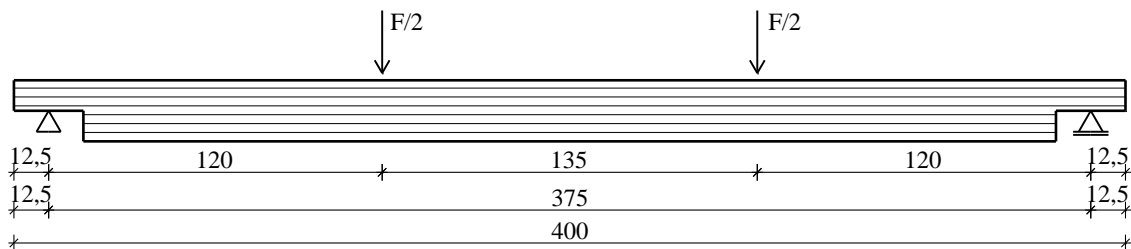
Експериментално испитивање је извршено у Лабораторији за испитивање конструкција, на Грађевинском факултету Универзитета у Београду. Сви носачи су испитани као просте греде распона 375 cm, што одговара препоруци стандарда EN 408 [38] да распон носача буде $18h \pm 3h$, где је h висина попречног пресека носача. У овом случају је распон носача био једнак $17h$. Носачи су оптерећени приближно у трећинама распона, такође у складу са стандардом EN 408 [38]. При томе се водило рачуна да растојање између концентрисаних сила буде $6h$, што је приближно 135 cm у случају овог испитивања.

Ослонци су постављени на 12,5 cm од крајева носача, тј. у средини дужине редукованог дела пресека. Коефицијент β , којим се дефинише зависност пуне висине носача $h = 22$ cm и дужине редукованог дела пресека до ослонца $\beta h = 12,5$ cm, износи $\beta = 0,568$.

Испитивање је извршено у челичном раму како је приказано на слици 5.35. Диспозиција експерименталног испитивања на савијање неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонца представљена је на слици 5.36.

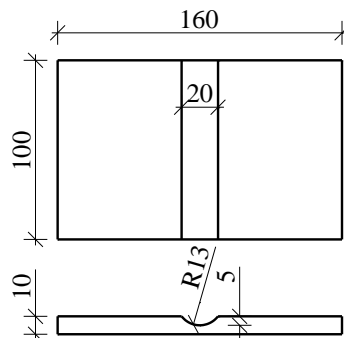


Слика 5.35 Носач постављен у рам за испитивање



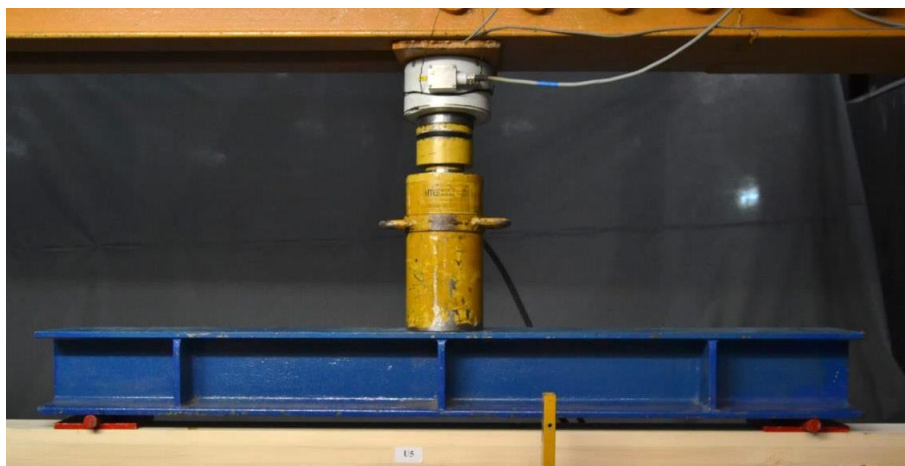
Слика 5.36 Диспозиција експерименталног испитивања носача

Оптерећење је нането преко хидрауличке пресе капацитета 350 kN, које је затим разложено са једне у две концентрисане силе помоћу челичног профила НЕВ 160. Како би се обезбедило концентрисано оптерећење постављена су два челична лежаја пречника 26 mm, дужине 200 mm. На местима уношења силе на носач су стављене две челичне плочице димензија 10 x 100 x 160 mm, са удубљењем у средини за поменуте челичне лежајеве (слика 5.37). Ове плочице имају улогу да спрече локална оштећења дрвених носача услед концентрације напона на местима уношења силе.



Слика 5.37 Димензије плочица на местима уношења оптерећења

Изглед пресе, челичног профила, лежајева и челичних плочица приказан је на слици 5.38. При анализи резултата експерименталних испитивања, оптерећење од сопствене тежине пресе и челичног профила додато је мереном оптерећењу у износу од 1,3 kN.



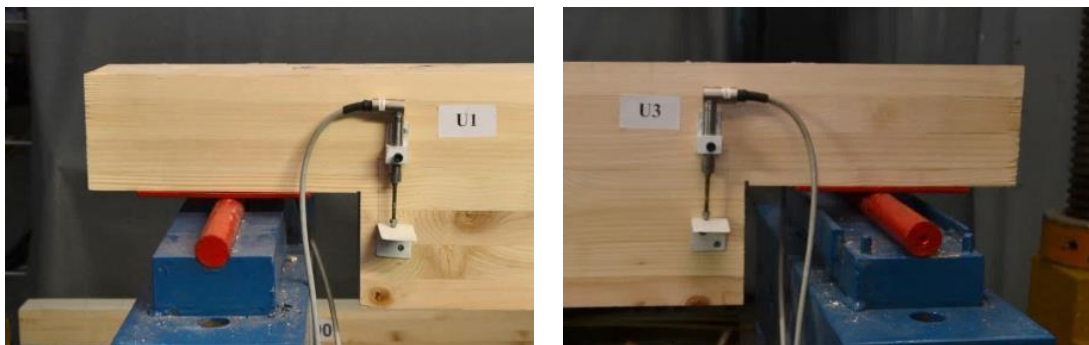
Слика 5.38 Елементи за наношење оптерећења

Ради утврђивања глобалне крутости носача при савијању потребно је нанети оптерећење максимално до 40% од силе при којој долази до лома, према EN 408 [38]. За неојачане носаче је усвојено да то буде 5 kN, док су ојачани носачи оптерећени до 10 kN. Након тога су носачи растерећени, да би се приступило испитивању на савијање. Брзина наношења оптерећења при испитивању носача на савијање до лома је усвојена 4 kN/min, како би до лома неојачаних носача дошло за максимално 5 минута. Иста брзина наношења оптерећења је задржана и код носача који су ојачани завртњевима и GFRP шипкама да би добијени резултати били упоредиви са резултатима неојачаних носача. У случају ојачаних носача до лома је долазило за 8 - 12 минута.

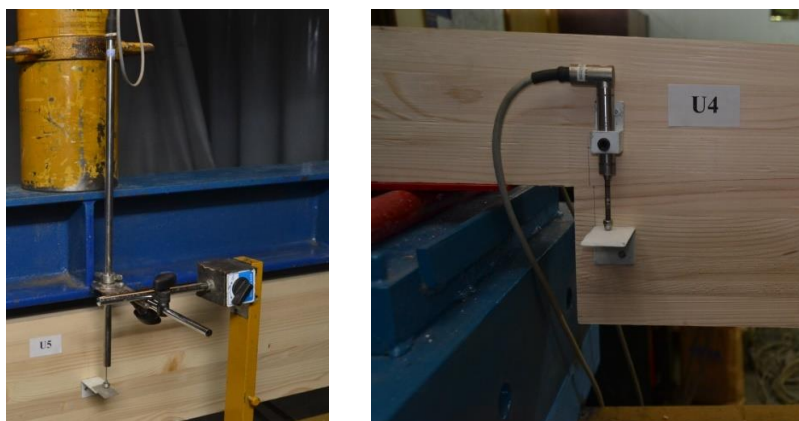
Ослањање носача је обезбеђено помоћу челичних лежајева пречника 28 mm и дужине 350 mm. На местима ослонаца су на дрвене носаче постављене челичне плочице димензија 5 x 100 x 160 mm, које имају улогу да спрече локална оштећења дрвета услед утискивања лежајева. Ослоначки детаљи испитаних носача су приказани на слици 5.39.

При експерименталном испитивању, сила је мерена помоћу дозне *HBM С6А* носивости 2 MN и тачности 0,05 kN. Угиб у средини носача је мерен угибомером *HBM 1-WA/200mm-L* са ходом $\pm 100\text{mm}$ и тачношћу од 0,01 mm. Размицање тачака

на местима редуције висине пресека (засека), где је долазило до отварања пукотина, мерено је обострано са по два угибомера код оба ослонаца. Дакле, на местима засека су коришћена четири угибомера *HBM 1-WA/20mm-L* са ходом ± 10 mm и тачношћу од 0,01 mm. Мерна база угибомера за размицање тачака је била 60 mm. На слици 5.40 су приказани угибомери постављени у средини и на местима редуције висине пресека.



Слика 5.39 Ослоначки детаљи – покретан и непокретан ослонац



Слика 5.40 Угибомер у средини и угибомер на месту засека

Подаци мерења деформација са угибомера и нанетог оптерећења са дозне су прикупљени помоћу аквизиционог система (*HBM MGC*), са фреквенцијом од 1 Hz.

5.5.3 Влажност дрвета

Влажност дрвета од којих су израђени носачи у овом испитивању је одређена помоћу влагомера *Gann Hydromette HTR 300*, са одговарајућим електродама за дрво (слика 5.41). Сви носачи су пре испитивања чувани на температури од $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и релативној влажности ваздуха од $45 \pm 5\%$.



Слика 5.41 Одређивање процента влажности дрвета влагомером

Процент влажности дрвета је утврђен на носачима који су испитани на савијање до лома, тако што је на сваком од узорака измерена влажност на произвољно изабрана четири места, а затим је одређена средња вредност. Резултати су приказани у табели 5.12. Измерена средња вредност за све узорке је износила 11,5%, са коефицијентом варијације 3,4%.

Табела 5.12 Резултати мерења процента влажности дрвета

Носач	Процент влажности (%)				
	Мерно место 1	Мерно место 2	Мерно место 3	Мерно место 4	Средња вредност
U6	11,2	11,5	11,7	12,3	11,7
U7	10,2	10,5	10,2	10,3	10,3
U8	10	11,2	11,6	11,2	11,0
U9	11,8	12	11,8	11,9	11,9
U10	11,6	11,2	11,9	11,5	11,6
R1-s90	11	11,2	11,1	10,9	11,1
R2-s90	10,7	11,1	11	10,8	10,9
R3-s90	10,8	11	11,2	10,9	11,0
R4-s90	11,2	11,5	11,6	11,3	11,4
R5-s90	10,9	11,2	11,5	10,8	11,1
R1-s45	11,4	11,6	11,6	11,3	11,5
R2-s45	10,8	11,5	11,7	10,7	11,2
R3-s45	11,4	11,6	11,6	11,3	11,5

Наставак табеле 5.12

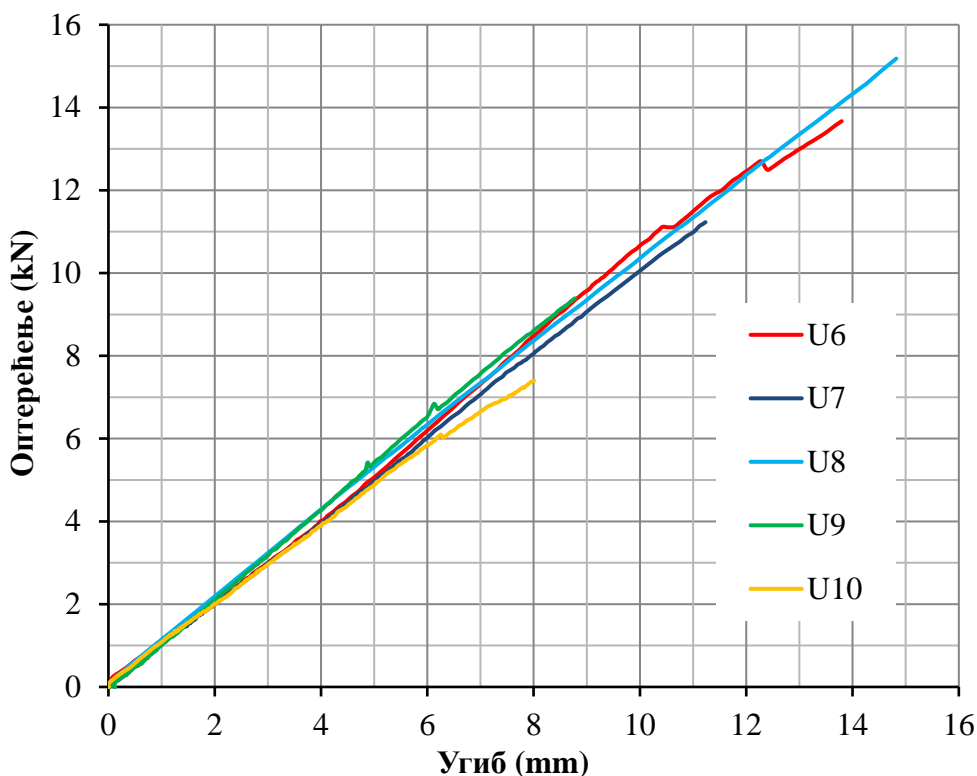
R4-s45	11,3	11,8	11,7	11,3	11,5
R5-s45	11,2	11,7	11,6	11,5	11,5
R1-f90	11,4	12	12,1	11,3	11,7
R2-f90	11,2	11,8	11,6	11,3	11,5
R3-f90	12,1	12,2	12,4	12	12,2
R4-f90	11,8	12	12,1	11,7	11,9
R5-f90	12	11,1	12,4	12,1	11,9
R6-f90	11,6	11,2	11,3	11,2	11,3
R7-f90	11,4	11,9	11,6	11,3	11,6
R8-f90	12	11,7	11,6	11,2	11,6
R9-f90	11,2	11,4	11,6	11,3	11,4
R10-f90	11,7	10,9	11,8	11,2	11,4
R1-f45	11,2	12,5	11,5	12,1	11,8
R2-f45	12,1	11,3	12	11,8	11,8
R3-f45	12	12,2	11,9	11,7	12,0
R4-f45	11,9	12,2	11,9	11,5	11,9
R5-f45	11,6	11,8	12	11,5	11,7
R6-f45	11,4	11,7	12,3	12	11,9
R7-f45	11,5	12,1	11,8	11,2	11,7
R8-f45	11,8	12	12,4	11,7	12,0
R9-f45	11,7	12,5	12,3	11,9	12,1
R10-f45	11,9	12,1	11,7	11,6	11,8
Средња вредност					11,5
Стандардна девијација					0,4
Коефицијент варијације (%)					3,4

6 АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА

6.1 Механичко понашање неојачаних носача – Серија U

6.1.1 Дијаграми оптерећење - угиб и облик лома

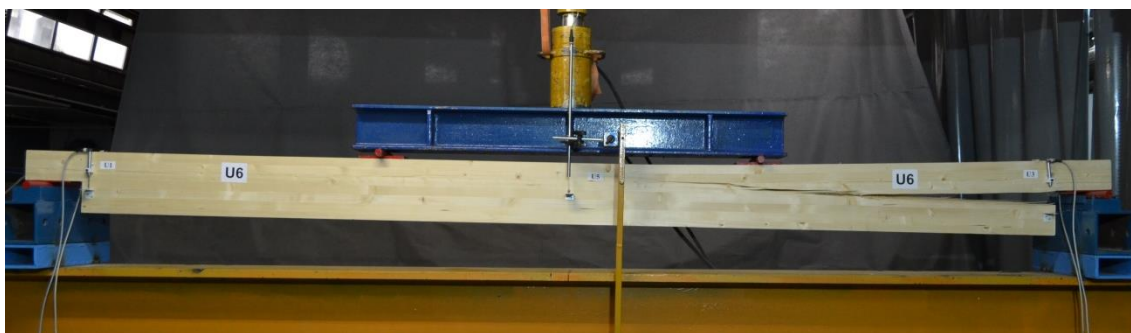
Неојачани носачи су показали линеарно еластично понашање до лома, као што се види са дијаграма оптерећење - угиб приказаних на слици 6.1. Лом је био крте природе и наступио је нагло, без претходних упозорења.



Слика 6.1 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију U

До лома неојачаних носача је дошло услед прекорачења чврстоће на затезање управно на влакна на местима редукције висине пресека (слика 6.2). Облик лома I је доминантан лом код неојачаних носача, јер је дошло до отварања пукотине као последица затезања управно на влакна (слика 6.3).

Након отварања пукотине код свих носача ове серије дошло је до њеног неконтролисаног раста, скоро до половине носача, чиме је он подељен на два дела – горњи и доњи. Такође, примећено је незнатано смицање у равни на споју горњег и доњег дела носача. Путања пукотине је углавном била праволинијска, а површине пукотине равне (слика 6.3). У неким случајевима је пукотина мењала правац на местима дефеката у дрвету, попут постојећих кврга (слика 6.4). Ни у једном случају није дошло до отварања пукотина не месту споја две ламеле, што говори о добром квалитету произведених носача.



Слика 6.2 Карактеристичан лом неојачаних носача – Серија U, носач U6

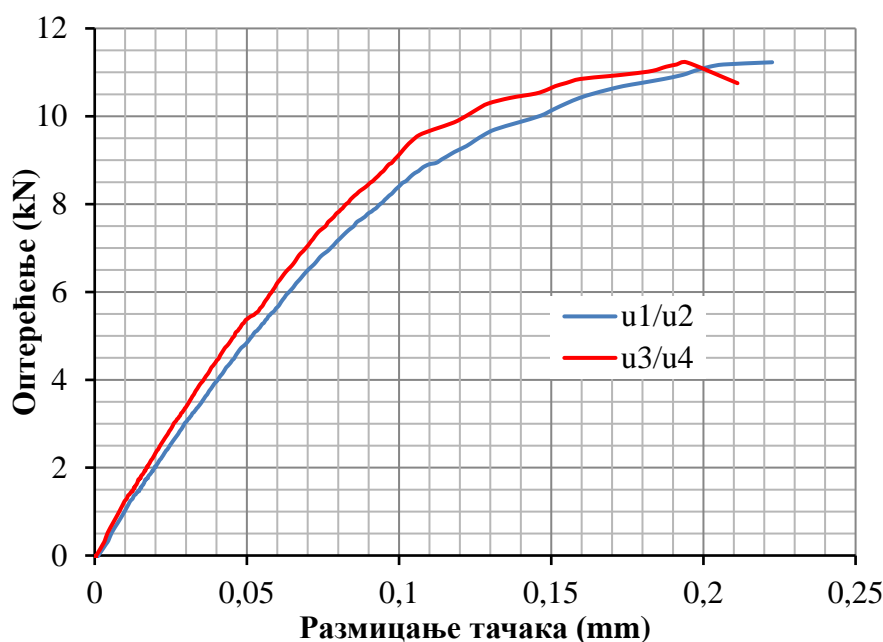


Слика 6.3 Облик лома I и путања пукотине – Серија U, носач U9



Слика 6.4 Промена правца пукотине на месту дефекта грађе дрвета – Серија U, носач U7

Пре коначног лома, примећено је незнатно отварање пукотина на местима редуције висине пресека. Ово иницијално отварање пукотина је мерено као размицање тачака помоћу угибомера постављених у близини ослонаца, са обе стране носача, као што је објашњено у поглављу 5.5.2. Измерено је размицање тачака од максимално 0,2 mm, симетрично са обе стране носача, пре нагло неконтролисаног отварања пукотине на једној страни и лома носача. Карактеристичан дијаграм оптерећење – размицање тачака са осредњеним вредностима очитаним са угибомера приказан је на слици 6.5.



Слика 6.5 Дијаграм оптерећење - размицање тачака код ослонаца за Серију U, носач U7

6.1.2 Носивост, деформабилност и крутост носача

Оптерећење при лому, угиб у средини носача при лому и апроксимативна крутост на савијање добијени експерименталним испитивањем неојачаних носача Серије U приказани су у табели 6.1. Вредности оптерећења и угиба су очитани из прикупљених експерименталних резултата. Крутост је срачуната на основу нагиба криве оптерећење - угиб, за област између $0,1F_{max}$ и $0,4F_{max}$ где је понашање носача линерано еластично, а F_{max} представља максимално оптерећење, односно оптерећење при лому носача. Користећи познати израз за угиб у средини носача статичког система прости греде симетрично оптерећеног двама концентрисаним силама, апроксимативна крутост на савијање се рачуна према изразу:

$$EI = \frac{1}{48} \cdot \frac{\Delta F (3l^2 - 4c^2)c}{\Delta w} \quad (6.1)$$

где је:

EI – апроксимативна крутост на савијање (Nmm^2);

$\Delta F = F_2 - F_1$;

F_1 – сила која одговара 10% максималне силе – $0,1F_{max}$ (N);

F_2 – сила која одговара 40% максималне силе – $0,4F_{max}$ (N);

$\Delta w = w_2 - w_1$;

w_1 – угиб у средини узорка, измерен за силу F_1 (mm);

w_2 – угиб у средини узорка, измерен за силу F_2 (mm);

l – размак између ослонаца (mm);

c – растојање од ослонаца до места наношења силе (mm).

Табела 6.1 Експериментални резултати испитивања Серије U

Носач	Максимална сила F_{max} (kN)	Угиб у средини при максималној сили w (mm)	Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ kNmm ²)
U6	15,0	13,8	9,03
U7	12,7	12,1	8,85
U8	16,7	15,1	9,55
U9	10,7	8,8	9,91
U10	8,7	8,0	8,60
Средња вредност	12,8	11,5	9,19
Стандардна девијација	3,2	3,1	0,53
Коефицијент варијације (%)	25,2	26,6	5,8

Средња вредност максималног оптерећења у случају неојачних носача износила је 12,8 kN. Овако мало гранично оптерећење је последица присуства редукције висине пресека код ослонаца, која доводи до знатног смањења капацитета носивости носача. Изузетно велики коефицијент варијације од 25,2% је последица како варијабилности карактеристика дрвета као материјала, тако и

непредвидивости лома услед отварања пукотине. Код носача израђених од дрвета је ова вредност коефицијента варијације очекивана, поготову у случају лома услед напрезања управно на влакна које се јавља у оваквим случајевима.

Средња вредност угиба у средини при максималној сили износила је 11,5 mm, са коефицијентом варијације од 26,6%. Резултати мерења угиба су у линеарној зависности са резултатима максималног оптерећења, с обзиром да су неојачани носачи остали у линеарно еластичној области понашања.

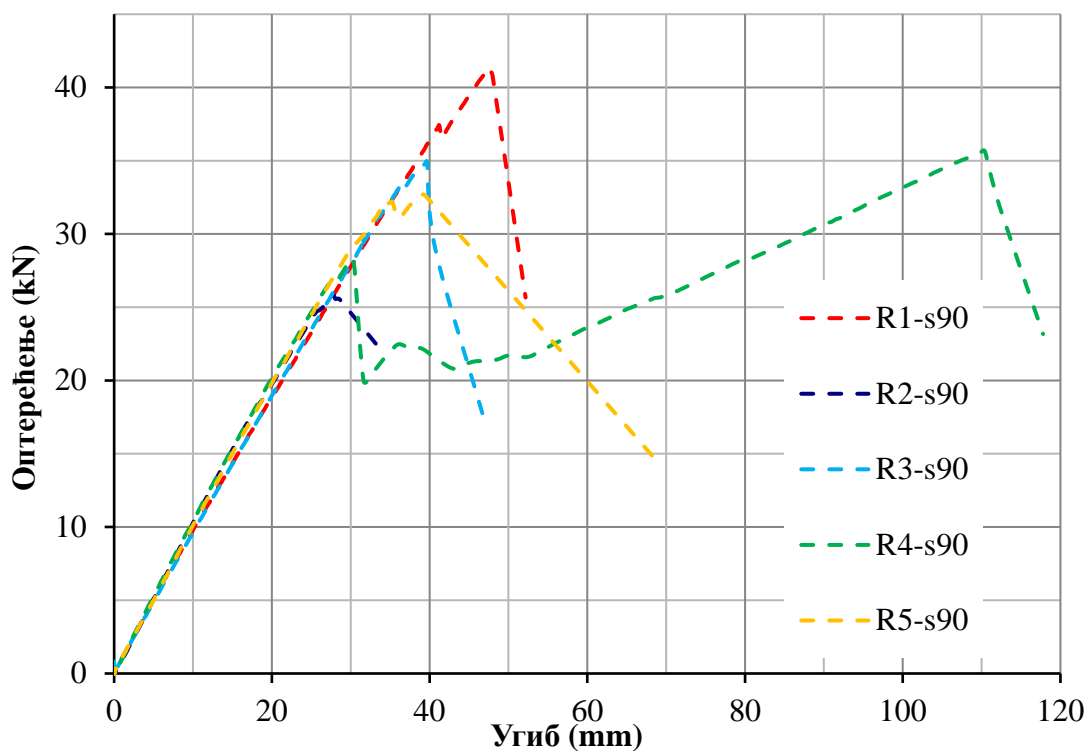
Средња вредност крутости носача Серије U је износила $9,19 \times 10^8$ kNmm². Коефицијент варијације у случају крутости је знатно мањи него у случају оптерећења и угиба и износи 5,8%. Ово је очекивано с обзиром да су сви носачи израђени од ламела исте класе чврстоће дрвета.

6.2 Механичко понашање носача ојачаних завртњевима – Серије R-s90 и R-s45

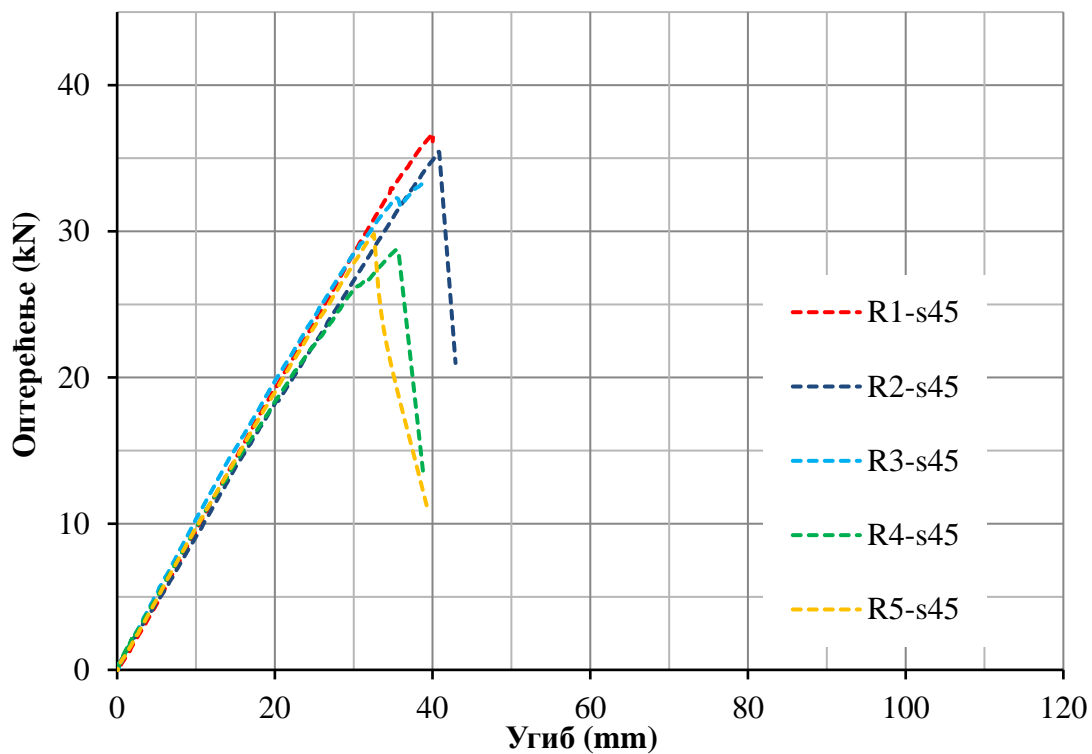
6.2.1 Дијаграми оптерећење - угиб и облик лома

Носачи са редукованом висином пресека ојачани завртњевима (Серија R-s) су у суштини имали линеарно понашање до лома, као што се види са дијаграма оптерећење - угиб приказаних на слици 6.6 за Серију R-s90 (по два вертикално постављена завртња код оба ослонца) и слици 6.7 за Серију R-s45 (по два косо постављена завртња код оба ослонца).

