



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ГРАЂЕВИНСКО АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ



мр Жарко И. Петровић

**Експериментално-теоријска анализа
граничних стања армиранобетонских
континуалних греда од самоуграђујућег
бетона ојачаних влакнима армираним
полимерима (Fiber-reinforced polymer – FRP)**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ниш, 2016.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND
ARCHITECTURE



M.Sc. Žarko I. Petrović

**Experimental - theoretical analysis of limit
states of continuous beams made of self-
compacting concrete strengthened with fiber
reinforced polymer (FRP)**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2016.

Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	др Марина Мијалковић, редовни професор, Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет
Наслов:	Експериментално-теоријска анализа граничних стања армиранобетонских континуалних греда од самоуграђујућег бетона ојачаних влакнима армираним полимерима (Fiber-reinforced polymer – FRP)
Резиме:	<p>У дисертацији су приказани резултати експерименталног и нумеричког испитивања армиранобетонских (АБ) континуалних гредних носача израђених од самоуграђујућег бетона ојачаних арматуром од влакнима армираним полимерима (Fiber Reinforced Polymer - FRP). Ојачавање је извршено уградњом ФРП шипки од стаклених и карбонских влакана у заштитном слоју бетона (НСМ метода), као и лепљењем ФРП трака од угљеничних влакана на затегнутој површини бетона (ЕБ метода). Испитано је шест континуалних носача изложених утицају краткотрајног статичког оптерећења до лома, при чему су мерене вредности угиба и дилатација у бетону, челичној и ФРП арматури. Ојачавањем гредних носача додатним стакленим (Ø10 mm) и карбонским (Ø8 mm) ФРП шипкама постигнуто је повећање носивости у односу на контролну (неојачану) греду од 22% до 82% у зависности од врсте и положаја ФРП ојачања док је ојачавањем гредног носача ФРП тракама постигнуто повећање носивости од 50%. Поред одређивања граничног стања носивости, извршена је и провера граничног стања употребљивости, праћена су напонско деформацијска стања носача и формирање пластичних зглобова. Применом МКЕ извршено је моделирање носача и спроведена је нумеричка нелинеарна анализа коришћењем програма ANSYS. Добијени резултати нумеричке анализе су показали добро слагање са резултатима експерименталног испитивања. На основу спроведеног истраживања закључено је да се ојачавањем континуалних гредних носача ФРП арматуром може остварити значајно повећање носивости без обзира на врсту ФРП арматуре и методу ојачања, при чему НСМ метода ојачања има низ предности у односу на ЕБ методу ојачања.</p>
Научна област:	Грађевинарство
Научна дисциплина:	Техничка механика и теорија конструкција
Кључне речи:	самоуграђујући бетон, влакнима армирани полимери, армиранобетонски континуални носачи, експериментално испитивање, нумеричка нелинеарна анализа, метод коначних елемената
УДК:	624.072.2(043.3)
CERIF класификација:	Т 002 Грађевинска технологија
Тип лиценце Креативне заједнице:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	D.Sc. Marina Mijalković, full professor, University of Nis, Faculty of Civil Engineering and Architecture
Title:	Experimental - theoretical analysis of limit states of continuous beams made of self-compacting concrete strengthened with fiber reinforced polymer (FRP)
Abstract:	<p>The paper presents the results of experimental and numerical investigations of the reinforced (RC) continuous beams made of self-compacting concrete strengthened with fiber reinforced polymer (FRP). Strengthening was performed by mounting glass and carbon FRP bars under the concrete surface (NSM method) as well as by glueing the FRP strips on the tensioned concrete surface (EB method). Six continuous beams were tested during which the deformations of beams and the strains in concrete, steel and FRP reinforcement were recorded until failure under monotonically increased loading. By strengthening beams with additional glass (Ø10 mm) and carbon (Ø8 mm) FRP bars increasing in bearing capacity was achieved compared to control (unstrengthened) beam of 22% to 82% depending on the type and the position of FRP reinforcement while by strengthening beam with FRP strips increasing in bearing capacity was achieved of 50%. In addition to observed the ultimate strength state, the ultimate serviceability state was verified, while the stress-strain states of the beams and formation of plastic joints were monitored. By using FEM, continuous beams were modelled, and numerical non-linear analysis was conducted using the program ANSYS. The obtained results of numerical analysis correlated very well with the experimental results. Based on the carried out investigation it is concluded that a significant increase in capacity can be achieved by strengthening of continuous beams using reinforcement made of FRP materials, regardless of the type of FRP reinforcement and strengthening method, whereby the NSM method has many advantages compared to the EB method.</p>
Scientific Field:	Civil Engineering
Scientific Discipline:	Technical mechanics and theory of structures
Key Words:	self-compacting concrete, fiber reinforced polymer, reinforced-concrete continuous beams, experimental research, numerical non-linear analysis, finite element method.
UDC:	624.072.2(043.3)
CERIF Classification:	T 002 Building technology
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND

ЗАХВАЛНОСТ

Желим да изразим најдубљу захвалност професорки др Марини Мијалковић на стрпљењу, сталној подршци и великој помоћи током израде ове дисертације.

Такође, најтоплије се захваљујем члановима Комисије доценту др Слободану Ранковићу на помоћи приликом реализације експерименталног дела, анализи и дискусији резултата и професору др Станку Брчићу на корисним саветима и сугестијама.

Велику захвалност упућујем грађевинском предузећу „Путинжењеринг“ у Нишу на материјалној подршци при изради узорака за испитивање.

Београдском представништву фирме МАПЕИ захваљујем на помоћи у ФРП материјалу за експериментална истраживања.

Посебну захвалност упућујем Ђуки и Цобију, члановима Лабораторије за механизме и машине Машинског факултета у Нишу, на уступљеној тест машини и логистичкој помоћи током извођења експеримента.

Захваљујем се и свим колегиницама и колегама који су ми на било који начин помогли током израде дисертације.

Својој породици се од свег срца захваљујем на огромном разумевању, стрпљењу и подршци.

Мр Жарко И. Петровић, дипл. грађ. инж.

САДРЖАЈ РАДА

Подаци о докторској дисертацији	i
Data on Doctoral Dissertation	ii
Захвалност	iii
Садржај рада	iv
Листа симбола	ix
Листа акронима	xii
Листа Слика	xii
Листа Табела	xxiv
1 Увод	1
1.1 Предмет и проблем истраживања	1
1.2 Циљеви истраживања и методологија рада	5
1.3.1 Аналитичка истраживања	5
1.3.2 Експериментална истраживања	5
1.3.3 Нумеричка истраживања	6
1.3 Делокруг истраживачког рада	6
2 Самоуграђујући бетон	9
2.1 Развој и примена самоуграђујућег бетона	9
2.2 Пројектовање самоуграђујуће бетонске мешавине	11
2.3 Карактеристике свеже самоуграђујуће бетонске мешавине	13
2.4 Карактеристике очврслог самоуграђујућег бетона	14
2.4.1 Чврстоћа при притиску	14
2.4.2 Чврстоћа при затезању	15
2.4.3 Веза напон-дилатација	15
2.4.4 Модул еластичности	16
2.4.5 Приањање за арматуру	17

3	О ФРП материјалима	19
3.1	Опште напомене	19
3.2	Референтне организације и документа за примену ФРП	23
3.3	Компонентни материјали	25
3.3.1	Сирови материјали	25
3.3.2	Арматурна влакна	25
3.3.3	Полимерна смола	30
3.3.4	Додаци	34
3.4	Методe производње елемената од ФРП материјала	35
3.4.1	Пултрузија (Pultrusion)	35
3.4.2	Ручно или влажно постављење (Hand or Wet layup)	36
3.4.3	Намотавање влакана (Filament Winding)	37
3.5	Карактеристике елемената од ФРП материјала	38
3.5.1	Модул еластичности	39
3.5.2	Чврстоћа	41
3.5.3	Замор	43
3.5.4	Течење	44
3.5.5	Кидање течењем (напонска корозија)	44
3.5.6	Трајност ФРП материјала у условима животне средине	45
4	Ојачавање АБ греда ФРП материјалима	48
4.1	Узроци настајања оштећења	48
4.2	Процена стања постојеће конструкције	48
4.3	Најчешће примене ФРП материјала за повећање носивости	49
4.3.1	Повећање носивости АБ елемената оптерећених на савијање	50
4.3.2	Повећање носивости АБ елемената оптерећених на смицање	50
4.3.3	Повећање носивости аксијално притиснутих АБ стубова	51
4.4	Повећање носивости АБ греда оптерећених на савијање	53
4.5	Ојачавање спољашњим лепљењем ФРП арматуре – ЕБ метода (Externally Bonded - EB)	56
4.5.1	Опште	56
4.5.2	О пореклу ЕБ ФРП методе	56
4.5.3	ЕБ ФРП системи ојачања	57

4.5.4	Технике ојачања ЕБ ФРП системима	.....57
4.5.5	Облици лома код ЕБ ФРП система ојачања	.....60
4.6	Метода ојачања уградњом ФРП арматуре у бетонском заштитном слоју (у близини површине) – НСМ метода (Near Surface Mounted - NSM)	.....64
4.6.1	Опште.....	64
4.6.2	О пореклу НСМ методе	.....65
4.6.3	Поступак уградње ФРП арматуре	.....66
4.6.4	Прионљивост ФРП арматуре	.....71
4.6.5	Облици лома код НСМ ФРП система ојачања	.....76
4.6.6	Предности и недостаци НСМ методе ојачања у поређењу са ЕБ методом	.....80
4.7	О резултатима претходних истраживања примене ФРП материјала за ојачавање бетонских елемената	.....81
5	Аналитички прорачун пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром	.....84
5.1	Опште.....	84
5.2	Почетно стање	.....85
5.3	Усвојени модели компонентних материјала	.....87
5.3.1	Модел бетона	.....87
5.3.2	Модел челика	.....89
5.3.3	Модел ФРП арматуре	.....90
5.4	Напонско деформацијска стања пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром	.....90
5.4.1	Напонско деформацијско стање пре појаве прслина (pre-cracking stage)	..93
5.4.2	Напонско деформацијско стање пре појаве течења арматуре (pre-yielding stage)	.....94
5.4.3	Напонско деформацијско стање после појаве течења арматуре (post-yielding stage)	.....95
5.5	Анализа зависности између момента и кривине у попречном пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром	.....96
5.5.1	Дијаграми зависности између момента и кривине у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром	.....97
5.6	Анализа граничног стања носивости пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром	.....106
5.6.1	Опште.....	106

5.6.2	Одређивање облика лома и граничне вредности момента савијања	...107
5.7	Анализа параметара који утичу на вредност граничног момента савијања и појаву одређених облика лома пресека АБ греде ојачене ФРП арматуром	...114
5.7.1	Анализа добијених вредности	.....139
6	Експериментално испитивање АБ континуалних носача ојачаних ФРП арматуром	.....146
6.1	Опште напомене	.....146
6.2	Програм експерименталних испитивања	.....146
6.2.1	Геометрија испитиваних гредних елемената	.....147
6.2.2	Припрема оплате	.....147
6.2.3	Припрема арматуре	.....148
6.2.4	Бетонирање гредних елемената	.....148
6.2.5	Израда епрувета (пробних тела) и њихова нега	.....149
6.3	Начини ојачавања испитиваних АБ греда	.....149
6.3.1	НСМ метода ојачања – поступак уградње ФРП арматуре у заштитном слоју бетона	.....150
6.3.2	ЕБ метода ојачања – ојачавање АБ греда лепљењем ФРП ламината на површини бетона	.....152
6.4	Поставка експеримента и програм испитивања АБ носача	.....153
6.4.1	Процедура доношења оптерећења	.....153
6.4.2	Мерења	.....154
6.4.3	Мерна опрема	.....154
6.5	Испитивања механичких карактеристика коришћених материјала (пратећа испитивања материјала)	.....156
6.5.1	Самоуграђујући бетон	.....156
6.5.2	Арматура	.....161
6.6	Резултати експерименталних испитивања и њихова анализа	.....163
6.6.1	Опште напомене	.....163
6.6.2	Ознаке, детаљи и варијанте ојачања испитиваних гредних носача	...163
6.6.3	Резултати испитивања	.....165
6.7	Анализа експерименталних резултата	.....184
6.7.1	Опште	.....184

6.7.1	Анализа угиба	.....	184
6.7.2	Анализа дилатација у челичној арматури	.....	187
6.7.3	Анализа дилатација у ФРП арматури	.....	188
6.7.4	Анализа дилатација у бетону	.....	189
6.7.5	Облици отказа (лома) носача	.....	191
7	Нумеричко моделирање применом методе коначних елемената	.....	199
7.1	Опште напомене	.....	199
7.1.1	Линеарно моделирање бетона при пројектовању конструкција	...	200
7.1.2	Нелинеарно моделирање конструкција	.....	201
7.2	Модели материјала усвојени у анализи	.....	202
7.2.1	Бетон	.....	202
7.2.2	Челична арматура и челичне плоче	.....	207
7.2.3	ФРП арматура	.....	208
7.3	Типови коначних елемената коришћени у анализи	.....	210
7.3.1	Армирани бетон	.....	210
7.3.2	ФРП арматура	.....	211
7.3.3	Челичне плоче	.....	211
7.4	Усвојени прорачунски модел испитиваних гредних носача и мрежа коначних елемената	.....	212
7.5	Резултати нумеричке анализе	.....	214
8	Завршне напомене	.....	223
8.1	Закључци спроведених истраживања	.....	224
8.2	Препоруке за будућа истраживања	.....	228
	Прилози	.....	229
	Литература	.....	241
	Биографија	.....	247

ЛИСТА СИМБОЛА

A_c	површина попречног пресека бетонске греде
A_{cc}	површина притиснутог дела бетонског пресека
A_{ct}	површина затегнутог дела бетонског пресека
A_f	површина влакана у ФРП материјалу
A_{frp}	површина ФРП материјала (ФРП арматуре)
$A_{frp,b}$	површина ФРП арматуре у случају симултаног лома
A_m	површина матрице у ФРП материјалу
A_s	површина затегнуте челичне арматуре
A_{s2}	површина притиснуте челичне арматуре
C_c	унутрашња сила у притиснутом делу бетонског пресека
C_e	фактор редукције утицаја средине
C_{s2}	унутрашња сила у притиснутој челичној арматури
E_c	модул еластичности бетона
E_f	модул еластичности влакана ФРП материјала
E_{frp}	модул еластичности ФРП материјала (ФРП арматуре)
E_m	модул еластичности матрице ФРП материјала
E_s	модул еластичности челика пре великих издужења (течења) челика
E_{sp}	модул еластичности челика после великих издужења (течења) челика
K_1	коэффициент за одређивање модула еластичности у односу на чврстоћу при притиску бетона
K_2	коэффициент за одређивање модула еластичности у односу на чврстоћу при притиску бетона
M	момент савијања
M_{cr}	момент појаве прелина
M_{ext}	спољашњи момент савијања
M_n	номинални гранични момент савијања
M_o	момент савијања у пресеку пре ојачања
M_u	гранични момент савијања (момент носивости пресека)
M_y	момент течења затегнуте челичне арматуре
T_c	унутрашња сила у затегнутом делу бетонског пресека
T_{frp}	унутрашња сила у ФРП арматури
T_g	температура стакленог прелаза
T_M	температура топљења или температура промене
T_{s1}	унутрашња сила у затегнутој челичној арматури
V_m	запремински удео матрице у ФРП материјалу

V_f	запремински удео влакана у ФРП материјалу
a_c	растојање од прореза до ивице греде у НСМ методи
a_g	растојање између два прореза у НСМ методи
b	ширина греде правоугаоног попречног пресека
b_g	ширина прореза у НСМ методи
d	статичка висина пресека
d_b	номинални пречник округле ФРП шипке
d_{frp}	одстојање ФРП арматуре од притиснуте ивице бетона
d_2	одстојање притиснуте челичне арматуре од притиснуте ивице пресека
f_c'	чврстоћа бетона при притиску
f_{ct}	чврстоћа бетона при затезању
f_f	чврстоћа влакана ФРП материјала при затезању
f_{frp}	чврстоћа ФРП материјала (ФРП арматуру) при затезању
f_m	чврстоћа матрице ФРП материјала при затезању
f_t	чврстоћа челичне арматуре при затезању
$f_y(\sigma_v)$	напон течења челичне арматуре
h	висина греде правоугаоног попречног пресека
h_f	ширина ФРП траке или ламината или већа димензија правоугане ФРП шипке
h_g	дубина прореза у НСМ методи
k	однос између ширине прореза и номиналног пречника округле ФРП шипке
n	број слојева ФРП материјала
r	редукциони фактор при прорачуну дебљине ФРП материјала
t_{frp}	дебљина ФРП материјала, траке или ламината или мања димензија правоугане ФРП шипке
t_f	дебљина влакана у ФРП материјалу
x	одстојање неутралне осе од притиснуте ивице бетона
x_b	одстојање неутралне осе од притиснуте ивице бетона при симултаном лому пресека ојачаног ФРП арматуром
x_o	одстојање неутралне осе од притиснуте ивице бетона пре ојачања
y	одстојање неутралне осе од одговарајуће унутрашње силе
u_{C_c}	одстојање неутралне осе од силе C_c
$u_{C_{s2}}$	одстојање неутралне осе од силе C_{s2}
u_{T_c}	одстојање неутралне осе од силе T_c
$u_{T_{frp}}$	одстојање неутралне осе од силе T_{frp}
$u_{T_{s1}}$	одстојање неутралне осе од силе T_{s1}
α_1	коэффициент редуктовања напона притиска у бетону
β	угао косих равни лома у бетону у односу на хоризонтални правац

β_t	коэффицијент преноса напона смицања
β_1	коэффицијент редуковања висине дијаграма напона до висине неутралне осе
ε	дилатација
ε_c	дилатација у бетону
ε_{cc}	дилатација на притиснутој ивици бетона
$\varepsilon_{cc,0}$	дилатација на притиснутој ивици бетона, пре ојачања
ε_{ct}	дилатација на затегнутој ивици бетона
$\varepsilon_{ct,0}$	дилатација на затегнутој ивици бетона, пре ојачања
ε_{cu}	гранична дилатација бетона при притиску
ε_{c1}	дилатација у бетону која одговара чврстоћи бетона при притиску f_c'
$\varepsilon_{f,u}$	гранична дилатација влакана ФРП материјала при затезању
$\varepsilon_{f,fp}$	дилатација у ФРП арматури
$\varepsilon_{f,fp,ef}$	ефективна гранична дилатација ФРП арматуре при затезању
$\varepsilon_{f,fp,u}$	гранична дилатација ФРП арматуре при затезању
$\varepsilon_{m,u}$	гранична дилатација матрице ФРП материјала при затезању
ε_s	дилатација у челику
ε_{su}	гранична дилатација челика при затезању
ε_{s1}	дилатација у затегнутој челичној арматури
ε_{s2}	дилатација у притиснутој челичној арматури
ε_y	дилатација у челику која одговара напону течења челика (f_y)
θ	угао између правца влакана и правца деловања оптерећења
κ	кривина пресека
κ_m	кофицијент редуције граничне дилатације ФРП арматуре при затезању
λ	фактор за прорачун запреминске тежине бетона
μ_s	процент армирања затегнутом челичном арматуром
μ_{s2}	процент армирања притиснутом челичном арматуром
$\mu_{f,fp,b}$	процент армирања спољашњом ФРП арматуром
$\mu_{f,fp,b}$	процент армирања спољашњом ФРП арматуром при нееластичном симултаном лому
ν	Поасонов коэффициент
σ	напон
σ_c	напон у бетону који одговара дилатацији бетона (ε_c)
σ_{cc}	напон на притиснутој ивици бетона
σ_{ct}	напон на затегнутој ивици бетона
σ_{cu}	напон у бетону који одговара граничној дилатацији бетона при притиску (ε_{cu})
σ_f'	напон у влакнима ФРП материјала у тренутку лома матрице
$\sigma_{f,fp}$	напон у ФРП арматури
σ_s	напон у челику

σ_{s1}	напон у затегнутој челичној арматури
σ_{s2}	напон у притиснутој челичној арматури
σ_m'	напон у матрици ФРП материјала у тренутку лома влакана
Ψ_{frp}	парцијални коефицијент сигурности материјала за ФРП арматуру

ЛИСТА АКРОНИМА

АБ	армирани бетон
АФРП	арамидним влакнима армирани полимери
ГФРП	стакленим влакнима армирани полимери
ЕА	аксијална крутост
ЕБ метода	ојачавање спољашњим лепљењем ФРП арматуре
МКЕ	метод коначних елемената
НСМ метода	ојачавање уградњом ФРП арматуре у заштитном слоју бетона
СЦЦ бетон	самоуграђујући бетон
ФРП	влакнима армирани полимери
ЦФРП	карбонским влакнима армирани полимери

ЛИСТА СЛИКА

Слика 1-1	Корозија арматурног челика у стубовима мостова која је резултирала одвајањем бетонског заштитног слоја (ISIS Educational module 2, 2006)	2
Слика 1-2:	Блок шема структуре тезе	8
Слика 2-1	Уобичајени састав вибрираног и самоуграђујућег бетона (Holschemacher and Yvette, 2002)	12
Слика 2-2	Експериментално добијени дијаграми зависности између напона и дилатације (HU et al., 2008)	16
Слика 3-1	Флексибилна карбонска трака која се користи за обнављање бетонских конструкција (ISIS Educational module 2, 2006)	20
Слика 3-2	Обмотавање стубова моста платном од ФРП материјала (Bank, 2006)	20
Слика 3-3	Стаклене и карбонске арматурне шипке за бетон (ISIS Educational module 2, 2006)	20
Слика 3-4	Плоча моста армирана шипкама од стаклених влакана (Bank, 2006)	21
Слика 3-5	Мост распона 56 метара у близини града Нијмеген (Nijmegen) у Холандији који се сматра најдужим композитним мостом у свету	21
Слика 3-6	Први мост у Француској који је направљен коришћењем каблова од угљеничних влакана (Laroin Foot Bridge, 2002)	21

Слика 3-7	SEM слика (SEM - scanning electron microscope) карбонских влакана коришћених у производњи ЦФРП материјала (ISIS Educational module 2, 2006)	26
Слика 3-8	Криве зависности између напона и дилатације за неколико врста влакана и арматурни челик	27
Слика 3-9	Различити пултрузовани конструкцијски профили (ISIS Educational module 2, 2006)	36
Слика 3-10	Линија пултрузије (Bank, 2006)	36
Слика 3-11	Стаклено ФРП платно примењено у ојачавању АБ стуба коришћењем технике ручног постављања (ISIS Educational module 2, 2006)	37
Слика 3-12	Стаклена влакна која се намотавају на троугаоуни калуп у току производње троуганих стаклених ФРП цеви намотавањем влакана (ISIS Educational module 2, 2006)	37
Слика 3-13	Криве зависности између напона и дилатације за ГФРП, ЦФРП и АФРП материјале и челик (fib bulletin 14, 2001)	38
Слика 3-14	Крива зависности између напона и дилатације ФРП материјала при различитим запреминским деловима влакана V_f који су дати у Табели 3-4 (fib bulletin 14, 2001)	41
Слика 3-15	Криве зависности између напона и дилатације у влакнима и матрици када је дилатација лома матрице мања од дилатације лома влакана	42
Слика 3-16	Криве зависности између напона и дилатације у влакнима и матрици када је дилатација лома матрице већа од дилатације лома влакана	42
Слика 4-1	Ојачавање АБ елемената оптерећених на савијање коришћењем споља залепљене ФРП арматуре (а) fib bulletin 14, 2001; (б) Motavalli and Czaderski, 2007	50
Слика 4-2	Ојачавање АБ греда на савијање и смицање (Bank, 2006)	50
Слика 4-3	Различити начини повећавања носивости АБ греда оптерећених на смицање спољашњим лепљењем ФРП арматуре	51
Слика 4-4	(а) Ојачање кружног АБ стуба коришћењем споља залепљене ФРП арматуре; (б) Употреба ФРП платна у ојачавању кружног АБ стуба (http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/116371391EN6.pdf)	52
Слика 4-5	(а) Обмотавање правоугаоног стуба ФРП платном (Bank, 2006); (б) Криве зависности између напона и дилатације кружног стуба обмотаног ФРП омотачем, правоугаоног стуба обмотаног ФРП омотачем и бетонског стуба без ојачања	52
Слика 4-6	Ојачавање армиранобетонске Т греде оптерећене на савијање	53

Слика 4-7	Повећање носивости АБ елемената оптерећених на савијање (Alkhrdaji et al., 2000)	53
Слика 4-8	Криве зависности између оптерећења и померања пресека у средини АБ греде (Alkhrdaji et al., 2000)	54
Слика 4-9	Облици лома додирне површине у случају примене ЕБ методе ојачања констуркција (Szabó and Balázs, 2007)	61
Слика 4-10	Различите линије одвајања у бетону	62
Слика 4-11	Облици лома везе бетонске греде ојачане ЕБ методом (Blaschko et al., 1998)	63
Слика 4-12	Лом смицањем краја ФРП арматуре	63
Слика 4-13	Ојачавање неармираних зидова НСМ методом (Tumialan et al., 2001)	64
Слика 4-14	Ојачавање силоса ФРП арматуром (Enmons et al, 2001)и ојачавање горње зоне АБ моста (Warren, 1998)	64
Слика 4-15	Процедура ојачавања гредних носача оптерећених на савијање применом НСМ методе	67
Слика 4-16	Типови ФРП арматуре за примену у НСМ методи (http://mguadagnini.staff.shef.ac.uk/frp/frp.php).....	67
Слика 4-17	Облици површина ФРП шипки: а) оребрена б) пресвучена песком в) и г) обмотана и пресвучена песком	68
Слика 4-18	Различити НСМ системи и означавање (De Lorenzis and Teng, 2007).....	69
Слика 4-19	Растојање НСМ арматуре (Parretti and Nanni, 2004)	70
Слика 4-20	Понашање везе код НСМ ФРП арматуре: (а) напон приањања у подужној равни; (б) нормални напон у попречној равни настао услед кружне шипке; (в) нормални напон у попречној равни настао услед правоугаоне шипке (De Lorenzis and Teng, 2007)	73
Слика 4-21	Облици лома везе код елемената ојачаних НСМ методом уочени у тестовима везе (De Lorenzis and Teng, 2007)	75
Слика 5-1	Расподела дилатација по висини пресека АБ греде пре уградње ФРП система за ојачање	85
Слика 5-2	Суперпозиција дилатација код ЕБ методе ојачања (Bank, 2006)	86
Слика 5-3	Дијаграм зависности између напона и дилатације за бетон при аксијалном притиску	87
Слика 5-4	Расподела напона у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром	88
Слика 5-5	Дијаграм зависности између напона и дилатације за арматурни челик	89
Слика 5-6	Дијаграм зависности између напона и дилатације за ФРП арматуру	90

Слика 5-7	Дијаграм зависности између момента (М) и кривине (κ) у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром	91
Слика 5-8	Претпостављена расподела дилатација, напона и унутрашњих сила у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром (са занемарењем почетних дилатација)	91
Слика 5-9	Расподела напона, дилатација и унутрашњих сила пре појаве прелина за: (а) контролну греду, (б) ојачану греду	93
Слика 5-10	Расподела дилатација, напона и унутрашњих сила у фази пре појаве течења за: (а) контролну греду, (б) ојачану греду	94
Слика 5-11	Расподела дилатација, напона и унутрашњих сила у фази после појаве течења за: (а) контролну греду, (б) ојачану греду	95
Слика 5-12	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек без ојачања	98
Слика 5-13	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{гр}=10 \text{ mm}^2$	98
Слика 5-14	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{гр}=20 \text{ mm}^2$	98
Слика 5-15	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{гр}=30 \text{ mm}^2$	99
Слика 5-16	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{гр}=40 \text{ mm}^2$	99
Слика 5-17	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{гр}=50 \text{ mm}^2$	99
Слика 5-18	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{гр}=60 \text{ mm}^2$	100
Слика 5-19	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{гр}=70 \text{ mm}^2$	100
Слика 5-20	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{гр}=80 \text{ mm}^2$	100
Слика 5-21	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{гр}=90 \text{ mm}^2$	101
Слика 5-22	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{гр}=100 \text{ mm}^2$	101
Слика 5-23	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{гр}=10 \text{ mm}^2$	101
Слика 5-24	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{гр}=20 \text{ mm}^2$	102
Слика 5-25	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{гр}=30 \text{ mm}^2$	102

Слика 5-26	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{гр}=40 \text{ mm}^2$	102
Слика 5-27	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{гр}=50 \text{ mm}^2$	103
Слика 5-28	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{гр}=60 \text{ mm}^2$	103
Слика 5-29	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{гр}=70 \text{ mm}^2$	103
Слика 5-30	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{гр}=80 \text{ mm}^2$	104
Слика 5-31	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{гр}=90 \text{ mm}^2$	104
Слика 5-32	Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{гр}=100 \text{ mm}^2$	104
Слика 5-33	Расподела дилатација, напона и унутрашњих сила у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром	108
Слика 5-34	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 20 \text{ МПа}$, $\mu_s = 0,2 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	115
Слика 5-35	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 25 \text{ МПа}$, $\mu_s = 0,2 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	116
Слика 5-36	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 30 \text{ МПа}$, $\mu_s = 0,2 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	116
Слика 5-37	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 35 \text{ МПа}$, $\mu_s = 0,2 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	117
Слика 5-38	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 40 \text{ МПа}$, $\mu_s = 0,2 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	117
Слика 5-39	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 45 \text{ МПа}$, $\mu_s = 0,2 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	118
Слика 5-40	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 50 \text{ МПа}$, $\mu_s = 0,2 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	118
Слика 5-41	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 20 \text{ МПа}$, $\mu_s = 0,5 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	119
Слика 5-42	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 25 \text{ МПа}$, $\mu_s = 0,5 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	119

Слика 5-59	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 40$ МПа, $\mu_s = 1,1$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	.....128
Слика 5-60	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 45$ МПа, $\mu_s = 1,1$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	.....128
Слика 5-61	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 50$ МПа, $\mu_s = 1,1$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	.....129
Слика 5-62	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 20$ МПа, $\mu_s = 1,4$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	.....129
Слика 5-63	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 25$ МПа, $\mu_s = 1,4$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	.....130
Слика 5-64	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 30$ МПа, $\mu_s = 1,4$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	.....130
Слика 5-65	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 35$ МПа, $\mu_s = 1,4$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	.....131
Слика 5-66	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 40$ МПа, $\mu_s = 1,4$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	.....131
Слика 5-67	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 45$ МПа, $\mu_s = 1,4$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	.....132
Слика 5-68	АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 50$ МПа, $\mu_s = 1,4$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре	.....132
Слика 5-69	АБ пресек ојачан ЦФРП арматуром: (а) $\mu_s = 0,2$ %, (б) $\mu_s = 0,5$ %, (в) $\mu_s = 0,8$ %, (г) $\mu_s = 1,1$ %, (д) $\mu_s = 1,4$ %	.....133
Слика 5-70	АБ пресек ојачан ГФРП арматуром: (а) $\mu_s = 0,2$ %, (б) $\mu_s = 0,5$ %, (в) $\mu_s = 0,8$ %, (г) $\mu_s = 1,1$ %, (д) $\mu_s = 1,4$ %	.....134
Слика 5-71	АБ пресек ојачан ЦФРП арматуром: (а) $f_c' = 20$ МПа, (б) $f_c' = 25$ МПа, (в) $f_c' = 30$ МПа, (г) $f_c' = 35$ МПа	.....135
Слика 5-72	АБ пресек ојачан ЦФРП арматуром: (а) $f_c' = 40$ МПа, (б) $f_c' = 45$ МПа, (в) $f_c' = 50$ МПа	.....136
Слика 5-73	АБ пресек ојачан ГФРП арматуром: (а) $f_c' = 20$ МПа, (б) $f_c' = 25$ МПа, (в) $f_c' = 30$ МПа, (г) $f_c' = 35$ МПа	.....137
Слика 5-74	АБ пресек ојачан ГФРП арматуром: (а) $f_c' = 40$ МПа, (б) $f_c' = 45$ МПа, (в) $f_c' = 50$ МПа	.....138

Слика 5-75	Повећање граничног момента савијања (M_u) када је проценат армирања ЦФРП арматуром: а) $\mu_{frp} = 0,22 \%$, б) $\mu_{frp} = 0,44 \%$	139
Слика 5-76	Криве зависности којима је дефинисана појава еластичног симултаног лома АБ пресека ојачаног ЦФРП арматуром	142
Слика 5-77	Процент повећања граничног момента савијања (M_u) када је проценат армирања ГФРП арматуром: а) $\mu_{frp} = 0,22 \%$, б) $\mu_{frp} = 0,44 \%$	143
Слика 5-78	Криве зависности којима је дефинисана појава еластичног симултаног лома АБ пресека ојачаног ГФРП арматуром	145
Слика 6-1	Детаљи армирања испитиваних гредних носача	147
Слика 6-2	Припрема оплате – калупа	148
Слика 6-3	Припрема арматуре	148
Слика 6-4	Калуп са арматуром и постављеним дистанцерима пред уградњу бетона и изглед греда у калупу после уградње бетона	149
Слика 6-5	Пробне епрувете облика коцке и цилиндра узете при бетонирању гредних носача	149
Слика 6-6	Изглед ГФРП арматуре (G-rod) и ЦФРП арматуре (C-rod и Carboplate E) са заштитном фолијом	150
Слика 6-7	Епоксидна смола (Adesilex PG1)	150
Слика 6-8	Исечени прорези код АБ греде ојачане НСМ методом	151
Слика 6-9	Поступак уградње ФРП шипки у оквиру НСМ методе	151
Слика 6-10	Поступак уградње ФРП ламината у оквиру ЕБ методе ојачања	152
Слика 6-11	Диспозиција испитиваних гредних АБ носача (experimental setup)	153
Слика 6-12	Положај угибомера U_1 (LVDT) и дилатомера (D_1 и D_2)	154
Слика 6-13	Мерне траке на бетону, челичној и ФРП арматури	155
Слика 6-14	Мерно-аквизицијски системи MGC-plus и SPIDER 8	156
Слика 6-15	Преса Controls - Automax 5 и читавање добијених вредности	157
Слика 6-16	Графички приказ чврстоће при притиску у функцији времена	158
Слика 6-17	Дијаграм зависности између напона и дилатације при једноаксијалном притиску	159
Слика 6-18	Диспозиција епрувета за испитивање дијаграма зависности између напона и дилатације и одређивање статичког модула еластичности	160
Слика 6-19	Дијаграм зависности између напона и дилатације код испитивања секантног модула еластичности спроведен на цилиндричној епрувети	160
Слика 6-20	Диспозиција епрувета за испитивање чврстоће при затезању цепањем (пре и после оптерећења)	161
Слика 6-21	Варијанте ојачања испитиваних гредних носача	164

Слика 6-22	Диспозиција контролног гредног носача пре оптерећења и под оптерећењем.	165
Слика 6-23	Распоред инструмената на контролној греди	165
Слика 6-24	Дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U_1) и пресеку II (U_2) контролне греде	167
Слика 6-25	Графички приказ угиба контролне греде у зависности од нанетог оптерећења	167
Слика 6-26	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT4) и челичној арматури (MT1) у пресеку I контролне греде	168
Слика 6-27	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (D1) и челичној арматури (MT2) у пресеку II контролне греде	168
Слика 6-28	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT5) и челичној арматури (MT3) у пресеку III контролне греде	169
Слика 6-29	Распоред инструмената на гредном носачу Б-Г1	169
Слика 6-30	Дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U_1) и пресеку II (U_2) греде Б-Г1	170
Слика 6-31	Графички приказ угиба у зависности од нанетог оптерећења греде Б-Г1 ...	170
Слика 6-32	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT4) и челичној арматури (MT1) у пресеку I греде Б-Г1	171
Слика 6-33	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (D1), челичној арматури (MT2) и ФРП арматури (MT6) у пресеку II греде Б-Г1	171
Слика 6-34	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT5) и челичној арматури (MT3) у пресеку III греде Б-Г1	172
Слика 6-35	Распоред инструмената на гредном носачу Б-Г2	172
Слика 6-36	Дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U_1) и пресеку II (U_2) греде Б-Г2	173
Слика 6-37	Графички приказ угиба у зависности од нанетог оптерећења греде Б-Г2 ...	173
Слика 6-38	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT4), челичној арматури (MT1) и ФРП арматури (MT6) у пресеку I греде Б-Г2	174
Слика 6-39	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (D1) и челичној арматури (MT2) у пресеку II греде Б-Г2	174
Слика 6-40	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT5), челичној арматури (MT3) и ФРП арматури (MT7) у пресеку III греде Б-Г2	175
Слика 6-41	Распоред инструмената на гредном носачу Б-Г3	175
Слика 6-42	Дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U_1) и пресеку II (U_2) греде Б-Г3.....	176
Слика 6-43	Графички приказ угиба у зависности од нанетог оптерећења греде Б-Г3.....	176

Слика 6-44	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (МТ4), челичној арматури (МТ1) и ФРП арматури (МТ6) у пресеку I греде Б-ГЗ.....	177
Слика 6-45	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (D1), челичној арматури (МТ2) и ФРП арматури (МТ7) у пресеку II греде Б-ГЗ.....	177
Слика 6-46	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (МТ5), челичној арматури (МТ3) и ФРП арматури (МТ8) у пресеку III греде Б-ГЗ.....	178
Слика 6-47	Распоред инструмената на гредном носачу Б-Ц.....	178
Слика 6-48	Дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U_1) и пресеку II (U_2) греде Б-Ц.....	179
Слика 6-49	Графички приказ угиба у зависности од нанетог оптерећења греде Б-Ц.....	179
Слика 6-50	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (МТ4), челичној арматури (МТ1) и ФРП арматури (МТ6) у пресеку I греде Б-Ц.....	180
Слика 6-51	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (D1), челичној арматури (МТ2) и ФРП арматури (МТ7) у пресеку II греде Б-Ц.....	180
Слика 6-52	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (МТ5), челичној арматури (МТ3) и ФРП арматури (МТ8) у пресеку III греде Б-Ц.....	181
Слика 6-53	Распоред инструмената на гредном носачу Б-ЕЦ.....	181
Слика 6-54	Дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U_1) и пресеку II (U_2) греде Б-ЕЦ.....	182
Слика 6-55	Графички приказ угиба у зависности од нанетог оптерећења греде Б-ЕЦ.....	182
Слика 6-56	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (МТ4), челичној арматури (МТ1) и ФРП арматури (МТ6) у пресеку I греде Б-ЕЦ.....	183
Слика 6-57	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (D1), челичној арматури (МТ2) и ФРП арматури (МТ7) у пресеку II греде Б-ЕЦ.....	183
Слика 6-58	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (МТ5), челичној арматури (МТ3) и ФРП арматури (МТ8) у пресеку III греде Б-ЕЦ.....	184
Слика 6-59	Дијаграм угиба у половини распона за различите варијанте ојачања.....	185
Слика 6-60	Упоређење максималних угиба у половини распона ојачаних греда у односу на угиб контролне греде	186
Слика 6-61	Упоређење максималних носивости ојачаних греда у односу на носивост контролне греде.....	186
Слика 6-62	Дијаграм зависности између оптерећења и просечне дилатације у затегнутој челичној арматури у пресеку у средини поља за испитиване гредне носаче.....	188
Слика 6-63	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у затегнутој челичној арматури у пресеку над ослоном за испитиване гредне носаче.....	188
Слика 6-64	Дијаграм зависности између оптерећења и просечне дилатације у ФРП арматури у пресеку у средини поља за испитиване гредне носаче.....	189

Слика 6-65	Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у ФРП арматури у пресеку над ослонцем за испитиване гредне носаче.....	189
Слика 6-66	Зависности између оптерећења и просечне дилатације у бетону у пресеку у средини поља за испитиване гредне носаче.....	190
Слика 6-67	Зависности између оптерећења и дилатације у бетону у пресеку над ослонцем за испитиване гредне носаче.....	190
Слика 6-68	Деформација контролне греде под оптерећењем.....	191
Слика 6-69	Лом пресека у средини поља контролне греде.....	191
Слика 6-70	Лом пресека над ослонцем контролне греде.....	191
Слика 6-71	Диспозиција греде Б-Г1.....	192
Слика 6-72	Распоред прлина и лом пресека у пољу.....	192
Слика 6-73	Распоред прлина и лом пресека над ослонцем.....	192
Слика 6-74	Карактеристичне прлине у епоксидном лепку (поглед одозго).....	192
Слика 6-75	Распоред прлина над ослонцем (задња страна носача).....	192
Слика 6-76	Деформација греде Б-Г2 под оптерећењем.....	193
Слика 6-77	Ојачање носача ГФРП арматуром у пољу.....	193
Слика 6-78	Лом пресека над ослонцем.....	193
Слика 6-79	Мрвљење бетона у зони аплицирања силе.....	194
Слика 6-80	Распоред прлина и лом пресека у пресеку над ослонцем (горња страна носача).....	194
Слика 6-81	Лом пресека у пољу настао одвајањем бетона.....	194
Слика 6-82	Карактеристичне попречне прлине у бетону које пресецају прорез са епоксидном испуном (доња страна греде).....	194
Слика 6-83	Одвајање бетона у висини заштитног слоја бетона (предња страна носача).....	195
Слика 6-84	Одвајање бетона у висини заштитног слоја бетона (задња страна носача).....	195
Слика 6-85	Карактеристичан распоред прлина у пресеку над ослонцем.....	195
Слика 6-86	Распоред прлина и мрвљење бетона у зони аплицирања силе.....	195
Слика 6-87	Карактеристичан распоред прлина (горња страна носача).....	195
Слика 6-88	Прлине у бетону које пресецају прорез са ојачањем и епоксидном испуном на горњој страни носача	195
Слика 6-89	Лом гредног носача Б-Ц1 настао губитком приањања ЦФРП арматуре.....	196
Слика 6-90	Карактеристичан распоред прлина над средњим ослонцем.....	197
Слика 6-91	Карактеристичан распоред прлина у пресеку у средини поља.....	197
Слика 6-92	Одвајање бетона у висини заштитног слоја бетона и распоред прлина.....	197
Слика 6-93	Прлине у бетону које пресецају прорез са ојачањем и епоксидном испуном са доње стране носача.....	197

Слика 6-94	ЦФРП ламинат залепљен на горњој страни носача.....	197
Слика 6-95	Губитак везе на споју бетона и епоксидног лепка на доњој страни носача..	197
Слика 6-96	Одвајање бетона у висини заштитног слоја бетона.....	198
Слика 6-97	Губитак везе на споју бетона и епоксидног лепка на горњој страни носача.	198
Слика 7-1	Прва мрежа коначних елемената коришћена при анализи бетонске бране методом коначних елемената (Barrett, 2013)	200
Слика 7-2	Оригинални дијаграм мерених и рачунских вредности оптерећење-угиб за гредни носач (Ранковић, 2010)	202
Слика 7-3	Дијаграм зависности између напона и дилатација при аксијалном притиску и затезању бетона (Bangash, 1989)	203
Слика 7-4	Поједностављени дијаграм зависности између напона и дилатације при аксијалном притиску бетона	205
Слика 7-5	Површина лома бетона (ANSYS, 2014)	206
Слика 7-6	Дијаграм зависности између напона и дилатације за арматурни челик	207
Слика 7-7	Дијаграм зависности између напона и дилатације за ФРП арматуру	208
Слика 7-8	Геометрија и положај чворова коначног елемента Солид 65 (ANSYS, 2014)..	210
Слика 7-9	Геометрија и положај чворова коначног елемента Линк 180 (ANSYS, 2014)..	211
Слика 7-10	Геометрија и положај чворова коначног елемента Солид 46 (ANSYS, 2014)..	211
Слика 7-11	Геометрија и положај чворова коначног елемента Солид45 (ANSYS, 2014)..	212
Слика 7-12	Прорачунски модел четвртине АБ греде моделиране коначним елементима..	212
Слика 7-13	Прорачунски модели четвртине контролне греде са 2587, 19736 и 155968 елемената	213
Слика 7-14	Прорачунски модел контролног гредног носача	214
Слика 7-15	Приказ деформисаног носача са вредностима угиба при пробном оптерећењу од: а) P=50 kN; б) P=100 kN	215
Слика 7-16	Упоредни дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U1) и пресеку III (U2) контролне греде добијени експериментално и применом МКЕ (Ansys).....	216
Слика 7-17	Прорачунски модел гредног носача Б-Г1	216
Слика 7-18	Приказ деформисаног носача са вредностима угиба при пробном оптерећењу од: а) P=40 kN; б) P=80 kN; в) P=120 kN	217
Слика 7-19	Упоредни дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U1) и пресеку II (U2) греде Б-Г1 добијени експериментално и применом МКЕ (Ansys)	218
Слика 7-20	Упоредни дијаграм дилатација у ФРП арматури у пресеку I греде Б-Г1 добијени експериментално (МТ6) и нумеричком анализом применом МКЕ (Ansys).....	218

Слика 7-21	Приказ деформисаног носача са вредностима угиба и мапе прслина при пробном оптерећењу од: а) $P=50\text{ kN}$; б) $P=100\text{ kN}$; в) $P=145\text{ kN}$	219
Слика 7-22	Упоредни дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U_1) и пресеку II (U_2) греде Б-Г2 добијени експериментално и применом МКЕ (Ansys)	220
Слика 7-23	Упоредни дијаграм дилатација у ФРП арматури у пресеку I греде Б-Г2 добијени експериментално (МТб) и нумеричком анализом применом МКЕ (Ansys).....	220
Слика 7-24	Приказ деформисаног носача са вредностима угиба и мапе прслина при пробном оптерећењу од: а) $P=50\text{ kN}$; б) $P=100\text{ kN}$; в) $P=165\text{ kN}$	221
Слика 7-25	Упоредни дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U_1) и пресеку III (U_2) греде Б-Г3 добијени експериментално и применом МКЕ (Ansys)	222
Слика 7-26	Упоредни дијаграм дилатација у ФРП арматури у пресеку I греде Б-Г3 добијени експериментално (МТб) и нумеричком анализом применом МКЕ (Ansys).....	222

ЛИСТА ТАБЕЛА

Табела 2-1	Уобичајене вредности састојака према Европском водичу за самоупрађујући бетон (EFNARC, 2006)	12
Табела 2-2	Најчешће коришћене методе за утврђивање карактеристика свеже бетонске масе самоупрађујућег бетона	13
Табела 2-3	Коефицијенти за одређивање модула еластичности у односу на чврстоћу при притиску за различите врсте мешавина (Aslani and Nejadi, 2012)	17
Табела 3-1	Светске организације и њихове Комисије за развој употребе ФРП материјала у конструкцијама	23
Табела 3-2	ФРП стандарди у светској регулативи	24
Табела 3-3	Приближне вредности физичких карактеристика неких врста стаклених влакана	28
Табела 3-4	Приближне вредности физичких карактеристика неких врста карбонских влакана	29
Табела 3-5	Приближне вредности физичких карактеристика неких врста термоотпорних полимерних смола	34
Табела 3-6	Карактеристичне вредности физичких карактеристика за ГФРП, ЦФРП, АФРП материјале и челик	38
Табела 3-7	Пример који показује ефекат запреминског удела влакана на особине ФРП материјала (fib bulletin 14, 2001)	40

Табела 3-8	Фактор редуције утицаја средине за различите ФРП материјале и услове изложености према АСI 440.2R-08	45
Табела 6-1	Карактеристике ФРП арматуре и епоксида коришћених за ојачавање ..	150
Табела 6-2	Састав бетона	157
Табела 6-3	Чврстоћа бетона при притиску	158
Табела 6-4	Вредности механичких карактеристика челичне арматуре и ФРП арматуре	162
Табела 6-5	Приказ мерених величина и коришћених инструмената	166
Табела 7-1	Карактеристике ФРП материјала (Kachlakev and McCurry, 2000)	209
Табела 7-2	Студија конвергенције резултата према густини мреже елемената	213

1 УВОД

1.1 Предмет и проблем истраживања

Предмет истраживања је анализа могуће примене влакнима армираних полимерних материјала за ојачавање армиранобетонских (АБ) континуалних греда од самоуграђујућег бетона.

Самоуграђујући бетон (Self-consolidating concrete - SCC) је нова врста бетона високих перформанси који карактерише велика покретљивост у току процеса ливења. Употребом самоуграђујућег бетона омогућава се уградња бетона без вибрирања, коришћењем само сопствене тежине, чак и код тешко приступачних места у оплати, што поред смањења времена уградње утиче и на побољшање хомогености, а самим тим и квалитета и трајности уграђеног бетона. Поред тога, код конструкцијских елемената са великим процентом армирања коришћење самоуграђујућег бетона има значајне предности јер је уградња класичног бетона вибрирањем отежана и често праћена појавом неправилне уградње што за последицу има смањену адхезију између бетона и арматуре.

Грађевинском индустријом су током историје доминирала четири традиционална материјала: камен, дрво, бетон и челик. До пре неколико стотина година, камен и дрво су били основни материјали за изградњу грађевинских конструкција. У протеклих двеста година, конструкцијски челик и армирани бетон су постали водећи конструкцијски материјали, тако да је већина модерних конструкција

израђена од ових материјала. Употреба челика и бетона омогућила је убрзани развој грађевинске индустрије и изградњу савремене инфраструктуре која је значајно допринела економском просперитету развијеног света. Међутим, вишедеценијско несавесно и прекомерно коришћење конструкција од челика и бетона резултирало је ситуацијом које се приближава глобалној инфраструктурној кризи. Постојећа јавна инфраструктура у Европи, Сједињеним Америчким Државама, Канади и осталим развијеним земљама је у незадовољавајућем стању са многих аспеката а без јавних средстава потребних за замену постојећих конструкција или изградњу нових (ISIS, 2006).

У Србији је ситуација таква да, са једне стране, постоји огромна потреба за санацијама и ојачавањем постојећих објеката, нарочито инфраструктурних (око 1500 мостова у земљи захтева проверу носивости по важећим прописима и конструктивне интервенције) док, са друге стране, нове методе и поступци тешко налазе пут до нормативних докумената и грађевинске праксе. Ово је само један од важних разлога који оправдава потребу за истраживањима у области примене композитних материјала, које с разлогом називамо материјалима будућности (Ранковић, 2010).

Један од основних фактора који је проузроковао незадовољавајуће стање постојеће инфраструктуре је корозија арматурног челика у бетону (*Слика 1-1*), која изазива оштећење бетона, губитак арматурног челика и у неким случајевима лом конструкције (ISIS, 2006).



Слика 1-1: Корозија арматурног челика у стубовима мостова која је резултирала одвајањем бетонског заштитног слоја (ISIS Educational module 2,2006)

Поред тога, најчешћи разлози ојачавања или обнављања постојећих конструкција су оштећења конструкција услед земљотреса, промена намене конструкција и имплементација додатних оптерећења, као и задовољавање нових

прописа и стандарда, због чега се јавља проблем смањене или недовољне носивости конструкцијских елемената или конструкција у целини.

У поменутих случајевима постоје два могућа решења: замена или обнављање. Потпуна замена конструкције или њених конструкцијских елемената може имати разне непогодности као што су висока цена материјала и радне снаге, као и прекид функције конструкције, тј. проблем континуитета, због чега је, када је то могуће, боље обновити оштећене делове конструкције.

Кроз напор да се успори и/или спречи пропадање грађевинских објеката, инжењери трагају за новим материјалима применом којих би се продужио радни век постојећих конструкција, а такође било могуће пројектовање и извођење трајнијих нових конструкција. Ојачавање бетонских конструкција могуће је постићи на више начина: смањењем статичких утицаја, повећањем носивости пресека, променом стања напрезања итд. Повећање носивости пресека је најчешћи вид ојачавања бетонских конструкција и може се остварити повећањем димензија бетонског пресека, додавањем челичне арматуре или додавањем арматуре од композитних материјала.

Влакнима армирани полимери – ФРП (Fiber Reinforced Polymer – FRP), релативно нова класа некорозивних материјала високе чврстоће и мале тежине, показали су се у протеклих петнаестак година као материјали погодни за велики број примена у грађевинском инжењерству. Као што и њихово име сугерише, ови материјали су састављени од влакана високе чврстоће утопљених у полимерну матрицу. Влакна су екстремно чврста и крута, а полимерна матрица их повезује и омогућава им да раде заједно као композитни материјал. У зависности да ли се за армирање композитног материјала користе араמידна, карбонска или стаклена влакна постоје АФРП (Aramid Fiber Reinforced Polymer), ЦФРП (Carbon Fiber Reinforced Polymer) и ГФРП (Glass Fiber Reinforced Polymer) материјали. Запремински удео влакана у ФРП материјалу је обично око 50-70 % код трака и око 25-35 % код платана (fib bulletin 14, 2001).

Интезивније коришћење ФРП материјала у конструкцијском инжењерству у претходних неколико деценија може се приписати константном смањивању цене ових материјала, али пре свега великом броју предности ових материјала у поређењу са конвенционалним материјалима за ојачавање, као што су (ISIS, 2006):

- ✓ Висок однос чврстоће према тежини;
- ✓ Изврсна трајност у различитим условима;

- ✓ Лака и брза уградња тј. прилагодљивост метода примене;
- ✓ Електромагнетна неутралност, која може бити битна у неким специјалним конструкцијама;
- ✓ Могућност да се направе различите механичке карактеристике одговарајућим избором врсте и оријентације влакана;
- ✓ Изврсне особине неких врста на замор, као и ниска термичка проводљивост.

ФРП материјали такође имају и бројне потенцијалне недостатке (fib bulletin 14, 2001):

- ✓ Највећи недостатак је почетна цена материјала, која је знатно већа него цена челика. Међутим, када се цена конструкције посматра кроз цео радни век, побољшана трајност добијена ФРП материјалима може их учинити најисплативијим материјалима у многим случајевима;
- ✓ Насупрот челику чије је понашање еласто-пластично, ФРП материјали су генерално линеарно-еластични до лома (мада он наступа при великим дилатацијама), без значајног течења или пластичне деформације, што утиче на смањење дуктилности;
- ✓ Неки ФРП материјали, у првом реду карбонски и арамидни, имају некомпатибилан коефицијент термичке дилатације са бетоном;
- ✓ Њихово излагање високој температури (у случају пожара) може проузроковати превремено распадање и лом композитног материјала (неке епоксидне смоле омекшавају при температури од 45-70°C).

Због свега овог ФРП материјали се не могу сматрати заменом за челик који се на сличан начин користи у конструкцијским интервенцијама, већ се њихове предности морају упоређивати са недостацима у сваком појединачном случају.

Предмет овог истраживања је ојачавање АБ континуалних греда спољашњим лепљењем ламината – ЕБ метода (ЕБ - externally bonded) и ојачавање уградњом арматуре од композитних материјала у заштитном слоју бетона – НСМ метода (NSM - near surface mounting), при статичком оптерећењу, уз теоријску и нумеричку верификацију добијених резултата.

1.2 Циљеви истраживања и методологија рада

Истраживање је обављено са циљем утврђивања могућности примене НСМ методе ојачавања АБ пресека код континуалних носача од самоуграђујућег бетона, коришћењем различитих типова влакнастих композита (ЦФРП, ГФРП). Један од циљева рада било је упоређење могућности примене споља залепљених (ЕБ метода) и у заштитном слоју постављених (НСМ метода) влакнастих композита. Упоређивани су носачи са истом аксијалном крутошћу ојачања (ЕА), са аспекта граничних стања носивости и употребљивости. Техно-економско поређење примене арматуре од карбонских (угљеничних) влакна (ЦФРП) и стаклених влакна (ГФРП) такође је било предмет истраживања. Осим литературног прегледа у овој области, спроведена су аналитичка, нумеричка и експериментална истраживања на континуалним гредним носачима.

Разлог оваковог одабира тема (циљева) истраживања лежи у реалним проблемима који се јављају у примени ФРП арматуре као материјала за ојачавање континуалних АБ носача, који нису довољно разматрани у литератури.

1.2.1 Аналитичка истраживања

Циљ аналитичких истраживања је развој модела за прорачун носивости пресека АБ греде ојачане ФРП материјалима при карактеристичним стањима гредног носача:

- ✓ до појаве прелина,
- ✓ до границе великих издужења (течења) арматуре и,
- ✓ после појаве течења арматуре, до лома.

1.2.2 Експериментална истраживања

Циљеви експерименталних истраживања били су:

- ✓ Истраживања могућности примене НСМ методе ради повећања носивости гредних носача;
- ✓ Истраживање утицаја методе ојачања (НСМ и ЕБ) на карактеристике ојачаних носача и њихово упоређење;
- ✓ Истраживање утицаја различитих начина ојачавања на носивост ојачаних континуалних носача и њихово компаративне анализе;

- ✓ Истраживање утицаја врсте влакана (ЦФРП и ГФРП) на понашање АБ континуалних носача под оптерећењем;
- ✓ Верификација добијених експерименталних резултата помоћу резултата добијених добијеним нумеричким истраживањима применом методе коначних елемената (МКЕ).

1.2.3 Нумеричка истраживања

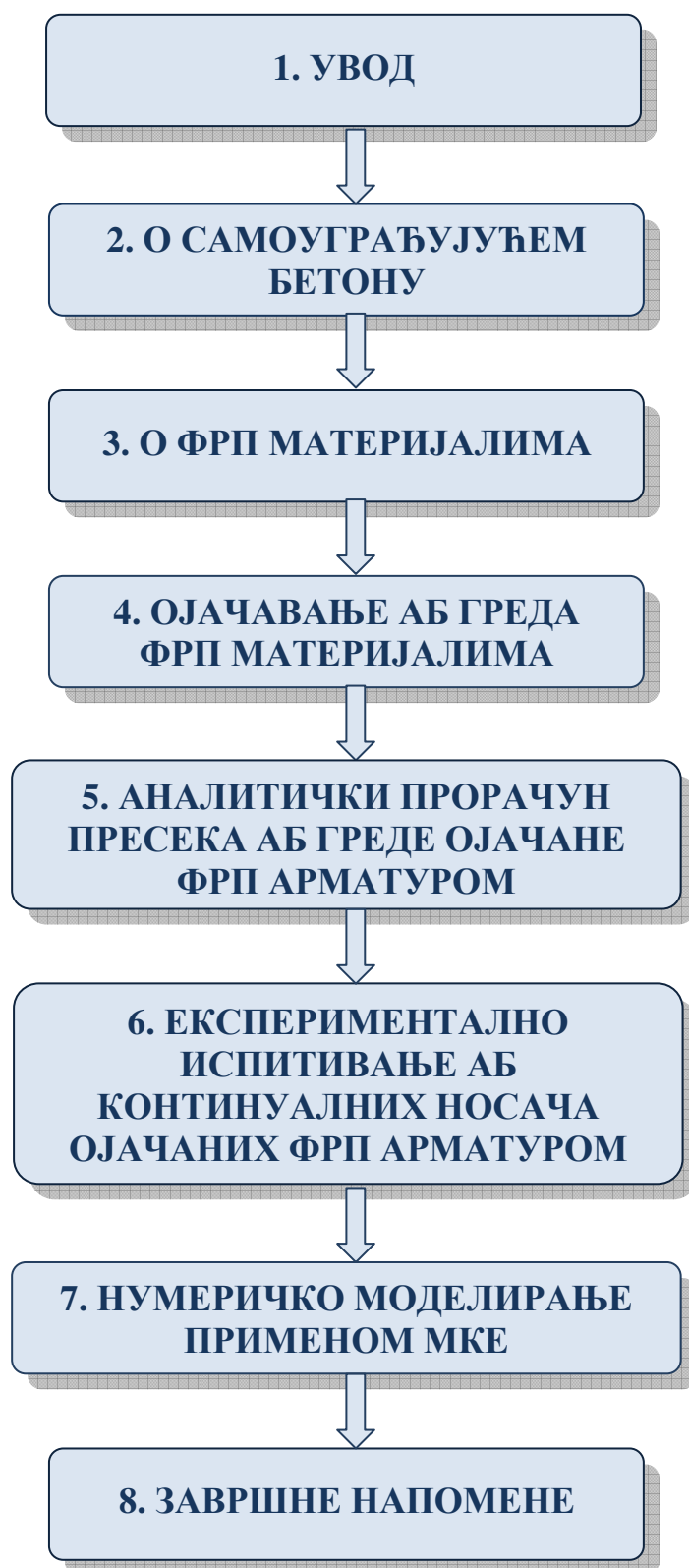
Нумеричка истраживања имала су за циљ верификацију експериментално добијених резултата основних мерних параметара (локалне и глобалне деформације, крутости, носивости) на испитиваним гредним носачима. Како су могућности експерименталног рада најчешће ограничене, један од циљева био је проверити могућност моделирања АБ конструкција ојачаних ФРП арматуром применом методе коначних елемената. Коришћен је, у научне сврхе често применљиви софтвер Ансис (ANSYS), уз моделирање свих елемената пресека: бетона, челичне и ФРП арматуре. Урађена је нелинеарна анализа понашања ојачаних АБ континуалних носача и дато упоређење са експерименталним резултатима уз приказ прслина у бетону за различите степене оптерећења.

1.3 Делокруг истраживачког рада

Тежиште истраживања у раду представља експериментално испитивање шест АБ гредних носача попречног пресека 120/200 mm, укупне дужине 3200 mm, статичког система континуални носач на два поља, са осовинским распоном између ослонаца од 1500 mm. Носачи су оптерећивани дејством две концентрисане силе у средини оба поља, при различитим начинима ојачавања ФРП арматуром. Мерене су деформације у функцији краткотрајног оптерећења и праћене карактеристичне фазе (прве прслине, течење челичне арматуре, лом) за различите начине ојачања, као и на неојачаном (контролном) носачу. Мерене су дилатације у бетону, челичној арматури и ФРП арматури у функцији нанетог оптерећења. Праћена је појава и развој прслина са кораком у прираштају оптерећења од 5 kN.

Нумерички модел формиран је у програмском пакету Ансис применом елемената Солид 65 (Solid 65), Линк 180 (Link 180) и Солид 45 (Solid 45). Извршено је упоређење резултата добијених мерењима и нумеричком анализом.

Докторска дисертација се састоји од 8 поглавља чија је организациона структура приказана на *Слици 1-2*. Први део је уводни и у њему је описана проблематика, разлози и циљеви истраживања, уз опис делокруга рада. У другом поглављу је дат литературни преглед досадашњих истраживања о самоуграђујућем бетону. У трећем поглављу је дат литературни преглед досадашњих истраживања о ФРП материјалима, начини производње и особине елемената од ФРП материјала. У четвртном поглављу је дат литературни преглед досадашњих истраживања о методама ојачавања АБ конструкција ФРП арматуром. У петом поглављу приказани су основни аналитички изрази за прорачун пресека ојачаног ЕБ и НСМ методом, кроз три основна стања конструкције током оптерећивања до лома: стање пре појаве прслина, стање пре појаве течења и стање после појаве течења челичне арматуре, до лома. У шестом поглављу најпре је приказан програм експерименталних истраживања (основних и пратећих), после чега су приказани и анализирани експериментално добијени резултати. У седмом поглављу формулисан је нумерички модел МКЕ и урађена је нелинеарна нумеричка анализа испитиваних гредних носача. Упоредном анализом експерименталних и нумеричких резултата извршена је верификација резултата добијених експерименталним истраживањем. У осмом поглављу дискутовани су добијени резултати, изнети су закључци и дате препоруке за примену, као и смернице за будућа истраживања.



Слика 1-2: Блок шема структуре тезе

2 О САМОУГРАЂУЈУЋЕМ БЕТОНУ

2.1 Развој и примена самоупрађујућег бетона

Бетон је један од најважнијих и најраспрострањенијих грађевинских материјала, који има широку примену у изградњи готово свих грађевинских објеката, а економичност, ефикасност, велика чврстоћа, као и задовољавајућа крутост елемената справљених од бетона, чине га атрактивним материјалом за широк спектар примене у изградњи грађевинских конструкција. По питању продуктивности, оствареног квалитета, као и економичности, бетон је у предности у односу на многе грађевинске материјале.

Током процеса уградње бетона, свежа бетонска маса се вибрира, што изазива буку, као и загађење. Због тога се један од праваца развоја бетона кретао у отклањању ових недостатака, што је постигнуто развојем самоупрађујућих бетона – СЦЦ бетона (Self-Compacting Concrete – SCC) или самоупрађљивих бетона (Self-Placing Concrete – SPC). Поред тога, један од основних разлога истраживања самоупрађујућих бетонских мешавина је и потреба за решавањем све већег проблема трајности АБ конструкција.

Самоуграђујући бетон је бетон који након изливања у оплату не захтева додатно вибрирање већ се његова уградња врши само уз помоћ силе гравитације. Док тече под сопственом тежином, чак и у присуству густо распоређених арматурних шипки, самоупрађујући бетон мора да испуни одређене услове (отпорност према спољашњој

сегрегацији, отпорност према инертној сегрегацији, отпорност на сегрегацију при распрострањавању), а да у исто време задовољи услове добре хомогености и трајности (Живковић, 2007).

Крајем двадесетог века у Јапану, на иницијативу Хајме Окамура (Haјime Okamura) са Кочи (Kochi) Универзитета покренута су истраживања везана за проблем трајности бетонских конструкција. Рад на развоју самоуграђујућег бетона, укључујући и фундаментална истраживања уградљивости и обрадљивости бетона, предводили су Озава, Окамура и Маекава (Ozawa, 1989; Okamura, 1993; Maekawa, 1999) на Универзитету у Токију. Већ 1988. године направљен је бетон који се сматра прототипом самоуграђујућег бетона. Он је тада добио назив бетон високих перформанси (High Performance Concrete-НРС), да би га касније Окамура преименовао у самозбијајући бетон високих перформанси (Self-Compacting High Performance Concrete).

Од свог настанка крајем 1980-тих, па до данас, самоуграђујући бетон је био тема истраживања и развоја како у Јапану, тако и у осталим деловима света, Европи и Сједињеним Америчким Државама. Карактеристике самоуграђујућег бетона су високе перформансе, бољи квалитет и густина, као и уједначена текстура површине очврслог бетона. Самоуграђујући бетон нашао је примену у извођењу многих елемената код којих је разливање свеже бетонске мешавине и уградња вибрираног бетона отежана због густе арматуре. Применом самоуграђујућег бетона елиминише се бука и проблеми везани за вибрирање бетона, трошкови рада при изради елемента су нижи, а ливење елемента је брже, чиме се постиже већа продуктивност.

Приликом справљања самоуграђујућег бетона потребно је обезбедити висок степен контроле квалитета коришћених материјала (песак, крупни агрегат, филер, суперпластификатор и цемент), као и пројектоване мешавине. Ови бетони захтевају много више пажње у фази пројектовања како би се добила стабилна бетонска мешавина у дужем временском периоду, како у току уграђивања, тако и у уграђеном стању, све до завршетка времена везивања и почетка очвршћавања. Употреба хемијских додатака неопходних за постизање жељених особина самоуграђујућег бетона често повећава материјалне трошкове самоуграђујуће бетонске мешавине у односу на материјалне трошкове вибрираног бетона. Рационално коришћење самоуграђујућег бетона доводи до боље продуктивности, краћег времена изградње и бољих услова рада, што надокнађује веће материјалне трошкове, па самим тим резултује и смањењем укупних трошкова.

Самоуграђујући бетон је нашао примену како код класично армираних бетонских конструкција, тако и у производњи претходнонапругнутих и префабрикованих конструкција. Употребом самоуграђујућег бетона у индустрији префабрикованих елемената побољшавају се услови рада у фабрикама, смањује се ниво буке, као и трошкови одржавања.