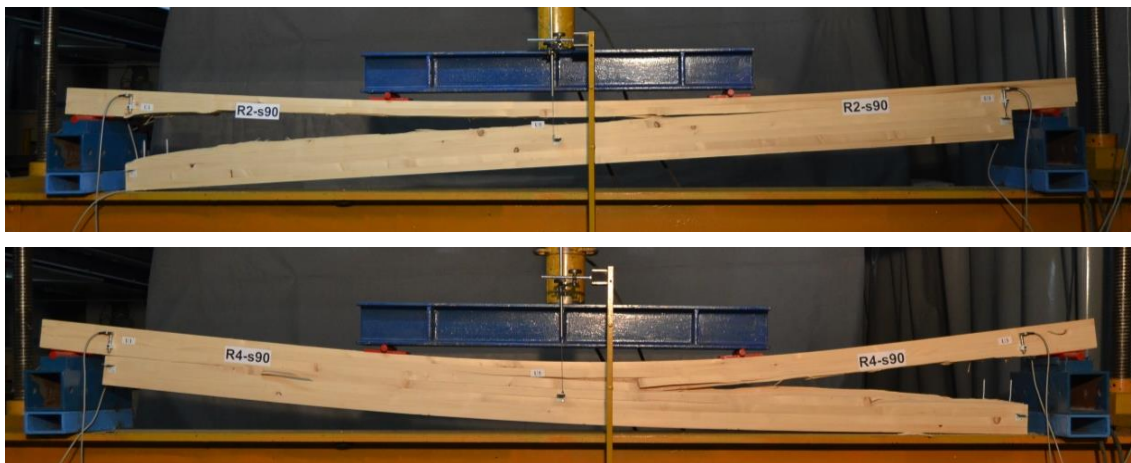
Девет од десет носача ојачаних завртњевима је имало крти лом. Један од носача (R4-s90) је имао пад носивости, али је наставио да носи оптерећење до лома. Иако је гранично оптерећење повећано у односу на неојачане носаче Серије U, ојачање није било довољно да се промени облик лома из комбинованог (услед затезања управно на влакна и смицања) у лом услед савијања. Слика 6.8 приказује карактеристичан лом носача ојачаних вертикалним завртњевима – Серија R-s90, док је на слици 6.9 илустрован карактеристичан лом носача ојачаних косим завртњевима – Серија R-s45. Обе серије носача ојачаних завртњевима су генерално показале исто механичко понашање при испитивању на савијање до лома.



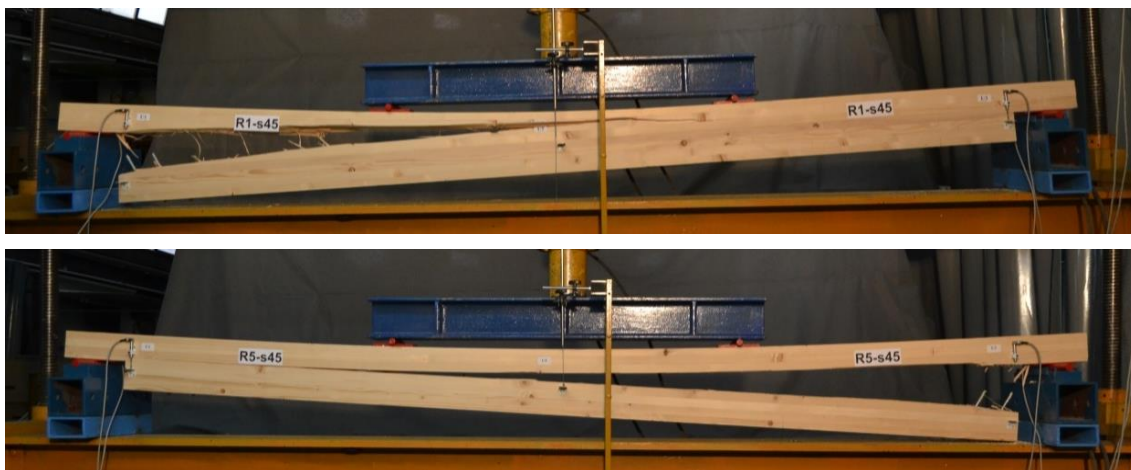
Слика 6.6 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-s90



Слика 6.7 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-s45



*Слика 6.8 Карактеристичан лом носача ојачаних вертикалним завртњевима –
Серија R-s90, носачи R2-s90 и R4-s90*



*Слика 6.9 Карактеристичан лом носача ојачаних косим завртњевима –
Серија R-s45, носачи R1-s45 и R5-s45*

Упркос интервенцији ојачања, појава пукотина на месту нагле промене висине пресека се не може спречити (слика 6.10). Може се видети да је иницирање пукотина започело на релативно ниским вредностима оптерећења. Ово се може објаснити веома малим капацитетом деформације дрвета при затезању управно на влакна. Прекомерно отварање пукотина је ограничено ојачањем. Са даљим порастом оптерећења, стабилан раст пукотине праћен је смицањем у њеној равни. При лому је дошло до нестабилног раста пукотине и пораста напона смицања у равни пукотине (слика 6.11). Може се констатовати да је смицање доминантан механизам лома. У највећем броју случајева, дошло је до одвајања носача на два дела и чупања завртњева из горњег дела пресека. На слици 6.12 а) је приказано чупање вертикално постављених завртњева, док је на слици 6.12 б)

приказано извлачење косо постављених завртњева. Само код носача R1-s90, није дошло до чупања ојачања, али је свакако губитак носивости наступио због прекорачења чврстоће на смицање у равни пукотине, односно услед нестабилног раста пукотине.



Слика 6.10 Иницирање пукотине на месту нагле промене висине код носача ојачаних завртњевима, носач R3-s90



Слика 6.11 Нестабилан раст пукотине код носача ојачаних завртњевима, носач R2-s90



а) Чупање вертикално постављених завртњева, носач R2-s90



б) Чупање косо постављених завртњева, носач R3-s45

Слика 6.12 Чупање завртњева – Серија R-s

Као и у случају неојачаних носача, пукотина је мењала правац на местима дефеката у дрвету, попут постојећих кврга (слика 6.13). Такође, ни у једном случају није дошло до иницирања пукотина на месту споја две ламеле.



Слика 6.13 Промена правца пукотине на месту дефекта грађе дрвета – Серија R-s, носач R4-s90

На завртњевима су постојале јасне пластичне деформације које указују на то да је формиран пластични зглоб у подручју лома у случају носача Серије R-s90 и Серије R-s45. Слика 6.14 а) приказује деформисане вертикално постављене завртњеви након испитивања, док су на слици 6.14 б) приказани деформисани косо постављени завртњеви након испитивања.



а) Деформисани вертикално постављени завртњеви



б) Деформисани косо постављени завртњеви

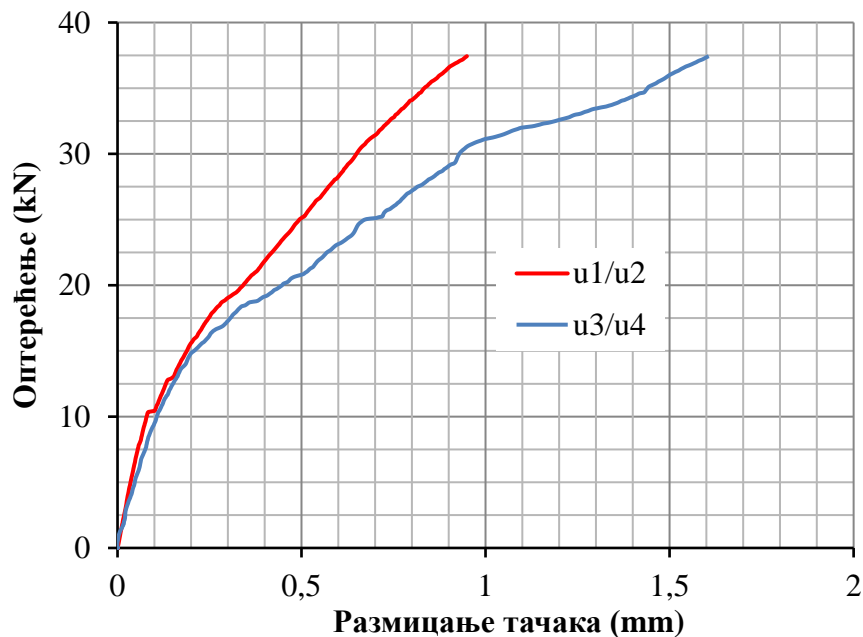
Слика 6.14 Деформисни завртњеви након лома – Серија R-s

Вертикално постављени завртњеви су оптерећени на комбиновано напрезање паралелно и управно на раван смицања. Мотивација за постављање завртњева под углом је била идеја да они буду аксијално оптерећени (на затезање), у правцу у коме показују највећу крутост. Због тога се очекивало да носачи Серије R-s45 имају много већу носивост, али због недовољне дубине забијања завртњева, лом се

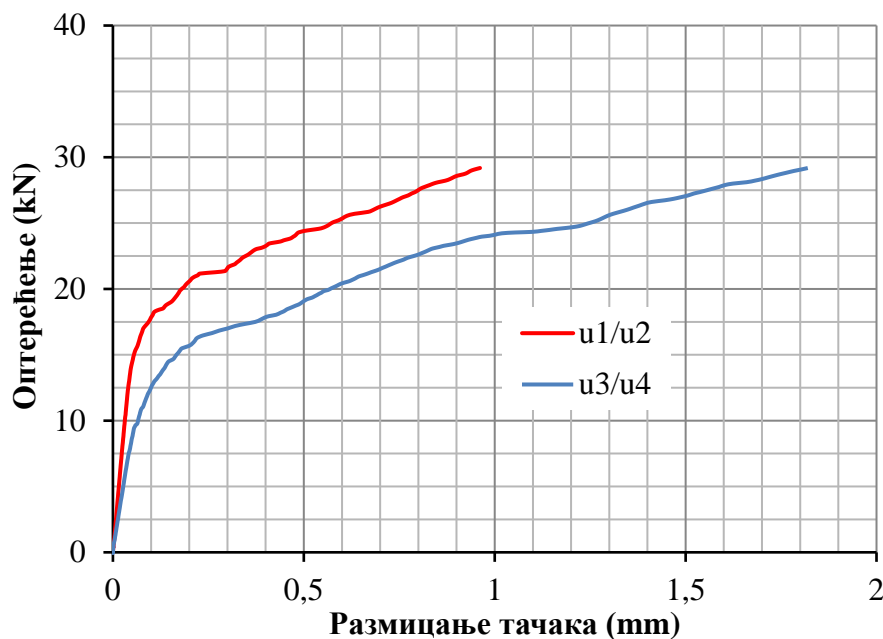
догодио раније него у случају носача Серије R-s90. Пошто традиционални завртњеве захтевају претходно избушене рупе за уградњу, бољи резултати у случају ојачања и санације дрвених конструкција могу бити постигнути помоћу самоуграђујућих завртњева.

Као и код неојачаних носача Серије U, иницијално отварање пукотина носача ојачаних завртњевима је мерено као размицање тачака помоћу угибомера постављених на месту нагле промене висине, са обе стране носача. Карактеристични дијаграми оптерећење – размицање тачака са осредњеним вредностима читаним са угибомера приказани су на слици 6.15 за носаче ојачане вертикалним завртњевима и на слици 6.16 за носаче ојачане косим завртњевима.

На приказаним дијаграмима се може уочити промена нагиба кривих при оптерећењу које одговара лому неојачаних носача – између 10 и 15 kN. Тренутак промене нагиба кривих се може сматрати тренутком када оптерећење преузимају завртњеве. Са даљим порасатом оптерећења отварање пукотина је и даље контролисано и стабилно, али знатно веће. Пре лома размицање тачака није прелазило вредност од 2,0 mm у случају носача ојачаних завртњевима. Поред тога, на оба дијаграма се уочава веће отварање пукотина при истом оптерећењу на страни на којој је дошло до лома.



Слика 6.15 Дијаграм оптерећење - размицање тачака код ослонаца за Серију R-s90, носач R1-s90



Слика 6.16 Дијаграм оптерећење - размицање тачака код ослонаца за Серију R-s45, носач R5-s45

6.2.2 Носивост, деформабилност и крутост носача

Оптерећење при лому, угиб у средини носача при лому и апроксимативна крутост на савијање добијени експерименталним испитивањем носача ојачаних завртњевима приказани су у табели 6.2 за носаче са вертикално постављеним ојачањем (Серија R-s90) и у табели 6.3 за носаче са косо постављеним ојачањем (Серија R-s45). Као и у случају неојачаних носача, вредности оптерећења и угиба су очитани из забележених резултата експерименталног испитивања. Такође, апроксимативна крутост на савијање је израчуната на основу почетног нагиба криве оптерећење - угиб, за област између између $0,1F_{max}$ и $0,4F_{max}$ где је понашање носача линеарно еластично, а F_{max} представља максимално оптерећење, односно оптерећење при лому носача. Вредности апроксимативне крутости на савијање су добијене користећи исти израз за угиб у средини носача као и код неојачаних узорак (израз 6.1). Поред тога, у табелама 6.2 и 6.3 су дати и облици лома носача ојачаних завртњевима. Као што је већ речено, доминантан облик лома код свих испитаних узорак Серија R-s90 и R-s45 је био лом услед прекорачења носивости на смицање.

Табела 6.2 Експериментални резултати испитивања Серије R-s90

Носач	Максимална сила F_{max} (kN)	Угиб у средини при максималној сили w (mm)	Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ kNmm ²)	Облик лома
R1-s90	42,7	47,7	8,46	Смицање
R2-s90	29,8	27,8	10,46	Смицање
R3-s90	36,3	39,7	8,63	Смицање
R4-s90	37,0	110,4	9,32	Смицање
R5-s90	34,0	39,2	9,14	Смицање
Средња вредност	35,9	52,9	9,20	/
Стандардна девијација	4,7	32,9	0,79	/
Коефицијент варијације (%)	13,0	62,1	8,5	/
Поређење са Серијом U (%)	180,5	360,0	/	/

Табела 6.3 Експериментални резултати испитивања Серије R-s45

Носач	Максимална сила F_{max} (кN)	Угиб у средини при максималној сили w (mm)	Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ кNmm ²)	Облик лома
R1-s45	38,0	40,1	9,01	Смицање
R2-s45	36,7	40,8	8,29	Смицање
R3-s45	34,6	38,9	9,19	Смицање
R4-s45	30,0	59,1	8,54	Смицање
R5-s45	31,1	32,6	8,83	Смицање
Средња вредност	34,1	42,3	8,77	/
Стандардна девијација	3,5	9,9	0,36	/
Коефицијент варијације (%)	10,1	23,5	4,1	/
Поређење са Серијом U (%)	166,4	267,8	/	/

Увођење ојачања на местима нагле промене висине попречног пресека носача довело је до побољшања носивости. Ојачани носачи са завртњевима постављеним под углом од 90° су имали просечно оптерећење при лому од 35,9 kN, са коефицијентом варијације од 13%. Ојачани носачи са завртњевима постављеним под углом од 45° су имали просечно оптерећење при лому од 34,1 kN, са коефицијентом варијације од 10,1%. Сви ојачани носачи показали су повећање граничног оптерећења у поређењу са оптерећењем при лому носача без ојачања. Ово повећање износило је 180,5% и 166,4% за носаче Серије R-s90 и Серије R-s45, редом. Поред повећања носивости од скоро три пута, може се приметити да и коефицијент варијације има ниже вредности, односно да је мање расипање резултата него у случају неојачаних носача. Ово је последица постављања завртњева који су помогли да се ублажи варијабилност у понашању дрвених носача услед присуства редукције висине пресека код ослонаца.

Неојачани носачи са редукованом висином пресека потпуно су изгубили носивост након иницирања пукотине. С друге стране, носачи ојачани завртњевима наставили су да носе оптерећење након иницијалног отварања пукотине. Међутим, недовољна дубина забијања није дозволила да носачи ојачани завртњевима достигну лом услед савијања. Извлачење завртњева наступило је пре достизања носивости коју би имали носачи без редуковане висине попречног пресека код ослонаца.

Носачи ојачани завртњевима претрпели су веће деформације пре лома у поређењу са неојачаним. Средња вредност измереног угиба у средини при граничном оптерећењу износила је 52,9 mm и 42,3 mm за носаче Серије R-s90 и Серије R-s45, редом. Ојачани носачи показали су 3,6 - 4,6 пута веће угибе у средини при граничном оптерећењу. Дакле, завртњеви су допринели побољшању деформабилности носача. Коефицијент варијације за угиб у случају носача ојачаних вертикалним завртњевима (Серија R-s90) износио је 62,1% јер је носач R4-s90 имао угиб од чак 110,4 mm и тиме утицао на расипање резултата. Ово је опет последица велике варијабилности карактеристика дрвета као материјала. С друге стране, коефицијент варијације за угиб у случају носача ојачаних косим завртњевима (Серија R-s45) износио је 23,5%, приближно као и код греда неојачане серије.

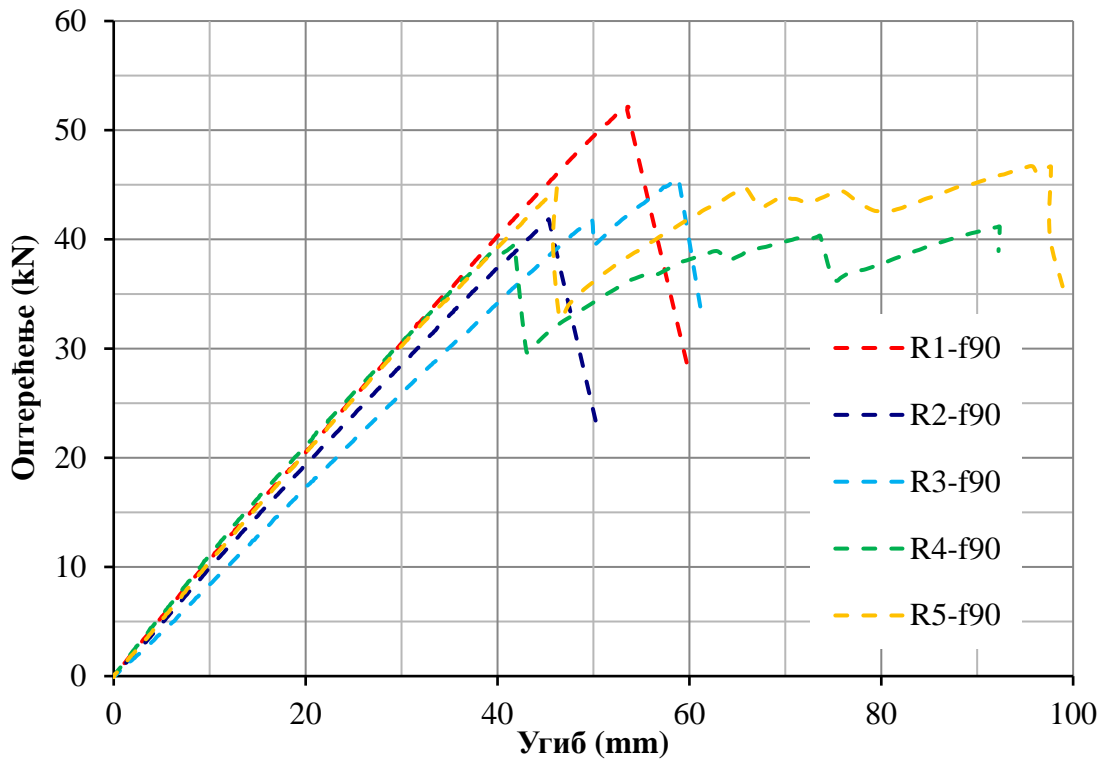
Сви носачи су имали сличне вредности крутости на савијање. Ово је очекивано с обзиром да примењено ојачање није намењено побољшању крутости. Серија R-s45 је имала мало нижу вредност која се може објаснити варијабилношћу својстава, што је карактеристично за дрво као материјал. Средња вредност крутости носача Серије R-s90 износила је $9,20 \times 10^8 \text{ kNmm}^2$, са коефицијентом варијације од 8,5%. Средња вредност крутости носача Серије R-s45 износила је $8,77 \times 10^8 \text{ kNmm}^2$, са коефицијентом варијације од 4,1%. Коефицијент варијације у случају крутости је очекивано знатно мањи него у случају оптерећења и угиба с обзиром да су сви носачи израђени од ламела исте класе чврстоће дрвета, а сем тога разматра се понашање носача само у почетној фази, односно еластичној области.

6.3 Механичко понашање носача ојачаних GFRP шипкама – Серије R-f90 и R-f45

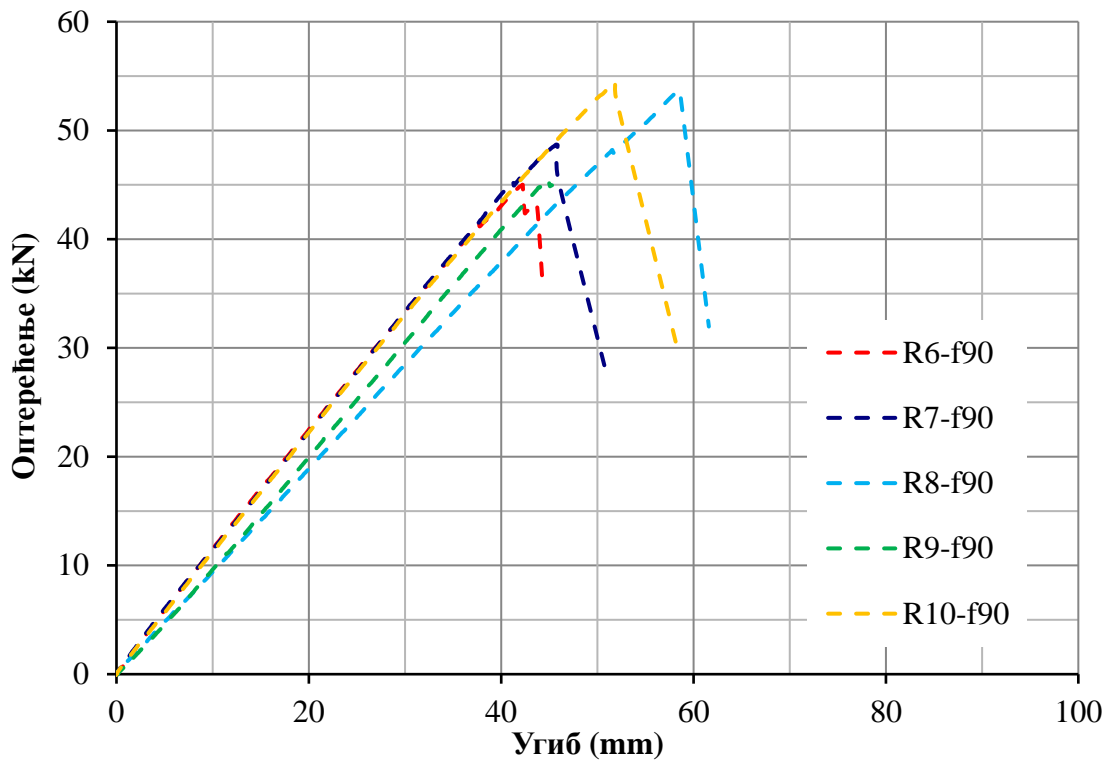
6.3.1 Дијаграми оптерећење - угиб и облик лома

Носачи са редукованом висином пресека ојачани GFRP шипкама (Серија R-f) су достигали како лом услед смицања, тако и лом услед савијања. У случају већине носача понашање до лома је било линеарно еластично, док је код пар носача долазило до пластификације притиснутих влакана и нелинеарног понашања пре лома.

Дијаграми оптерећење - угиб за ојачане носаче код којих су по две GFRP шипке постављене вертикално једна иза друге дуж подужне осе носача (узорци од R1-f90 до R5-f90) приказани су на слици 6.17. Дијаграми оптерећење - угиб за ојачане носаче код којих су по две GFRP шипке постављене вертикално једна до друге у попречном пресеку (узорци од R6-f90 до R10-f90) приказани су на слици 6.18. Дијаграми су приказани засебно за носаче R1-f90 до R5-f90 и носаче R6-f90 до R10-f90 како би се анализирао утицај различитих диспозиција постављања вертикалних GFRP шипки на механичко понашање носача. Оваква анализа има за циљ доношење закључка о оптималном положају ојачања носача са редукованом висином пресека код ослонаца.



Слика 6.17 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f90 (R1 - R5)



Слика 6.18 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f90 (R6 - R10)

У случају носача R1-f90, R2-f90 и R3-f90 лом се догодио услед савијања, у доњој затегнутој зони (слика 6.19), док се у случају носача R4-f90 и R5-f90 лом догодио услед смицања, са извлачењем GFRP шипки (слика 6.20). Поред тога што је знатно повећана носивост у односу на неојачане узорке, и само понашање носача је било дуктилније. Такође, носивост је повећана и у поређењу са носачима ојачаним завртњевима. Као што је већ речено, у случају три од пет носача је облик лома промењен из комбинованог, услед затезања управно на влакна и смицања, у лом услед савијања. И код носача ојачаних GFRP шипкама је долазило до иницирања пукотина на местима нагле промене висине, али су шипке успешно спречиле прекомерно отварање истих. На приказаним дијаграмима се види скоковит пад силе пре наступања коначног лома носача R3-f90, R4-f90 и R5-f90. Ове скоковите промене криве одговарају постепеном извлачењу ојачања, те се може рећи да је лом био најављен.



Слика 6.19 Лом услед савијања носача ојачаних вертикалним GFRP шипкама – Серија R-f90, носачи R2-f90 и R3-f90



Слика 6.20 Лом услед смицања носача ојачаних вертикалним GFRP шипкама – Серија R-f90, носач R4-f90

Носачи R1-f90, R2-f90 и R3-f90, чији се лом догодио услед савијања, имали су линеарно еластично понашање и нису показали знаке пластификације притиснутих влакана дрвета у горњој зони. Лом у случају ових греда је претежно

инициран на местима дефеката и кврга у дрвету, као што је приказано на слици 6.21. У случају носача R4-f90 и R5-f90, чији се лом догодио услед смицања, дошло је до извлачења шипки (слика 6.22) и неконтролисаног раста пукотине.



Слика 6.21 Лом носача услед затезања у доњој зони на месту кврга у дрвету – Серија R-f90, носач R2-f90



Слика 6.22 Извлачење GFRP шипки – Серија R-f90, носач R4-f90

Лом услед савијања се догодио код носача R6-f90, R9-f90 и R10-f90 у доњој затегнутој зони (слика 6.23), док се код носача R7-f90 и R8-f90 догодио лом, односно губитак носивости, услед смицања, без извлачења GFRP шипки (слика 6.24). Дакле, у случају три од пет носача је постигнута промена облика лома у лом услед савијања. Поред тога, код свих пет носача је знатно повећана носивост и деформабилност у односу на неојачане носаче и носаче ојачане завртњевима. Међутим, носивост је повећана и у односу на носаче са две GFRP шипке постављене вертикално једна иза друге (R1-f90 до R5-f90), што говори да је овакав распоред ојачања повољнији. Нису уочене скоковите промене кривих на дијаграмима, дакле није долазило до извлачења шипки. У случају лома носача услед смицања није дошло до прекомерног отварања пукотине, већ само до њене пропагације целом дужином греде као што је приказано на слици 6.25.