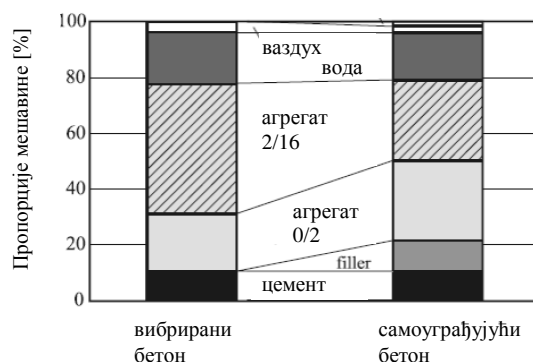
Предности самоуграђујућег бетона у односу на вибрирани бетон су (Милошевић, 2016):

- ✓ Елиминише се потреба за вибрирањем што доводи до уштеде енергије и смањења буке током ливења. Стварају се бољи услови рада и побољшава ефикасност рада;
- ✓ Избегавањем вибрирања спречава се исцуривање бетонске мешавине из калупа, спречава се померање и могућност оштећења калупа;
- ✓ Повећава се степен слободе обликовања конструкције, па се могу употребити за извођење и обликовање интензивно армираних сложених облика танкозидних конструкција;
- ✓ Омогућава се широка употреба индустријских отпада који се користе као адитиви за смањење топлоте хидратације у бетонској мешавини;
- ✓ Брзина изградње објекта, смањење броја оперативних радника, као и пројектовање оптималних конструкција резултује мањим трошковима при изградњи АБ конструкција.

Због својих реолошких карактеристика и многих предности употреба самоуграђујућег бетона може да допринесе значајном побољшању квалитета АБ конструкција.

2.2 Пројектовање самоуграђујуће бетонске мешавине

Основне компоненте које се користе за справљање самоуграђујућег бетона су исте као и код вибрираног бетона. Разлика се огледа у већем проценту ултра финих материјала и суперпластификатора који су неопходни како би се добиле тражене особине свежег самоуграђујућег бетона. Као филер материјал користи се летећи пепео, кречњак у праху, шљака из високих пећи, силицијум и кварц у праху (Малешев и Радоњанин, 2008; Грдић и други, 2008; Uysal, 2012; Мнаћонсакoва et al., 2008). На *Слици 2-1* је приказано поређење састава вибрираног и самоуграђујућег бетона.



Слика 2-1: Уобичајени састав вибрираног и самоуграђујућег бетона (Holschemacher and Yvette, 2002)

С обзиром да не постоји јединствена мешавина код справљања самоуграђујућег бетона, у сваком појединачном случају врши се пројектовање и тестирање сваке одговарајуће мешавине да би били задовољени услови пројекта. Постоји велики број метода за пројектовање мешавина, као што су описали: Окамура и Озава (Okamura and Ozawa, 1995), Су и други (Su et al., 2001), Босилјков (Bosiljkov, 2003) и Сонеби (Sonebi, 2004).

Просечне вредности компонената за справљање самоуграђујућег бетона су:

- ✓ садржај крупног агрегата 31,2 % запремине,
- ✓ садржај пасте 34,8 % запремине,
- ✓ садржај праха 500 kg/m^3 ,
- ✓ однос воде и прашкасте компоненте 0,34 масе,
- ✓ садржај ситног агрегата и малтера 47,5 % запремине.

Табела 2-1: Уобичајене вредности састојака према Европском водичу за самоуграђујући бетон (EFNARC, 2006)

Састојак	Уобичајена вредност по маси kg/m^3	Уобичајена вредност по запремини l/m^3
Прашкасте честице	380 - 600	
Паста		300 - 380
Вода		150 - 210
Крупан агрегат		270 - 360
Ситан агрегат (песак)	48 - 55% од тежине укупног агрегата	
Водопрашкasti фактор		0,85 - 1,10

Европски водич за самоуграђујући бетон (EFNARC, 2002; EFNARC, 2006) даје препоруке за справљање мешавине СЦЦ бетона, приказане у *Табели 2-1*, уз напомену да један или више састојака могу да буду ван дефинисаних вредности.

2.3 Карактеристике свеже самоуграђујуће бетонске мешавине

Бетонска мешавина се класификује као самоуграђујући бетон једино ако су задовољени захтеви у погледу: способности течења, вискозности, способности пролаза и отпорности на сегрегацију.

Да би се постигла жељена покретљивост бетонске мешавине важно је да се смањи трење између чврстих честица мешавине, што се може постићи повећањем запремине пасте и смањењем количине крупног агрегата. Други начин је примена континуирано градуираног филера и минимална употреба једнолично градуираног агрегата (Luis, 2004).

Да би се повећала покретљивост саме пасте и смањило унутрашње трење између чврстих честица, најчешће се користе редуктори воде (High Range Water Reducing Admixture – HRWR), односно суперпластификатори, који смањују количину потребне воде, при чему се уградљивост мешавине не мења, а чврстоћа повећава (Живковић, 2007).

Да би се обезбедила хомогена расподела бетонске мешавине унутар оплате, користе се модификатори вискозитета (Viscosity Modifying Agent – VMA), који повећавају пластичну вискозност и границу течења, а користе се у комбинацији са пластификаторима да би се постигле оптималне вредности. Некомпатибилност између цемента и суперпластификатора приликом справљања самоуграђујућег бетона може битно да утиче на његове карактеристике у свежем и очврслом стању.

Табела 2-2: Најчешће коришћене методе за утврђивање карактеристика свеже бетонске масе самоуграђујућег бетона

Карактеристика бетона	Коришћена метода
Способност течења	Slump-flow test
Вискозност	T ₅₀₀ Slump-flow ili V-funnel test
Способност проласка	L – box test
Отпорност на сегрегацију	Тест отпорности на сити

Најчешће коришћене методе за утврђивање карактеристика свеже бетонске масе самоуграђујућег бетона на основу Европског правилника за самоуграђујући бетон (EFNARC, 2002; EFNARC, 2006), приказане су у *Табели 2-2*.

2.4 Карактеристике очврслог самоуграђујућег бетона

Због боље микроструктуре и хомогености самоуграђујућег бетона, његове основне карактеристике разликују се у односу на карактеристике вибрираног бетона (Илић и Шешић, 2010). У погледу чврстоће при притиску самоуграђујући бетон је сличан вибрираном бетону (Domone, 2007). Услед мањег садржаја крупног агрегата постоји извесна сумња да самоуграђујући бетон има нижу вредност модула еластичности, а услед високог садржаја пасте очекује се да ће скупљање самоуграђујућег бетона бити веће. Ипак, многе студије презентоване у литератури указују да се својства самоуграђујућег бетона не разликују значајно од својстава вибрираног бетона.

2.4.1 Чврстоћа при притиску

До сада су се готово сва истраживања самоуграђујућег бетона односила на испитивање чврстоће при притиску и параметара који на њу утичу. Како је за постизање високе деформабилности и стабилности мешавине самоуграђујућег бетона потребна велика количина прашкастих материја и релативно мали водоцементни фактор, закључује се да чврстоћа може да се регулише врстом и уделом прашкастих компонената (HU et al., 2008). Код самоуграђујућег бетона се уочава већа чврстоћа у поређењу са вибрираним бетоном са истим водоцементним фактором, јер се код самоуграђујућег бетона остварује јача веза између агрегата и очврсле пасте.

Коефицијент прерачунавања напона са цилиндра на коцку код вибрираног бетона износи 0,76, док се за самоуграђујући бетон креће у границама од 0,80 до 1,0 (Domone, 2007). На основу истраживања спроведених на Технолошком Институту Харбин у Кини, утврђен је коефицијент прерачунавања напона при притиску са цилиндра на коцку од 0,84 за самоуграђујући бетон (HU et al., 2008).

2.4.2 Чврстоћа при затезању

Када се чврстоћа при затезању код самоуграђујућег и вибрираног бетона одређује директним аксијалним напрезањем, тестом цепања или савијањем, разлика готово да и не постоји (Castel et al., 2010). Како је самоуграђујући бетон могуће пројектовати тако да се задовољи прописана класа чврстоће при притиску, чврстоћа при затезању се може сматрати истом као и код вибрираног бетона. Због боље микроструктуре и мање укупне порозности могуће је да код самоуграђујућег бетона чврстоћа при затезању буде и већа у односу на вибрирани бетон исте чврстоће при притиску.

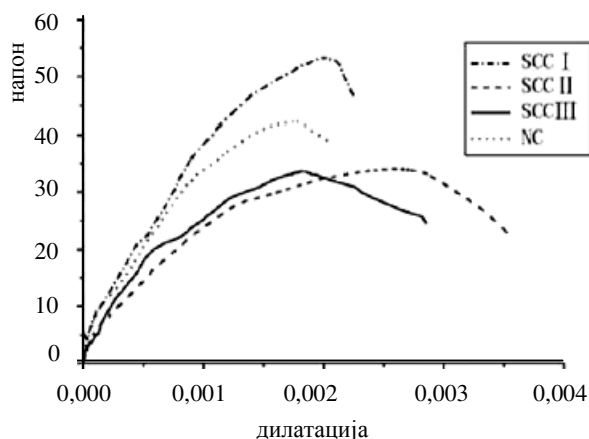
Однос чврстоће при затезању и чврстоће при притиску за самоуграђујући бетон сличан је оном за вибрирани бетон, при чему је велики број података добијен тестом цепања цилиндра налази у горњој половини опсега предложеног на основу Еврокода 2 (Domone, 2007). До сличног закључка у свом раду дошли су Итербек и други (Itterbeack et al., 2011).

2.4.3 Веза напон–дилатација

Веза која дефинише међусобну зависност између напона и дилатације при аксијалној сили притиска за самоуграђујући бетон до сада није у потпуности истражена. Аналитичке формулације којима је дефинисана веза између напона и дилатације за самоуграђујући бетон приказане су у многим радовима (HU et al., 2008; Suresh Babu , et al., 2008; Kumar et al., 2011; Prasad et al., 2009).

На Тахнолошком Институту Харбин у Кини (HU et al., 2008) обављено је експериментално одређивање зависности између напона и дилатације код самоуграђујућег бетона. На основу добијених резултата (*Слика 2-2*) закључује се да је облик дијаграма зависности између напона и дилатације сличан облику за вибрирани бетон.

Сви до сада предложени аналитички изрази у литератури су доста компликовани за практичну примену, тако да се приликом прорачуна АБ конструкција од вибрираног бетона користи упрошћени радни дијаграм бетона облика парабола–права.



Слика 2-2: Експериментално добијени дијаграми зависности између напона и дилатације (HU et al., 2008)

2.4.4 Модул еластичности

Аналитичке формулације које су на располагању за одређивање модула еластичности на основу чврстоће при притиску не могу да обухвате сложеност мешавине самоуграђујућег бетона. Поред старости бетона, модул еластичности је у корелацији са запреминском масом бетона, порозношћу и модулом еластичности цементне пасте, водоцементним фактором, као и врстом и својствима агрегата (Грдић З., 2011). Како већи део запремине бетона чини агрегат, врста и количина агрегата, као и његов модул еластичности битно утичу на модул еластичности бетона. Код самоуграђујућег бетона преовлађује утицај садржаја пасте у односу на агрегат, што није случај код вибрираних бетона. Због високог садржаја пасте и нижег садржаја крупног агрегата модул еластичности самоуграђујућег бетона је нижи за 20 % у односу на вибрирани бетон исте чврстоће при притиску, справљен са истим агрегатом.

Аслани и Нејади (Aslani and Nejadi, 2012) су на основу опсежне студије дефинисали аналитички израз за одређивање модула еластичности (E_c) у зависности од чврстоће при притиску (f'_c), како за вибрирани, тако и за самоуграђујући бетон у следећем облику:

$$E_c = K_1 (f'_c)^{K_2} \quad (2-1)$$

Аналитички израз (2-1), који је дефинисан на основу експериментално добијених вредности за самоуграђујући бетон, без обзира на различите врсте агрегата и филера, показује да постоје мале разлике између предложеног модела за самоуграђујући и за вибрирани бетон.

Табела 2-3: Коефицијенти за одређивање модула еластичности у односу на чврстоћу при притиску за различите врсте мешавина (Aslani and Nejadi, 2012)

Карактеристике мешавине	K_1	K_2
Вибрирани бетон	4835	0,490
Самоуграђујући бетон	4150	0,525
Самоуграђујући бетон са речним облим и дробљеним гранитним агрегатом	3995	0,533
Самоуграђујући бетон са кречњачким агрегатом	6847	0,410
Самоуграђујући бетон са летећим пепелом као филером	3655	0,548
Самоуграђујући бетон са кречњачким филером	9455	0,345
Општи модел за обе врсте бетона	3202	0,587

2.4.5 Приањање за арматуру

Код АБ конструкција садејство између арматурних шипки и околног бетона остварује се помоћу атхезионе силе везе. Адекватна веза између арматурне шипке и бетона један је од битнијих захтева у пројектовању АБ конструкција (Karatas et al., 2010). Познавање везе између арматурног челика и бетона је важно у погледу одређивања потребне дужине сидрења арматурног челика, као и дужине преноса и сидрења каблова за преднапрезање код претходнонапрегнутих елемената. Величина силе приањања између арматурне шипке и бетона зависи од пречника арматурне шипке, као и чврстоће бетона при притиску.

Атхезиона сила везе између арматурне шипке и околног бетона у великој мери зависи и од начина уградње бетонске мешавине. Збијање и консолидација представљају важан фактор приликом извођења АБ елемената. Недовољно компактна бетонска мешавина око арматурних шипки може да доведе до умањења атхезионе силе везе и трајности конструкције. Код вибрираног бетона додатним вибрирањем се утиче на побољшање ових карактеристика, док код самоуграђујућег бетона оне искључиво зависе од карактеристика бетонске мешавине.

На основу анализе података спроведених експерименталних истраживања приказаних у литератури, Домоне (Domone, 2007). долази до закључка да су за различите врсте самоуграђујућег бетона, као и различите пречнике арматурних шипки,

незнатне разлике у величини силе приањања. Сила приањања код самоуграђујућег бетона готово је једнака вредностима за вибрирани бетон истих карактеристика, а у неким случајевима је и знатно већа.

Испитивање силе приањања на гредним носачима у зависности од количине силикатне прашине у смеси самоуграђујућег бетона спровели су Караташ и други (Karatas et al., 2010). Сила приањања код свих узорака који садрже силикатну прашину је већа у односу на узорке који су израђени од вибрираног бетона. Међутим, сила приањања расте са повећањем силикатне прашине до 15 %, после чега почиње нагло да опада.

3 О ФРП МАТЕРИЈАЛИМА

3.1 Опште напомене

Влакнима армирани полимери – ФРП (Fiber Reinforced Polymer – FRP) су подгрупа класе материјала који се називају композити или композитни материјали. Композитни материјали су направљени од два или више материјала који формирају нов материјал са побољшаним особинама које су супериорне у односу на особине индивидуалних састојака појединачно. Иако се о композитним материјалима најчешће размишља као о савременим материјалима развијеним у новије време, многи композити, као што је рецимо бетон, састављен од шљунка, песка и цементне пасте, користе се у грађевинарству већ неколико стотина година. Органски композитни материјали постоје и у природи, а дрво и кости су примери природних композитних материјала изузетне чврстоће. Кости су, на пример састављене од влакана протеинског колагена, повезане кристалним калцијумовим састојком који се зове апатит (ISIS, 2006).

Истраживање ФРП материјала је компликовано пре свега због безбројних комбинација материјала који се могу користити при њиховом креирању. Ово је и предност и мана ФРП материјала. На пример, ФРП материјал се одговарајућим избором влакана и полимерне матрице може направити са особинама које одговарају безмало свакој намени. Ова разноврсност води ка широком спектру могућих особина због чега се не могу постићи генерализације о понашању ФРП материјала.

Интересовање за коришћење ФРП материјала у грађевинским конструкцијама се стално повећава, тако да данас постоји велики број примена ових материјала у конструкцијама широм света. Неке од најчешћих примена у грађевинском инжењерству укључују:

- ✓ ојачавање и санацију конструкцијских елемената од армираног бетона, челика, алуминијума и дрвета (Слика 3-1 и Слика 3-2),
- ✓ армирање бетона шипкама и кабловима од ФРП материјала (Слика 3-3 и Слика 3-4),
- ✓ израда конструкција од ФРП материјала (Слика 3-5) и
- ✓ израда хибридних конструкција (Слика 3-6).



Слика 3-1: Флексибилна карбонска трака која се користи за санацију бетонских конструкција (ISIS Educational module 2, 2006)



Слика 3-2: Обмотавање стубова моста платном од ФРП материјала (Bank, 2006)



Слика 3-3: Стаклене и карбонске арматурне шипке за бетон (ISIS Educational module 2, 2006)



Слика 3-4: Плоча моста армирана шипкама од стаклених влакана (Vanik, 2006)



Слика 3-5: Мост распона 56 метара у близини града Нијмеген (Nijmegen) у Холандији који се сматра најдужим композитним мостом у свету



Слика 3-6: Први мост у Француској који је направљен коришћењем каблова од угљеничних влакана (Laroin Foot Bridge, 2002)

О све масовнијој примени ФРП материјала говори и чињеница да бројни светски произвођачи из Швајцарске (*Sika*), Италије (*Mapei*, *Sinit*, *Sireg*), САД-а (*Hughes Brothers*), Канаде (*Pultral*), Јапана итд, имају у свом производном програму неку од варијанти ових производа. Иако је почетна цена ових материјала свакако већа, због брзине и лакоће уградње, отпорности у случају хемијски агресивних средина, као и непроменљивости габарита и изгледа, коначна економичност у односу на остале начине ојачавања може у много случајева бити на страни примене ФРП материјала. Тенденција смањења цене ФРП материјала, што је основни недостатак ових материјала, представља велики потенцијал за њихову ширу примену. Ако се томе дода ограниченост ресурса природних материјала и еколошки разлози, јасно је да ФРП материјали могу у блиској будућности постати више од алтернативе за конвенцијалне материјале (поготово челик) у многим областима, па и у грађевинском конструктерству (Ранковић, 2010).

3.2 Референтне организације и документа за примену ФРП

У свету се већина најеминентнијих организација и удружења из области грађевинског конструкторства бави развојем и применом ФРП материјала, а као резултат њиховог рада појављује се све више референтних докумената за њихову практичну примену. Табеларно су побројане важне организације и њихове комисије које раде на пољу примене ФРП материјала.

Табела 3-1: Светске организације и њихове Комисије за развој употребе ФРП материјала у конструкцијама

Организација	Комисија
American Concrete Institute (ACI) (Амерички институт за бетон)	440 – Composites for Concrete (440 – бетонски композити)
American Society of Civil Engineers (ASCE) (Америчко удружење грађевинских инжењера)	Structural Composites and Plastics (Конструкцијски композити и пластика)
American Society of Testing and Materials (ASTM) (Америчко удружење за испитивање и материјале)	ASTM D20.18.01 – FRP Materials for Concrete (ASTM D20.18.01 – ФРП материјали за бетон)
AASHTO Bridge Subcommittee (AASHTO подкомисија за мостове)	T-21 – FRP Composites (T-21 – ФРП композити)
International Federation for Structural Concrete (fib) (Међународно удружење за бетон)	Task Group 9.3 FRP – Reinforcement for Concrete Structures (Група 9.3 – ФРП арматура за бетонске конструкције)
Canadian Society of Civil Engineers (CSCE) (Канадско удружење грађевинских инжењера)	ACMBS – Advanced Composite Materials for Bridges and Structures (ACMBS – Напредни композитни материјали за мостове и конструкције)
Japan society of Civil Engineers (Јапанско удружење грађевинских инжењера)	Committee on Concrete Structures with Externally Bonded Continuous Fiber Reinforcing materials (Комисија за бетонске конструкције са споља лепљеним континуалним влакнима армираним материјалима)
Transportation Research Board (Одбор за саобраћајна истраживања)	A2C07 – FRP Composites (A2C07 – ФРП композити)
National Research Council of Italy (Италијански национални истраживачки одбор)	CNR – FRP Systems (CNR – ФРП системи)

Табела 3-2: ФРП стандарди у светској регулативи

Code/Стандард	Reference/Референца
Canadian Building Code (Канадски прописи за зграде)	Design and Construction of Building components with Fiber Reinforced Plastics (Пројектовање и конструкција композитних зграда са влакнима армираним пластикама)
Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC) (Канадски прописи за прорачун аутопутних мостова)	Fiber Reinforced Structures (section of code) (Влакнима армиране конструкције – секција за прописе)
International Conference of Building Officials (ICBO) (Међународна конференција за државне зграде)	AC 125: Acceptance Criteria for Concrete and Unreinforce Masonry Strengthening Using Fiber-Reinforced Composite Systems (AC 125: Прихваћени критеријуми за бетон и неармиране зидарије ојачане коришћењем влакнима армираних композитних система)
Japan Society of Civil Engineers (JSCE) Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures (Јапанско удружење грађевинских инжењера)	Recommendation for Design and Construction for Reinforced Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials (Препоруке за прорачун и конструисање армиранобетонских конструкција коришћењем континуалних влакнима армираних материјала)
National Research Council (CNR) – Italy Advisory Committee on technical recommendation for construction (Национални истраживачки савет Италије)	Guidelines for design and construction of Externally Bonded FRP systems for Strengthening existing structures (Упутство за прорачун и конструисање споља лепљених ФРП система за ојачање постојећих конструкција)
International Federation for Structural Concrete (fib) (Међународно удружење за бетон)	Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures (Прорачун и примена спољашње лепљене арматуре од влакнастих композита (ФРП ЕБР) за армирање бетонских конструкција)
American Concrete Institute (ACI) (Амерички институт за бетон)	Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP bars (Упутство за прорачун бетонских конструкција армираних ФРП шипкама)

3.3 Компонентни материјали

3.3.1 Сирови материјали

Да би се произвео влакнима армиран полимерни материјал, неопходна су два главна састојка: арматурна влакна (fiber) и полимерна матрица (polymer matrix). Ови сирови материјали се производе при високим температурама у индустријском процесу који захтева високо специјализовану опрему и контролу. Полимерна матрица се прозиводи од сирове нафте, док се стаклена влакна добијају од силикатног песка. Након што се влакна произведу, она се дорађују у низу секундарних операција како би се добили влакнасти производи као што су нити, траке, платна итд, који се могу користити у процесу производње ФРП материјала. Слично, сирови полимер, који се најчешће назива базични полимер (base polymer) или чиста смола (neat resin), меље се са осталим смолама и меша са разним адитивима, како би се направио смоласти систем погодан за производњу ФРП материјала. Велики број компанија у свету производи и дистрибуира како сирове састојке, тако и додатно обрађене материјале, који се користе у производњи влакнима армираних полимерних материјала (Sourcebook, 2006).

3.3.2 Арматурна влакна

Влакнасти део ФРП материјала састоји се од неколико хиљада појединачних влакана микрометарских пречника која су бесконачно дуга и називају се континуалним или непрекидним (continuous). Њих треба разликовати од кратких влакана, дужине 10 до 50 mm, која се користе у процесу добијања армираних цементних материјала, као што су стаклом армирани цементи (glass-reinforced cements – GRCs) или влакнима армирани цементи (fiber-reinforced cementitious – FRC). Континуална влакна, која чине 20 до 60% ФРП материјала, армирају полимерну матрицу, па одатле и назив влакнима армирани полимери (Bank, 2006).

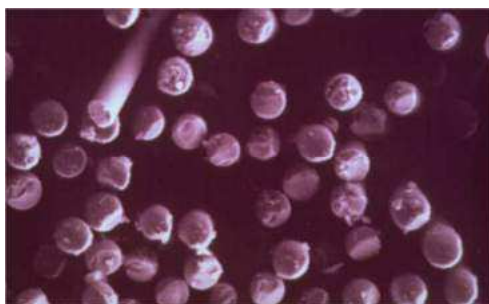
Мали пречник влакана је значајан јер се молекуларна структура материјала пружа дуж влакана дајући влакнима велику чврстоћу при затезању. Такође, како могућност да узорак материјала који има неки недостатак довољно велики да проузрокује крти лом опада са запремином, микроскопска влакна имају мање дефеката него материјали са влакнима веће запремине, па су самим тим и веће чврстоће. У случају лома појединачног влакна у ФРП материјалу сила се преноси на суседна влакна захваљујући напонима смицања који се развијају у полимерној матрици, чиме се

спречава лом целог композитног материјала. Важно је нагласити да пренос силе који је потребан како би се спречио лом ФРП материјала, зависи примарно од чврстоће матрице на смицање (ISIS, 2006).

Механичке карактеристике влакана су генерално веће од механичких карактеристика полимерне матрице коју армирају. Међутим, услед њихове влакнасте природе она се не могу користити као самостални конструкцијски материјали, већ се користе у синергији са полимерном матрицом. Влакна пружају чврстоћу и крутост ФРП материјалу. Као последица чињенице да су влакна која се користе у производњи ФРП материјала континуална и најчешће оријентисана у одређеном правцу, ФРП материјали су ортотропни и знатно чвршћи и крући у правцу влакана. Особине влакана које су пожељне приликом њиховог избора за производњу неког елемента су (ISIS, 2006):

- ✓ велика крутост,
- ✓ велика чврстоћа при затезању,
- ✓ мала варијација чврстоће између појединачних влакана,
- ✓ стабилност у току коришћења и
- ✓ равномерни пречник влакана.

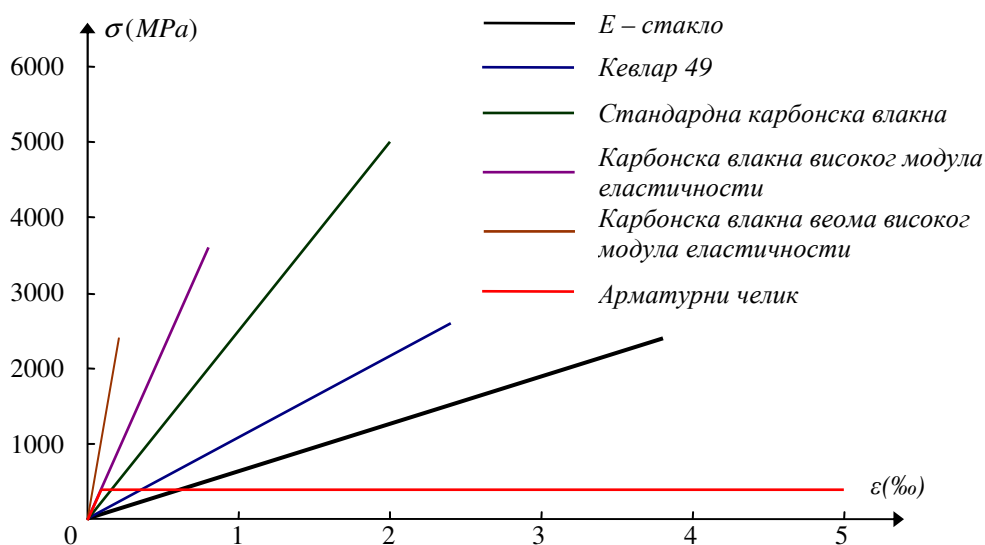
Многи различити типови влакана су доступни и сви имају своје предности и недостатке, а три најчешће коришћена типа влакана у грађевинском инжењерству су: стаклена (glass), карбонска (carbon) и араמידна (aramid).



Слика 3-7: СЕМ слика (SEM - scanning electron microscope) карбонских влакана коришћених у производњи ЦФРП материјала (ISIS Educational module 2, 2006)

Поред ових влакана користе се и влакна од борона, најлона, полиестера, полиетилена, полипропилена итд. Употреба различитих влакана за специфичне примене зависи од великог броја фактора, као што су: захтевана чврстоћа, крутост, трајност, ограничење цене и доступност компоненталних материјала. На *Слици 3-8* приказане су криве зависности између напона и дилатације за различита тренутно

доступна влакна. Ове криве се односе на чиста влакна и не укључују ефекте полимерне матрице.



Слика 3-8: Криве зависности између напона и дилатације за неколико врста влакана и арматурни челик

Стаклена влакна се користе у изради многих ФРП производа у конструкцијском инжењерству, од арматурних шипки за бетон, преко трака и платана, која се користе за ојачавање конструкција, до конструкцијских профила. Силицијум диоксид (SiO_2) је доминантан састојак у свим облицима стакла, са запреминским уделом од 50 до 70%. Поред силицијум диоксида, стакло садржи и кречњак, борну киселину, глину, као и разне металне оксиде. Постоје различите врсте производа од стаклених влакана, које се означавају различитим словима, а добијају се комбинацијама поменутих састојака (Bank, 2006).

E -стакло (E -glass – electrical glass) је бор-силикатно стакло, познато по својој високој електричној отпорности и ниској цени, које се користи за производњу огромне већине производа од стаклених влакана у конструкцијском инжењерству (око 90%). Поред осталог, користи се за израду радарских купола и антена, као и плоча рачунара, где обезбеђује крутост и електричну отпорност.

A -стакло – прозорско стакло (A -glass – window glass).

C -стакло (C -glass – corrosion resistant), такође познато и као AP -стакло (alkali-resistant glass), је калцијум бор-силикатно стакло које се користи за производњу специјалних производа у конструкцијском инжењерству где је потребна велика отпорност у окружењима као што су хлороводонична и сумпорна киселина.

С-стакло (S-structural (high-strength) glass) користи се за производњу влакана високих перформанси са најчешћом применом у авионској индустрији. Ово стакло је велике јачине и крутости, отпорно је на високе температуре и корозију, а користи се у захтевнијим применама где је виша цена овог стакла оправдана. Чешћа ознака овог стакла у Европи је Р-стакло, а у Јапану Т-стакло.

Пречник појединачних стаклених влакана је од 3 до 24 μm . Влакна пречника 17 μm најчешће се користе за ФРП производе у конструкцијском инжењерству. Стакло се сматра изотропним материјалом. Вредности физичких карактеристика неких врста стаклених влакана дате су у Табели 3-3.

Табела 3-3: Приближне вредности физичких карактеристика неких врста стаклених влакана

Врста стаклених влакана	Густина (g/cm^3)	Модул еластичности (GPa)	Чврстоћа при затезању (GPa)	Максимално издужење (%)
Е	2,57	72,5	3400	2,5
А	2,46	73	2760	2,5
Ц	2,46	74	2350	2,5
С	2,47	88	4600	3

Појединачна стаклена влакна се облажу неким од смоластих система: епоксидним, полиестерским и винилестерским. Облагање стаклених влакана је потребно због њихове заштите када су у форми снопа или ланаца.

Стаклена влакна су углавном осетљива на влажност, посебно у присуству соли и повишене алкалности и потребно је добро их заштити смоластим системом. Стаклена влакна су такође осетљива на кидање течењем (напонска корозија) и губе јачину при константним напонима (Bank et al., 1995). Стаклена влакна су одлични термички и електрични изолатори, због чега се све више користе као изолациони материјали у зградама и електро индустрији. Стаклена влакна су нејјефтинија од свих влакана високих перформанси.

Карбонска влакна се користе у конструкцијском инжењерству у виду ФРП трака или платана за ојачавање, као и код израде каблова за преднапрезање. Комбинација њихове велике чврстоће и мале тежине чини их веома атрактивним у ваздухопловном инжењерству и сличним применама где њихове добре особине оправдавају високу цену.

Карбонска влакна су запремински полукристални органски материјали пречника од 5 до 10 μm , који се на нивоу атома састоје од дводимензионалних матрица угљеничних атома. Услед дводимензионалне структуре атома, угљенична влакна се сматрају трансверзално изотропним, са различитим особинама у подужном и трансверзалном правцу. Подужна оса влакана паралелна је са графичком равни због чега влакна имају велику крутост и чврстоћу при затезању (Bank, 2006). Приближне вредности физичких карактеристика неких врста карбонских влакана дате су у Табели 3-4.

Табела 3-4: Приближне вредности физичких карактеристика неких врста карбонских влакана

Врста карбонских влакана	Густина (g/cm^3)	Модул еластичности (GPa)	Чврстоћа при затезању (GPa)	Максимално издужење (%)
Стандардна	1,7	250	3700	1,2
Велике чврстоће	1,8	250	4800	1,4
Великог модула еластичности	1,9	500	3000	0,5
Веома великог модула еластичности	2,1	800	2400	0,2

Слично као код стаклених влакана, карбонска влакна морају да се обложе, што се углавном ради епоксидним смолама. У последње време се карбонска влакна користе и са винилестерским и мешаним винилестерским и полиестерским смолама, док облагање полиестерским и винилестерским смолама није још увек довољно проучено.

Карбонска влакна се добијају или од полиакрилнитрила (влакна нешто нижег модула еластичности) или коришћењем нафте или смоле катрана каменог угља (влакна високог модула еластичности).

Карбонска влакна су веома трајна и добро се понашају у топлим и влажним срединама јер не апсорбују влагу, а такође показују добре особине и када су изложена оптерећењима на замор. Имају негативан или веома мали коефицијент термичке дилатације у подужном правцу, што им даје одличну стабилност у погледу димензија. Међутим, карбонска влакна су температурни и електрични проводници па је потребна обазривост у додиру са металним материјалима због могуће појаве галванске корозије услед електропотенцијалног неслагања између карбонских влакана и већине металних материјала. Нека истраживања указују да ово може проузроковати деградацију

полимерне матрице у ФРП материјалу (поготово у присуству хлорида) и корозију металних материјала (Alias and Brown, 1992; Torres-Acosta, 2002), због чега се мора поставити материјал, као што је нпр. стакло или епоксидни материјал, као баријера између карбона и метала.

Арамидна влакна су ароматични полиамиди органског порекла. Производ на бази арамидних влакана фирме Дупон (DuPont) назива се Кевлар, што се често користи као синоним за арамидне производе. Две најчешће врсте су Кевлар 29, са нешто нижим, и Кевлар 49, са већим модулом еластичности. Остали произвођачи имају своје име за производе на бази арамидних влакана, па тако Акзо (Akzo) производи Тварон, а Тејжин (Teijin) Технор.

Арамидна влакна су употребљавана за производњу прве генерације ФРП каблова за преднапрезање, у 1980-им, у Европи и Јапану. Међутим, само неколико произвођача још увек производи арамидне арматурне шипке или каблове за преднапрезање, док се арамидна платна повремено користе код ојачавања стубова обмотавањем.

Због релативно високе цене, проблема у производњи, високе апсорпције влаге, ниских температура топљења и релативно слабе отпорности на притисак, арамидна влакна имају мању примену у конструкцијском инжењерству. Њихове предности укључују екстремно велику чврстоћу, због чега се она користе у индустријским производима где се захтева апсорпција енергије, као што је случај код панцира, шлемова итд. Као и карбонска влакна, арамидна влакна имају негативан коефицијент термичке дилатације у подужном правцу влакана, а најлакша су од свих влакана високих перформанси, са густином од око $1,4 \text{ g/cm}^3$. У зависности од врсте арамидног влакана, чврстоћа при затезању у правцу влакана је у границама између 3400 и 4100 МПа, док је њихов модул еластичности у правцу влакана у границама од 70 до 125 ГПа.

3.3.3 Полимерна смола

Термин полимер (polymer) користи се да опише матрицу од екстремно великих молекула који се називају макромолекули, код којих су атоми међусобно повезани ковалентним везама. Иако се термин полимер генерално користи за описивање органског материјала овакве врсте, он се може користити и за описивање неорганског материјала. Термин полимерна смола (polymer resin), или једноставније смола, у индустрији композита означава примарни полимерни састојак у делу ФРП материјала

без влакана који међусобно повезује влакна. Овај део без влакана је такође познат и као матрица (matrix) или везиво (binder). Када се употребљавају у комерцијалним и индустријским производима, материјали базирани на полимерима се често називају и пластичним (plastic), тако да се акронимом ФРП такође означава и влакнима армирана пластика (fiber reinforced plastic). Акронимом РП (reinforced plastic) се означава армирана пластика, иако се њим најчешће описују кратким влакнима армирани пластични производи мале јачине и крутости (Bank, 2006).

Матрица је везивно средство у ФРП материјалу и има неколико важних функција као што су да (ISIS, 2006):

- ✓ повезује влакна,
- ✓ штити влакна од абразије и утицаја околине,
- ✓ раздваја и распоређује влакна у композиту,
- ✓ преноси силу између појединачних влакана.

Главни критеријум код избора материјала матрице је мала густина, обично мања од густине влакана, тако да се свеукупна тежина композитног материјала минимализује. Док влакна пружају чврстоћу и крутост ФРП материјалу, матрица је есенцијална у преносу силе између појединачних влакана. Пренос силе се остварује захваљујући напонима смицања који се јављају између појединачних влакана у матрици. Очигледно, квалитет везе између влакана и матрице је кључан фактор у постизању добрих механичких особина ФРП материјала.

Две главне групе полимера су: термореактивни или термоотпорни (thermosetting) и термопластични (thermoplastic) полимери. Они се међусобно разликују по начину повезивања полимерних ланаца када је полимер у чврстом облику. Термореактивни полимери су унакрсно повезани, што значи да су њихови молекуларни ланци повезани тако да формирају континуалну тродимензионалну мрежу чврстом ковалентном везом атома. За разлику од њих, термопластични полимери нису унакрсно повезани и њихови молекуларни ланци су повезани међусобно слабир Ван дер Валсовим (Van der Waals) силама или хидрогенским везама (Schwartz, 1997), што утиче на њихове механичке и физичке особине. Услед унакрсне везе, материјал са термореактивним полимером, који је направљен у процесу полимеризације, не може се загревањем омекшати и поново формирати у другачијем облику. Са друге стране, код термопластичног полимера молекуларни ланци могу да „теку“ када се полимер загрева и може се формирати другачији облик при хлађењу.

Најчешће употребљаване термопластичне смоле су: ацетал, акрилонитрил бутадиен стирен, најлон, полиетилен, полипропилен и полиетилен терефталат, док у термоотпорне смоле спадају: полиестерске, епоксидне, винилестерске, фенолне и полиуретанске.

Полимерне смоле су добри изолатори и не проводе температуру ни електрицитет с обзиром да је проценат заступљености шупљина мали. Ипак, вода у шупљинама полимерног композита може бити некада узрок електричне проводљивости ФРП материјала. Полимерне смоле се сматрају изотропним вискоеластичним материјалима. Оне теку при константним напонима или оптерећењима и релаксирају се при константним дилатацијама или померањима. Већина полимерних смола су подложне деградацији при ултраљубичастом зрачењу (White and Turnbull, 1994). Термоотпорне полимерне смоле не би требало употребљавати при температурама већим од 180°C, мада се могу користити и при већим температурама са одговарајућим системом заштите ватроодбојним адитивима. Термопластични полимери се користе и код високих температура, све до 450°C.

Мада се оба типа полимера користе у ФРП материјалима, ипак је доминантна употреба термоотпорних смола у односу на термопластичне из разлога као што су: термичка стабилност, хемијска отпорност, смањено течење и релаксација напона, мала вискозност и већ устаљене методе производње.

Полиестерске смоле се широко користе у производњи ФРП профила који се употребљавају у грађевинском конструкторству, као и за производњу арматурних шипки. Уколико је потребна већа отпорност елемента од ФРП материјала на корозију, препоручује се употреба скупљих, винилестерских смола мада отпорност на корозију неких полиестерских смола може бити готово једнако добра. Иако се и полиестерске смоле могу користити за ојачавање конструкција, епоксидне смоле су тренутно најзаступљеније због њихових везивних особина, малог скупљања и трајности. Називају се незасићеним полимерима зато што дупле ковалентне везе у њиховим полимерним ланцима нису засићене атомима водоника. У зависности од формуле полиестера и употребљеног катализатора, полиестерске смоле се могу правити како при собним, тако и при другим температурама, па због тога могу имати температуру стакленог прелаза између 40 и 110°C.

Епоксидне смоле се користе при изради многих производа од ФРП материјала који имају примену у грађевинском конструкторству. Многе карбонским влакнима

армиране ФРП траке за ојачавање конструкција су направљене са епоксидним смолама, а поред тога се и лепкови базирани на епоксидним смолама употребљавају за лепљење ФРП трака на бетон (као и остале материјале) у процесу ојачавања конструкција. Епоксидне смоле се користе и у поступку ојачавања када се композитни елемент прави на лицу места, делујући и као матрица композитног елемента и као лепак за причвршћавање елемента. Епоксидне смоле се употребљавају у производњи ФРП каблова за преднапрезање и каблова код висећих мостова, док је њихова употреба у производњи великих профила нешто мања, пре свега због њихове високе цене, али и због потешкоћа које се јављају у процесу производње великих профила. Епоксидне смоле су познате по одличној отпорности на корозију, као и значајно мањем скупљању од полиестерских и винилестерских смола после очвршћавања, што за последицу има мању осетљивост на пуцање при термичким оптерећењима. Епоксидне смоле се могу применити и у случају високих температура, виших од 180°C. Могу се правити при собној температури или при вишим температурама што утиче на температуру стакленог прелаза епоксида која је у границама од 40° до 300°C.

Развијене у последњих 20-30 година, **винилестерске смоле** су постале атрактивне полимерне смоле за израду ФРП производа у грађевинском конструкторству због њихових добрих особина као што су отпорност на корозију и једноставност израде (Blankenship et al., 1989.). Данас се винилестерске смоле користе у производњи већине арматурних шипки од композитних материјала, при изради пултрузованих профила, у процесу производње трака за ојачавање, као и шипки које се употребљавају у НСМ методи. Оне генерално служе као замена за полиестерске смоле због њихових изузетних особина у алкалним окружењима. Винилестерске смоле имају температуру стакленог прелаза између 40° и 120°C, а могу се правити при собној или некој другој, одговарајућој температури.

Фенолне смоле су најстарије и најшире коришћене термоотпорне смоле, које се тек од скора употребљавају за израду производа у конструкцијском инжењерству. Имају велику отпорност на ватру са температуром стакленог прелаза од 220 до 250°C. У овом тренутку оне се користе у изради ограниченог броја ФРП производа, као што су шеталишне решетке на нафтним платформама и траке за ојачавање дрвених конструкција.

Термоотпорне **полиуретанске смоле** су скоро уведене на тржиште као конструкцијске смоле, иако почетак њихове употребе у производњи изолационих и конструкцијских полимерних пенастих материјала датира у првој половини двадесетог века. Тек недавно су почеле да се производе у формама са великом густином које се могу користити у обликовању смоле и процесу пултрузије (Connolly et al., 2005). Полиуретанске смоле имају велику чврстоћу и када се користе са стакленим влакнима добијају се композитни материјали са великом чврстоћом у попречном правцу, као и великом чврстоћом на удар.

Табела 3-5: Приближне вредности физичких карактеристика неких врста термоотпорних полимерних смола

Врсте термоотпорних полимерних смола	Густина (g/cm ³)	Модул еластичности (GPa)	Чврстоћа при затезању (GPa)	Максимално издужење (%)
Полиестерске	1,2	4,0	65	2,5
Епоксидне	1,2	3,0	90	8,0
Винилестерске	1,12	3,5	82	6,0
Фенолне	1,24	2,5	40	1,8
Полиуретанске	променљива	2,9	71	5,9

3.3.4 Додаци

ФРП материјали поред влакана и полимерне смоле садрже и друге састојке. Влакна се производе површинским пресвлачењем и испоручују се у различитим облицима, док смоле могу садржати филере, катализаторе, акцелераторе, очвршћиваче, агенсе изливања, пигменте, ултраљубичасте стабилизаторе и остале адитиве. Сви ови додаци имају различите функције, од проузроковања полимеризације смоле, до помоћних процеса за промену коначних особина ФРП материјала.

Филер (камено брашно) који се користе у производњи ФРП материјала су: калцијум карбонат, каолин, калцијум сулфат и други, а користе се како због смањења коштања материјала, тако и због редукције скупљања, ватроотпорности и повећања чврстоће ФРП материјала. Поред тога, они помажу и у превенцији појаве прслина, а поправљају и уједначеност карактеристика.

Постоји широк спектар адитива за побољшање одређених особина композитних материјала. Најчешћа својства која се побољшавају додавањем адитива су отпорност на ватру и смањење скупљања, али поред тога, они утичу и на вискозност, жилавост, топлотну стабилност, ултраљубичасту стабилност, као и на низ других веома важних особина.

3.4 Методе производње елемената од ФРП материјала

Постоји широк спектар метода производње елемената од ФРП материјала у конструкцијском инжењерству. Најчешће и најважније методе производње ФРП материјала са својим изворним (енглеским) називима, који још увек немају наш званични превод, су:

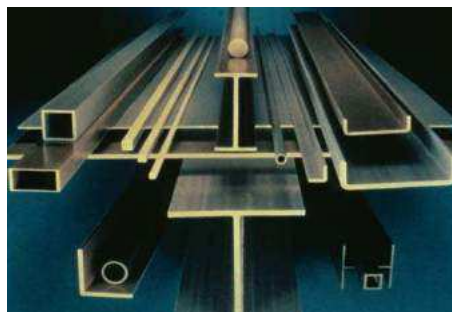
- ✓ Пултрузија (Pultrusion);
- ✓ Ручно или влажно постављање (Hand or wet layup);
- ✓ Намотавање влакана (Filament winding).

Поред ових метода, које ће укратко бити објашњене, постоји велики број других које нису разматране, као што су:

- ✓ Resin Transfer Molding (RTM);
- ✓ Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM);
- ✓ Compression Molding;
- ✓ Injection Molding;
- ✓ Reinforced Reaction Injection Molding (RRIM);
- ✓ Centrifugal Casting;
- ✓ Pull-winding.

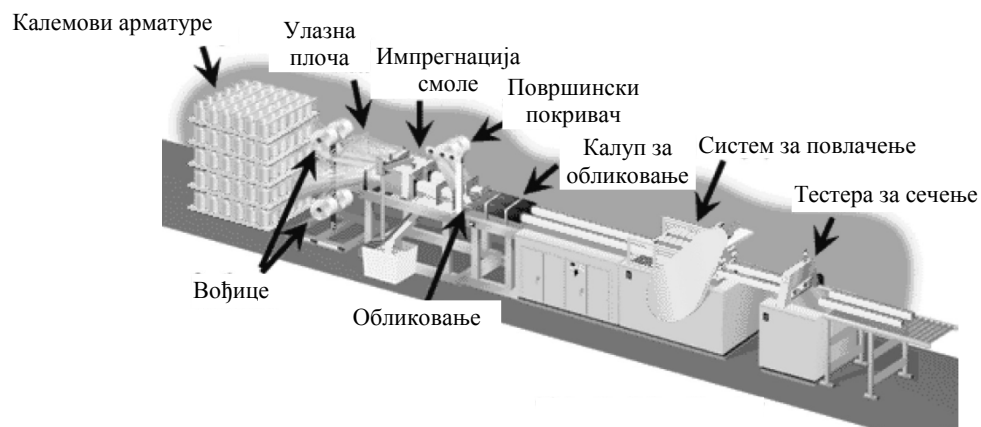
3.4.1 Пултрузија (Pultrusion)

Пултрузија је најраспрострањенија метода развијена раних 1950-их, којом се готов производ прави у фабрици од сирових састојака, а затим шаље на градилиште. Процес пултрузије користи се за производњу ФРП арматурних шипки, трака за ојачавање и конструкцијских профила и она је по цени најкомпетитивнија метода за производњу ФРП елемената високог квалитета. На *Слици 3-9* приказани су различити пултрузовани конструкцијски профили који се употребљавају у конструкцијском инжењерству.



Слика 3-9: Различити пултрузовани конструкцијски профили (ISIS Educational module 2, 2006)

Прву машину за пултрузију, названу *Glastruder*, развио је Бранд Голдсворти (Brandt Goldsworthy) у раним 1950-им (Goldsworthy, 1954.). Шема линије пултрузије или машине показана је на *Слици 3-10*.



Слика 3-10: Линија пултрузије (Bank, 2006)

Процес пултрузије се постиже повлачењем сирових влакана кроз смоласту каду и затим кроз загрејани шаблон. Полимерна матрица очвршћава у облику шаблона, проласком смолом импрегнираних влакана кроз шаблон, чиме се добија конструкцијски део. Процес је континуалан тако да се ФРП елемент може направити било које дужине. Обзиром да су сва влакна у пултрузованом елементу оријентисана дуж осе елемента, овим процесом се креирају једноосни ФРП елементи.

3.4.2 Ручно или влажно постављање (Hand or Wet layup)

Ова метода представља мануелну методу, којом се ФРП производ прави на градилишту у време његове уградње. Ручно постављање се често користи у процесу санације, када се траке или платна од ФРП материјала лепе на спољашност армиранобетонских, челичних, алуминијумских или дрвених елемената. У овој методи, крути калуп се прекрије смолом после чега се ваљком утисну влакна (у форми трака

или платна) у смолу. У неким случајевима се додаје смола на спољној површини влакана како би се обезбедила њихова потпуна импрегнација. Уколико је потребно, могу се додавати слојеви ФРП материјала једни преко других како би се постигла жељена дебљина. Примена ручног постављања при санацији бетонског стуба приказана је на *Слици 3-11*.



Слика 3-11: Стаклено ФРП платно примењено у ојачавању АБ стуба коришћењем технике ручног постављања (ISIS Educational module 2, 2006)

3.4.3 Намотавање влакана (Filament Winding)

ФРП елементи се често производе и у аутоматском процесу, приказаном на *Слици 3-12*, у коме се сирова влакна извлаче са калемова кроз смоласту купку и намотавају на ротирајући калуп. Намотавање влакана на калуп се контролише компјутером, омогућавајући да се влакна поставе са екстремном прецизношћу у различитим, жељеним правцима. Варирањем оријентације влакана, елементи добијени овом методом могу бити са различитим механичким карактеристикама које одговарају одређеним применама.



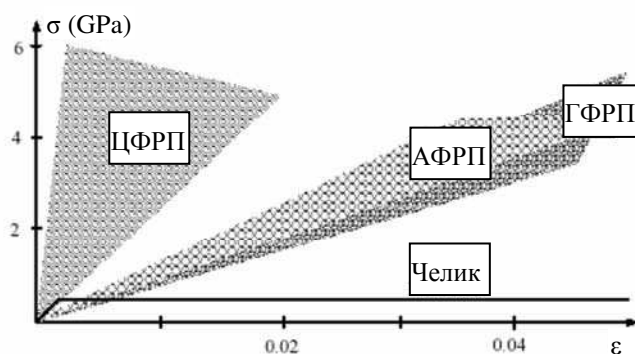
Слика 3-12: Стаклена влакна која се намотавају на троугаоуни калуп у току производње троуганих стаклених ФРП цеви намотавањем влакана (ISIS Educational module 2, 2006)

3.5 Карактеристике елемената од ФРП материјала

Особине елемената од ФРП материјала зависе од бројних фактора укључујући и (ISIS, 2006):

- ✓ релативни однос запремина влакана и матрице,
- ✓ механичке особине материјала (влакана, матрице и осталих састојака),
- ✓ оријентација влакана,
- ✓ метода производње.

На *Слици 3-13* приказане су криве зависности између напона и дилатације за неколико једноосних ФРП материјала, као и за арматурни челик (fib bulletin 14, 2001). На основу ових података очигледно је да и ГФРП и АФРП имају модул еластичности који је значајно мањи у односу на челик пре течења, као и да ЦФРП има модул еластичности који може бити и већи него код челика у неким случајевима. Такође је евидентно на основу података да ФРП материјали имају чврстоћу при затезању неколико пута већу него челик.



Слика 3:13: Криве зависности између напона и дилатације за ГФРП, ЦФРП и АФРП материјале и челик (fib bulletin 14, 2001)

Табела 3-6: Карактеристичне вредности физичких карактеристика за ГФРП, ЦФРП, АФРП материјале и челик

	Челик	ГФРП	ЦФРП	АФРП
Напон течења (МПа)	276-517	-	-	-
Чврстоћа при затезању(МПа)	483-690	483-1600	600-3690	1720-2540
Модул еластичности (МПа)	200	35-51	120-580	41-125
Дилатација течења (‰)	0,14	-	-	-

3.5.1 Модул еластичности

Код једноосних ФРП материјала, највећа чврстоћа и крутост добијају се када је материјал напрегнут на затезање у правцу влакана. У овом случају, модул еластичности ФРП материјала ($E_{\text{фрп}}$) може се приближно изразити у функцији модула еластичности компоненталних материјала, тј. модула еластичности матрице (E_m) и модула еластичности влакана (E_f), као и запреминских делова матрице и влакана (V_m и V_f), према једначини познатој као правило мешавине (rule of mixtures):

$$E_{\text{фрп}} = E_m V_m + E_f V_f = (E_f - E_m) V_f + E_m, \quad (3-1)$$

$$V_f + V_m = 1. \quad (3-2)$$

Једначином (3-1) се може срачунати само модул еластичности ФРП материјала у правцу влакана, док је модул еластичности у правцу управаном на влакна знатно мањи.

Како је правило мешавине апроксимација микро-механичког понашања, тачнију везу између напона и дилатација требало би добити тестом затезања (fib bulletin 14, 2001). Због тога би својства материјала требало дати тако да одражавају карактеристике влакана и матрице, као и микро-структурне аспекте, као што су пречник влакана, правац простирања влакана, локални дефекти, запремински проценти и особине додирне површине између влакана и матрице.

У случају префабрикованих елемената карактеристике материјала базиране на површини попречног пресека могу се користити у прорачуну и обично су дате од стране произвођача. Са друге стране, у случају формирања елемента на лицу места, коначна дебљина елемента, а са тим и запремински удео влакана је несигуран и може варирати, због чега прорачун базиран на особинама ФРП материјала као целине може бити непоуздан. Из тог разлога произвођачи често дају карактеристике материјала и за чиста влакна, како би се у прорачуну користиле одговарајуће карактеристике ФРП материјала. Разлика између ова два приступа је овде укратко објашњена и илустрована примером (fib bulletin 14, 2001).

Услед чињенице да су модул еластичности (крутост) и чврстоћа влакана много већи у поређењу са крутошћу и чврстоћом матрице, особине ФРП материјала су у многоме одређене особинама влакана и површином попречног пресека самих влакана. Како су особине ФРП материјала базиране на површини попречног пресека влакана и матрице, крутост и чврстоћа ФРП материјала су мање у поређењу са особинама самих влакана. Ипак, чврстоћа и крутост целог материјала није промењена зато што је ово смањење компензирано повећањем површине попречног пресека ФРП материјала у

поређењу са површином попречног пресека влакана. На основу свега овог очигледно је да постоји јака веза између запреминског удела влакана и особина ФРП материјала које би требало користити у прорачуну. Ово је илустровано примером где је за произвољно изабране особине влакана и матрице приказан ефекат запреминског удела влакана на особине ФРП материјала (Табела 3-7 и Слика 3-14).

Табела 3-7: Пример који показује ефекат запреминског удела влакана на особине ФРП материјала (fib bulletin 14, 2001)

Изабране особине компоненталних материјала ФРП композита:								
$E_f = 220 \text{ GPa}$ $f_f = 4000 \text{ MPa}$								
$E_m = 3 \text{ GPa}$ $f_m = 80 \text{ MPa}$								
Површина попречног пресека			Особине ФРП материјала				Оптерећење лома	
A_f (mm ²)	A_m (mm ²)	A_{fip} (mm ²)	V_f (%)	E_{fip} (јед. (3-1)) (MPa)	f_{fip} (јед. (3-2)) (MPa)	Гранична дилатација (ϵ_u) (‰)	(kN)	(%)
70	0	70	100	220000	4000	1,818	280,0	100,0
70	30	100	70	154900	2824	1,823	282,4	100,9
70	70	140	50	111500	2040	1,830	285,6	102,0
У случају трака са ширином од 100 mm делећи ову вредност са 100 mm добијамо дебљину траке (редом 0,7 mm, 1,0 mm и 1,4 mm).								

где је:

A_f – површина влакана,

A_m – површина матрице,

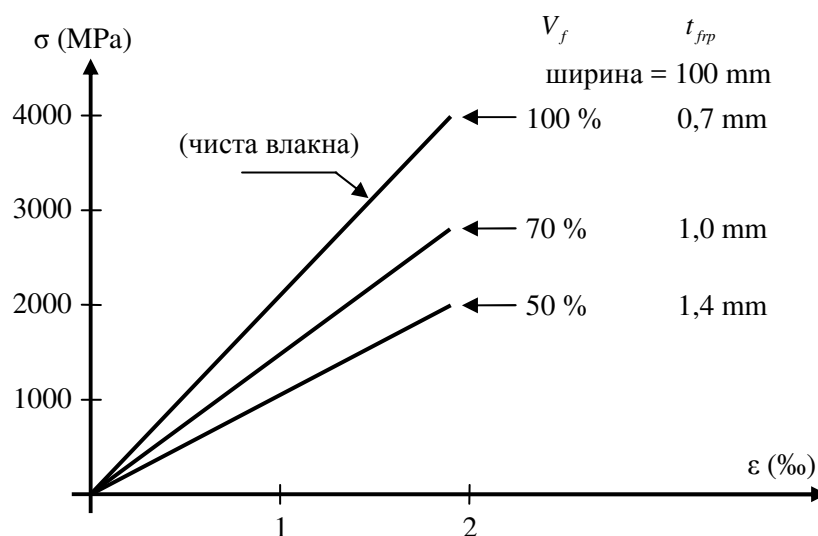
A_{fip} – површина ФРП материјала,

f_f – чврстоћа при затезању влакана,

f_m – чврстоћа при затезању матрице,

f_{fip} – чврстоћа при затезању ФРП материјала.

У случају константне површине влакана ($A_f=70 \text{ mm}^2$) оптерећење лома и дилатација при лому се веома мало мењају са повећавањем површине матрице (A_m). За разлику од оптерећења лома и граничне дилатације, повећање површине матрице значајно утиче на модул еластичности и чврстоћу ФРП материјала при затезању.



Слика 3-14: Крива зависности између напона и дилатације ФРП материјала при различитим запреминским деловима влакана V_f који су дати у Табели 3-4 (fib bulletin 14, 2001).

Дати пример показује да приликом избора ФРП материјала некада није довољно само упоређивање њихових чврстоћа већ је неопходно знати и састав ФРП материјала. У случају када постоји недоумица око дебљине елемента прорачун би требало базирати на особинама влакана пре него на особинама целог елемента укључујући и матрицу.

Модул еластичности при притиску је генерално мањи од модула еластичности при затезању и обично је од 50 до 80% од оног добијеног тестом затезања, у зависности од типа ФРП материјала.

3.5.2 Чврстоћа

Чврстоћа једноосних ФРП материјала који су оптерећени у правцу влакана је већа при затезању него при притиску, па је из тог разлога њихова најчешћа употреба код затегнутих бетонских елемената.

Понашање ФРП материјала при затезању у великој мери зависи од граничних дилатација влакана и матрице. На Слици 3-15 и Слици 3-16 приказани су могући случајеви дилатација лома влакана и матрице, чиме се пружа увид у понашање ФРП материјала при лому (ISIS, 2006).

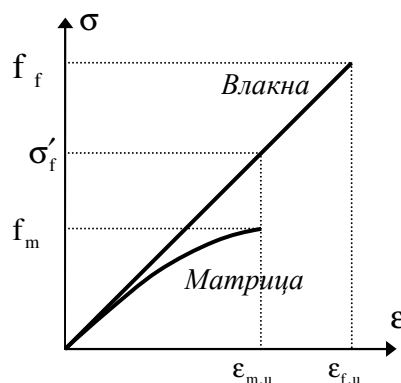
У првом случају када је дилатација лома матрице ($\epsilon_{m,u}$) мања од дилатације лома влакана ($\epsilon_{f,u}$) као што је приказано на Слици 3-15, а поред тога је запремински део влакана (V_f) мали (мањи од 0,10), тада лом ФРП материјала зависи од лома матрице. У

овом случају чврстоћа ФРП материјала при затезању (f_{frp}) је дефинисана приближним изразом (3-3):

$$f_{frp} = \sigma'_f V_f + f_m (1 - V_f), \quad (3-3)$$

где је:

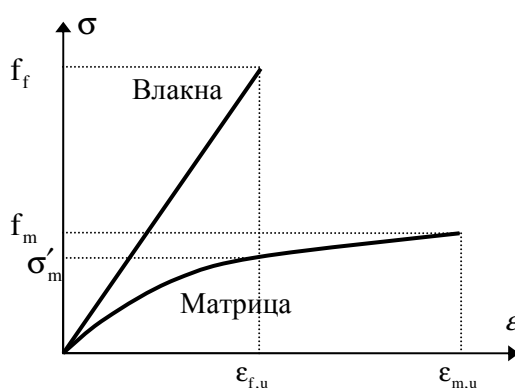
σ'_f – напон у влакнима у тренутку лома матрице.



Слика 3-15: Криве зависности између напона и дилатације у влакнима и матрици када је дилатација лома матрице мања од дилатације лома влакана

Међутим, уколико је запремински део влакана велики, тада влакна носе већи део оптерећења и лом матрице не представља услов за лом ФРП материјала. У овом случају, оптерећење преносе влакна све до достизања граничне дилатације ($\epsilon_{f,u}$). Чврстоћа ФРП материјала при затезању (f_{frp}) је тада дефинисана изразом (3-4):

$$f_{frp} = f_f V_f \quad (3-4)$$



Слика 3-16: Криве зависности између напона и дилатације у влакнима и матрици када је дилатација лома матрице већа од дилатације лома влакана

где је:

σ'_m – напон у матрици у тренутку лома влакана.

У другом случају, када је гранична дилатација матрице ($\epsilon_{m,u}$) већа од граничне дилатације влакана ($\epsilon_{f,u}$), као што је приказано на *Слици 3-16*, а уз то је запремински део влакана мали, до лома ФРП материјала не долази при лому влакана, а чврстоћа ФРП материјала при затезању (f_{frp}) је дефинисана изразом:

$$f_{frp} = f_m (1 - V_f). \quad (3-5)$$

Међутим, уколико је запремински део влакана велики, тада је пренос оптерећења од влакана на матрицу при иницијалном лому влакана велики, због чега долази до лома ФРП материјала. Чврстоћа ФРП материјала при затезању (f_{frp}) се може описати изразом:

$$f_{frp} = f_f V_f + \sigma'_m (1 - V_f). \quad (3-6)$$

У већини примена ФРП материјала у грађевинском инжењерству запремински део влакана (V_f) је већи од 0,10 и сматра се великим.

Чврстоћа ФРП материјала при затезању управно на правац влакана је знатно мања него у правцу влакана и зависи од много фактора, али неће бити даље разматрана због чињенице да је елемент од ФРП материјала ретко оптерећен на овај начин у грађевинском инжењерству.

Чврстоћа ФРП материјала при притиску је мања у односу на чврстоћу при затезању и зависи од бројних фактора, укључујући тип влакана, особине матрице, додирне површине између матрице и влакана итд, и може се достићи услед микроизвијања влакана, попречног лома затезањем матрице или ломом смицањем. Чврстоћа једноосних ФРП материјала при притиску оптерећених у правцу влакана је приближно 55%, 20% и 78% чврстоће при затезању стакленог, араמידног и карбонског ФРП материјала редом. Арамидна влакна су генерално слаба на притисак, због чега се чврстоћа при притиску материјала направљених од ових влакана најчешће занемарује (ISIS, 2006).

3.5.3 Замор

Већина једноосних ФРП материјала који се користе у грађевинском инжењерству показују у поређењу са челиком добре особине на замор.

Мада су истраживања понашања на замор у току, може се рећи да карбонски ФРП материјал показује изванредне особине на замор. Ово се приписује чињеници да угљенична влакна имају веома велику крутост. Та крутост ограничава дилатацију полимерне матрице па самим тим спречава њено пуцање, као и лом по додирној

површини између матрице и влакана, чиме се спречава замор материјала. Испитивања на замор при затезању која су изведена код једноосних карбон-епоксидних ФРП елемента указују да они могу да поднесу знатно веће главне напоне и амплитуде компоненталних напона у односу на челик. Стаклена влакна имају значајно мању крутост у односу на карбонска влакна тако да се при понаваљању циклуса оптерећења могу јавити веће дилатације матрице. Ово може проузроковати појаву већег броја прслина у матрици и самим тим лом ГФРП материјала. Арамидна влакна имају крутост која је између крутости стаклених и карбонских влакана због чега би се могло очекивати и боље понашање на замор у односу на ГФРП материјал, али она су ипак осетљива на оштећење замором због процеса који се назива дефибрилизација и може водити ка евентуалном лому замором.

3.5.4 Течење

Течење је феномен који се јавља у различитом обиму код безмало свих инжењерских материјала и односи се на појаву повећања дилатација при константном нивоу напона. Иако карбонска, стаклена и арамидна влакна показују релативно мало течење при већини амбијенталних услова, материјал матрице ФРП материјала је вискоеластичан тако да и ФРП материјали „теку“ при константном оптерећењу. Течење одређеног ФРП материјала зависи у првом реду од запреминског удела влакана, као и оријентације влакана у односу на нанешено оптерећење. Поред тога, и температура, као и влажност, могу имати значајан утицај на течење ФРП материјала. Међутим, код већине једноосних ФРП материјала који се користе у грађевинском инжењерству течење није од неког посебног значаја за разматрање уколико се испуни услов да је напон у ФРП материјалу ограничен.

3.5.5 Кидање течењем (напонска корозија)

Неке врсте влакана (у првом реду стаклена) су подложне облику лома који се назива кидање течењем када се лом влакана јавља при константном нивоу напона који је знатно мањи од напона лома ФРП материјала. Због подложности стаклених влакана и самим тим ГФРП материјала напонској корозији, ниво напона је често строго ограничен при дуготрајном оптерећењу, на мање од 20 до 25% чврстоће ФРП материјала при затезању.

3.5.6 Трајност ФРП материјала у условима животне средине

Трајност неког конструкцијског елемента дефинише се у општем случају као његова отпорност на различита дејства у задатом временском интервалу, као што су: прслине, оксидација, хемијска деградација, губитак везе, оштећења услед агресивног дејства средине и друго. Механичке особине материјала су од кључног значаја при пројектовању конструкција, али су једнако важна и разматрања о утицају животне средине и трајности материјала. Излагање разноврсним неповољним условима може значајно да промени механичке особине ФРП материјала тако да се утицаји као што су температура, влажност, ултра-љубичасто зрачење, разноврсне хемикалије и ватра морају разматрати при њиховој употреби.

У упутству америчког института за бетон (ACI 440.2R-08) дати су редукциони фактори (Табела 3-8) за добијање прорачунских механичких карактеристика ФРП материјала, у зависности од врсте материјала и услова изложености.

У овом делу рада кратко су описани значајни фактори који имају утицај на трајност ФРП материјала који се користе у грађевинским конструкцијама.

Табела 3-8: Фактор редукције утицаја средине за различите ФРП материјале и услове изложености према ACI 440.2R-08

Услови изложености	Врста влакана	Фактор редукције C_e
Затворен простор	Карбон	0,95
	Стакло	0,75
	Арамид	0,85
Отворен простор (мостови, стубови, отворене гараже)	Карбон	0,85
	Стакло	0,65
	Арамид	0,75
Агресивни услови средине (хемијска дејства и отпадне воде)	Карбон	0,85
	Стакло	0,50
	Арамид	0,70

Температура је веома битан фактор у пројектовању и коришћењу ФРП материјала у инфраструктурним објектима. При повишеним температурама, полимерни материјали се разлажу, а у неким случајевима се и запале. Ниске температуре нису од значаја у већини конструкцијских примена ФРП материјала, изузев у ретким

случајевима где екстремно ниске (криогене) температуре резултирају кртошћу материјала.

Утицај температуре на ФРП материјал је комплексан тако да је истраживање ефекта температуре у току. Досадашња истраживања су показала следеће особине ФРП материјала које се не смеју занемарити при разматрњу њиховог коришћења у потенцијалној конструкцијској примени (ISIS, 2006):

- ✓ Високе температуре повећавају течење ФРП материјала;
- ✓ Веће температуре повећавају количину деградације ФРП материјала услед утицаја хемикалија или продора влаге;
- ✓ Различити коефицијенти термичке дилатације између влакана и матрице или између ФРП материјала и подлоге (у случајевима његове везе са бетоном, челиком или дрветом) могу проузроковати појаву напона и оштећење додирне површине између матрице и влакана или додирне површине ФРП материјала и подлоге;
- ✓ Термички циклуси и резултујући поновљени термички напони, могу проузроковати оштећење ФРП материјала кроз пуцање матрице и лом влакана, што може да поспеши продор влаге и/или хемикалија.