*Слика 6.23 Лом услед савијања носача ојачаних вертикалним GFRP шипкама –
Серија R-f90, носач R10-f90*



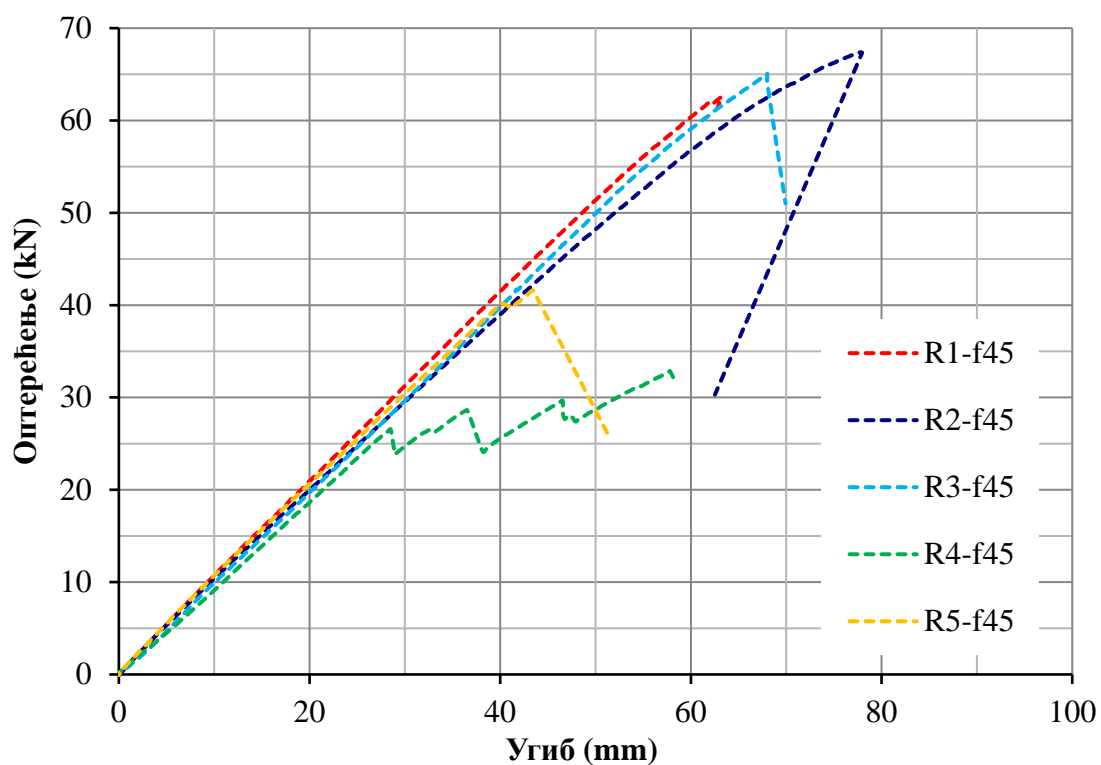
*Слика 6.24 Лом услед смицања носача ојачаних вертикалним GFRP шипкама –
Серија R-f90, носач R8-f90*



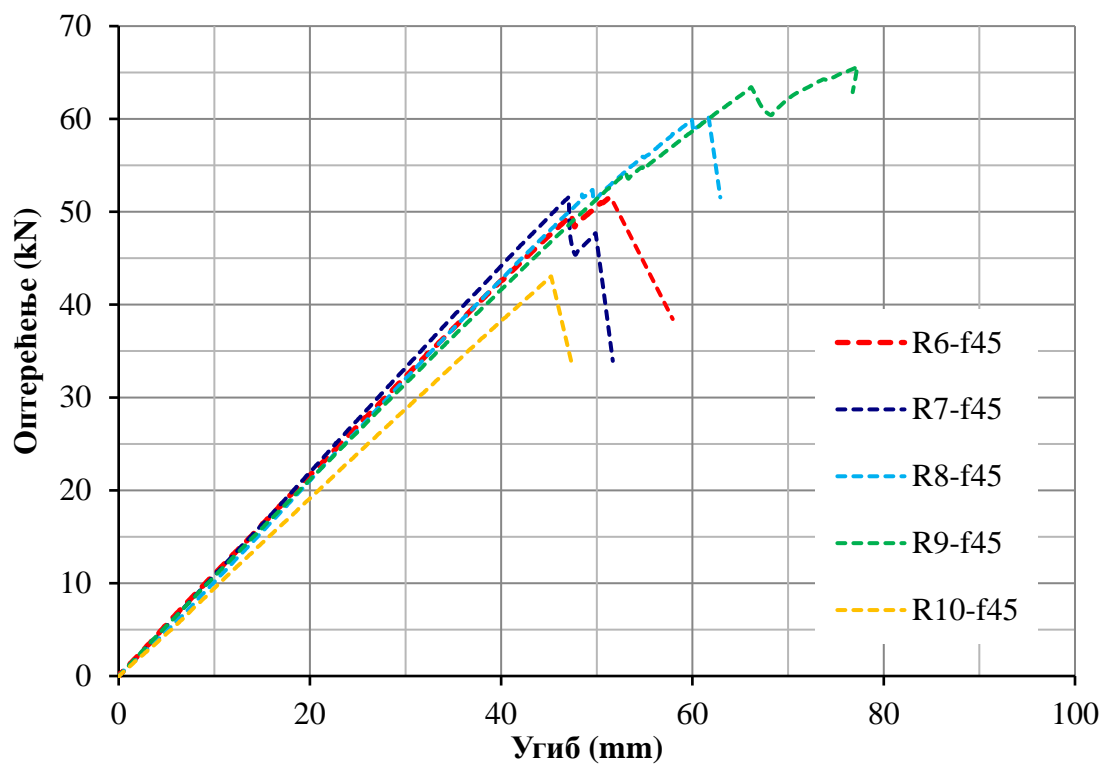
*Слика 6.25 Пропагија пукотине целом дужином носача, без извлачења шипки,
носач R8-f90*

Носачи R6-f90, R9-f90 и R10-f90, чији се лом догодио услед савијања, нису показали знаке пластификације притиснутих влакана дрвета у горњој зони, па је и у овом случају понашање носача у еластичној области. Такође, и код ових носача је лом претежно био инициран на местима дефеката у дрвету, у доњој затегнутој зони.

На слици 6.26 су приказани дијаграми оптерећење - угиб за ојачане носаче код којих су по две GFRP шипке постављене косо (под углом од 45°) једна иза друге дуж подужне осе носача (узорци од R1-f90 до R5-f90). Дијаграми оптерећење - угиб за ојачане носаче код којих су по две GFRP шипке постављене косо једна до друге у попречном пресеку (узорци од R6-f45 до R10-f45) приказани су на слици 6.27. Као и код вертикално постављених шипки, дијаграми су приказани засебно како би се разматрао утицај распореда GFRP шипки на механичко понашање носача, а тиме и донео закључак о оптималном положају ојачања.



Слика 6.26 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f45 (R1 - R5)



Слика 6.27 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f45 (R6 - R10)

У случају носача R1-f45, R2-f45 и R3-f45 лом се догодио услед смицања и приказан је на слици 6.28. Носач R5-f90 је достигао лом услед савијања, у доњој затегнутој зони (слика 6.29). Носач R4-f45 је имао пад оптерећења услед лома последње ламеле узрокованог затезањем влакана у доњој зони пресека (савијање), да би наставио да носи оптерећење до коначног лома услед смицања (слика 6.30). Носачи ојачани шипкама постављеним под углом од 45° су показали највећу носивост од свих носача. Поред побољшања носивости у односу на све претходне серије узорака, повећана је и деформабилност носача. И у случају ових носача долазило је до иницирања пукотина на местима нагле промене висине, али су шипке успешно спречиле њихово прекомерно отварање.



*Слика 6.28 Лом услед смицања носача ојачаних косим GFRP шипкама –
Серија R-f45, носачи R2-f45 и R3-f45*



*Слика 6.29 Лом услед савијања носача ојачаних косим GFRP шипкама –
Серија R-f45, носач R5-f45*



Слика 6.30 Комбиновани лом носача R4-f45

Код носача R1-f45 се догодио лом услед смицања, међутим због чвора у близини ослонца дошло је до потпуног одвајања сегмента носача и израженог лома, као што је приказано на слици 6.31.



Слика 6.31 Лом носача R1-f45 услед чвора близу ослонца

Носач R2-f45 је показао одређено нелинеарно понашање пре лома као што се види са дијаграма на слици 6.26, а последица је делимичне пластификације притиснуте зоне, испод тачке уношења оптерећења. На том месту је дошло до збијања влакана дрвета (слика 6.32).



Слика 6.32 Трагови пластификације притиснуте зоне носача R2-f45

У случају носача код којих се лом десио услед смицања, дошло је до неконтролисаног раста пукотине (слика 6.33) и извлачења шипки (слика 6.34). На слици 6.26, на дијаграму оптерећење - угиб за носач R4-f45 уочавају се скоковите промене силе што представља постепено извлачење ојачања. Носач R5-f45, код ког се лом догодио услед савијања, није показао знаке пластификације притиснутих влакана дрвета у горњој зони, те је понашање носача било линеарно еластично до лома. Код овог носача је лом био инициран на местима дефеката у дрвету у доњој затегнутој зони (слика 6.35).



Слика 6.33 Нестабилан раст пукотине код носача ојачаних GFRP шипкама – Серија R-f45, носач R3-f45



Слика 6.34 Извлачење GFRP шипки – Серија R-f45, носач R2-f45



Слика 6.35 Лом носача услед затезања у доњој зони на месту кврга у дрвету – носач R5-f45

Што се тиче друге половине Серије R-f45, код носача R6-f45, R7-f45, R8-f45 и R10-f45 је до лома дошло услед савијања (слика 6.36), док се код носача R9-f45 лом догодио услед смицања (слика 6.37) и био је пропраћен извлачењем шипки. Поред повећања носивости и деформабилности у односу на носаче без ојачања, у случају четири од пет греда је облик лома промењен из комбинованог у лом услед савијања. Носивост је повећана и у односу на све остале испитане носаче, укључујући и узорке код којих су две GFRP шипке постављене косо једна иза друге (R1-f45 до R5-f45). На основу овога се може закључити да је овакав положај и распоред ојачања најповољнији.



*Слика 6.36 Лом услед савијања носача ојачаних косим GFRP шипкама –
Серија R-f45, носачи R6-f90 и R7-f90*



*Слика 6.37 Лом услед смицања носача ојачаних косим GFRP шипкама –
Серија R-f45, носач R9-f45*

Без обзира на лом услед савијања, носачи R6-f45, R7-f45, R8-f45 и R10-f45 нису показали знаке пластификације притиснутих влакана дрвета у горњој зони. Такође, и код ових носача је лом претежно био инициран на местима дефеката у грађи дрвету у доњој затегнутој зони (слика 6.38).

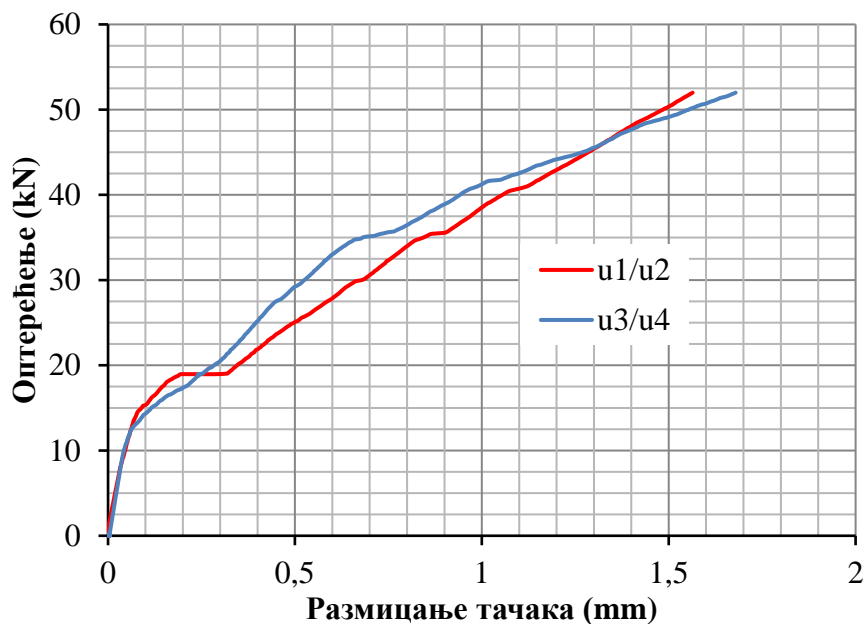


*Слика 6.38 Лом носача услед затезања у доњој зони на месту кврга у дрвету –
носач R10-f45*

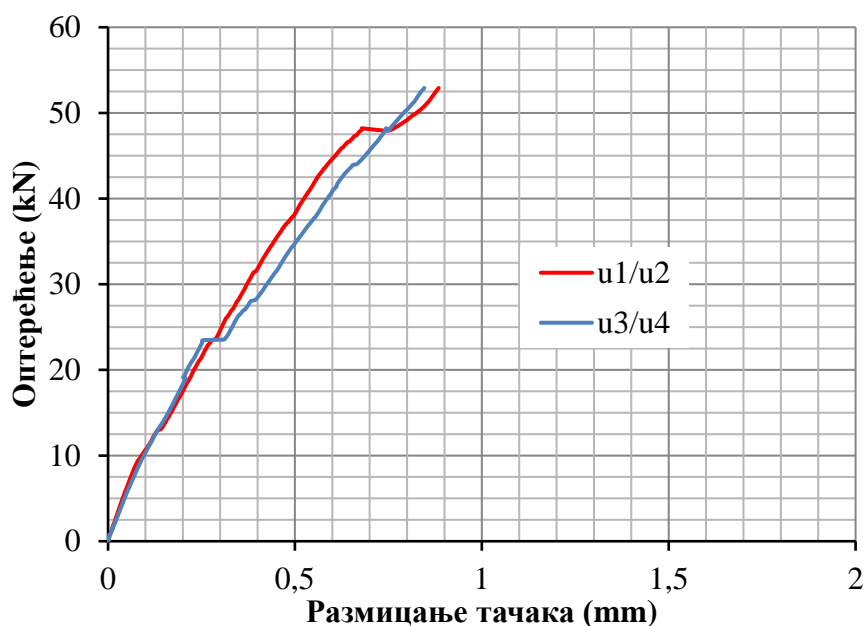
Као ни код носача Серија U, R-s90 и R-s45, ни у случају носача ојачаних GFRP шипкама није дошло до лома на споју ламела.

Карактеристични дијаграми оптерећење - размицање тачака са осредњеним вредностима очитаним са угибомера постављених на предњој и задњој страни носача ојачаних GFRP шипкама приказани су на сликама 6.39 - 6.42. Као и код носача ојачаних завртњевима, на приказаним дијаграмима се може уочити промена

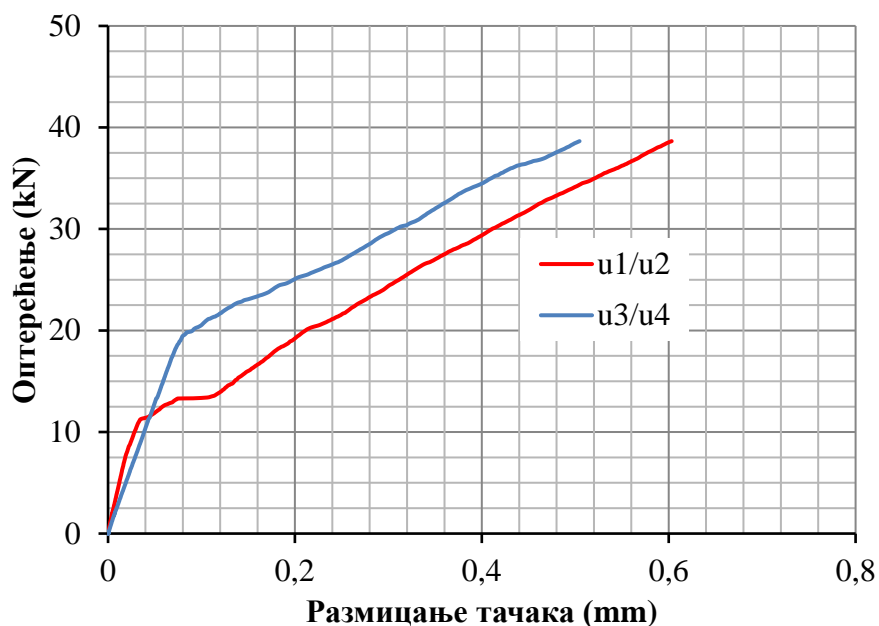
нагиба криве при оптерећењу које одговара лому неојачаних носача, када заправо оптерећење на месту нагле промене висине пресека преузимају шипке. Након тога је отварање пукотина и даље контролисано и стабилно, али знатно веће. Пре лома, размицање тачака је у већини случајева било мање од 1,5 mm за носаче ојачане GFRP шипкама (осим носача R1-f90), што говори о ефикасности ове методе ојачања у поређењу са завртњевима.



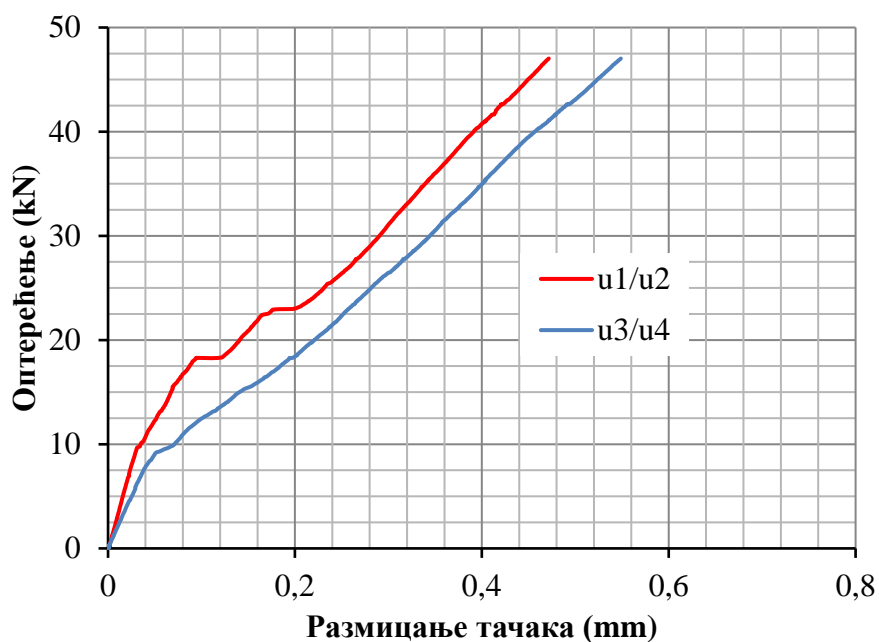
Слика 6.39 Дијаграм оптерећење - размицање тачака код ослонаца за Серију R-f90, носач R1-f90



Слика 6.40 Дијаграм оптерећење - размицање тачака код ослонаца за Серију R-f90, носач R8-f90



Слика 6.41 Дијаграм оптерећење - размицање тачака код ослонаца за Серију R-f45, носач R5-f45



Слика 6.42 Дијаграм оптерећење - размицање тачака код ослонаца за Серију R-f45, носач R6-f45

6.3.2 Носивост, деформабилност и крутост носача

Оптерећење при лому, угиб у средини носача при лому и апроксимативна крутост на савијање добијени експерименталним испитивањем носача ојачаних двама вертикалним GFRP шипкама постављеним једна иза друге дуж подужне осе носача (узорци од R1-f90 до R5-f90) приказани су у табели 6.4, док су за носаче

ојачане двама GFRP шипкама постављеним вертикално једна до друге у попречном пресеку (узорци од R6-f90 до R10-f90) дати у табели 6.5. Табела 6.6 приказује резултате експерименталног испитивања носача код којих су две GFRP шипке постављене косо (под углом од 45°) једна иза друге дуж подужне осе носача (узорци од R1-f90 до R5-f90). Табела 6.7 даје резултате експерименталног испитивања за носаче код којих су две GFRP шипке постављене косо једна до друге у попречном пресеку (узорци од R6-f45 до R10-f45).

Као и у случају неојачаних носача и носача ојачаних завртњевима, вредности оптерећења и угиба су очитани из забележених резултата експерименталног испитивања. Вредности апроксимативне крутости на савијање су добијене користећи исти израз за угиб у средини носача као и код неојачаних узорака (израз 6.1), за област између између $0,1F_{max}$ и $0,4F_{max}$ где је понашање носача линерано еластично, а F_{max} представља максимално оптерећење, тј. оптерећење при лому носача. Поред тога, у табелама 6.4 до 6.7 су дати и облици лома носача ојачаних GFRP шипкама. До лома је долазило услед прекорачења чврстоће на савијање или чврстоће на смицање. Из приказаних резултата се види да је ојачање у виду GFRP шипки допринело великом побољшању носивости у односу на неојачане носаче, али и да је дало знатно боље резултате у поређењу са носачима који су ојачани завртњевима за дрво.

Носачи ојачани са по две GFRP шипке вертикално постављене једна иза друге (узорци R1-f90 до R5-f90) су имали просечно оптерећење при лому од 45,5 kN, са коефицијентом варијације од 9,7%. Носачи ојачани са по две GFRP шипке вертикално постављене једна до друге (узорци R6-f90 до R10-f90) су имали просечно оптерећење при лому од 50,8 kN, са коефицијентом варијације од 8,7%. Носачи R1-f45 до R5-f45, ојачани са по две GFRP шипке косо постављене једна иза друге, су имали просечно оптерећење при лому од 53,9 kN, са коефицијентом варијације 29,0%. Носачи R6-f45 до R10-f45, ојачани са по две GFRP шипке косо постављене једна до друге, су имали просечно оптерећење при лому од 55,7 kN, са коефицијентом варијације од 15,6%.

Табела 6.4 Експериментални резултати испитивања Серије R-f90 (R1 - R5)

Носач	Максимална сила F_{max} (кN)	Угиб у средини при максималној сили w (mm)	Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ кNmm ²)	Облик лома
R1-f90	52,1	53,6	9,17	Савијање
R2-f90	41,8	45,3	8,94	Савијање
R3-f90	45,6	58,9	8,00	Савијање
R4-f90	41,1	92,4	9,76	Смицање
R5-f90	46,7	95,5	9,35	Смицање
Средња вредност	45,5	69,1	9,04	/
Стандардна девијација	4,4	23,2	0,65	/
Коефицијент варијације (%)	9,7	33,5	7,2	/
Поређење са Серијом U (%)	256,7	498,8	/	/

Табела 6.5 Експериментални резултати испитивања Серије R-f90 (R6 - R10)

Носач	Максимална сила F_{max} (кN)	Угиб у средини при максималној сили w (mm)	Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ кNmm ²)	Облик лома
R6-f90	46,3	42,2	10,167	Савијање
R7-f90	50,0	45,7	9,939	Смицање
R8-f90	55,0	58,4	8,582	Смицање
R9-f90	46,8	44,9	9,294	Савијање
R10-f90	55,7	51,9	10,091	Савијање
Средња вредност	50,8	48,6	9,62	/
Стандардна девијација	4,4	6,5	0,67	/
Коефицијент варијације (%)	8,7	13,4	7,0	/
Поређење са Серијом U (%)	298,3	321,2	/	/

Табела 6.6 Експериментални резултати испитивања Серије R-f45 (R1 - R5)

Носач	Максимална сила F_{max} (кN)	Угиб у средини при максималној сили w (mm)	Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ кNmm ²)	Облик лома
R1-f45	62,6	63,2	9,40	Смицање
R2-f45	67,4	77,8	8,82	Смицање
R3-f45	65,1	68,0	9,04	Смицање
R4-f45	32,8	57,8	8,44	Савијање / Смицање
R5-f45	41,6	43,5	9,31	Савијање
Средња вредност	53,9	62,1	9,00	/
Стандардна девијација	15,6	12,7	0,38	/
Коефицијент варијације (%)	29,0	20,5	4,3	/
Поређење са Серијом U (%)	322,6	437,7	/	/

Табела 6.7 Експериментални резултати испитивања Серије R-f45 (R6 - R10)

Носач	Максимална сила F_{max} (кN)	Угиб у средини при максималној сили w (mm)	Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ кNmm ²)	Облик лома
R6-f45	52,9	51,4	9,79	Савијање
R7-f45	53,0	47,1	10,05	Савијање
R8-f45	61,4	61,7	9,86	Савијање
R9-f45	66,9	77,2	9,51	Смицање
R10-f45	44,3	45,2	8,87	Савијање
Средња вредност	55,7	56,5	9,62	/
Стандардна девијација	8,7	13,2	0,46	/
Коефицијент варијације (%)	15,6	23,4	4,8	/
Поређење са Серијом U (%)	336,8	389,5	/	/

Сви носачи ојачани GFRP шипкама су показали повећање граничног оптерећења у поређењу са оптерећењем при ком се лом догодио код носача без ојачања. Ово повећање је износило 256,7% (носачи R1-f90 до R5-f90) и 298,3% (носачи R6-f90 до R10-f90) за носаче Серије R-f90, односно 322,6% (носачи R1-f45 до R5-f45) и 336,8% (носачи R6-f45 до R10-f45) за носаче Серије R-f45. Осим што је носивост повећана од 3,6 до 4,4 пута, може се приметити да је опао и коефицијент варијације, односно да је мање расипање резултата него у случају неојачане серије. Изузетак су носачи ојачани са по две GFRP шипке косо постављене једна иза друге (R1-f45 до R5-f45), код којих је велики коефицијент варијације последица прераног лома једног носача. Као и код носача ојачаних завртњевима, нижи коефицијент варијације је последица постављања GFRP шипки које су помогле да се ублажи варијабилност у понашању дрвених носача услед присуства редуције висине пресека код ослонаца.

Као и у случају завртњева, ојачање GFRP шипкама је омогућило носачима да наставе да носе оптерећење након иницијалног отварања пукотине. Такође, велики број носача ојачаних GFRP шипкама је имао лом услед савијања, са достизањем носивости коју би имали носачи без редуковане висине пресека код ослонаца.

Носачи ојачани GFRP шипкама су претрпели веће деформације пре лома у поређењу са неојачаним. Средња вредност угиба у средини при граничном оптерећењу била је 69,1 mm за носаче R1-f90 до R5-f90, са коефицијентом варијације 33,5% и 48,6 mm за носаче R6-f90 до R10-f90, са коефицијентом варијације 13,4%. Затим, средња вредност угиба у средини при граничном оптерећењу била је 62,1 mm за носаче R1-f45 до R5-f45, са коефицијентом варијације 20,5% и 56,5 mm за носаче R6-f45 до R10-f45, са коефицијентом варијације 23,4%. Носачи ојачани GFRP шипкама су показали 4,2 - 6 пута веће угибе у средини при граничном оптерећењу у поређењу са неојачаном серијом. На основу ових разматрања може се рећи да су шипке допринеле побољшању деформабилности носача. Велики коефицијент варијације код појединих серија је последица велике варијабилности карактеристика дрвета као материјала.

Носачи са две GFRP шипке вертикално постављене једна иза друге (R1-f90 до R5-f90) су имали просечну крутост $9,04 \times 10^8 \text{ kNm}^2$, док су носачи са две GFRP шипке вертикално постављене једна до друге (R6-f90 до R10-f90) имали просечну

крутост $9,62 \times 10^8 \text{ kNmm}^2$. Носачи са две GFRP шипке косо постављене једна иза друге (R1-f45 до R5-f45) су имали просечну крутост $9,0 \times 10^8 \text{ kNmm}^2$, док су носачи са две GFRP шипке косо постављене једна до друге (R6-f45 до R10-f45) имали просечну крутост $9,62 \times 10^8 \text{ kNmm}^2$. Како носачи друге фазе испитивања код којих су шипке постављене вертикално једна до друге (R6-f90 до R10-f90) и косо једна до друге (R6-f45 до R10-f45) нису истовремено испоручени нити испитани са осталим носачима, овај резултат није изненађење, с обзиром да дрво има природно варијабилне карактеристике. Коефицијент варијације у случају крутости је знатно мањи него у случају оптерећења и угиба с обзиром да се разматра понашање носача само у еластичној области.

Може се рећи да су GFRP шипке ефикасније средство ојачања од завртњева, као и да је најповољнији распоред шипки онај који одговара носачима R6-f45 до R10-f45 – шипке једна до друге под углом од 45° . Генерално, бољи резултати су постигнути постављањем две шипке једна до друге у попречном пресеку у поређењу са постављањем две шипке у низу, једна иза друге.

6.4 Закључци

Из приказаних резултата спроведених експерименталних испитивања неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца изведени су следећи закључци:

- До лома неојачаних носача је дошло услед прекорачења напона на затезање управно на влакна на местима редуције висине пресека. Облик лома I је доминантан лом код неојачаних носача, јер је затезање управно на влакна дрвета изазвало прекомерно отварање пукотина.
- Носачи ојачани завртњевима су имали знатно побољшану носивост и деформабилност у поређењу са неојачаним носачима.
- Иако је гранично оптерећење повећано скоро три пута у односу на неојачане носаче, ојачање у виду завртњева није било довољно да се промени облик лома из лома услед затезања управно на влакна и смицања у лом услед савијања.
- Боље резултате су дали носачи са завртњевима постављеним под правим углом у односу на оне који су имали завртњеве под углом од 45° . Објашњење

за ово се може наћи у чињеници да су косо постављени завртњевима имали недовољну дубину забијања.

- Носивост носача ојачаних GFRP шипкама је увећана у просеку четири пута у односу на неојачну серију. Ојачање у виду GFRP шипки дало је знатно боље резултате у односу на носаче ојачане завртњевима за дрво и у смислу носивости и у смислу деформабилности.
- Такође, у случају многих носача ојачаних GFRP шипкама лом се догодио услед савијања, са достизањем очекиване носивости носача без редуковане висине попречног пресека код ослонаца.
- Генерално, бољи резултати су постигнути постављањем две шипке једна до друге у попречном пресеку у поређењу са постављањем две шипке у низу, једна иза друге.
- Најповољнији распоред GFRP шипки је њихово постављање једна до друге у попречном пресеку под углом од 45°.

7 АНАЛИТИЧКИ ПРОРАЧУН

Поступак прорачуна носача са редукованом висином пресека дат у поглављу 2.4.1 према стандарду Еврокод 5 [7] примењен је на тестиране носаче, како би се извршило поређење експерименталних и аналитичких резултата. Да би ово поређење било могуће, неопходно је узети одговарајуће вредности карактеристика материјала при аналитичком прорачуну. Гранична вредност напона смицања може се одредити користећи карактеристичну вредност чврстоће на смицање. Тада израз 2.5 постаје:

$$\tau = \frac{1,5V}{b_{ef} h_{ef}} \leq k_v f_{v,k} \quad (7.1)$$

где је:

V – трансверзална сила;

τ – смичући напон;

$f_{v,k}$ – чврстоћа на смицање, узета као карактеристична вредност;

h_{ef} – редукована висина носача;

b_{ef} – ефективна ширина носача: $b_{ef} = k_{cr} b$;

$k_{cr} = 0,67$ за правоугаони попречни пресек;

k_v – фактор редуције којим се узима у обзир концентрација напона на месту нагле промене висине попречног пресека:

$k_v = 1$ – за редуковану висину на супротној страни од ослонца;

$$k_v = \frac{k_n}{\sqrt{h \left(\sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0,8 \frac{x}{h} \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)}} \leq 1 \text{ – за редуковану висину} \quad (7.2)$$

на истој страни ослонца;

где је:

h – висина носача;

x – растојање реакције ослонца до места редуције висине пресека;

$$\alpha = \frac{h_{ef}}{h} \quad (7.3)$$

$$k_n = \begin{cases} 5 & \text{за монолитно дрво} \\ 6,5 & \text{за лепљено ламелирано дрво.} \end{cases}$$

Што се тиче поступка прорачуна ојачања носача са редукованом висином пресека код ослонаца према Немачком националном анексу за Еврокод 5 [8], део силе који преузима ојачање се може израчунати као:

$$F_{ax,E} = k_\alpha V \quad (7.4)$$

уз услов да је:

$$F_{ax,E} \leq n F_{ax,R}$$

где је:

$$k_\alpha = 1,3 \left[3(1-\alpha)^2 - 2(1-\alpha)^3 \right] \quad (7.5)$$

$F_{ax,E}$ – аксијална сила у једном средству за ојачање;

n – број средстава за ојачање;

$F_{ax,R}$ – капацитет носивости средства за ојачање на чупање.

7.1 Поређење експерименталних и аналитичких резултата

7.1.1 Неојачани носачи – Серија U

На основу израза датих у Еврокоду 5 за носаче са редукованом висином пресека извршен је аналитички прорачун за неојачане носаче. Прорачун је спроведен са карактеристичним вредностима утицаја и чврстоћа, како би резултати могли да се упореде са експериментално добијеним вредностима.

Карактеристична чврстоћа на смицање за лепљено ламелирано дрво класе GL22h износи $f_{v,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$ [49].

Фактор k_n усвојен је за лепљено ламелирано дрво: $k_n = 6,5$.

Фактор k_v израчунат је за $\alpha = 0,5$, $x = 125 \text{ mm}$, $h = 220 \text{ mm}$ и износи:

$$k_v = \frac{6,5}{\sqrt{220} \left(\sqrt{0,5(1-0,5)} + 0,8 \frac{125}{220} \sqrt{\frac{1}{0,5} - 0,5^2} \right)} = 0,398$$

Вредност граничног оптерећења за неојачане носаче према Еврокоду 5, за $h_{ef} = 110 \text{ mm}$ и $b_{ef} = 0,67 \cdot 100 = 67 \text{ mm}$, а на основу израза 7.1, износи:

$$F_{max,U} = \frac{2}{1,5} k_v f_{v,k} b_{ef} h_{ef} = 13,7 \text{ kN}$$

Просечна вредност граничног оптерећења добијена експерименталним испитивањем неојачаних носача износила је 12,8 kN, док је аналитички добијена вредност 13,7 kN. Може се уочити да предложени метод прорачуна премашује гранично оптерећење за 7,0%. Ова неповољна разлика у резултатима (аналитички прорачун није на страни сигурности) може се објаснити чињеницом да прорачунски приступ презентован у Еврокоду 5 узима у обзир само вертикалну компоненту која изазива затезање управно на влакна, док занемарује појаву напона смицања у равни пукотине, који се јавља на месту редуkcије висине пресека.

Rautenstrauch и други аутори [18] дошли су до истог закључка у оквиру свог испитивања и узимајући у обзир енергију која се ослобађа при облику лома I и облику лома II, предложили су корекцију фактора редуkcије k_v :

$k_v = 1$ – за редуковану висину на супротној страни ослонца;

$$k_v = \frac{0,8k_n}{\sqrt{h \left(\sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0,8 \frac{x}{h} \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)}} \leq 1 \text{ – за редуковану висину на истој}$$

страни ослонца;

Дакле, предлог дат у оквиру рада [18] је да се фактор k_n умањи за 20%. У том случају гранично оптерећење за неојачане носаче износи 11,0 kN. Разлика у односу на експерименталне вредности је сада 14,1%, али на страни сигурности.

Преглед поређења експерименталних и аналитичких резултата за неојачане носаче дат је у табели 7.1. Приказани су аналитички резултати са и без модификације фактора редуkcије k_v .

Табела 7.1 Поређење експерименталних и аналитичких резултата – Серија U

	Максимална сила F_{max} (kN)	
	Без модификације k_v	Са модификацијом k_v
Експериментални резултати	12,8	12,8
Аналитички резултати	13,7	11,0
Разлика (%)	7,0	14,1

7.1.2 Носачи ојачани завртњевима – Серије R-s90 и R-s45

Као што је већ напоменуто Немачки национални анекс Еврокода 5 [8] даје аналитички прорачун ојачања носача са редукованом висином пресека. У случају носача ојачаних завртњевима, вредност капацитета носивости једног завртња на чупање усваја се према [48]:

$$F_{ax,R} = f_{ax,90} \cdot d \cdot l_{ef} \quad (7.6)$$

где је:

$f_{ax,90}$ – чврстоћа вертикалног завртња на чупање управно на влакна дрвета;

d – пречник завртња;

l_{ef} – дубина забијања дела завртња са навојем.

Просечна чврстоћа вертикалног завртња на чупање управно на влакна према испитивању описаном у поглављу 5.2.2 износи $f_{ax,90} = 9,5 \text{ N/mm}^2$. Вредност капацитета носивости вертикалног завртња на чупање за пречник $d = 10 \text{ mm}$ и дубину забијања $l_{ef} = 90 \text{ mm}$ је:

$$F_{ax,R,s90} = f_{ax,90} \cdot d \cdot l_{ef} = 8,55 \text{ kN}$$

Пошто су завртњеви постављени у низу, предлаже се увођење ефективног броја средстава за ојачање $n_{ef} = n^{0,9}$, као што је случај у прорачуну веза према Еврокоду 5 [7]. Под претпоставком да завртњеви носе целокупно оптерећење ($k_a = 1$), гранично оптерећење за носаче ојачане са два вертикална завртња према [48] износи:

$$F_{max,s90} = 2V = 2n_{ef} F_{ax,R,s90} = 31,9 \text{ kN}$$

У случају носача са завртњевима под углом од 90° , разлика аналитички добијеног граничног оптерећења у односу на експерименталну вредност, која је износила $35,9 \text{ kN}$, јесте $11,1\%$.

Усвојена претпоставка да је $k_a = 1$ је валидна, с обзиром на то да је поређење вршено за гранично оптерећење при лому, а не за експлоатационо оптерећење. Носач губи носивост на смицање при иницирању пукотине на месту нагле промене висине пресека, а завртњеви настављају да носе оптерећење до лома.

За завртњеве под углом од 45° у односу на подужну осу носача, чврстоћа завртња на чупање узета је као $f_{ax,45} = 0,86 f_{ax,90}$ према [48]. Вредност капацитета

носивости косог завртња на чупање за пречник завртња $d = 10$ mm и дубину забијања $l_{ef} = 94$ mm износи:

$$F_{ax,R,s45} = 0.86 \cdot f_{ax,90} \cdot d \cdot l_{ef} = 7,68 \text{ kN}$$

Опет, ако се не узима у обзир коефицијент k_a (односно $k_a = 1$), с претпоставком да завртњеви носе целокупно оптерећење, гранично оптерећење за носаче ојачане са два коса завртња износи:

$$F_{max,s45} = 2V = 2n_{ef} F_{ax,R,s45} = 28,7 \text{ kN}$$

У случају носача са завртњевима под углом од 45° , разлика аналитички добијеног граничног оптерећења у односу на експерименталну вредност од 34,1 kN, износи 15,8%.

Како се у случају свих носача ојачаних завртњевима лом догодио услед смицања, није потребно разматрати носивост коју би носачи имали на савијање да нема редуције висине пресека код ослонаца.

Преглед поређења експерименталних и аналитичких резултата за носаче ојачане завртњевима дат је у табели 7.2. Уочава се солидно слагање аналитичких и експерименталних резултата за носивост носача ојачаних завртњевима. При томе је аналитички прорачун на страни сигурности јер даје мање вредности граничног оптерећења од вредности добијених експерименталним испитивањем.

Табела 7.2 Поређење експерименталних и аналитичких резултата – Серија R-s

	Максимална сила F_{max} (kN)	
	Серија R-s90	Серија R-s45
Експериментални резултати	35,9	34,1
Аналитички резултати	31,9	28,7
Разлика (%)	11,1	15,8

7.1.3 Носачи ојачани GFRP шипкама – Серије R-f90 и R-f45

Од тренутно важећих светских прописа за прорачун дрвених конструкција ни један не даје метод прорачуна дрвених носача са редукованом висином пресека ојачаних FRP шипкама. Такође, прописи не дефинишу ни метод прорачуна

капацитета носивости FRP шипке на чупање из дрвеног пресека [46]. Међутим, Немачки национални анекс Еврокода 5 даје прорачун носача са редукованом висином код ослонца ојачаних профилисаним челичним шипкама постављеним у унапред припремљене рупе испуњене лепком (*Glued-in rods*). Како се управо овај приступ прорачуна у литератури наводи као најконзервативнији [46], у овом раду ће се карактеристична вредност капацитета носивости једне GFRP шипке на чупање усвојити исто као и за профилисане челичне шипке постављене у унапред припремљене рупе испуњене лепком. Капацитет носивости једне GFRP шипке на чупање паралелно влакнима дрвета према [48] износи:

$$F_{ax,R} = \pi \cdot d \cdot l_{ef} \cdot f_{k1,k} \quad (7.7)$$

где је:

d – пречник GFRP шипке;

l_{ef} – дужина сидрења GFRP шипке;

$f_{k1,0}$ – носивост лепљеног споја шипке и дрвета на чупање у правцу влакана, која има вредност $f_{k1,0} = 4 \text{ N/mm}^2$ за $l_{ef} \leq 250 \text{ mm}$ према [48].

Како се ради о чупању шипки управно на влакна ову носивост треба редуковати за 10% према препорукама наведеним у раду [50], па је вредност носивости вертикално постављене GFRP шипке на чупање управно на влакна дрвета:

$$f_{k1,90} = 0,9 \cdot f_{k1,0} = 0,9 \cdot 4 = 3,6 \text{ N/mm}^2$$

Вредност капацитета носивости GFRP шипке на чупање управно на влакна дрвета, за пречник $d = 10 \text{ mm}$ и дужину сидрења $l_{ef} = 110 \text{ mm}$ износи:

$$F_{ax,R,f90} = \pi \cdot d \cdot l_{ef} \cdot f_{k1,90} = 12,44 \text{ kN}$$

Под претпоставком да GFRP шипке носе целокупно оптерећење ($k_\alpha = 1$), гранично оптерећење за носаче ојачане двама вертикалним GFRP шипкама постављеним једна до друге (R6-f90 до R10-f90) према [48] износи:

$$F_{max,f90,I} = 2V = 2nF_{ax,R,f90} = 49,8 \text{ kN}$$

У случају носача ојачаних вертикалним шипкама постављеним једна иза друге (R1-f90 до R5-f90) предлаже се увођење ефективног броја средстава за ојачање $n_{ef} = n^{0,9}$. Ефективни број средстава за ојачање треба узимати у обзир само код шипки постављених у низу дуж подужне осе носача, попут ојачања носача

R1-f90 до R5-f90. Након увођења ефективног броја средстава за ојачање, гранично оптерећење за носаче ојачане двама вертикалним GFRP шипкама постављеним у низу има вредност:

$$F_{max,f90,II} = 2V = 2n_{ef} F_{ax,R,f90} = 46,4 \text{ kN}$$

За GFRP шипке постављене под углом од 45° у односу на подужну осу носача, вредност носивости GFRP шипке на чупање у правцу влакна дрвета треба редуковати за 10% према препорукама наведеним у раду [50]. Вредност носивости косо постављене GFRP шипке на чупање под углом у односу на влакна дрвета износи:

$$f_{k1,45} = 0,9 \cdot f_{k1,0} = 0,9 \cdot 4 = 3,6 \text{ N/mm}^2$$

Вредност капацитета носивости косо постављене GFRP шипке на чупање под углом од 45° у односу на влакна дрвета, за пречник $d = 10 \text{ mm}$ и дужину сидрења $l_{ef} = 155 \text{ mm}$ износи:

$$F_{ax,R,f45} = \pi \cdot d \cdot l_{ef} \cdot f_{k1,45} = 17,53 \text{ kN}$$

Гранично оптерећење за носаче ојачане двама косим GFRP шипкама постављеним једна до друге (R6-f45 до R10-f45), уз претпоставку да GFRP шипке носе целокупно оптерећење, износи:

$$F_{max,f45,I} = 2V = 2n F_{ax,R,f45} = 70,1 \text{ kN}$$

У случају носача ојачаних косим шипкама постављеним једна иза друге (R1-f45 до R5-f45) уводи се ефективни број средстава за ојачање $n_{ef} = n^{0,9}$. Гранично оптерећење за носаче ојачане двама косим GFRP шипкама постављеним у низу има вредност:

$$F_{max,f45,II} = 2V = 2n_{ef} F_{ax,R,f45} = 65,4 \text{ kN}$$

У случају већине експериментално испитаних носача Серије R-f, GFRP шипке су имале довољну носивост да, након иницирања пукотине на местима редуције висине попречног пресека дрвених носача, изврше спрезање раздвојених дрвених пресека. Као последица тога, носачи ојачани GFRP шипкама су могли да достигну носивост коју би имали без редуције висине пресека код ослонаца, па је у већини случајева лом уследио због губитка носивости дрвета на савијање, а не услед чупања ојачања из дрвета.

Гранично оптерећење које могу да достигну носачи који немају редуковану висину код ослонаца се може срачунати из израза за савијање просте греде оптерећене двама концентрисаним силама:

$$f_m = \frac{M_{ult}}{W} = \frac{\frac{F_{ult} \cdot e}{2}}{\frac{b \cdot h^2}{6}} \quad (7.8)$$

где је:

f_m – чврстоћа дрвета на савијање (N/mm^2), која износи $f_m = 39,1 \text{ N/mm}^2$ према испитивању извршеном у 5.1.2;

M_{ult} – максимални момент савијања (Nm);

F_{ult} – максимална сила (N);

e – растојање од ослонца до места деловања концентрисане силе (mm),

$$e = 1200 \text{ mm};$$

W – отпорни момент попречног пресека носача (mm^3);

b – ширина попречног пресека носача (mm), $b = 100 \text{ mm}$;

h – висина попречног пресека носача (mm), $h = 220 \text{ mm}$.

Гранично оптерећење, када се узме у обзир носивост на савијање носача без редуковане висине пресека износи:

$$F_{max} = \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot 2 \cdot \frac{f_m}{e} = \frac{100 \cdot 220^2}{6} \cdot 2 \cdot \frac{39,1}{1200} = 52,6 \text{ kN}$$

Поређење експерименталних и аналитичких резултата је извршено тако што су носачи по серијама раздвојени на оне код којих се лом догодио услед смицања и на оне код којих се лом догодио услед савијања. Максимална сила добијена експерименталним испитивањем носача код којих се лом догодио услед смицања упоређена је са граничним оптерећењем добијеним на основу носивости GFRP шипки. Експериментално добијена максимална сила за носаче код којих се лом догодио услед савијања упоређена је са граничним оптерећењем добијеним на основу носивости на савијање носача без редуковане висине пресека. Приказ поређења експерименталних и аналитичких резултата дат је у табелама 7.2 до 7.5. Носач R4-f45 није разматран јер је имао лом прво услед савијања, а затим услед смицања, који се догодио прерано у односу на остале носаче као последица грешака у грађи дрвета.

Табела 7.3 Поређење експерименталних и аналитичких резултата –
Серија R-f90 (R1 - R5)

	Максимална сила F_{max} (kN)	
	Савијање (3 носача)	Смицање (2 носача)
Експериментални резултати	46,5	43,9
Аналитички резултати	52,6	46,4
Разлика (%)	13,1	5,7

Табела 7.4 Поређење експерименталних и аналитичких резултата –
Серија R-f90 (R6 - R10)

	Максимална сила F_{max} (kN)	
	Савијање (3 носача)	Смицање (2 носача)
Експериментални резултати	49,6	52,5
Аналитички резултати	52,6	49,8
Разлика (%)	6,0	5,1

Табела 7.5 Поређење експерименталних и аналитичких резултата –
Серија R-f45 (R1 - R5)

	Максимална сила F_{max} (kN)	
	Савијање (1 носач)	Смицање (3 носача)
Експериментални резултати	41,6	65,0
Аналитички резултати	52,6	65,4
Разлика (%)	26,4	0,6

Табела 7.6 Поређење експерименталних и аналитичких резултата –
Серија R-f45 (R6 - R10)

	Максимална сила F_{max} (kN)	
	Савијање (4 носача)	Смицање (1 носач)
Експериментални резултати	52,9	66,9
Аналитички резултати	52,6	70,1
Разлика (%)	0,6	4,8

Резултати аналитичких прорачуна су показали добро слагање са експерименталним резултатима испитивања носача ојачаних GFRP шипкама. Изузетак је носивост носача R5-f45 (лом услед савијања) где је гранична вредност оптерећења предвиђена аналитичким прорачуном премашила експерименталну вредност за 26,4%. Ово се може објаснити лошим квалитетом дрвета од ког је носач израђен, па је до лома дошло при нижим вредностима оптерећења него што је то био случај код других носача ојачаних GFRP шипкама. Такође, треба имати у виду да аналитичке вредности у већини случајева нису на страни сигурности, односно да дају веће резултате од експерименталних. Поред тога, недостатак овакве анализе резултата је што је облик лома носача непознат унапред. Како би се усавршио овај метод прорачуна неопходна су даља испитивања ради утврђивања тачног капацитета носивости GFRP шипки на чупање.

7.2 Прорачун ојачања за експлоатационо оптерећење

Поступак аналитичког прорачуна ојачања дат у Немачком националном анексу Еврокода 5 [8], објашњен у делу 2.4.1, примењен је на носаче ојачане GFRP шипкама разматране у оквиру експерименталног испитивања у овом раду. Носач је оптерећен једнако подељеним експлоатационим оптерећењем које је срачунато из услова носивости на савијање, према изразу:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{q_d \cdot l^2}{\frac{8}{b \cdot h^2}} \leq f_{m,d} \quad (7.9)$$

где је:

$\sigma_{m,d}$ – прорачунска вредност напона савијања (N/mm^2);

M_d – прорачунски момент савијања просте греде оптерећење једнако подељеним оптерећењем (Nmm);

q_d – прорачунско оптерећење (N/mm);

l – распон носача (mm), $l = 3750 \text{ mm}$;

W – отпорни момент попречног пресека носача (mm^3);

b – ширина попречног пресека носача (mm), $b = 100 \text{ mm}$;

h – висина попречног пресека носача (mm), $h = 220 \text{ mm}$.

$f_{m,d}$ – прорачунска чврстоћа дрвета на савијање (N/mm^2), која се рачуна према:

$$f_{m,d} = \frac{k_h \cdot k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (7.10)$$

где је:

$f_{m,k}$ – карактеристична чврстоћа дрвета на савијање (N/mm^2), која износи
 $f_{m,k} = 22 \text{ N/mm}^2$ за класу дрвета GL22h према [49];

k_{mod} – корекциони коефицијент којим се узима у обзир утицај трајања оптерећења и влажност дрвета, а за краткотрајно оптерећење и експлоатациону класу 2 има вредност $k_{mod} = 0,9$ према [49];

k_h – коефицијент којим се узима у обзир утицај величине елемента на чврстоћу на савијање, а рачуна се према следећем за лепљено ламелирано дрво:

$$k_h = \min \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1} \\ 1,1 \end{array} \right. \text{ за } h \leq 600 \text{ mm}$$

$$k_h = 1 \text{ за } h > 600 \text{ mm}$$

где је h димензија попречног пресека у равни савијања,

за $h = 220 \text{ mm}$ овај коефицијент има вредност $k_h = 1,1$;

γ_M – парцијални коефицијент сигурности за својства материјала, који за лепљено ламелирано дрво има вредност $\gamma_M = 1,3$.

Прорачунско једнако подељено експлоатационо оптерећење, када се узме у обзир прорачунска носивост на савијање носача износи:

$$q_d = \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot \frac{8 \cdot f_{m,d}}{l^2} = \frac{100 \cdot 220^2}{6} \cdot \frac{8 \cdot \frac{1,1 \cdot 0,9 \cdot 22}{1,3}}{3750^2} = 7,7 \text{ N/mm}$$

Прорачунска вредност трансверзалне силе код ослонца износи:

$$V_d = \frac{q_d \cdot l}{2} = \frac{7,7 \cdot 3750}{2} = 14,4 \text{ kN}$$

Прорачунска вредност смичућег напона на овом месту се рачуна према изразу 2.5 и за геометријске карактеристике испитаних носача износи:

$$\tau_d = \frac{1,5V_d}{b_{ef} h_{ef}} = 1,5 \cdot \frac{14400}{0,67 \cdot 100 \cdot 110} = 2,93 \text{ N/mm}^2$$

Прорачунска вредност чврстоће дрвета на смицање $f_{v,d}$ се рачуна према изразу:

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} \tag{7.11}$$

где је:

$f_{v,k}$ – карактеристична чврстоћа дрвета на смицање (N/mm^2), која има вредност

$f_{v,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$ за класу дрвета GL22h према [49];

k_{mod} – корекциони коефицијент којим се узима у обзир утицај трајања оптерећења и влажност дрвета, а за краткотрајно оптерећење и експлоатациону класу 2 има вредност $k_{mod} = 0,9$ према [49];

γ_M – парцијални коефицијент сигурности за својства материјала, који за лепљено ламелирано дрво има вредност $\gamma_M = 1,3$.

Прорачунска вредност чврстоће дрвета на смицање износи:

$$f_{v,d} = \frac{0,9 \cdot 3,5}{1,3} = 2,42 \text{ N/mm}^2$$

Редуковањем прорачунске чврстоће дрвета на смицање фактором k_v (дефинисан изразом 2.6), који за геометријске карактеристике испитаних носача има вредност $k_v = 0,398$, добија се да услов дефинисан изразом 2.5 по граничним стањима није испуњен:

$$\tau_d = 2,93 \text{ N/mm}^2 > k_v f_{v,d} = 0,96 \text{ N/mm}^2$$

Према томе, може се закључити да је неопходно ојачање носача на месту редукације висине попречног пресека. Вредност силе коју треба да прихвати ојачање према изразу 2.8 износи:

$$F_{ax,Ed} = k_\alpha V_d = 0,65 \cdot 14,4 = 9,36 \text{ kN}$$

При чему је фактор k_α израчунат према изразу 2.10 за геометријске карактеристике испитаних носача, односно $\alpha = 0,5$, и има вредност:

$$k_\alpha = 1,3 \left[3(1-\alpha)^2 - 2(1-\alpha)^3 \right] = 1,3 \cdot \left[3 \cdot (1-0,5)^2 - 2 \cdot (1-0,5)^3 \right] = 0,65$$

Потребан број шипки се рачуна према изразу 2.9:

$$F_{ax,Ed} \leq n F_{ax,Rd}$$

Прорачунска вредност капацитета носивости GFRP шипке на чупање управно на влакна се може израчунати према:

$$F_{ax,Rd} = \pi \cdot d \cdot l_{ef} \cdot f_{k1,d,90} \quad (7.12)$$

где је:

d – пречник GFRP шипке;

l_{ef} – дужина сидрења GFRP шипке;

$f_{k1,d,90}$ – прорачунска носивост лепљеног споја шипке и дрвета на чупање управно на влакна која се рачуна као:

$$f_{k1,d,90} = \frac{k_{mod} \cdot f_{k1,k,90}}{\gamma_M} \quad (7.13)$$

где је:

$f_{k1,k,90}$ – карактеристична носивост лепљеног споја шипке и дрвета на чупање управно на влакна (N/mm^2), која има вредност $f_{k1,d,90} = 3,6 \text{ N/mm}^2$, како је израчунато у делу 7.1.3;

k_{mod} – корекциони коефицијент којим се узима у обзир утицај трајања оптерећења и влажност дрвета, а за краткотрајно оптерећење и експлоатациону класу 2 има вредност $k_{mod} = 0,9$ према [49];

γ_M – парцијални коефицијент сигурности за везе остварене механичким спојним средствима, који износи $\gamma_M = 1,3$.