Влажност: Готово сви полимери, уколико су у влажној средини, апсорбоваће влагу док се не достигне тачка засићења. Количина влаге која је апсорбована и ефекти ове апсорпције на механичке перформансе ФРП материјала варираће у зависности од врсте материјала. Тренутно преовладава мишљење (ISIS, 2006) да се повећање влажности у ФРП материјалу генерално јавља у подручју матрице у близини влакана услед капиларног деловања, чиме се погоршавају особине матрице и оштећује површина влакана. Код једноосних ФРП материјала чврстоћа при затезању мање зависи од особина матрице тако да на њу влажност генерално не утиче. Са друге стране, особине ФРП материјала које зависе од особина матрице (чврстоћа при притиску и чврстоћа при смицању) могу бити значајно деградиране у условима повећане влажности. Арамидна влакна су највише осетљива на ефекат влажности с обзиром да су сама влакна позната по апсорпцији влаге и бубрењу у влажној средини, што за последицу има пуцање матрице и развој унутрашњих напона. Због тога се арамидна влакна не применују тамо где се влажност може јавити као потенцијални проблем.

Деградација механичких особина ФРП материјала услед влажности достићи ће максимални ниво када полимерна матрица достигне своју тачку zasiћења. После тога нема деградирања механичких особина, по чему се ови материјали фундаментално разликују од челика, код којих се деградација наставља док метал у потпуности не кородира услед влажности.

Ултраљубичасто зрачење може деградирати ФРП материјале. Арамидна влакна су позната по израженој осетљивости на ултраљубичасто зрачење, док су карбонска и стаклена влакна нешто отпорнија. Поред тога, већина полимерних матрица благо деградира услед ултраљубичастиг зрачења.

Деградација услед ултраљубичастиг зрачења може бити спречена употребом различитих адитива, применом омотача од пигментног гела на површини ФРП материјала или бојењем елемента од ФРП материјала мат бојом. На пример, код примене ФРП трака у ојачавању бетона спољашњим лепљењем, оне се премазују ултраљубичастом отпорном бојом која одговара бетону.

Алкални ефекти: ФРП материјали се све више користе као унутрашња арматура код бетонских конструкција као замена за конвенциону челичну арматуру. Окружење унутар бетона је високо алкално (pH ниво је генерално између 12 и 13,5) што може бити проблем за ФРП материјал од стаклених влакана, чија се чврстоћа смањује у алкалном окружењу. Због тога се ГФРП шипке често производе са алкално-отпорним полимерним матрицама. Иако постоје недоумице око ефекта алкалне средине на стаклене ФРП шипке, постоји сагласност да се оне могу користити као арматура у бетону уз услов да је напон ограничен из напред наведених разлога.

Ватра: Све полимерне смоле горе када су изложене довољно високим температурама, тако да је важно разматрати могућност појаве пожара код ФРП материјала и конструкција где се они користе. Полимери који се често користе као матрице у инфраструктурним ФРП материјалима су генерално запаљиви и ослобађају велике количине густог, црног, и некада токсичног и/или корозивног дима, тако да се потенцијалне последице пожара морају разматрати у току процеса пројектовања било којих конструкција са ФРП материјалима. Постоје различите могућности за заштиту од ФРП материјала од високих температура почев од употребе експандирајућих противпожарних премаза, изолација од пожара, адитива матрици, керамичких боја итд.

4 ОЈАЧАВАЊЕ АБ ГРЕДА ФРП МАТЕРИЈАЛИМА

4.1 Узроци настајања оштећења

Неки од најчешћих фактора који утичу на пропадање бетонске инфраструктуре су (ISIS, 2004):

- ✓ Ефекти средине на понашање конструкција, који обухватају хлоридима узроковану корозију конвенционалног арматурног челика у бетону, циклусе замрзавања и одмрзавања, као и циклусе влажења и сушења, од којих сваки може допринети појави прелина и разарању бетона;
- ✓ Повећање пројектних оптерећења, такво да конструкције не могу безбедно носити оптерећења која се захтевају актуелним прописима;
- ✓ Промена начина прорачуна од приступа базираног на дозвољеним напонима (стара метода пројектовања) до приступа базираног на теорији граничних стања (актуелна метода пројектовања);
- ✓ Повећање интензитета саобраћаја и оптерећења услед повећаног броја аутомобила и тежих камиона на путевима.

4.2 Процена стања постојеће конструкције

Стање бетонске површине је један од критичних фактора који би требало размотрити пре употребе било ког ФРП система за ојачање неке бетонске конструкције. Постојећи бетон мора бити у стању да пренесе оптерећење од конструкцијског

елемента на ФРП систем кроз напоне смицања који се развијају у лепку/матрици. У неким случајевима се део површинског слоја бетона мора уклонити и заменити пре уградње ФРП система за ојачање.

Процена стања постојеће конструкције треба да буде резултат детаљног истраживања на лицу места и анализе оригиналних пројектних цртежа укључујући и све измене оригиналног пројекта. Неопходно је проценити носивост постојеће конструкције, уочити недостатке и разлоге оштећења бетонског елемента и одредити стање постојеће бетонске подлоге. На основу препорука датих од стране америчког института за бетона (ACI Committee 440, 2002), истраживањем на лицу места треба утврдити:

- ✓ Постојеће димензије конструкцијског елемента;
- ✓ Положај, величину и узрок настајања прелина и цепања;
- ✓ Количину и положај корозије арматурног челика;
- ✓ Количину и положај постојећег арматурног челика;
- ✓ Чврстоћу бетона при притиску;
- ✓ Стање бетона, поготово бетонског заштитног слоја, у свим областима где би се ФРП систем требао везати за бетон.

Процену стања постојеће конструкције би требало извести са великом пажњом а избор стратегије при било којој конструкцијској санацији или ојачавању конструкције ФРП системима зависи како од процене стања конструкције тако и од процене погодности употребе одређених метода ојачања у санацији конструкције.

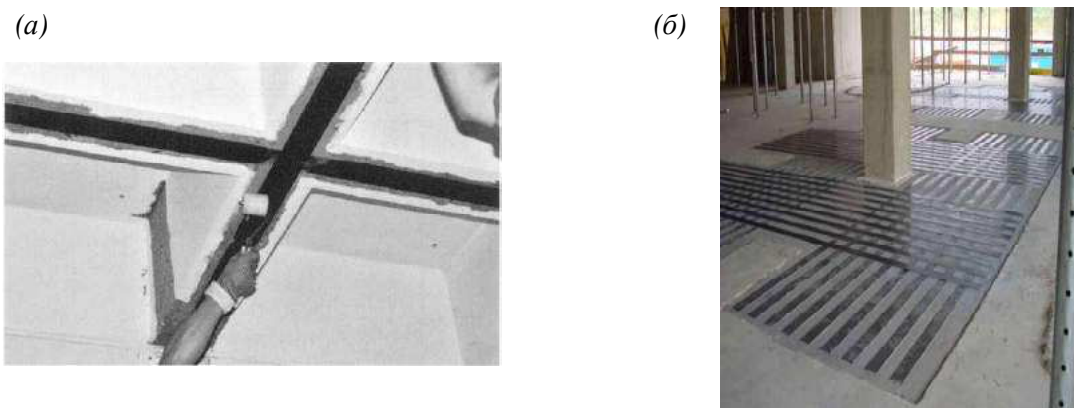
4.3 Најчешће примене ФРП материјала за повећање носивости

ФРП материјали се као спољашња арматура у ојачавању или обнављању АБ конструкција најчешће користе за (ISIS, 2004):

- ✓ повећавање носивости АБ елемената оптерећених на савијање,
- ✓ повећавање носивости АБ елемената оптерећених на смицање,
- ✓ повећавање носивости аксијално притиснутих АБ стубова.

4.3.1 Повећавање носивости АБ елемената оптерећених на савијање

Код повећавања носивости АБ елемената оптерећених на савијање ФРП систем за ојачање се поставља на затегнутој и/или бочној страни као додатна затегнута арматура (Слика 4-1). Детаљнији опис повећавања носивости АБ греда оптерећених на савијање дат је у делу 4.4.



Слика 4-1: Ојачавање АБ елемената оптерећених на савијање коришћењем споља залепљене ФРП арматуре

(a) *fib bulletin 14, 2001*; (б) *Motavalli and Czaderski, 2007*

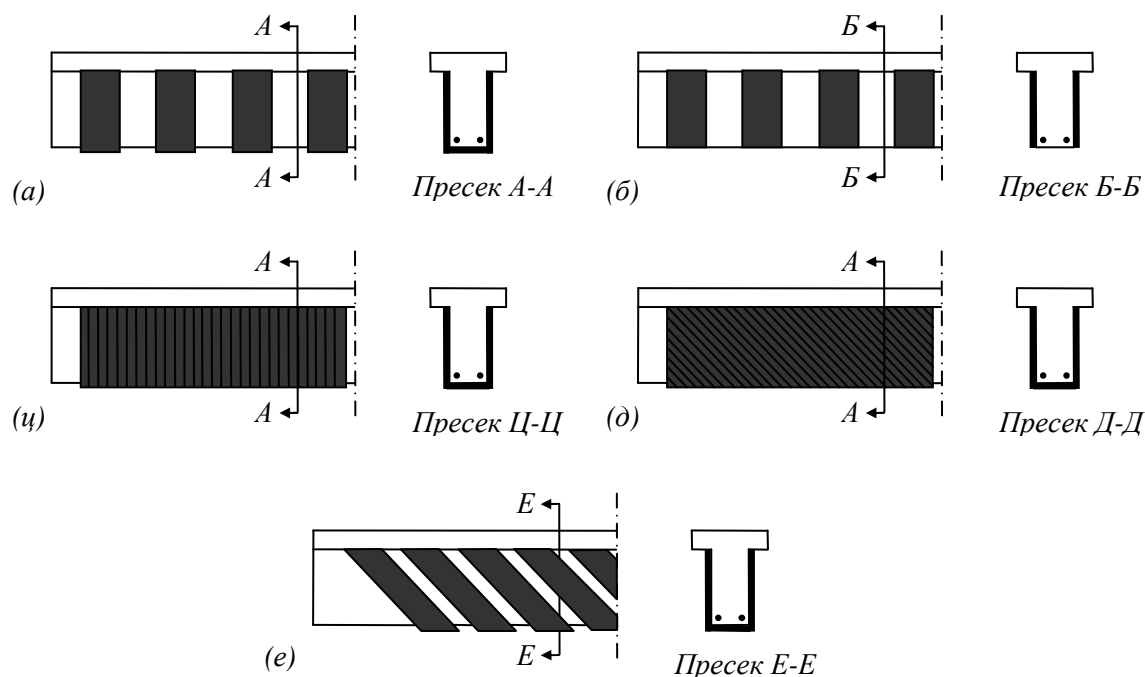
4.3.2 Повећавање носивости АБ елемената оптерећених на смицање

У случају повећавања носивости АБ греда оптерећених на смицање, ФРП материјали се лепе на бочне стране греде као што је приказано на Слици 4-2. На тај начин се повећава носивост АБ греда на смицање.



Слика 4-2: Ојачавање АБ греда на савијање и смицање (*Bank, 2006*)

У овом случају влакна могу бити оријентисана под било којим углом у односу на подужну осу греде. Елементи од ФРП материјала могу бити примењени само на бочној страни (Слика 4-3(a)) или у облику У-омотача (Слика 4-3(б)) који су континуални и налазе се и на доњој страни греде.



Слика 4-3: Различити начини повећавања носивости АБ греда оптерећених на смицање спољашњим лепљењем ФРП арматуре

У-омотачи имају додатну предност у побољшању сидрења ФРП арматуре у случају повећавања носивости греда оптерећених на савијање када су постављени преко те арматуре. ФРП арматура у случају повећавања носивости на смицање може се применити и у виду континуалних трака коначне ширине. Споља залепљена ФРП арматура ради на начин сличан унутрашњим челичним узенгијама чиме се повећава носивост на смицање бетона.

Како је дужина на којој се ФРП узенгије могу анкерисати (сидрити) ограничена висином греде, квалитет постојећег бетона је од пресудног значаја. Поред тога, некад је неопходно поставити подужну ФРП траку како би се побољшало сидрење арматуре којом се повећава носивост на смицање. Како би се избегао могућ лом ФРП трака услед концентрације напона у угловима греда, углове би требало заоблити са минималним полупречником од 15 mm (Bank, 2006).

4.3.3 Повећавање носивости аксијално притиснутих АБ стубова

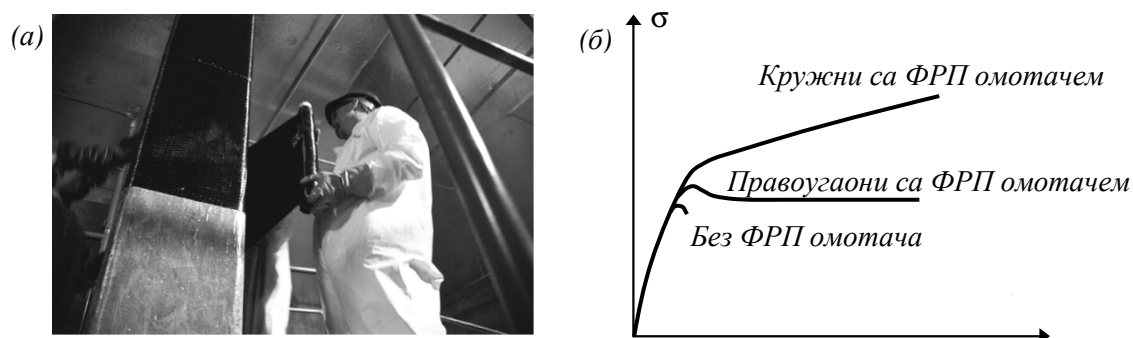
Постојећи бетонски стубови оптерећени тако да се у њима јавља сила притиска могу се ојачати споља залепљеним ФРП омотачима (платнима) обмотавањем стубова (Слика 4-4). Када је стуб изложен аксијалном притиску, скраћује се подужно али се

шири бочно. Ово ширење изазива појаву напона затезања у ФРП омотачу који утеже (confine) бетон у коме се јавља просторно стање напона. Као последице овог стања напона је и повећање носивости, односно јачи и дуктилнији конструкцијски елементи.



Слика 4-4: (а) Ојачање кружног АБ стуба коришћењем споља залепљене ФРП арматуре;
(б) Употреба ФРП платна у ојачавању кружног АБ стуба
(<http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/116371391EN6.pdf>)

Споља залепљена ФРП платна се такође могу користити и за повећавање носивости кратких аксијално напрегнутих правоугаоних АБ стубова (Слика 4-5 (а)). Међутим, има веома мало експерименталних података о понашању ових елемената, а обмотавање ФРП платнима је знатно мање ефикасно са становништа повећања носивости код стубова који нису кружног попречног пресека (Слика 4-5 (б)).

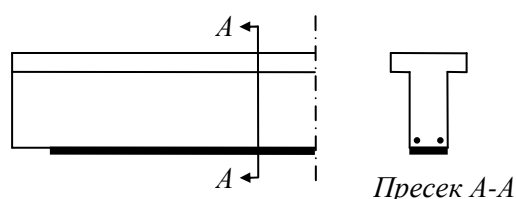


Слика 4-5: (а) Обмотавање правоугаоног стуба ФРП платном (Bank, 2006); (б) Криве зависности између напона и дилатације кружног стуба обмотаног ФРП омотачем, правоугаоног стуба обмотаног ФРП омотачем и бетонског стуба без ојачања

Споља залепљена ФРП арматура се може користити за повећање носивости на смицање и кружних и правоугаоних АБ стубова коришћењем истих принципа као и оних за повећавање носивости АБ греда оптерећених на смицање.

4.4 Повећавање носивости АБ греда оптерећених на савијање

Повећање носивости (ојачавање) АБ греда оптерећених на савијање постиже се постављањем ФРП система за ојачање на затегнутој површини греде (или дела греде) како би се повећала укупна сила затезања у елементу, а самим тим и гранични момент савијања (момент носивости). У случају ојачања АБ греда, влакна ФРП арматуре су паралелна са правцем доминантног напона затезања, тј. паралелна са подужном осом греде (Слика 4-6).



Слика 4-6: Ојачавање армиранобетонске Т греде оптерећене на савијање

Анализа греда ојачаних на савијање може се спровести према поступку који се користи код анализе греда од армираног бетона уз услов да се утицај спољашње ФРП арматуре узме у обзир на адекватан начин и да је специјална пажња посвећена проблему везе између бетона и ФРП арматуре.

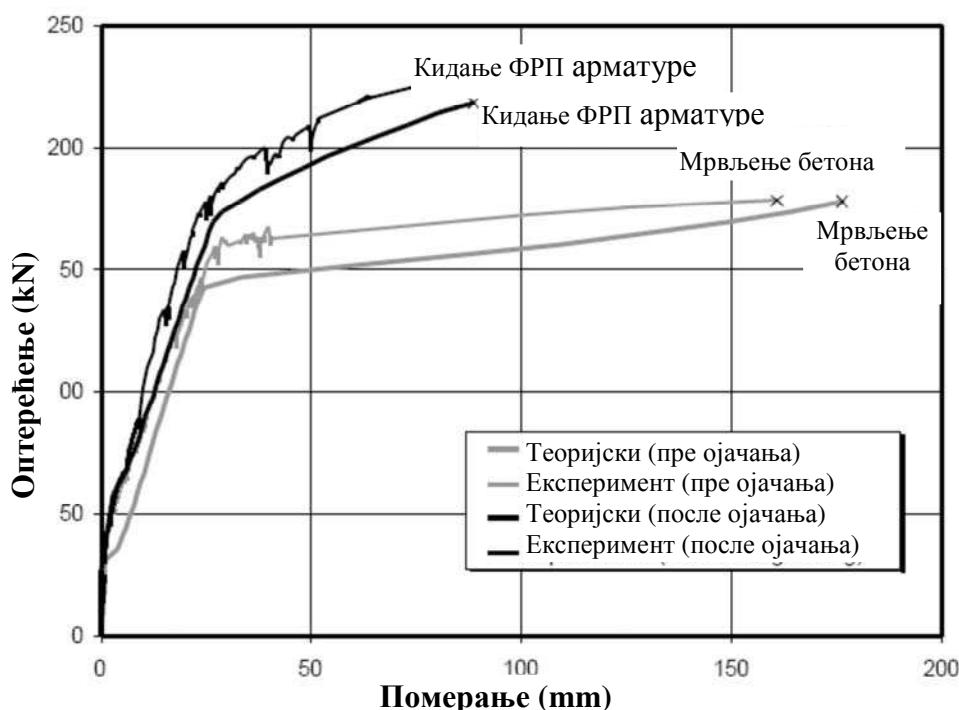
Примена две најчешће методе за повећање носивости АБ греда оптерећених на савијање приказана је на Слици 4-7.



Слика 4-7: Повећавање носивости АБ елемената оптерећених на савијање (Alkhrdaji et al., 2000)

Повећање носивости АБ греда оптерећених на савијање ФРП системима је аналогно додавању челичних трака или ламела за ојачање на затегнутој површини греде. Међутим, постоје две главне разлике: ФРП арматура се понаша на линеарно-еластичан начин и нема течења и, ФРП системи за ојачавање су осетљивији на лом одвајањем (debonding, delamination) у односу на системе за ојачање челичним плочама.

Разлог томе лежи у чињеници да се течење челичних плоча јавља при сличној дилатацији као и течење унутрашње челичне арматуре тако да је ниво напона у систему ојачања челиком ограничен а при томе се челичне плоче најчешће анкеришу челичним завртњима или само на крајевима или целом дужином плоче. За разлику од ојачавања челичним плочама, код ојачавања ФРП системима који имају чврстоћу при затезању већу од 2000 МПа и модул еластичности већи од 280 GPa, ниво напона у ФРП арматури може бити значајно већи. Због тога повећање носивости на савијање које се добија ФРП системом за ојачање може бити знатно веће у односу на примену челичних система. Уколико се течење унутрашње челичне арматуре код ојачане АБ греде јави пре било ког облика лома ФРП система за ојачање (што је пожељно), ФРП систем ће „прихватити“ оптерећење које је веће од оптерећења течења унутрашњег челика. Велика сила затезања у ФРП системима ојачања, као и велика померања после појаве течења арматурног челика у елементу често проузрокују одвајање ФРП система од бетона. Због тога се максимални напон и дилатација у ФРП арматури најчешће не могу постићи и они су ограничени у поступку пројектовања како би се избегла појава одвајања ФРП система.



Слика 4-8: Криве зависности између оптерећења и померања пресека у средини АБ греде (Alkhrdaji et al., 2000)

Карактеристична крива зависности између оптерећења и померања пресека на средини АБ греде ојачане ФРП системом приказана је на Слици 4-8 (Alkhrdaji et al., 2000).

У почетку се греда понаша као и конвенционална АБ греда са унутрашњом челичном арматуром која носи већи део силе затезања у пресеку. У неком тренутку почиње течење затегнуте челичне арматуре, после чега она не може да прими додатну силу затезања, што се манифестује на дијаграму као промена нагиба криве зависности између оптерећења и померања. Додатну силу затезања прима ФРП систем чиме се постиже повећање носивости елемента. На крају, при одређеном нивоу оптерећења долази до лома ојачане греде услед неког од различитих облика лома који се могу јавити код оваквих носача (Alkhrdaji et al., 2000).

Без обзира на проблем одвајања који је поменут раније, анализа и пројектовање ФРП система за ојачање на савијање према упутству америчког института за бетон (АСИ 440.2R-02), као и према упутствима међународног удружења за бетон (fib bulletin 14, 2001), базирано је на традиционалним претпоставкама пројектовања армираног бетона које обухватају линеарну расподелу дилатација по висини пресека и равнотежу унутрашњих сила у било ком пресеку АБ греде. Ове претпоставке важе и када почне течење затегнуте челичне арматуре, а и када бетонски заштитни слој између челичне арматуре и ФРП система за ојачање значајно испуца.

Ојачање елемента оптерећеног на савијање је могуће само уколико постоји додатни капацитет притиснутог дела бетонског пресека који би дозволио повећање унутрашњег момента у пресеку. Због тога је ојачавање на савијање најпогодније код бетонских греда које су умерено армиране, са процентом армирања у опсегу 20 до 40% од процента армирања при коме долази до симултаног лома, што није неуобичајено у АБ елементима, поготово код старијих конструкција. Поред тога, ојачање се може постићи ФРП системима само уколико је бетон у заштитном слоју за који је ФРП залепљен у задовољавајућем стању да омогући пренос сила у пресеку изнад затегнуте челичне арматуре. У многим старијим АБ гредама код којих је челична арматура кородирала, бетонски заштитни слој генерално није у довољно добром стању да испуни ову функцију и потребно је обновити бетон пре примене ФРП система ојачања.

Постоје две основне методе при коришћењу ФРП материјала за ојачавање како армиранобетонских, тако и зиданих, дрвених, па чак и металних конструкција. Прва метода се заснива на лепљењу ламината (laminates) од композитних материјала на површину АБ елемента (ЕБ метода). Последњих година се развила друга метода ојачавања у којој се ФРП шипке (bars) или траке (strips) постављају у подужне прорезе, у заштитном слоју бетона, као додатна арматура и затапају у епоксидне или цеметне смоле (НСМ метода).

4.5 Ојачавање спољашњим лепљењем ФРП арматуре – ЕБ метода (Externally Bonded – EB)

4.5.1 Опште

Методе ојачавања спољашњим лепљењем арматуре у виду трака, ламела и платна сматрају се једноставним и погодним методама обнављања или ојачавања АБ греда напрегнутих на савијање. Предност ових метода је да се обнављање може извести без ремећења употребе конструкције, као и њихова економичност у односу на остале методе ојачања. Први примери ојачања спољашњим лепљењем трака јављају се у Јужној Африци и Француској (Fleming and King, 1967; Bresson, 1971). Од тада су изведена многобројна истраживања тако да се данас овај начин ојачавања користи код многих врста конструкција (Baker and Chester, 1992; Mays and Hutchinson, 1992; Allan and Bird, 1986). У почетку су употребљаване челичне траке као спољашња арматура, али временом су уочени недостаци примене ових трака, као што су: потреба за пажљивом припремом пре лепљења трака, несигурности у погледу трајности везива и потенцијални проблеми са корозијом на додирној површини челика и везива, отежана уградња тешких челичних плоча, потреба за анкерисањем и неопходност одржавања фарбањем. Као алтернатива употреби челичних трака јавила се употреба трака од ФРП материјала (ФРП арматуре) код којих се не јавља проблем корозије а већина њихових механичких и физичких особина је боља у поређењу са челиком.

4.5.2 О пореклу ЕБ методе

Интересовање за употребу арматуре на бази влакана у бетону у Сједињеним Америчким Државама датира у 1930. године. Међутим, актуелни развој и истраживање о коришћењу ових материјала за обнављање бетонских конструкција почиње 1980-их кроз иницијативу националног научног фонда (National Science Foundation - NSF) и федералне управе аутопутева (Federal Highway Administration - FHWA). Употреба ФРП арматуре у обнављању бетонских конструкција у Европи јавља се 1978. године у Немачкој (Wolf and Miessler, 1989), после чега се нека истраживања у обнављању бетонских конструкција јављају и у осталим европским земљама и Јапану, па се може рећи да употреба споља залепљене ФРП арматуре у ојачавању бетонских конструкција широм света почиње од средине 80-их година двадесетог века. Истраживање у

Швајцарској, које је резултирало првом практичном применом ФРП материјала у обнављању греда и плоча, изведено је у *Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research* (ЕМРА) 1987. године (Meier, 1987; Rostasy, 1987). ФРП систем за утезање бетона је најпре примењен у Јапану у 1980-им (Fardis and Khalili, 1981; Katsumata et al., 1987) где је повећано интересовање за примену ФРП материјала после земљотреса *Hyogoken Nanbu* 1995. године (Nanni, 1995). Коришћење ФРП система широм света је порасло од неколико изведених пројеката годишње пре двадесетак година до неколико хиљада пројеката данас.

Споља залепљени ФРП системи су нашли своју примену и у ојачавању зиданих, дрвених, челичних, као и конструкција од ливеног гвожђа. Они се употребљавају код елемената конструкција као што су: греде, плоче, стубови, зидови, везе (чворови), димњаци, сводови, куполе, тунели, силоси, цеви и решетке.

4.5.3 ЕБ ФРП системи ојачања

Поступак уградње ЕБ ФРП система ојачања је најчешће дат од стране произвођача система. Постоје разлике у поступку уградње различитих система ојачања, али и код примене истог система ојачања при различитим стањима бетонског елемента. У зависности од поступка уградње, системи ојачања се могу поделити на системе формиране на лицу места (*wet lay-up, cured in-situ*) и префабриковане системе (*prefab, precured*).

4.5.4 Технике ојачавања ЕБ ФРП системима

Технике ојачања обухватају примену ФРП материјала као конструкцијске арматуре која се везује за постојећу бетонску подлогу конструкције. Оне се могу користити при различитим условима и на различитим деловима конструкцијског елемента при чему се морају узети у обзир све специфичности и захтеви пројекта ојачања.

1. Основна техника

Најчешће коришћена техника ојачања је мануелна уградња ФРП система формираних на лицу места или префабрикованих система лепљењем ФРП арматуре при чему се веза између арматуре и бетонске подлоге остварује двокомпонентним

лепком (најчешће епоксидним). Типична примена уградње система формираног на лицу места је приказана на *Слици 4-1(a)*. Основни делови ФРП система ојачања од којих зависи понашање ојачане греде су: бетонска подлога, лепак и ФРП арматура.

Бетонска подлога

Понашање ојачане греде у многоме зависи од особина бетонске подлоге и припреме бетонске површине. Као што је показано у фиб 14 (fib bulletin 14, 2001), неопходно је познавање почетног стања бетонске површине у погледу чврстоће, храпавости, имперфекција, прлина, врсте и могућности корозије унутрашње челичне арматуре, влажности, нивоа хлорида и сулфата, итд.

Бетонска подлога (субстрат) и одговарајућа припрема и профилисање бетонске површине могу утицати на понашање бетонске греде ојачане или обновљене ФРП системима. Одвајање или деламинација ФРП система пре достизања вредности пројектованог оптерећења може бити резултат неадекватно припремљене бетонске подлоге и површине бетона. Неповољности које се јављају при репарацији бетонске подлоге односно припреми бетонске површине су: бука, прашина, као и угрожавање корисника грађевинског објекта.

Произвођачи ФРП система обично дају одређено упутство за припрему бетонске подлоге и бетонске површине при примени одговарајућег ФРП система.

У оквиру контроле бетонске подлоге треба проверити постојање корозије челичне арматуре. Узроке корозије треба открити, а оштећења настала услед корозије треба поправити пре почетка ојачавања. Компатибилност материјала који се користе за обнављање подлоге и ФРП система треба размотрити са произвођачем ФРП система.

Неки произвођачи ФРП система сматрају да прлине ширине 0,3 mm или шире могу проузроковати одвајање система ојачања или кидање влакана ФРП арматуре због чега такве прлине треба ињектирати епоксидима. Ињектирање смолом или заптивање (Resin injection or sealing) се препоручује код мањих прлина како би се спречила корозија постојећег арматурног челика. У сваком случају, треба користити релевантне стандарде и упутства у којима постоје детаљнија упутстава за репарацију и припрему површине бетона (ACI Committee 440, 2002).

Препоруке произвођача „Сика“ чији су производи коришћени у експерименталном делу рада су (http://srb.sika.com/sr/solutions_products/02/02a013.html):

Површина коју треба ојачати мора бити поравната, са варијацијама и неравнинама од оплате не већим од 0,5 mm. Равност и изnivelисаност подлоге треба проверити металном летвом. Толеранција на 2 m дужине је максимум 10 mm, а за 0,3 m дужине је 4 mm. Наведену толеранцију треба усагласити са локалним стандардима уколико исти постоје. У сваком случају, мора се проверити чврстоћа подлоге (бетонска, зидана, од природног камена).

Бетон мора бити старији од 28 дана, а просечна адхезиона затезна чврстоћа припремљене бетонске подлоге треба да буде 2,0 N/mm² (минимум 1,5 N/mm²).

Подлоге морају бити здраве, суве, чисте и без цементног млека, леда, стајаће воде, масноћа, уља, без старих третамна површине или премаза и свих слободних или слабо везаних честица (делова). Бетон се мора очистити и припремити како би се добила површина без цементног млека и прљавштине, односно тако да се оствари отворена текстура на површини подлоге.

Лепак

Одговарајући лепак би требало изабрати за одређени систем ФРП ојачања. Ово је обично одређено од стране произвођача како би се постигли захтеви система уградње. Лепак омогућава везу између подлоге и ФРП арматуре. Поред тога, он може и да импрегнира систем који се формира на лицу места у зависности од врсте ФРП арматуре.

ФРП арматура

У зависности од примене ФРП арматуре, она се може сврстати у две групе (fib bulletin 14, 2001):

- ✓ Префабриковане (prefab or pre-cured) уске траке (strips) или ламинати (laminates) добијају се од стране произвођача као готови производи, који имају коначан облик, чврстоћу и крутост. Оне су дебљине од 1,0 до 1,5 mm, слично као челичне плоче за ојачавање. Код овог типа трака лепак пружа везу само између траке и бетона.
- ✓ Траке (sheets) и платна (fabrics) формирана на лицу места (wet lay-up or cured in situ), добијају се од стране произвођача у форми „сувих влакана“, што значи да се смола не налази у ФРП материјалу пре примене или се само мала количина

смоле налази у ФРП материјалу пре примене. У другом случају, количина смоле није довољна за полимеризацију. Код ове врсте арматуре, примена лепка је неопходна и за везу траке и платна за бетон и за импрегнацију траке.

2. Специјалне технике

Разматрајући основне потребе при ојачавању ФРП системима, неколико специјалних техника је развијено како би се убрзала уградња или заштитила ФРП арматура. Овде је наведено неколико специјалних техника од којих су неке патентиране од стране компанија које су их развиле (fib bulletin 14, 2001):

- ✓ Аутоматско обмотавање (Automated wrapping);
- ✓ Претходнонапрегнути ФРП;
- ✓ Брзо очвршћавање на лицу места употребом уређаја за загревање (In-situ fast curing using heating device);
- ✓ Префабриковани елементи;
- ✓ Импрегнација ФРП арматуре вакуумом.

4.5.5 Облици лома код ЕБ ФРП система ојачања

Облици лома АБ греда ојачаних на савијање спољашњим лепљењем ФРП арматуре могу се поделити у две групе:

1. Облици лома код којих је одржано заједничко деловање бетона и ФРП система све до појаве мрвљења бетона или кидања ФРП арматуре и,
2. Облици лома код којих је заједничко деловање бетона и ФРП система прекинуто услед одвајања ФРП система.

1. Облици лома при одржаном заједничком деловању

Облици лома који се јављају у случају одржаног заједничког деловања бетона и ФРП арматуре су:

- ✓ Течење затегнуте челичне арматуре праћено мрвљењем бетона у притиснутој зони при чему није дошло до одвајања ФРП система;
- ✓ Течење затегнуте челичне арматуре праћено кидањем ФРП арматуре у случају малих процената унутрашње челичне и спољашње ФРП арматуре;
- ✓ Мрвљење бетона пре почетка течења челичне арматуре које се јавља у случају великих процената армирања. Овај облик лома је крт и непожељан. У овом

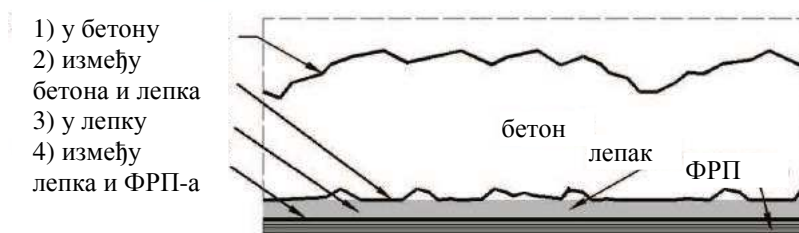
случају спољашње армирање губи на значају и треба размотрити повећање капацитета носивости бетона на притисак (утезање бетона).

2. Облици лома у случају престанка заједничког деловања

Адекватна веза између бетона и система за ојачање је неопходна за пренос сила са једног материјала на други па се самим тим облици лома везе (bond failure) морају узети у обзир на адекватан начин при пројектовању. Лом везе у случају ЕБ методе означава потпуни губитак заједничког деловања бетона и спољашње арматуре и појављује се на додирној површини између ФРП арматуре и бетонске подлоге. За разлику од лома везе, локално одвајање (localised debonding) означава локални лом у зони везе између бетона и ФРП арматуре при чему је смањење чврстоће везе између бетона и ФРП арматуре ограничено на малу површину, нпр. губитак у дужини везе од 2 mm у близини прслине код елемента оптерећеног на савијање. Локално одвајање није сам по себи облик лома који ће дефинитивно проузроковати губитак моћи ношења оптерећења елемената ојачаних спољашњим лепљењем ФРП арматуре.

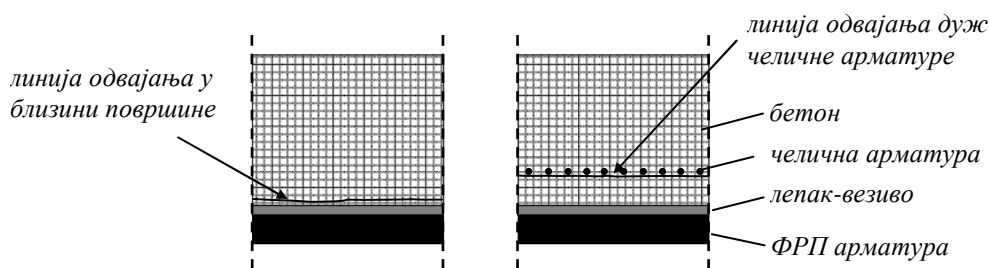
Када се локално одвајање прошири и престане заједничко деловање бетона и ФРП арматуре јавља се потпуно одвајање ФРП система за ојачање (енг. peeling-off). Уколико није могућа никаква прерасподела напона са споља залепљене ФРП арматуре на челичну арматуру овај облик лома ће бити изненадан и крт.

Лом везе се може јавити на различитим додирним површинама између бетона, лепка и ФРП арматуре, као и у бетону и лепку (Szabó and Balázs, 2007) (Слика 4-9):



Слика 4-9: Облици лома додирне површине у случају примене ЕБ методе ојачања конструкција (Szabó and Balázs, 2007)

- ✓ Одвајање у бетону се јавља или у близини површине бетона или дуж ослабљеног слоја, тј. дуж линије унутрашње челичне арматуре (Слика 4-10), у висини заштитног слоја бетона;



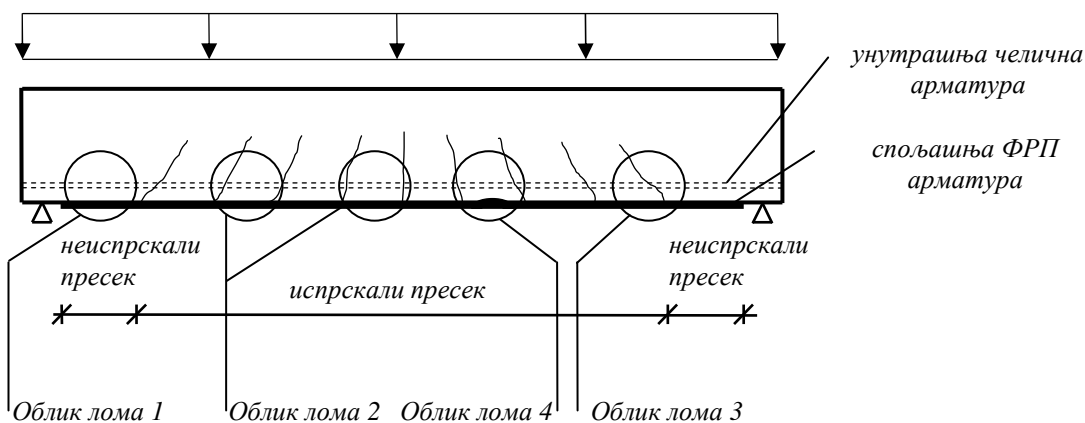
Слика 4-10: Различите линије одвајања у бетону

- ✓ Одвајање у лепку (кохезивни лом) се може јавити једино када његова чврстоћа при затезању опадне испод чврстоће бетона при затезању, нпр. при високим температурама или када је чврстоћа бетона при затезању неуобичајно висока. Чврстоћа при затезању и чврстоћа при смицању епоксидног лепка су најчешће веће од чврстоће при затезању и чврстоће при смицању бетона тако да се лом у већини случајева јавља у бетону, при чему танак слој бетона (дебљине неколико милиметара) остаје на ФРП арматури;
- ✓ Одвајање на додирној површини између бетона и лепка или лепка и ФРП арматуре (адхезивни лом) се јавља само уколико припрема бетонске површине није адекватна, с обзиром да је кохезивна чврстоћа епоксидне смоле мања од адхезивне чврстоће;
- ✓ Одвајање унутар ФРП арматуре (унутрашњи лом смицањем) се може такође јавити између влакана и матрице. Такав механизам лома може настати када се прлина прво јави у ФРП арматури, односно када је бетон високе чврстоће. Ипак, унутрашњи лом је секундарни вид лома који се јавља после лома везе у бетону, па самим тим не одређује чврстоћу везе.

Одвајање спољашње (ФРП) арматуре је најчешћи облик лома уочен испитивањем АБ елемената оптерећених претежно на савијање. Најслабија тачка у вези између спољашње ФРП арматуре и бетона је слој бетона у близини површине носача. У зависности од почетне тачке процеса одвајања, разликују се следећи облици отказа (Слика 4-11):

- ✓ Одвајање спољашње (ФРП) арматуре у зони сидрења као резултат лома везе смицањем који се јавља на површини бетона (Облик лома 1);

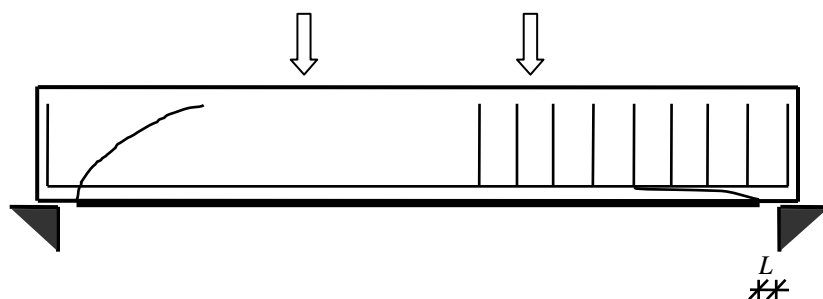
- ✓ Одвајање ФРП арматуре у зони савијања, односно појаве претежно вертикалних прслина, где може доћи и до хоризонталних прслина које заправо доводе до отказа (Облик лома 2);
- ✓ Одвајање спољашње (ФРП) арматуре проузроковано косим прслинама (услед смицања) у бетону код којих се јавља и хоризонтално и вертикално отварање што може довести до одвајања додатне ФРП арматуре (Облик лома 3);
- ✓ Одвајање услед неједнакости (храпавости) бетонске површине (Облик лома 4).



Слика 4-11: Облици лома везе бетонске греде ојачане ЕБ методом (Blaschko et al., 1998)

Лом смицањем на крају ФРП арматуре

Бројна истраживања (Oehlers and Moran, 1990; Jansze, 1997) указују да када су споља залепљене траке на извесном растојању од ослонца (што је уобичајно у применама ојачавања) могу се појавити приближно вертикалне прслине на крају залепљене траке, које се надаље развијају као нагнуте прслине услед смицања. Поред тога, због присуства унутрашњих узенгија, прслине услед смицања могу бити ограничене због чега се спољашња арматура са заштитним слојем бетона одваја у нивоу подужне арматуре (Слика 4-12). Овај други облик лома се назива кидање бетона (concrete rip-off).



Слика 4-12: Лом смицањем краја ФРП арматуре

4.6 Метода ојачања уградњом ФРП арматуре у бетонском заштитном слоју (у близини површине) – НСМ метода (Near Surface Mounted – NSM)

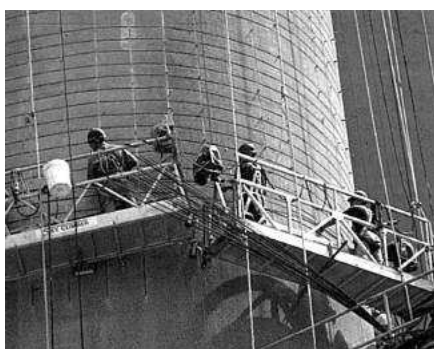
4.6.1 Опште

Уградња ФРП арматуре у бетонском заштитном слоју је атрактивна метода за повећање носивости на савијање и смицање АБ конструкција и конструкција од претходно напрегнутог бетона (Alkhrdaji et al., 1999; De Lorenzis et al., 2000), као и за ојачавање неармираних зидова (Tumialan et al., 2001).

Ова метода је постала интересантна и у сеизмичком ојачавању веза стуб – греда код АБ конструкција, пружајући или додатну носивост или већу укупну дуктилност, померањем зоне лома од стуба ка греди (Porta et al., 2001). На *Слици 4-14* приказана је примена НСМ методе код ојачавања цеметног силоса (Enmons et al., 2001) и ојачавања АБ моста у зони негативних момената (Warren, 1998).



Слика 4-13: Ојачавање неармираних зидова НСМ методом (Tumialan et al., 2001)



Слика 4-14: Ојачавање силоса ФРП арматуром (Enmons et al, 2001) и ојачавање горње зоне АБ моста (Warren, 1998)

НСМ метода има нарочите предности код ојачавања конструкција у зони негативних момената савијања, због брже и лакше апликације.

Применом ове методе покреће се низ значајних питања која укључују: поузданост метода пројектовања елемената напрегнутих на савијање и смицање, формирање модела за описивање понашања везе између ФРП арматуре и бетона, оптимизацију конструкцијских детаља, као и наглашавање предности ове методе у односу на остале методе ојачавања.

Ојачавање АБ конструкција НСМ методом подразумева познавање већег броја утицајних фактора, у односу на залепљену ФРП арматуру, а најзначајнији су (Ранковић, 2010):

1. Величина и облик арматурне шипке;
2. Материјал од кога је израђена шипка;
3. Површинска обрада шипке (оребрена или охрапављена);
4. Величина прореза;
5. Облик и површинска обрада прореза;
6. Карактеристике лепка и његова дебљина;
7. Чврстоћа бетона при затезању и смицању;
8. Количина и положај унутрашње, челичне арматуре.

Сви ови фактори појединачно, као и њихово садејство, утичу на понашање ојачаног конструкцијског елемента.

4.6.2 О пореклу НСМ методе

За разлику од ЕБ методе која се развијала у протеклих тридесет година, метода уградње ФРП арматуре у близини површине бетона се појавила пре петнаестак година, па је и постојеће знање о овој методи мање. Последица тога је и недовољно релевантних одредби у постојећим препорукама за ојачавање бетонских конструкција ФРП арматуром.

Код ове методе, најпре се врши исецање прореза у заштитном слоју АБ греде, после чега се ФРП арматура уграђује у те прорезе применом одговарајуће испуне прореза (епоксидне или цементне). НСМ метода има порекло у методи уградње челичне арматуре у исеченим прорезима која је имала називе као што су: арматура у прорезу испуњеном малтером (grouted reinforcement) (Apslund, 1949.) или уграђена арматура (embedded reinforcement) (Warren, 1998.).

Метода уградње арматуре у близини површине бетона јавља се 1948. год. у Шведској (Asplund, 1949) где се ојачавање плоче АБ моста врши уградњом арматурних челичних шипки у прорезе направљене у бетонском заштитном слоју. Ова метода се користила и у ојачању зиданих конструкција са циљем повећања њихове дуктилности и носивости на савијање (Atkinsosn and Shuller, 1992), као и код ојачавања ниских зиданих зграда и лучних мостова (Garrity, 1995). У току развоја ове методе најпре је нерђајући челик заменио црни челик, који се користио у првим годинама примене ове методе, да би у протеклих 15 година ФРП арматура заменила челичну (Hassan and Rizkalla, 2003; Tälsten et al., 2003; Barros and Fortes 2005; Barros et al., 2006). Са друге стране, цементну испуну, коришћену при уградњи челичне арматуре, замениле су епоксидне испуне. Значајна истраживања су од тада спроведена ради утврђивања понашања система ојачања у различитим случајевима примене. Главни истраживани параметри били су карактеристике прореза, тип лепка, облик ФРП арматуре, понашање везе ФРП систем - бетонски елемент и генерално понашање ојачаног елемента.

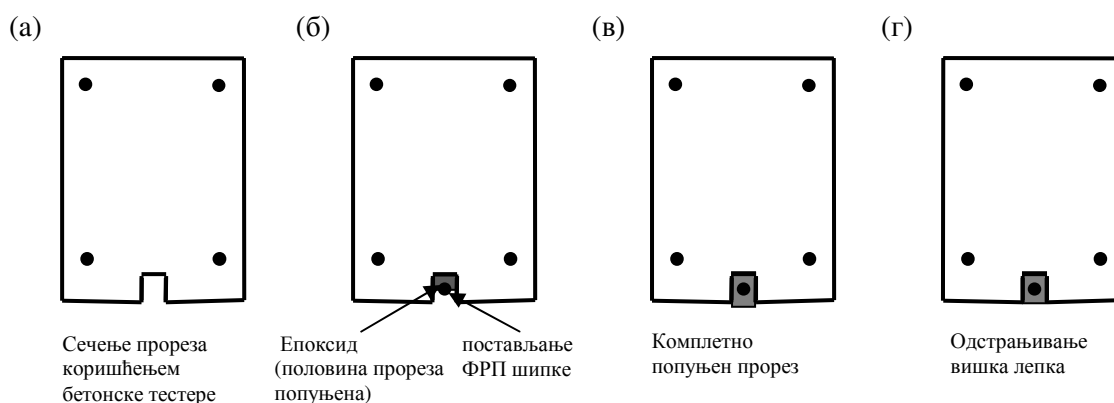
4.6.3 Поступак уградње ФРП арматуре

НСМ метода ојачања се састоји из следећих корака (*Слика 4-15*) (Taljsten et al., 2003):

1. Исецање прореза у заштитном слоју бетона, у зависности од његове дебљине и димензија ФРП композитне арматуре која се користи;
2. Пажљиво чишћење прореза употребом ваздуха или воде под притиском како би се уклонили сви остаци од сечења у прорезима;
3. Уколико се користи епоксидни лепак прорез мора бити сув пре уградње. Уколико се користи цементни малтер препорука је да површина прореза буде влажна у време његове уградње;
4. Уграђује се епоксидни лепак или цементни малтер;
5. Уграђује се ФРП арматура у прорез и уклања се вишак епоксидног лепка или цементног малтера.

Препорука је да се ФРП арматура очисти пре уградње ако нема заштитну фолију која се скида непосредно пре апликације, као и да се епоксидни лепак нанесе на арматуру пре уградње. Поред тога, вискозност лепка у случају ојачавања зона позитивних момената код АБ греда и плоча мора се повећати због лакше уградње. У неким истраживањима, повећање вискозности је постигнуто додавањем мале количине

инертног филера епоксидној испуни при чему није уочено смањење квалитета везе (Aidoo et al., 2006).



Слика 4-15: Процедура ојачавања гредних носача оптерећених на савијање применом НСМ методе

ФРП армирања која се користи у НСМ методи

У већини испитивања ојачавања АБ конструкција НСМ методом коришћена је карбонска (ЦФРП) армирања, док је стаклена (ГФРП) армирања коришћена у већини примена НСМ методе код зиданих и дрвених конструкција. Чврстоћа при затезању и модул еластичности ЦФРП армирања су знатно већи у односу на ГФРП армирања тако да при истом капацитету носивости на затезање, ЦФРП шипке су мањих димензија него ГФРП шипке, па су самим тим потребни и мањи прорези за уградњу. Ова чињеница утиче на једноставнију уградњу ЦФРП армирања, мањи ризик угрожавања унутрашње челичне армирање и уштеду у материјалу испуне прореза. Важан параметар за избор врсте ФРП материјала је њихова цена, која је на страни ГФРП (скоро 3 пута нижа), али је зато и крутост носача знатно мања, што је лимитирајући фактор у поређењу са ЦФРП.

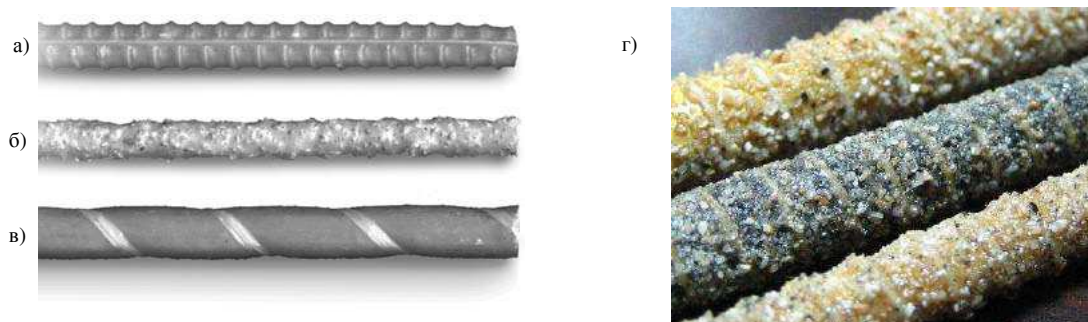


Слика 4-16: Типови ФРП армирања за примену у НСМ методи

(<http://mguadagnini.staff.shef.ac.uk/frp/frp.php>)

ФРП арматура која се користи у НСМ методи најчешће је у виду уских трака или шипки кружног, квадратног и правоугоног попречног пресека (Слика 4-16). Различити облици попречних пресека имају различите предности и пружају другачије могућности у практичним применама. На пример, код шипки квадратног попречног пресека максимална је површина попречног пресека арматуре у односу на величину прореца, док су кружне шипке доступније и могу се веома једноставно анкерисати у поступцима претходног напрезања. Код уских трака је максимални однос између додирне површине и површине попречног пресека због чега је код њих најмањи ризик од одвајања, а и прављење прореца је лакше. У практичним применама избор арматуре за ојачавање зависи у многоме од ограничења у конкретним ситуацијама, као што је дебљина заштитног слоја бетона, доступност и цена одговарајуће врсте ФРП арматуре.

ФРП шипке се производе са различитом текстуром површине која утиче на њихову прионљивост, па тако оне могу бити глатке, пескарене, пресвучене песком или охрапављене одговарајућим површинским поступком, а округле шипке могу бити и спирално оребрене, или обмотане спиралном траком од ФРП влакана.



Слика 4-17: Облици површина ФРП шипки: а) оребрена, б) пресвучена песком, в) и г) обмотана и пресвучена песком

Испуна прореца

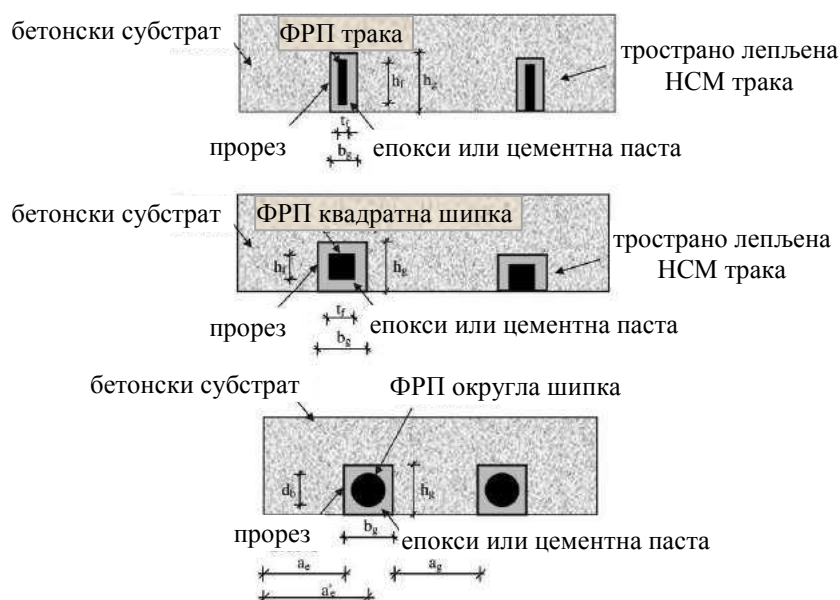
Испуна прореца је веза између ФРП арматуре и бетона ојачаване конструкције. Са становништа конструкцијског понашања, најважније механичке особине испуне прореца су чврстоћа при затезању и чврстоћа при смицању. Чврстоћа при затезању је посебно битна када употребљене шипке имају деформисану површину услед чега се јављају велики периферни напони затезања.

Испуна прореца са најбољим карактеристикама је двокомпонентни епоксид и он се најчешће користи. Епоксид мале вискозности се користи код ојачања у зонама

негативних момената, с обзиром да се епоксид може сипати у прорезе, док се у другим случајевима користи епоксид велике вискозности, како би се избегло капање или цурење епоксида. Епоксиду се може додати песак чиме се може повећати запремина и тиме смањити цена, контролисати вискозност, смањити коефицијент термичке дилатације и подићи температура стакленог прелаза. Недостатак додавања песка је смањење адхезије на додирној површини између шипке и епоксида у случају глатке површине шипке (Warren, 1998).

Димензије и положај прореза

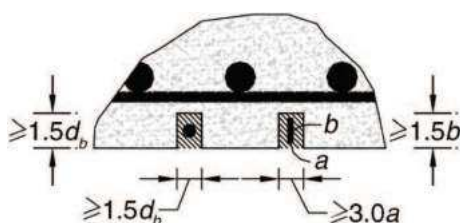
На *Слици 4-18* приказано је неколико облика НСМ ојачања, где је d_b номинални пречник округле шипке, а t_f и h_f дебљина (ширина) и висина уске траке или правоугане шипке. Ширина и дубина прореза (b_g и h_g), растојање између два суседна прореза (a_g) и растојање од прореза до краја греде (a_c) су релевантни конструкцијски параметри који могу да утичу на особине везе, па самим тим и на особине ојачаног елемента. У постојећим истраживањима, уске траке су везане епоксидом или дуж све четири стране (Sena Cruz and Barros, 2002), или само дуж три стране површине траке (Hassan and Rizkalla, 2003) (*Слика 4-18*). Како је ширина траке знатно већа од њене дебљине то је смањење у површини везе у другом случају занемарљиво.



Слика 4-18: Различити НСМ системи и означавање (De Lorenzis and Teng, 2007)

У случају употребе шипки кружног попречног пресека, базирајући се на резултатима испитивања везе са квадратним прорезима Де Лоренцис (De Lorenzis,

2002), предлаже да ширина прореза буде минимално 1,5 пута већа од пречника шипке у случају глатких или благо пескарених шипки, односно минимално 2 пута већа од пречника шипке у случају оребрених шипки. Парети и Нани (Parretti and Nanni, 2004) предлажу да ширина и дубина прореза буду минимално 1,5 пута веће од пречника шипке, а у случају употребе уских трака минимална ширина прореза не сме бити мања од троструке вредности дебљине траке, док би дубина прореза минимално требала бити 1,5 пута већа од ширине траке (Слика 4-19). Блашко (Blaschko, 2003) предлаже да у случају употребе уских трака ширина и дубина прореза буду за око 3 mm веће од дебљине и ширине одговарајуће ФРП траке, тако да се добије дебљина слоја лепка од око 1-2 mm.



Слика 4-19: Растојање НСМ арматуре (Parretti and Nanni, 2004)

У случају када се ојачавање греде врши уградњом једне шипке положај те шипке је на половини ширине попречног пресека затегнутог елемента. Међутим, када се ојачавање врши уградњом две или више шипки растојање између две шипке (прореза), као и растојање тих шипки од ивице попречног пресека постају важни параметри пројекта.

Ефекат односа између ширине и дубине прореза на понашање везе није још увек у потпуности испитан. Употребом моделирања коначним елементима, уочено је да оптерећење при коме долази до одвајања траке расте са ширином прореза (Hassan and Rizkalla, 2003) јер при једнакој дубини прореза повећање ширине узрокује већу додирну површину између епоксида и бетона.

Аналитичким моделирањем за случај употребе охрапављених кружних шипки (De Lorenzis, 2004) уочено је да вредност оптерећења при коме долази до пуцања епоксидног слоја опада са повећањем односа између ширине и дубине прореза, за разлику од оптерећења лома које остаје непромењено с обзиром да се лом јавља у бетону, па је самим тим независно од односа димензија прореза. Због опадања напона затезања у бетону, са повећањем ширине прореза повећава се и оптерећење које доводи до појаве прве прслине.

На основу испитивања веза код НСМ трака (Blaschko, 2001, 2003), Блашко предлаже да минимално растојање осе ФРП траке од ивице пресека не буде мање од 20 mm како би се избегао лом цепањем ивице бетона, али и предлаже да то растојање не буде мање од 30 mm, или максималне величине агрегата, јер при испитивању узорака са растојањем већим од 30 mm није дошло до појаве прелина у бетону при лому.

На основу моделирања коначним елементима за охрапављене шипке кружног попречног пресека Хасан и Рицкала (Hassan and Rizkalla, 2004) предлажу да минимално растојање између два прореза буде једнако двоструком пречнику шипке, док минимално растојање прореза од ивице бетонског елемента буде једнако четвороструком пречнику шипке без обзира на ширину прореза. Међутим, при испитивању веза остварених НСМ методом (De Lorenzis, 2002) код једне од греда ојачане спирално пресвученом кружном шипком јавио се лом услед одвајања ФРП шипке, као и одвајање бетонског заштитног слоја, иако су удаљења већа од оних предложених од стране претходно поменутих аутора, што указује да та растојања нису довољна како би се избегла интеракција између ФРП шипки и ивице елемента.

Поред наведених фактора (карактеристике испуне прореза, бетонске подлоге и површине ФРП арматуре) оптималне димензије прореза зависе веома често више од услова уградње. Примера ради, ширина прореза је условљена дебљином сечива док је дубина прореза условљена дебљином заштитног слоја бетона обзиром да би требало увек избећи сечење постојеће челичне арматуре.

4.6.4 Прионљивост ФРП арматуре

Основна предност НСМ методе у односу на ЕБ методу, заснива се на постизању боље прионљивости између ФРП арматуре и бетона. Прионљивост ФРП шипки и уских трака са лепком односно бетоном представља критичан фактор за понашање конструкција ојачаних ФРП арматуром. С обзиром на разлике у врстама ФРП арматуре, неминовне су и разлике у погледу прионљивости због чега се она мора дефинисати за сваки тип шипке појединачно, односно није могуће једноставно генерализације овог ефекта (Ранковић, 2010). Може се рећи да је ефекат прионљивости далеко сложенији код ФРП арматуре у односу на класичну (челичну) арматуру што се додатно усложњава у НСМ методи због тога што је ФРП арматура затопљена у испуну која се везује за бетон. Де Лоренцис и Нани (De Lorenzis and Nanni, 2002), Де Лоренцис и Тенг (De Lorenzis and Teng, 2007) истраживали су прионљивост ФРП арматуре са испуном

прореза епоксидом, на основу чега су дефинисали основне облике могућих модела попуштања везе код НСМ система ојачања ФРП арматуром.

1. Лом везе на додирној површини између шипке и епоксида

Овај облик лома се јавља или као чисти лом додирне површине – облик лома БЕ-И (BE-I – bar-epoxy interfacial) или као кохезивни лом смицањем испуне прореза (облик лома ВЕ-С – bar-epoxy cohesive). Чисти лом додирне површине је критичан код шипки са глатком или благо пескареном површином, тј. када је степен храпавости површине недовољан да пружи механичку везу између шипке и испуне прореза, па јачина везе у првом реду зависи од адхезије између шипке и испуне. Код шипки кружног попречног пресека овај облик лома постаје критичан уколико је величина прореза довољна да се избегне лом цепањем испуне прореза, а који проузрокују радијалне компоненте напона приањања. Де Лоренцис и Нани (De Lorenzis and Nanni, 2002) су дошли до закључка да до лома цепањем епоксидне испуне неће доћи у случају када је однос $k=b_g/d_b$ већи од 1,5.

Кохезивни лом смицањем је уочен код уских трака са охрапављеном површином (Blaschko, 2001, 2003) а последица је прекорачења чврстоће на смицање епоксида.

Унутрашњи лом смицањем у самој арматурној шипки, иако теоретски могућ, никада није уочен. Смицање ребара оребрених шипки никада није уочено као облик лома, као у случају употребе ФРП оребрених шипки за унутрашњу арматуру у бетону, али у неким истраживањима (De Lorenzis and Nanni, 2002) уочено је оштећење површине оребрених шипки што указује да се може јавити и овакав облик лома везе.

2. Лом везе на додирној површини између епоксида и бетона

Лом везе на додирној површини између епоксида и бетона може се јавити као чисти лом додирне површине – облик лома ЕЦ-И (EC-I – epoxy-concrete interfacial), или као кохезивни лом смицањем у бетону – облик лома ЕЦ-Ц (EC-C – epoxy-concrete cohesive). Чисти лом додирне површине је доминантан у случају прореза направљених у току ливења бетона, а не исецањем прореза (De Lorenzis et al., 2002). Код спирално пресвучених или оребрених шипки са малим ребрима, ово је критичан облик лома без обзира на то када је прорез урађен, независно од вредности односа k . Код оребрених шипки са већим ребрима овај облик лома је критичан само код вредности k већих од

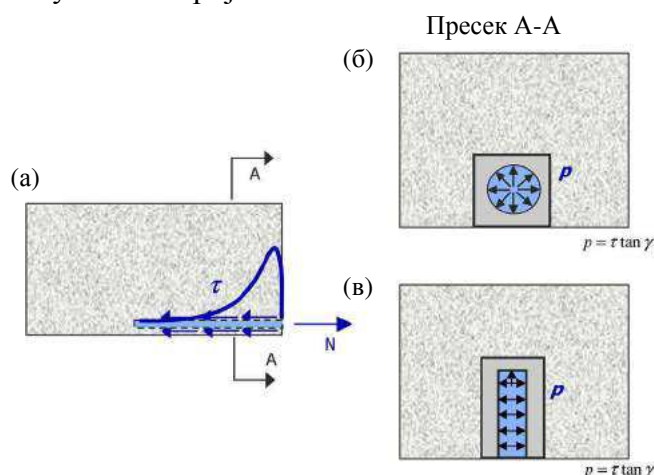
минималне вредности (приближно 2,0), док је за мање вредности k лом цепањем слоја епоксида доминантан.

Кохезивни лом смицањем није никада уочен у испитивањима везе али уочен је у испитивањима греда на савијање унутар зоне ојачања (De Lorenzis, 2002), или у тачки одвајања шипке (Hassan and Rizkalla, 2003).

3. Цепање – одвајање епоксидног слоја

Подужно пуцање испуне прореза и/или лом околног бетона дуж нагнутих равни, које се назива цепање или одвајање епоксидног слоја (epoxy cover splitting), јавља се као доминантан облик лома у случају охрапављених (оребрених или спирално пресвучених) шипки кружног попречног пресека.

Механизам одвајања епоксидног слоја у елементима ојачаним НСМ методом сличан је лому одвајањем челичних оребрених шипки у бетону. Радијална компонента напона приањања код округлих шипки је уравнотежена ободним напоном затезања у епоксидном слоју што може проузроковати формирање подужних прелина у епоксиду. Бетон у околини прореза је такође изложен напонима затезања и може доћи до његовог лома уколико је достигнута његова чврстоћа при затезању, при чему се јавља лом бетона у косим равнинама. Да ли ће се лом у бетону јавити пре или после појаве одвајања епоксидног слоја или после потпуног лома епоксидног слоја зависи од димензија слоја и чврстоће при затезању оба материјала.