Прорачунска носивост лепљеног споја шипке и дрвета на чупање управно на влакна има вредност:

$$f_{k1,d,90} = \frac{0,9 \cdot 3,6}{1,3} = 2,49 \text{ N/mm}^2$$

Прорачунска вредност капацитета носивости вертикално постављене GFRP шипке на чупање управно на влакна, за пречник $d = 10 \text{ mm}$ и дужину сидрења $l_{ef} = 110 \text{ mm}$, износи:

$$F_{ax,Rd} = \pi \cdot 10 \cdot 110 \cdot 2,49 = 8,60 \text{ kN}$$

Потребан број GFRP шипки је:

$$n \geq \frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}} = 1,1$$

Усвојени број од две вертикалне GFRP шипке у оквиру експерименталних испитивања ојачаних носача у потпуности одговара спроведеном прорачуну ојачања за експлоатационо оптерећење.

Неопходно је додатно размотрити фактор расподеле k_a , јер не узима у обзир крутост средстава за ојачање, већ врши расподелу смичуће силе на месту засека на основу дијаграма смичућих напона који се јављају у дрвеном попречном пресеку. Ради утврђивања израза за прорачун фактора k_a потребно је извршити експериментална испитивања при којима ће се утврдити стварна величина силе коју прихватају средства за ојачање.

7.3 Дискусија резултата

Поступак прорачуна носача са редукованом висином пресека према Еврокоду 5 [7] и Немачком националном анексу Еврокода 5 [8] примењен је на експериментално тестиране носаче, како би се извршило поређење експерименталних и аналитичких резултата.

Прорачун дат у Еврокоду 5 занемарује појаву напона смицања у равни пукотине, који се јавља на месту редуције висине пресека и узима у обзир само напон затезања управно на влакна дрвета. Као последица овога, јавља се разлика у експерименталним и аналитичким резултатима у случају неојачаних носача. Гранично оптерећење добијено аналитичким прорачуном веће је за 7,0% у поређењу са експерименталним резултатима. Сходно томе, потребно је размотрити

израз за фактор редуције k_v којим се узима у обзир концентрација напона на месту нагле промене висине попречног пресека. У складу са разматрањима датим у раду [18] предлог је да се фактор редуције умањи за 20%. Ово умањење фактора редуције k_v даје резултате за гранично оптерећење неојачаних носача на страни сигурности.

Поступак прорачуна смичућег напона на месту редуције висине попречног пресека дат у оквиру Еврокода 5 не предвиђа изразе за прорачун евентуалних ојачања. Као допуна Еврокоду 5 Немачки национални анекс предлаже поступак прорачуна ојачања на месту редуције висине носача. И овај метод прорачуна узима у обзир напон затезања управно на влакна, док занемарује појаву смичућих напона у правцу влакана. Приступ је базиран на идеји да се напон затезања управно на влакана који се јавља на месту нагле промене висине носача расподељује између ојачања и дрвета путем фактора k_a .

У циљу поређења резултата уведена је претпоставка да је фактор $k_a = 1$, односно да ојачање носи целокупно оптерећење. Ова претпоставка је оправдана, с обзиром на то да је поређење вршено за гранично оптерећење при лому, а не за експлоатационо оптерећење. Носач губи носивост на смицање при иницирању пукотине на месту нагле промене висине пресека, а ојачање наставља да носи оптерећење до лома.

У случају ојачања постављеног у низу дуж подужне осе носача (ојачање постављено једно иза другог), уводи се ефективни број средстава за ојачање при прорачуну носивости, као што је случај при прорачуну веза према Еврокоду 5.

Уочава се солидно слагање аналитичких и експерименталних резултата за носивост носача ојачаних завртњевима. Како је лом ових носача скоро увек праћен извлачењем и деформацијом завртњева, може се рећи да је аналитички прорачун са коефицијентом $k_a = 1$ довољно тачан.

У случају носача ојачаних GFRP шипкама, услед непостојања прорачунског поступка, усвојен је метод дат у Немачком националном анексу Еврокода 5 који се односи на прорачун носача са редукованом висином код ослонца ојачаних профилисаним челичним шипкама постављеним у унапред припремљене рупе испуњене лепком. Код експериментално испитаних носача ојачаних GFRP шипкама, у већини случајева ојачање је имало довољну носивост да изврши

спрезање дрвеног пресека након формирања иницијалне пукотине. Ови носачи су могли да достигну своју пуну носивост на савијање, као да нема редуције висине пресека, што није био случај код завртњева. Поређење експерименталних и аналитичких резултата је извршено тако што су носачи ојачани шипкама по серијама раздвојени на оне код којих се лом догодио услед смицања и на оне код којих се лом догодио услед савијања. Недостатак овакве анализе резултата је што облик лома није познат при димензионисању носача.

Може се приметити солидно слагање аналитичких и експерименталних резултата за носивост носача ојачаних шипкама. Међутим, аналитичке вредности у већини случајева нису на страни сигурности, те даља испитивања треба усмерити ка утврђивању тачног аналитичког метода прорачуна носача са редукованом висином пресека који су ојачани полимерним шипкама на бази стаклених или других влакана.

Поступак прорачуна ојачања према Немачком националном анексу Еврокода 5 може се применити приликом прорачуна GFRP шипки као ојачања носача са редукованом висином пресека за експлоатационо оптерећење. Треба размотрити могућност дефинисања израза за фактор расподеле k_a који би узео у обзир и крутост самог ојачања.

Може се закључити да у зависности од типа ојачања које се примењује код носача са редукованом висином попречног пресека, треба адекватно изабрати аналитички прорачунски модел. Односно, неопходно је водити рачуна о томе да ли су употребљена средства за ојачање довољно крута и да ли је квалитет везе успостављене са дрветом довољно добар да може да се изврши спрезање дрвеног попречног пресека, након иницијалног формирања пукотина.

8 НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА

Тродимензионални модели експериментално испитаних неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца на бази методе коначних елемената направљени су у комерцијалном софтверском пакету *Abaqus 6.13* [51].

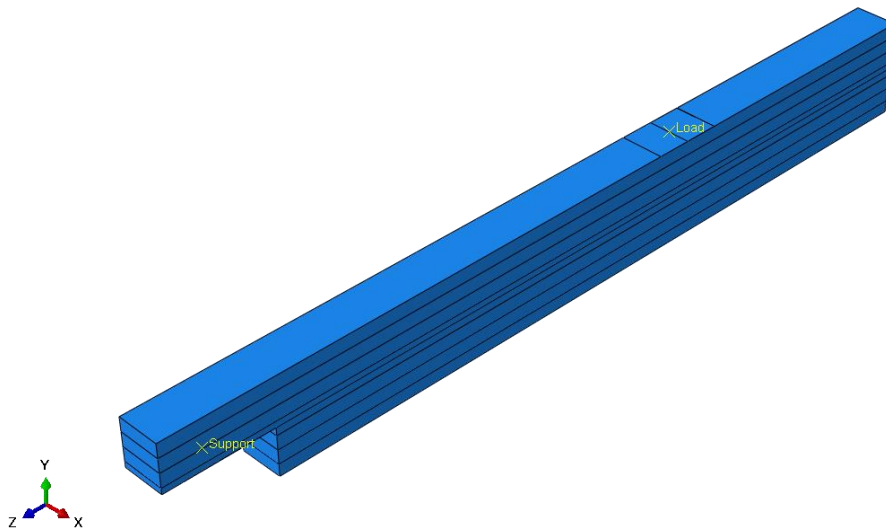
Адекватно нумеричко моделирање има предност над експерименталним испитивањима у томе што захтева знатно мање ресурса, у смислу финансијских трошкова, времена и простора. Међутим, како би нумеричка анализа била прецизна, неопходна је калибрација и верификација модела на основу експерименталних и аналитичких истраживања. У том циљу, у овом раду су презентовани тродимензионални нумерички модели испитаних неојачаних и ојачаних носача, који након верификације кроз експериментално добијене резултате могу бити употребљени за даље параметарске анализе (варирање геометрије, материјалних карактеристика и система и положаја ојачања).

У наставку је дат опис нумеричких модела укључујући геометрију, усвојене карактеристике материјала, граничне услове, оптерећење, моделирање ојачања, поделу на коначне елементе и моделирање кохезивне зоне.

8.1 Опис нумеричког модела

8.1.1 Геометријске карактеристике нумеричког модела

Геометријске карактеристике модела у потпуности одговарају геометрији експериментално испитаних носача. Слика 8.1 приказује изглед модела неојачаних носача (Серија U) у *Abaqus*-у. Модел је направљен тако да су искоришћени услови симетрије у z правцу, па је анализа извршена за половину прости греде. Како је ојачање постављено дуж подужне осе носача, није коришћена симетрија у x правцу. Геометрија ојачаних носача је иста као и геометрија неојачаних са додатим завртњевима и GFRP шипкама, чији положај и димензије одговарају експериментално испитаним носачима Серија R-s и R-f.

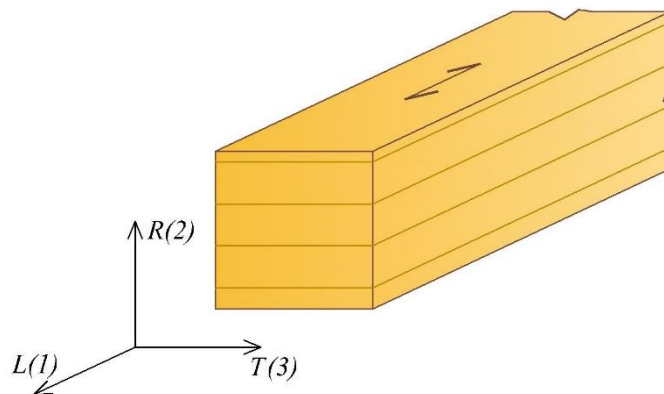


Слика 8.1 Изглед модела неојачаног носача формираног у Abaqus-у

8.1.2 Карактеристике материјала у нумеричком моделу

Примена адекватних конститутивних модела материјала је кључна при нумеричком моделирању носача, како би се добило очекивано механичко понашање елемената. Како је лом код свих испитаних носача у овом раду достигнут у линеарно еластичној области понашања (није долазило до пластификације притиснутих влакана), линеарно еластични конститутивни модел је сасвим адекватан за моделирање лепљеног ламелираног дрвета.

Дрво је моделирано као ортотропни материјал, са различитим карактеристикама у сва три међусобно ортогонална правца. Правци главних оса, односно оријентација влакана приказани су на слици 8.2. Словима L , R и T су означени лонгитудинални, радијални и тангенцијални правац, редом.



Слика 8.2 Правци главних оса

Лонгитудинални модул еластичности је одређен експериментално, као што је приказано у поглављу 5.1.2. Усвојена вредност износи $E_L = 10750$ МПа. Остале константе су израчунате према препоруци датај у [52] где је однос између модула еластичности и модула клизања дефинисан као:

$$E_L : E_R : E_T \approx 20 : 1,6 : 1 \quad (8.1)$$

$$G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} \approx 10 : 9,4 : 1 \quad (8.2)$$

$$E_L : G_{LR} \approx 14 : 1 \quad (8.3)$$

Вредности *Poisson*-ових коефицијената су такође усвојене према [52], за меко дрво. Усвојене карактеристике дрвета као материјала у оквиру нумеричке анализе носача са редукованом висином пресека код ослонаца дате су у табели 8.1.

Табела 8.1 Карактеристике дрвета као материјала примењене у нумеричкој анализи

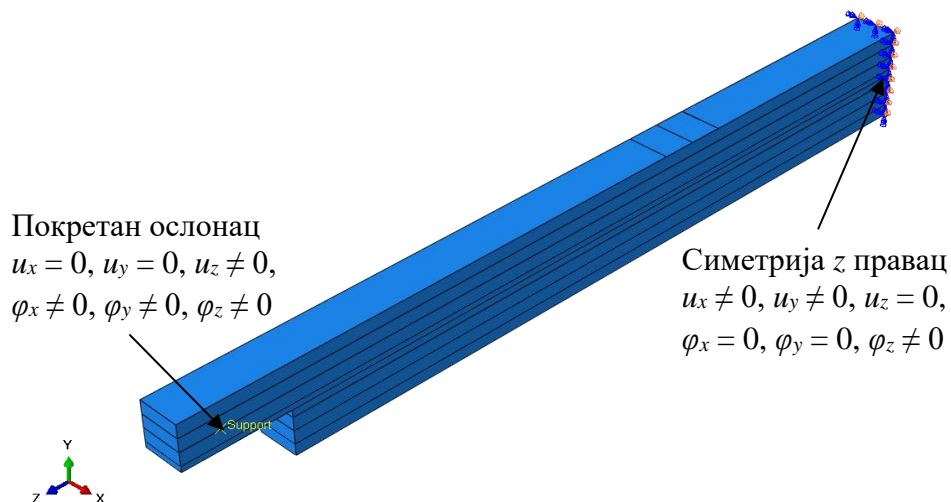
E_L (N/mm ²)	E_R (N/mm ²)	E_T (N/mm ²)	G_{LR} (N/mm ²)	G_{LT} (N/mm ²)	G_{RT} (N/mm ²)	ν_{LR} (-)	ν_{LT} (-)	ν_{RT} (-)
10 750	860	538	768	724	77	0,37	0,42	0,47

Челични елементи, односно подложне плочице на местима ослонаца и на местима уношења оптерећења, моделирани су као линеарно еластични изотропни материјал са модулом еластичности од $E = 210$ ГПа и *Poisson*-овим коефицијентом од $\nu = 0,3$.

Понашање завртњева је усвојено као еласто-пластично, док су GFRP шипке моделиране са линеарно еластичним понашањем. У случају завртњева, усвојене су материјалне карактеристике дате од стране увозника и имају следеће вредности: модул еластичности $E = 210$ ГПа, *Poisson*-ов коефицијент $\nu = 0,3$, граница развлачења $f_y = 300$ МПа и чврстоћа на затезање $f_u = 500$ МПа. GFRP шипке су моделиране са материјалним карактеристикама добијеним у оквиру експерименталног испитивања описаног у поглављу 5.3.1: модул еластичности $E = 40$ ГПа и чврстоћа на затезање $f_t = 890$ МПа. *Poisson*-ов коефицијент за GFRP шипке је усвојен из литературе као $\nu = 0,25$.

8.1.3 Гранични услови у нумеричком моделу

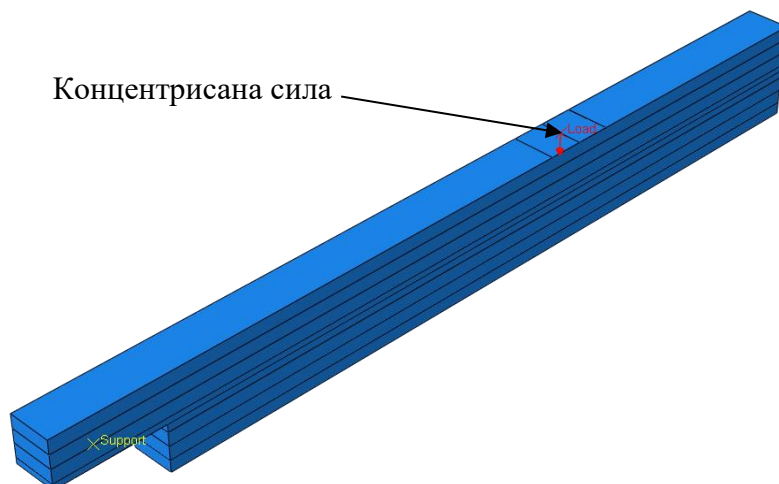
Као што је већ речено, моделирана је половина просте греде и искоришћена је симетрија у z правцу, па су задати гранични услови симетрије на половини распона. Ослонац на крају носача је моделиран као покретан који спречава померања носача у вертикалном правцу. Омогућено је померање носача у подужном правцу, као што је био случај и при експерименталном испитивању. На месту ослонца моделирана је челична плочица димензија $5 \times 100 \times 160 \text{ mm}$, што одговара извршеном експерименталном испитивању. Ова челична плочица на ослонцу, као и плочица испод тачке уношења оптерећења, повезана је са дрвеним носачем тако да нема релативних померања и обртања између носача и плочица (*tie constraint*). Слика 8.3 приказује примењене граничне услове у нумеричком моделу.



Слика 8.3 Гранични услови модела

8.1.4 Оптерећење у нумеричком моделу

У оквиру нумеричке анализе, оптерећење је задато у виду концентрисане силе која делује у трећини укупног распона, како би начин задавања оптерећења одговарао извршеним експерименталним испитивањима (слика 8.4). Ова сила се уноси преко челичне плочице, чије су димензије $10 \times 100 \times 160 \text{ mm}$, како би се спречила концентрација напона на месту уношења оптерећења, као што је учињено и при експерименталном испитивању носача. Оптерећење је задато у једном кораку (*Step*), који је подељен на инкременте, и расте линеарно зависно од протеклог времена анализе.



Слика 8.4 Оптерећење задато у моделу

8.1.5 Нумеричко моделирање ојачања

Средства за ојачање (завртњеве и GFRP шипке) су моделирана као једнодимензионални *beam* елементи, у складу са препорукама датим у раду [53]. *Oudjene* и други аутори [53] анализирали су могућности нумеричког моделирања самоуграђујућих завртњева као ојачања носача са редукованом висином пресека код ослонца у софтверском пакету *Abaqus*. Разматрано је моделирање завртњева у виду тродимензионалних *solid* елемената и једнодимензионалних *beam* елемената. Након поређења нумерички и експериментално добијених дијаграма оптерећење - угиб, дошли су до закључка да су резултати приближно исти, без обзира на усвојен тип елемената при моделирању ојачања. Међутим, моделирање завртњева у виду тродимензионалних *solid* елемената знатно компликује и успорава нумеричку анализу, те је препоручено да се усвоји једноставнији приступ, односно *beam* елементи, што је и учињено у оквиру ове дисертације.

При нумеричком моделирању се усваја идеална веза између ојачања и дрвета. Како би се поставило ојачање унутар пресека носача искоришћена је опција *embedded region* (попут моделирања арматуре код армиранобетонских елемената), при чему су завртњеве и GFRP шипке усвојени као „*the guest*“, а дрвени носач као „*the host*“ регион.

Усвојене геометријске карактеристике и положај ојачања при нумеричкој анализи носача у потпуности одговарају експерименталном испитивању. На сликама 8.5 до 8.10 су приказани развијени тродимензионални нумерички модели ојачаних серија носача.



Слика 8.5 МКЕ модел – Серија R-s90



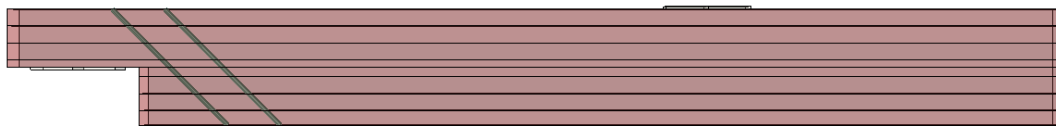
Слика 8.6 МКЕ модел – Серија R-s45



Слика 8.7 МКЕ модел – Серија R-f90 (R1 - R5)



Слика 8.8 МКЕ модел – Серија R-f90 (R6 - R10)



Слика 8.9 МКЕ модел – Серија R-f45 (R1 - R5)

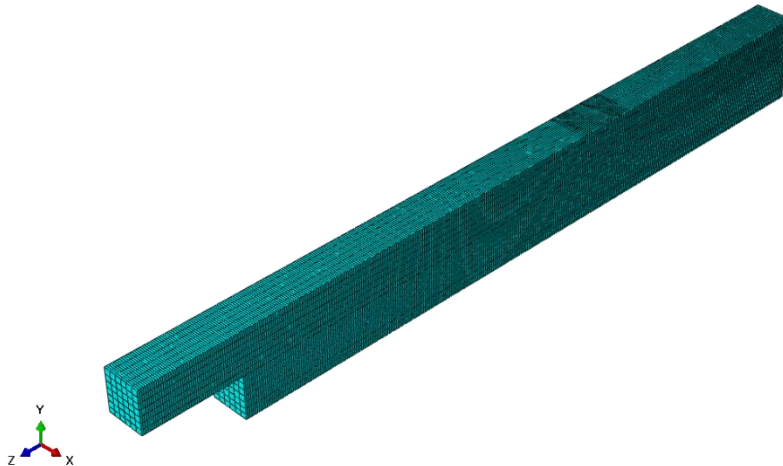


Слика 8.10 МКЕ модел – Серија R-f45 (R6 - R10)

8.1.6 Избор коначних елементата у нумеричком моделу

Коначни елементи на које је подељен лепљени ламелирани дрвени носач су *solid* C3D8R – просторни 3D коначни елементи са 8 чворова и редукованом интеграцијом који имају 6 степени слободе (три померања и три обртања). Величина коначних елемената је изабрана тако да се свака ламела по висини састоји од два елемента (16 mm), док је финија мрежа усвојена на местима ослонаца и уношења оптерећења, због проблема концентрације напона. Коначни елементи на које су подељене челичне плочице су правоугаони плочасти (*shell*) елементи са 4

чвора и редукованом интеграцијом – S4R. *Shell* елементи се обично користе када је једна димензија знатно мања од осталих, као што је то случај код челичних плочица. Усвојена величина коначних елемената за челичне плочице је 5 mm. Подела модела на коначне елементе приказана је на слици 8.11.



Слика 8.11 Подела модела на коначне елементе

Као што је већ речено, средстава за ојачање (завртњеве и GFRP шипке) усвојена су као *beam* елементи – B31. Величина коначних елемената на које су подељени завртњеве и GFRP шипке износила је 8 mm, како би се поклопили чворови носача и ојачања. Такође, задат је и „физички радијус дејства“ средстава за ојачање (одговара пречнику завртњева и GFRP шипки, односно 10 mm). Чворови мреже коначних елемената ојачања су повезани са чворовима мреже коначних елемената носача који су обухваћени радијусом дејства.

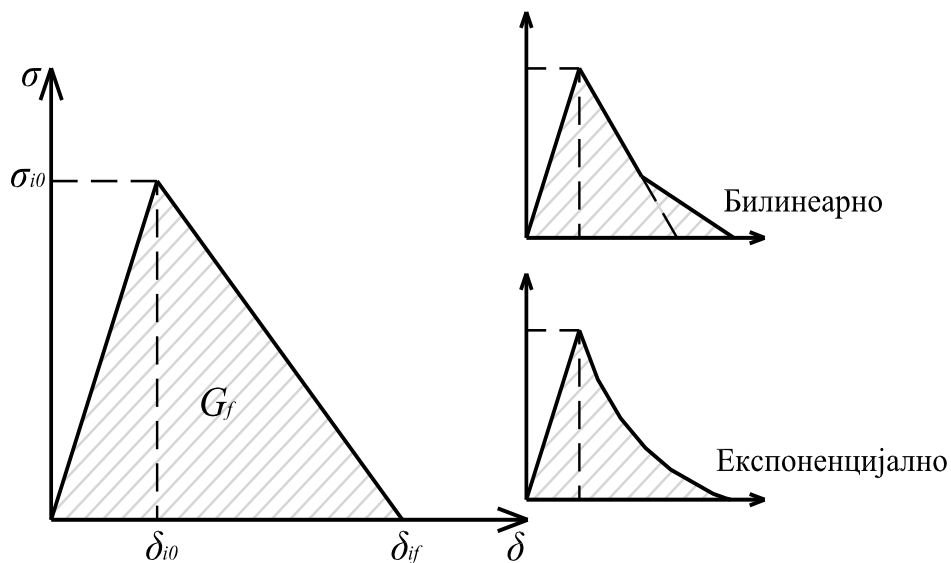
8.1.7 Нумеричко моделирање кохезивне зоне

Отварање и раст пукотина код лепљених ламелираних дрвених носача са редукованом висином пресека код ослонаца подвргнутих краткотрајном оптерећењу симулиран је коришћењем приступа нелинеарне механике лома помоћу опције *Cohesive Zone Modelling* (CZM) у софтверском пакету *Abaqus 6.13*.

Приликом извршених експерименталних испитивања неојачаних носача на савијање, пукотине су инициране на месту нагле промене висине пресека и пропагирале су у правцу влакана дрвета, што одговара облику лома I (отварање пукотина). Пошто је путања пукотине позната из експерименталних испитивања, подручје лома се може адекватно описати моделирањем кохезивне зоне (CZM), где

се лом елемената одликује прогресивном деградацијом крутости материјала која се покреће процесом оштећења насталих услед иницирања пукотина.

Феномен раста пукотина и последично оштећење дрвета може се описати на следећи начин. У току процеса наношења оптерећења, однос оптерећења и померања остаје линеарно еластичан у првом узлазном делу криве (слика 8.12). Како се оптерећење приближава критичним вредностима долази до првих појава оштећења у дрвету (микро-пукотине и премошћавање влакана). Када се достигне максимално оптерећење, почиње да се развија локализовани процес лома. Након тога, све додатне деформације се одвијају у подручју лома, док се материјал изван те зоне понаша еластично. При моделирању кохезивне зоне, претпоставља се да механизми деградације у подручју лома остају у дискретној линији или равни и представљени су односом напон - померање који дефинише „омекшавање“ материјала. За квази-круте материјале као што је дрво, најчешће коришћени закони оштећења су линеарни, би-линеарни или експоненцијални (слика 8.12). Параметри који карактеришу CZM криву напон - померање су критична кохезивна чврстоћа и енергија лома G_f , која графички приказано представља подручје испод криве. Механичка својства изван подручја лома се могу дефинисати уобичајеном кривом напон - дилатација, док се унутар подручја лома мора користити крива напон - померање. У оквиру овог рада коришћен је експоненцијални закон оштећења материјала при нумеричком моделирању носача.



Слика 8.12 Дијаграми напон - померање за кохезивну зону

Напонско стање у кохезивној зони се уопштено дефинише као:

- Пре иницирања оштећења у виду пукотине, вектор напона σ је линеарно зависан од матрице крутости, тако да кохезивна зона има исто понашање као и остатак носача:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{bmatrix} = K \delta \quad (8.4)$$

где су:

$\sigma_n, \sigma_s, \sigma_t$ – вредности номиналних напона у нормалном и два смичућа правца (у односу на раван пукотине);

$\delta_n, \delta_s, \delta_t$ – вредности размицања тачака у равни пукотине;

K – матрица крутости у кохезивној зони (у равни пукотине).

Будући да се у овом раду занемарује интеракција нормалних и смичућих компоненти, вандијагонални чланови матрице крутости K су једнаки нули.

- Током „омекшавања“ материјала, вектор напона σ се дефинише помоћу матрице параметара оштећења (*damage parameters*) D :

$$\sigma = (I - D) \bar{\sigma} \quad (8.5)$$

где је:

$\bar{\sigma}$ – вектор напона срачунат из линеарно еластичног закона, без оштећења;

I – јединична матрица;

D – дијагонална матрица која садржи параметре оштећења (*damage parameters*) d_i ($i = n, s, t$). Ови параметри су функција померања δ_i и максималног размицања тачака $\delta_{if} = \delta_{max}$ за део криве напон - померање који се односи на омекшавање материјала, као што је приказано на слици 8.12. Параметри d_i имају вредности $0 < d_i < 1$.