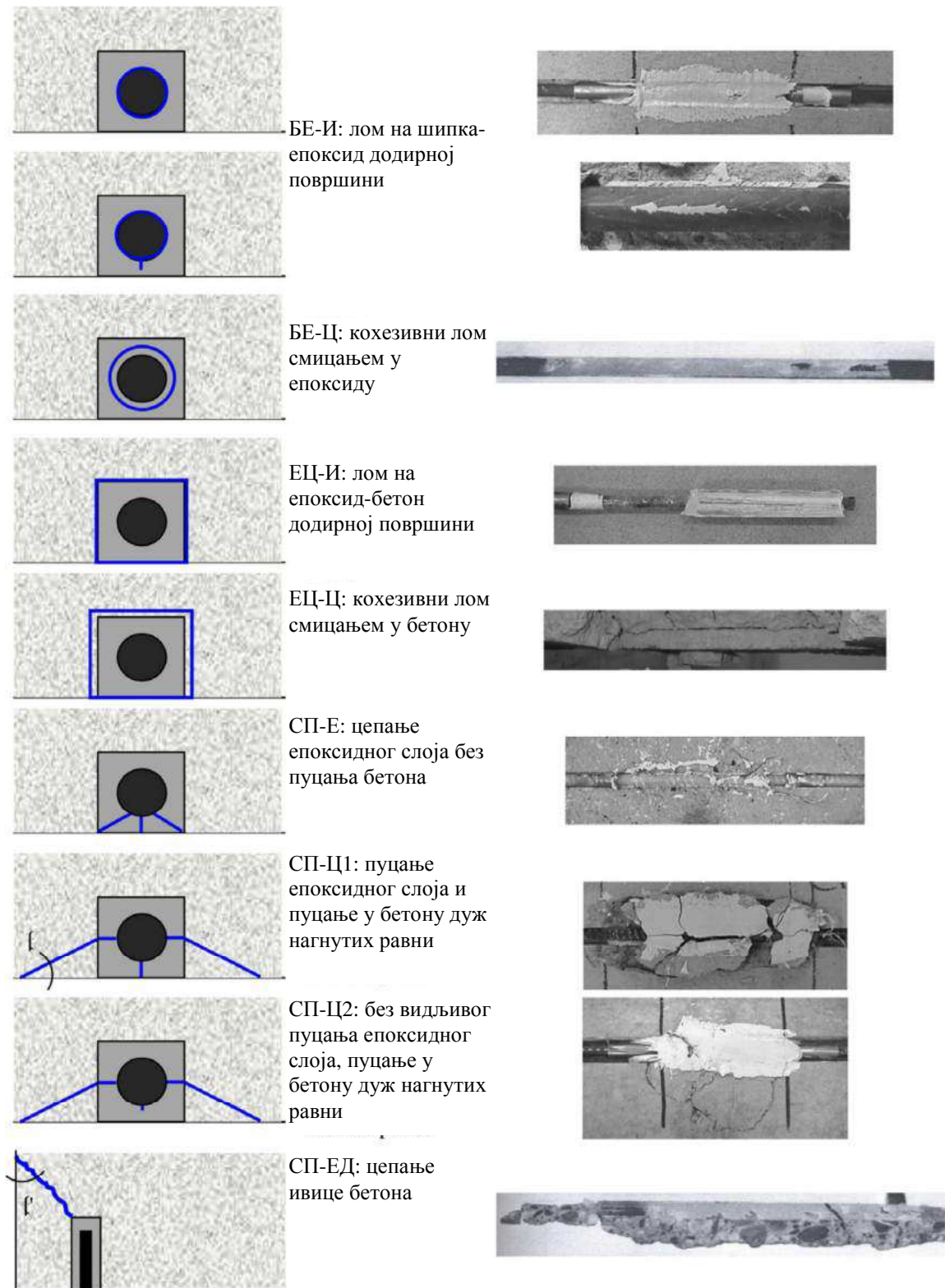
Слика 4-20: Понашање везе код НСМ ФРП арматуре: (а) напон приањања у подужној равни; (б) нормални напон у попречној равни настао код кружне шипке; (в) нормални напон у попречној равни настао код правоугаоне шипке (De Lorenzis and Teng, 2007).

Чврстоћа епоксида при затезању је већа него чврстоћа бетона при затезању, али дебљина слоја епоксида је мања од дебљине заштитног слоја бетона, што објашњава зашто је одвајање епоксидног слоја вероватнији (чешћи) облик лома код елемената ојачаних НСМ методом. На *Слици 4-20* приказан је напон приањања дуж ФРП шипке, као и разлика у механизму везе између шипки кружног попречног пресека и уских трака. У случају уских трака, нормална компонента напона приањања је управна на бочне стране прореза тако да је лом одвајањем мање вероватан.

Различити начини лома цепањем епоксидног слоја код НСМ система приказани су на *Слици 4-21*. Када је однос k веома мали (1,12-1,18), лом је ограничен на слој епоксида и укључује мало оштећење у околном бетону – облик лома СП-Е (SP-E – splitting ероху). Код већих вредности односа k , лом укључује комбинацију подужног пуцања у епоксидном слоју и лом околног бетона дуж косих равни – облик лома СП-Ц-1 (SP-C-1 – splitting concrete 1). Лом бетона почиње оног тренутка када почне пуцање епоксидног слоја и прерасподела напона затезања (De Lorenzis et al., 2004). Уочено је да су косе равни лома у бетону под углом β од око 30° у односу на хоризонтални правац (*Слика 4-21*). Код великих дубина прореза и/или када је однос чврстоће бетона и епоксида при затезању мали, лом бетона се може јавити пре него што прслине дођу до површине епоксидне испуне – облик лома СП-Ц-2 (SP-C-2 – splitting concrete 2).

Облици лома везе који су до сада наведени односе се на случај када је ФРП шипка постављена централно по средини широке греде, односно када су небитни ефекти близине ивице греде. У случају да је шипка близу ивице бетонске греде, лом се може јавити услед цепања ивице бетона – облик лома СП-ЕД (SP-ED – splitting edge distance). У испитивањима се овај облик лома јављао у случају када је оса ФРП шипке удаљена од ивице бетонске греде (a'_e) мање од 20 mm (Blaschko, 2001) под углом β' , дефинисаним на *Слици 4-21* у границама од 45° до 70° .

Чврстоћа везе код СП-Е облика лома у великој мери зависи од чврстоће епоксида при затезању, док чврстоћа везе код облика лома СП-Ц-1 и СП-Ц-2 зависи од чврстоће бетона при затезању. Иако је очекивано да чврстоћа везе расте са дебљином слоја епоксида, у испитивањима је уочено смањење прираштаја чврстоће са дужином прореза, када је дубина прореза већа од приближно двоструке вредности пречника. Овде облик лома СП-Ц-2 постаје критичан. Чврстоћа везе код облика лома СП-Е расте како храпавост површине постаје мање изражена (De Lorenzis et al., 2004).



Слика 4-21: Облици лома везе код елемената ојачаних НСМ методом уочени у тестовима везе (De Lorenzis and Teng, 2007)

4.6.5 Облици лома код НСМ ФРП система ојачања

1. Облици лома код ФРП шипки

У првим експерименталним истраживањима НСМ методе употребљаване су кружне пултрузоване шипке сличне оним које су већ биле у употреби као унутрашња арматура у бетону. На основу доступне литературе у овој области могу се дефинисати две основне врсте испитивања: испитивања веза (bond tests) и испитивања елемената (member tests) (Burke, 2008).

Досадашња истраживања су указала да је у применама НСМ методе „прионљивост од примарног значаја, с обзиром да игра главну улогу у преносу напона између бетона и ФРП арматуре како би се постигло њихово заједничко деловање“ (De Lorenzis, 2000). Из тог разлога велики број испитивања у којима се истражују питања везана за понашање везе између ФРП арматуре, епоксидне испуне и бетонске подлоге је урађен и објављен у литератури.

Два главна типа испитивања су:

1. директни тест чупања (the direct pull-out test) и
2. тест чупања на греди (the beam pull-out test),

и оба се могу извести на различите начине.

Модификовани тест чупања на греди се сматра репрезентативнијим за стварно понашање везе код елемената ојачаних на савијање док су директни тестови чупања репрезентативнији за понашање везе елемената ојачаних на смицање (De Lorenzis, 2001).

У истраживањима Де Лоренцис и други (De Lorenzis et al., 2000, 2001, 2002) изведени су тестови чупања на обрнутим Т гредама како би се испитали ефекти дужине везе, врсте ФРП арматуре, облика површине ФРП арматуре и величине прореза на понашање везе. Три различита облика лома су уочена у току испитивања: одвајање лепка, пуцање бетона и чупање ФРП арматуре. Уочено је да се код греда ојачаних охрапављеном арматуром јавља већа чврстоће везе, тако да се отказ јавља услед одвајања лепка, за разлику од греда ојачаних пескареном арматуром код којих се јавља отказ услед извлачења ФРП арматуре. Испитивања су такође показала да се са повећањем дужине везе повећава сила чупања до чега долази и услед повећања димензија прореза, при чему се напрезање преноси са лепка на бетон, тако да се уместо отказа услед одвајања лепка јавља отказ услед пуцања бетона (Burke, 2008).

У свом даљем истраживању Де Лоренцис (De Lorenzis, 2002, 2004) директним тестовима чупања истражује понашање везе НСМ ФРП шипки. У оквиру истраживања варирано је: тип лепка, дужина везе, димензије прореза и површинска обрада шипке. У првом истраживању, из 2002. године, прорези су формирану у току ливења бетона што се испоставило нереалним јер се формира глатка површина прореза. У практичним применама, НСМ прорези су исечени накнадно, чиме се постиже храпава површина прореза. Глаткија површина ливених прореза има негативан ефекат на понашање везе на додирној површини лепак-бетон, тако да се у готово свим истраживањима са епоксидним лепком, као и у многим истраживањима са лепковима базираним на цементу, отказ јавио услед клизања на додирној површини лепак-бетон.

У поновљеном истраживању (2004. године) са приближно истим параметрима али са исеченим прорезима уместо ливених уочено је много боље слагање резултата у погледу отказа везе.

Испитивања су показала да је чврстоћа везе код узорака са лепком на бази цементног малтера, нижа у односу на узорке са епоксидним лепком, што је последица ниже чврстоће при затезању цементних лепкова. Такође је уочено да се услед ширења цементних лепкова јављају подужне и попречне прслине у заштитном слоју бетона пре испитивања која даље деградирају везу. У суштини, оптерећење које изазива отказ везе расте са повећањем дужине везе. Ова појава је израженија код примене ЦФРП шипки, у односу на ГФРП шипке. При већим димензијама прореза већа је и чврстоћа везе осим у случају узорака са цементним лепком и спирално пресвученим шипкама. Процент повећања чврстоће везе услед повећања димензија прореза опада са повећањем димензија прореза.

При испитивању армиранобетонских носача Т пресека на савијање, статичког система проста греда, Хасан и други (Hassan et al., 2004), истраживали су утицај дужине везе и врсте лепка при ојачању оребреним ЦФРП шипкама.

Испитивања су показала да се два коришћена епоксидна лепка понашају слично. Код свих греда изузев оних са најкраћом дужином везе, уочени облик лома је био отказ услед одвајања бетона на додирној површини бетон-лепак. Оптерећење лома је расло са повећањем дужине везе, при чему степен повећања оптерећења лома опада код узорака са највећом дужином везе. Код најмање дужине везе, достигнуто је само 6% чврстоће при затезању, док је код већих дужина везе искоришћено 40–45% чврстоће при затезању. Узевши у обзир добијене резултате аутори су закључили да је лом ФРП арматуре „мало вероватан без обзира на дужину арматуре или тип епоксидног

лепка“ (Hassan et al., 2004). Испитивање је такође показало да дужина уградње не би треба да буде мања од 80 пречника шипке како би се осигурала одговарајућа чврстоћа везе и ограничило слободно клизање краја арматуре.

У истом раду, параметарска студија базирана на методи коначних елемената указала је да „чисто“ растојање између прореза које је мање од два пречника шипке утиче на повећање напона затезања на додирној површини бетон-лепак. Овај напон затезања се јавља услед преклапања напона суседних шипки за блиско постављене прорезе због чега се може јавити лом везе. Са друге стране, испитивање је такође показало да растојање прореза има мали ефекат на напоне на додирној површини ФРП арматура-лепак. Препорука аутора је да растојање прореза од ивице греде не буде мање од четири пречника шипке, а да ширина прореза не буде мања од два пречника шипке.

Де Лоренцис и други (De Lorenzis et al., 2000) су у свом раду из 2000. године анализирали понашање четири армиранобетонске Т греде ојачане НСМ ФРП методом. У раду су истраживали утицај врсте ојачања (ГФРП и ЦФРП арматура), утицај површинске обраде ФРП арматуре (охрапављене и пескарене) и утицај количине спољашње арматуре, на величину оптерећења лома.

Резултати испитивања су показали да све греде ојачане ЦФРП шипкама отказују услед одвајања ФРП арматуре и то као последица подужног одвајања епоксидног лепка. Код греда ојачаних ГФРП шипкама уочен је отказ одвајањем и у епоксиду и у бетонском заштитном слоју при лому. Испитивања су показала да повећање површине НСМ арматуре није значајно повећало носивост елемента. Уочено је повећање носивости греде од 25,7 % до 44,3 % када се ојачане греде упореде са неојачаном контролном гредом.

2. Облици лома код НСМ ФРП трака

Док су ранија лабораторијска и истраживања на терену о примени НСМ ФРП методе у ојачавању АБ конструкција изведена искључиво коришћењем шипки кружног попречног пресека, у скорашњим истраживањима све је више употребе шипки или трака правоугаоног или квадратног попречног пресека (Burke, 2008). Повећано интересовање за употребу овакве ФРП арматуре јавило се због жеље за достизањем већих дилатација у ФРП арматури пре отказа одвајањем. У случају када су сви остали параметри идентични, просечна чврстоћа везе ФРП трака је обично већа у односу на кружне шипке због просторне расподеле напона везе који се развија у бетону који

окружује траке (Blaschko, 2003). Код трака, већи део силе везе и затезања остаје у равни површине бетона, док код округлих шипки, силе настале услед радијалних напона проузрокују затезање које тежи да изгура шипку из заштитног слоја бетона, због чега долази до одвајања и отказа везе. Поред тога, како је код трака у односу на округле шипке знатно већи однос обима и површине попречног пресека, напон пријањања при истој сили затезања је мањи (Teng et al., 2006).

У истраживању Хасана и других из 2003. године (Hasan et al., 2003) испитиван је утицај дужине везе на чврстоћу везе, а резултати указују да при мањим дужинама везе отказ настаје услед одвајања на додирној површини лепак-бетон при чему долази до незнатног или никаквог повећања чврстоће везе у поређењу са контролним узорком. Код тих узорака је искоришћен веома мали део чврстоће траке (мање од 15 %). Са друге стране, значајно повећање чврстоће је уочено код греда са средњим дужинама везе код којих се лом јавља услед одвајања краја траке а проценат искоришћености чврстоће расте са повећањем дужине везе и креће се у распону од 15 % до 92 %. Код греда са великом дужином везе, отказ се јавио услед кидања ФРП траке, што указује да је у овом случају постигнута пуна чврстоћа при затезању. Ови резултати јасно указују да је могуће достићи пуну чврстоћу ФРП трака за разлику од испитиваних ФРП шипки код којих се отказ јавља услед одвајања без обзира на дужину везе.

У истраживању Тенга и других (Teng et al., 2006) испитиван је ефекат дужине везе на понашање ФРП система ојачања. Отказ везе се јавио на додирној површини ФРП трака-лепак с тим да је при већој дужини везе за 17,5 % веће оптерећење лома, али је мања просечна чврстоћа везе за 6 %. Испитивање је показало да је при већим оптерећењима већа искоришћеност траке, што је и очекивано и слично понашању споља залепљених ФРП ламината у ојачавању бетона.

У истраживању Серацина и других (Seracino et al., 2007) уочени су откази услед кидања ФРП арматуре, одвајање на додирној површини између бетона и лепка и одвајање лепка. Истраживање је показало да се при повећању ширине траке повећава и чврстоћа везе али и да повећање чврстоће није само последица повећања попречног пресека, јер се при повећању ширине траке за 100 % повећање чврстоће везе кретало у границама од 118-157 %. Разлог је у чињеници да ФРП трака улази дубље у заштитни слој бетона па долази до њеног бољег утезања. Уочено је и да повећање дебљине траке утиче на пропорционално повећање оптерећења лома као последица веће површине везе, док повећање дужине везе повећава чврстоћу везе, с тим што је то повећање чврстоће мање код већих дужина везе.

У истраживању Бароса и других (Barros et al., 2005) испитиване су греде правоугаоног попречног пресека ојачане на савијање. У оквиру истраживања варирано је: проценат армирања челичном арматуром и проценат армирања ФРП арматуром. Код свих греда осим код једне, отказ се јавио услед одвајања бетона. Бетонски заштитни слој унутар кога је била ФРП арматура одвојио се од остатка греде као и у неким случајевима бетон изнад челичне арматуре. Постигнуто је повећање силе лома (носивости) од 78 % до 96 % у поређењу са контролном гредом, док су дилатације биле у опсегу од 62 % до 91 % од граничне дилатације затезења траке, при чему је највећи ниво дилатација уочен код греде са најмањом количином ојачања.

У истраживању Тенга и других (Teng et al., 2006) испитиване су бетонске греде дужине 3000 mm, оптерећене на савијање са различитим дужинама НСМ ЦФРП трака (500, 1200, 1800 и 2900 mm). Код греда дужинама везе од 1200 и 1800 mm уочено је повећање носивости греде од 30 % до 90 %, као и повећана крутост у поређењу са неојачаном контролном гредом. Отказ код обе греде се јавио услед одвајања заштитног слоја почевши од слободног краја ФРП траке. Код греда са највећом дужином везе уочено је повећање носивости од 106 % у поређењу са контролном гредом. До лома је дошло услед мрвљења бетона, које је праћено одвајањем заштитног слоја бетона, одвајањем траке на додирној површини лепак-бетон и одвајањем лепка.

4.6.6 Предности и недостаци НСМ методе ојачања у поређењу са ЕБ методом

У поређењу са ЕБ методом, НСМ метода има велики број предности (De Lorenzis and Teng, 2007) као што су:

- ✓ Количина рада при ојачавању може бити мања, с обзиром да припрема површине сем исецања прореца није неопходна (није неопходно уклањање малтера и слабог површинског слоја бетона, као и равнање храпаве бетонске површине);
- ✓ Одвајање ФРП арматуре као један од најчешћих облика лома ојачаних носача је знатно мање кад је арматура уграђена у близини површине у поређењу са споља залепљеном арматуром;
- ✓ Арматура уграђена у близини површине се може једноставније сидрити у суседним елементима како би се спречили облици лома одвајањем, што је

поготово битно код ојачавања на савијање греда и стубова рамова са крутим везама, где се максимални моменти обично јављају на крајевима елемената;

- ✓ НСМ ФРП арматура се може једноставније претходно напрегнути;
- ✓ Арматура уграђена у прорезу је заштићена бетонским слојем тако да је мање изложена случајним утицајима и механичким оштећењима, ватри и вандализму, што чини ову методу погоднију за ојачање у зонама негативних момената код греда и плоча;
- ✓ Изглед ојачане конструкције остаје непромењен.

Због наведених предности, метода уградње ФРП арматуре у бетонском заштитном слоју је у многим случајевима супериорна у односу на методу спољашњег лепљења ФРП арматуре или може бити коришћена у комбинацији са ЕБ методом, под условом да је заштитни слој бетона ојачаног елемента довољно дебео да би се направио прорез жељене величине.

Минимална величина прореза која је потребна за уградњу ФРП арматуре, а која треба да буде најмање 1,5 пута већа од пречника арматуре, је често основни ограничавајући фактор за примену НСМ методе. Поред тога, количина испуне прореза (најчешће епоксидне смоле) је знатно већа него код ЕБ методе, па је самим тим и цена ојачања НСМ методом већа, што је у извесној мери елиминисано употребом уских трака за ојачање за које су потребни прорези мањих димензија.

4.7 О резултатима претходних истраживања примене ФРП материјала за ојачавање бетонских елемената

У једном од најранијих радова у којима се истражује употреба НСМ методе (Alkhrdaji et al., 1999) упоређено је понашање три АБ плоче од којих је једна контролна без ојачања, друга ојачана споља залепљеним ЦФРП тракама и трећа ојачана НСМ пескареним ЦФРП шипкама. Остали параметри испитивања су били приближно исти. Отказ контролне плоче се јавио услед течења затегнуте челичне арматуре које је праћено мрвљењем бетона, као што се очекује код адекватно пројектованих АБ конструкција. Лом плоче ојачане НСМ методом је настао услед кидања ФРП арматуре, док се лом плоче ојачане ЕБ методом јавио услед кидања ФРП арматуре и одвајања трака. Уочено је повећање крутости код обе ојачане плоче и повећање носивости од 27 % код плоче ојачане НСМ методом, односно 17 % код плоче ојачане ЕБ методом. Ова студија је показала да се обе методе могу користити за ефикасно ојачавање АБ

конструкција али и потврдили да је код НСМ методе ојачавања ефикасније коришћење ЦФРП арматуре због избегавања превременог одвајања.

Осам АБ греда је тестирано у оквиру истраживања из 2004. године (El-Nasha et al., 2004). Једна од греда је коришћена као контролна док су остале ојачане НСМ ЦФРП шипкама, НСМ ЦФРП уским тракама различитих димензија, са различитим димензијама прореза, и НСМ ГФРП уским термопластичним тракама. Резултати тестова су показали да је понашање свих греда пре појаве прслина слично, али после појаве прслина носивост и крутост свих ојачаних греда су веће у односу на контролну, као што је било и очекивано. У случају греда ојачаних НСМ ЦФРП шипкама, отказ је инициран одвајањем лепка, најчешћим видом отказа који се помиње у литератури у случају употребе шипки у оквиру НСМ методе. Код греда ојачаних НСМ ЦФРП уским тракама до отказа је дошло услед кидања трака, што указује на потпуно искоришћење трака, док је лом греда са НСМ ГФРП термопластичним тракама настао услед одвајања бетона. Код свих НСМ методом ојачаних греда, број и ширина прслина је смањена због чега су мање и укупне деформације греда. Све греде ојачане споља залепљеном ФРП арматуром су отказале услед одвајања трака при нижем оптерећењу у односу на примену НСМ методе тако да за идентичне ЦФРП траке као материјал ојачања, примена НСМ методе је пружила 4,8 пута већу носивост у односу на ЕБ методу.

У истраживању из 2005. године (Quattkebaum et al., 2005) упоређена је ефикасност споља залепљених ЦФРП трака, НСМ ЦФРП трака и хибридног стакло/карбон механички уграђеног система за ојачавање АБ греда на савијање. При примени сваке од метода ојачавања пројектована је са приближно иста аксијална крутост. Резултати истраживања су показали да је до отказа споља залепљеног система дошло услед одвајања ФРП трака док су и НСМ систем и хибридни систем отказали услед мрвљења бетона, с тим да је НСМ систем био једини систем код кога није било оштећења везе у тренутку лома.

У истраживању из 2006. године (Harrison et al., 2006) упоређене су греде са споља залепљеним ЦФРП тракама, НСМ ЦФРП тракама, споља залепљеним челиком армираним полимерима и НСМ нерђајућим арматурним челичним шипкама. На жалост, све четири греде су отказале услед мрвљења бетона пре било ког облика лома везе или кидања, а повећање носивости у сва четири случаја је било слично, у опсегу од 46 % до 51 %, у поређењу са контролном неојачаном гредом.

У истраживању Аида и других из 2006. године (Aidoo et al., 2006) ојачани су постојећи мостовски носачи исечени из постојеће конструкције на начин као у раду

(Quattkebaum et al., 2005). До отказа код греда ојачаних споља залепљеним ЦФРП тракама је дошло услед одвајања, отказ код греде ојачане НСМ методом је настао услед мрвљења бетона које је праћено одвајањем заштитног слоја, а лом хибридног система је настао услед мрвљења бетона после значајног оштећења везе и одвајања заштитног слоја бетона.

Ранковић је у свом истраживању из 2010. године (Ранковић, 2010) упоређивао носивост контролне неојачане греде са ојачаним гредама, као и могућност настављања ФРП арматуре иновативном „бајпас“ методом. Ојачавање греда је урађено НСМ методом са ЦФРП и ГФРП арматуром, ЕБ методом са карбонским тракама исте аксијалне крутости као и у случају греде ојачане НСМ методом. Носивост греде ојачане ЦФРП арматуром је била за 89 % већа у односу на контролну греду. Носивост греде ојачане ГФРП арматуром је за 73 % била већа у односу на носивост контролне греде. Носивост греде ојачане карбонском траком је била за 51 % већа у односу на контролну греду. Добијени резултати у погледу деформација су потврдили предност ЦФРП арматуре у односу на ГФРП арматуру.

Док већина доступних истраживања указује да су НСМ ФРП системи, посебно системи са тракама, способни да искористе веће чврстоће ФРП арматуре у односу на споља залепљене ФРП системе ојачања, неколико упоредних студија је указало да је НСМ неекономичније решење (Rizkalla et al., 2002; Quattlebaum et al., 2005; Aidoo et al., 2006; Rosenboom et al., 2007). Главно повећање трошкова код НСМ методе је у вези радне снаге за исецање прореза, а фактори као што су велика количина потребног лепка за испуну прореза и висока цена материјала може учинити НСМ методу скупљом у поређењу са ЕБ методом. Међутим, у овим студијама нису обично разматране остале потенцијалне предности НСМ методе, као што је повећање трајности, заштита од ватре и вандализма, естетске предности и ефикаснија примена у случају негативних момената. Са додатним истраживањем о ефектима величине прореза, посебно употребом НСМ трака, може се значајно смањити потребна величина прореза, чиме ће се смањити цена радне снаге и количина потребног лепка. Такође, употреба цементних лепкова или ињекционих епоксида уместо епоксидних паста може значајно умањити цену материјала. Осим тога, с обзиром на супериорне карактеристике везе НСМ методом ојачања, виша цена НСМ ФРП методе се у неким применама не може избећи (Burke, 2008).

5 АНАЛИТИЧКИ ПРОРАЧУН ПРЕСЕКА АБ ГРЕДЕ ОЈАЧАНЕ ФРП АРМАТУРОМ

Циљ аналитичких истраживања је развој математичког модела за прорачун носивости пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром, оптерећене на савијање, при карактеристичним стањима гредног носача:

- ✓ до појаве прелина,
- ✓ до границе великих издужења (течења) арматуре и
- ✓ после појаве течења арматуре, до лома.

5.1 Опште

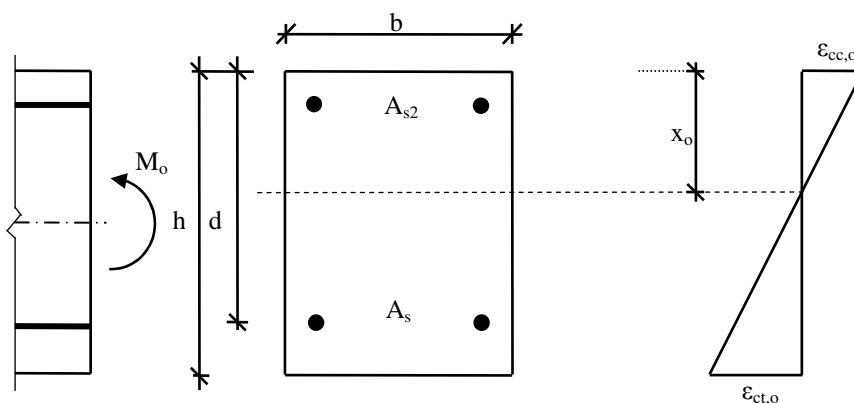
Постоје бројне аналитичке методе за анализу АБ греда ојачаних ФРП арматуром (Vasseur, Matthys and Taerwe, 2006; Akbarzadeh and Maghsoudi, 2009). Аналитичким приступом базираном на анализи попречног пресека може се на једноставан начин одредити оптерећење лома ојачане греде. Приступ је заснован на принципима компатибилности дилатација, равнотеже унутрашњих сила и идеализованим конститутивним везама за бетон, челичну и ФРП арматуру. Ове идеализоване везе, заједно са претпоставком да се клизање на додирној површини између бетона и ФРП система може занемарити, представљају основу за анализу граничног стања носивости АБ греда ојачаних на савијање (Teng et al., 2002).

Претпоставке које се уводе у анализи попречног пресека АБ греда ојачаних ФРП арматуром су следеће (Akbarzadeh, and Maghsoudi, 2009):

1. Расподела дилатација по висини пресека је линеарна – Бернулијева (Bernoulli) хипотеза о равним пресецима;
2. Нема клизања између подужног арматурног челика и бетона;
3. Нема клизања између ФРП система и бетона;
4. Лом греде се јавља или услед достигања граничне дилатације бетона при притиску или услед лома ФРП система за ојачање.

5.2 Почетно стање

При пројектовању система ојачања треба узети у обзир и утицај деловања претходног оптерећења. Расподела дилатација у пресеку АБ греде при деловању момента пре уградње система за ојачање (M_0) може се одредити на основу теорије еластичности. Како је момент (M_0) обично већи од момента појаве прелина (M_{cr}), прорачун треба базирати на испрском пресеку. Уколико је момент (M_0) мањи од момента (M_{cr}), његов утицај при пројектовању система ојачања може се занемарити (fib bulletin 14, 2001). Разматра се АБ греда правоугаоног попречног пресека (Слика 5-1):



Слика 5-1: Расподела дилатација по висини пресека АБ греде пре уградње ФРП система за ојачање

где је:

A_s – површина затегнуте челичне арматуре,

A_{s2} – површина притиснуте челичне арматуре,

b – ширина попречног пресека,

d – одстојање затегнуте челичне арматуре од притиснуте ивице бетона (статичка висина пресека),

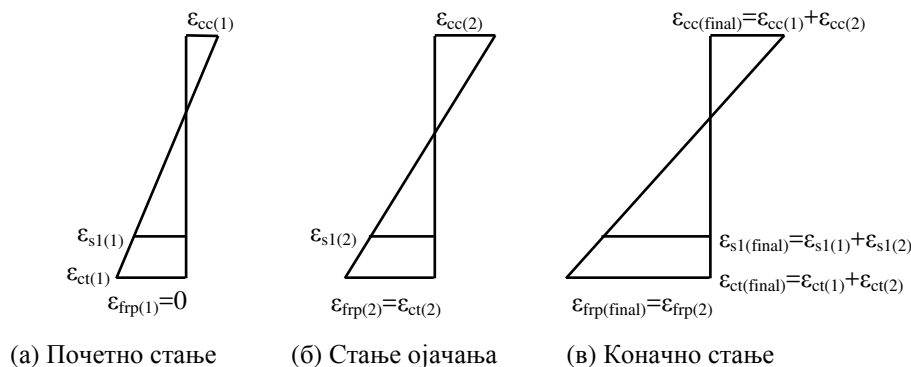
h – висина попречног пресека,

x_0 – одстојање неутралне осе од притиснуте ивице пресека,

$\varepsilon_{cc,o}$ – дилатација на притиснутој ивици бетона, пре ојачања,

$\varepsilon_{ct,o}$ – дилатација на затегнутој ивици бетона, пре ојачања.

Да би се илустровало стање дилатација у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром оне се могу приказати као суперпозиција дилатација пре и после уградње ФРП система ојачања (Слика 5-2),



Слика 5-2: Суперпозиција дилатација код ЕБ методе ојачања (Bank, 2006)

где је:

ε_{cc} – дилатација на притиснутој ивици бетона,

ε_{ct} – дилатација на затегнутој ивици бетона,

ε_{frp} – дилатација у ФРП арматури,

ε_{s1} – дилатација у затегнутој челичној арматури.

Приказана стања дилатација су:

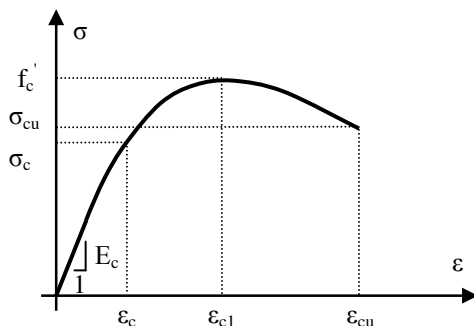
1. **Почетно – иницијално стање**, пре уградње система за ојачање, код кога се разматрају дилатације ($\varepsilon_{(1)}$) услед оптерећења у тренутку уградње система за ојачање, Слика 5-2(а);
2. **Стање ојачања**, после уградње система за ојачање, код кога се разматрају дилатације ($\varepsilon_{(2)}$) услед оптерећења које је нането после уградње система за ојачање (хипотетичка ситуација), Слика 5-2(б);
3. **Коначно стање**, после уградње система за ојачање код кога се разматрају дилатације ($\varepsilon_{(final)}$) услед оптерећења које постоји у тренутку уградње система за ојачање као и од додатног оптерећења, Слика 5-2(в).

Коначно стање дилатација се добија суперпозицијом почетних дилатација и дилатација које се јављају у ФРП арматури, при чему неутрална оса мења положај (Bank, 2006).

5.3 Усвојени модели компонентних материјала

5.3.1 Модел бетона

У раду је при анализи пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром усвојена параболична зависност између напона и дилатације за бетон (Слика 5-3). Математичка формулација ове зависности може се описати изразима (5-2)-(5-4) (Collins and Mitchell, 1987):



Слика 5-3: Дијаграм зависности између напона и дилатације за бетон при аксијалном притиску

$$\sigma_c = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2 \right], \quad (5-2)$$

$$\varepsilon_{c1} = \frac{2f'_c}{E_c}, \quad (5-3)$$

$$E_c = 4500 \sqrt{f'_c}, \quad (5-4)$$

где је:

E_c – модул еластичности бетона,

f'_c – чврстоћа бетона при притиску,

ε_c – дилатација у бетону,

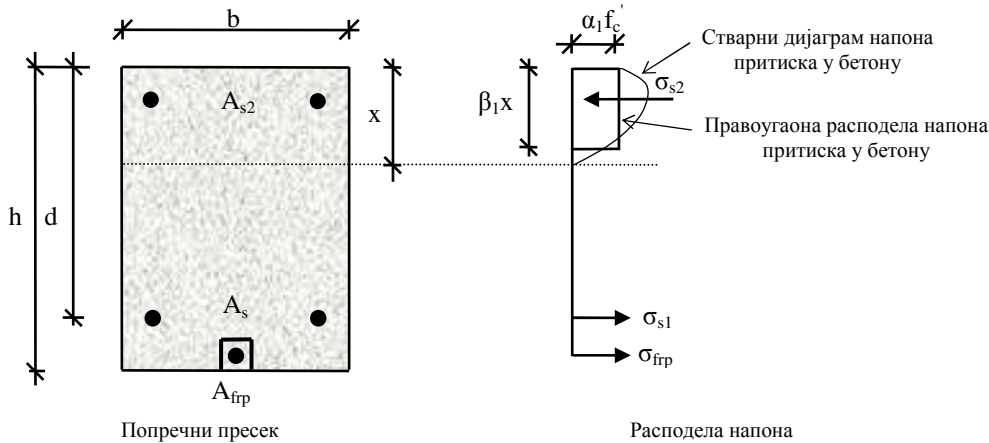
ε_{cu} – гранична дилатација бетона при притиску (дилатација мрвљења бетона),

ε_{c1} – дилатација у бетону која одговара чврстоћи бетона при притиску f'_c ,

σ_c – напон у бетону,

σ_{cu} – напон у бетону који одговара граничној дилатацији бетона (ε_{cu}).

Поједностављену расподелу напона притиска у бетонском пресеку приказану на Слици 5-4 дали су Колинс и Мичел (Collins and Mitchell, 1987).



Слика 5-4: Расподела напона у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром

где је:

A_{frp} – површина ФРП арматуре,

x – одстојање неутралне осе од притиснуте ивице пресека,

α_1 – коефицијент редуковања напона притиска у бетону,

β_1 – коефицијент редуковања висине дијаграма напона до висине неутралне осе,

σ_{s1} – напон у затегнутој челичној арматури,

σ_{s2} – напон у притиснутој челичној арматури,

σ_{frp} – напон у ФРП арматури.

Коефицијенти правоугаоне расподеле напона притиска у бетону (α_1 и β_1) одређују се према следећим изразима:

$$\alpha_1 \beta_1 = \frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_0} - \frac{1}{3} \left(\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_0} \right)^2,$$

(5-5)

$$\beta_1 = \frac{4 - \left(\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_0} \right)}{6 - \left(\frac{2\epsilon_{cc}}{\epsilon_0} \right)}, \quad (5-6)$$

где је:

ϵ_{cc} – дилатација на притиснутој ивици бетона,

ϵ_0 – одговарајућа дилатација у бетону.

Сила притиска у бетону (C_c) и њен положај у односу на неутралну осу (y_c) дати су следећим изразима (Collins and Mitchell, 1987):

$$C_c = \alpha_1 \beta_1 f'_c x b, \quad (5-7)$$

$$y_{cc} = x - \frac{1}{2} \beta_1 x. \quad (5-8)$$

Када је напон на затегнутој ивици бетона (σ_{ct}) мањи од чврстоће бетона при затезању (f_{ct}), вредност силе затезања у бетону (T_c) и њен положај у односу на неутралну осу (y_{Tc}) дати су изразима:

$$T_c = \frac{1}{2} b \sigma_{ct} (h - x), \quad (5-9)$$

$$y_{Tc} = \frac{2}{3} (h - x), \quad (5-10)$$

$$f_{ct} = 0,6 \lambda \sqrt{f'_c}, \quad (5-11)$$

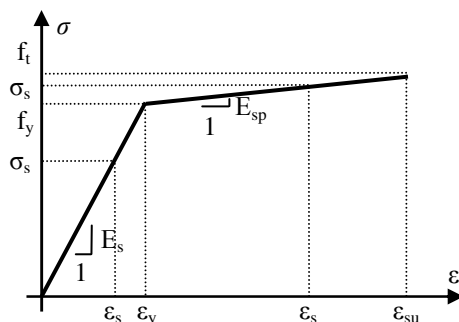
где је:

f_{ct} – чврстоћа бетона при затезању,

λ – фактор за прорачун запреминске тежине бетона.

5.3.2 Модел челика

У раду је при анализи пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром усвојена билинеарна зависност између напона и дилатације за арматурни челик (еластопластично понашање) са 1 % нагиба ојачања (Слика 5-5). Математичка формулација ове зависности може се описати изразима (5-12) и (5-13):



Слика 5-5: Дијаграм зависности између напона и дилатације за арматурни челик

$$\sigma_s = \begin{cases} \epsilon_s E_s & \text{за } \epsilon_s \leq \epsilon_y \\ f_y + E_{sp} (\epsilon_s - \epsilon_y) & \text{за } \epsilon_s \geq \epsilon_y \end{cases}, \quad (5-12)$$

$$E_{sp} = 0,01 E_s, \quad (5-13)$$

где је:

E_s – модул еластичности челика пре великих издужења (течења) челика,

E_{sp} – модул еластичности челика после великих издужења (течења) челика,

f_t – чврстоћа челика при затезању,

f_y – напон великих издужења (течења) челика,

ε_s – дилатација у челику,

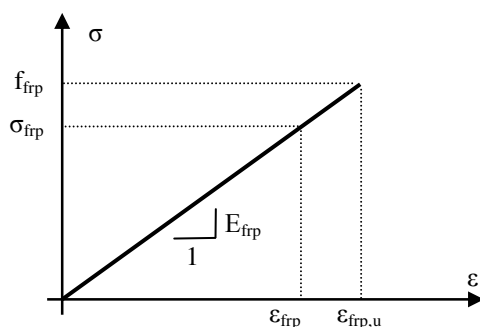
ε_{su} – гранична дилатација челика при затезању,

ε_y – дилатација у челику која одговара напону течења челика,

σ_s – напон у челику.

5.3.3 Модел ФРП арматуре

У раду је при анализи пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром усвојена линеарно-еластична зависност између напона и дилатације за ФРП арматуру, као на *Слици 5-6*. Математичка формулација ове зависности може се описати изразом (5-14):



Слика 5-6: Дијаграм зависности између напона и дилатације за ФРП арматуру

$$\sigma_{frp} = \varepsilon_{frp} E_{frp}, \quad (5-14)$$

где је:

E_{frp} – модул еластичности ФРП арматуре,

f_{frp} – чврстоћа ФРП арматуре при затезању,

ε_{frp} – дилатација у ФРП арматури,

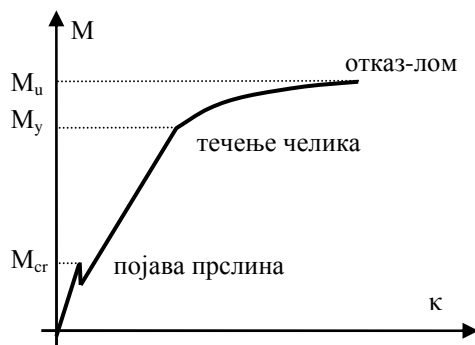
$\varepsilon_{frp,u}$ – гранична дилатација ФРП арматуре при затезању (дилатација кидања ФРП арматуре),

σ_{frp} – напон у ФРП арматури.

5.4 Напонско деформацијска стања пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром

На *Слици 5-7* приказан је дијаграм зависности између момента (M) и кривине (κ) у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром, која је оптерећена на савијање. Зависност је идеализована нелинеарном кривом која се састоји из три дела:

- ✓ зона пре појаве прслина,
- ✓ зона после појаве прслина а пре појаве течења челика и
- ✓ зона после појаве течења челика до лома пресека.



Слика 5-7: Дијаграм зависности између момента (M) и кривине (κ) у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром

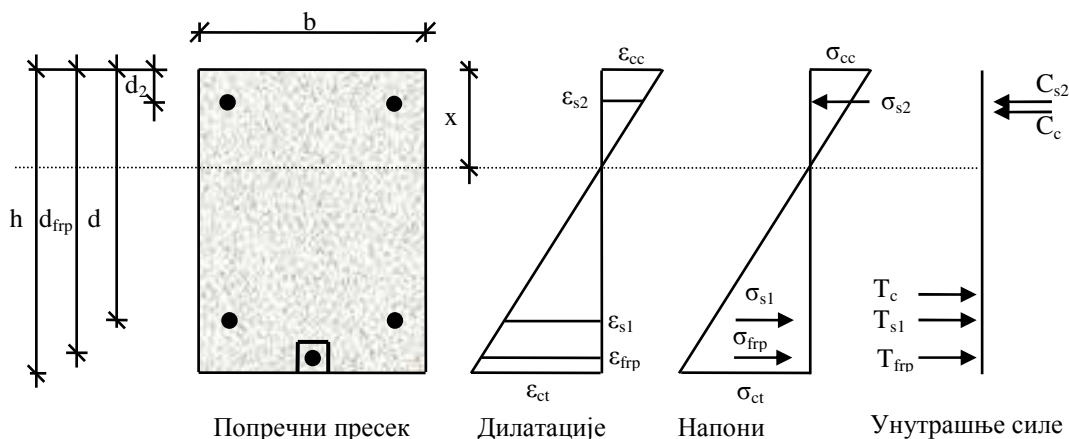
где је:

M_{cr} – момент појаве прслина,

M_y – момент течења затегнуте челичне арматуре,

M_u – гранични момент савијања (момент носивости пресека).

У анализи пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром, напрегнутог на савијање, у овом раду примењују се принципи прорачуна сложених (спрегнутих) пресека који се користе у теорији конструкција (Badawi, 2007). Расподела дилатација и напона по висини пресека приказана је на Слици 5-8 (ISIS, 2004 – прилагођен за НСМ метод ојачања):



Слика 5-8: Претпостављена расподела дилатација, напона и унутрашњих сила у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром (са занемарењем почетних дилатација)

где је:

C_{s2} – сила у притиснутој челичној арматури,

T_{frp} – сила у ФРП арматури,

T_{s1} – сила у затегнутој челичној арматури,

d_{frp} – одстојање ФРП арматуре од притиснуте ивице бетона,

d_2 – одстојање притиснуте челичне арматуре од притиснуте ивице бетона,

ε_{s1} – дилатација у затегнутој челичној арматури,

ε_{s2} – дилатација у притиснутој челичној арматури,

σ_{cc} – напон на притиснутој ивици бетона,

σ_{ct} – напон на затегнутој ивици бетона,

σ_{s1} – напон у затегнутој челичној арматури,

σ_{s2} – напон у притиснутој челичној арматури.

Одговарајуће једначине равнотеже унутрашњих сила базирају се на претпоставци да је резултанта унутрашњих сила у пресеку једнака нули ($\Sigma X=0$):

$$\int_{A_{cc}} \sigma_c dA_{cc} + \int_{A_{s2}} \sigma_{s2} dA_{s2} - \int_{A_{ct}} \sigma_c dA_{ct} - \int_{A_{s1}} \sigma_{s1} dA_{s1} - \int_{A_{frp}} \sigma_{frp} dA_{frp} = 0, \quad (5-15)$$

односно:

$$C_c + C_{s2} - T_c - T_{s1} - T_{frp} = 0, \quad (5-16)$$

као и да је момент унутрашњих сила једнак спољашњем моменту савијања ($\Sigma M=M_{ext}$):

$$\int_{A_{cc}} \sigma_c y dA_c + \int_{A_{s2}} \sigma_{s2} y dA_{s2} - \int_{A_{ct}} \sigma_c y dA_{ct} - \int_{A_{s1}} \sigma_{s1} y dA_{s1} - \int_{A_{frp}} \sigma_{frp} y dA_{frp} = M_{ext}, \quad (5-17)$$

односно:

$$C_c y_{C_c} + C_{s2} y_{C_{s2}} - T_c y_{T_c} - T_{s1} y_{T_{s1}} - T_{frp} y_{T_{frp}} = M_{ext}, \quad (5-18)$$

где је:

A_{cc} – површина притиснутог дела бетонског пресека,

A_{ct} – површина затегнутог дела бетонског пресека,

M_{ext} – спољашњи момент савијања,

y – одстојање неутралне осе од одговарајуће силе,

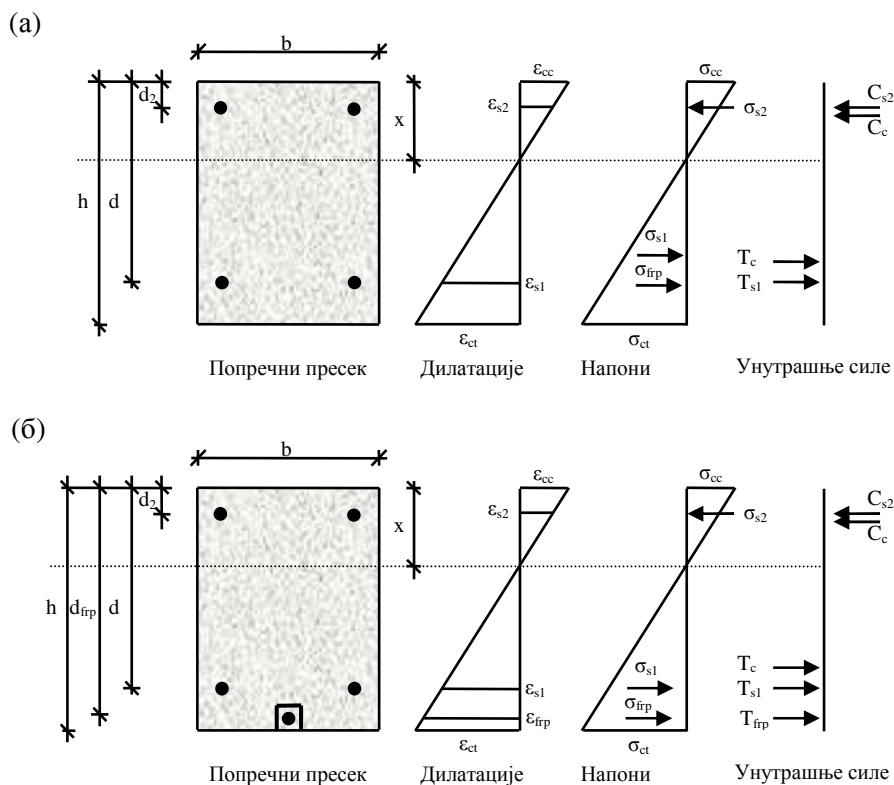
$y_{C_{s2}}$ – одстојање неутралне осе од силе C_{s2} ,

$y_{T_{frp}}$ – одстојање неутралне осе од силе T_{frp} ,

$y_{T_{s1}}$ – одстојање неутралне осе од силе T_{s1} .

5.4.1 Напонско деформацијско стање пре појаве прелина (pre-cracking stage)

Пре појаве прелина напон затезања на затегнутој ивици бетона је мањи од чврстоће бетона при затезању па цео пресек учествује у прихватању спољашњег оптерећења. Због тога се за прорачун користи момент инерције целог пресека (I_g).



Слика 5-9: Расподела напона, дилатација и унутрашњих сила пре појаве прелина за:

(а) контролну греду, (б) ојачану греду

За стање пре појаве прелина једначине равнотеже унутрашњих сила ($\Sigma X=0$ и $\Sigma M=M_{ext}$) могу се написати у следећем облику:

$$b x \sigma_{cc} / 2 + A_{s2} \sigma_{s2} - b(h-x) \sigma_{ct} / 2 - A_{s1} \sigma_{s1} = 0, \quad (5-19)$$

$$\frac{1}{3} b x^2 \sigma_{cc} + A_{s2} \sigma_{s2} (x - d_2) - \frac{1}{3} b (h-x)^2 \sigma_{ct} - A_{s1} \sigma_{s1} (d-x) = M_{ext}, \quad (5-20)$$

за контролну греду, односно:

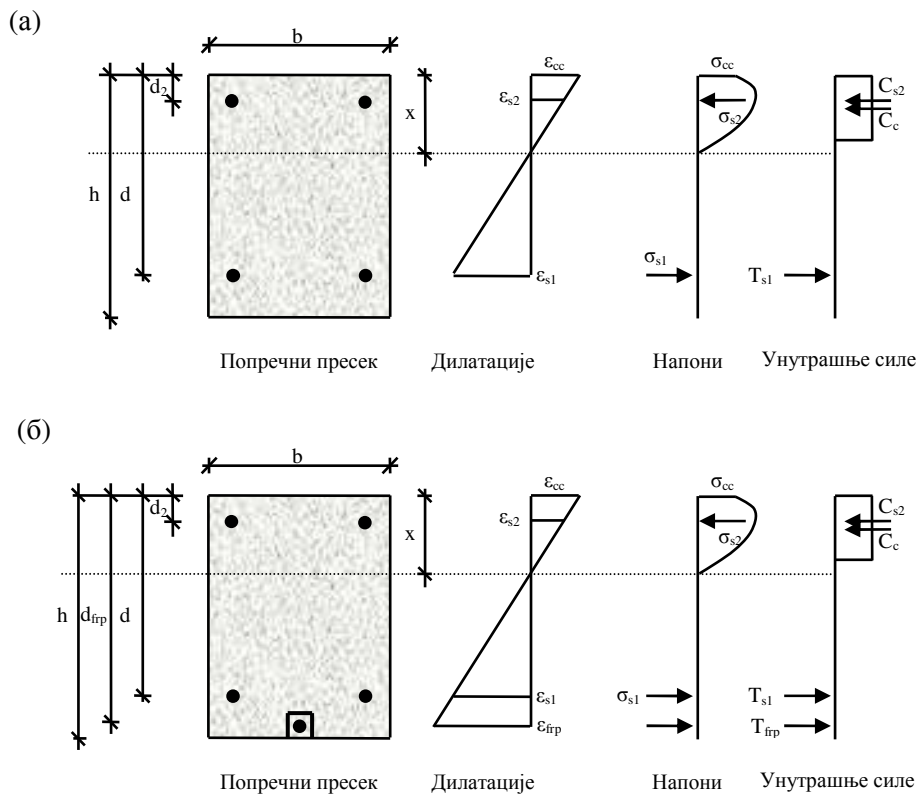
$$b x \sigma_{cc} / 2 + A_{s2} \sigma_{s2} - b(h-x) \sigma_{ct} / 2 - A_{s1} \sigma_{s1} - A_{frp} \sigma_{frp} = 0, \quad (5-21)$$

$$\frac{1}{3} b x^2 \sigma_{cc} + A_{s2} \sigma_{s2} (x - d_2) - \frac{1}{3} b (h-x)^2 \sigma_{ct} - A_{s1} \sigma_{s1} (d-x) - A_{frp} \sigma_{frp} (d_{frp} - x) = M_{ext}, \quad (5-22)$$

за ојачану греду.

5.4.2 Напонско деформацијско стање пре појаве течења арматуре (pre-yielding stage)

Када напон затезања на затегнутој ивици бетона прекорачи чврстоћу бетона при затезању, појављују се прслине услед савијања, а греда се посматра као да је састављена од испрскалих пресека. Расподела напона у пресеку је као на *Слици 5-10*:



Слика 5-10: Расподела дилатација, напона и унутрашњих сила у фази пре појаве течења за:

(а) контролну греду, (б) ојачану греду

Једначине равнотеже унутрашњих сила ($\Sigma X=0$ и $\Sigma M=M_{ext}$) пре појаве течења (великих издужења) арматуре добијају следећи облик:

$$\alpha_1 \beta_1 b x f'_c + A_{s2} \sigma_{s2} - A_{s1} \sigma_{s1} = 0, \quad (5-23)$$

$$\alpha_1 \beta_1 b x^2 f'_c \cdot \left(x - \frac{1}{2} \beta_1\right) + A_{s2} \sigma_{s2} (x - d_2) - A_{s1} \sigma_{s1} (d - x) = M_{ext}, \quad (5-24)$$

за контролну греду, односно:

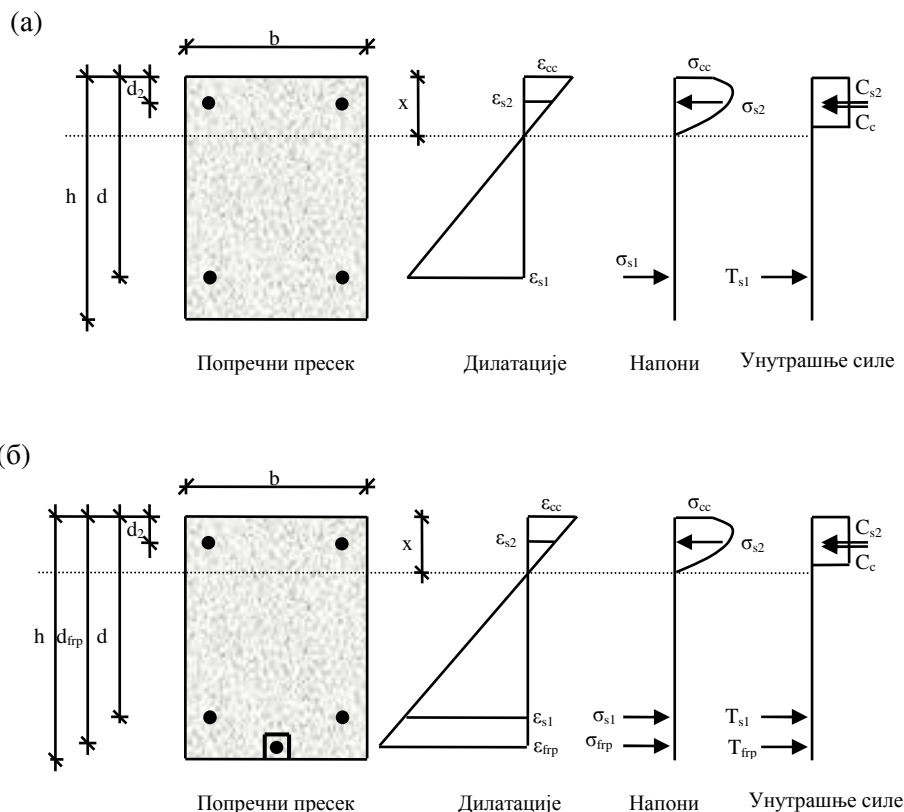
$$\alpha_1 \beta_1 b x f'_c + A_{s2} \sigma_{s2} - A_{s1} \sigma_{s1} - A_{frp} \sigma_{frp} = 0, \quad (5-25)$$

$$\alpha_1 \beta_1 b x^2 f'_c \left(x - \frac{1}{2} \beta_1\right) + A_{s2} \sigma_{s2} (x - d_2) - A_{s1} \sigma_{s1} (d - x) - A_{frp} \sigma_{frp} (d_{frp} - x) = M_{ext} \quad (5-26)$$

за ојачану греду.

5.4.3 Напонско деформацијско стање после појаве течења арматуре (post-yielding stage)

После почетка течења (великих издужења) челичне (главне) арматуре настаје стање које је приказано на *Слици 5-11*:



Слика 5-11: Расподела дилатација, напона и унутрашњих сила у фази после појаве течења за: (а) контролну греду, (б) ојачану греду

У овом стању једначине равнотеже унутрашњих сила су следеће:

$$\alpha_1 \beta_1 b x f'_c + A_{s2} \sigma_{s2} - A_{s1} [f_y + 0,01E_{sp} (\epsilon_{s1} - \epsilon_y)] = 0, \quad (5-27)$$

$$\alpha_1 \beta_1 b x^2 f'_c \left(x - \frac{1}{2} \beta_1\right) + A_{s2} \sigma_{s2} (x - d_2) - A_{s1} [f_y + 0,01E_{sp} (\epsilon_{s1} - \epsilon_y)] (d - x) = M_{ext}, \quad (5-28)$$

за контролну греду, односно:

$$\alpha_1 \beta_1 b x f'_c + A_{s2} \sigma_{s2} - A_{s1} [f_y + 0,01E_{sp} (\epsilon_{s1} - \epsilon_y)] - A_{frp} \sigma_{frp} = 0, \quad (5-29)$$

$$\alpha_1 \beta_1 b x^2 f'_c \left(x - \frac{1}{2} \beta_1\right) + A_{s2} \sigma_{s2} (x - d_2) - A_{s1} [f_y + 0,01E_{sp} (\epsilon_{s1} - \epsilon_y)] (d - x) - A_{frp} \sigma_{frp} (d_{frp} - x) = M_{ext}, \quad (5-30)$$

за ојачану греду.

5.5 Анализа зависности између момента и кривине у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром

Облик везе момент-кривина је битна карактеристика АБ пресека од које у значајној мери зависи понашање АБ греде у целини (Бајић, 1985). Однос између момента и кривине се најједноставније може одредити тако што се варирају вредности ивичних дилатација у бетону. На основу дилатације на притиснутој ивици бетона (ϵ_{cc}) могу се одредити и остале карактеристичне вредности дилатација: у притиснутој челичној арматури (ϵ_{s2}), затегнутој челичној арматури (ϵ_{s1}), ФРП арматури (ϵ_{fpr}) и на затегнутој ивици бетона (ϵ_{ct}) према следећим изразима (Слика 5-11 (б)):

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cc} \frac{x - d_2}{x}, \quad (5-31)$$

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cc} \frac{d - x}{x}, \quad (5-32)$$

$$\epsilon_{fpr} = \epsilon_{cc} \frac{d_{fpr} - x}{x}, \quad (5-33)$$

$$\epsilon_{ct} = \epsilon_{cc} \frac{h - x}{x}. \quad (5-34)$$

Заменом израза (5-31)-(5-34) у услови равнотеже (5-16), може се одредити одстојање неутралне осе од притиснуте ивице бетона (x), после чега се користећи услов равнотеже (5-18), може одредити и момент савијања (M) који одговара дилатацији на притиснутој ивици бетона (ϵ_{cc}). Користећи се хипотезом равних пресека, величина кривине у пресеку (κ) може се одредити дељењем дилатације притиснуте ивице бетонског пресека (ϵ_{cc}) са одстојањем те ивице од неутралне осе (x):

$$\kappa = \frac{\epsilon_{cc}}{x}. \quad (5-35)$$

На тај начин се добија однос између момента савијања и кривине (M - κ) у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром. Крива зависности између момента и кривине се може одредити инкременталним повећавањем дилатације притиснуте ивице бетона све до испуњења једног од следећих услова:

1. вредност дилатације на притиснутој ивици бетона једнака је дилатацији мрвљења бетона,
2. вредност дилатације у ФРП арматури једнака је дилатацији кидања.

У дисертацији је ради анализе пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром написан програм $M_k.m$ у Матлабу (*MATLAB R2014a*). Програм се базира на претходно

описаном поступку одређивања зависности између момента и кривине у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром, оптерећене на савијање. Извршењем овог програма одређене су криве зависности између момента и кривине које су приказане у поглављу 5.5.1, при чему је дилатација притиснуте ивице пресека бетона повећавана у сваком кораку за 10 микродилатација (0,00001 mm/mm).

5.5.1 Дијаграми зависности између момента и кривине у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром

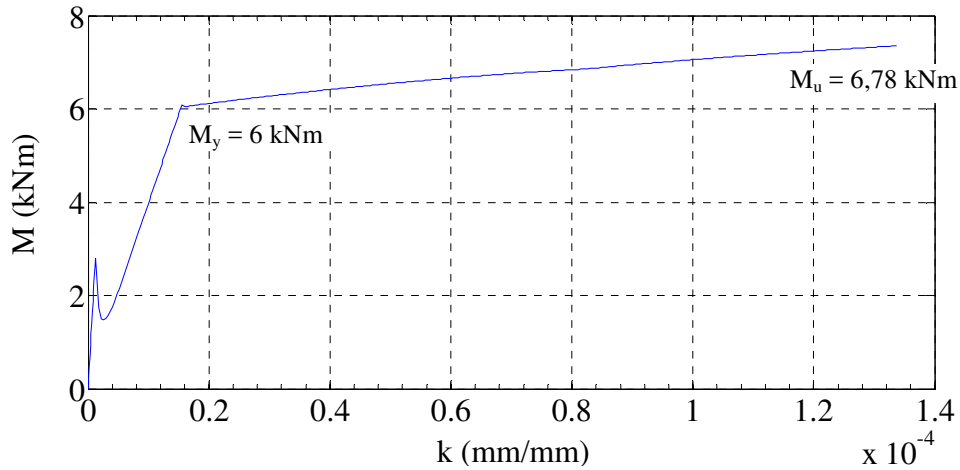
Тежиште експерименталног испитивања у овој дисертацији представљају АБ гредни носачи попречног пресека 120/200 mm. Они су израђени од самоупраћујућег бетона чврстоће при притиску $f_c' = 40$ МПа, армирани и у притиснутој и у затегнутој зони челичном арматуром 2Ø8 ($A_s = 100 \text{ mm}^2$, $\mu_s \approx 0,5\%$), напона течења $f_y = 400$ МПа и модула еластичности $E_s = 210$ GPa.

У оквиру испитивања, које је приказано у поглављу 6, анализиране су:

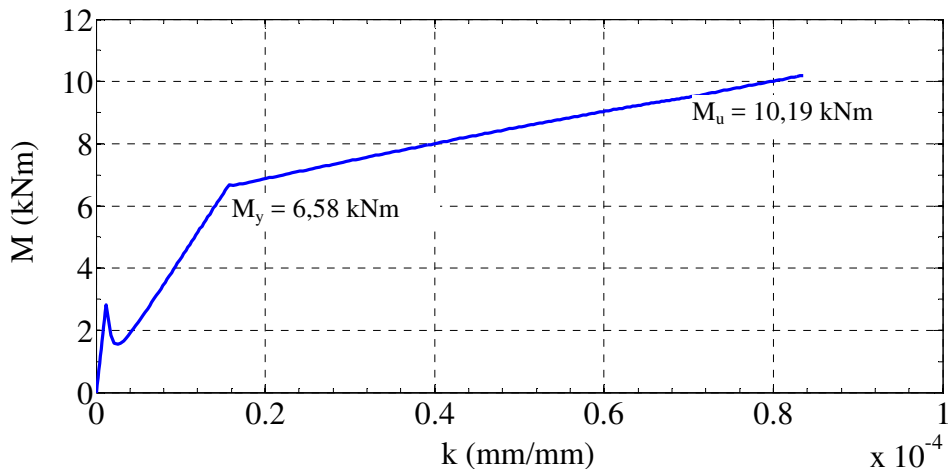
1. контролна, неојачана греда,
2. греде ојачане ЦФРП арматуром, чврстоће при затезању $f_{fr,u} = 2000$ МПа, модула еластичности $E_{fr} = 150$ GPa и граничне дилатације $\epsilon_{fr,u} = 0,0133$ и
3. греде ојачане ГФРП арматуром, чврстоће при затезању $f_{fr,u} = 760$ МПа, модула еластичности $E_{fr} = 40,8$ GPa и граничне дилатације $\epsilon_{fr,u} = 0,0186$.

Да би се извршила анализа утицаја ФРП арматуре на величину момента појаве прслина (M_{cr}), момента течења (M_y) и граничног момента савијања (M_u), употребом програма M_k.m добијени су дијаграми зависности између момента и кривине за:

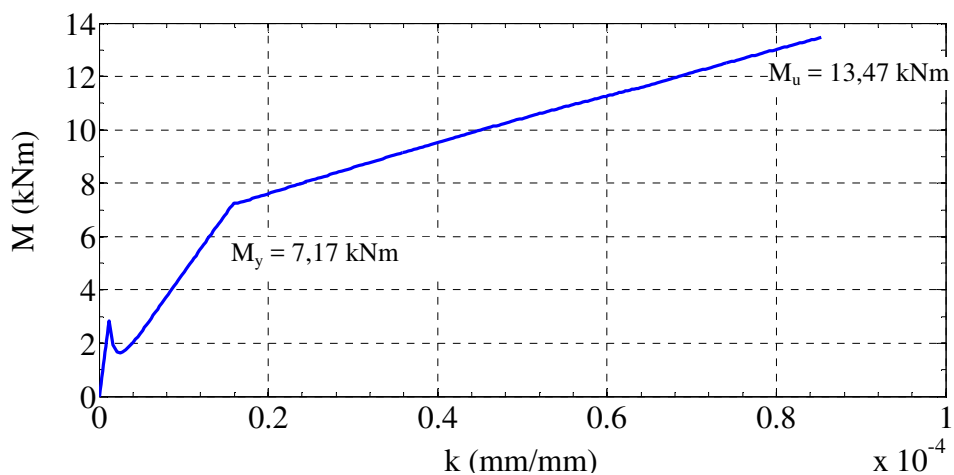
- ✓ пресек без ојачања – неојачан пресек (Слика 5-12),
- ✓ пресеке ојачане различитом количином ЦФРП арматуре (Слике (5-13) – (5-22)),
- ✓ пресеке ојачане различитом количином ГФРП арматуре (Слике (5-23) – (5-32)).