Компоненте напона се у овом случају могу изразити као:

$$\sigma_n = \begin{cases} (1 - D) \bar{\sigma}_n, & \bar{\sigma}_n \geq 0 \\ \bar{\sigma}_n & \text{нема оштећења у случају притиска} \end{cases} \quad (8.6)$$

$$\sigma_s = (I - D) \bar{\sigma}_s \quad (8.7)$$

$$\sigma_t = (I - D) \bar{\sigma}_t \quad (8.8)$$

- За подручје померања изван приказане криве на слици 8.12: $\sigma = 0$.

Иницирање оштећења се дефинише почетком деградације материјала. Процес деградације почиње када напони задовоље одређени критеријум иницирања оштећења, односно пукотине. У софтверском пакету *Abaqus 6.13* доступно је неколико оваквих критеријума. Најчешће коришћени су:

- Критеријум максималног номиналног напона. Оштећење, односно пукотина, се иницира када је задовољен следећи услов:

$$\max \left\{ \frac{\langle \sigma_n \rangle}{\sigma_{n0}}, \frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}}, \frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}} \right\} = 1 \quad (8.9)$$

- Квадратни критеријум номиналног напона. Оштећење, односно пукотина, се иницира када је задовољен следећи услов:

$$\left\{ \frac{\langle \sigma_n \rangle}{\sigma_{n0}} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}} \right\}^2 = 1 \quad (8.10)$$

где су:

σ_{n0} , σ_{s0} , σ_{t0} – максималне вредности номиналних напона када је деформација у правцу управном на раван пукотине, или у првом или другом смичућем правцу.

У оквиру овог рада примењен је критеријум максималног номиналног напона при нумеричком моделирању носача. Пропагација пукотине је усвојена у *RL* равни (слика 2.7), што одговара извршеним експерименталним испитивањима. Узимајући обележавање из *Abaqus*-а, крутост у кохезивној зони (K_{nn} , K_{ss} , K_{tt}), номинални напони (σ_n , σ_s , σ_t) и енергија лома (G_f) су улазни параметри CZM модела. Крутост у кохезивној зони, која представља однос номиналних напона и размицања тачака у равни пукотине, експериментално се одређује на узорцима који су описани у поглављу 2.2.2. У одсуству експерименталних резултата, вредности крутости у кохезивној зони су усвојене након калибрације модела неојачаних носача, односно након неколико анализа извршених са различитим вредностима ових параметара, тако да добијени резултати најбоље одговарају експериментално добијеним кривама оптерећење - угиб. Номинални напони су усвојени из експерименталних

испитивања дрвета на смицање и затезање управно на влакна, датих у поглављима 5.1.3 и 5.1.4. Енергија лома је усвојена на основу препоруке дате у оквиру рада [53].

Усвојене вредности параметара при моделирању кохезивне зоне лепљених ламелираних дрвених носача са редукованом висином пресека код ослонаца дате су у табели 8.2.

Табела 8.2 Параметри кохезивне зоне

K_{nn} (N/mm ³)	K_{ss} (N/mm ³)	K_{tt} (N/mm ³)	σ_n (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	G_f (-)
20	20	20	1,15	5,85	5,85	0,45

8.1.8 Нумерички прорачун

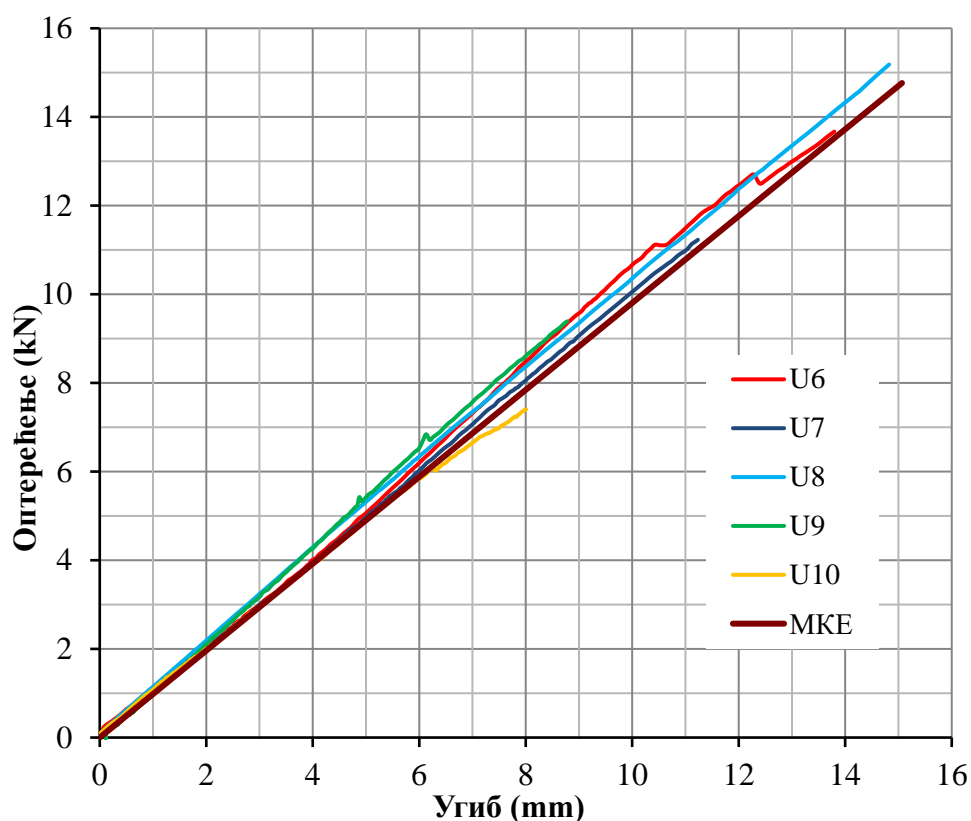
Анализа неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца спроведена је статичким прорачуном *Abaqus/Standard solver*. Овај *solver* се користи за статичку анализу, када је неопходан тачан и прецизан одговор у смислу напона и дилатација, као што је случај у овом раду.

8.2 Резултати нумеричке анализе

Нумерички резултати упоређени су са резултатима експерименталних испитивања како би се извршила верификација предложених тродимензионалних модела на бази методе коначних елемената развијених у комерцијалном софтверском пакету *Abaqus 6.13*.

8.2.1 Неојачани носачи – Серија U

Глобални одговори неојачаних носача са редукованом висином пресека у смислу оптерећење - угиб у средини носача добијени експерименталним испитивањима и нумеричком анализом дати су на слици 8.13. Нумеричко предвиђање за понашање неојачаних носача је показало добро слагање са експериментално добијеним резултатима. Симулиран одговор носача у оквиру нумеричке анализе је потпуно линеарно еластичан, као што је то био случај и код експерименталног испитивања.



Слика 8.13 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију U (експериментални и нумерички резултати)

Поређење облика лома добијених нумеричком анализом и експерименталним испитивањем приказано је на слици 8.14. Види се да нумерички предвиђени облик лома одговара експерименталном. Достицање задатог критеријума лома, односно прекорачење чврстоће на затезање управно на влакна дрвета је и у случају нумеричке анализе изазвало прекомерно отварање пукотине и коначно лом носача са редукованом висином пресека код ослонца. Овакав лом одговара облику лома I (лом услед отварања пукотине).



а) Експеримент



б) MKE

Слика 8.14 Облик лома носача Серије U – отварање пукотине

Резултати нумеричке анализе у смислу максималног оптерећења, крутости и угиба у средини носача упоређени су са средњим вредностима експериментално добијених резултата за неојачне носаче Серије U у табели 8.3.

Табела 8.3 Поређење експерименталних и нумеричких резултата – Серија U

	Максимална сила F_{max} (kN)	Угиб у средини при максималној сили w (mm)	Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ kNmm ²)
Експериментални резултати	12,8	11,5	9,19
Нумерички резултати	14,8	15,1	8,93
Разлика (%)	15,3	31,0	2,8

Што се тиче граничног оптерећења, разлика између резултата теоријског модела и експеримента је 15,3%. Нумеричка вредност максималног оптерећења је виша од експерименталне, што је очекивано обзиром на реално понашање дрвета као материјала, које је често непредвидиво услед различитих дефеката који постоје у дрвету (кврга и слично). Такође, при експерименталном испитивању се јавио велики коефицијент варијације од чак 25,2% који је последица раног лома појединих носача (узорци U9 и U10), те нумеричка вредност максималног оптерећења одговара неојачаним носачима који су показали већу носивост (узорци U6, U7 и U8).

Нумерички модел је преценио угиб у средини носача при максималном оптерећењу (разлика од 31,0%). Ово се може објаснити чињеницом да је при експерименталном испитивању коефицијент варијације за угиб у средини био 26,6% (опет последица раног лома носача U9 и U10).

Крутост носача на савијање при анализи нумеричких резултата је одређена као и код анализе експерименталних резултата, на основу израза 6.1 за угиб у средини носача и за област између $0,1F_{max}$ и $0,4F_{max}$. Разлика у крутости неојачаних носача између експериментално и нумерички добијене вредности је свега 2,8%. Варијабилност модула еластичности ламела дрвета је узрок ове незнатне разлике.

Напон затезања управно на влакна дрвета на месту нагле промене висине носача је износио $1,15 \text{ N/mm}^2$ при отварању пукотине, што и одговара задатој вредности овог напона при моделирању кохезивне зоне носача (слика 8.15).



Слика 8.15 Тренутак отварања пукотине носача Серије U при напону затезања управно на влакна $\sigma_n = 1,15 \text{ N/mm}^2$

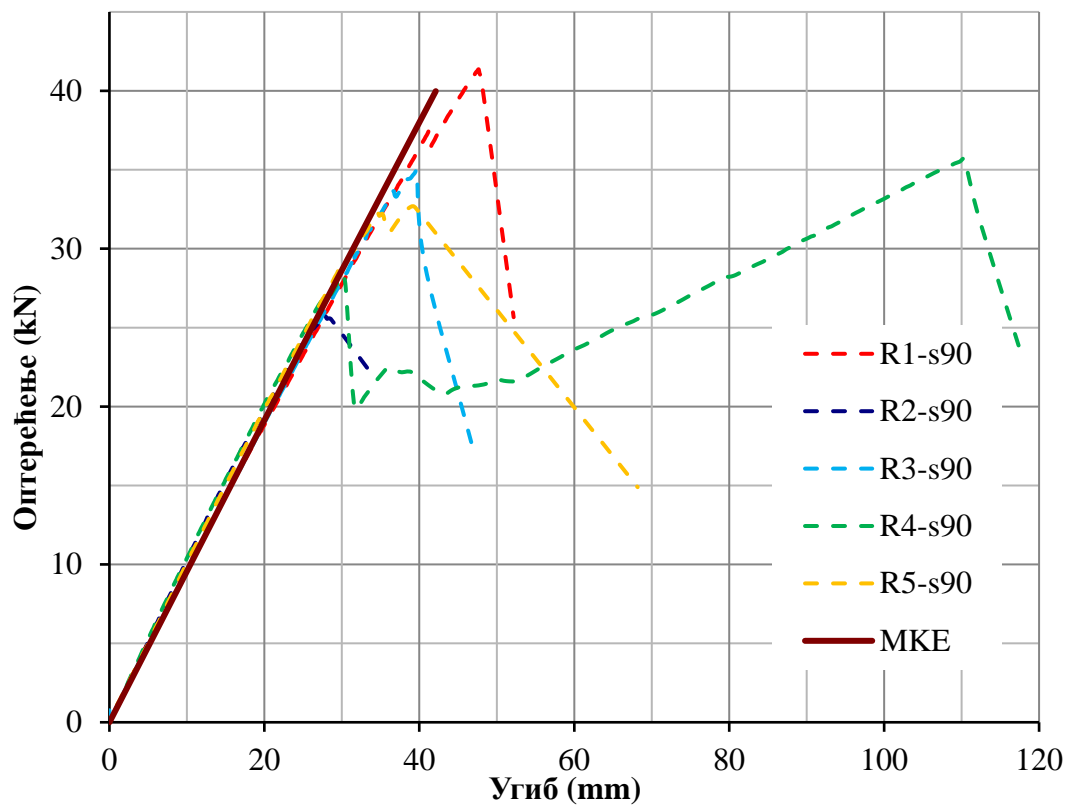
Размицање тачака за неојачне носаче у тренутку лома износило је $0,14 \text{ mm}$ при нумеричком моделирању, док су експериментално добијене вредности биле од $0,1$ до $0,2 \text{ mm}$. Уочава се добро слагање нумеричких и експерименталних резултата и при анализи отварања пукотине.

8.2.2 Носачи ојачани завртњевима – Серије R-s90 и R-s45

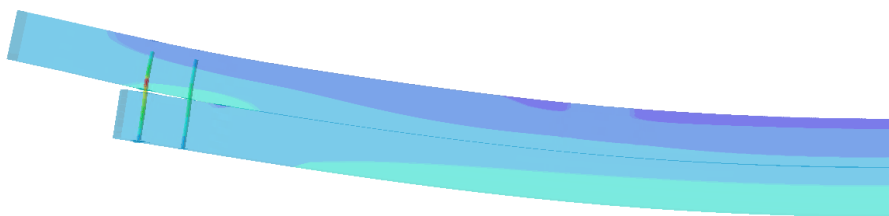
8.2.2.1 Серија R-s90

Глобални одговори носача са редукованом висином пресека ојачаних вертикално постављеним завртњевима у смислу оптерећење - угиб у средини носача добијени експерименталним испитивањима и нумеричком анализом дати су на слици 8.16. Као и у случају неојачних узорака, нумеричко предвиђање за понашање носача Серије R-s90 показало је добро слагање са експериментално добијеним резултатима.

При нумеричкој симулацији, лом је дефинисан као тренутак када пукотина пропагира и преко другог завртња, што се може сматрати да одговара извлачењу завртњева и прекомерном отварању пукотине услед смицања при експерименталном испитивању. Облик лома добијен нумеричком анализом носача ојачаних вертикалним завртњевима приказан је на слици 8.17. Нумерички предвиђени облик лома одговара експерименталном, односно доминантан облик лома је губитак носивости услед прекорачења чврстоће на смицање – облик лома II. Расподела смичућих напона при лому је приказана на слици 8.18.



Слика 8.16 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-s90 (експериментални и нумерички резултати)



Слика 8.17 Облик лома носача Серије R-s90 – MKE (расподела σ_n напона)



Слика 8.18 Смичући напони у носачу са вертикалним завртњевима, тренутак пропагације пукотине преко другог завртња $\sigma_s = 5,85 \text{ N/mm}^2$

Иницијално отварање пукотине се десило при истој сили од 14,8 kN као и код неојачаних носача. Након тога се активирају завртњеви који носе оптерећење до тренутка прекомерне пропагације пукотине преко другог завртња. Завртњеви су

доживели пластичну деформацију као и у случају експерименталног испитивања, након достизања границе течења од $f_y = 300$ МПа, али је први завртањ доживео знатно већу деформацију, док се други завртањ активирао у знатно мањој мери пре лома носача (слика 8.17).

У табели 8.4 приказани су резултати нумеричке анализе у смислу максималног оптерећења, крутости и угиба у средини носача и упоређени су са средњим вредностима експериментално добијених резултата за носаче ојачане вертикалним завртњевима – Серија R-s90.

Табела 8.4 Поређење експерименталних и нумеричких резултата – Серија R-s90

	Максимална сила F_{max} (kN)	Угиб у средини при максималној сили w (mm)	Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ kNmm ²)
Експериментални резултати	35,9	52,9	9,20
Нумерички резултати	40,0	42,1	8,76
Разлика (%)	11,4	20,4	4,8

Разлика између граничног оптерећења добијеног из нумеричког модела и експеримента је 11,4%. Нумеричка вредност максималног оптерећења је виша од експерименталне, али је блиска лому носача R1-s90 који је имао највећу носивост у овој серији. Узимајући у обзир, поред реалног понашања дрвета као материјала, и могуће грешке при уградњи завртњева, очекивано је да сила при којој долази до лома при експерименталном испитивању буде нижа од нумеричке вредности. Дакле, при нумеричком моделирању се усваја идеално понашање материјала и идеална веза између ојачања и дрвета, што није случај при експерименталном истраживању.

Нумерички модел је предвидео угиб у средини носача при максималном оптерећењу мањи за 20,4% од средњег експерименталног угиба. С обзиром да је коефицијент варијације при експерименталном испитивању угиба био чак 62,1% и да је носач R4-s90 имао угиб од 110,4 mm (више него дупло већи од осталих носача), овакав резултат је очекиван.

Крутост на савијање при нумеричкој анализи носача ојачаних вертикалним завртњевима је одређена на исти начин као и код експерименталног испитивања (израз 6.1). Нумерички добијена вредност крутости на савијање се разликује за 4,8% од експерименталне вредности. Као и у случају неојачане серије, варијабилност модула еластичности ламела дрвета је узрок ове мале разлике.

Напон затезања управно на влакна дрвета на месту нагле промене висине носача је износио $1,15 \text{ N/mm}^2$ при отварању пукотине, као и код неојачане серије. Напон смицања у дрвету при прекомерном отварању пукотине је износио $5,85 \text{ N/mm}^2$, што одговара задатој вредности овог напона при моделирању кохезивне зоне носача (слика 8.18).

Размицање тачака за носаче ојачане вертикалним завртњевима у тренутку лома износило је $0,7 \text{ mm}$ при нумеричком моделирању, што одговара експериментално добијеним вредностима које су износиле од $0,6$ до $1,6 \text{ mm}$.

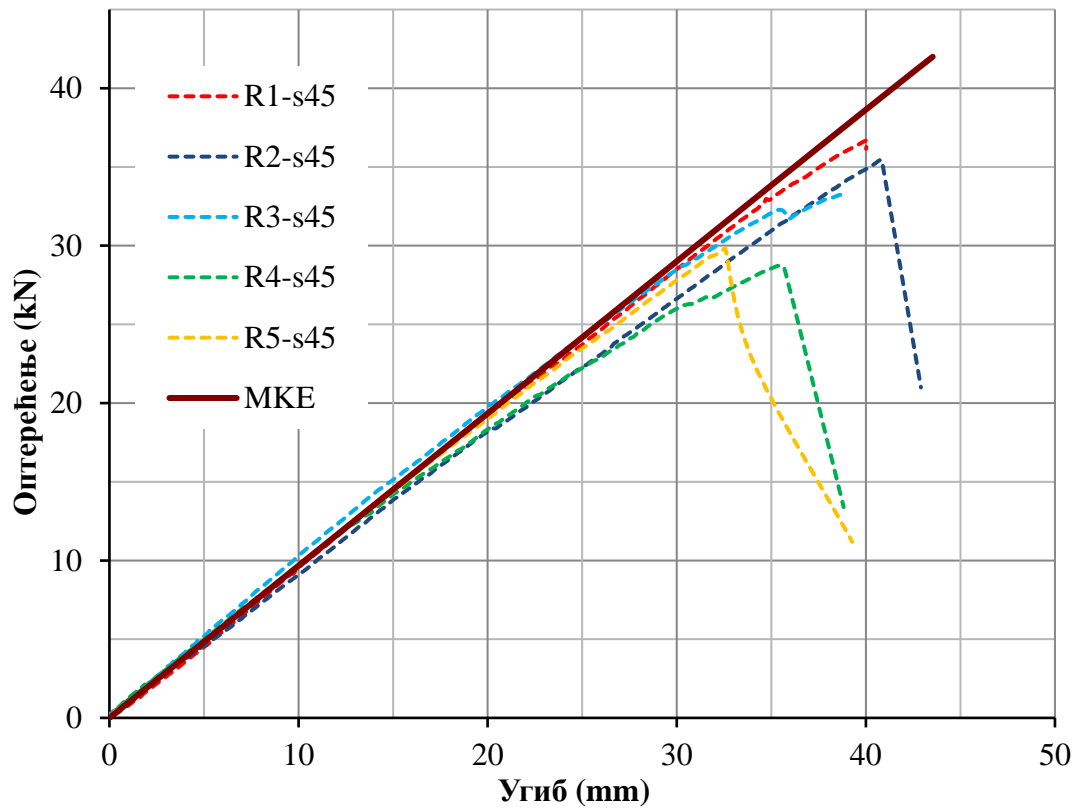
8.2.2.2 Серија R-s45

Глобални одговори носача са редукованом висином пресека ојачаних косо постављеним завртњевима (Серија R-s45) у смислу оптерећење - угиб у средини носача добијени експерименталним испитивањима и нумеричком анализом дати су на слици 8.19.

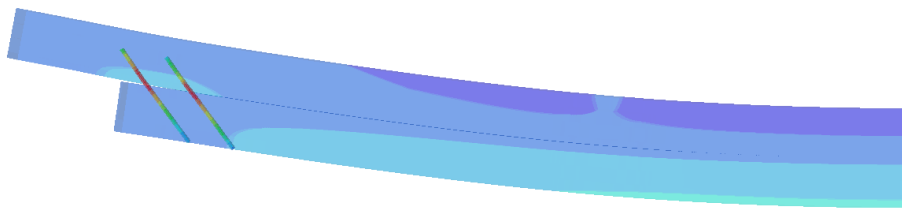
Тренутак лома при нумеричком моделирању носача са косим завртњевима је дефинисан као и код носача са вертикалним завртњевима, односно када пукотина пропагира и преко другог завртња. Облик лома добијен нумеричком анализом носача ојачаних косим завртњевима приказан је на слици 8.20. Нумерички предвиђени облик лома одговара експерименталном, тј. доминантан облик лома је губитак носивости услед прекорачења чврстоће на смицање – облик лома II, као и у случају вертикално постављених завртњева. Расподела смичућих напона при лому је приказана на слици 8.21.

Иницијално отварање пукотине се десило при истој сили од $14,8 \text{ kN}$ као и код неојачаних носача и носача Серије R-s90. Након иницирања пукотине се активирају завртњеви који носе оптерећење до тренутка прекомерне пропагације пукотине преко другог завртња, као што је био случај и код вертикалног ојачања. Завртњеви су доживели пластичну деформацију када су достигли дефинисану границу течења од $f_y = 300 \text{ MPa}$. У случају носача ојачаних косим завртњевима (Серија R-s45), други

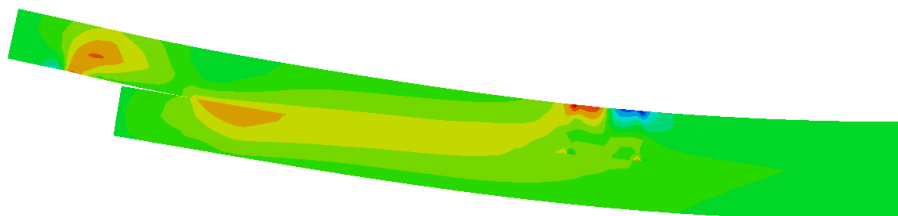
завртња је активаран у знатно већој мери него што је то био случај код носача ојачаних вертикалним завртњевима (Серија R-s90), што се и види на слици 8.20.



Слика 8.19 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-s45 (експериментални и нумерички резултати)



Слика 8.20 Облик лома носача Серије R-s45 – MKE (расподела σ_n напона)



Слика 8.21 Сличући напони у носачу са косим завртњевима, тренутак пропагације пукотине преко другог завртња $\sigma_s = 5,85 \text{ N/mm}^2$

Резултати нумеричке анализе у смислу максималног оптерећења, крутости и угиба у средини носача упоређени су средњим вредностима експериментално добијених резултата за носаче ојачане косо постављеним завртњевима Серије R-s45 у табели 8.5.

Табела 8.5 Поређење експерименталних и нумеричких резултата – Серија R-s45

	Максимална сила F_{max} (kN)	Угиб у средини при максималној сили w (mm)	Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ kNmm ²)
Експериментални резултати	34,1	42,3	8,77
Нумерички резултати	42,0	43,5	8,81
Разлика (%)	23,1	2,8	0,5

Што се тиче граничног оптерећења, разлика између резултата теоријског модела и експерименталног испитивања је око 23%. Нумеричка вредност максималног оптерећења је виша од експерименталне. С обзиром да при нумеричкој анализи није моделирано чупање завртњева услед недовољне дубине забијања, косо постављено ојачање даје боље резултате од вертикалног јер боље подноси сложено напонско стање (затезање управно на влакна и смицање) које се јавља на месту редукације висине пресека носача. Поред тога, опет треба узети у обзир реално понашање дрвених носача и грешке при уградњи завртњева, посебно косих. Ово говори у прилог претпоставци да би самоуграђујући завртњеви дали знатно боље резултате од класичних завртњева за дрво који су примењени у експерименталном испитивању спроведеном у оквиру овог рада.

Нумерички модел је предвидео угиб у средини носача при максималном оптерећењу већи за 2,8% од средњег угиба добијеног експерименталним испитивањем. Коefицијент варијације угиба носача са косим завртњевима је био три пута мањи од коefицијента варијације угиба носача са вертикалним завртњевима при експерименталном испитивању, зато је и разлика између нумеричке и експерименталне вредности угиба мања код Серије R-s45 него код Серије R-s90.

Крутост на савијање при нумеричкој анализи носача ојачаних косим завртњевима је одређена на исти начин као и код експерименталног испитивања (израз 6.1). Разлика у крутости носача између експериментално и нумерички добијене вредности је свега 0,5%.

Као и код вертикално постављених завртњева, напон затезања управно на влакна дрвета на месту нагле промене висине носача је износио $1,15 \text{ N/mm}^2$ при отварању пукотине, а напон смицања у дрвету при прекомерном отварању пукотине је износио $5,85 \text{ N/mm}^2$ (слика 8.21). Обе вредности одговарају напонима који су задати при моделирању кохезивне зоне носача.

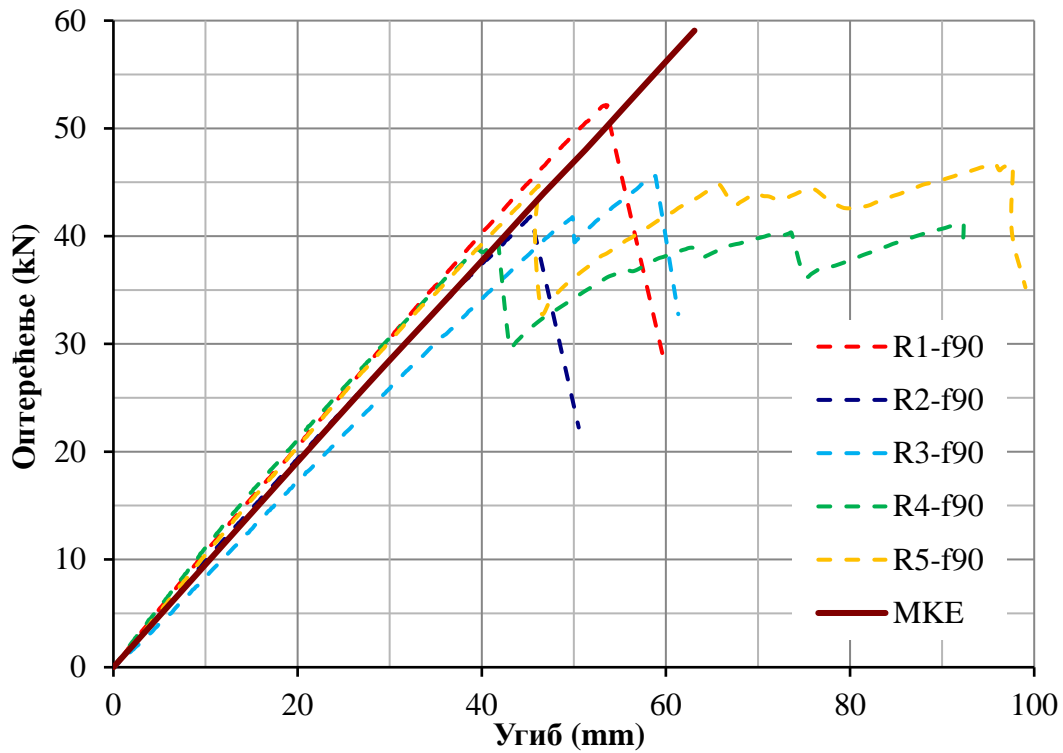
Размицање тачака за носаче ојачане косим завртњевима у тренутку лома износило је 0,5 mm при нумеричком моделирању, што одговара експериментално добијеним вредностима које су износиле од 0,5 до 2,0 mm.

8.2.3 Носачи ојачани GFRP шипкама – Серије R-f90 и R-f45

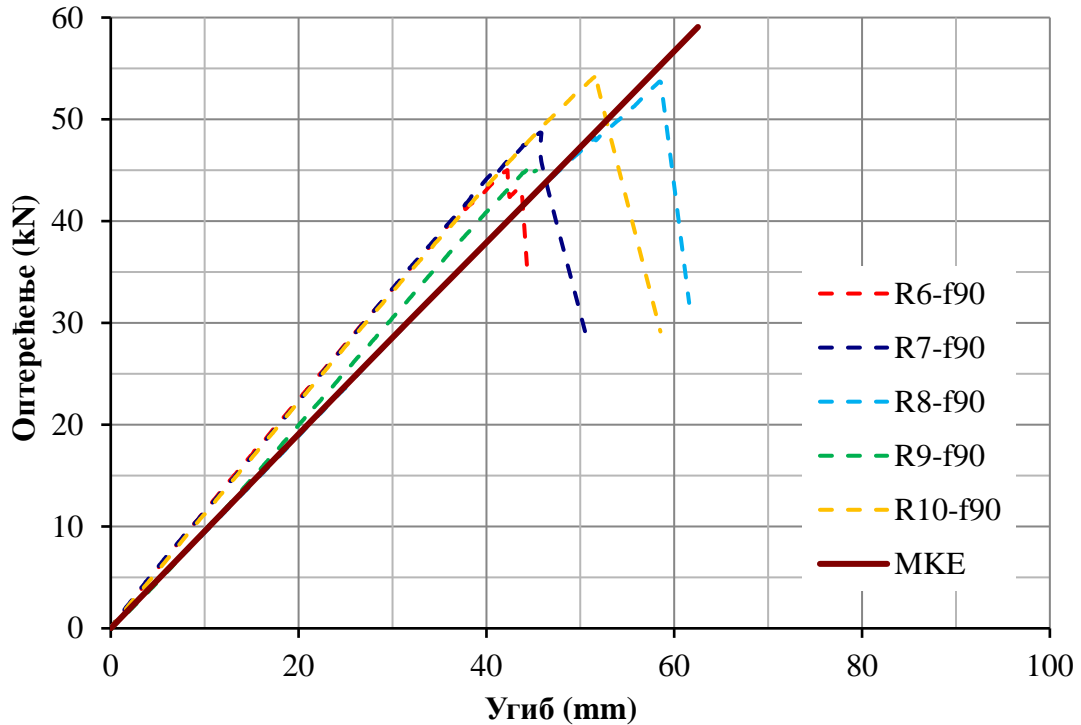
8.2.3.1 Серија R-f90

Глобални одговори носача са редукованом висином пресека ојачаних вертикално постављеним GFRP шипкама – Серија R-f90 у смислу оптерећење - угиб у средини носача добијени експерименталним испитивањима и нумеричком анализом дати су на сликама 8.22 и 8.23. Слика 8.22 приказује дијаграме за носаче код којих су две GFRP шипке постављене вертикално једна иза друге (узорци од R1-f90 до R5-f90), док слика 8.23 приказује дијаграме за носаче код којих су две GFRP шипке постављене вертикално једна до друге (узорци од R6-f90 до R10-f90).

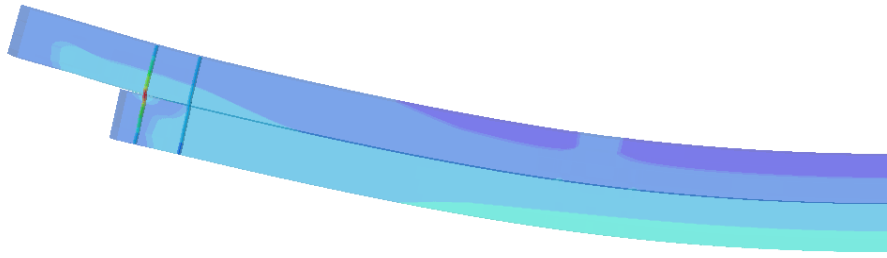
Симулирано понашање носача Серије R-f90 је показало да пукотине не пропагирају мимо ојачања (слике 8.24 и 8.25), те да лом наступа услед губитка носивости на савијање, који је дефинисан као прекорачење чврстоће дрвета на савијање на доњој затегнутој ивици (слике 8.26 и 8.27). Овај напон савијања је при нумеричкој анализи усвојен као $39,1 \text{ N/mm}^2$, колико је добијено експерименталним испитивањем описаним у поглављу 5.1.2. За ту вредност напона гранично оптерећење износи 59,0 kN. Ово гранично оптерећење се разликује од аналитички добијене вредности која износи 52,6 kN. Објашњење се може наћи у чињеници да ојачање ипак доприноси повећању носивости носача, па је нумерички одговор већи од аналитички очекиваног.



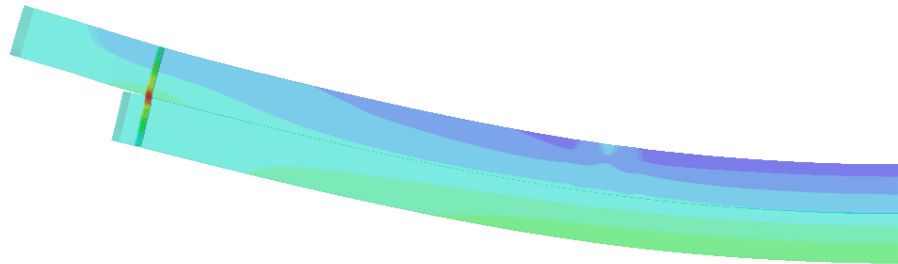
Слика 8.22 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f90 (R1 - R5)
(експериментални и нумерички резултати)



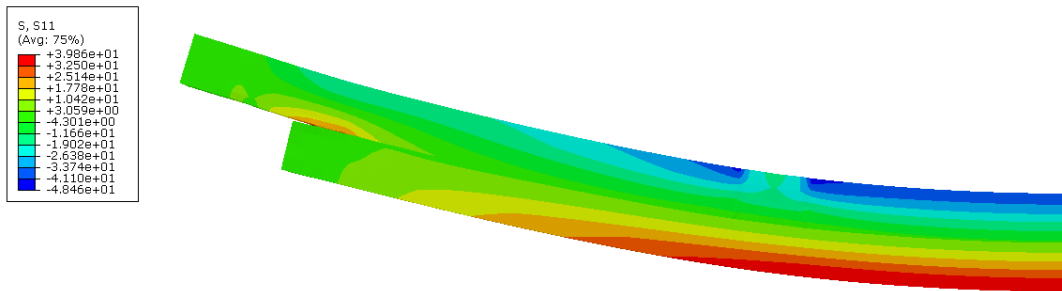
Слика 8.23 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f90 (R6 - R10)
(експериментални и нумерички резултати)



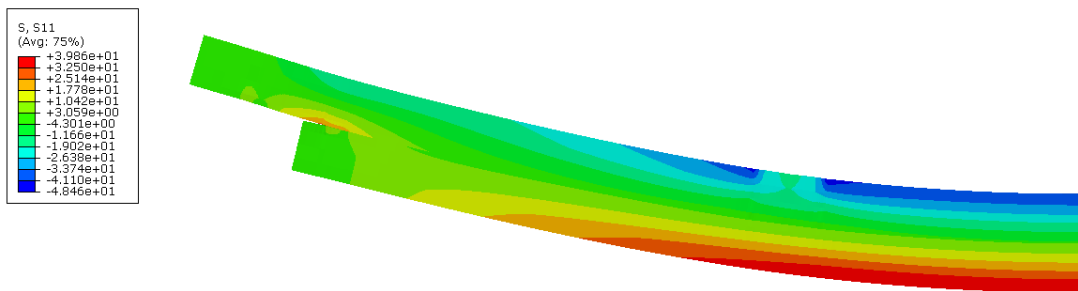
Слика 8.24 Тренутак лома за носаче R1-f90 до R5-f90 – MKE (расподела σ_n напона)



Слика 8.25 Тренутак лома за носаче R6-f90 до R10-f90 – MKE (расподела σ_n напона)



Слика 8.26 Лом носача услед прекорачења носивости на савијање у доњим затегнутим влакнима за носаче R1-f90 до R5-f90 – MKE



Слика 8.27 Лом носача услед прекорачења носивости на савијање у доњим затегнутим влакнима за носаче R6-f90 до R10-f90 – MKE

При експерименталним испитивањима је до лома долазило како услед савијања тако и услед смицања (односно извлачења шипки из дрвета). При

нумеричком моделирању се претпоставља идеална веза између дрвета и ојачања, па су GFRP шипке биле довољне да се достигне лом услед савијања, односно да се носачи понашају као да нема редукације висине попречног пресека код ослонаца.

Иницијално отварање пукотине се десило при истој сили од 14,8 kN као и код неојачаних носача и носача ојачаних завртњевима. Након тога се активирају шипке које носе оптерећење до дефинисаног тренутка лома. Напон затезања управно на влакна дрвета на месту нагле промене висине носача је износио 1,15 N/mm² при отварању пукотине, што и одговара задатој вредности овог напона при моделирању кохезивне зоне носача.

Резултати нумеричке анализе у смислу максималног оптерећења, крутости и угиба у средини носача упоређени су са средњим вредностима експериментално добијених резултата за носаче ојачане вертикално постављеним GFRP шипкама Серије R-f90 у табелама 8.6 и 8.7.

Табела 8.6 Поређење експерименталних и нумеричких резултата –
Серија R-f90 (R1 - R5)

	Максимална сила F_{max} (kN)	Угиб у средини при максималној сили w (mm)	Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ kNmm ²)
Експериментални резултати	45,5	69,1	9,04
Нумерички резултати	59,0	63,1	8,67
Разлика (%)	29,7	8,7	4,1

Табела 8.7 Поређење експерименталних и нумеричких резултата –
Серија R-f90 (R6 - R10)

	Максимална сила F_{max} (kN)	Угиб у средини при максималној сили w (mm)	Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ kNmm ²)
Експериментални резултати	50,8	48,6	9,62
Нумерички резултати	59,0	62,1	8,68
Разлика (%)	16,1	27,8	9,8

Што се тиче граничног оптерећења, разлика између резултата теоријског модела и резултата експерименталних испитивања је 29,7% и 16,1%, за носаче ојачане двама GFRP шипкама постављеним вертикално једна иза друге (R1-f90 до R5-f90) и за носаче ојачане двама GFRP шипкама постављеним вертикално једна до друге (R6-f90 до R10-f90), редом. Овако велика разлика је последица чињенице да је у нумеричким моделима лом узрокован прекорачењем чврстоће дрвета на савијање, што није увек био случај при експерименталним испитивањима.

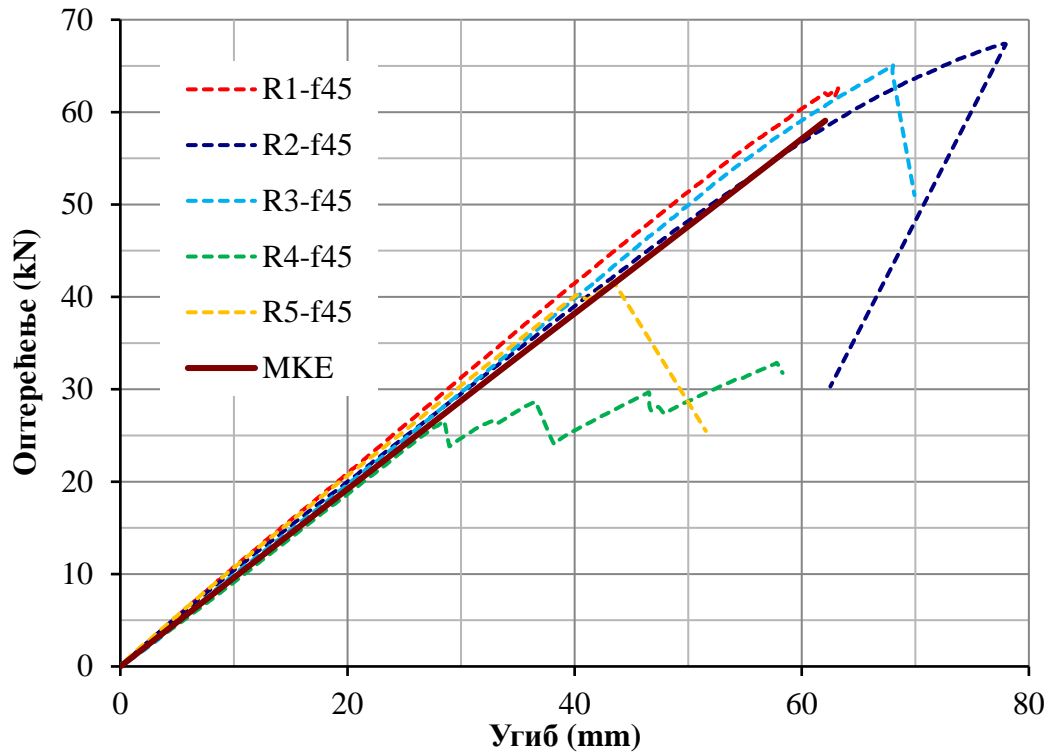
Што се тиче вредности угиба у средини носача при максималној сили, разлика за носаче са шипкама постављеним вертикално једна иза друге (R1-f90 до R5-f90) је износила 8,7% између експерименталних и нумеричких резултата. Разлика је већа у случају носача са шипкама постављеним вертикално једна до друге (R6-f90 до R10-f90), за које је вредност симулираног угиба 27,8% већа од експериментално добијене средње вредности. Ова одступања су директна последица веће крутости експериментално испитаних носача од очекиване вредности која је усвојена при моделирању дрвета као материјала.

Разлика у крутости носача између експериментално и нумерички добијене вредности је 4,1% и 9,8%, за носаче R1-f90 до R5-f90 и за носаче R6-f90 до R10-f90, редом. Варијабилност модула еластичности експериментално испитаних дрвених носача је узрок ове разлике. Носачи R6-f90 до R10-f90 су имали знатно већу крутост од осталих испитаних серија.

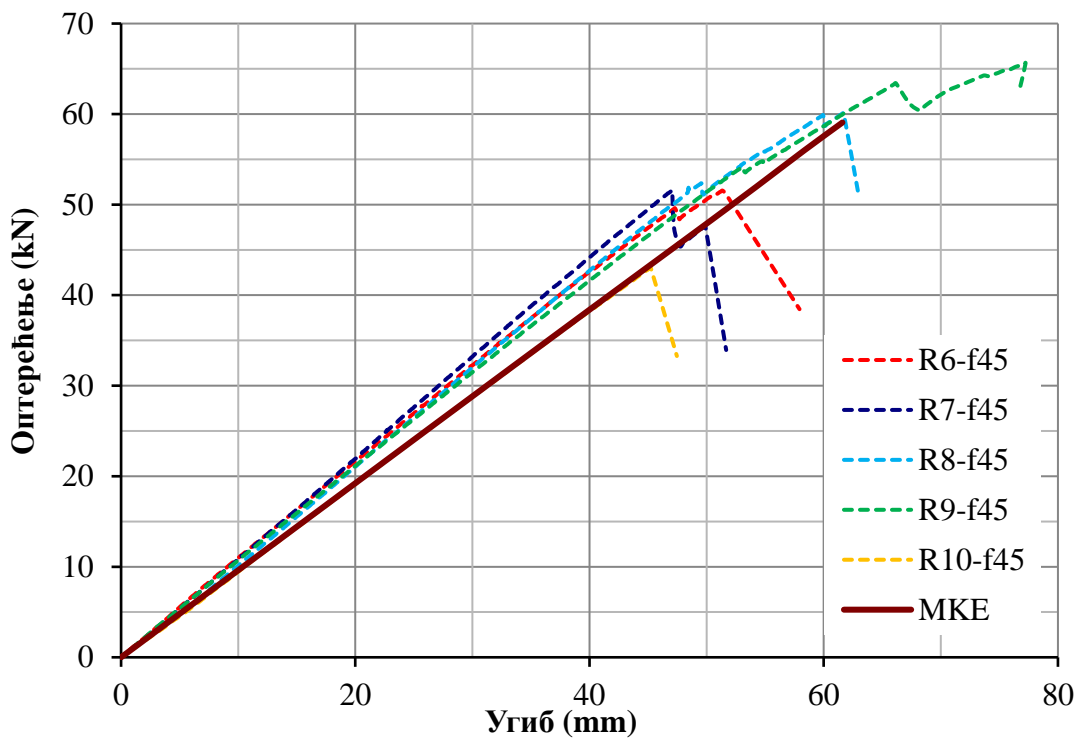
Размицање тачака за носаче ојачане шипкама постављеним вертикално једна иза друге (R1-f90 до R5-f90) у тренутку лома износило је 1,3 mm при нумеричком моделирању, што одговара експерименталним вредностима које су биле од 1,0 до 1,5 mm. Размицање тачака за носаче ојачане шипкама постављеним вертикално једна до друге (R6-f90 до R10-f90) у тренутку лома износило је 1,0 mm, што такође одговара експериментално добијеним вредностима које су биле од 0,6 до 1,0 mm.

8.2.3.2 Серија R-f45

Слика 8.28 приказује дијаграме оптерећење - угиб у средини носача добијене експерименталним испитивањима и нумеричком анализом за носаче ојачане двама GFRP шипкама постављеним косо једна иза друге (узорци од R1-f90 до R5-f90). На слици 8.29 су приказани дијаграми за носаче ојачане двама GFRP шипкама постављеним косо једна до друге (узорци од R6-f45 до R10-f45).



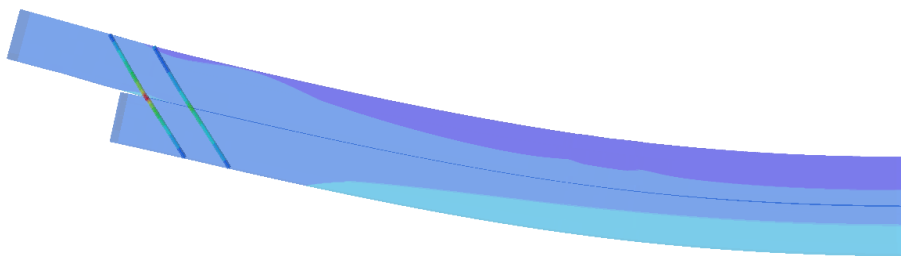
Слика 8.28 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f45 (R1 - R5)
(експериментални и нумерички резултати)



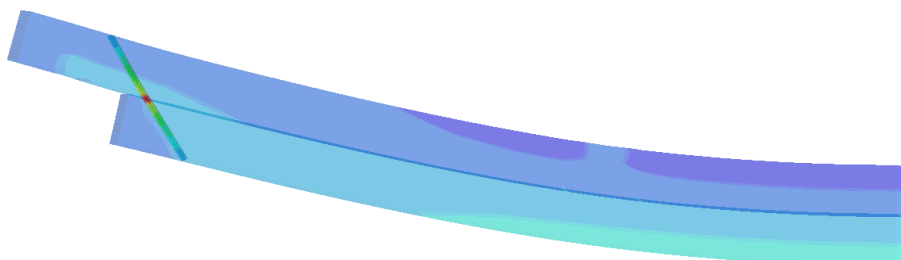
Слика 8.29 Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f45 (R6 - R10)
(експериментални и нумерички резултати)

Резултати нумеричке анализе за Серију R-f45 у смислу граничног оптерећења су исти као и за Серију R-f90. И у случају Серије R-f45, симулирано понашање носача је показало да пукотине не пропагирају мимо ојачања (слике 8.30 и 8.31) и да лом настапа услед губитка носивости на савијање, који је дефинисан као прекорачење чврстоће дрвета на савијање у доњим затегнутим влакнима (слике 8.32 и 8.33). Као што је већ напоменуто, чврстоћа на савијање је при нумеричкој анализи усвојена као $39,1 \text{ N/mm}^2$, колико је добијено експерименталним испитивањем описаним у поглављу 5.1.2. За ту вредност напона гранично оптерећење износи $59,0 \text{ kN}$, као и код носача ојачаних вертикалним шипкама Серије R-f90.

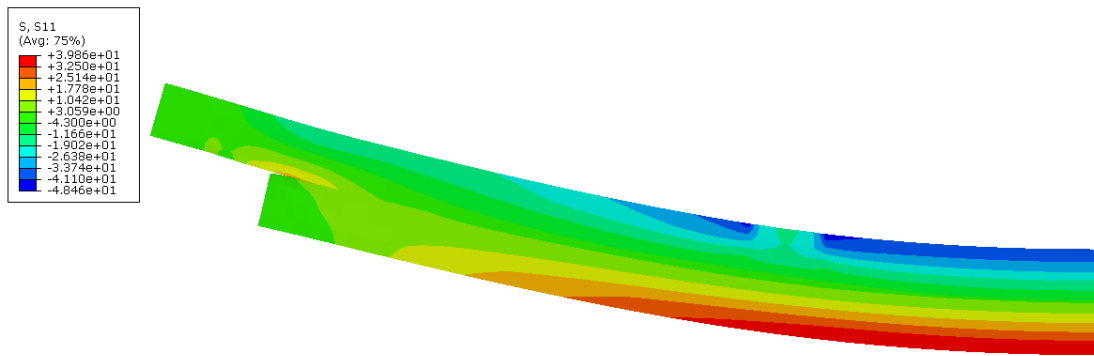
При експерименталним испитивањима Серије R-f45 до лома долазило је услед савијања или услед смицања, као и у случају носача са вертикално постављеним шипкама. Нумеричко моделирање носача са косим GFRP шипкама је спроведено на исти начин као и моделирање носача са вертикалним GFRP шипкама тако да је претпостављена идеална веза између дрвета и ојачања, па су шипке биле довољне да се постигне лом услед савијања, као да нема редуције висине попречног пресека код ослонаца.



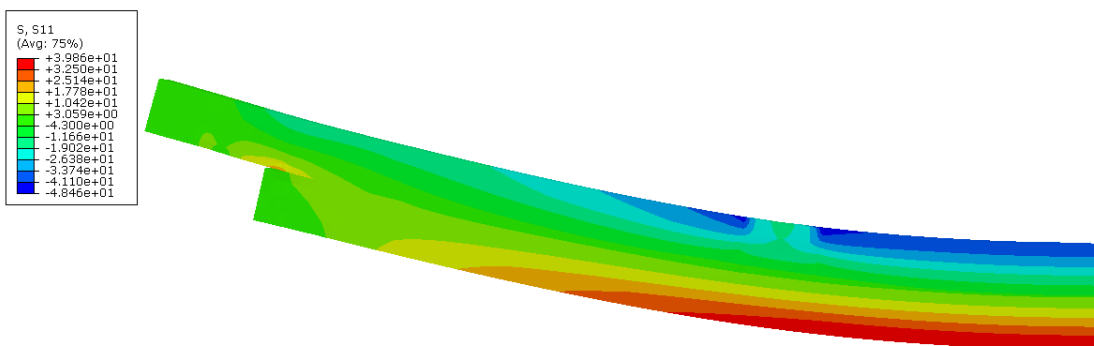
Слика 8.30 Тренутак лома за носаче R1-f45 до R5-f45 – MKE (расподела σ_n напона)



Слика 8.31 Тренутак лома за носаче R6-f45 до R10-f45 – MKE (расподела σ_n напона)



Слика 8.32 Лом носача услед прекорачења носивости на савијање у доњим затегнутим влакнима за носаче R1-f45 до R5-f45 – МКЕ



Слика 8.33 Лом носача услед прекорачења носивости на савијање у доњим затегнутим влакнима за носаче R6-f45 до R10-f45 – МКЕ

Иницијално отварање пукотине се десило као и код свих анализираних нумеричких модела при сили од 14,8 kN (напон затезања управно на влакна дрвета на месту нагле промене висине носача је износио $1,15 \text{ N/mm}^2$), након чега су се активирале шипке које носе оптерећење до дефинисаног тренутка лома.

Резултати нумеричке анализе у смислу максималног оптерећења, крутости и угиба у средини носача упоређени су са средњим вредностима експериментално добијених резултата за носаче ојачане косо постављеним GFRP шипкама Серије R-f45 у табелама 8.8 и 8.9.

Разлика између резултата граничних оптерећења добијених из теоријских модела и експерименталних испитивања је 9,5% и 5,9%, за носаче ојачане двама GFRP шипкама постављеним косо једна иза друге (R1-f45 до R5-f45) и за носаче ојачане двама GFRP шипкама постављеним косо једна до друге (R6-f45 до R10-f45), редом. Овде се примећује знатно боље слагање експерименталних и нумеричких резултата него што је то био случај код носача ојачаних вертикалним шипкама Серије R-f90. Слагање је нарочито изражено у случају носача са шипкама

постављеним косо једна до друге (R6-f45 до R10-f45), за које је и разлика у резултатима мања. Разлог томе је што је већина ових носача достигла лом услед прекорачења чврстоће на савијање.

Табела 8.8 Поређење експерименталних и нумеричких резултата –
Серија R-f45 (R1 - R5)

	Максимална сила F_{max} (kN)	Угиб у средини при максималној сили w (mm)	Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ kNmm ²)
Експериментални резултати	53,9	62,1	9,00
Нумерички резултати	59,0	62,1	8,74
Разлика (%)	9,5	0	3,0

Табела 8.9 Поређење експерименталних и нумеричких резултата –
Серија R-f45 (R6 - R10)

	Максимална сила F_{max} (kN)	Угиб у средини при максималној сили w (mm)	Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ kNmm ²)
Експериментални резултати	55,7	56,5	9,62
Нумерички резултати	59,0	61,6	8,75
Разлика (%)	5,9	9,0	9,0

Што се тиче вредности угиба у средини носача при максималној сили за носаче R1-f45 до R5-f45 је добијен идентичан угиб као и при експерименталном испитивању, док је за носаче R6-f45 до R10-f45 та разлика 9,0%. Ово је опет последица веће крутости експериментално испитаних носача од очекиване вредности која је усвојена при моделирању дрвета као материјала. Генерално, носачи ојачани косим GFRP шипкама имају најбоље слагање резултата угиба у средини при граничном оптерећењу, јер је савијање било доминантан облик лома при експерименталним испитивањима.

Разлике између експериментално и нумерички добијених вредности крутости носача су 3,0% и 9,0%, за носаче R1-f45 до R5-f45 и за носаче R6-f45 до R10-f45,

редом. Ове разлике се поново могу објаснити варијабилношћу модула еластичности експериментално испитаних дрвених носача. Носачи ојачани двома GFRP шипкама постављеним косо једна до друге (R6-f45 до R10-f45) имају знатно већу крутост од осталих испитаних серија, исто као и носачи ојачани двома GFRP шипкама постављеним вертикално једна до друге (R6-f90 до R10-f90). Као што је већ речено, ове две серије су испоручене и тестиране у оквиру друге фазе испитивања, па се може рећи да је примењена дрвена грађа за производњу ових носача нешто квалитетнија, као последица природне варијабилности карактеристика дрвета као материјала.

Размицање тачака за носаче ојачне шипкама постављеним косо једна иза друге (R1-f45 до R5-f45) у тренутку лома износило је 1,1 mm при нумеричком моделирању, што одговара експериментално добијеним вредностима које су биле од 0,5 до 1,5 mm. Размицање тачака за носаче ојачане шипкама постављеним косо једна до друге (R6-f45 до R10-f45) у тренутку лома износило је 0,8 mm при нумеричком моделирању, што такође одговара експериментално добијеним вредностима које су биле од 0,3 до 1,0 mm.