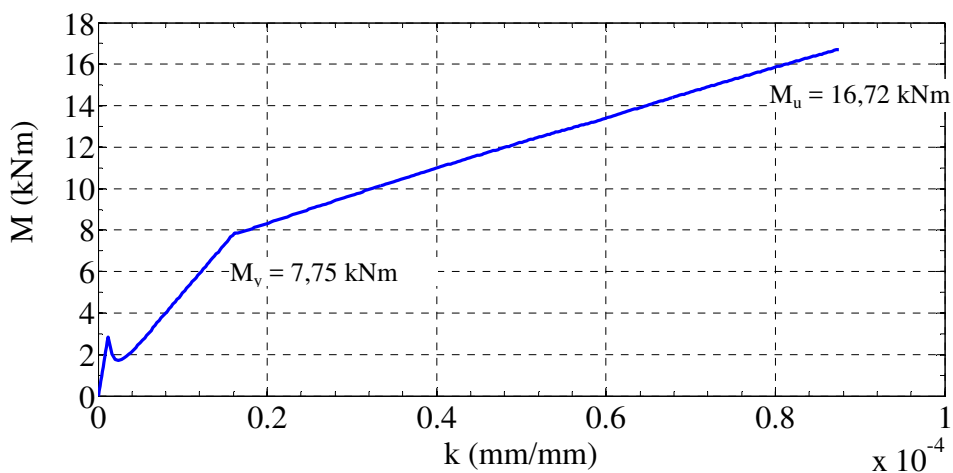
Слика 5-12: Дијаграм зависности између момента и кривине за неојачан пресек



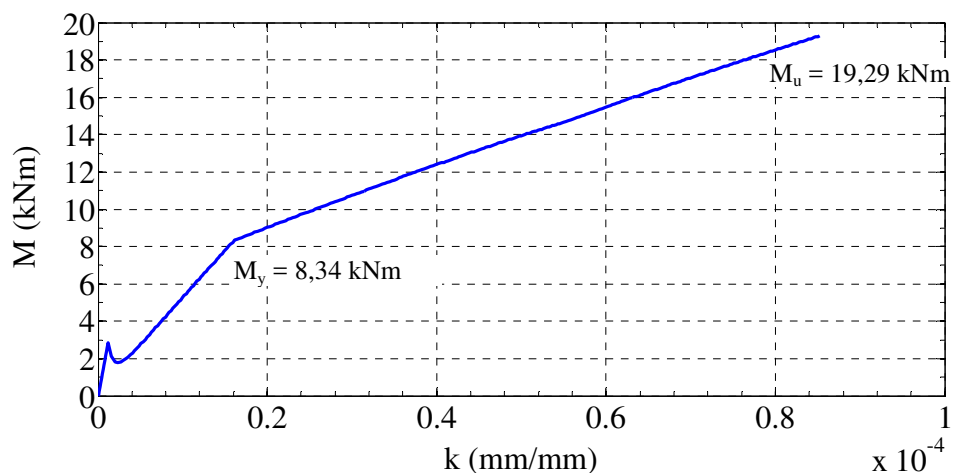
Слика 5-13: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{frp} = 10$ mm²



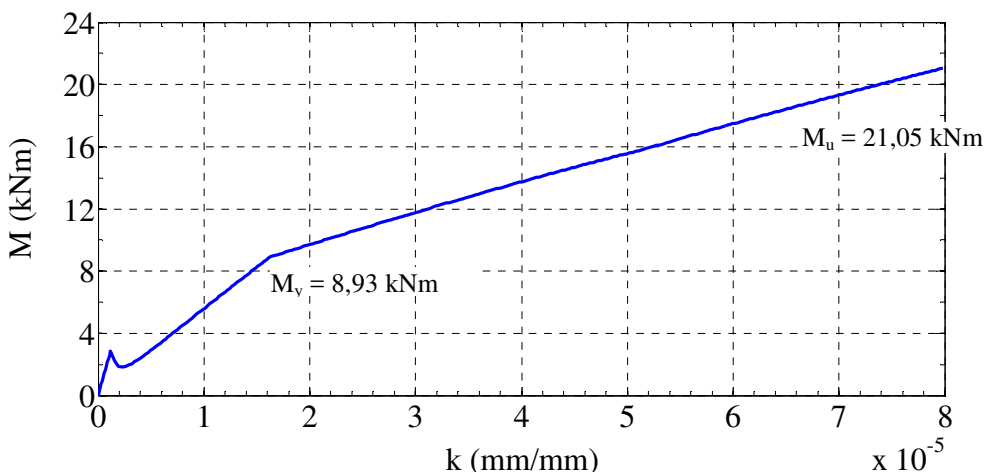
Слика 5-14: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{frp} = 20$ mm²



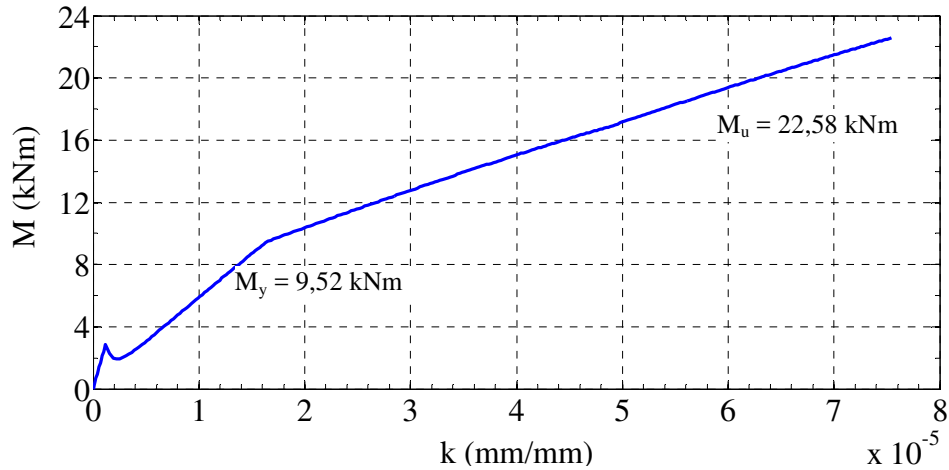
Слика 5-15: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{fpr}=30 \text{ mm}^2$



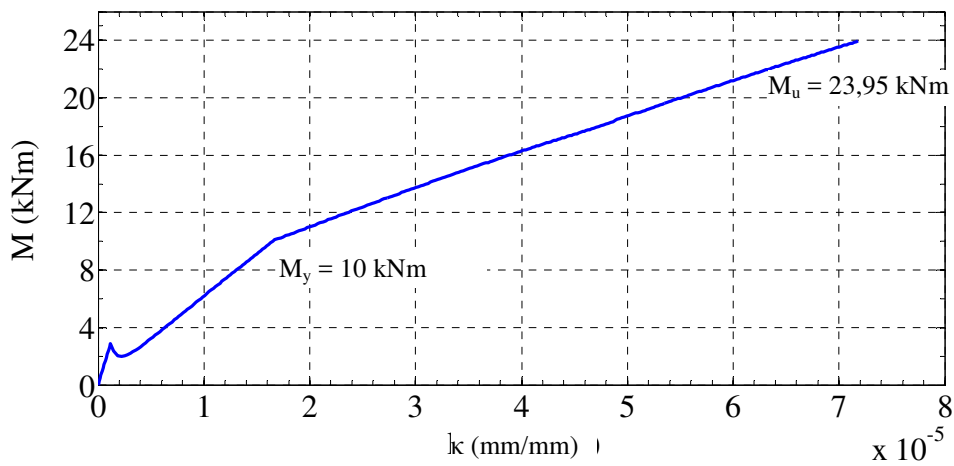
Слика 5-16: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{fpr}=40 \text{ mm}^2$



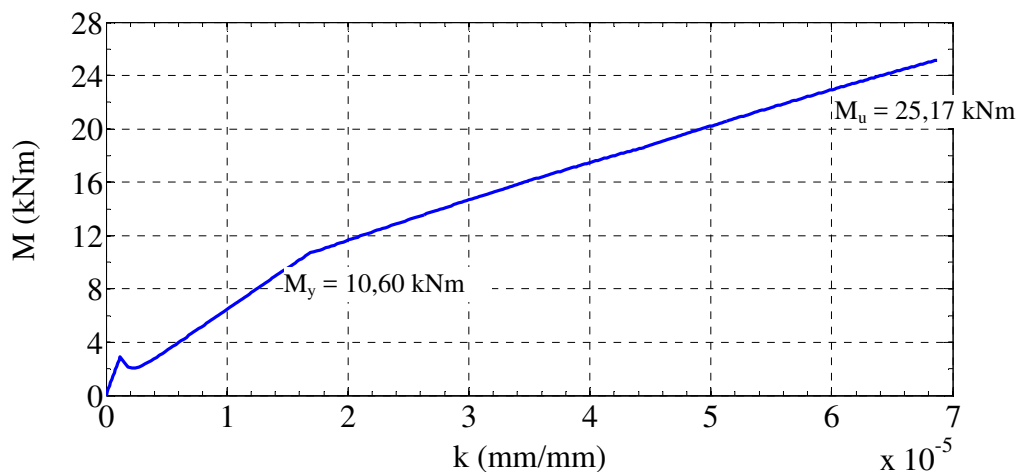
Слика 5-17: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{fpr}=50 \text{ mm}^2$



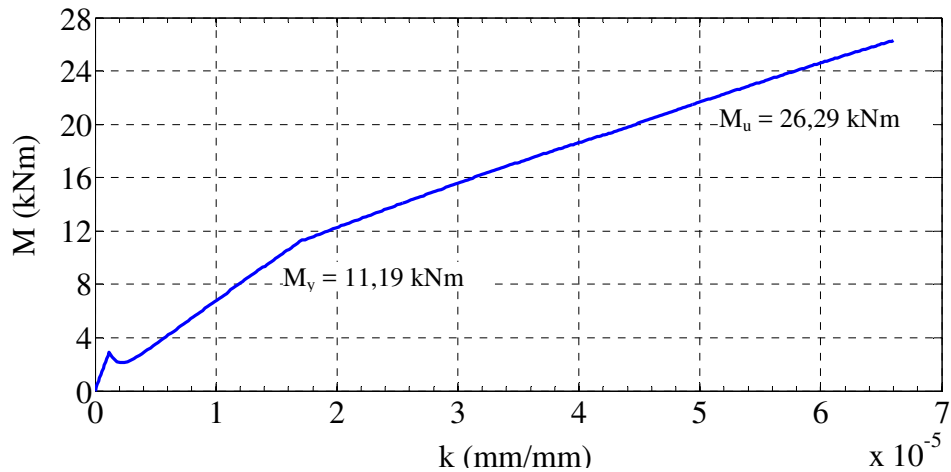
Слика 5-18: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{frp}=60 \text{ mm}^2$



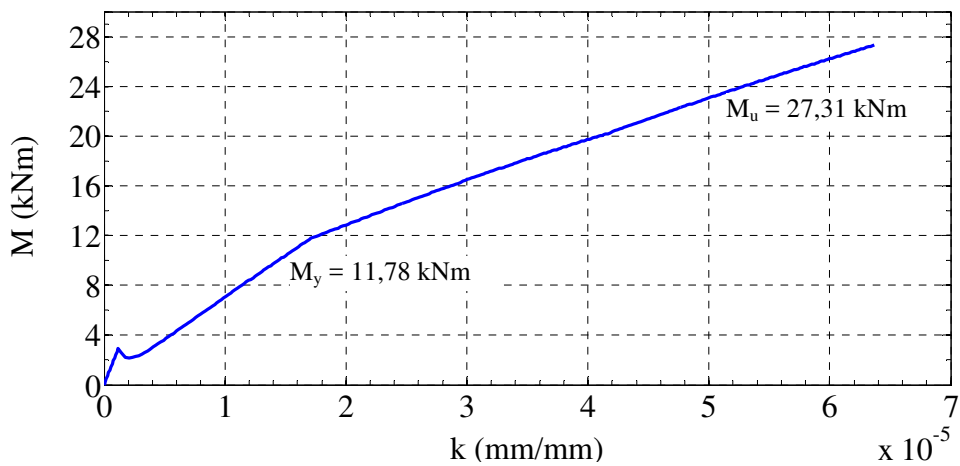
Слика 5-19: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{frp}=70 \text{ mm}^2$



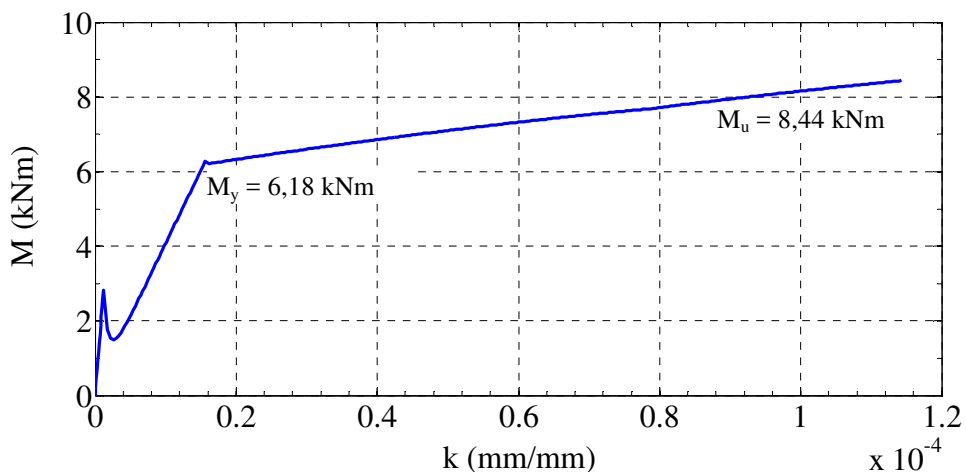
Слика 5-20: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{frp}=80 \text{ mm}^2$



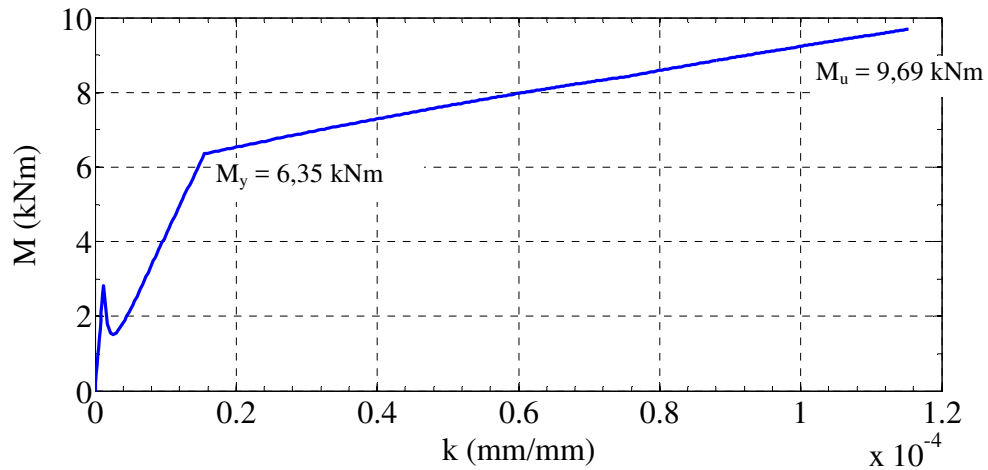
Слика 5-21: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{frp} = 90 \text{ mm}^2$



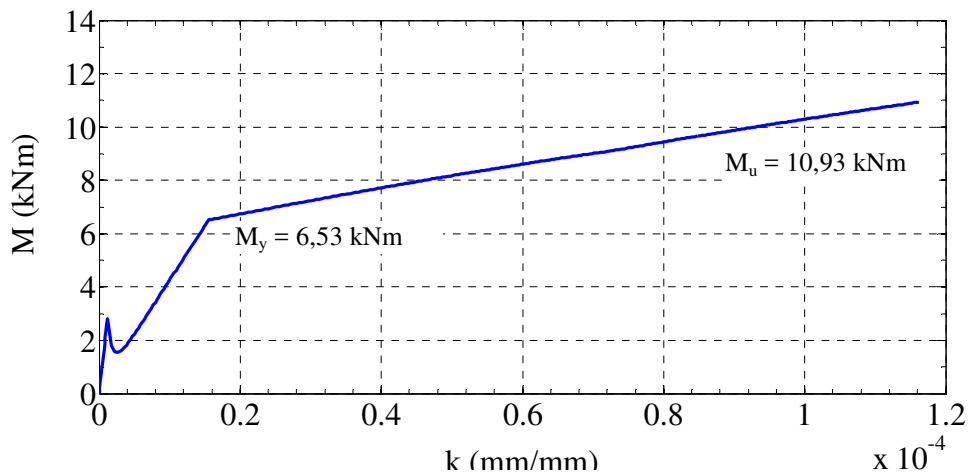
Слика 5-22: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ЦФРП арматуром, $A_{frp} = 100 \text{ mm}^2$



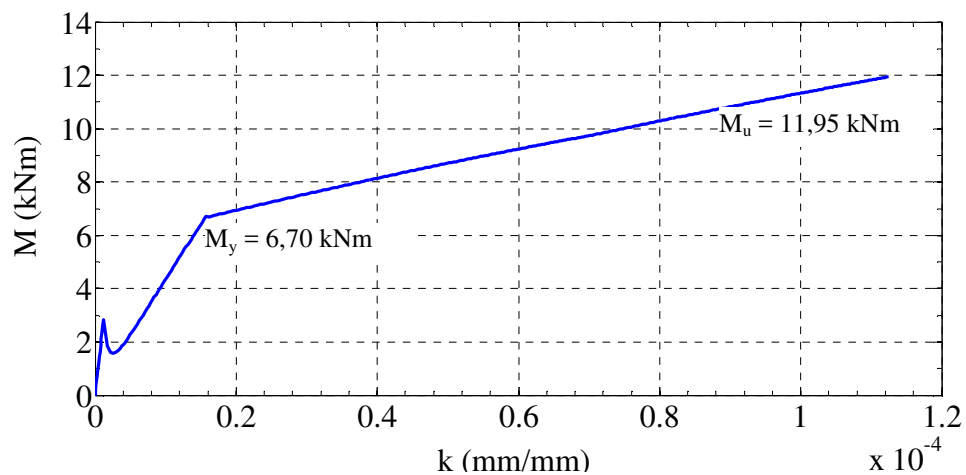
Слика 5-23: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{frp} = 10 \text{ mm}^2$



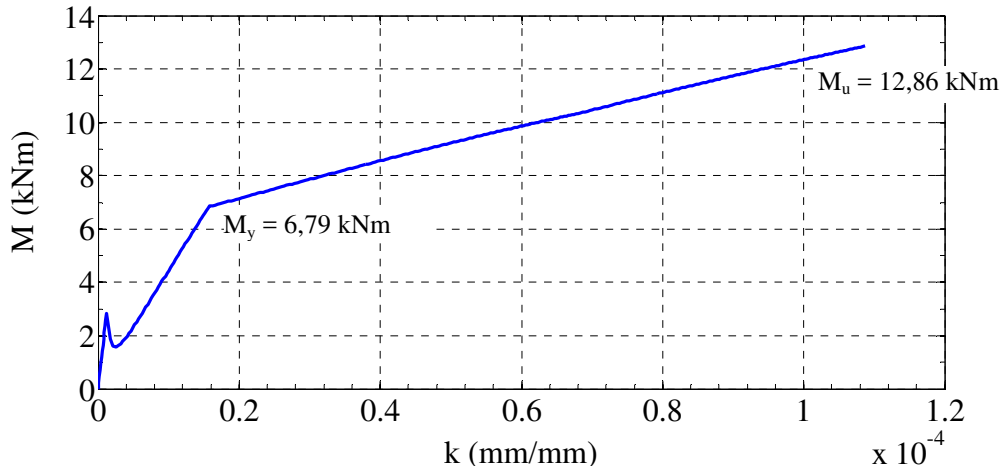
Слика 5-24: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{fp}=20 \text{ mm}^2$



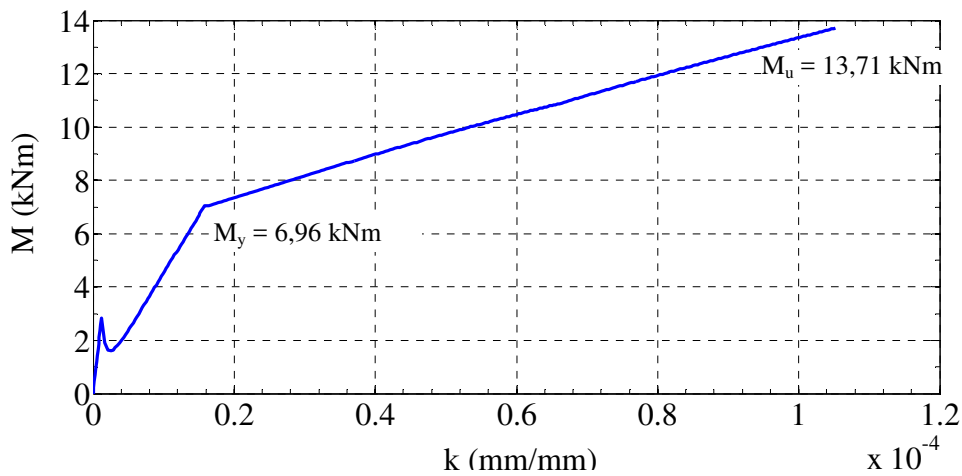
Слика 5-25: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{fp}=30 \text{ mm}^2$



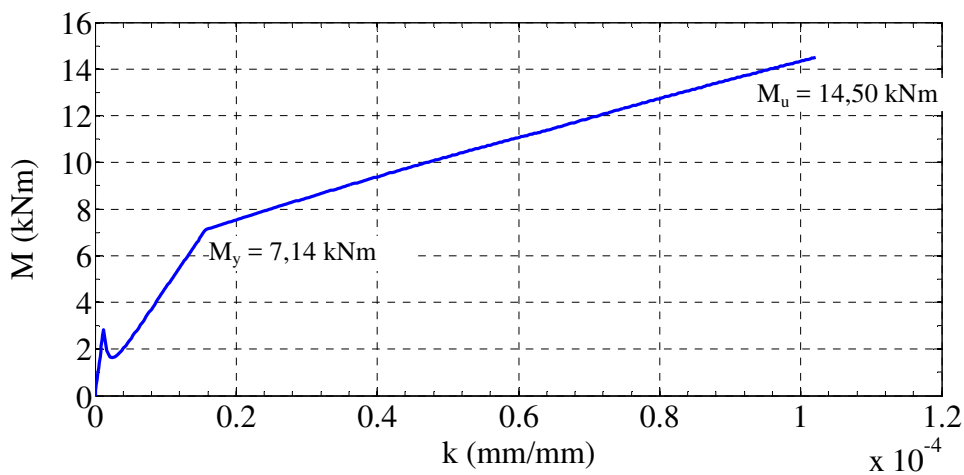
Слика 5-26: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{fp}=40 \text{ mm}^2$



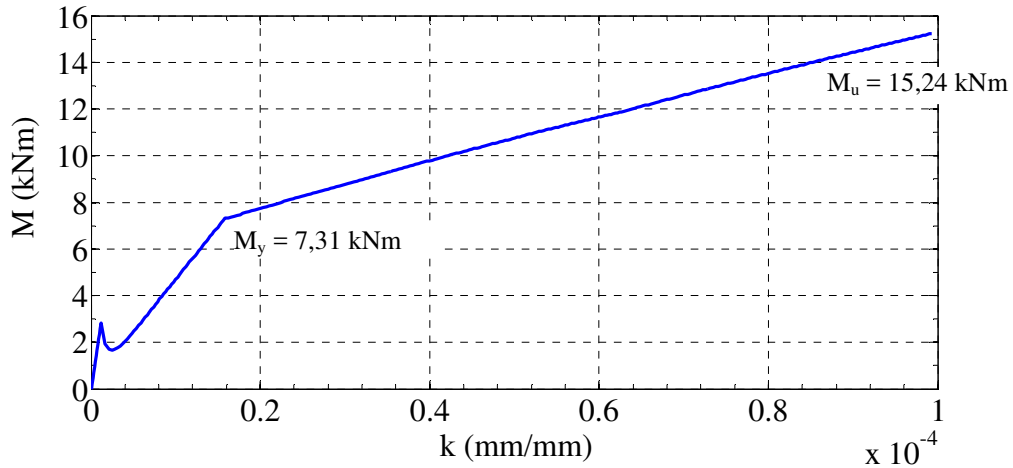
Слика 5-27: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{fp} = 50 \text{ mm}^2$



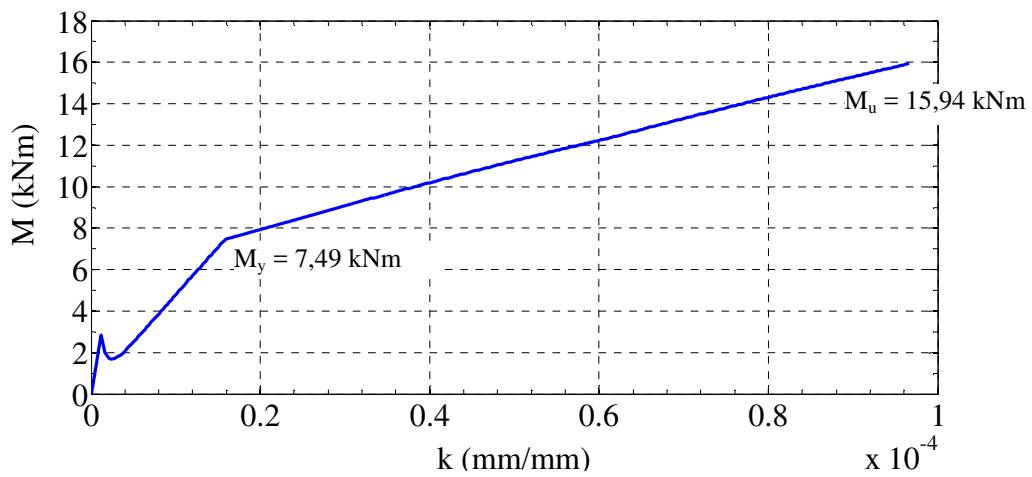
Слика 5-28: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{fp} = 60 \text{ mm}^2$



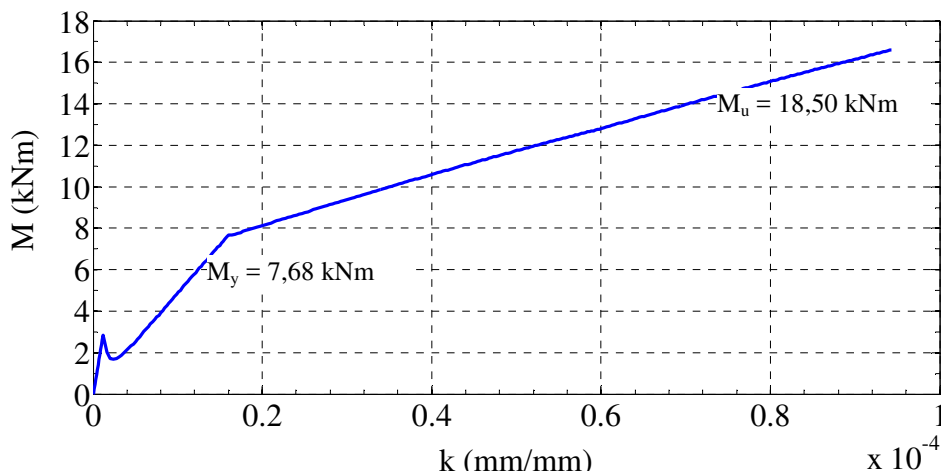
Слика 5-29: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{fp} = 70 \text{ mm}^2$



Слика 5-30: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{fr}=80 \text{ mm}^2$



Слика 5-31: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{fr}=90 \text{ mm}^2$



Слика 5-32: Дијаграм зависности између момента и кривине за пресек ојачан ГФРП арматуром, $A_{fr}=100 \text{ mm}^2$

На основу добијених дијаграма зависности између момента и кривине (Слика 5-12, 5-13 и 5-14), и добијених вредности момента појаве прслина (M_{cr}), момента течења (M_y) и кривине пресека у тренутку почетка течења челичне арматуре (κ_y), граничног момента савијања (M_u) и кривине пресека у тренутку лома (κ_u), као и њихових односа изведени су следећи закључци:

1. Спољашња ФРП арматура нема значајан утицај на вредност момента појаве прслина, као ни на крутост пресека на савијање пре појаве прслина:
 - ✓ код греде ојачане ЦФРП арматуром, повећање момента појаве прслина (M_{cr}) износи максимално 4,41 %, у случају када је проценат армирања спољашњом ФРП арматуром једнак проценту армирања унутрашњом челичном арматуром,
 - ✓ код греде ојачане ГФРП арматуром повећање момента појаве прслина (M_{cr}) износи максимално 0,24 %, у случају када је проценат армирања спољашњом ФРП арматуром једнак проценту армирања унутрашњом челичном арматуром.
2. Спољашња ФРП арматура утиче на вредност момента течења, као и на крутост пресека на савијање:
 - ✓ код греде ојачане ЦФРП арматуром повећање момента течења (M_y) износи максимално 96,33 %, док је максимално повећање крутости на савијање у тренутку почетка течења челичне арматуре 77,56 %,
 - ✓ код греде ојачане ГФРП арматуром повећање момента течења (M_y) износи максимално 26,17 %, док је максимално повећање крутости на савијање у тренутку почетка течења челичне арматуре 22,30 %.
3. Спољашња ФРП арматура значајно утиче на гранични момент савијања, као и на крутост пресека на савијање:
 - ✓ код греде ојачане ЦФРП арматуром повећање граничног момента савијања (M_u) износи максимално 302,8 %, док је максимално повећање крутости на савијање у тренутку граничног стања носивости 298,07 %,
 - ✓ код греде ојачане ГФРП арматуром повећање граничног момента савијања (M_u) износи максимално 144,84 %, док је максимално повећање крутости на савијање у тренутку граничног стања носивости 64,70 %.

5.6 Анализа граничног стања носивости пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром

5.6.1 Опште

Анализа граничног стања носивости пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром у овом раду је извршена према упутству америчког института за бетон (АСИ 440.2R-02).

Кључ одређивања граничне вредности момента савијања (M_u) пресека АБ греде ојачане ФРП системом лежи у познавању потенцијалних облика лома. Најчешћи облици лома који се јављају код ојачаних бетонских греда су: лом ФРП система за ојачање, одвајање ФРП система за ојачање (услед различитих облика одвајања) и лом мрвљењем бетона (Arduini and Nanni, 1997; Spadea et al., 1998). Сви ови облици лома могу се јавити пре или после почетка течења затегнуте челичне арматуре. Најпожељнији облик лома је лом бетона мрвљењем после почетка течења челичне арматуре без одвајања ФРП система за ојачање. Међутим, овај облик лома се веома ретко јавља тако да се облици лома услед одвајања ФРП система (ређе кидање ФРП арматуре) при великим деформацијама, после почетка течења затегнуте челичне арматуре али пре мрвљења бетона чешће јављају у односу на остале. Аналитичке методе за предвиђање различитих облика лома одвајањем нису још увек у потпуности развијене тако да нема експлицитног поступка за њихово одређивање. Уместо тога, према упутству америчког института за бетон, редукује се гранична дилатација ФРП арматуре при затезању, чиме се спречава појава одвајања ФРП система. Ефективна гранична дилатација ФРП арматуре при затезању ($\epsilon_{frp,ef}$) добија се редукцијом граничне дилатације при затезању ($\epsilon_{frp,u}$) емпиријски добијеним коефицијентом (κ_m), који зависи од крутости и дебљине ФРП арматуре и може се одредити према следећем изразу:

$$\kappa_m = \begin{cases} \frac{1}{60 \epsilon_{frp,u}} \left(1 - \frac{n E_{frp} t_{frp}}{2000000}\right) \leq 0,90 & n E_{frp} t_{frp} \leq 1000000 \text{ lb/in} \\ \frac{1}{60 \epsilon_{frp,u}} \left(\frac{500000}{n E_{frp} t_{frp}}\right) \leq 0,90 & n E_{frp} t_{frp} > 1000000 \text{ lb/in} \end{cases}, \quad (5-36)$$

где је:

n – број слојева ФРП трака или ламела,

E_{frp} – модул еластичности ФРП арматуре у правцу влакана код трака или модул еластичности влакана код платна,

t_{frp} – дебљина траке или дебљина влакана код платна.

Како коефицијент редукције (κ_m) мора да буде мањи од 0,90, дилатација у ФРП арматури никада не достиже вредност граничне дилатације ($\epsilon_{fr,u}$), због чега се облик лома кидањем ФРП арматуре не може никада јавити. Из тог разлога, једина два облика лома која треба разматрати при пројектовању су: лом мрвљењем бетона (облик лома 1) и лом ФРП система ојачања (облик лома 2). При одређивању граничне вредности момента савијања (M_u), како у случају облика лома мрвљењем бетона тако и у случају лома ФРП система ојачања, потребно је одредити напон у ФРП арматури, челичној арматури и бетону.

Лом мрвљењем бетона се може јавити или после (облик лома 1а) или пре (облик лома 1б) почетка течења затегнуте челичне арматуре при чему није дошло до одвајања ФРП система за ојачање. Овај облик лома се јавља код АБ греда са већим процентима армирања.

Лом ФРП система за ојачање се може јавити или после (облик лома 2а) или пре (облик лома 2б) почетка течења затегнуте челичне арматуре, при чему је напон у бетону мањи од чврстоће бетона при притиску ($\sigma_{cc} < f_c'$), односно дилатација на притиснутој ивици бетона је мања од дилатације мрвљења бетона ($\epsilon_{cc} < \epsilon_{cu}$; $\epsilon_{cu} = 0,003$). Под ломом ФРП система подразумева се било који облик одвајања ФРП система за ојачање или кидање ФРП арматуре у случају када је додатно сидрење коришћено како би се спречио лом услед одвајања. Овај облик лома се јавља код АБ греда са мањим процентима армирања.

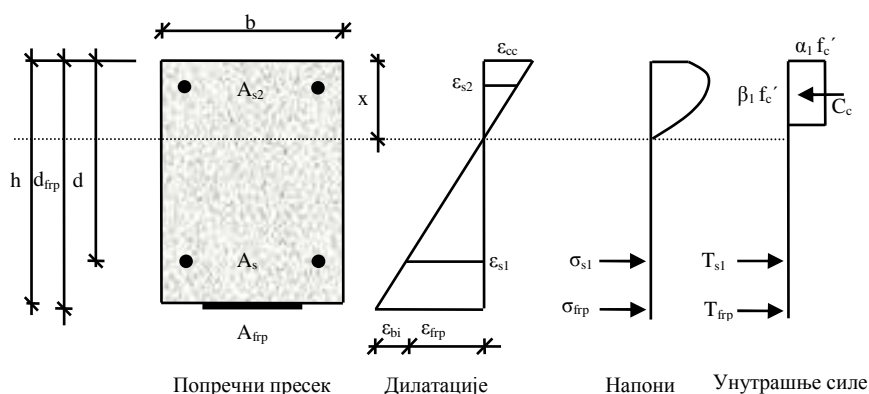
5.6.2 Одређивање облика лома и граничне вредности момента савијања

Решавањем једначина равнотеже унутрашњих сила добија се одстојање неутралне осе од притиснуте ивице бетона (x) и гранична вредност момента савијања ојачаног пресека (M_u). Одстојање неутралне осе на основу кога се одређују напони и дилатације у свим материјалима добија се или методом пробе или решавањем квадратних једначина које су приказане у оквиру овог поглавља. При томе, одстојање неутралне осе мора да буде компатибилно са претпостављеним обликом лома.

Као што је речено раније, постоје два главна облика лома, од којих је сваки са по две варијације:

- ✓ **Облик лома 1а:** Мрвљење бетона после почетка течења затегнуте челичне арматуре;
- ✓ **Облик лома 1б:** Мрвљење бетона пре почетка течења затегнуте челичне арматуре;
- ✓ **Облик лома 2а:** Лом ФРП система после почетка течења затегнуте челичне арматуре;
- ✓ **Облик лома 2б:** Лом ФРП система пре почетка течења затегнуте челичне арматуре.

С обзиром да ФРП арматура има мањи модул еластичности и веће дилатације при лому у односу на челичну арматуру, најчешћа претпоставка је да до лома долази услед мрвљења бетона или лома ФРП система после почетка течења затегнуте челичне арматуре (**облици лома 1а и 2а**). У циљу ефикасног искоришћења великог капацитета дилатација ФРП арматуре, дилатација у челику (ϵ_s) у случају лома ФРП система ојачања мора бити много већа него дилатација течења челика (ϵ_y). Међутим, код ФРП арматуре са великим модулом еластичности, код које су мање дилатације при лому, значајно ојачање се постиже и пре почетка течења затегнуте челичне арматуре (**облици лома 1б и 2б**). Поред тога, у случају специфичне геометрије и конфигурације ФРП система ојачања, није могућа појава течења затегнуте челичне арматуре пре лома (због одвајања ФРП система, великог процента армирања челичном арматуром или веома мале чврстоће бетона при притиску). Такође, у случајевима када постоји значајно покретно оптерећење, тежња је да се смањи дилатација у челичној арматури, тако да лом после почетка течења затегнуте челичне арматуре није пожељан облик лома.



Слика 5-33: Расподела дилатација, напона и унутрашњих сила у пресеку АБ греде ојачане ФРП арматуром

Код **облика лома 1а** течење затегнуте челичне арматуре је праћено мрвљењем бетона, при чему је дилатација у ФРП арматури мања од граничне дилатације ФРП арматуре при затезању ($\epsilon_{frp} < \epsilon_{frp,u}$). Због тога се у анализи напон у затегнутој челичној арматури изједначава са напоном течења челика ($\sigma_{s1} = f_y$) и могу се применити коефицијенти β_1 и α_1 као коефицијенти правоугаоног дијаграма напона притиска у бетону (Слика 5-15).

Одстојање неутралне осе од притиснуте ивице бетона (x) се може одредити из квадратне једначине:

$$(0,85 f'_c \beta_1 b) x^2 - A_{s1} f_y x - A_{frp} E_{frp} [\epsilon_{cu} (h - x) - \epsilon_{bi} x] = 0, \quad (5-37)$$

где је:

ϵ_{bi} – почетна дилатација на затегнутој ивици бетона у тренутку ојачања.

Користећи добијену вредност за одстојање неутралне осе, треба срачунати дилатације у арматурном челику и ФРП арматури, при чему дилатација у затегнутој челичној арматури треба да буде већа од дилатације течења челика, а дилатација у ФРП арматури мања од ефективне граничне дилатације ФРП арматуре при затезању:

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \frac{d - x}{x} \geq \epsilon_y, \quad (5-38)$$

$$\epsilon_{frp} = \epsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{frp,ef}. \quad (5-39)$$

Уколико су услови (5-38) и (5-39) задовољени, напон у затегнутој челичној арматури је једнак напону течења челика ($\sigma_{s1} = f_y$), док се напон у ФРП арматури одређује према изразу:

$$\sigma_{frp} = E_{frp} \epsilon_{frp}. \quad (5-40)$$

Номинални гранични момент савијања (M_n) добија се према изразу:

$$M_n = A_{s1} f_y \left(d - \frac{\beta_1 x}{2}\right) + \psi_{frp} A_{frp} \sigma_{frp} \left(h - \frac{\beta_1 x}{2}\right), \quad (5-41)$$

где је:

ψ_{frp} – парцијални коефицијент сигурности за ФРП арматуру.

Код **облика лома 1б** до мрвљења бетона долази пре почетка течења затегнуте челичне арматуре, при чему је дилатација у ФРП арматури мања од граничне дилатације ФРП арматуре при затезању ($\epsilon_{frp} < \epsilon_{frp,u}$), због чега се могу применити коефицијенти β_1 и α_1 као коефицијенти правоугаоног дијаграма напона притиска у бетону.

Одстојање неутралне осе од притиснуте ивице бетона (x) се може одредити из квадратне једначине:

$$(0,85 f_c' \beta_1 b) x^2 - A_{s1} E_s \epsilon_{cu} (d - x) - A_{fрп} E_{fрп} [\epsilon_{cu} (h - x) - \epsilon_{bi} x] = 0. \quad (5-42)$$

Користећи добијену вредност за одстојање неутралне осе, треба срачунати дилатације у арматурном челику и ФРП арматури, при чему дилатација у затегнутој челичној арматури треба да буде мања од дилатације течења челика, а дилатација у ФРП арматури мања од ефективне граничне дилатације ФРП арматуре при затезању:

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \frac{d - x}{x} \leq \epsilon_y, \quad (5-43)$$

$$\epsilon_{fрп} = \epsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fрп,ef}. \quad (5-44)$$

Уколико су услови (5-43) и (5-44) задовољени, напон у затегнутој челичној арматури се одређује према изразу:

$$\sigma_{s1} = E_s \epsilon_{s1}, \quad (5-45)$$

док се напон у ФРП арматури одређује према изразу:

$$\sigma_{fрп} = E_{fрп} \epsilon_{fрп}. \quad (5-46)$$

Номинални гранични момент савијања (M_n) добија се према изразу:

$$M_n = A_{s1} \sigma_s \left(d - \frac{\beta_1 x}{2}\right) + \psi_{fрп} A_{fрп} \sigma_{fрп} \left(h - \frac{\beta_1 x}{2}\right). \quad (5-47)$$

Код **облика лома 2а** течење затегнуте челичне арматуре је праћено ломом ФРП система, при чему је дилатација на притиснутој ивици бетона мања од дилатације мрвљења бетона ($\epsilon_{cc} < \epsilon_{cu}$; $\epsilon_{cu} = 0,003$). Због тога се, у анализи, напон у затегнутој челичној арматури изједначава са напоном течења челика ($\sigma_{s1} = f_y$), док се за напон у ФРП арматури усваја ефективна чврстоћа ФРП арматуре при затезању ($\sigma_{fрп} = f_{fрп,ef}$). Како је дилатација на притиснутој ивици бетона мања од дилатације мрвљења бетона, не би требало користити вредности коефицијената β_1 и α_1 као коефицијенте правоугаоног дијаграма напона притиска у бетону, већ би те параметре требало одредити нелинеарном анализом. Међутим, како је дилатација на притиснутој ивици бетона и при овом облику лома блиска дилатацији мрвљења бетона, према упутству америчког института за бетон дозвољена је употреба коефицијената β_1 и α_1 уместо њиховог одређивања нелинеарном итеративном анализом. Ипак, дилатацију на затегнутој ивици бетона при лому би требало одредити и упоредити са дилатацијом мрвљења бетона.

Уколико се њихове вредности значајно разликују, коефицијенте правоугаоног дијаграма напона притиска у бетону треба одредити нелинеарном анализом.

Одстојање неутралне осе од притиснуте ивице бетона (x) се може одредити према изразу:

$$x = \frac{A_{s1} f_y + A_{frp} \kappa_m f_{frp,u}}{0,85 f_c' \beta_1 b} \quad (5-48)$$

Користећи добијену вредност за одстојање неутралне осе, треба срачунати дилатације у арматурном челику и бетону, при чему дилатација у затегнутој челичној арматури треба да буде већа од дилатације течења челика, а дилатација у бетону треба да буде мања од дилатације мрвљења бетона:

$$\epsilon_c = (\epsilon_{frp,ef} + \epsilon_{bi}) \frac{x}{h - x} \leq \epsilon_{cu} \quad (5-49)$$

$$\epsilon_{s1} = (\epsilon_{frp,ef} + \epsilon_{bi}) \frac{d - x}{h - x} \geq \epsilon_y \quad (5-50)$$

Уколико су услови (5-49) и (5-50) задовољени, напон у затегнутој челичној арматури је једнак напону течења челика ($\sigma_{s1} = f_y$), док је напон у ФРП арматури једнак ефективној чврстоћи ФРП арматуре при затезању:

$$\sigma_{frp} = f_{frp,ef} = E_{frp} \epsilon_{frp,ef} \quad (5-51)$$

Номинални гранични момент савијања (M_n) добија се према изразу:

$$M_n = A_{s1} f_y \left(d - \frac{\beta_1 x}{2} \right) + \psi_{frp} A_{frp} f_{frp,ef} \left(h - \frac{\beta_1 x}{2} \right) \quad (5-52)$$

Код **облика лома 2б** долази до лома ФРП система пре почетка течења затегнуте челичне арматуре, при чему је дилатација на притиснутој ивици бетона мања од дилатације мрвљења бетона. Због тога се усваја да је напон у ФРП арматури једнак ефективној чврстоћи ФРП арматуре при затезању ($\sigma_{frp} = f_{frp,ef}$). Како су дилатације у бетону мање од граничних, не би требало користити вредности коефицијената β_1 и α_1 као коефицијенте правоугаоног дијаграма напона притиска у бетону, већ би их требало одредити нелинеарном анализом. Међутим, као и у случају облика лома 2а, дозвољена је употреба коефицијената β_1 и α_1 уместо одређивања коефицијената правоугаоног дијаграма нелинеарном итеративном анализом. Ипак, дилатацију на затегнутој ивици бетона при лому би требало одредити и упоредити са дилатацијом мрвљења бетона. Уколико се њихове вредности значајно разликују, параметре правоугаоног дијаграма напона притиска у бетону треба одредити нелинеарном анализом.

Одстојање неутралне осе од притиснуте ивице бетона (x) се може одредити према изразу:

$$(0.85 f'_c \beta_1 b) x (h - x) - A_{s1} E_s (\epsilon_{frp,ef} + \epsilon_{bi}) (d - x) - A_{frp} E_{frp} \epsilon_{frp,ef} (h - x) = 0. \quad (5-53)$$

Користећи добијену вредност одстојања неутралне осе, треба срачунати дилатације у арматурном челику и бетону, при чему дилатација у затегнутој челичној арматури треба да буде мања од дилатације течења челика, а дилатација у бетону треба да буде мања од дилатације мрвљења бетона:

$$\epsilon_c = (\epsilon_{frp,ef} + \epsilon_{bi}) \frac{x}{h - x} \leq \epsilon_{cu}, \quad (5-54)$$

$$\epsilon_{s1} = (\epsilon_{frp,ef} + \epsilon_{bi}) \frac{d - x}{h - x} \leq \epsilon_y. \quad (5-55)$$

Уколико су услови (5-54) и (5-55) задовољени, напон у затегнутој челичној арматури се одређује према изразу:

$$\sigma_{s1} = E_s \epsilon_{s1}, \quad (5-56)$$

док се за напон у ФРП арматури усваја ефективна чврстоћа ФРП арматуре при затезању:

$$\sigma_{frp} = f_{frp,ef} = E_{frp} \epsilon_{frp,ef}. \quad (5-57)$$

Номинални гранични момент савијања (M_n) добија се према изразу:

$$M_n = A_{s1} \sigma_{s1} \left(d - \frac{\beta_1 x}{2} \right) + \psi_{frp} A_{frp} f_{frp,ef} \left(h - \frac{\beta_1 x}{2} \right). \quad (5-58)$$

У случају пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром **симултани лом** се може дефинисати на сличан начин као симултани лом код пресека АБ греде без ојачања. Симултани лом ојачаног пресека је лом при коме се истовремено јавља мрвљење бетона и лом ФРП система за ојачање. У зависности од дилатације у челичној арматури при којој се јавља лом, разликују се две врсте симултаног лома:

- ✓ еластични симултани лом, при коме није дошло до течења затегнуте челичне арматуре у тренутку лома и
- ✓ нееластични симултани лом, код кога се течење затегнуте челичне арматуре јавља пре лома.

Из разлога наведених раније тежња пројектанта је да се појави нееластични симултани лом који је овде анализиран. Анализа еластичног симултаног лома се може извести на сличан начин.

У случају нееластичног симултаног лома, дилатација у бетону је једнака дилатацији мрвљења бетона ($\epsilon_{cc} = \epsilon_{cu} = 0,003$), дилатација у ФРП арматури је једнака

ефективној граничној дилатацији ($\epsilon_{frp,ef} = \kappa_m \epsilon_{frp,u}$), док је дилатација у затегнутој челичној арматури већа од дилатације течења челика ($\epsilon_{sl} \geq \epsilon_y$). На основу ових дилатација, проценат армирања спољашњом ФРП арматуром при нееластичном симултаном лому ($\mu_{frp,b}$) се може одредити према изразу:

$$\mu_{frp,b} = \frac{A_{frp,b}}{bd}, \quad (5-59)$$

где је:

$A_{frp,b}$ – површина ФРП арматуре у случају симултаног лома,

b – ширина попречног пресека греде,

d – статичка висина пресека.

Како је гранична дилатација ФРП арматуре при затезању функција коефицијента приањања, да би се одредио проценат армирања при симултаном лому неопходно је претпоставити број слојева ФРП арматуре, што није велика препрека у пројектовању, с обзиром да већина система ојачања има од једног до три слоја.

Одстојање неутралне осе при симултаном лому (x_b) је:

$$x_b = \frac{\epsilon_{cu} h}{\epsilon_{cu} + \kappa_m \epsilon_{frp,u} + \epsilon_{bi}}, \quad (5-60)$$

а површина ФРП арматуре ($A_{frp,b}$) и проценат армирања ($\mu_{frp,b}$) при симултаном нееластичном лому су:

$$A_{frp,b} = \frac{0,85 f'_c \beta_1 b h \epsilon_{cu}}{\kappa_m f_{frp} (\epsilon_{cu} + \kappa_m \epsilon_{frp,u} + \epsilon_{bi})} - \frac{A_{sl} f_y}{\kappa_m f_{frp}}, \quad (5-61)$$

$$\mu_{frp,b} = 0,85 \frac{f'_c \beta_1}{\kappa_m f_{frp}} \frac{\epsilon_{cu}}{(\epsilon_{cu} + \kappa_m \epsilon_{frp,u} + \epsilon_{bi})} - \frac{f_y \mu_s}{\kappa_m f_{frp}}. \quad (5-62)$$

При овим вредностима, дилатација у затегнутој челичној арматури мора да буде већа од дилатације течења челика:

$$\epsilon_{sl} = (\epsilon_{frp,ef} + \epsilon_{bi}) \frac{d - x_b}{h - x_b} \geq \epsilon_y. \quad (5-63)$$

5.7 Анализа параметара који утичу на вредност граничног момента савијања и појаву одређених облика лома пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром

У овом делу рада анализиран је утицај различитих параметара на величину граничног момента савијања пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром. Анализиран је попречни пресек димензија 120/200 mm, армиран у притиснутој зони челичном арматуром 2Ø8 ($A_{s2} = 100 \text{ mm}^2$, $\mu_{s2} \approx 0,5\%$), напона течења $f_y=400 \text{ МПа}$ и модула еластичности $E_s=210 \text{ ГПа}$. Ојачање пресека извршено је НСМ методом, уградњом ФРП арматуре у заштитном слоју бетонког пресека ($d_{\text{фрп}} = 190 \text{ mm}$).

Варирани параметри су:

1. Површина ФРП арматуре ($A_{\text{фрп}}$)

У оквиру овог истраживања, површина ФРП арматуре је повећавана од 0 до 100 mm^2 , са инкрементом од 10 mm^2 .

2. Врста ФРП арматуре (ЦФРП и ГФРП)

а) ЦФРП арматура, чврстоће при затезању $f_{\text{фрп,у}} = 2000 \text{ МПа}$, модула еластичности $E_{\text{фрп}} = 150 \text{ ГПа}$ и граничне дилатације $\epsilon_{\text{фрп,у}} = 0,0133$ и

б) ГФРП арматура, чврстоће при затезању $f_{\text{фрп,у}} = 760 \text{ МПа}$, модула еластичности $E_{\text{фрп}} = 40,8 \text{ ГПа}$ и граничне дилатације $\epsilon_{\text{фрп,у}} = 0,0186$.

3. Количина затегнуте челичне арматуре (μ_s)

а) $\mu_s = 0,2 \%$, б) $\mu_s = 0,5 \%$, в) $\mu_s = 0,8 \%$, г) $\mu_s = 1,1 \%$,
д) $\mu_s = 1,4 \%$.

4. Чврстоћа бетона при притиску (f_c')

а) $f_c' = 20 \text{ МПа}$, б) $f_c' = 25 \text{ МПа}$, в) $f_c' = 30 \text{ МПа}$, г) $f_c' = 35 \text{ МПа}$,
д) $f_c' = 40 \text{ МПа}$, њ) $f_c' = 45 \text{ МПа}$, е) $f_c' = 50 \text{ МПа}$.

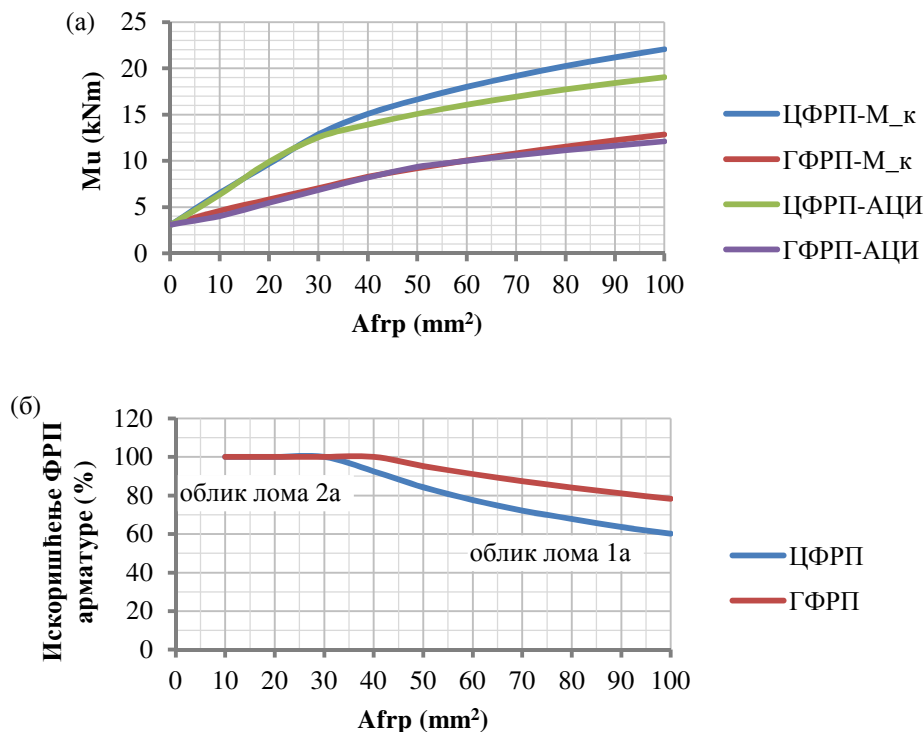
Да би се извршила анализа утицаја ФРП арматуре на величину граничног момента савијања (M_u), коришћен је програм $M_k.m$ написан у Матлабу (*MATLAB R2014a*), који је описан у поглављу 5.5. Употребом програма $M_k.m$ добијене су вредности граничног момента савијања АБ пресека ојачаног ФРП арматуром при чему су карактеристике: бетона (чврстоћа при притиску), затегнуте челичне арматуре (процент армирања) и ФРП арматуре (врста и површина) варирани у претходно дефинисаним границама.

Ради контроле добијених вредности, коришћењем израза датих у поглављу 5.6, одређене су вредности граничног момента савијања према препоруци америчког института за бетона (ACI 440.2R-02).

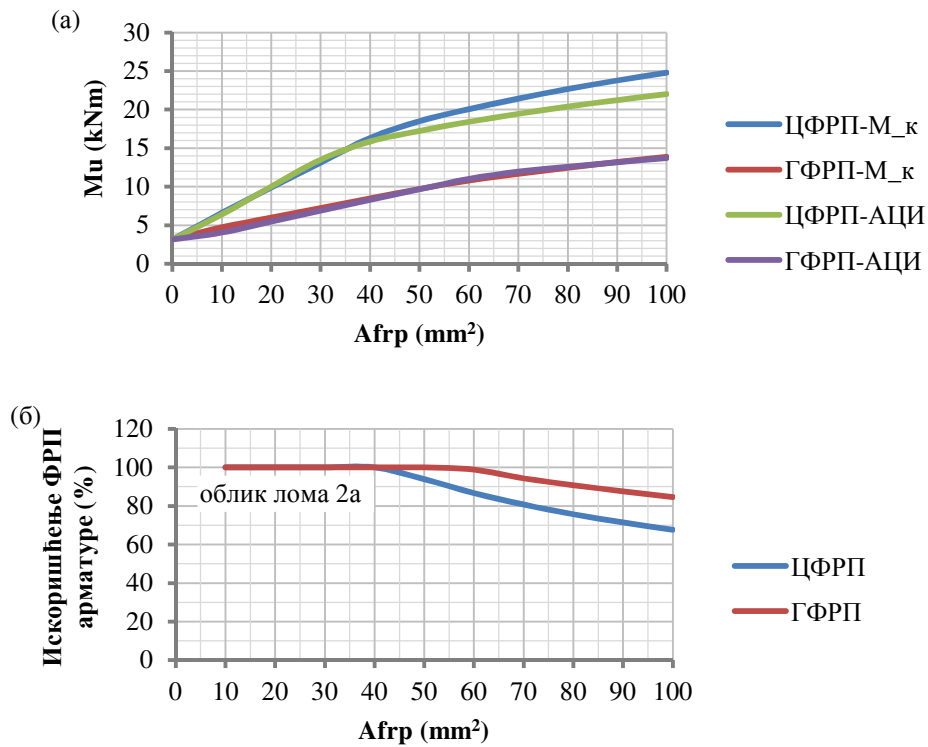
Повећање граничног момента савијања при ојачању пресека ЦФРП и ГФРП арматуром у функцији површине ФРП арматуре приказано је на *Сликама (5-34) до (5-68)*. Вредности добијене програмом $M_k.m$ приказане су кривама зависности ЦФРП- M_k и ГФРП- M_k док су вредности добијене према препоруци америчког института за бетон приказане кривама зависности ЦФРП-АЦИ и ГФРП-АЦИ. Поред тога, дати су и дијаграми на којима је приказано искоришћење ФРП арматуре изражено у процентима према чему су дефинисане области у којима се јављају одређени облици лома пресека у зависности од вредности варираних параметара.

Дијаграм зависности између граничног момента савијања и површине ФРП арматуре у функцији чврстоће при притиску бетона (f_c') дат је на *Слици 5-69* за ЦФРП, односно на *Слици 5-70* за ГФРП арматуру.

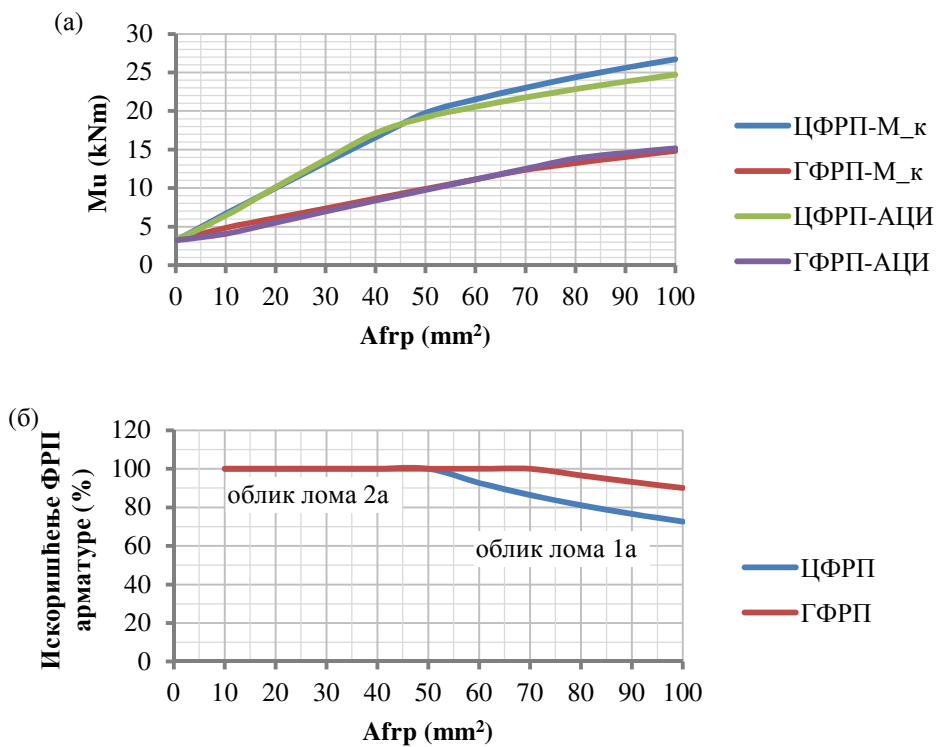
Дијаграми зависности између граничног момента савијања и површине ФРП арматуре у функцији процента армирања челичном арматуром (μ_s) дати су на *Сликама 5-71* и *5-72* за ЦФРП, односно на *Сликама 5-73* и *5-74* за ГФРП арматуру.



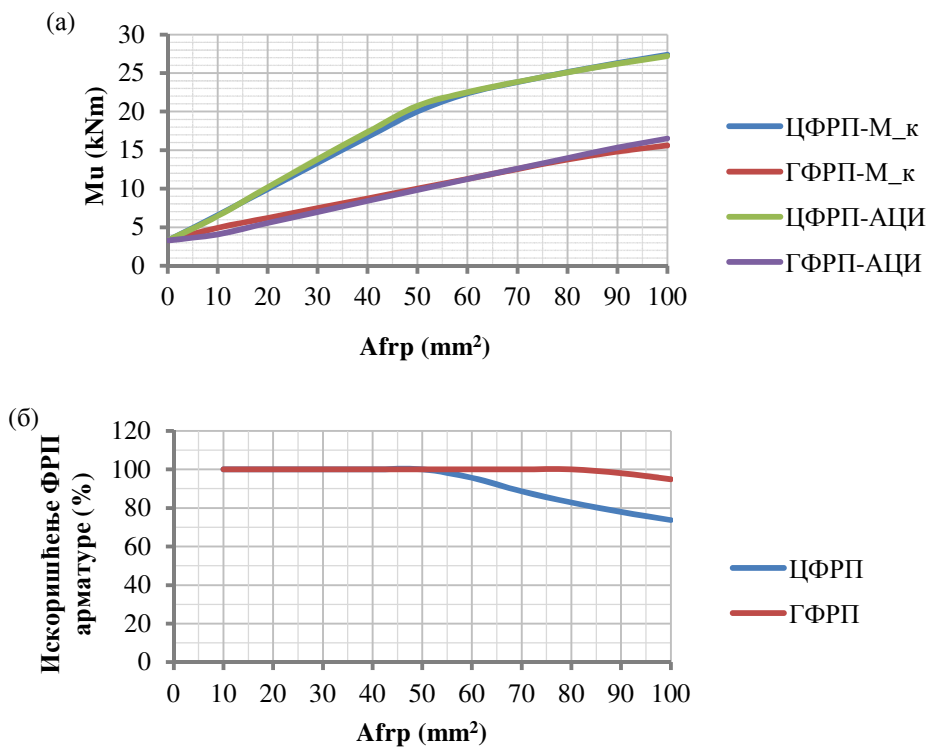
Слика 5-34: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 20$ МПа, $\mu_s = 0,2$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



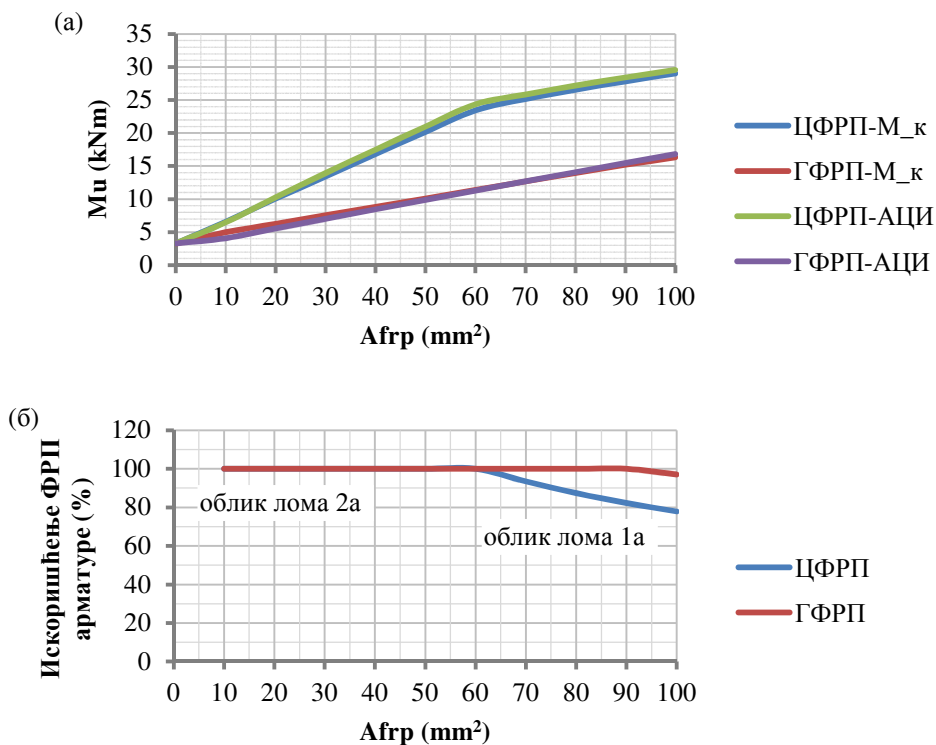
Слика 5-35: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 25$ МПа, $\mu_s = 0,2$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



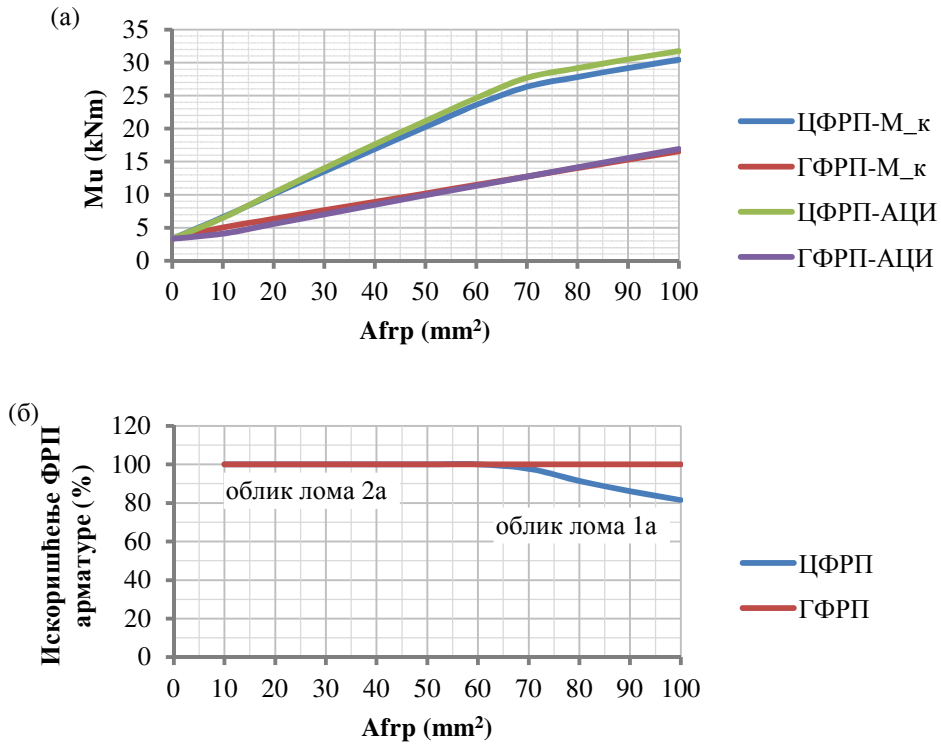
Слика 5-36: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 30$ МПа, $\mu_s = 0,2$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



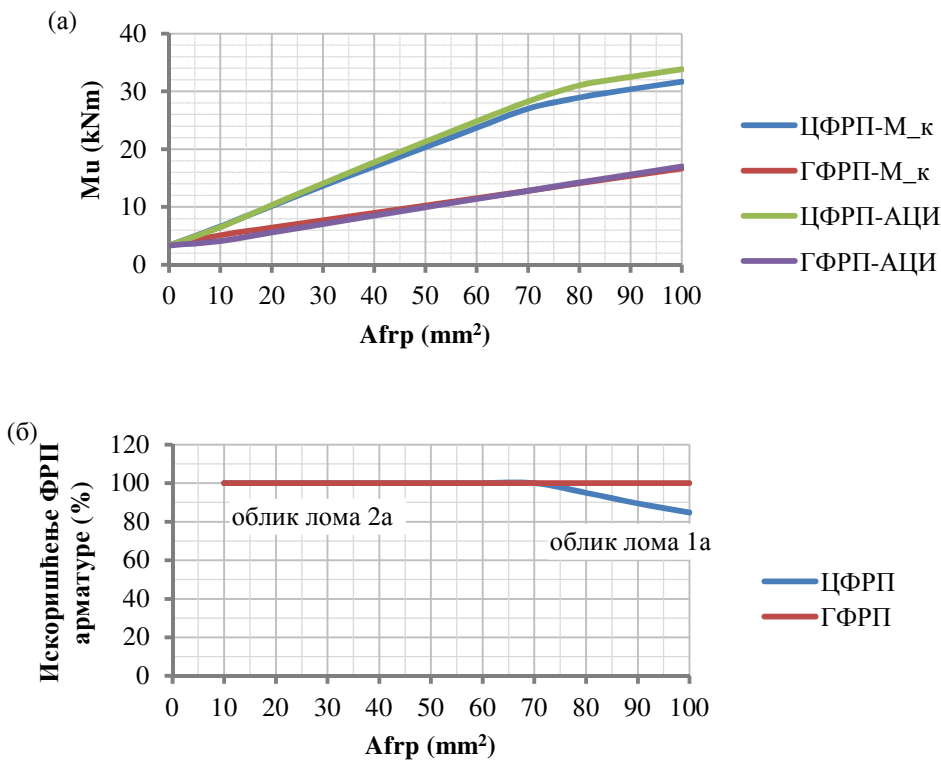
Слика 5-37: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 35 \text{ MPa}$, $\mu_s = 0,2 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



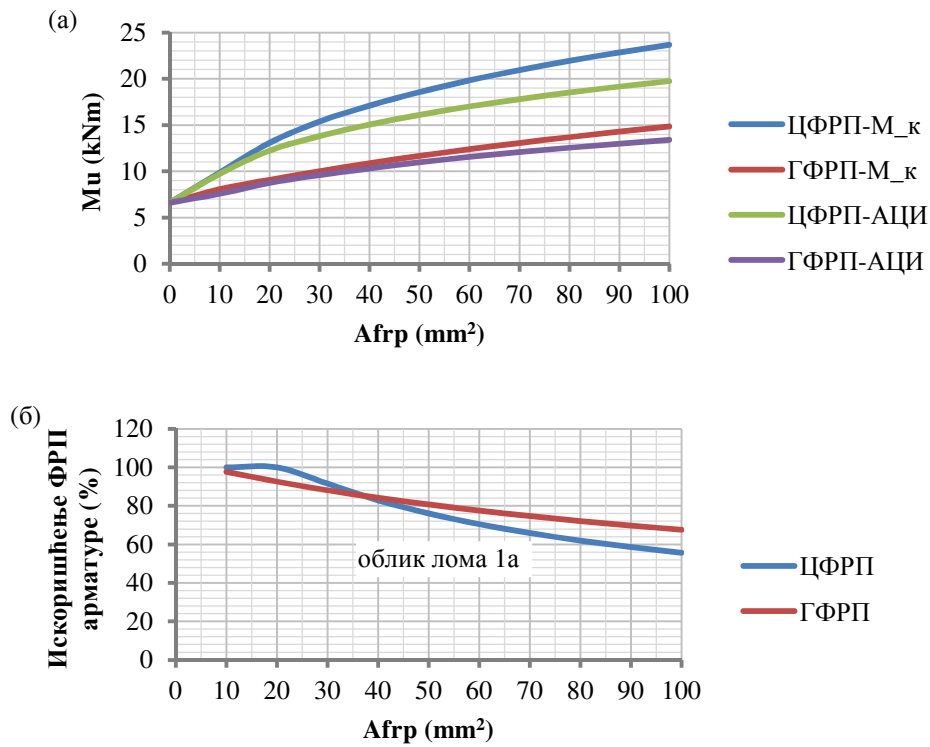
Слика 5-38: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 40 \text{ MPa}$, $\mu_s = 0,2 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



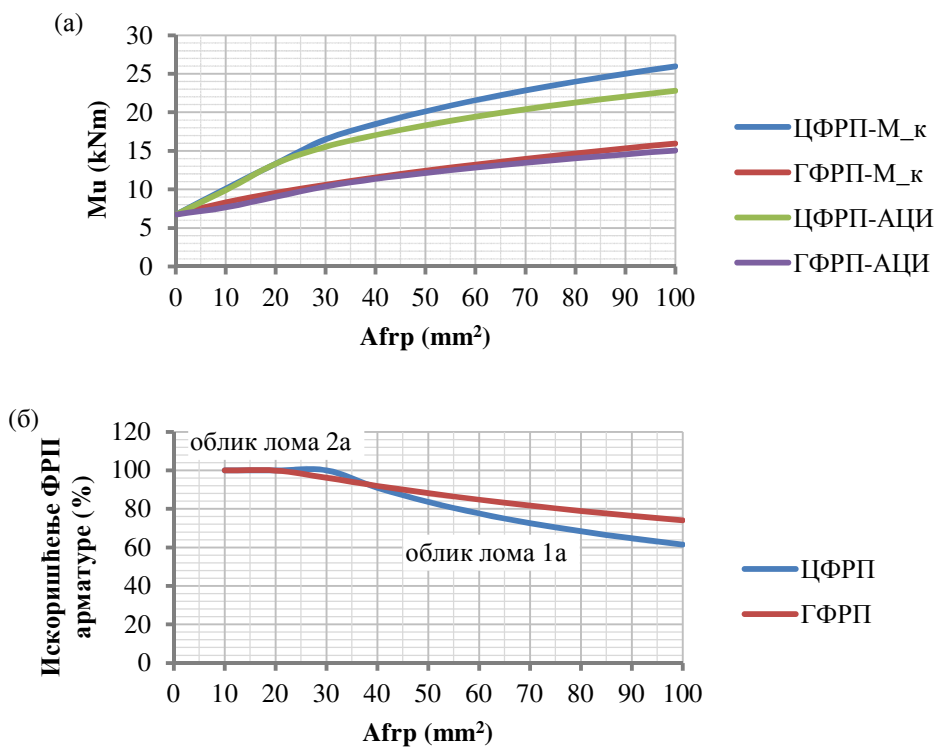
Слика 5-39: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 45$ МПа, $\mu_s = 0,2$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



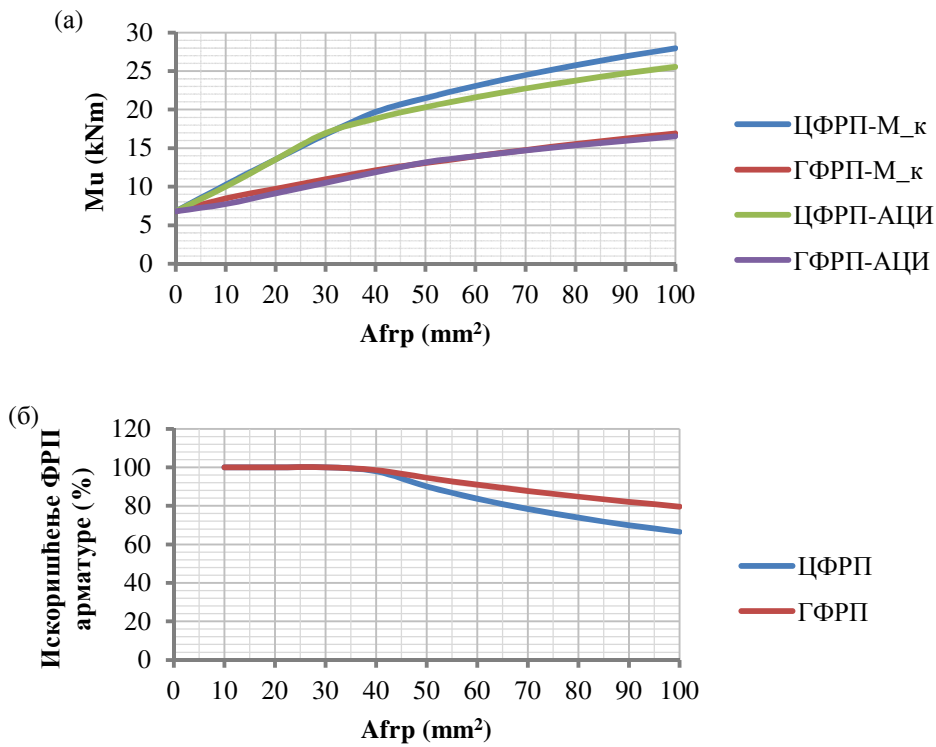
Слика 5-40: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 50$ МПа, $\mu_s = 0,2$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



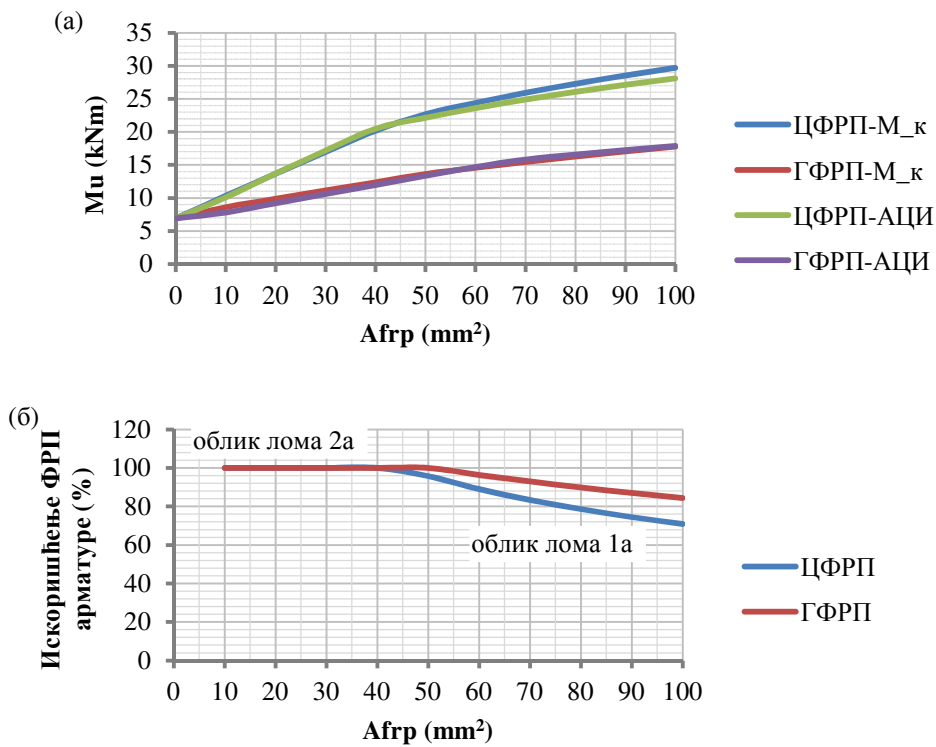
Слика 5-41: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 20 \text{ MPa}$, $\mu_s = 0,5 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



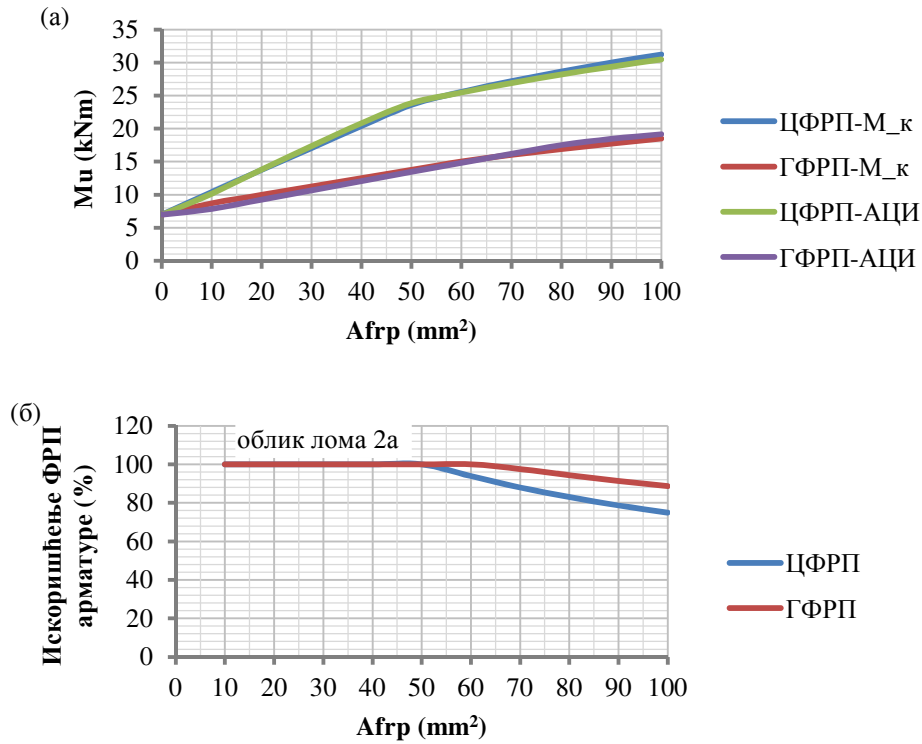
Слика 5-42: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 25 \text{ MPa}$, $\mu_s = 0,5 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



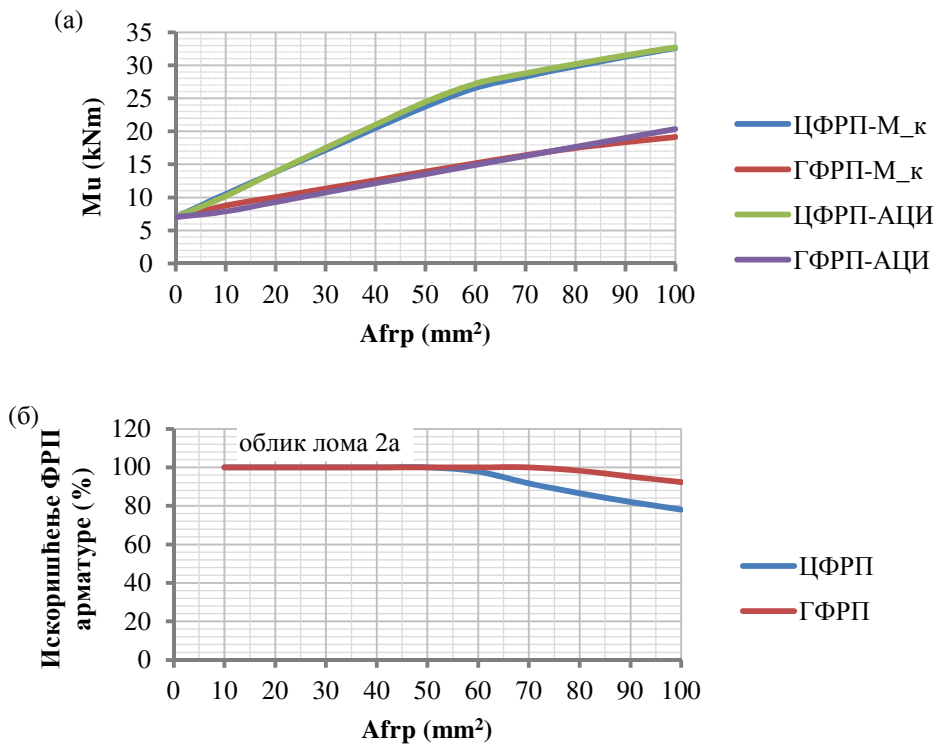
Слика 5-43: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 30$ МПа, $\mu_s = 0,5\%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



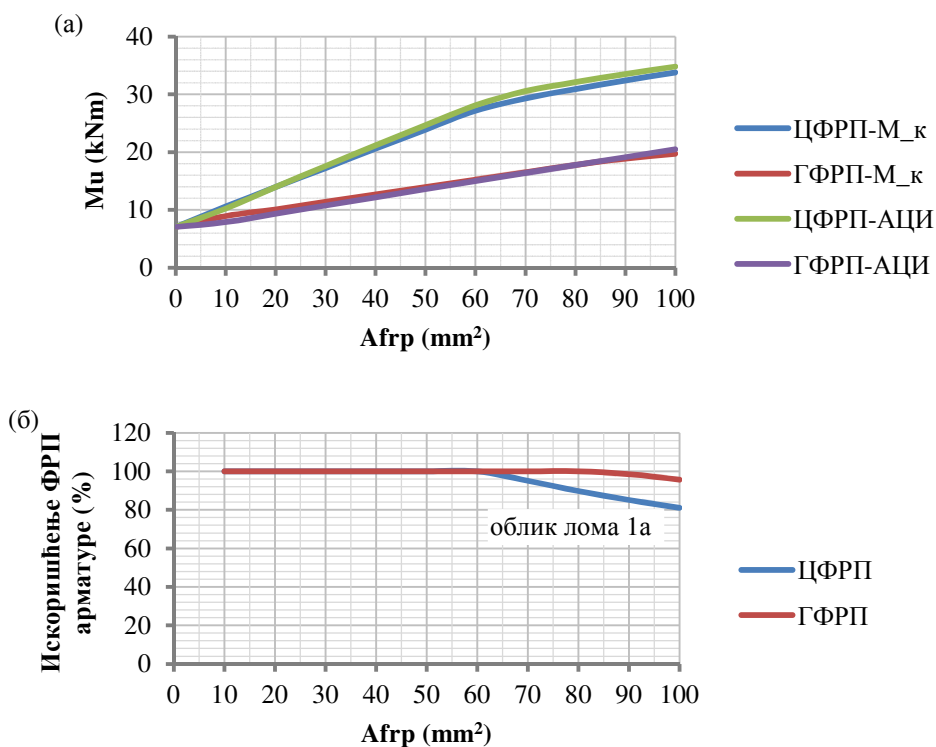
Слика 5-44: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 35$ МПа, $\mu_s = 0,5\%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



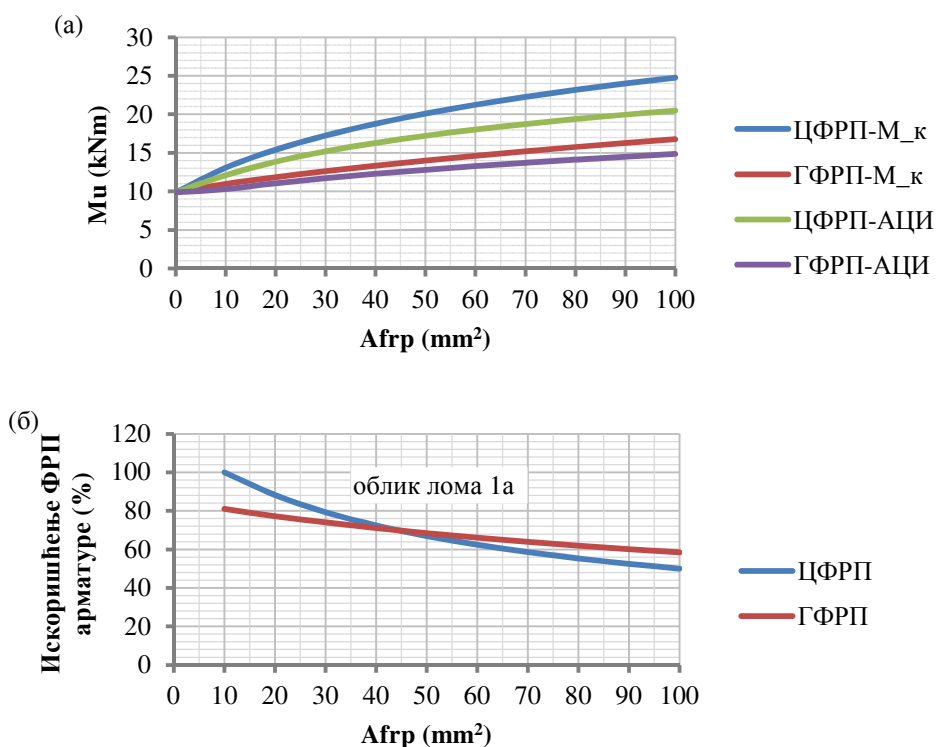
Слика 5-45: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 40$ МПа, $\mu_s = 0,5$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



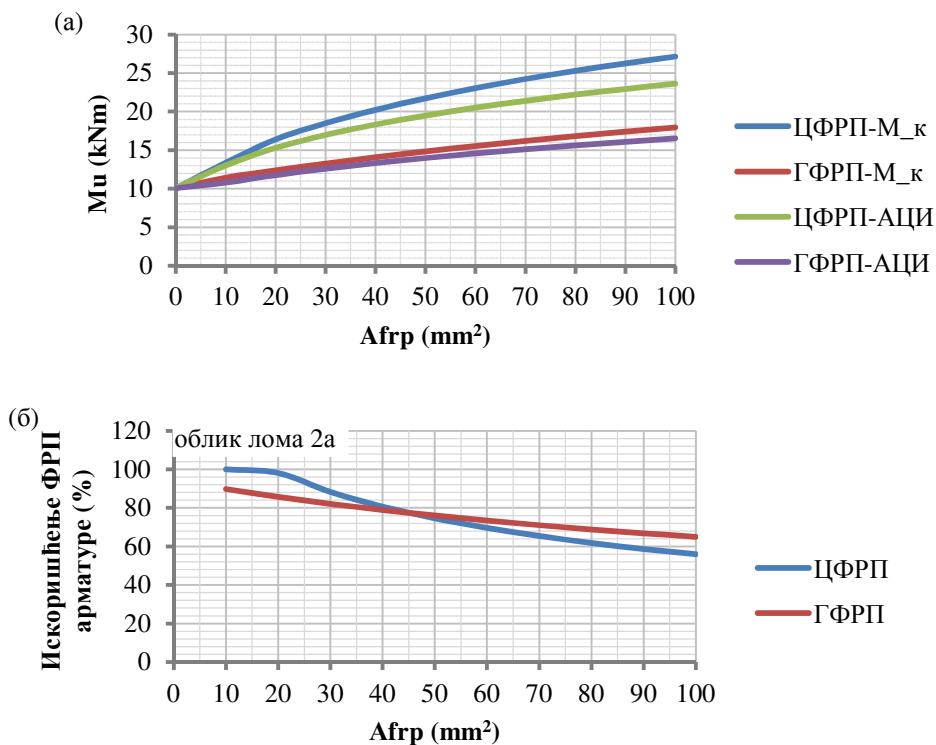
Слика 5-46: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 45$ МПа, $\mu_s = 0,5$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



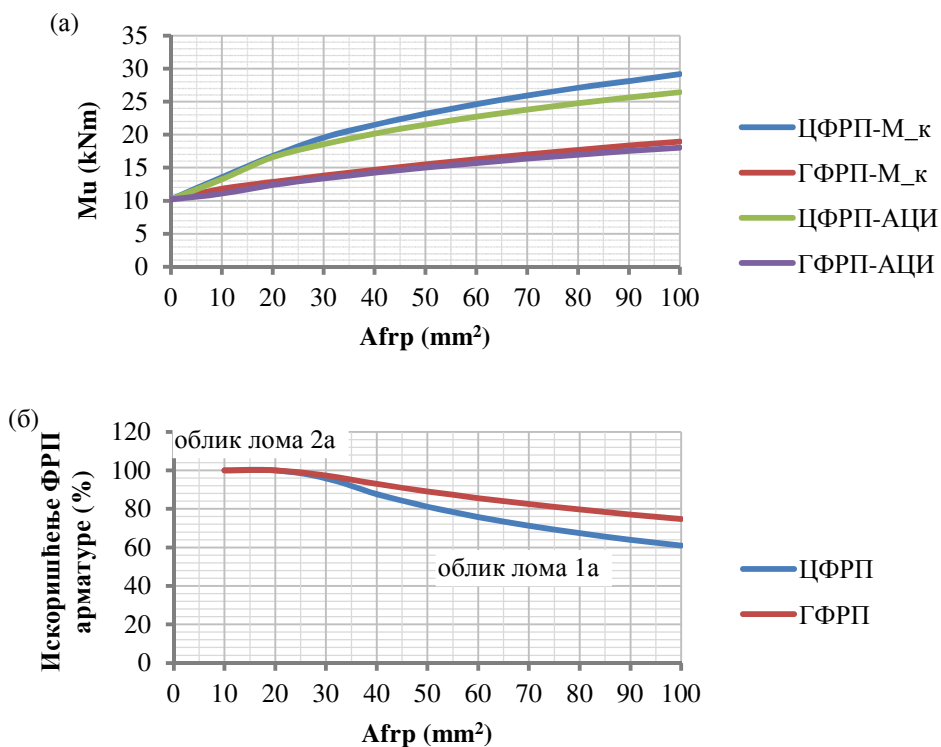
Слика 5-47: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 50$ МПа, $\mu_s = 0,5$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



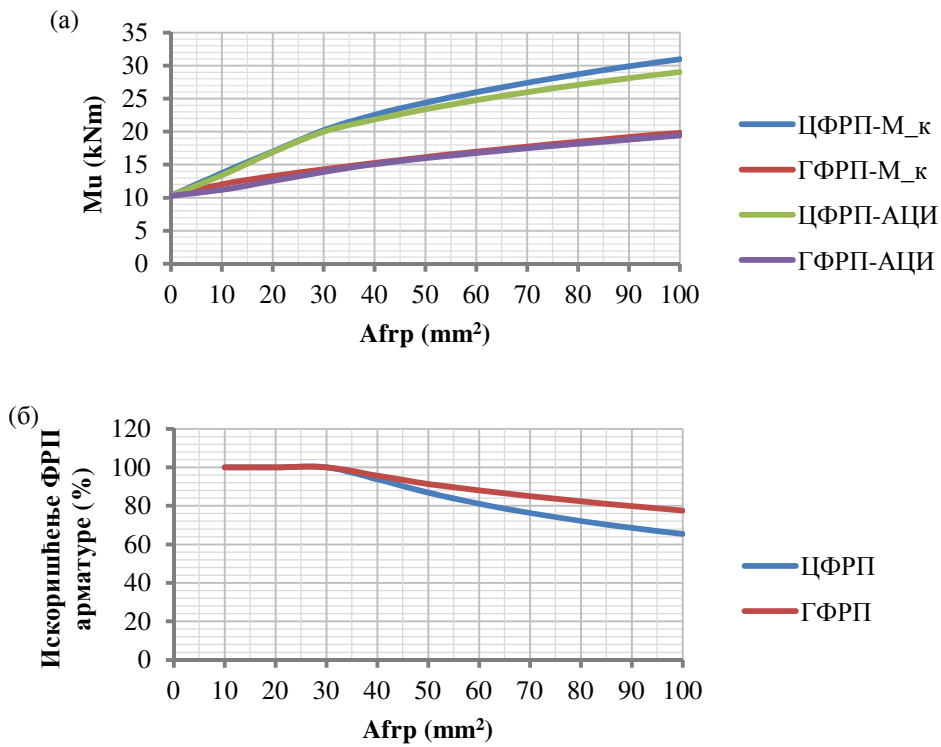
Слика 5-48: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 20$ МПа, $\mu_s = 0,8$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



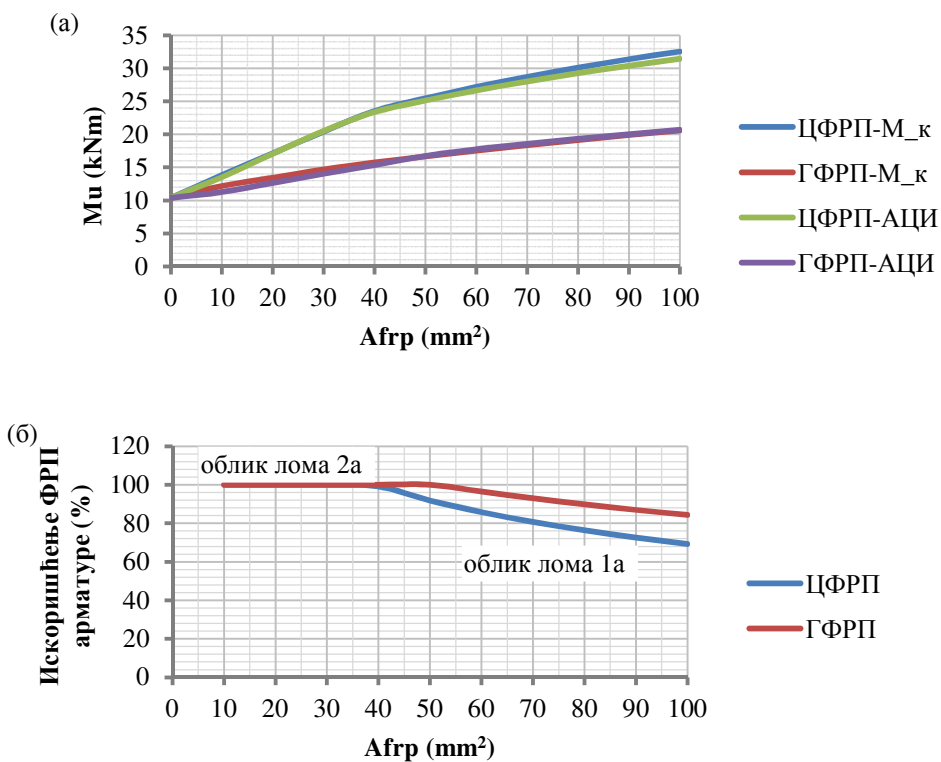
Слика 5-49: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 25$ МПа, $\mu_s = 0,8$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



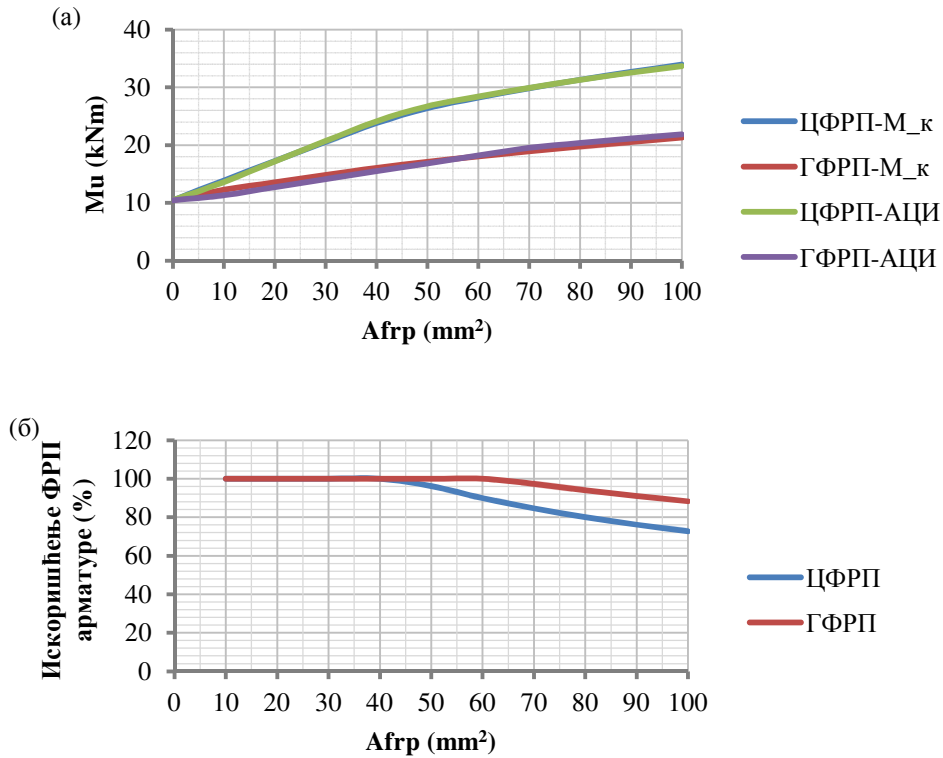
Слика 5-50: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 30$ МПа, $\mu_s = 0,8$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



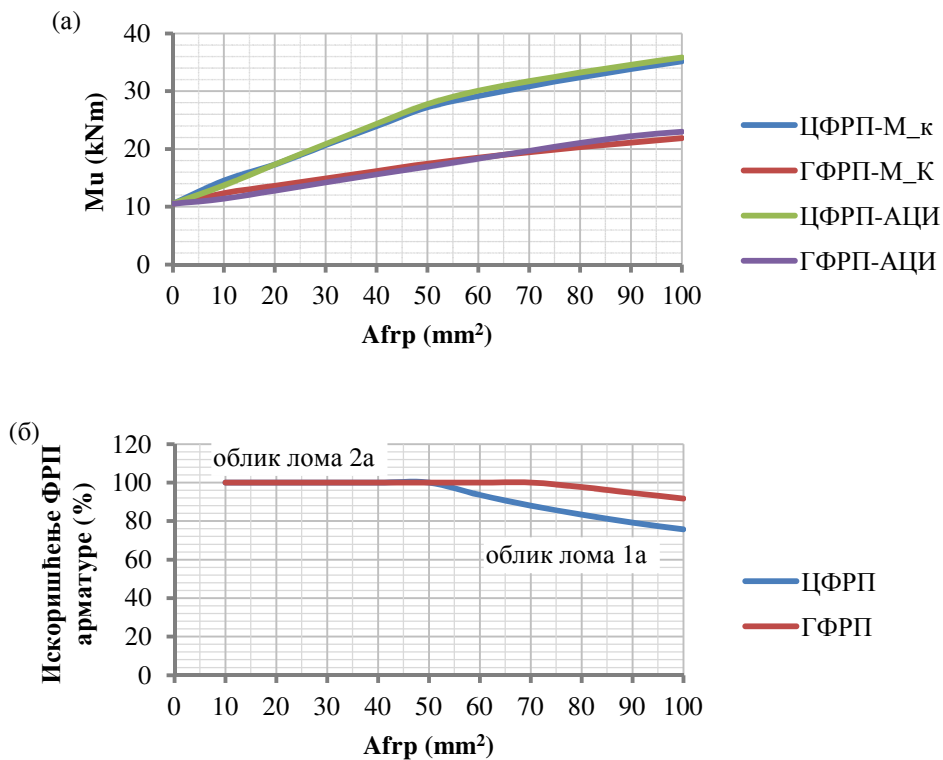
Слика 5-51: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 35$ МПа, $\mu_s = 0,8$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



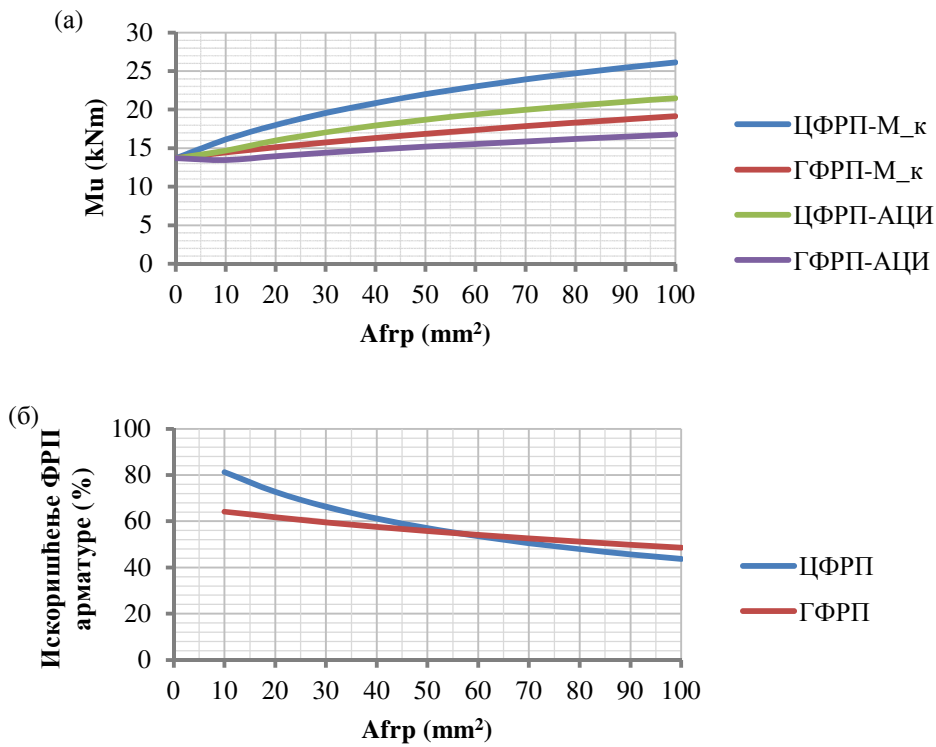
Слика 5-52: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 40$ МПа, $\mu_s = 0,8$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



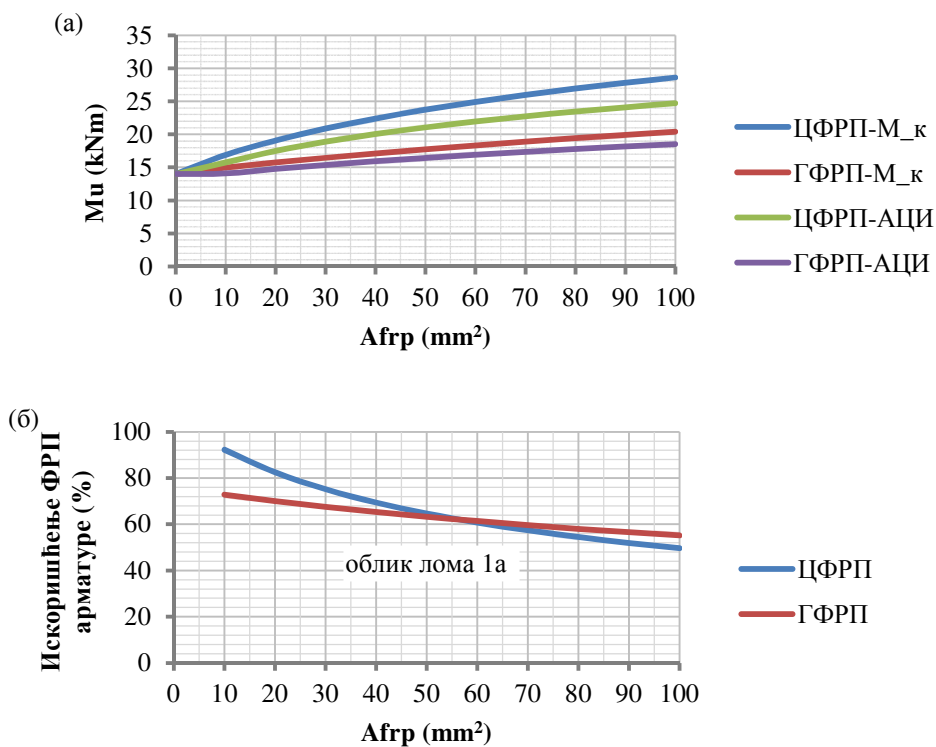
Слика 5-53: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 45 \text{ MPa}$, $\mu_s = 0,8 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



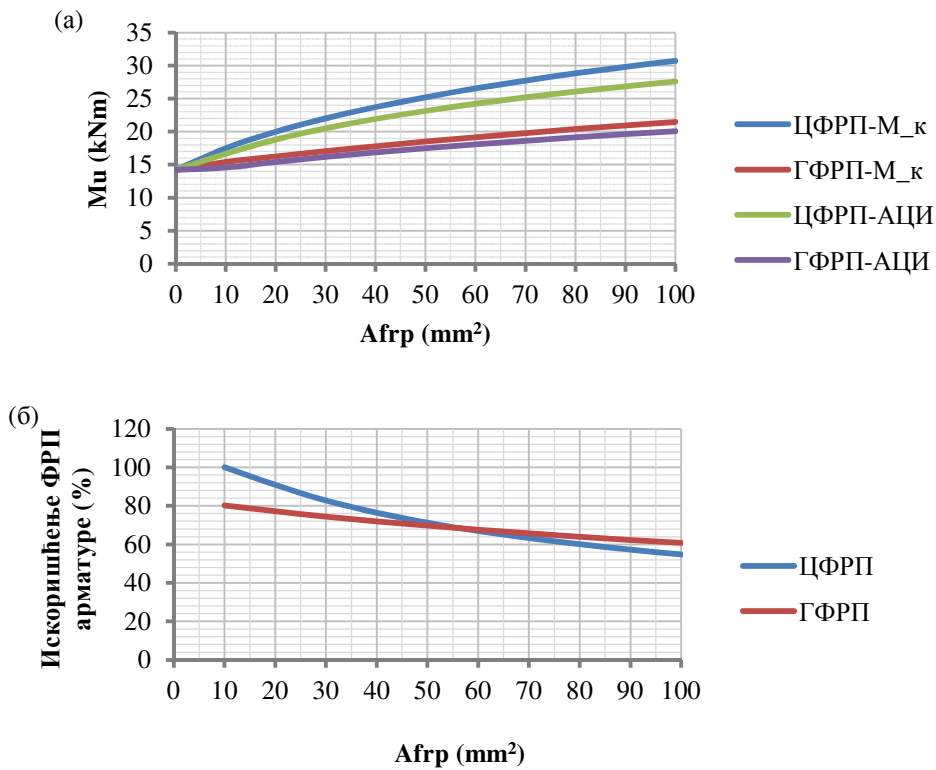
Слика 5-54: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 50 \text{ MPa}$, $\mu_s = 0,8 \%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



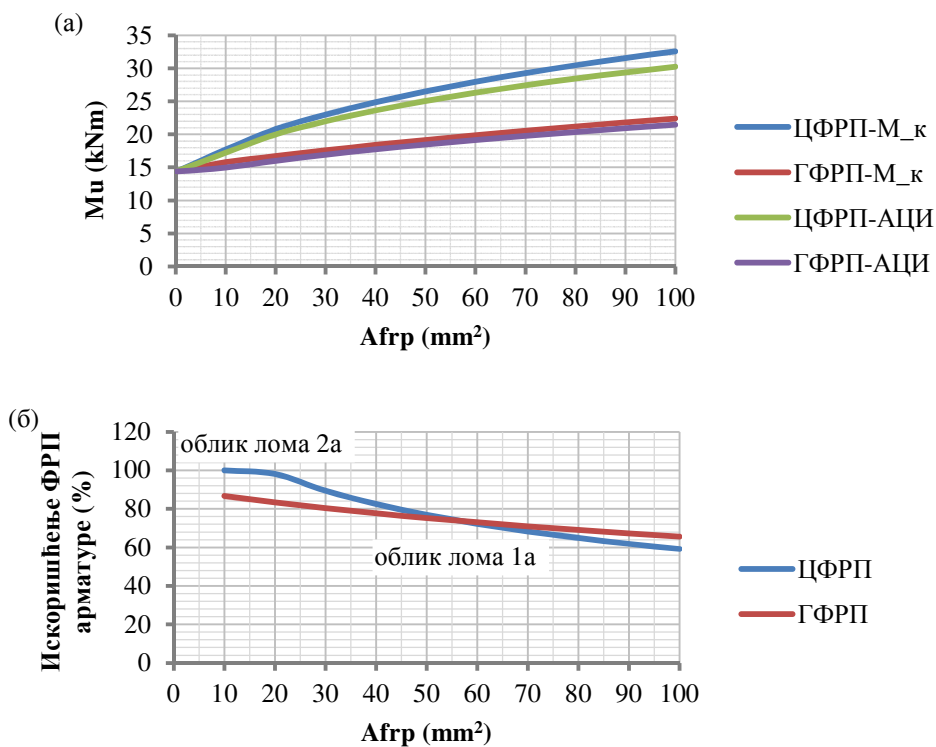
Слика 5-55: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 20$ МПа, $\mu_s = 1,1$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



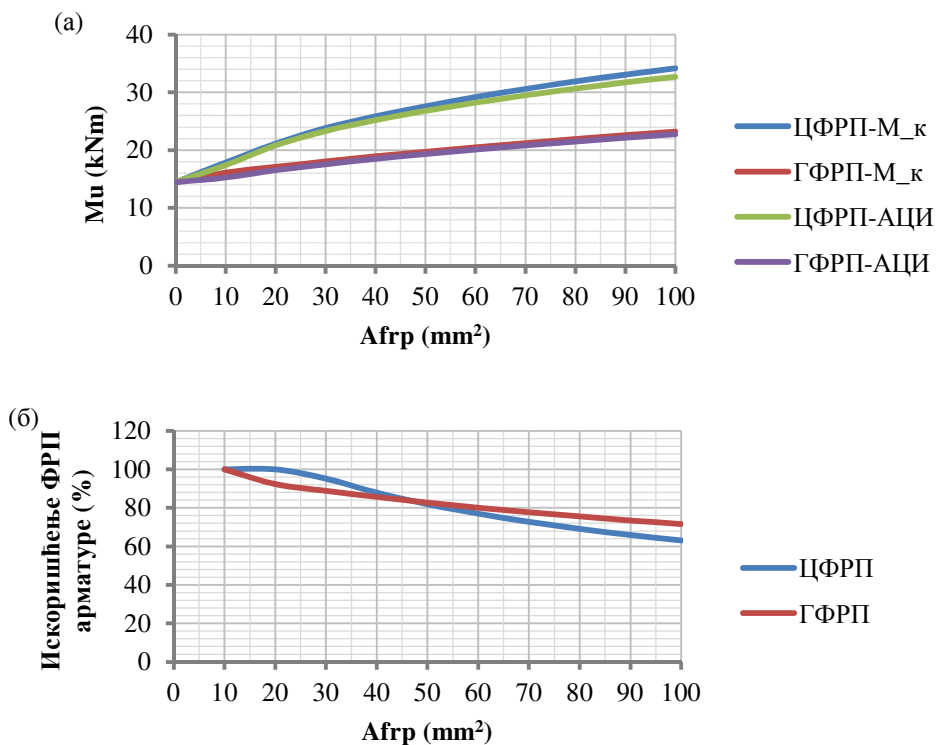
Слика 5-56: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 25$ МПа, $\mu_s = 1,1$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



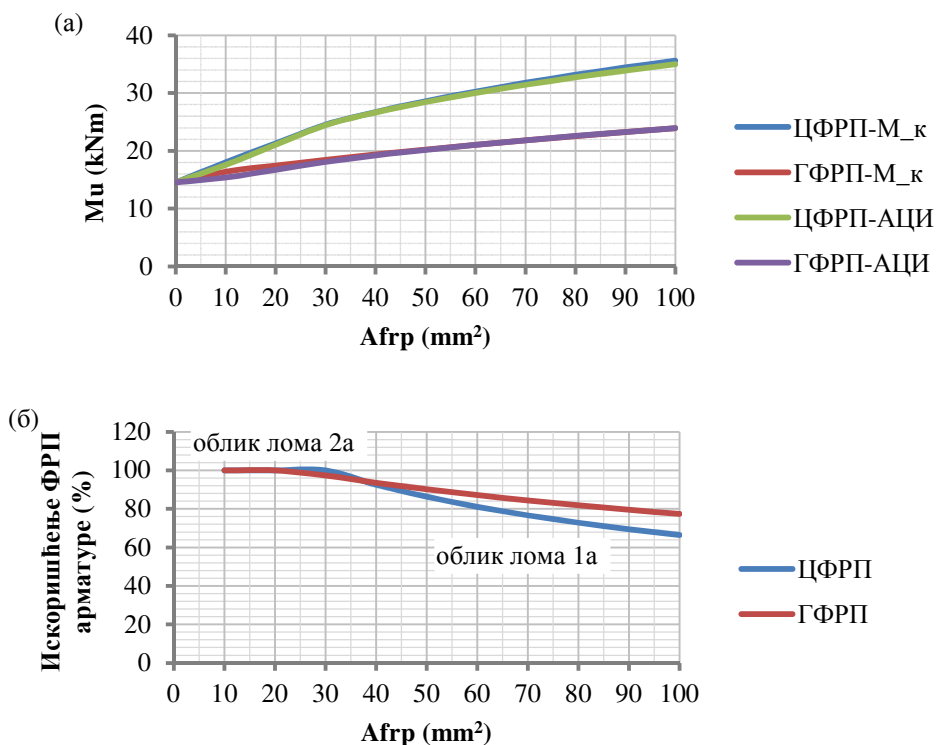
Слика 5-57: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 30$ МПа, $\mu_s = 1,1$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



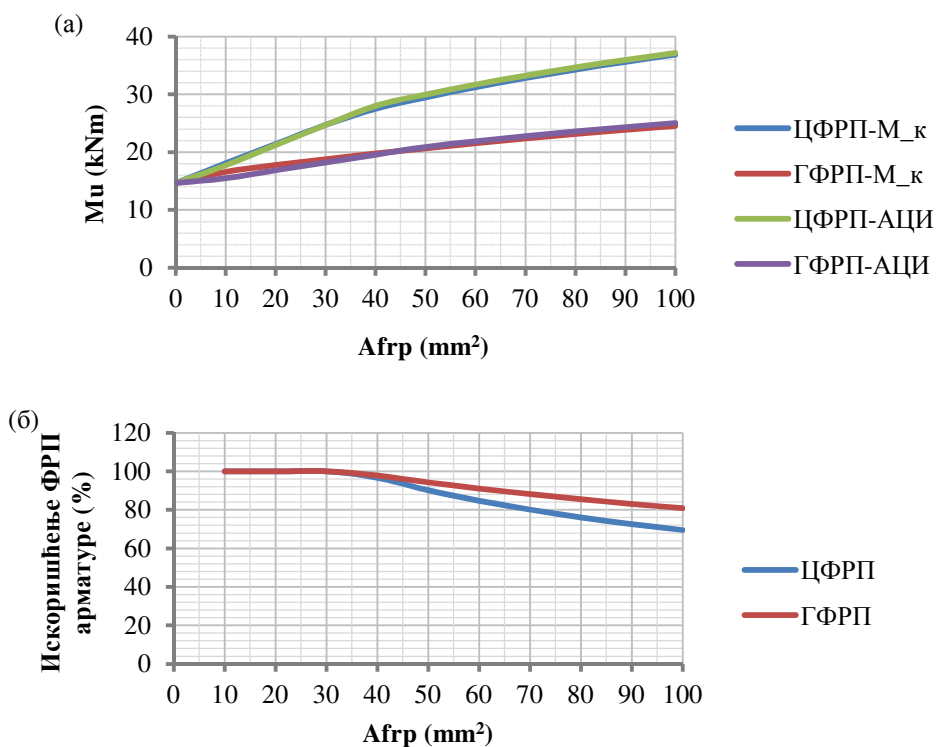
Слика 5-58: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 35$ МПа, $\mu_s = 1,1$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



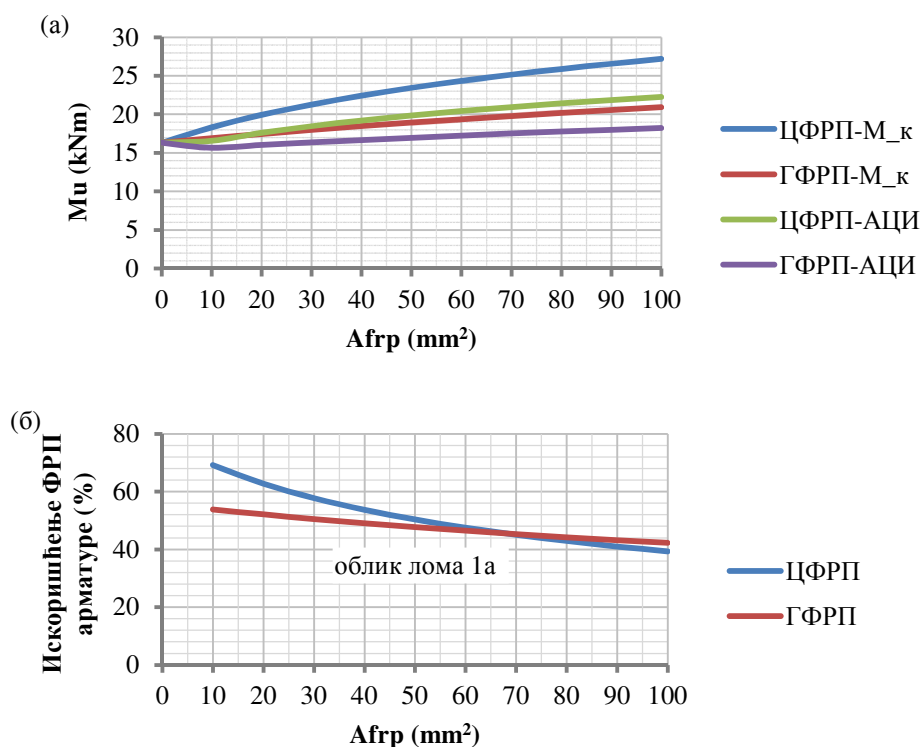
Слика 5-59: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 40$ МПа, $\mu_s = 1,1$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



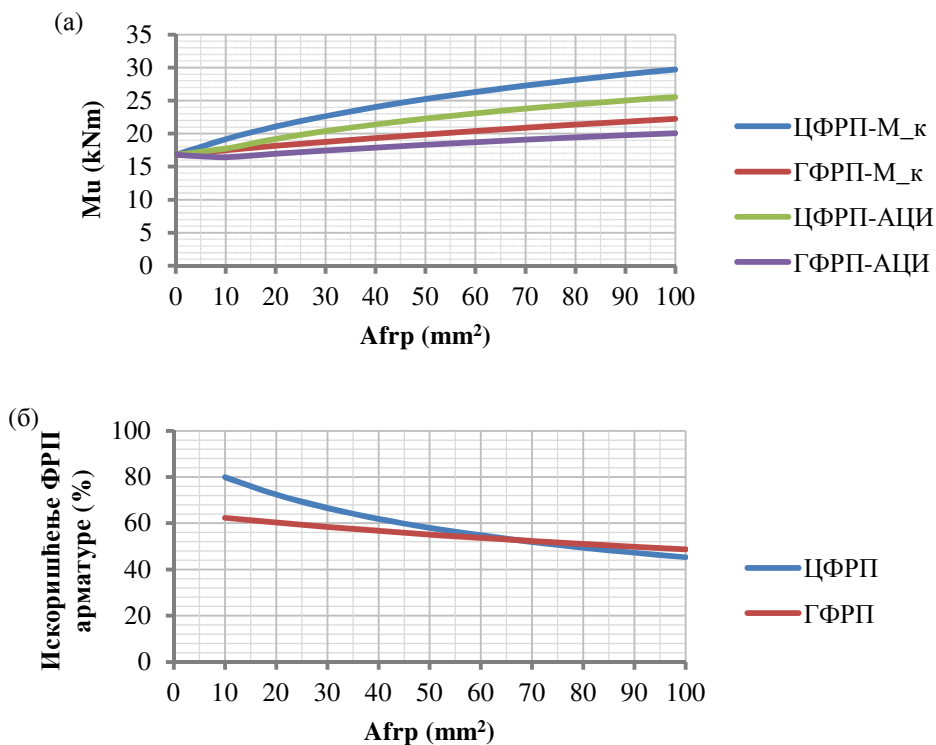
Слика 5-60: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 45$ МПа, $\mu_s = 1,1$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



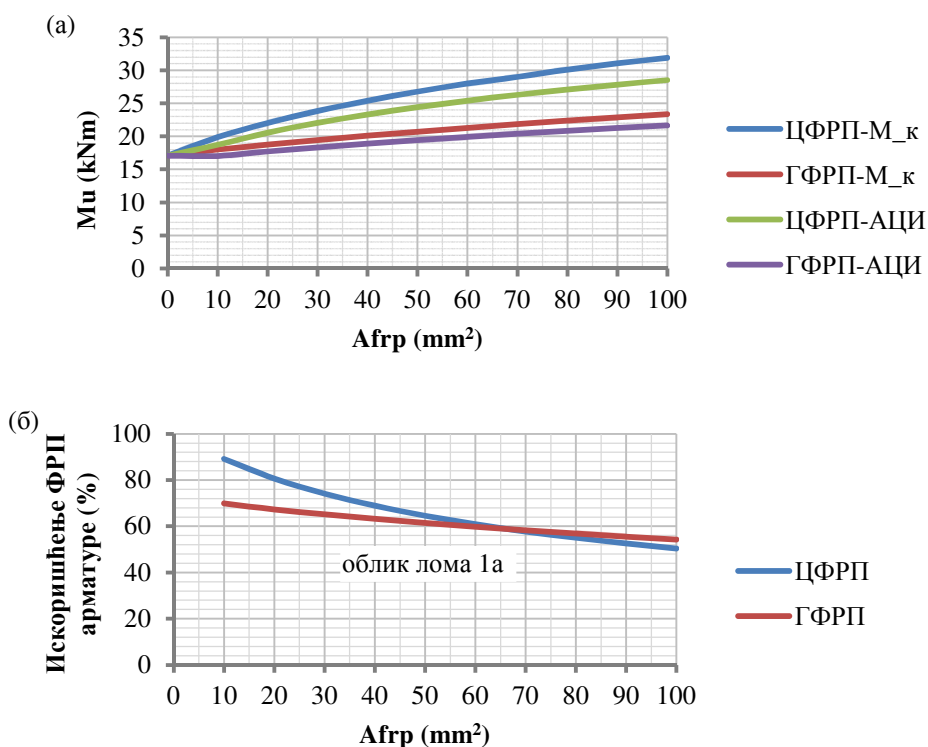
Слика 5-61: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 50$ МПа, $\mu_s = 1,1$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



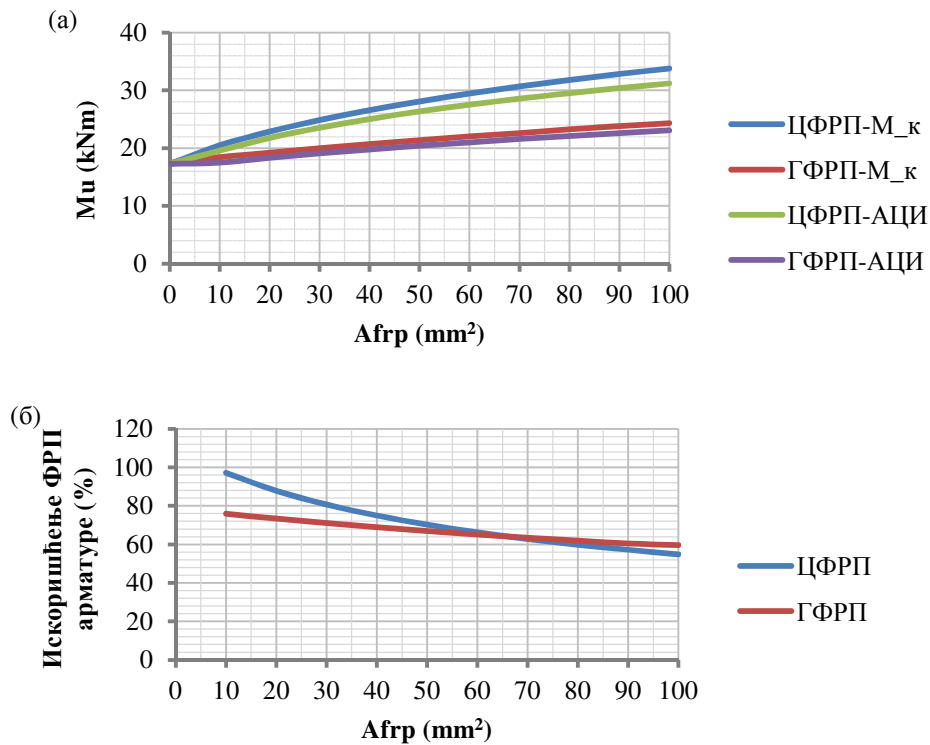
Слика 5-62: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 20$ МПа, $\mu_s = 1,4$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



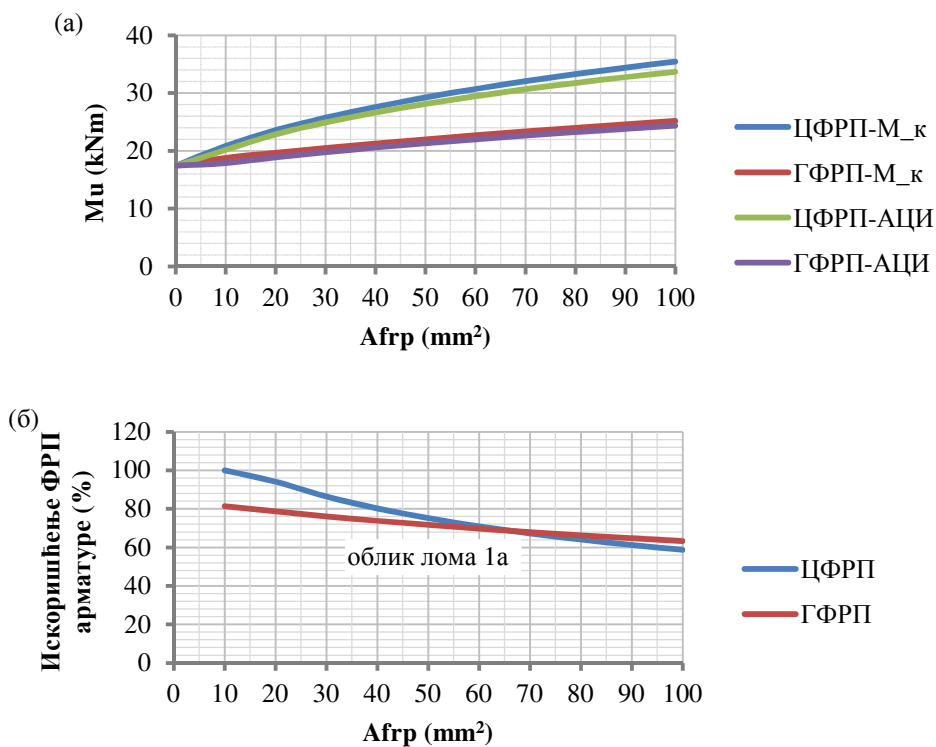
Слика 5-63: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 25$ МПа, $\mu_s = 1,4$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



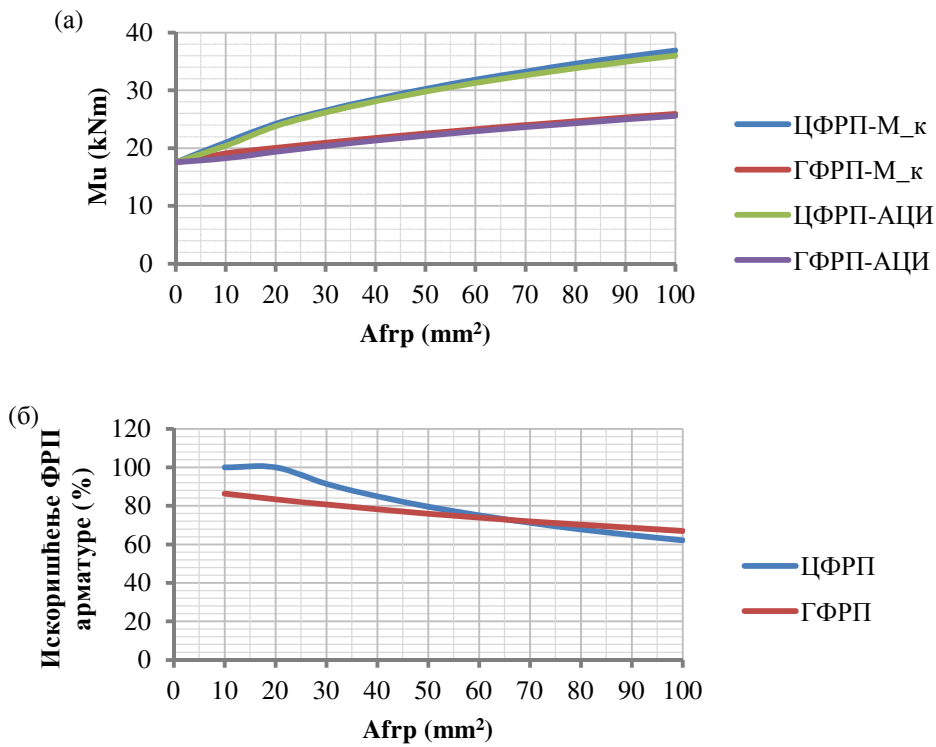
Слика 5-64: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 30$ МПа, $\mu_s = 1,4$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



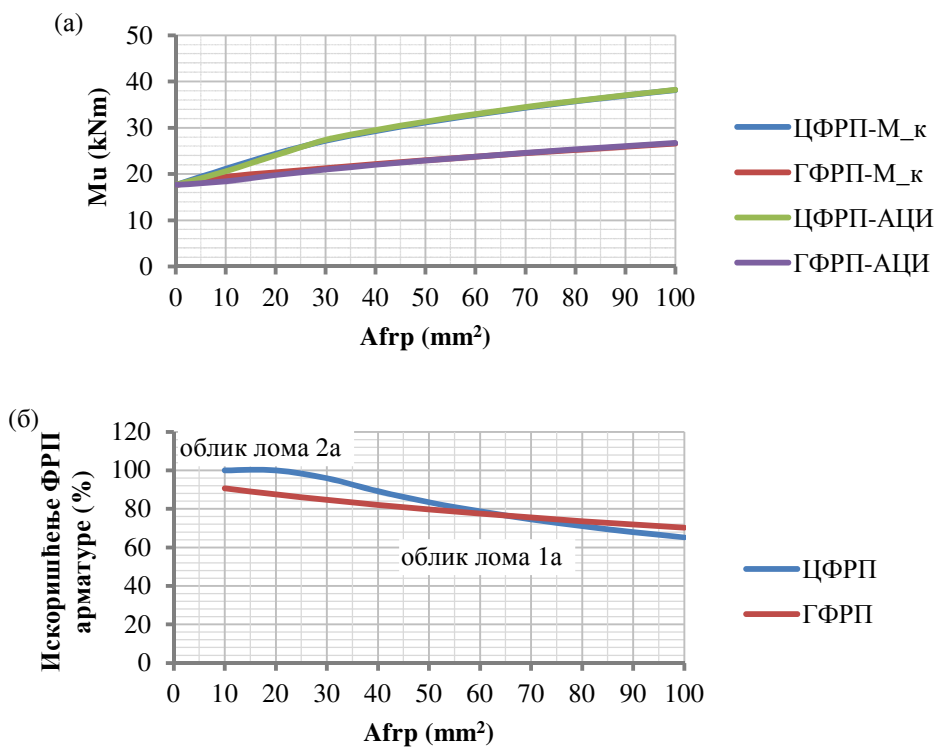
Слика 5-65: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 35$ МПа, $\mu_s = 1,4$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



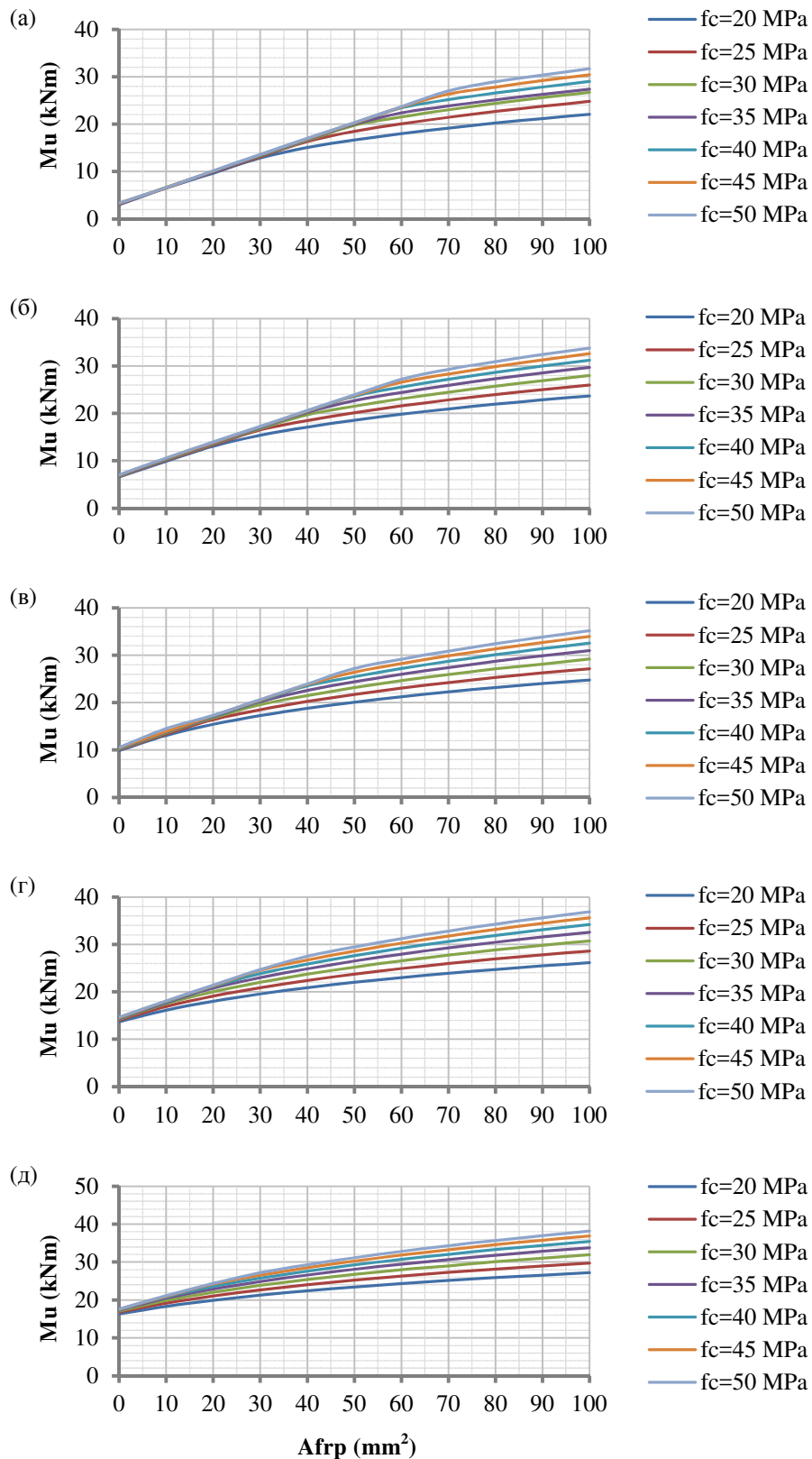
Слика 5-66: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f_c' = 40$ МПа, $\mu_s = 1,4$ %: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