8.3 Дискусија резултата

У оквиру нумеричке анализе, уз помоћ софтверског пакета *Abaqus* 6.13, симулирано је понашање неојачаних носача и носача који су ојачани завртњевима и GFRP шипкама. Добијени нумерички резултати су показали солидно слагање са експерименталним вредностима, са разликама које се пре свега односе на варијабилности карактеристика дрвета као материјала.

Нумеричко предвиђање за понашање неојачних носача је показало добру сагласност са експериментално добијеним резултатима, са разликама у граничном оптерећењу и угибу које су последица великих коефицијената варијације при експерименталном испитивању. Облик лома је у потпуности одговарао лому носача који се догодио при експерименталном испитивању – облик лома I (лом услед отварања пукотине).

При нумеричкој симулацији у случају носача ојачаних завртњевима тренутак лома (извлачење завртњева и прекомерно отварање пукотине) је дефинисан када пукотина пропагира и преко другог завртња. Симулирано понашање носача са

вертикално постављеним завртњевима показало је солидно поклапање са резултатима експерименталних испитивања. Облик лома добијен нумеричком анализом носача ојачаних вертикалним завртњевима одговара лому носача који се догодио при експерименталном испитивању – лом настао услед смицања (облик лома II). Нумеричка предвиђања за носаче са косо постављеним завртњевима су преценила гранично оптерећење при коме је дошло до неконтролисане пропагације пукотина и лома носача. С обзиром да у нумеричкој анализи није моделирано чупање завртњева услед недовољне дубине забијања, косо постављено ојачање даје боље резултате од вертикалног јер поред напона затезања управно на влакна прихвата и смичуће напоне који се јављају на месту нагле промене висине пресека.

У случају носача ојачаних GFRP шипкама нумеричка анализа је показала да да лом наступа услед губитка носивости на савијање и да пукотине не прелазе преко ојачања, док је при експерименталним испитивањима до лома долазило како услед савијања тако и услед смицања. При нумеричком моделирању се претпоставља идеална веза између дрвета и ојачања, па су GFRP шипке биле довољне да се достигне лом услед савијања (носачи се понашају као да нема редуције висине попречног пресека код ослонаца). Разлика у граничном оптерећењу између нумеричких и експерименталних резултата најмања је у случају носача ојачаних косим GFRP шипкама постављеним једна до друге, код којих је до лома при експерименталним испитивањима углавном долазило услед прекорачења чврстоће на савијање.

Иницијално отварање пукотине код свих ојачаних носача се десило при истој сили као и код неојачаних носача са напоном затезања при отварању пукотине који одговара задатој вредности при моделирању кохезивне зоне носача.

Као и при експерименталним испитивањима, нумеричке симулације су доказале да су GFRP шипке боље средство за ојачање од завртњева. Поред тога, с обзиром да се при постављању ојачања у низу, други завртањ и друга GFRP шипка активирају у мањој мери, нумеричка анализа је показала да је постављање ојачања једно до другог боља конфигурација у смислу достизања већих граничних оптерећења. Најбољи резултати су постигнути постављањем косих GFRP шипки једна до друге у попречном пресеку. Осим тога што се обе шипке активирају у истој

мери, оне и боље подносе сложено напонско стање које се јавља на месту редуције висине попречног пресека носача.

Ако се узме у обзир непредвидивост понашања дрвета као материјала, нумеричка анализа је показала добру сагласност са експерименталним испитивањем. Презентовани модели могу бити употребљени за даље параметарске анализе, које укључују варирање геометрије, материјалних карактеристика и система и положаја ојачања.

9 ЗАКЉУЧАК

Узимајући у обзир проблеме концентрације напона и појаве пукотина који се јављају са редукцијом висине дрвених носача, ово истраживање имало је за циљ да предложи методе ојачања и методе прорачуна лепљених ламелираних дрвених носача са редукованом висином пресека код ослонаца. Акцент је стављен на могућност примене савремених материјала као што су GFRP шипке.

У оквиру овог рада су прво презентована теоријска разматрања механичког понашања засечених дрвених носача. Затим су представљена досадашња испитивања спроведена на неојчаним и ојчаним носачима са редукованом висином пресека код ослонаца, као и испитивања примене FRP шипки као ојачања дрвених конструкција. На основу теоријских претпоставки и критичког осврта на досадашња истраживања, изведени су следећи закључци:

- Редукција висине попречног пресека дрвених носача изазива појаву сложених напонских стања и концентрацију напона на местима засека. У случају неојчаних носача са редукованом висином пресека, лом се догађа услед отварања пукотине на месту концентрације напона, када дође до прекорачења чврстоће дрвета на затезање управно на влакана, што одговара дефинисаном облику лома I.
- Ојачање носача са редукованом висином пресека доводи до повећања носивости. Међутим, побољшање носивости и облик лома доста зависе од врсте и крутости примењеног ојачања.
- У случају ојачања у виду завртњева и челичних шипки са навојем, најчешће је долазило до лома услед смицања, што одговара дефинисаном облику лома II. Код ових испитивања је уочено отварање пукотина, њихова пропација и смицање у равни пукотине. Ојачање је ограничило неконтролисано отварање пукотине, али није обезбедило промену облика лома носача у лом услед савијања.
- FRP шипке као ојачање дрвених носача на савијање, постављене у затегнутој зони, показале су одличне резултате у смислу повећања носивости носача и добру интеракцију са дрветом.

- Постоји доста недостатака у постојећим прорачунима како неојачаних тако и ојачаних дрвених носача са редукованом висином пресека, те је неопходно унапредити аналитичке изразе који се баве овом проблематиком.

У наставку рада су описана експериментална испитивања која су се састојала из одређивања физичких и механичких карактеристика свих употребљених материјала (дрво, завртњеви, GFRP шипке) и главног експерименталног испитивања. Неојачани и ојачани носачи од лепљеног ламелираног дрвета са редукованом висином пресека код ослонаца су испитани на савијање до лома. Укупно је тестирано 35 носача – 5 неојачаних, 10 ојачаних са по два завртња код оба ослонца, постављена под угловима од 45° и 90° у односу на подужну осу носача и 20 ојачаних са по две GFRP шипке код оба ослонца, постављене под угловима од 45° и 90° у односу на подужну осу носача. У случају носача са GFRP ојачањем вариран је положај шипки тако да су оне постављане у низу једна иза друге (као и завртњеви), али и једна до друге у попречном пресеку, све са циљем доношења закључка о оптималном положају ојачања.

На малим „чистим“ узорцима, који су исечени из великих носача након извршених експерименталних испитивања, су утврђене вредности запреминске масе, модула еластичности, чврстоће на савијање, чврстоће на смицање и чврстоће на затезање управно на влакна дрвета. Испитивања карактеристика дрвета су урађена према важећим EN и ISO стандардима.

Из спроведених експерименталних испитивања неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца су изведени следећи закључци:

- До лома неојачаних носача је дошло услед прекорачења чврстоће на затезање управно на влакна на местима редуције висине пресека. Облик лома I (отварање пукотине) је доминантан лом код неојачаних носача са редукованом висином пресека.
- Носачи ојачани завртњевима су показали побољшање носивости и деформабилности у поређењу са неојачаним носачима. Иако је гранично оптерећење повећано, ојачање у виду завртњева није било довољно да се промени облик лома из комбинованог, услед затезања управно на влакна и смицања, у лом услед савијања.

- Боље резултате у смислу носивости су дали носачи са завртњевима постављеним под правим углом у односу на оне који су имали завртње под углом од 45° . Очекивало се да носачи са косим завртњевима имају много већу носивост, јер је у овом случају ојачање доминантно аксијално оптерећено. Објашњење за малу носивост носача ојачаних завртњевима постављеним под углом од 45° се може наћи у чињеници да су коси завртњеви имали недовољну дубину забијања.
- Препоручује се минимална дубина забијања (дужина сидрења у случају шипки) која је већа или једнака од редуције висине попречног пресека (односно дубина забијања $l_{ef} \geq h - h_{ef}$).
- Ојачање у виду GFRP шипки дало је знатно боље резултате у односу на носаче ојачане завртњевима за дрво и у смислу носивости и у смислу деформабилности.
- У случају већине носача ојачаних GFRP шипкама лом се догодио услед савијања, са достизањем носивости коју би имали носачи без редуковане висине пресека код ослонаца. Дакле, за разлику од завртњева, шипке су имале довољну носивост да након иницирања пукотине, изврше спрезање подељеног дрвеног пресека тако да носачи могу да достигну своју пуну носивост на савијање.
- Што се тиче шеме ојачања, најбољи резултати су постигнути када су GFRP шипке постављене једна до друге у попречном пресеку под углом од 45° . Проблем овакве диспозиције ојачања је компликованост смештања и обезбеђивања захтеваних минималних ивичних и међусобних растојања.
- Увођењем ојачања редуковано је расипање резултата испитивања носача, јер постављање завртњева и GFRP шипки помаже да се ублажи варијабилност у понашању дрвених носача услед присуства редуције висине попречног пресека код ослонаца.

Поступак прорачуна носача са редукованом висином пресека према Еврокоду 5 примењен је на експериментално испитане неојачане носаче, док је прорачун према Немачком националном анексу Еврокода 5 примењен на експериментално испитане ојачане носаче. Обе методе прорачуна занемарују појаву напона смицања у равни пукотине, који се јавља на месту редуције висине

попречног пресека и узимају у обзир само компоненту напона која изазива затезање управно на влакна дрвета. Прорачун ојачања према Немачком националном анексу Еврокода 5 расподељује напон који се јавља на месту нагле промене висине носача између ојачања и дрвета путем фактора расподеле k_a . Услед непостојања прорачунског поступка за ојачање у виду GFRP шипки, усвојен је метод који се односи на прорачун засечених носача ојачаних профилисаним челичним шипкама постављеним у унапред припремљене рупе испуњене лепком. Експериментални резултати носача код којих се лом догодио услед смицања упоређени са граничним оптерећењем добијеним на основу носивости GFRP шипки, док су експериментални резултати носача код којих се лом догодио услед савијања упоређени са граничним оптерећењем добијеним на основу носивости на савијање носача без редуковане висине пресека.

На основу анализе и поређења аналитичких и експерименталних вредности изведени су следећи закључци:

- У случају неојачаних носача, аналитички добијено гранично оптерећење веће је за 7,0% од експериментално добијених резултата. Сходно томе, потребно је размотрити израз за фактор редукације k_v којим се узима у обзир концентрација напона на месту нагле промене висине попречног пресека. Предлог је да се фактор редукације умањи за 20%.
- Узимајући у обзир да је поређење аналитичких и експерименталних резултата вршено за гранично оптерећење при лому, а не за експлоатационо оптерећење, у оквиру овог рада је уведена претпоставка да је фактор расподеле $k_a = 1$, односно да ојачање носи целокупно оптерећење. Ова претпоставка је оправдана јер носач губи носивост на смицање при иницирању пукотине на месту нагле промене висине пресека, а ојачање наставља да носи оптерећење до лома.
- У случају ојачања постављеног у низу дуж подужне осе носача (једно иза другог), препоручује се увођење ефективног броја средстава за ојачање при прорачуну носивости, као што је случај при прорачуну веза према Еврокоду 5. Нумеричком анализом је потврђена ова препорука, јер је показано да се други завртањ у низу, односно друга GFRP шипка у низу, активира у мањој мери.

- Уочава се добро слагање аналитичких и експерименталних резултата за носивост носача ојачаних завртњевима. Како је лом ових носача скоро увек праћен извлачењем и деформацијом завртњева, може се рећи да је аналитички прорачун за гранично оптерећење са занемареним коефицијентом k_a валидан.
- Може се приметити солидно слагање аналитичких и експерименталних резултата за носивост носача ојачаних GFRP шипкама, с тим што аналитичке вредности у већини случајева нису на страни сигурности. Додатна испитивања треба спровести ради утврђивања тачног аналитичког метода прорачуна носача са редукованом висином пресека који су ојачани полимерним шипкама на бази стаклених или других влакана.
- Поступак прорачуна ојачања према Немачком националном анексу Еврокода 5 може се применити приликом прорачуна FRP шипки као ојачања носача са редукованом висином пресека за експлоатационо оптерећење. Треба размотрити могућност дефинисања израза за фактор расподеле k_a који би узео у обзир крутост ојачања.
- У зависности од типа ојачања које се примењује код носача са редукованом висином пресека, треба адекватно изабрати аналитички прорачунски модел. Односно, неопходно је водити рачуна о томе да ли су употребљена средства за ојачање довољно крута и да ли имају довољно квалитетно остварену везу са дрветом да могу да изврше спрезање дрвеног пресека након иницијалног формирања пукотина.

Тродимензионални модели експериментално испитаних неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца на бази методе коначних елемената направљени су у комерцијалном софтверском пакету *Abaqus*. Отварање и раст пукотина код носача са редукованом висином пресека код ослонаца, изложених краткотрајном оптерећењу, симулирано је коришћењем приступа нелинеарне механике лома помоћу опције *Cohesive Zone Modelling (CZM)*. На основу нумеричких резултата су изведени следећи закључци:

- Нумеричко предвиђање за понашање неојачаних носача је показало добро слагање са експериментално добијеним резултатима. Облик лома је у потпуности одговарао лому носача који се догодио при експерименталном испитивању – облик лома I (лом услед отварања пукотине).

- При нумеричкој симулацији носача ојачаних завртњевима, лом је дефинисан као тренутак када пукотина пропагира и преко другог завртња, што се може сматрати да одговара извлачењу завртњева и прекомерном отварању пукотине услед смицања при експерименталном испитивању.
- Симулирано понашање носача ојачаних са по два вертикална завртња је показало солидно поклапање са резултатима добијеним експерименталним испитивањем. Облик лома добијен нумеричком анализом носача ојачаних вертикалним завртњевима одговара лому носача који се догодио при експерименталном испитивању – облик лома II (лом услед смицања у равни пукотине).
- Нумеричка предвиђања за носаче ојачане са по два коса завртња су преценила гранично оптерећење при коме је дошло до неконтролисане пропагације пукотина преко другог завртња и лома носача. С обзиром да при нумеричкој анализи није моделирано чупање завртњева услед недовољне дубине забијања, косо постављено ојачање даје боље резултате од вертикалног јер боље подноси сложено напонско стање (затезање управно на влакна и смицање) које се јавља на месту редуције висине носача. Поред тога, треба узети у обзир реално понашање дрвета као материјала и могуће „несавршености“ при уградњи завртњева.
- Симулирано понашање носача ојачаних са по две GFRP шипке (вертикалне и косе) је показало да пукотине не пропагирају преко ојачања, те да лом наступа услед губитка носивости на савијање, који је дефинисан као прекорачење чврстоће дрвета на савијање у доњим затегнутим влакнима. GFRP шипке су имале довољну носивост да се постигне лом услед савијања, односно да се носачи понашају као да нема редуције висине попречног пресека код ослонаца.
- Иницијално отварање пукотине код свих ојачаних носача се десило при истој сили и напону као и код неојачаних носача.
- Нумеричка анализа је показала да се при постављању ојачања у низу други завртња и друга GFRP шипка активирају у мањој мери (потпуно се активирају тек пошто пукотина дође до њих), па је постављање ојачања једно до другог повољнија конфигурација од постављања ојачања једно иза другог.

- Ако се узме у обзир непредвидивост понашања дрвета као материјала, нумеричка анализа је показала добру сагласност са експерименталним испитивањем. Презентовани модели могу бити употребљени за даље параметарске анализе, варирање геометрије, граничних услова и система и положаја ојачања.

Генерални закључак свих разматрања и испитивања у овом раду је да GFRP шипке представљају ефикасно средство ојачања дрвених носача са редукованом висином пресека код ослонаца.

На основу спроведених експерименталних, аналитичких и нумеричких испитивања дрвених носача са редукованом висином пресека могу се дати препоруке за даља испитивања:

- одређивање оптималне шеме ојачања која зависи од облика и величине засека;
- утврђивање утицаја трајања оптерећења, услова спољашње средине, динамичких оптерећења и пожара на понашање неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца;
- побољшање аналитичког метода прорачуна, који ће узети у обзир реално понашање носача са редукованом висином пресека који су ојачани полимерним шипкама, како на бази стаклених, тако и на бази других влакана, и имплементација истог у стандарде;
- усавршавање предложених нумеричких модела који су верификовани експерименталним испитивањима, у циљу оптимизације методе ојачања.

И поред сложености проблема који се јављају са редуцијом висине пресека дрвених носача, адекватно ојачање, попут GFRP шипки, омогућава несметану примену оваквих елемената конструкција. Услов за употребу носача са редукованом висином пресека код ослонаца је утврђивање методе прорачуна ојачања која ће инжењерима омогућити једноставну примену у свакодневној пракси.

Литература

- [1] Gojković M. Drvene konstrukcije. Beograd, Srbija: Naučna knjiga, Građevinski fakultet, 1989.
- [2] Smith I, Landis E, Gong M. Fracture and Fatigue in Wood. West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd., 2003.
- [3] Šumarac D, Krajčinović D. Osnovi mehanike loma. Beograd, Srbija: Naučna knjiga, Građevinski fakultet, 1990.
- [4] Jockwer R. Structural Behaviour of Glued Laminated Timber Beams with Unreinforced and Reinforced Notches. Doctoral dissertation. ETH Zurich, 2014.
- [5] Schachner H, Reiterer A, Stanzl-Tschegg S. E. Orthotropic fracture toughness of wood. J Mater Sci Lett 2000;19:1783-1785.
- [6] Wu EM. Application of Fracture Mechanics to Anisotropic Plates. J Appl Mech 1967;34:967-974.
- [7] European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 5: EN 1995-1-1: Design of timber structures. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Brussels, Belgium, 2008.
- [8] National Annex - Nationally determined parameters. Eurocode 5: DIN EN 1995-1-1/NA: Design of timber structures. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Berlin, Germany, 2010.
- [9] Institut za standardizaciju Srbije. SRPS U.C9.200:1984: Projektovanje i izvođenje drvenih konstrukcija - Konstrukcije od monolitnog drveta i ploča. Beograd, Srbija, 1984.
- [10] Glišović I. Teorijska i eksperimentalna analiza nosača od lepljenog lameliranog drveta ojačanih karbonskim trakama. Doktorska disertacija. Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2013.
- [11] Raftery GM, Kelly F. Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber. Compos Part B - Eng 2015;70:9-19.
- [12] André A. Benefits of strengthening timber with fibre-reinforced polymers. Doctoral dissertation. Chalmers University of Technology, 2011.
- [13] Lopresto V, Leone C, De Iorio I. Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic. Compos Part B - Eng 2011;42:717-23.

- [14] Banhia N, Bisby L, Cheng R, et al. ISIS Educational Module 2: An Introduction to FRP Composites for Construction. ISIS Canada, A Canadian Network of Centres of Excellence, 2006.
- [15] Muravljov M. Osnovni aspekti praktične primene kompozitne GFRP armature proizvođača „Kompozit Armatura”. Beograd: Kompozit Armatura, 2016.
- [16] Larsen HJ, Munch-Andersen J. CIB-W18 Timber Structures - A review of meetings I-43 Part 3: Structures and structural members. Danish Timber Information, 2011.
- [17] Asiz A, Smith I. Inclined glue laminated timber beams with an end notch at the tension side. In: Proceedings of 10th World Conference on Timber Engineering 2008. Miyazaki, Japan, 2008. p. 124-31.
- [18] Rautenstrauch K, Franke B, Franke S, Schober K. U. Working Commission W18 - Timber Structures: A New Design Approach for End Notched Beams - View on Code. Department of Timber and Masonry Engineering Bauhaus, University of Weimar, 2008.
- [19] Toussaint E, Fournely E, Moutou Pitti R, Grédiac M. Studying the mechanical behavior of notched wood beams using full-field measurements. Eng Struct 2016;113:277-86.
- [20] Gentile C, Svecova D, Rizkalla SH. Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications. J Compos Constr 2002;6:11.
- [21] Svecova D, Eden R. J. Flexural and shear strengthening of timber beams using glass fibre reinforced polymer bars - an experimental investigation. Can J Civ Eng 2004;31:45-55.
- [22] Borri A, Corradi M, Grazini A. A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. Compos Part B Eng 2005;36:143-53.
- [23] Micelli F, Scialpi V, La Tegola A. Flexural reinforcement of glulam timber beams and joints with carbon fiber-reinforced polymer rods. J Compos Constr 2005;9:337-47.
- [24] Johnsson H, Blanksvärd T, Carolin A. Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement. Mater Struct 2006;40:47-56.
- [25] Yusof A. Bending Behavior of Timber Beams Strengthened using Fiber Reinforced Polymer Bars and Plates. Doctoral dissertation. Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 2010.

- [26] Raftery GM, Whelan C. Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods. *Constr Build Mater* 2014;52:209-20.
- [27] Yang H, Liu W, Lu W, Zhu S, Geng Q. Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: Experimental and theoretical evaluation. *Constr Build Mater* 2016;106:550-63.
- [28] Yang H, Ju D, Liu W, Lu W. Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars. *Constr Build Mater* 2016;109:73-83.
- [29] Mohler K, Mistler HL. Untersuchungen über den Einfluss von Ausklinkungen im Auflagebereich von Holzbiegeträgern auf die Tragfestigkeit, vol F 1504. Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen Universität Karlsruhe (TH), 1978.
- [30] Coureau J.L., Cuvillier E. Lavergne C. Strength of locally PGF reinforced end-notched beams. In: *Proceedings of International RILEM Symposium on Joints in Timber Structures*. RILEM Publications, vol PRO22, 2001. p. 413-22.
- [31] Blass, H.J., Bejtka I. *Querzugverstärkung in gefährdeten Bereichen mit selbstbohrenden Schrauben*, Fraunhofer IRB Verlag, 2003.
- [32] Amy K, Svecova D. Strengthening of dapped timber beams using glass fibre reinforced polymer bars. *Can J Civ Eng* 2004;31:943-55.
- [33] Gomez S, Svecova D. Behavior of split timber stringers reinforced with external GFRP sheets. *J Compos Constr* 2008;12:202-11.
- [34] Franke S, Franke B, Harte AM. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams - State of the art. *Constr Build Mater* 2015;97:2-13.
- [35] European Committee for Standardization (CEN). EN 10480: Timber structures - Glued laminated timber - Requirements. Brussels, Belgium, 2005
- [36] European Committee for Standardization (CEN). EN 384: Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Brussels, Belgium, 2010.
- [37] European Committee for Standardization (CEN). EN 338: Structural timber - Strength classes. Brussels, Belgium, 2009.
- [38] European Committee for Standardization (CEN). En 408:2010+a1: Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. Brussels, Belgium, 2012.

- [39] Institut za standardizaciju Srbije. SRPS D.A1.053:1979: Ispitivanje drveta - Određivanje smicajne čvrstoće paralelno drvenim vlaknima. Beograd, Srbija, 1979.
- [40] American Society for Testing and Materials. ASTM D143-09: Standard test methods for small clear specimens of timber. Philadelphia, USA, 2009.
- [41] Institut za standardizaciju Srbije. SRPS D.A1.052:1958: Ispitivanje drveta - Zatezna čvrstoća upravno na drvena vlakna. Beograd, Srbija, 1958.
- [42] European Committee for Standardization (CEN). EN 1382: Timber structures - Test methods - Withdrawal capacity of timber fasteners. Brussels, Belgium, 1999.
- [43] Osnovne fizičko-mehaničke karakteristike kompozitne armature. <http://kompozitna-armatura.com/armatura/> (pristupljeno 01.12.2018.)
- [44] International Organization for Standardization. ISO 10406-1:2008: Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete - Test methods - Part 1: FRP bars and grids. Switzyerland, 2008.
- [45] Zhu H, Faghani P, Tannert T. Experimental investigations on timber joints with single glued-in FRP rods. *Constr Build Mater* 2017;140:167-72.
- [46] Steiger R, Serrano E, Stepinac M, Rajčić V, O'Neill C, McPolin D, et al. Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Constr Build Mater* 2015;97:90-105.
- [47] Sika d.o.o. Sikadur-30 - Dvokomponentni epoksidni lepak za lepljenje karbonskih lamela. Tehnički list proizvoda. 2010.
- [48] Colling F. *Holzbau: Grundlagen und Bemessung nach EC 5*. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg, 2016.
- [49] Glišović I, Stevanović B, Todorović M. Proračun drvenih konstrukcija prema Evrokodu 5. Beograd, Srbija: Građevinski fakultet, Akademska Misao, 2019.
- [50] Stepinac M, Bidakov A, Jockwer R, Rajcic V. Review and Evaluation of Design Approaches for Glued-in Rods in East and West Europe. In: *Proceedings of 15th World Conference on Timber Engineering 2018*. Seoul, Republic of Korea, 2018.
- [51] Dassault Systèmes Simulia. *Abaqus CAE User's Manual*. Abaqus Version 6.12. Rhode Island, USA, 2012.
- [52] Bodig J, Jayne BA. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.

- [53] Oudjene M, Tran V, Meghlat E, Ait-Aider H. Numerical Models for Self-Tapping Screws as Reinforcement of Timber Structures and Joints. In: Proceedings of 14th World Conference on Timber Engineering 2016. Vienna, Austria, 2016.

Биографија аутора

Марија Тодоровић рођена је 21.03.1989. године у Краљеву. Завршила је гимназију у Трстенику, 2008. године, као носилац Вукове дипломе и као Ученик генерације.

Основне академске студије на Грађевинском факултету у Београду уписала је 2008. године, а завршила 2012. године са просечном оценом 9,50/10. За синтезни пројекат на тему „Пројекат зидане зграде спратности Пр+1 са дрвеном кровном конструкцијом“, добила је оценом 10. Мастер академске студије, такође на Грађевинском факултету у Београду, уписала је 2012. године. Просечна оцена остварена на мастер студијама је 9,86/10. Мастер рад на тему „Анализа понашања спрегнутих мостова са завртњевима као средствима за спрезање применом МКЕ“ одбранила је у октобру 2013. године са оценом 10. За овај рад је добила награду из фонда проф. др Бранка Зарића за најбољи мастер рад из области Металних конструкција. Докторске студије на Грађевинском факултету у Београду уписала је 2013. године и положила је све испите предвиђене курикулумом.

Током периода јул - август 2012. године обавила је праксу на „*Vrije*“ Универзитету у Бриселу, где је вршила лабораторијска испитивања на Катедри за материјале. Такође, јула 2013. године обавила је праксу у фирми „Машинопројект“ у Београду.

Од фебруара 2014. године ради као асистент - студент докторских студија на Катедри за материјале и конструкције Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Учествоје у извођењу наставе на основним и мастер студијама на групи предмета Дрвене и зидане конструкције.

У публикацијама и на скуповима у земљи и иностранству, као аутор и коаутор, објавила је 21 рад из области дрвених и зиданих конструкција. Од 2014. године учествује у реализацији научног пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја под називом „Истраживање стања и метода унапређења грађевинских конструкција са аспекта употребљивости, носивости, економичности и одржавања“. Поред наставно-научног рада бави се и стручним радом.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора _____ Марија Тодоровић _____

Број индекса _____ 903/13 _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Ојачање дрвених носача у зони редукције висине пресека

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 09.05.2019.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Марија Тодоровић

Број индекса 903/13

Студијски програм Грађевинарство

Наслов рада Ојачање дрвених носача у зони редукције висине пресека

Ментор проф. др Бошко Стевановић, дипл. грађ. инж.

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива 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 аутора

У Београду, 09.05.2019.

Изјава о коришћењу

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

Ојачање дрвених носача у зони редукције висине пресека

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 09.05.2019.

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада. Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прерада. Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство – делити под истим условима. Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.