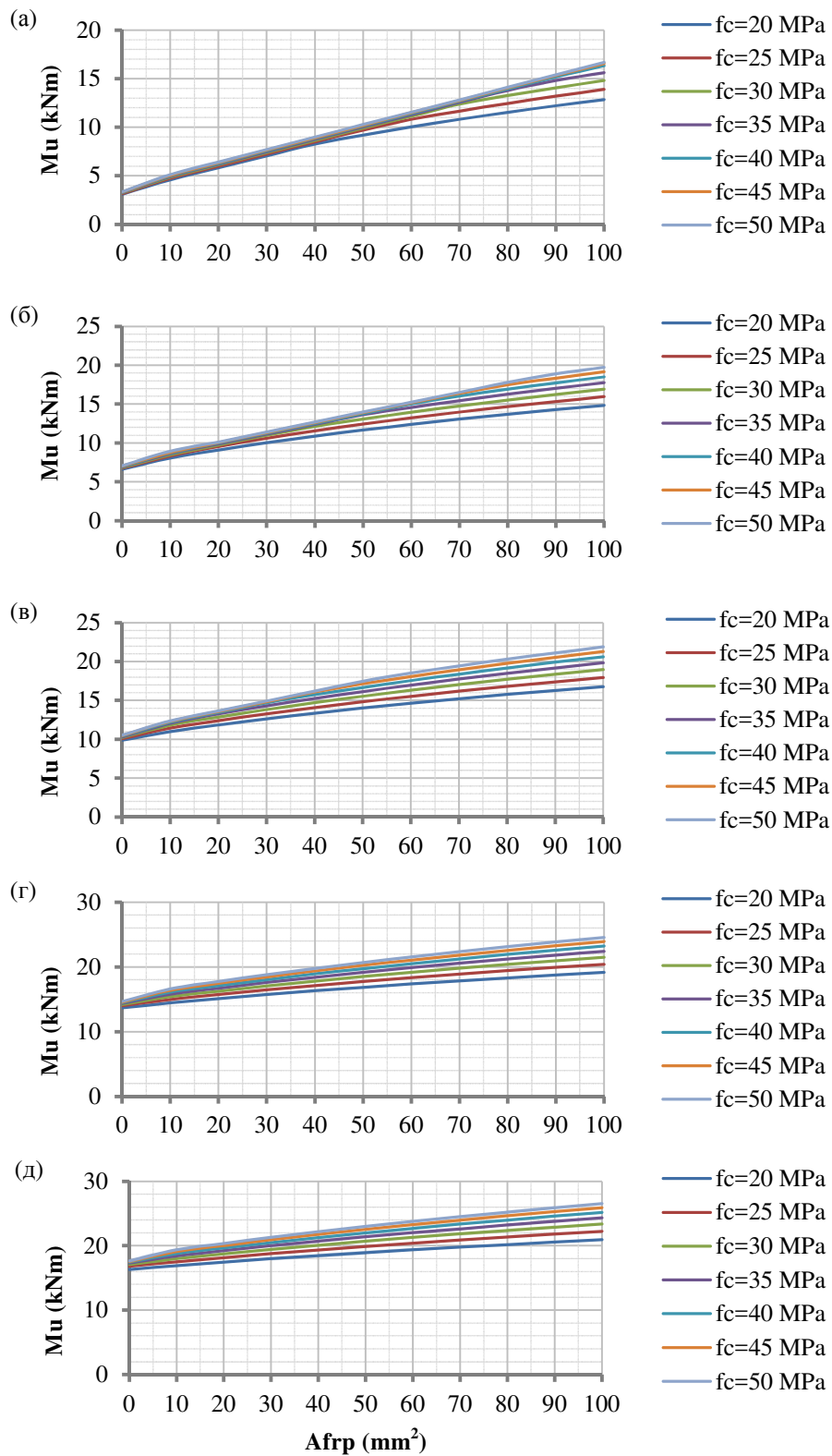
Слика 5-67: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 45$ МПа, $\mu_s = 1,4\%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



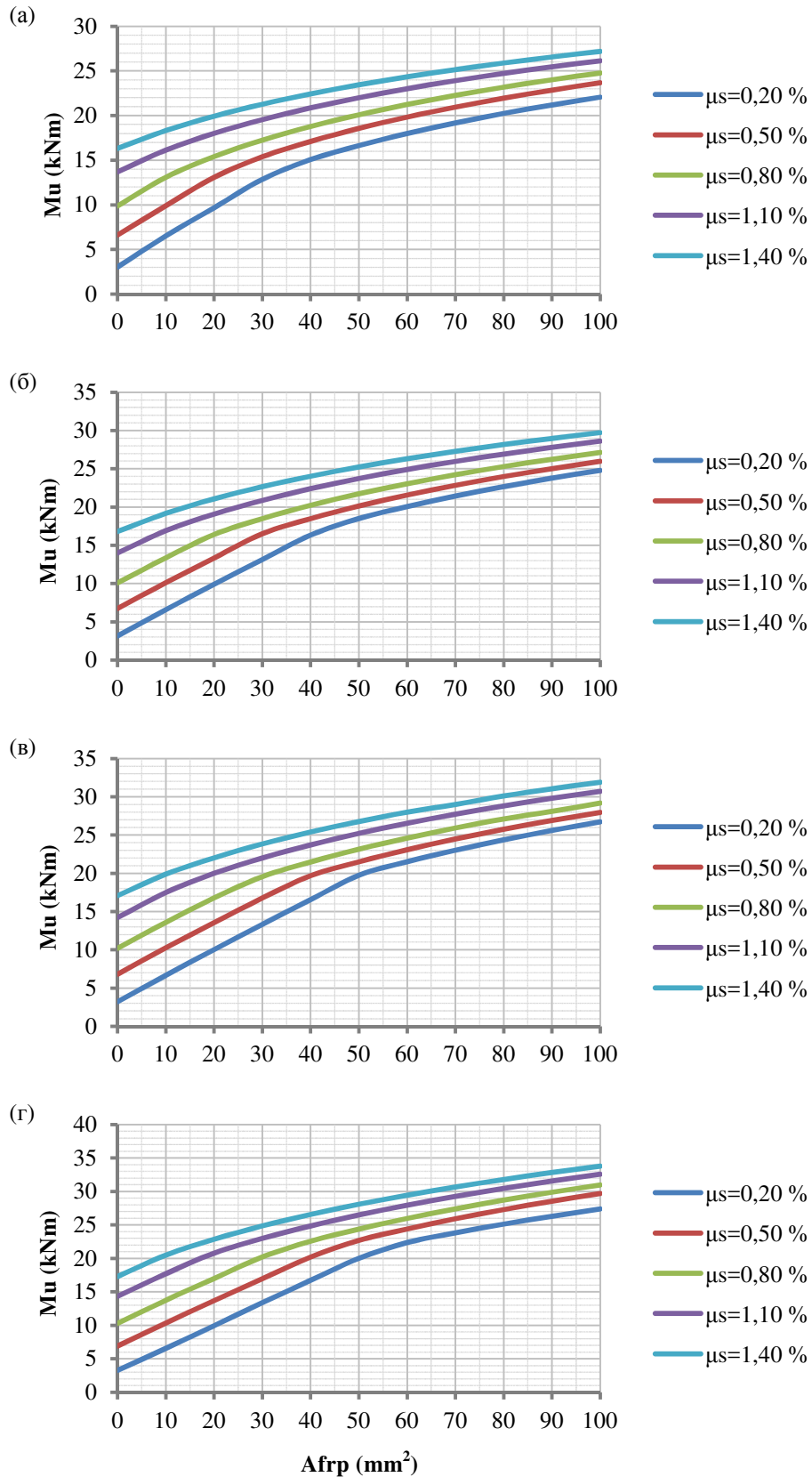
Слика 5-68: АБ пресек ојачан ФРП арматуром, $f'_c = 50$ МПа, $\mu_s = 1,4\%$: а) повећање граничног момента савијања, б) искоришћење ФРП арматуре



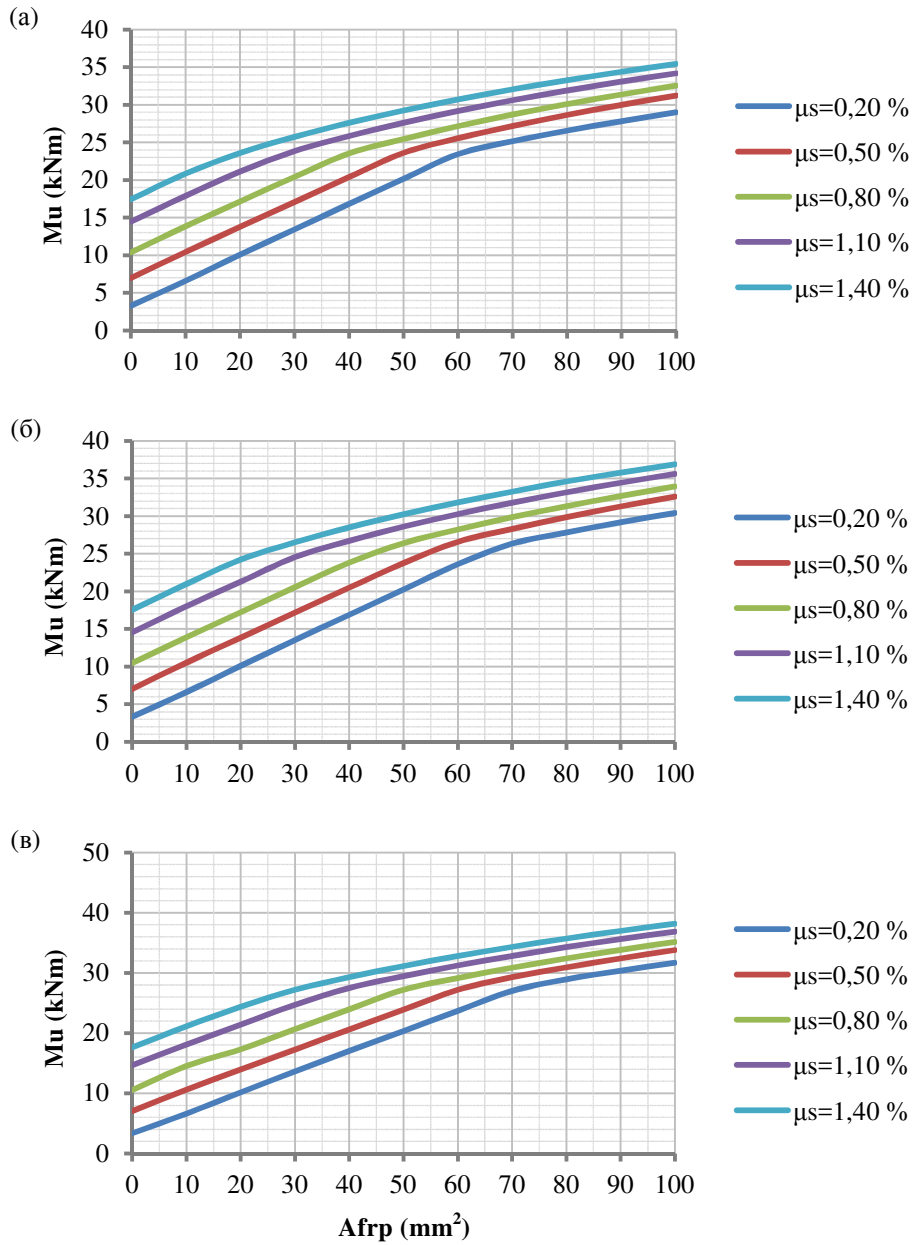
Слика 5-69: АБ пресек ојачан ЦФРП арматуром: (а) $\mu_s = 0,2\%$, (б) $\mu_s = 0,5\%$, (в) $\mu_s = 0,8\%$, (г) $\mu_s = 1,1\%$, (д) $\mu_s = 1,4\%$



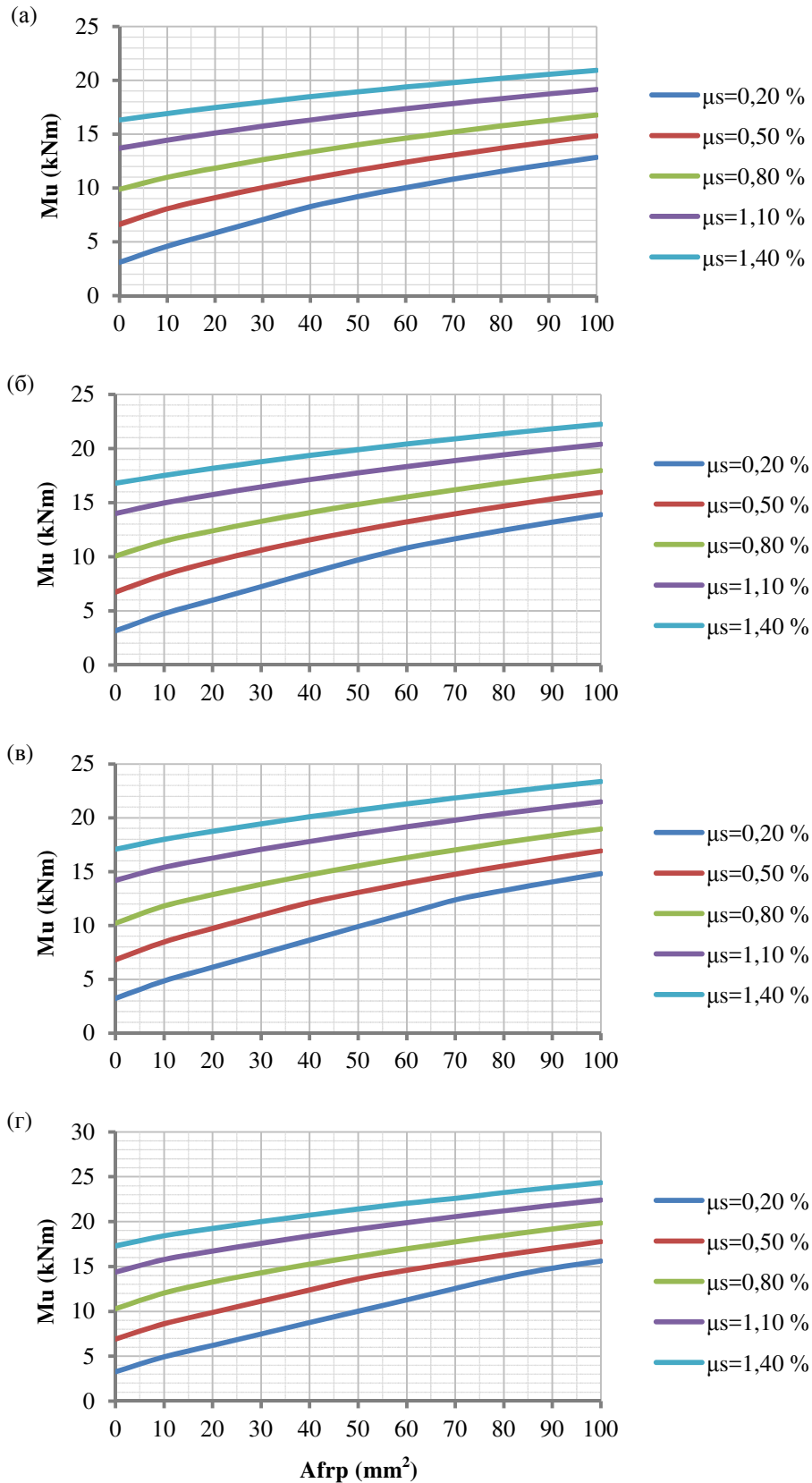
Слика 5-70: АБ пресек ојачан ГФРП арматуром: (а) $\mu_s = 0,2\%$, (б) $\mu_s = 0,5\%$, (в) $\mu_s = 0,8\%$, (г) $\mu_s = 1,1\%$, (д) $\mu_s = 1,4\%$



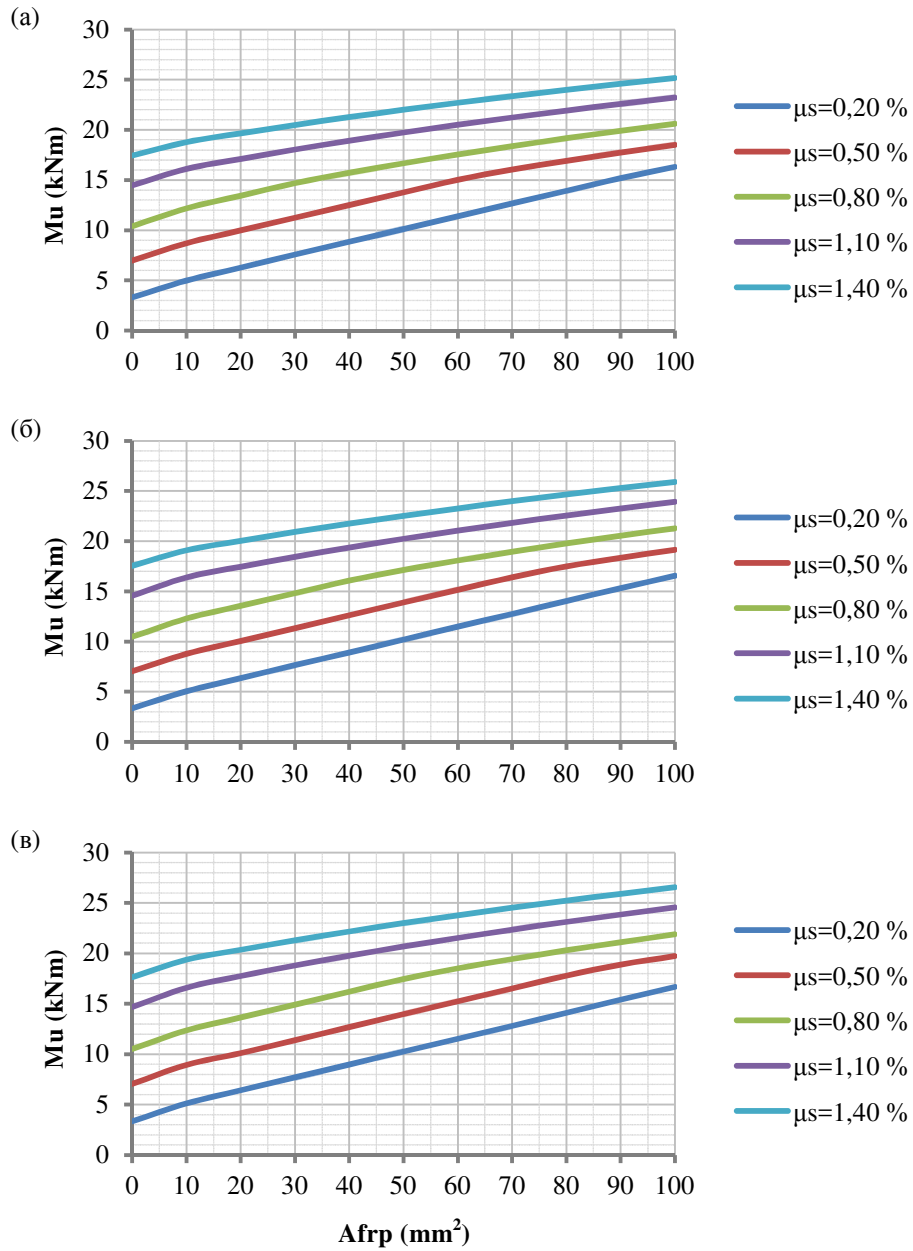
Слика 5-71: АБ пресек ојачан ЦФРП арматуром: (а) $f_c' = 20 \text{ MPa}$, (б) $f_c' = 25 \text{ MPa}$, (в) $f_c' = 30 \text{ MPa}$, (г) $f_c' = 35 \text{ MPa}$



Слика 5-72: АБ пресек ојачан ЦФРП арматуром: (а) $f'_c = 40$ МПа, (б) $f'_c = 45$ МПа, (в) $f'_c = 50$ МПа



Слика 5-73: АБ пресек ојачан ГФРП арматуром: (а) $f'_c=20$ МПа, (б) $f'_c=25$ МПа, (в) $f'_c=30$ МПа, (г) $f'_c=35$ МПа



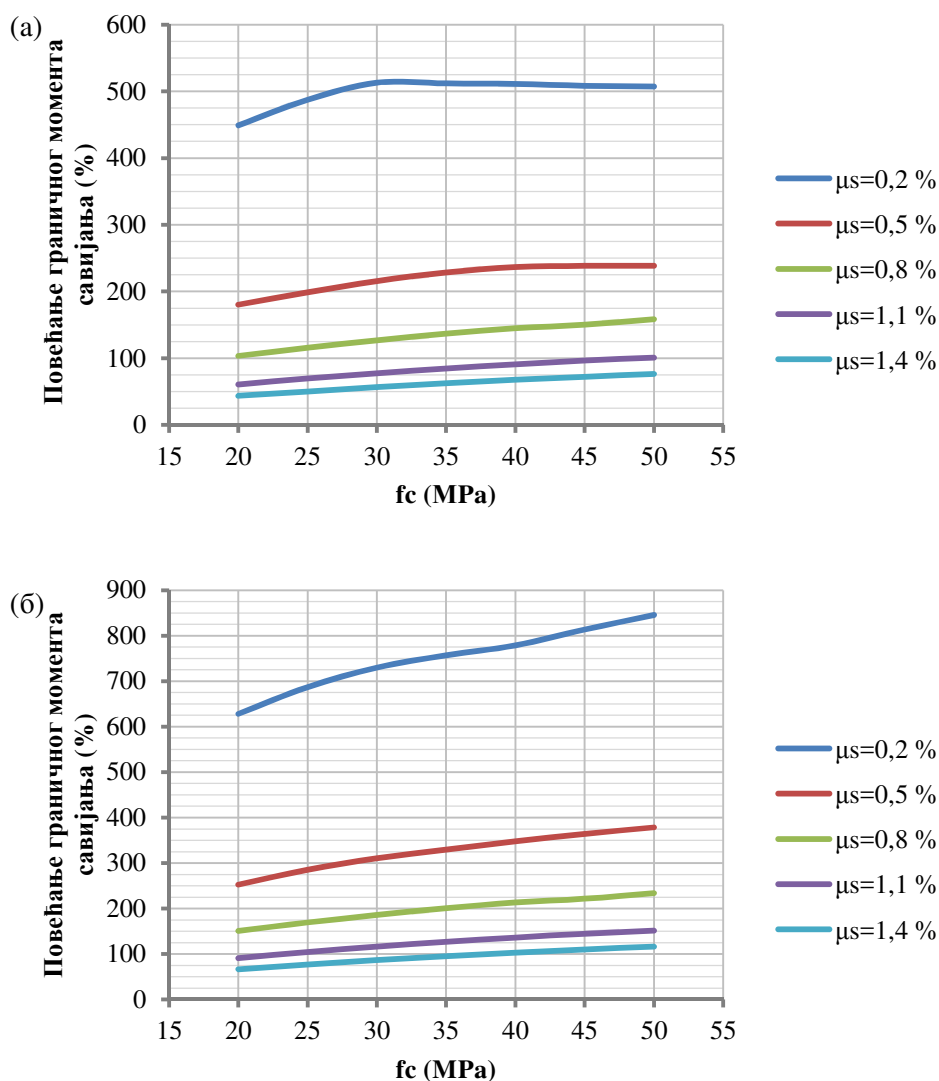
Слика 5-74: АБ пресек ојачан ГФРП арматуром: (а) $f'_c = 40$ МПа, (б) $f'_c = 45$ МПа, (в) $f'_c = 50$ МПа

5.7.1 Анализа добијених вредности

ЦФРП арматура – гранични момент савијања

Повећање граничног момента савијања (M_u) изражено у процентима у случају ојачања различитом количином ЦФРП арматуре приказано је на *Слици 5-75*. Приказана су два случаја:

- ✓ када је проценат армирања ФРП арматуром (μ_{frp}) 0,22 %, што одговара ојачању једном шипком пречника 8 mm ($A_{frp} = 50 \text{ mm}^2$), *Слика 5-75 (а)* и
- ✓ када је проценат армирања ФРП арматуром 0,44 %, што одговара ојачању двама шипкама пречника 8 mm ($A_{frp} = 100 \text{ mm}^2$), *Слика 5-75 (б)*.



Слика 5-75: Повећање граничног момента савијања (M_u) када је проценат армирања ЦФРП арматуром: а) $\mu_{frp} = 0,22 \%$, б) $\mu_{frp} = 0,44 \%$

Повећање граничног момента савијања (*Слика 5-75(а)*), када је проценат армирања ЦФРП арматуром 0,22 % је у границама:

- ✓ 449,04 до 507,16 % када је проценат армирања челичном арматуром (μ_s) 0,2 %,
- ✓ 176,86 до 238,57 % када је проценат армирања челичном арматуром 0,5 %,
- ✓ 103,55 до 158,40 % када је проценат армирања челичном арматуром 0,8 %,
- ✓ 60,70 до 100,89 % када је проценат армирања челичном арматуром 1,1 %,
- ✓ 43,72 до 76,53 % када је проценат армирања челичном арматуром 1,4 %.

Повећање граничног момента савијања (*Слика 5-75(б)*), када је проценат армирања ЦФРП арматуром 0,44 % је у границама:

- ✓ 628,05 до 845,67 % када је проценат армирања челичном арматуром 0,2 %,
- ✓ 252,51 до 378,50 % када је проценат армирања челичном арматуром 0,5 %,
- ✓ 150,96 до 233,81 % када је проценат армирања челичном арматуром 0,8 %,
- ✓ 90,94 до 151,26 % када је проценат армирања челичном арматуром 1,1 %,
- ✓ 66,71 до 116,38 % када је проценат армирања челичном арматуром 1,4 %.

ЦФРП арматура – облици лома

У случају када је проценат армирања челичном арматуром 0,2 % јављају се облици лома 1а и 2а (*Слике (5-34) до (5-40)*). Појава једног од ова два облика лома зависи од количине ФРП арматуре и чврстоће бетона при притиску. Мрвљење бетона после почетка течења затегнуте челичне арматуре (облик лома 1а) се јавља када је проценат армирања ФРП арматуром већи од 0,114 %, а чврстоћа бетона при притиску (f_c') је 20 МПа. Са повећањем чврстоће бетона при притиску повећава се и потребна количина ФРП арматуре за појаву овог облика лома, тако да за $f_c' = 50$ МПа, до мрвљења бетона долази када је $\mu_{fr} > 0,337$ %. При овом облику лома ФРП арматура није у потпуности искоришћена (*Слике (5-34) до (5-40)*). Кидање ФРП арматуре услед достизања граничне дилатације ФРП арматуре при затезању после почетка течења затегнуте челичне арматуре (облик лома 2а) је други облик лома који се генерално јавља у случају виших вредности чврстоће бетона при притиску, при чему је ФРП арматура у потпуности искоришћена.

За проценат армирања челичном арматуром од 0,5 % јављају се облици лома 1а и 2а (*Слике (5-41) до (5-47)*). Мрвљење бетона после почетка течења челика се јавља када је проценат армирања ФРП арматуром већи од 0,061 %, а чврстоћа бетона при притиску

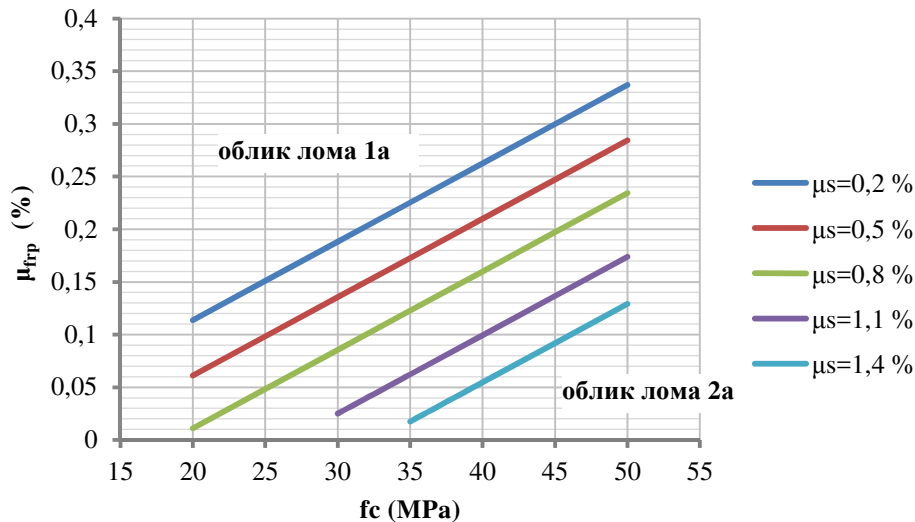
је 20 МПа, док је за појаву овог облика лома када је $f_c' = 50$ МПа, потребна већа количина ФРП арматуре ($\mu_{frp} > 0,284$ %).

Када је проценат армирања челичном арматуром 0,8 % јављају се облици лома 1а и 2а (*Слике (5-48) до (5-54)*). Мрвљење бетона после почетка течења челика се јавља када је проценат армирања ФРП арматуром већи од 0,011 %, а чврстоћа бетона при притиску 20 МПа, док је за појаву овог облика лома када је $f_c' = 50$ МПа, потребно да је $\mu_{frp} > 0,234$ %.

У случају када је проценат армирања челичном арматуром 1,1 % јављају се облици лома 1а и 2а (*Слике (5-55) до (5-61)*). Мрвљење бетона после почетка течења челика се јавља без обзира на количину ФРП арматуре за чврстоћу бетона при притиску од 20 и 25 МПа. За чврстоћу бетона при притиску 30 МПа, до мрвљења бетона долази у случају када је проценат армирања ФРП арматуром већи од 0,025 %, док је за појаву овог облика лома када је $f_c' = 50$ МПа, потребна већа количина ФРП арматуре ($\mu_{frp} > 0,174$ %).

Када је проценат армирања челичном арматуром 1,4 % јављају се облици лома 1а и 2а (*Слике (5-62) до (5-68)*). Мрвљење бетона после почетка течења челика се јавља без обзира на количину ФРП арматуре, за чврстоћу бетона при притиску од 20-30 МПа. Кидање ФРП арматуре после почетка течења затегнуте челичне арматуре се јавља у случају када је $f_c' > 30$ МПа, при чему проценат армирања ФРП арматуром мора бити мањи од 0,129 % када је чврстоћа бетона при притиску 50 МПа.

Користећи изразе дате у поглављу 5.6 одређене су криве зависности којима је дефинисан однос између чврстоће бетона при притиску, процента армирања челичном арматуром и процента армирања ФРП арматуром при коме се јавља еластични симултани лом пресека. Те криве зависности између чврстоће бетона при притиску и процента армирања ФРП арматуром за одређени проценат армирања челичном арматуром приказане су на *Слици 5-76*. Облик лома 1а се јавља у случају када је проценат армирања ФРП арматуром изнад вредности дефинисаних кривом за одговарајући проценат армирања затегнутом челичном арматуром. Облик лома 2а се јавља у случају када је проценат армирања ФРП арматуром испод вредности дефинисаних кривом за одговарајући проценат армирања затегнутом челичном арматуром.



Слика 5-76: Криве зависности којима је дефинисана појава еластичног симултаног лома АБ пресека ојачаног ЦФРП арматуром

ГФРП арматура – гранични момент савијања

Повећање граничног момента савијања изражено у процентима у случају ојачања различитом количином ГФРП арматуре приказано је на Слици 5-77. Приказана су два случаја:

- ✓ када је проценат армирања ФРП арматуром ($\mu_{грп}$) 0,22 %, што одговара ојачању једном шипком пречника 8 mm ($A_{грп} = 50 \text{ mm}^2$), Слика 5-77 (а) и
- ✓ када је проценат армирања ФРП арматуром 0,44 %, што одговара ојачању двама шипкама пречника 8 mm ($A_{грп} = 100 \text{ mm}^2$), Слика 5-77 (б).

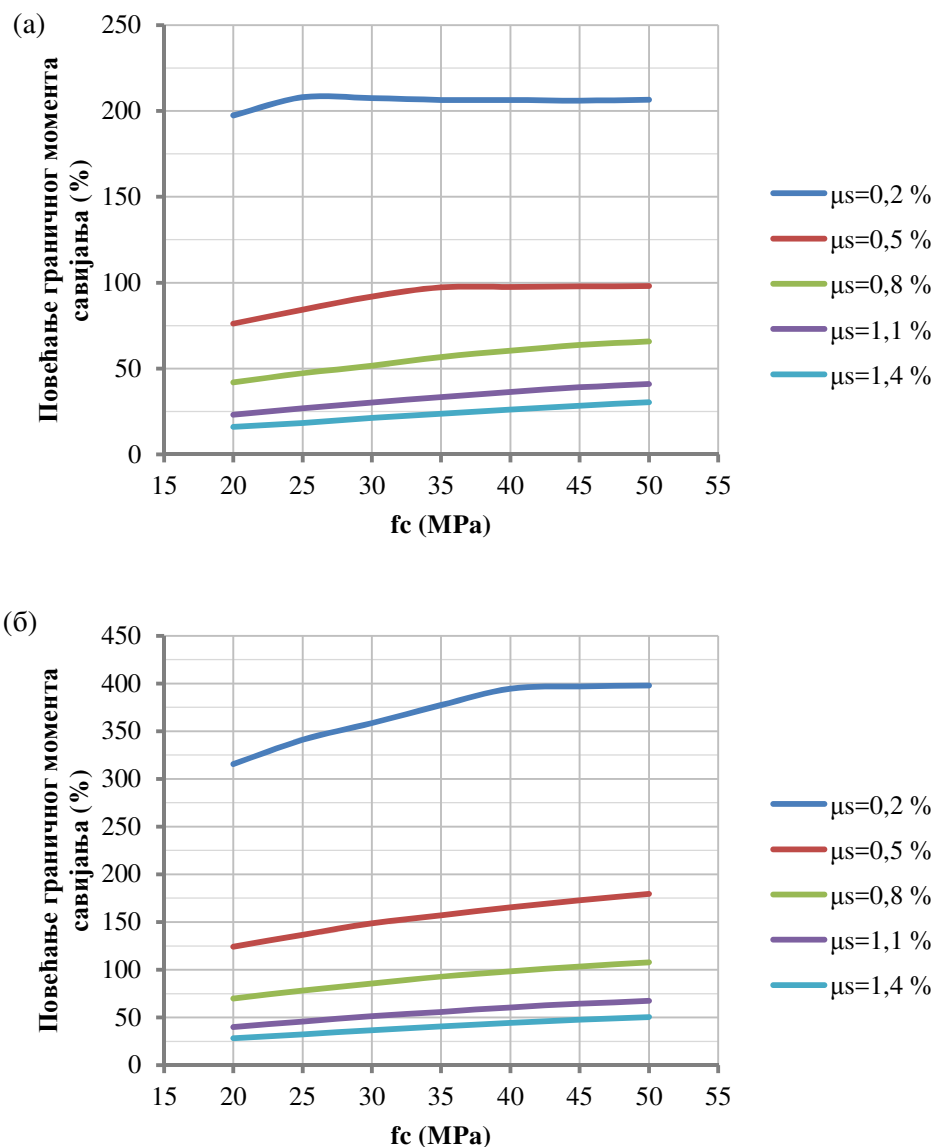
Повећање граничног момента савијања (Слика 5-59(а)), када је проценат армирања ГФРП арматуром 0,22 % је у границама:

- ✓ 197,41 до 206,57 % када је проценат армирања челичном арматуром 0,2 %,
- ✓ 76,13 до 98,02 % када је проценат армирања челичном арматуром 0,5 %,
- ✓ 41,95 до 65,81 % када је проценат армирања челичном арматуром 0,8 %,
- ✓ 23,08 до 40,97 % када је проценат армирања челичном арматуром 1,1 %,
- ✓ 16,06 до 30,39 % када је проценат армирања челичном арматуром 1,4 %.

Повећање граничног момента савијања (Слика 5-59(б)), када је проценат армирања ГФРП арматуром 0,44 % је у границама:

- ✓ 315,53 до 397,91 % када је проценат армирања челичном арматуром 0,2 %,
- ✓ 124,17 до 179,46 % када је проценат армирања челичном арматуром 0,5 %,

- ✓ 69,91 до 107,88 % када је проценат армирања челичном арматуром 0,8 %,
- ✓ 39,88 до 67,35 % када је проценат армирања челичном арматуром 1,1 %,
- ✓ 28,26 до 50,51 % када је проценат армирања челичном арматуром 1,4 %.



Слика 5-77: Процент повећања граничног момента савијања (M_u) када је проценат армирања ГФРП арматуром: а) $\mu_{fip} = 0,22\%$, б) $\mu_{fip} = 0,44\%$

ГФРП арматура – облици лома

У случају када је проценат армирања челичном арматуром (μ_s) 0,2 % јављају се облици лома 1а и 2а (Слике (5-34) до (5-40)). Процент армирања ФРП арматуром изнад кога долази до појаве облика лома 1а налази се у границама између 0,192 % када је чврстоћа бетона при притиску 20 МПа, и 0,653 % када је чврстоћа бетона при притиску 50 МПа. Како је у овом истраживању максимални проценат армирања ФРП арматуром

0,44 %, то се у случајевима када је чврстоћа бетона при притиску већа од 40 МПа јавља искључиво облик лома 2а.

Када је проценат армирања челичном арматуром 0,5 % јављају се облици лома 1а и 2а (*Слике (5-41) до (5-47)*). Мрвљење бетона после почетка течења затегнуте челичне арматуре се јавља када је проценат армирања ФРП арматуром већи од 0,067 %, а чврстоћа бетона при притиску 20 МПа, односно већи од 0,514% када је чврстоћа бетона при притиску 50 МПа. С обзиром да је максимални проценат армирања ФРП арматуром у овом истраживању 0,44 %, овај облик лома се није јављао у случају када је чврстоћа бетона при притиску већа од 45 МПа. У том случају ФРП арматура је у потпуности искоришћена па до лома пресека долази услед достизања граничне дилатације ФРП арматуре при затезању.

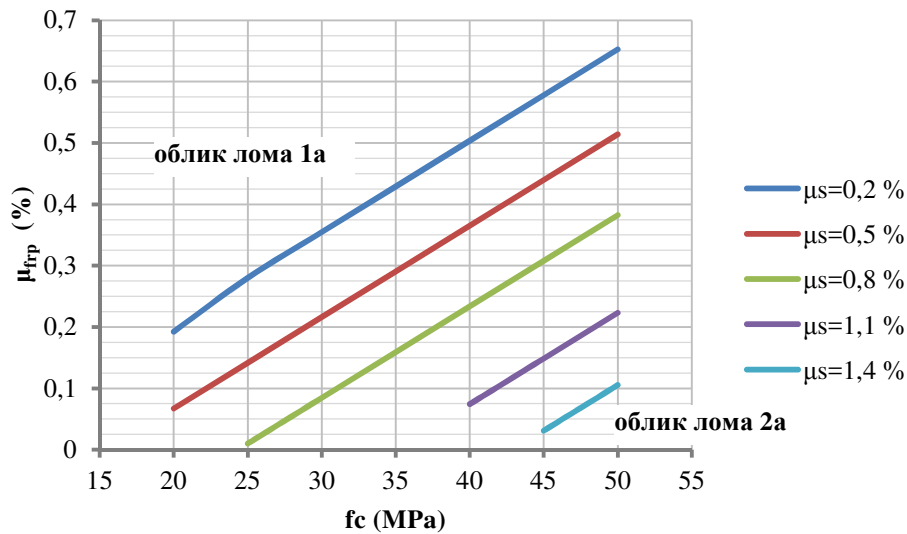
За проценат армирања челичном арматуром од 0,8 % јављају се облици лома 1а и 2а (*Слике (5-48) до (5-54)*). Мрвљење бетона после почетка течења затегнуте челичне арматуре се јавља када је проценат армирања ФРП арматуром већи од 0,01 %, а чврстоћа бетона при притиску 25 МПа, односно већи од 0,382 % када је чврстоћа бетона при притиску 50 МПа.

У случају када је проценат армирања челичном арматуром 1,1 % јављају се облици лома 1а и 2а (*Слике (5-55) до (5-61)*). Када је чврстоћа бетона при притиску од 20 до 35 МПа, јавља се једино лом мрвљењем бетона после почетка течења затегнуте челичне арматуре. За чврстоћу бетона при притиску од 40 МПа јавља се облик лома 2а. при проценту армирања ФРП арматуром мањем од 0,074 %, док у случају чврстоће бетона при притиску од 50 МПа до овог облика лома долази када је проценат армирања мањи од 0,22 %.

Када је проценат армирања челичном арматуром 1,4 % јављају се облици лома 1а и 2а (*Слике (5-62) до (5-68)*). Мрвљење бетона после почетка течења затегнуте челичне арматуре (облик лома 1а) се јавља, без обзира на количину ФРП арматуре, када је чврстоћа бетона при притиску од 20 до 40 МПа. Кидање ФРП арматуре после почетка течења затегнуте челичне арматуре (облик лома 2а) се јавља када је проценат армирања ФРП арматуром мањи од 0,031 % а чврстоћа бетона при притиску 45 МПа, односно када је проценат армирања ФРП арматуром мањи од 0,105 % а чврстоћа бетона при притиску 50 МПа.

Користећи изразе дате у поглављу 5.6 одређене су криве зависности којима је дефинисан однос између чврстоће бетона при притиску, процента армирања челичном арматуром и процента армирања ФРП арматуром при коме се јавља еластични

симултани лом пресека. Те криве зависности између чврстоће бетона при притиску и процента армирања ФРП арматуром за одређени проценат армирања челичном арматуром приказане су на *Слици 5-78*. Облик лома 1а се јавља у случају када је проценат армирања ФРП арматуром изнад вредности дефинисаних кривом за одговарајући проценат армирања затегнутом челичном арматуром. Облик лома 2а се јавља у случају када је проценат армирања ФРП арматуром испод вредности дефинисаних кривом за одговарајући проценат армирања затегнутом челичном арматуром.



Слика 5-78: Криве зависности којима је дефинисана појава еластичног симултаног лома АБ пресека ојачаног ГФРП арматуром

6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ АБ КОНТИНУАЛНИХ НОСАЧА ОЈАЧАНИХ ФРП АРМАТУРОМ

6.1 Опште напомене

У циљу утврђивања понашања АБ континуалних гредних носача, ојачаних ФРП арматуром, под дејством краткотрајног оптерећења, спроведена су експериментална испитивања на узорцима у лабораторијским условима. АБ конструкције ојачане ФРП материјалима спадају међу најсложеније за аналитички и нумерички прорачун, па постоји ризик да се неки од феномена који се јављају не третира на прави начин. Због великог броја значајних фактора, различитих карактеристика материјала (бетона, епоксидног лепка, челичне и ФРП арматуре) и нелинеарног понашања током прираштаја оптерећења, експериментална анализа је незаобилазна у оваквим истраживањима. Тежиште рада стављено је управо на тај сегмент анализе ојачаних гредних елемената (тестирање узорака).

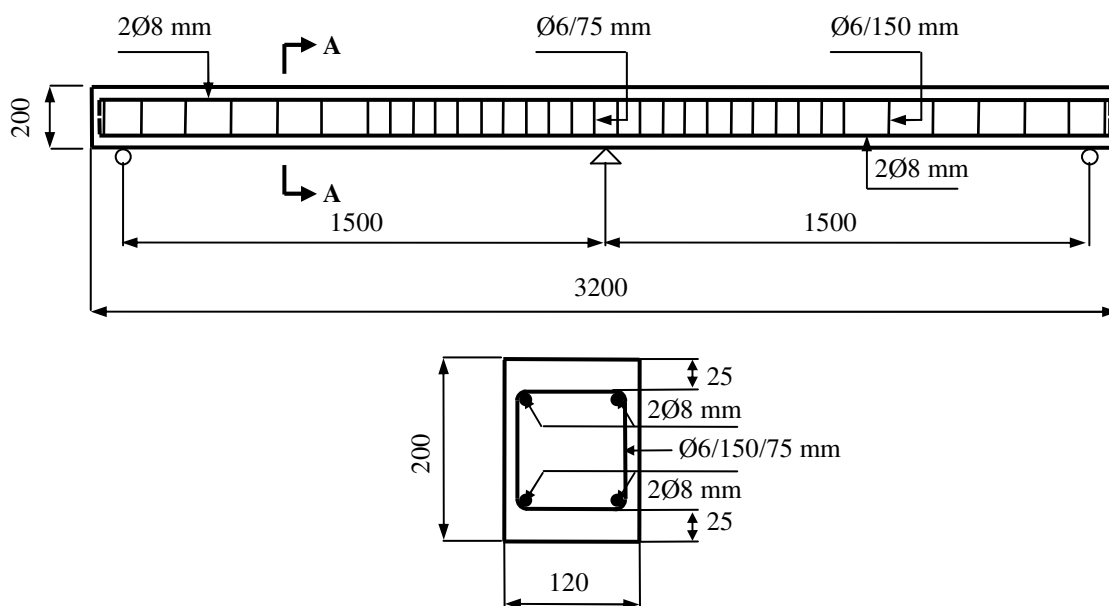
6.2 Програм експерименталних испитивања

Програм експерименталних испитивања приказан у овом поглављу садржи одабир геометрије и начина израде гредних носача и пробних епрувета, методологију и варијанте ојачања, врсте и распоред коришћених инструмената и процедуру испитивања. Вариране су врсте ФРП материјала (ЦФРП и ГФРП), методе ојачања (ЕБ и НСМ) и зона ојачања. Анализа експериментално утврђених резултата испитивања

ојачаних гредних носача, извршена је на основу упоређења са одговарајућим резултатима добијеним испитивањем контролног, неојачаног носача. Упоредо са основним испитивањима, урађена су и пратећа испитивања механичких карактеристика бетона, док су за челичну и ФРП арматуру усвојене карактеристике добијене од стране произвођача.

6.2.1 Геометрија испитиваних гредних елемената

АБ греде израђене су у грађевинском предузећу „Путинжењеринг“ у Нишу. У складу са Програмом истраживања урађено је шест АБ носача према детаљима приказаним на *Слици 6-1*. Укупна дужина греда је 3200 mm, а њихов попречни пресек износи 120×200 mm. Армирање греда обављено је ребрастом арматуром РА 400/500-2, према приказаним детаљима (*Слика 6-1*), а пројектована марка самоупраћујућег бетона је МБ 30. За потребе пратећих испитивања механичких карактеристика бетона током израде гредних елемената узети су узорци бетона (пробне епрувете) облика цилиндра и коцке.



Слика 6-1: Детаљи армирања испитиваних гредних носача

6.2.2 Припрема оплате

Калупи за израду гредних носача урађени су у глаткој оплати, један комплет од шест АБ греда (*Слика 6-2*).



Слика 6-2: Припрема оплате – калуна

6.2.3 Припрема арматуре

Детаљи армирања приказани су на *Слици 6-1*. За израду гредних носача коришћена је ребраста арматура РА 400/500-2 пречника $\varnothing 8$ mm и узенгије од глатке арматуре ГА 240/360 пречника $\varnothing 6$ mm (*Слика 6-3*). Правилан положај арматуре остварен је употребом дистанцера.



Слика 6-3: Припрема арматуре

6.2.4 Бетонирање гредних елемената

Бетонирање свих греда изведено је из једне мешавине укупне запремине приближно 1 m^3 . Бетон је израђен у фабрици бетона грађевинског предузећа „Путинжењеринг“, пројектоване марке МБ 30.



Слика 6-4: Калуп са арматуром и постављеним дистанцерима пред уградњу бетона и изглед греда у калупу после уградње бетона

6.2.5 Израда епрувете (пробних тела) и њихова нега

Током бетонирања узете су пробне епрувете облика коцке (ивице 150 mm) и цилиндра ($\text{Ø}150/300$ mm). С обзиром да се радило о једној мешавини и релативно малој количини бетона све епрувете су узете истовремено са уградњом бетона за све израђене узорке гредних носача.



Слика 6-5: Пробне епрувете облика коцке и цилиндра узете при бетонирању гредних носача

6.3 Начини ојачавања испитиваних АБ греда

Ојачање АБ греда извршено је на укупно пет греда, напред наведених димензија. Коришћена је ФРП арматура италијанске фирме Мапеи (МАРЕИ) и швајцарске фирме Сика (SIKA) и одговарајући епоксидни лепкови за њихову уградњу. Комерцијални називи, врсте, геометрија и механичке карактеристике ФРП арматуре дате су табеларно (Табела 6-1).

Табела 6-1: Карактеристике ФРП арматуре и епоксида коришћених за ојачавање

Комерцијални назив	Врста ФРП арматуре	Попречни пресек (mm)	Површина пресека (mm ²)	Чврстоћа на затезање (МПа)	Модул еластичности (GPa)
G-rod	ГФРП	Ø10	71,29	760	40,8
C-rod	ЦФРП	Ø8	50,24	2000	155
Carboplate E 170/50/1,4	ЦФРП	34×1,4	48	3100	170
Епоксидни лепак	Adesilex PG1	/	/	30 МПа – затезна 40 МПа – савојна >3 МПа – везе	4000 МПа на савијање 8000 МПа на притисак

Комерцијални назив	Гранично издужење	Коефицијент ширења (m/m/°C)	Смичућа чврстоћа (МПа)	Температура уградње	Садржај влакана
G-rod	2 %	$6 \div 10 \times 10^{-6}$	/	>5°C	75 %
C-rod	1,5 %	$6 \div 10 \times 10^{-6}$	/	>5°C	71 %
Carboplate E 170/50/1,4	2 %	$0,6 \times 10^{-6}$	77	>5°C	68 %



Слика 6-6: Изглед ГФРП арматуре (G-rod) и ЦФРП арматуре (C-rod и Carboplate E) са заштитном фолијом



Слика 6-7: Епоксидна смола (Adesilex PG1)

6.3.1 НСМ метода ојачања – поступак уградње ФРП арматуре у заштитном слоју бетона

Поступак ојачавања АБ греда НСМ методом врши се у неколико корака. Најпре се формира прорез обележен лењиром и засечен уз помоћ тестере са дијамантским сечивом према димензијама зависним од пречника шипке. Наредни корак је чишћење прореза од опиљака бетона до свођења на захтеване димензије. У конкретном случају

ширина и дубина прореза били су два и по пута већи од пречника уграђених шипки. Код ГФРП шипки то је био прорез 25×25 mm, док је код ЦФРП шипки износио 20×20 mm у одређеном делу АБ греде у зависности од врсте ојачања.



Слика 6-8: Исечени прорези код АБ греде ојачане НСМ методом

У поступку уградње ФРП арматуре прво се све три засечене стране прореза премазују двокомпоненталним прајмером. Следећи корак је наношење двокомпоненталног епоксидног лепка до половине дубине прореза. У до пола попуњени прорез поставља се ФРП шипка затпањем у епоксидну пасту. После тога епоксидном пастом запуњује се остатак прореза, а површина поравнава, уз уклањање вишка епоксида (Слика 6-9).



Слика 6-9: Поступак уградње ФРП шипки у оквиру НСМ методе

Тиме је поступак уградње ФРП шипки у АБ греде завршен, а греде се не оптерећују док епоксид не достигне прописане механичке карактеристике, што према препоруци произвођача износи седам дана. За то време ојачане греде треба заштитити од директног излагања дејствима атмосферских утицаја и прашине. Треба имати у виду да је оптимална температура за ове радове од +5 до +25°C, а да време везивања епоксидног лепка директно зависи од спољашње температуре. За правилно наношење епоксидног пуниоца потребно је доследно се придржавати упутстава произвођача.

После постављања ФРП шипки и везивања лепка, греде су шрафиране „шах пољем“ на 50 mm, ради лакшег исцртавања мапе прслина приликом испитивања под утицајем пробног оптерећења.

6.3.2 ЕБ метода ојачања – ојачавање АБ греда лепљењем ФРП ламината на површини бетона

Ојачавање АБ носача споља лепљеним ламинатима је метода ојачавања позната и коришћења дуже од две деценије. Овде ће бити укратко приказана, а циљ њене примене је да обезбеди податке за упоредну анализу гредних елемената ојачаних НСМ и ЕБ методом, за случај исте аксијалне крутости ојачања.

Ламинати од карбонских влакана (ЦФРП ламинати) уграђени су на следећи начин: Најпре је на радном столу укројен ламинат „CarboDur S512“, који фабрички има димензије 50×1,2 mm, на потребне мере ради постизања исте аксијалне крутости са ЦФРП шипком Ø8 mm ($E_1A_1=E_2A_2$). Конкретно, за дебљину ламината од 1,2 mm усвојена ширина ламината износила је 34 mm. Затим је шпахтлом нанесен слој двокомпонентне епоксидне пасте у дебљини од приближно 1 mm (Слика 6-10).

На обележеном делу АБ греде такође је нанесен танак слој епоксида, без посебне обраде површине бетона (Слика 6-10).



Слика 6-10: Поступак уградње ФРП ламината у оквиру ЕБ методе ојачања

Ламинат је спојен са површином носача, а онда су ваљком истиснути ваздушни мехурови, чиме је ламинат причвршћен за бетонску површину. Вишак епоксида са обе стране ламината је одстрањен. По препоруци произвођача, носач се може оптеретити после 7 дана. Температурни услови који се захтевају при раду са епоксидом током лепљења ламината су исти као код уградње ФРП арматуре у оквиру НСМ методе.

6.4 Поставка експеримента и програм испитивања АБ носача



Слика 6-11: Диспозиција испитиваних гредних АБ носача (*experimental setup*)

Испитивање гредних АБ носача изложених савијању извршено је на тест машини лабораторије за мехатронику Машинског факултета у Нишу. Стручно особље и коришћена мерна опрема су из акредитоване Лабораторије за испитивање конструкција Грађевинско-архитектонског факултета у Нишу.

Програм испитивања обухватио је шест гредних АБ носача укупне дужине 3200 mm, статичког система „континуалац“ на два поља. Осовински распон између ослонаца износио је 1500 mm.

6.4.1 Процедура доношења оптерећења

Оптерећење је доношено хидрауличким уређајем, при чему је сила са клипа тест машине пренесена на носач у виду две концентрисане силе, које делују у средини оба поља на осовинском размаку од 1500 mm (Слика 6-11). За пренос оптерећења од

хидрауличког клипа искоришћене су две челичне шине дужине 2 m, а пренос оптерећења на АБ греду остварен је преко челичних плоча ширине 100 mm и челичних ваљака $\varnothing 30$ mm постављених између њих. Ослањање гредног носача остварено је такође преко челичних контактних плоча ширине 100 mm уз симулацију два покретна и једног непокретног лежишта. Наношење оптерећења имало је „временски мод“, односно константан прираштај угиба у функцији времена до лома. Брзина наношења оптерећења износила је 0,02 mm/s (1,2 mm/min).

6.4.2 Мерења

Током оптерећења праћене су глобалне деформације носача (угиб), дилатације у бетону, челичној и ФРП арматури, појава и развој прелина, све у функцији од нанетог оптерећења. Ради праћења понашања прелина у бетону бочна страна испитиване греде је шрафирана „шах пољем“ на 50 mm од доње ивице носача, а на сваких 5 kN заустављано је наношење оптерећења ради исцртавања прелина и мерења њиховог отвора. Развој прелина на дужини базе инструмената (100 mm) регистрован је континуално дилатомером. Паралелно је рађена фото документација, којом су бележени значајни детаљи понашања гредних носача.

6.4.3 Мерна опрема

1. Претварачи померања (LVDT)

Ради праћења померања употребљени су: Индуктивни претварачи померања LVDT (Linear Variable Displacement Transducers) W50 којима су мерени угиби и LVDT W20 као мерни елемент дилатомера конструисаног за мерење дилатација у затегнутој зони бетона. Њиме је регистрована и укупна ширина прелина на дужини базе од 100 mm у затегнутој зони АБ пресека (Слика 6-12).



Слика 6-12: Положај угибомера U_1 (LVDT) и дилатомера (D_1 и D_2)

2. Електро отпорни екстензометри (Мерне траке)

Мерење дилатација у арматури (челичној и ФРП), као и на горњој притиснутој површини бетона, вршено је електроотпорним екстензометрима, познатијим као „мерне траке“ – МТ („strain gauge“). За ова експериментална истраживања коришћене су МТ производње „Hottinger“ (НВМ) електричног отпора 120 Ω , са различитом дужином базе. На челичној арматури база је била 6 mm, на ЦФРП шипкама, ГФРП шипкама и ЦФРП ламинату 6 mm а на бетону 50 mm (Слика 6-13).



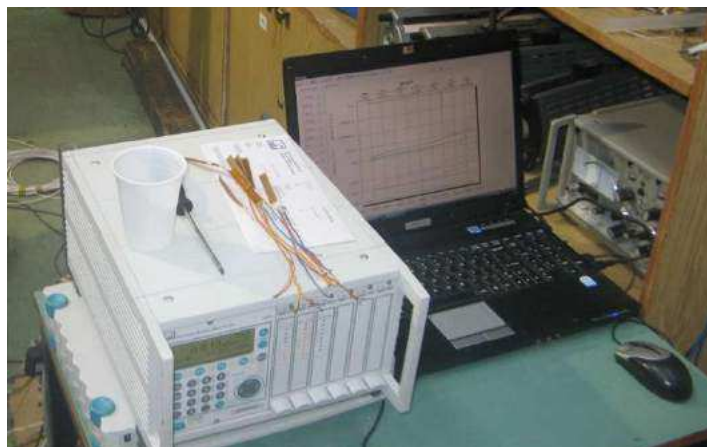
Слика 6-13: Мерне траке на бетону, челичној и ФРП арматури

С обзиром да се МТ на арматури (челичној и ФРП), заједно са арматуром, утапају у бетон односно епоксид, биле су заштићене на прописан начин. Лепљење мерних трака за арматуру (челичну и ФРП) изведено је лепком Z70 а на бетону лепком Х60 производње Хоттингер. На свакој греди залепљене су мерне траке на главној (челичној) арматури у затегнутој зони. Постављање МТ на додатној ФРП арматури је такође урађено у затегнутој зони.

Поред претходно поменутих електронских инструмената, коришћени су и механички компаратери (угибомери) ($p=1/100$ и $p=1/1000$) за праћење померања ослонаца, мерач прслина (ZDI-VDA са $p=0,05$ mm), лупа и оптички микроскоп чија је осетљивост мерења 0,05 mm. За мерење силе (оптерећења) коришћен је електронски динамометар (НВМ U2A) мерног опсега до 100 kN, тачности 0,5%.

3. Мерно-аквизицијски систем

За снимање сигнала са претварача за превођење механичких величина у електричне, односно за мерење померања (угиба) и локалних деформација (дилатација), коришћена је електронска мерна опрема немачког произвођача „Hottinger“ (НВМ), вишеканални мерно-аквизицијски системи MGC-plus и SPIDER 8 (Слика 6-14).



Слика 6-14: Мерно-аквизицијски системи MGC-plus и SPIDER 8

Коришћени претварачи повезани су преко аквизицијских система на рачунар, ради калибрације инструмената, очитавања и снимања података. Очитавање електронских инструмената вршено је аутоматски на 1 секунду (квази динамички), а снимање и обрада података је обављено преко софтверског пакета CATMAN (s/n 70341313408) такође фирме „Hottinger“.

6.5 Испитивања механичких карактеристика коришћених материјала (Пратећа испитивања материјала)

6.5.1 Самоуграђујући бетон

Паралелно са испитивањем АБ гредних носача вршено је и пратеће испитивање самоуграђујућег бетона ради одређивања њихових механичких карактеристика док су за челичну и ФРП арматуру усвојене карактеристике дате од стране произвођача.

Самоуграђујући бетон пројектоване марке МБ 30 израђен је машински у фабрици бетона грађевинског предузећа „Путинжењеринг“ по рецептури приказаној у Табели 6-2.

За справљање бетона коришћен је цемент СЕМ I 42.5 R произвођача HOLCIM, камено брашно добијено млевењем кречњака специфичне масе $2,692 \text{ g/cm}^3$ и адитив MC PowerFlow 1102, типа хиперпластификатор у складу са EN 934-2, који је у хемијском смислу модификовани поликарбоксилат. Дозирање адитива износило је 0,5 % у односу на масу прашкастих компоненти (цемент и камено брашно).

Табела 6-2: Састав бетона

	SCC kg/m ³
Цемент: СЕМІ 42,5R	320,00
Филер: Омуа Venčac	100,00
0 – 4 mm (46%)	807,50
4 – 8 mm (22%)	380,00
8 – 16 mm (32%)	553,00
Адитив: MC Powerflow	2,2
Вода	210,00

Пошто се радило о једној мешавини, запремине приближно 1 m³, пробне епрувете узете су за све греде истовремено (12 коцки ивице 150 mm и 6 цилиндара Ø150/300 mm). Епрувете су испитиване после 2, 7, 14, 28 дана и у тренутку испитивања греда. Испитивана је чврстоћа при притиску (СРПС ИСО 4012:2000), чврстоћа на затезање цепањем (СРПС ИСО 4108:2000) и модул еластичности бетона (СРПС ИСО 6784:2000).

1. Одређивање чврстоће при притиску

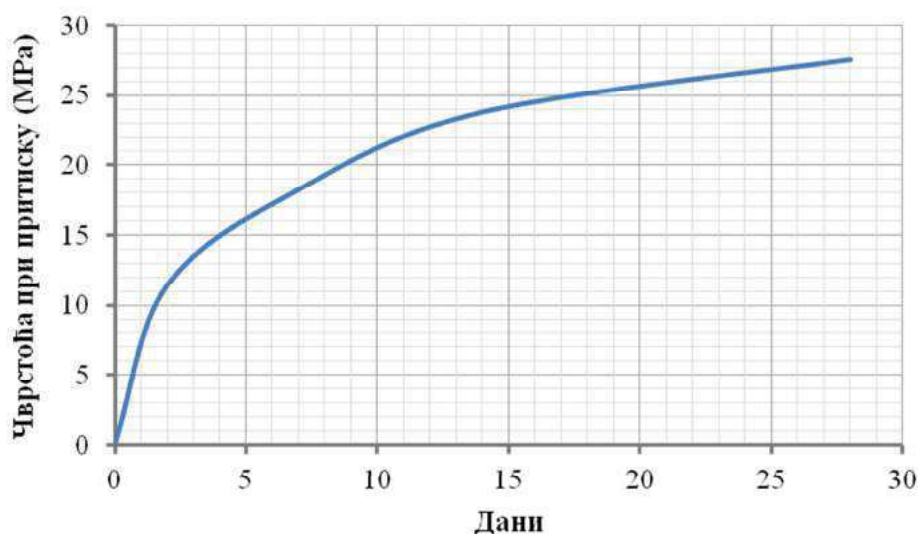
Одређивање чврстоће при притиску спроведено је на преси производње Controls, модел Automax 5, уз контролисани прираштај оптерећења од 0,5 МПа/s (Слика 6-15), а добијени резултати дати су табеларно у Табели 6-3 и у облику дијаграма (Слика 6-16).



Слика 6-15: Преса Controls - Automax 5 и читавање добијених вредности

Табела 6-3: Чврстоћа бетона при притиску

Старост бетона	Средња чврстоћа при притиску f_{sr} [MPa]	Стандардна девијација	Референтне вредности чврстоће f_b [MPa]
2	12,06	0,63	11,43
7	18,15	0,92	17,23
14	24,93	1,15	23,78
28	28,82	1,24	27,58
Испитивање греда	33,82	1,52	32,30



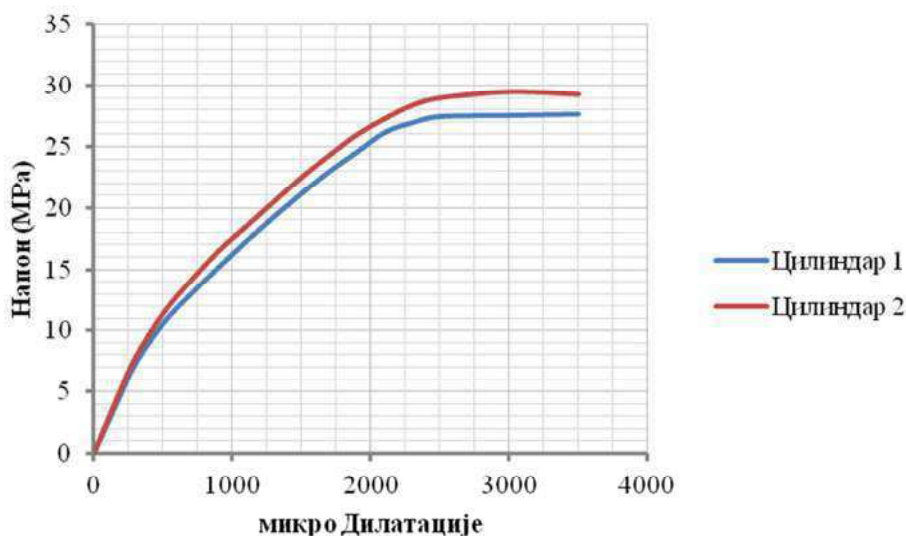
Слика 6-16: Графички приказ прираштаја чврстоће при притиску у функцији времена

За прорачуне је усвојена чврстоћа одређена у време испитивања гредних носача, за епрувете облика коцке, неговане у води чија је вредност $f_b = 32,30$ MPa. Тиме је успостављена веза чврстоће бетона испитиване једноосним оптерећењем епрувета и утегнутог бетона оптерећеног на савијање, а уједно је избегнут утицај старости бетона на резултате.

2. Одређивање дијаграма напон – дилатација у бетону при једноаксијалном притиску епрувета и одређивање чврстоће при притиску на цилиндричним епруветама

Због природе оптерећења које код испитивања гредних носача као и реалних конструкција, постепено расте од нуле до максималне вредности без растерећења, две епрувете (цилиндра) оптерећивани су притиском до лома ради утврђивања односа напона и дилатација у бетону. Из добијених дијаграма одређени су тангентни и

секантни модул еластичности у зависности од интезитета оптерећења. Уједно је дефинисана чврстоћа при притиску на цилиндричним епруветама.



Слика 6-17: Дијаграм зависности између напона и дилатације при једноаксијалном притиску

На основу добијених дијаграма закључује се да криве имају врло сличан нагиб, односно тангентни почетни модул еластичности. Тангентни модул еластичности E_T кретао се у границама између 15 и 27 МПа, зависно од нивоа напонског стања.

3. Одређивање статичког модула еластичности при притиску (секантни модул)

Статички модул еластичности одређен је у складу са важећим прописима (СРПС ИСО 6784:2000), на цилиндричним епруветама $\varnothing 150 \times 300$ mm, према диспозицији са *Слике 6-18*. Постављена су три претварача померања W20 распоређена у мерним линијама под углом од 120° , ради мерења дилатације под аксијалним притиском. База мерења износила је 100 mm и налазила се у средњој трећини епрувете. Испитивање је спроведено на преси НРМ 3000 која има могућност контролисаног уноса силе у оба смера (оптерећење и растерећење), што захтева процедура прописа.

У складу са процедуром изведена су најпре три циклуса предоптерећења (у еластичном подручју) од основног напона $\sigma_b = 0,5$ МПа до $\sigma_a = 1/3 \cdot f_c'$, при чему су очитане вредности одговарајућих дилатација ϵ_b и ϵ_a . У завршном циклусу оптерећење је наносено до лома епрувете.



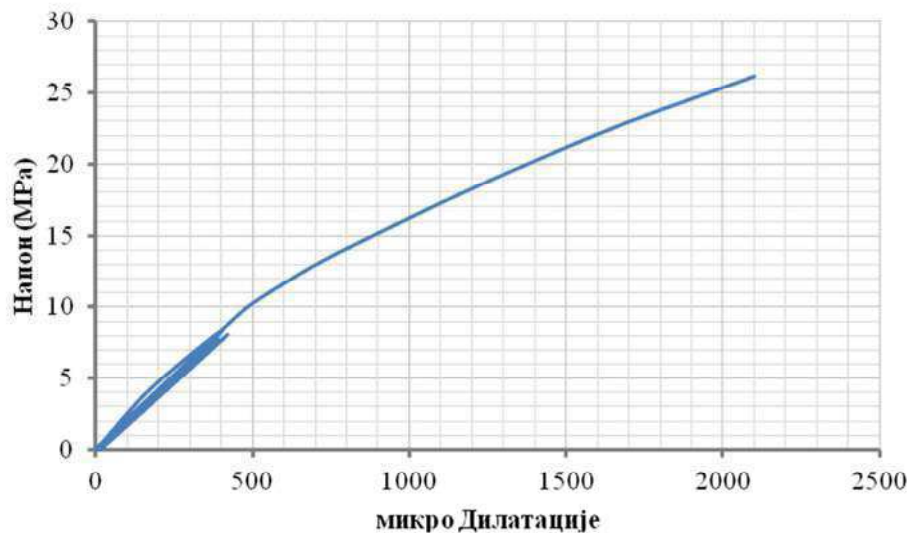
Слика 6-18: Диспозиција епрувета за испитивање дијаграма зависности између напона и дилатације и одређивање статичког модула еластичности

Израчунавање статичког модула еластичности при притиску врши се према једначини:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}, \quad (6-1)$$

при чему су величине ε_a и ε_b добијене као средње вредности на различитим мерним линијама.

Карактеристични дијаграм напон-дилатација (σ - ε) приликом одређивања статичког модула еластичности дати су на *Слици 6-19*.



Слика 6-19: Дијаграм зависности између напона и дилатације код испитивања секантног модула еластичности спроведен на цилиндричној епрувети

Вредност секантног модула еластичности дефинисана на основу регистрованих вредности тежишних дилатација при одговарајућем нивоу напона:

епрувета 1: 23,56 МПа

епрувета 1: 27,72 МПа

епрувета 1: 24,77 МПа

4. Одређивање чврстоће бетона при затезању цепањем

Чврстоћа бетона при затезању одређена је на цилиндричним епруветама $\text{Ø}150 \times 300 \text{ mm}$ у складу са SRPS ISO 4108:2000, коришћењем трака за налегање према диспозицији са *Слике 6-21*.



Слика 6-20: Диспозиција епрувета за испитивање чврстоће при затезању цепањем (пре и после оптерећења)

Оптерећење је нанешено континуално $0,06 \text{ N}/(\text{mm}^2\text{s})$ све до лома, при чему је забележена максимална сила од 240 kN. Лом је настао по висини епрувете (*Слика 6-20*).

Чврстоћа на затезање одређена цепањем f_{ct} (N/mm^2) дата је једначином:

$$f_{ct} = \frac{2 F}{\pi l d}, \quad (6-2)$$

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot 240000}{\pi \cdot 300 \cdot 150} = 3,44 \text{ МПа}, \quad (6-3)$$

6.5.2 Арматура

Арматура (челична и ФРП) није испитивана већ су усвојене карактеристике челичне арматуре добијене од стране произвођача док су за ФРП арматуру усвојене

карактеристике добијене испитивањем у Лабораторији машинског факултета у Нишу (Ранковић, 2010). Ради компарације дати су и фабрички подаци за ФРП арматуру.

Табела 6-4: Вредности механичких карактеристика челичне арматуре и ФРП арматуре

Назив арматуре	Пречник	Модул еластичности [МПа]	Гранична дилатација $\epsilon \times 10^{-6}$	Граница течења [МПа]	Гранични напон [МПа]	Фабрички подаци	
						E	f _u
челична арматура	Ø8	205000	-	400	500	205000	500
C-rod	Ø8	148100	13434	-	1940	150000	2000
G-rod	Ø10	47000	15635	-	735	40800	760
S 512 CarboDur		165000	17000	-	3100	165000	3100

6.6 Резултати експерименталних испитивања и њихова анализа

6.6.1 Опште напомене

Доминантно место у спроведеним експерименталним истраживањима заузимају резултати добијени испитивањем континуалних гредних носача под дејством краткотрајног статичког оптерећења.

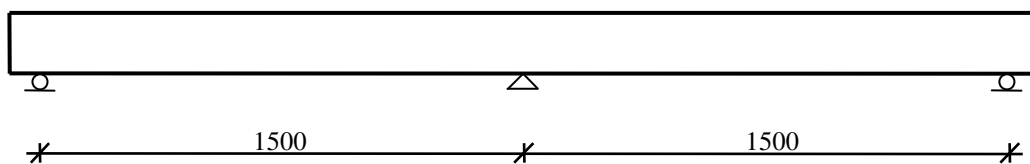
Вредности мерених величина (померања и локалних деформација), услед дејства статичког оптерећења, очитаване су квази динамички (сваке секунде), а затим су обрађиване у Екселу (*Excel*) и Кетмену (*Catman*). Излазни резултати приказани су у облику дијаграма, из којих је могуће најпрегледније пратити мерене параметре у функцији нанетог оптерећења (угиби и дилатације). Резултати су дати најпре појединачно за сваки испитани носач, а затим је спроведена њихова појединачна и упоредна анализа.

6.6.2 Ознаке, детаљи и варијанте ојачања испитиваних континуалних гредних носача

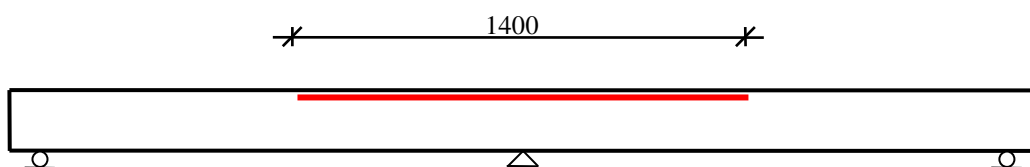
За испитивање су изабране следеће варијанте АБ континуалних гредних носача:

1. Б-Кон (В-Con – Beam Control): Контролна (неојачана) греда;
2. Б-Г1 (В-G1 – Beam Glass 1): Греда ојачана ГФРП арматурном шипком $\varnothing 10$ у горњој зони над средњим ослонцем (*Слика 6-21 (а)*);
3. Б-Г2 (В-G2 – Beam Glass 2): Греда ојачана ГФРП арматурним шипкама $\varnothing 10$ у доњој зони оба поља носача (*Слика 6-21 (б)*);
4. Б-Г3 (В-G3 – Beam Glass 3): Греда ојачана ГФРП арматурном шипкама $\varnothing 10$ у горњој зони над средњим ослонцем и у доњој зони оба поља носача (*Слика 6-21 (в)*);
5. Б-Ц (В-C – Beam Carbon): Греда ојачана ЦФРП арматурном шипкама $\varnothing 8$ у горњој зони над средњим ослонцем и у доњој зони оба поља носача (*Слика 6-21 (г)*);
6. Б-ЕЦ (В-EC – Beam External Carbon): Греда ојачана ЦФРП ламинатом $d_{\text{фр}}=1,4$ mm у горњој зони над средњим ослонцем и у доњој зони оба поља носача (*Слика 6-21 (д)*).

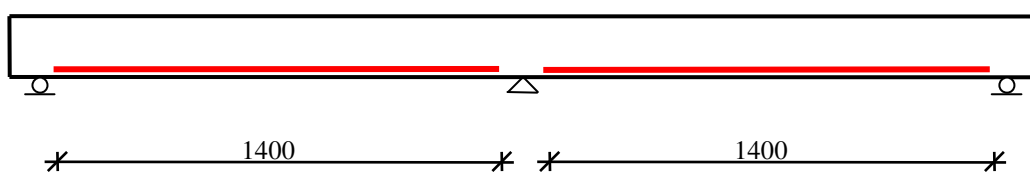
Б-Кон



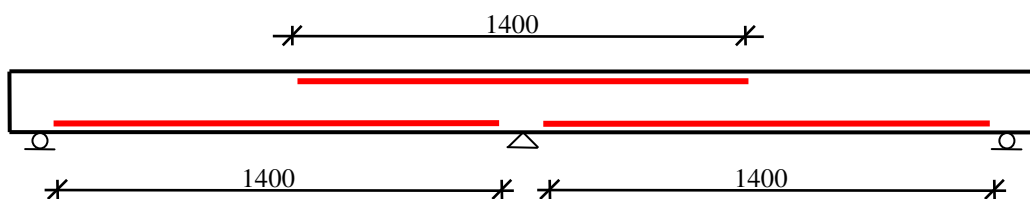
Б-Г1



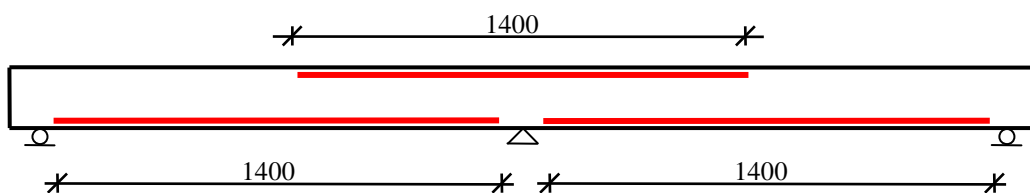
Б-Г2



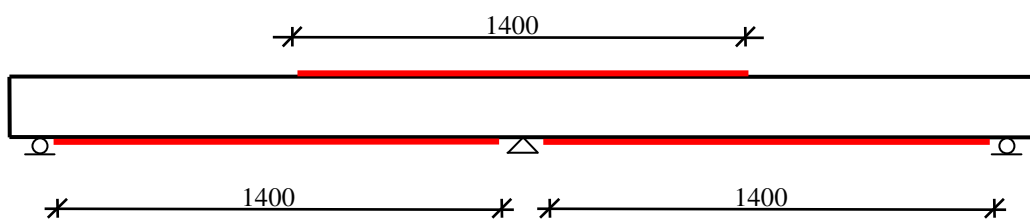
Б-Г3



Б-Ц1



Б-ЕЦ



Слика 6-21: Варијанте ојачања испитиваних гредних носача

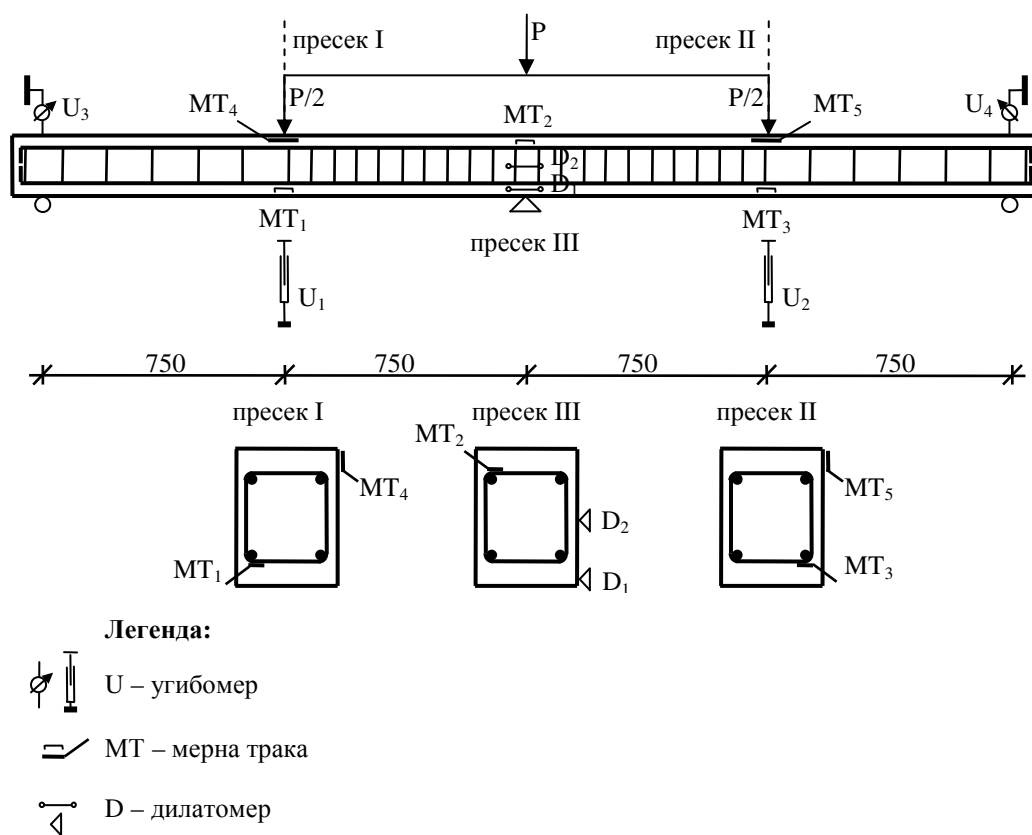
6.6.3 Резултати испитивања

Контролни гредни носач (Б-Кон)

Контролна (неојачана) греда и њена диспозиција при испитивању приказана је на *Слици 6-22*, док је распоред мерних инструмената приказан на *Слици 6-23*.



Слика 6-22: Диспозиција контролног гредног носача пре оптерећења и под оптерећењем



Слика 6-23: Распоред инструмената на контролној греди

Табела 6-5: Приказ мерених величина и коришћених инструмената

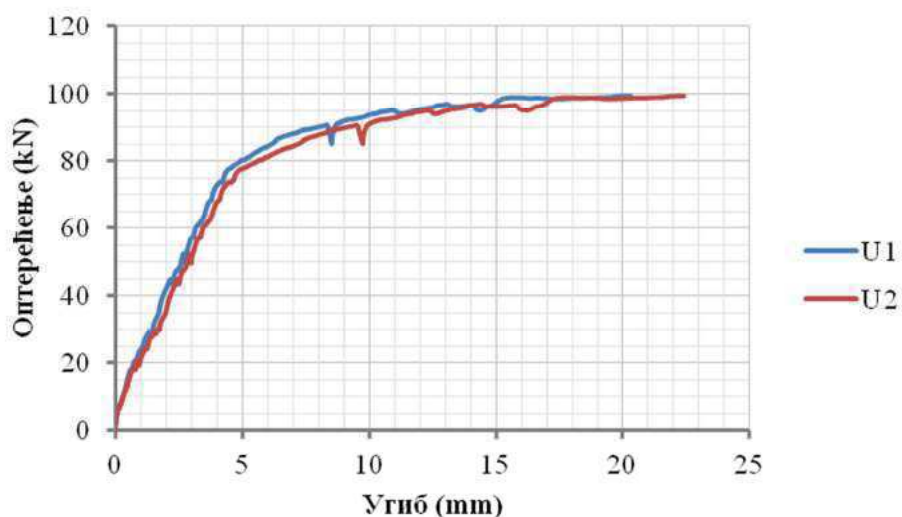
Мерена величина	Мерни инструмент	Ознака инструмента	Положај инструмента	Дужина базе инструмента или опсег инструмента	Податак инструмента
Сила	Динамометар	Din	L/2	100 kN	(0,5 %)
Угиб	LVDT – W50	U1, U2	L/4	50 mm	1/1000 mm
Угиб	LVDT – W50	U3, U4	Ослонац	5 mm	1/1000 mm
Дилатација	Дилатомер	D1	L/2	100 mm	10×10^{-6}
Дилатација	Дилатомер	D2	L/2	100 mm	10×10^{-6}
Дилатација	Мерна трака	MT1, MT3	L/4 (челик)	6	1×10^{-6}
Дилатација	Мерна трака	MT2	L/2 (челик)	6	1×10^{-6}
Дилатација	Мерна трака	MT4, MT5	L/4 (бетон)	50	1×10^{-6}

Ток експеримента

Оптерећење је наношено у тзв. „временском моду“, са брзином прираштаја угиба од 0,02 mm/s и заустављано је на сваких 5 kN ради праћења појаве, развоја и ширине прслина које су бележене различитим бојама према тренутку настанка на претходно шрафираној бочној површини греде.

Распоред примењених инструмената приказан је на *Слици 6-23*. За праћење угиба коришћени су индуктивни претварачи W50 (LVDT) постављени у средини оба поља. Померање ослонаца праћено је угибомер сатовима са податком 1/100 mm. Дилатације у притиснутом влакну бетона у средини оба поља регистроване су мерним тракама са базом од 50 mm. Дилатације у челичној арматури праћене су мерним тракама према датом распореду (*Слика 6-23*). Дилатомери са базом од 100 mm су постављени над средњим ослонцем, по висини пресека, ради регистравања дилатација на бетону.

Мерени угиби и дилатације приказани су у функцији оптерећења, а као последица прекида у наношењу оптерећења на сваких 5 kN, ради снимања прслина, криве нису у потпуности глатке.

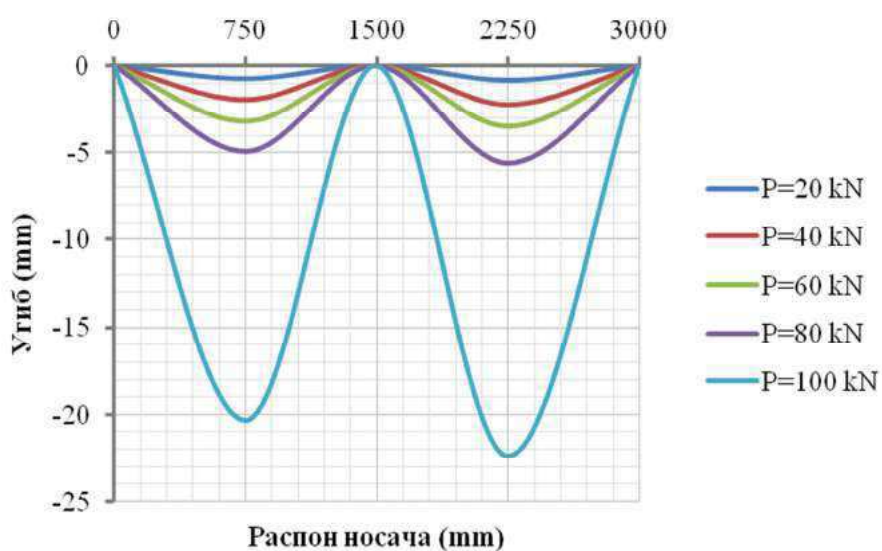


Слика 6-24: Дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U_1) и пресеку II (U_2) контролне греде

На дијаграму зависности између оптерећења и угиба (Слика 6-24) могу се уочити три карактеристичне области:

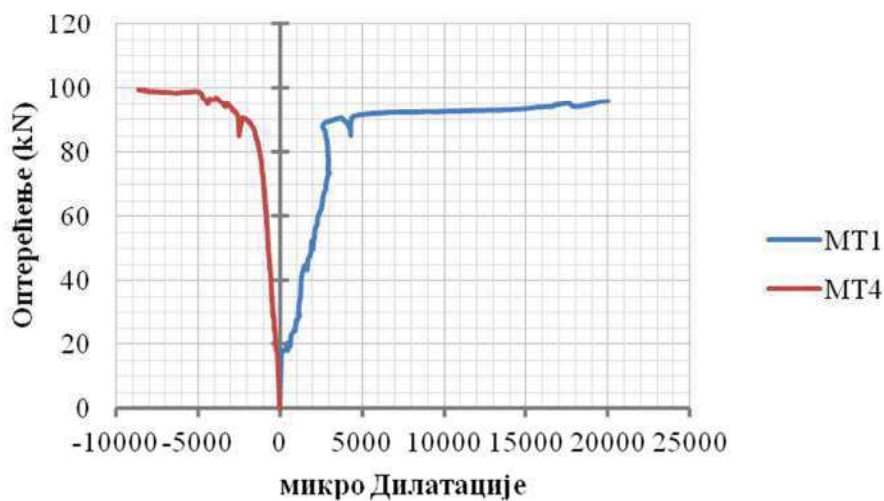
- ✓ пре појаве прслина,
- ✓ после појаве прслина, а пре појаве течења челичне арматуре и
- ✓ после појаве течења челичне арматуре до лома пресека.

На Слици 6-25 дат је графички приказ угиба у зависности од нивоа оптерећења.

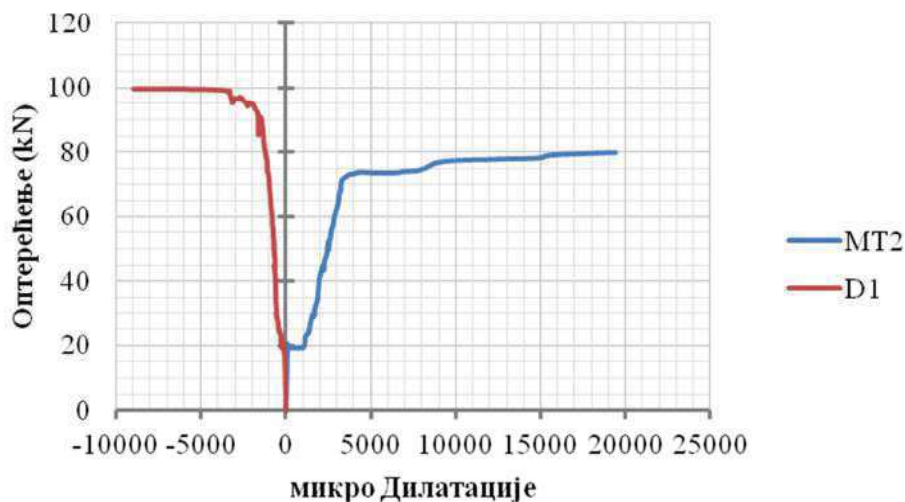


Слика 6-25: Графички приказ угиба контролне греде у зависности од нанетог оптерећења

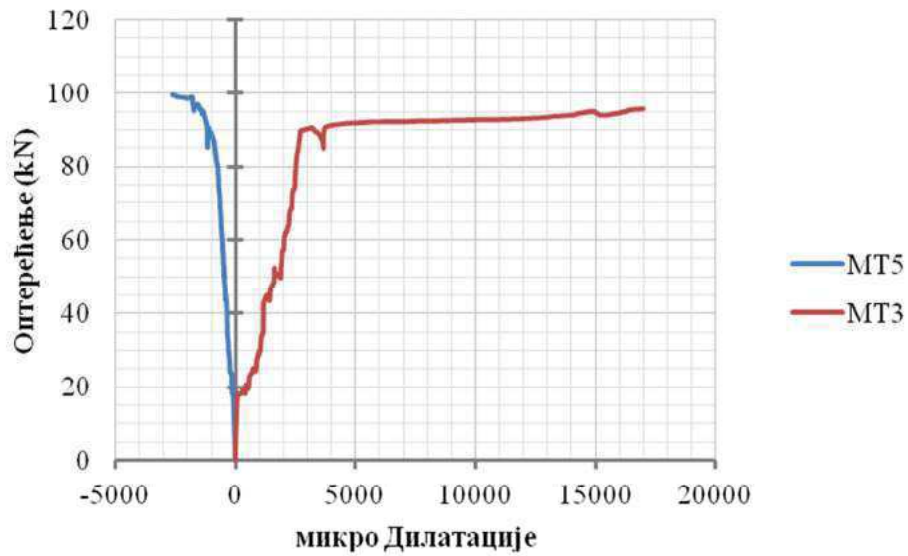
Дијаграми зависности између оптерећења и дилатације добијени при оптерећивању контролне греде дати су на *Слици 6-26* (пресек I), *6-27* (пресек II) и *6-28* (пресек III). На основу ових дијаграма може се константовати да су дилатације линеарне и занемарљиво мале до појаве прслина, а да након тога нелинеарно расту. Уочава се појава течења арматуре најпре у пресеку над средњим ослоном, при оптерећењу од 75 kN (*Слика 6-27*). Појава течења арматуре у пресеку у средини распона јавља се при оптерећењу од приближно 90 kN (*Слике 6-26* и *6-28*). У сва три карактеристична пресека долази до мрвљења бетона при максималном оптерећењу од 100 kN.



Слика 6-26: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT4) и челичној арматури (MT1) у пресеку I контролне греде

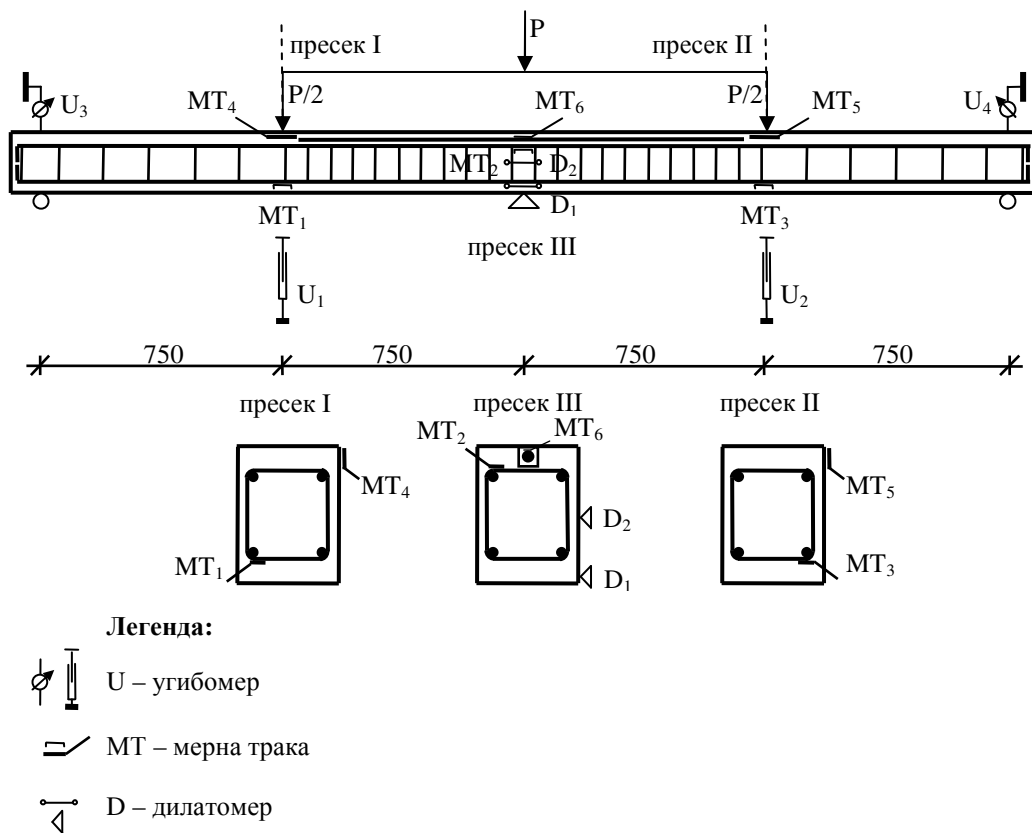


Слика 6-27: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (D1) и челичној арматури (MT2) у пресеку II контролне греде



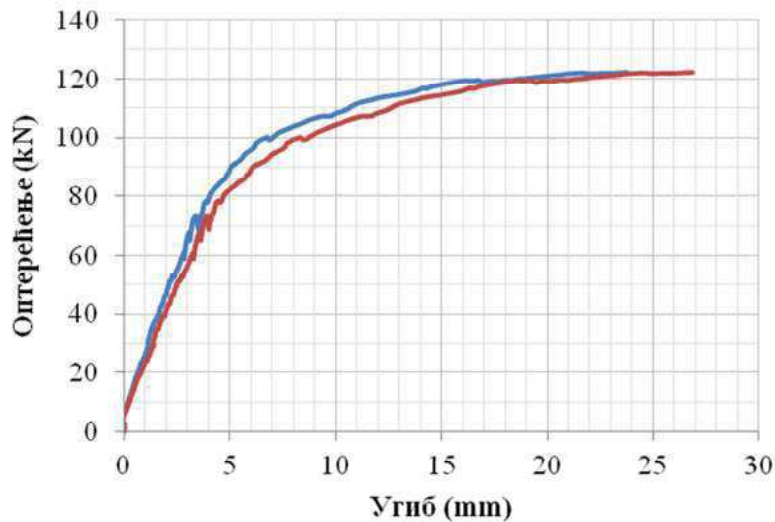
Слика 6-28: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT5) и челичној арматури (MT3) у пресеку III контролне греде

Континуални гредни носач Б-Г1



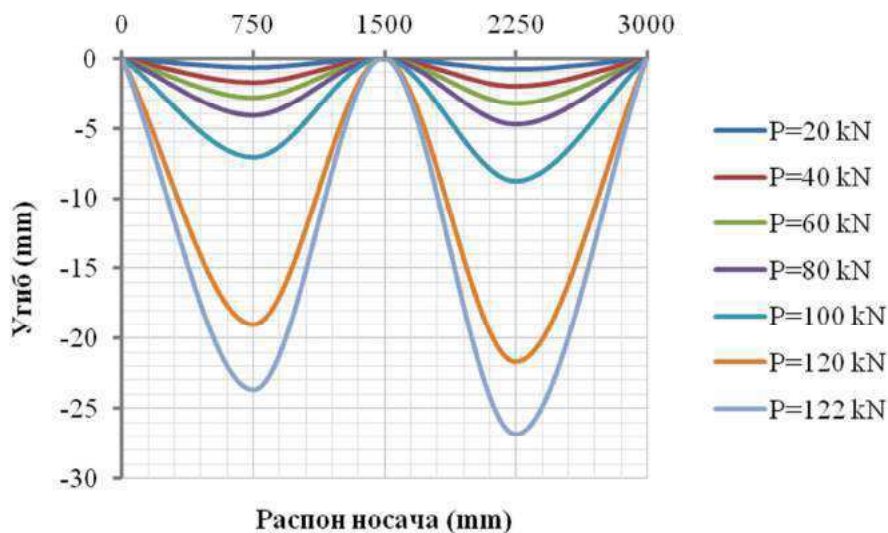
Слика 6-29: Распоред инструмената на гредном носачу Б-Г1

Иако су криве зависности између оптерећења и угиба греде ојачане ГФРП арматуром у зони негативних момената (Слика 6-30) по облику сличне као код неојачане, контролне греде, максимално оптерећење је веће (22 %) при чему су и вредности максималних мерених угиба веће што указује на добру дуктилност носача.



Слика 6-30: Дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U_1) и пресеку II (U_2) греде Б-Г1

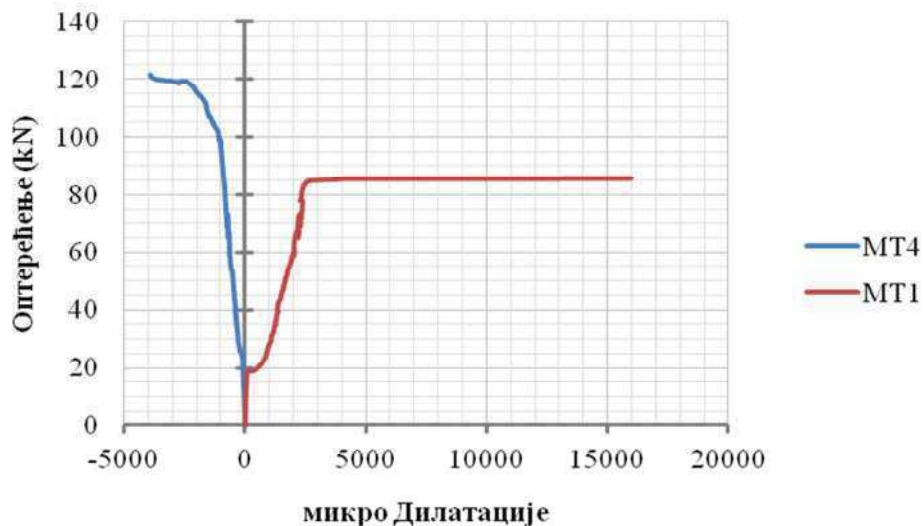
На Слици 6-31 дат је графички приказ угиба гредног носача Б-Г1, у зависности од нанетог оптерећења.



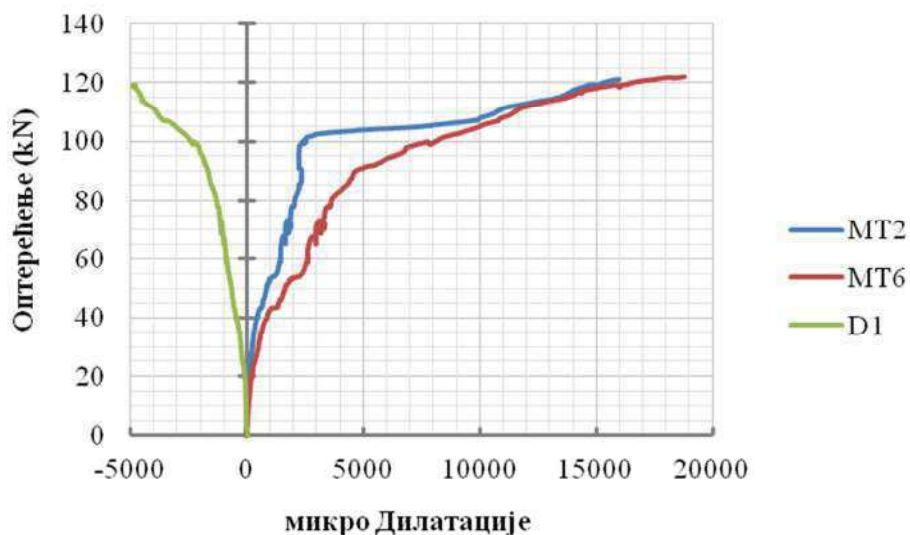
Слика 6-31: Графички приказ угиба у зависности од нанетог оптерећења греде Б-Г1

Дијаграми зависности између оптерећења и дилатација добијени при оптерећивању греде Б-Г1 дати су на Сликама 6-32 (пресек I), 6-33 (пресек II) и 6-34

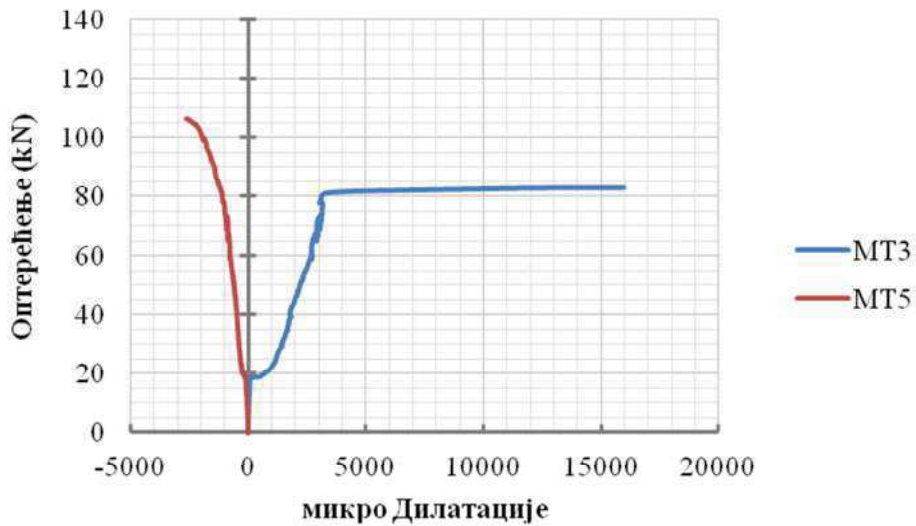
(пресек III). Уочава се појава течења арматуре најпре у пресеку у средини оба поља, при оптерећењу од приближно 80 kN (Слике 6-27 и 6-29). Појава течења основне (челичне) арматуре у пресеку над средњим ослонцем јавља се при оптерећењу од приближно 100 kN, после чега силу затезања прима додатна ГФРП арматура (Слика 6-33). При оптерећењу од 122 kN долази до мрвљења бетона и лома тог пресека, што је уједно и максимално оптерећење које греда може да прими.



Слика 6-32: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT4) и челичној арматури (MT1) у пресеку I греде Б-Г1

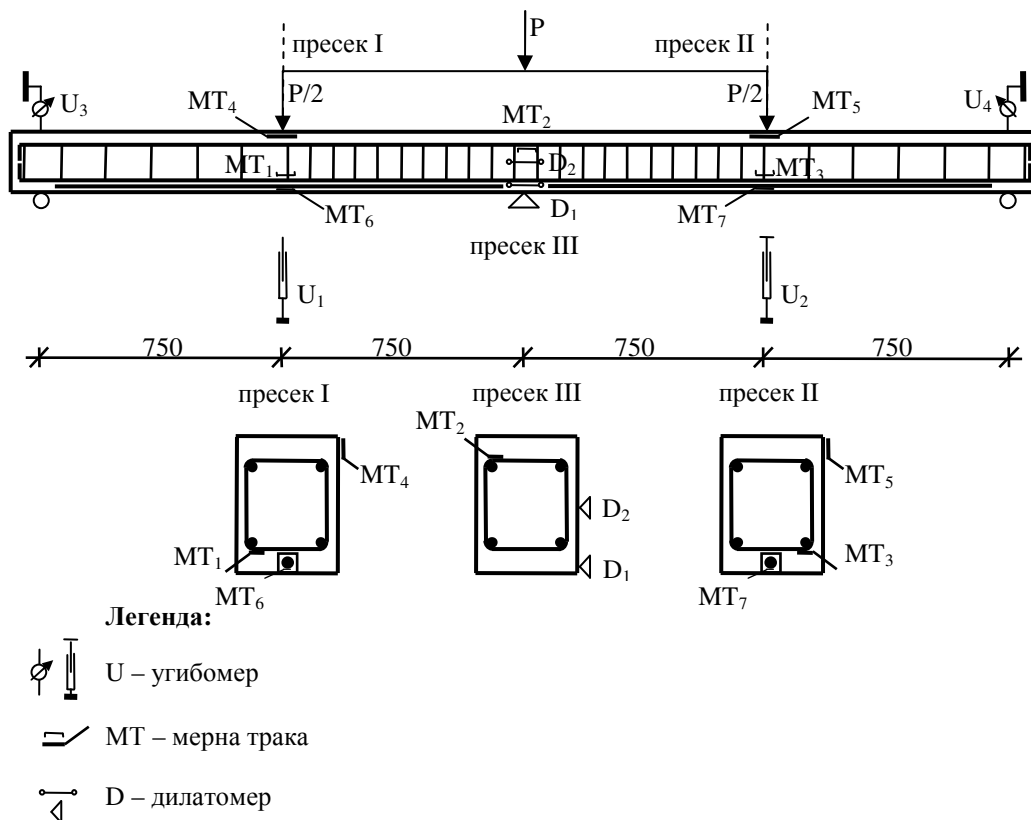


Слика 6-33: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (D1), челичној арматури (MT2) и ФРП арматури (MT6) у пресеку II греде Б-Г1



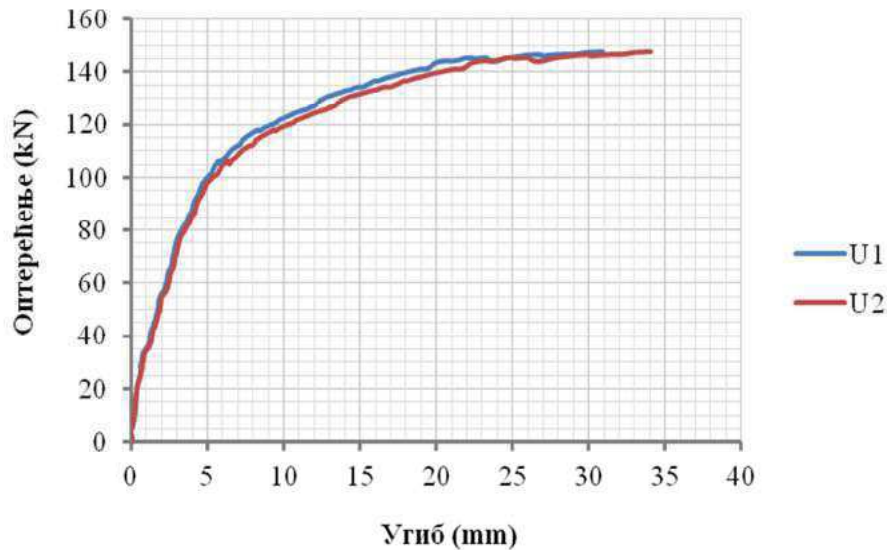
Слика 6-34: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT5) и челичној арматури (MT3) у пресеку III греде Б-Г1

Континуални гредни носач Б-Г2



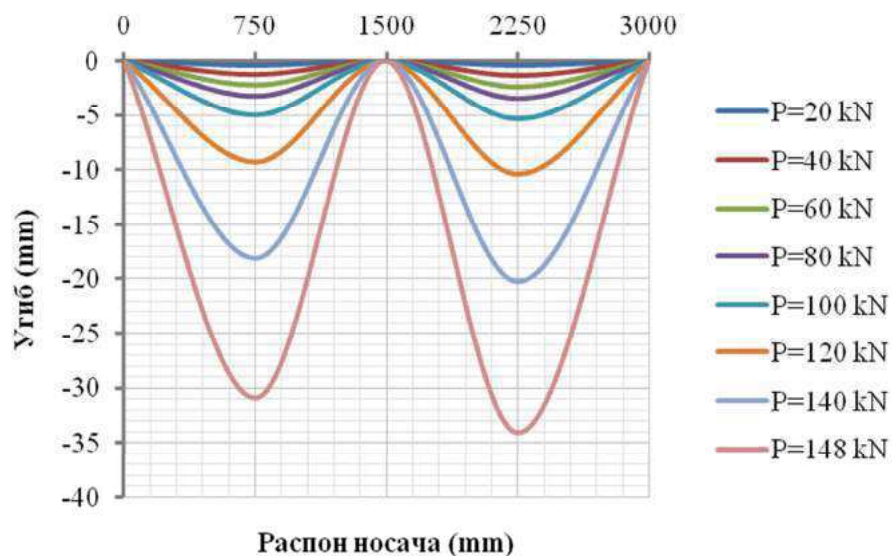
Слика 6-35: Распоред инструмента на гредном носачу Б-Г2

На дијаграму зависности између оптерећења и угиба у случају греде ојачане у зонама позитивних момената (Б-Г2) могу се уочити карактеристичне области при наношењу оптерећења: 1) до појаве првих прлина, 2) од појаве првих прлина до појаве течења у челичној арматури и 3) од појаве течења челичне арматуре до лома (Слика 6-36). Максимално остварено оптерећење је значајно веће (48 %), а долази и до повећања максималног угиба, што указује на добру дуктилност на овај начин ојачаног гредног носача.



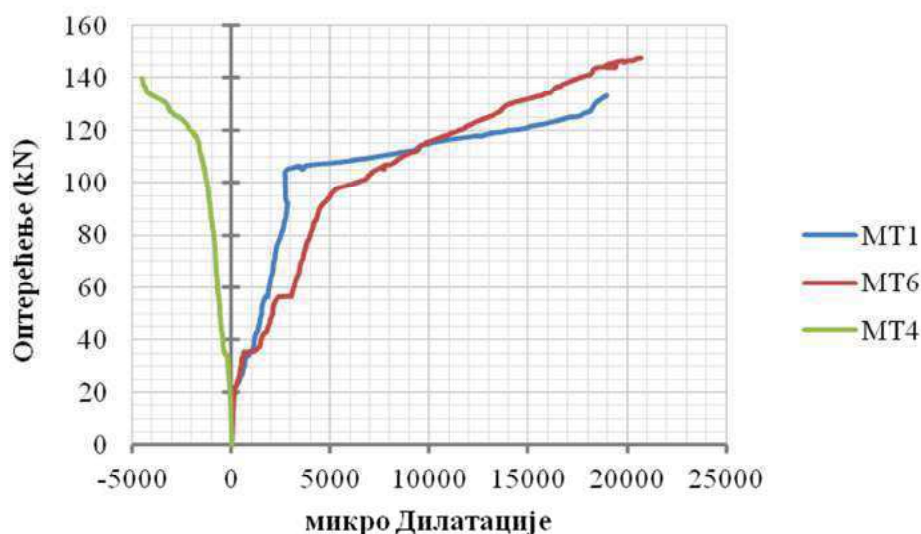
Слика 6-36: Дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U_1) и пресеку II (U_2) греде Б-Г2

На Слици 6-37 дат је графички приказ угиба гредног носача Б-Г2 ојачаног ГФРП арматуром, у зависности од нанетог оптерећења.

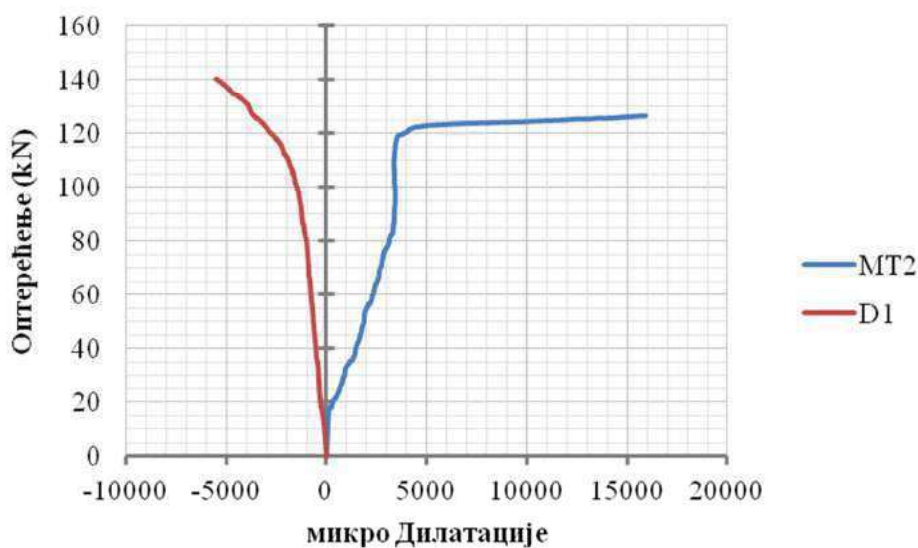


Слика 6-37: Графички приказ угиба у зависности од нанетог оптерећења греде Б-Г2

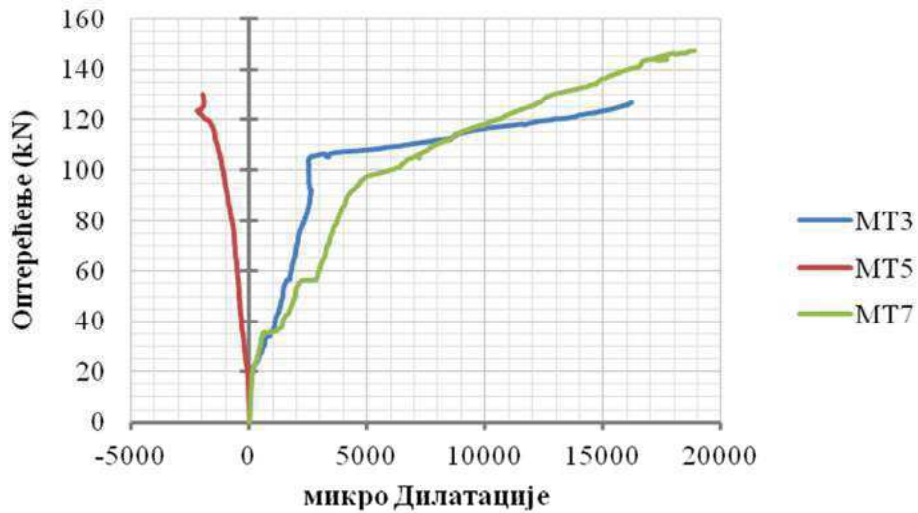
Дијаграми зависности између оптерећења и дилатација у бетону, челичној и ФРП арматури добијени при оптерећивању греде Б-Г2 дати су на *Сликама 6-38* (пресек I), *6-39* (пресек II) и *6-40* (пресек III). Уочава се појава течења арматуре најпре у пресеку у средини поља, при оптерећењу од приближно 110 kN (*Слике 6-38* и *6-40*), после чега силу затезања прима додатна ФРП арматура. Појава течења арматуре у пресеку над средњим ослоном јавља се при оптерећењу од приближно 120 kN (*Слика 6-39*). При оптерећењу од 140 kN долази до мрвљења бетона и лома тог пресека.



Слика 6-38: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (МТ4), челичној арматури (МТ1) и ФРП арматури (МТ6) у пресеку I греде Б-Г2

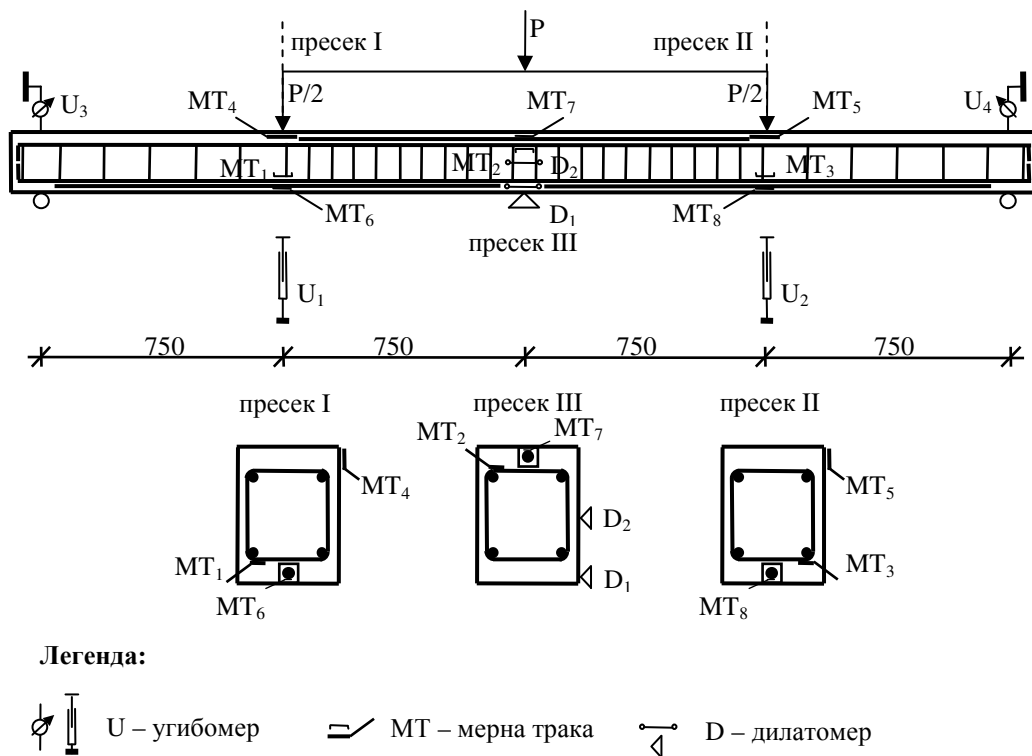


Слика 6-39: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (D1) и челичној арматури (МТ2) у пресеку II греде Б-Г2



Слика 6-40: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT5), челичној арматури (MT3) и ФРП арматури (MT7) у пресеку III гредe Б-Г2

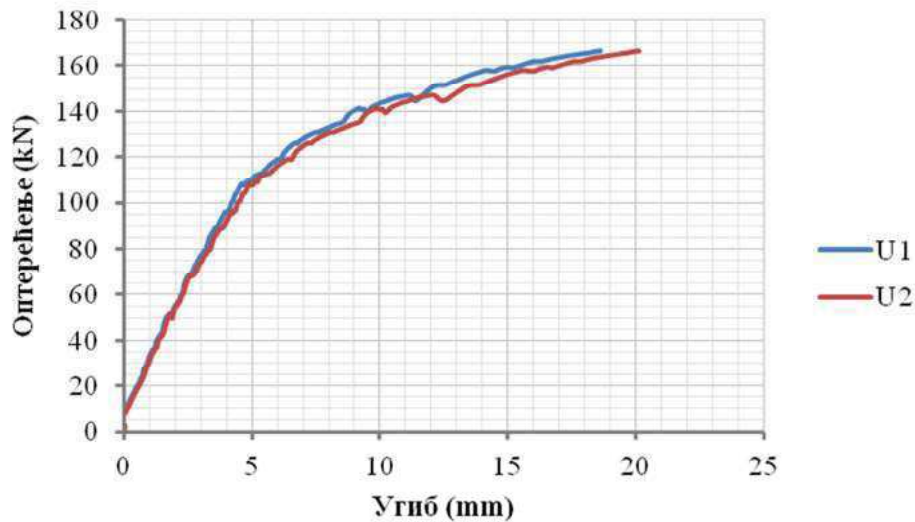
Континуални гредни носач Б-Г3



Слика 6-41: Распоред инструмената на гредном носачу Б-Г3

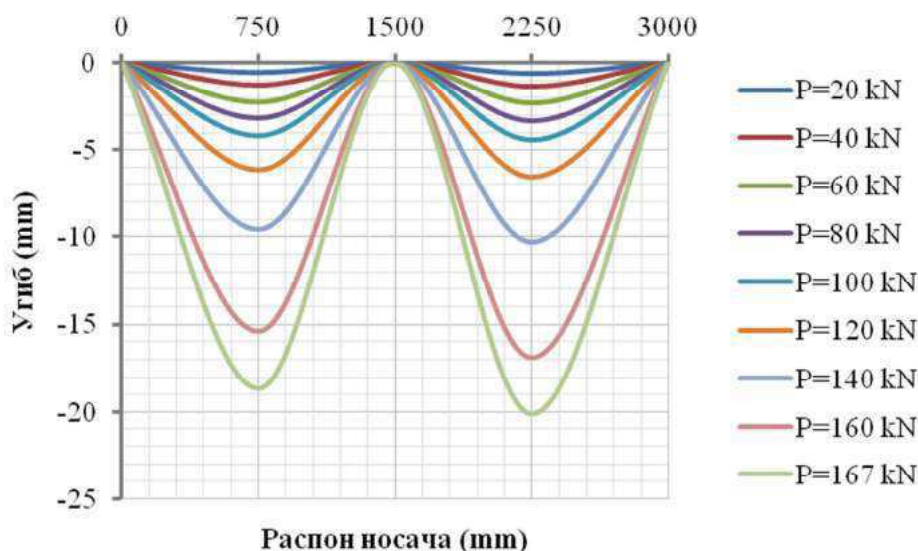
Криве зависности између оптерећења и угиба у случају гредног носача Б-Г3 по облику су сличне као код контролне гредe (Слика 6-42). Максимално оптерећење ($P_u =$

167 kN) је веће како у односу на контролну тако и у односу на гредне ојачане ГФРП арматуром (Б-Г1 и Б-Г2). За разлику од оптерећења, вредности максималних угиба су мање у односу на гредне носаче Б-Г1 и Б-Г2 што указује на смањену дуктилност овог носача.



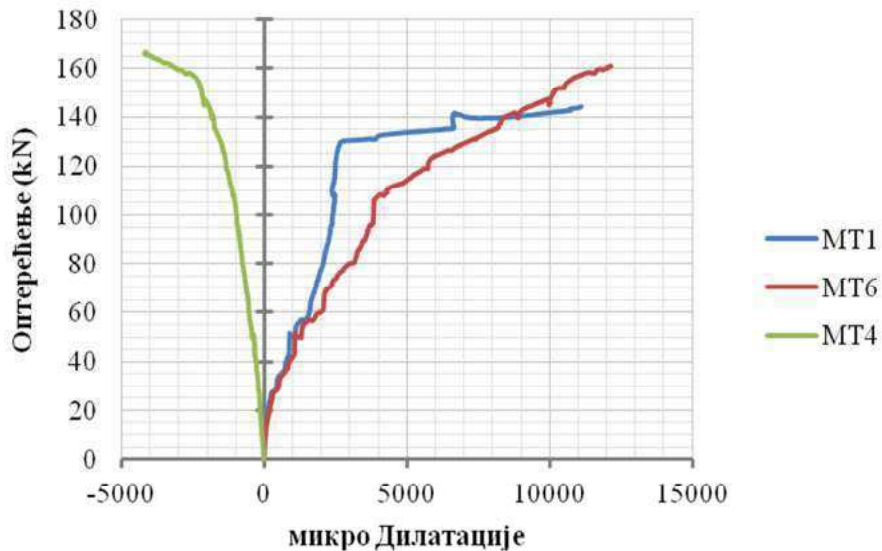
Слика 6-42: Дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U_1) и пресеку II (U_2) греде Б-Г3

На Слици 6-43 дат је графички приказ угиба гредног носача Б-Г3 ојачаног ГФРП арматуром, у зависности од нанетог оптерећења.

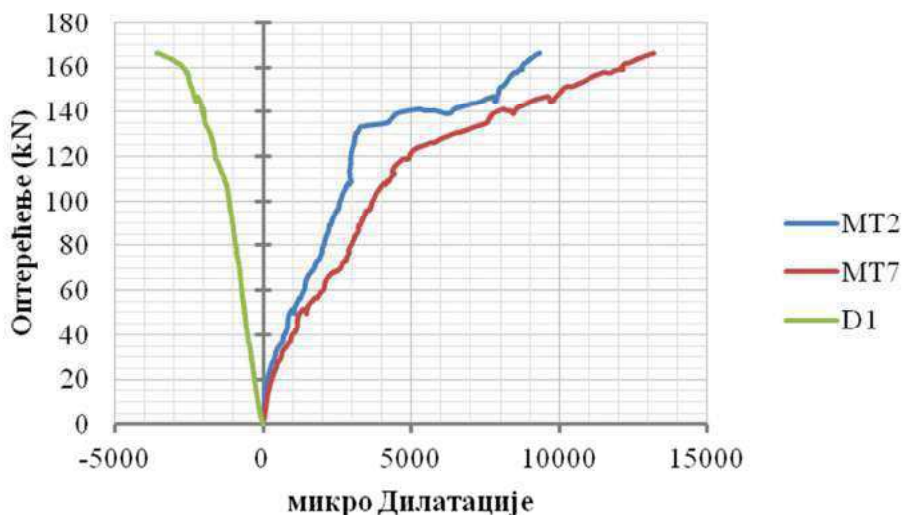


Слика 6-43: Графички приказ угиба у зависности од нанетог оптерећења греде Б-Г3

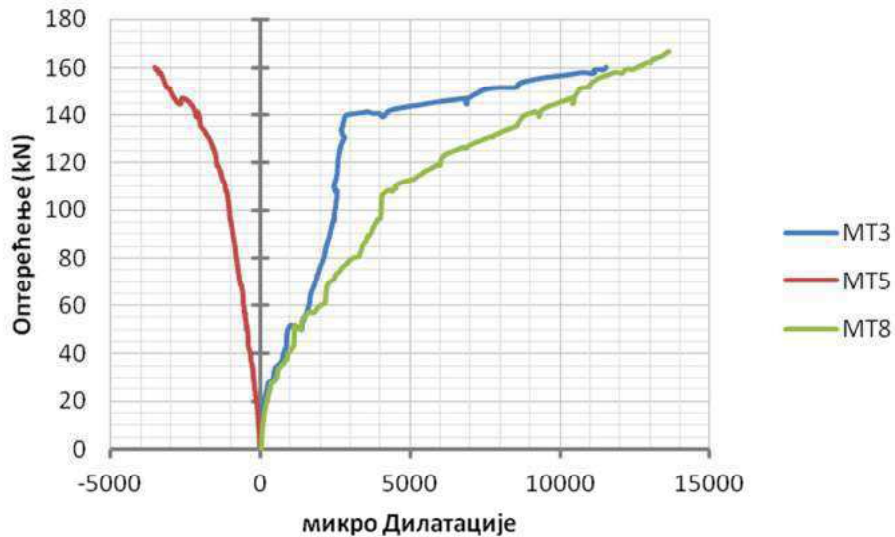
Дијаграми зависности између оптерећења и дилатација у бетону, челичној и ФРП арматури добијени при оптерећивању гредног носача Б-Г3 дати су на *Сликама 6-44* (пресек I), *6-45* (пресек II) и *6-46* (пресек III). Уочава се појава течења арматуре при оптерећењу од приближно 130 kN (*Слике 6-44* до *6-46*), после чега силу затезања прима додатна ФРП арматура. Дијаграми дилатација су линеарни до појаве прелина у бетону, после чега попримају нелинеаран прираштај.



Слика 6-44: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT4), челичној арматури (MT1) и ФРП арматури (MT6) у пресеку I греде Б-Г3

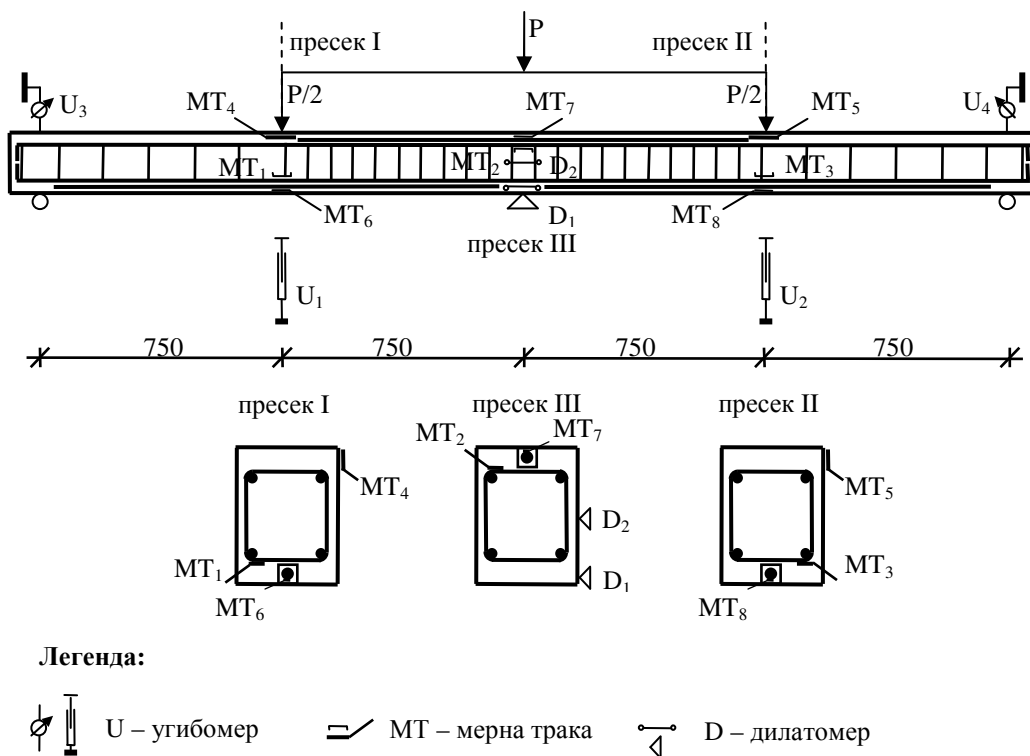


Слика 6-45: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (D1), челичној арматури (MT2) и ФРП арматури (MT7) у пресеку II греде Б-Г3



Слика 6-46: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT5), челичној арматури (MT3) и ФРП арматури (MT8) у пресеку III греде Б-Г3

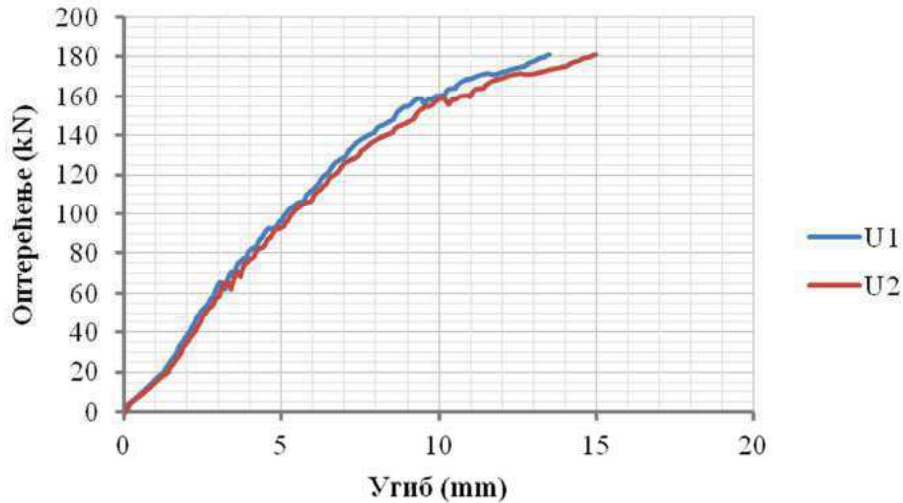
Континуални гредни носач Б-Ц



Слика 6-47: Распоред инструмената на гредном носачу Б-Ц

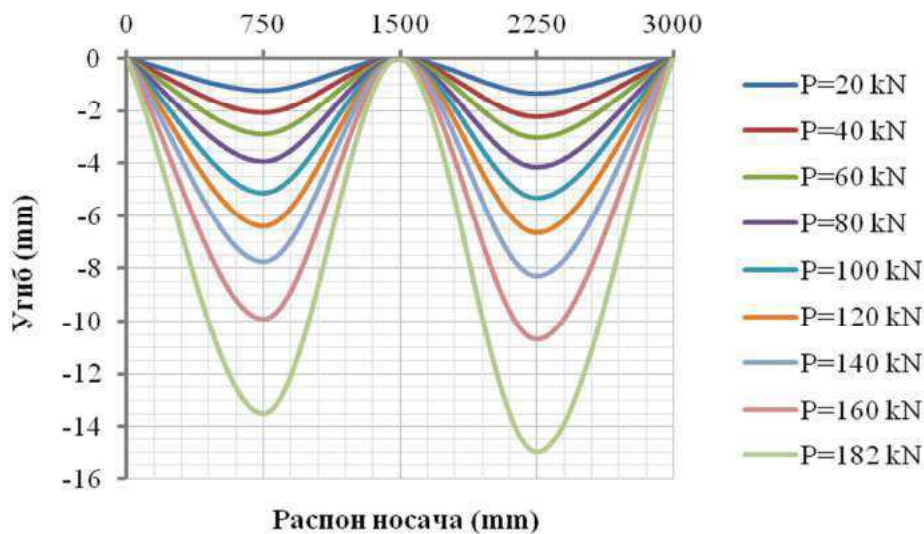
Криве зависности између оптерећења и угиба гредног носача ојачаног ЦФРП арматуром разликују се од оних код гредних носача ојачаних ГФРП арматуром (Слика

6-48). Мада се и даље уочавају три карактеристичне зоне, зона после појаве течења челичне арматуре је краћа у односу на греде ојачане арматуром од стаклених влакана. Максимално оптерећење је веће у односу на контролну греду за 82 % док су вредности максималних угиба мање што указује на малу дуктилност овако ојачаног носача.



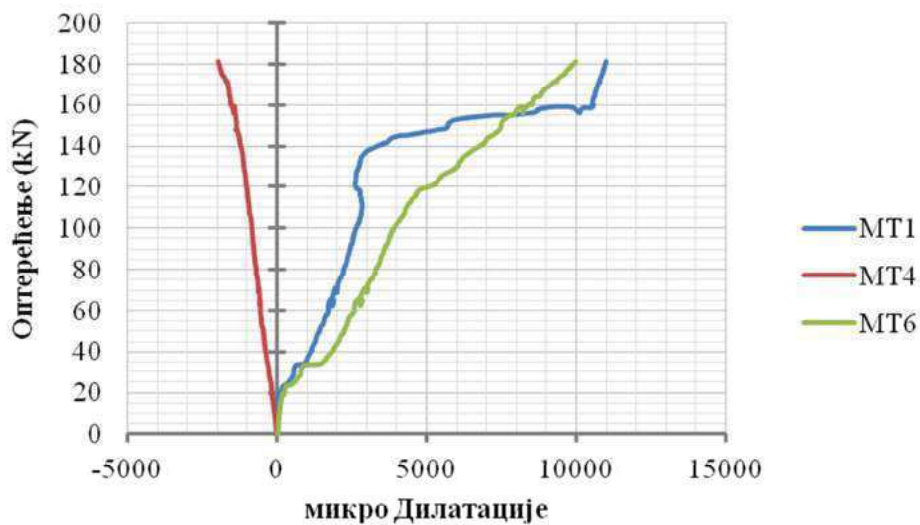
Слика 6-48: Дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U_1) и пресеку II (U_2) греде Б-Ц

На Слици 6-31 дат је графички приказ угиба греде Б-Г1, у зависности од нанетог оптерећења.

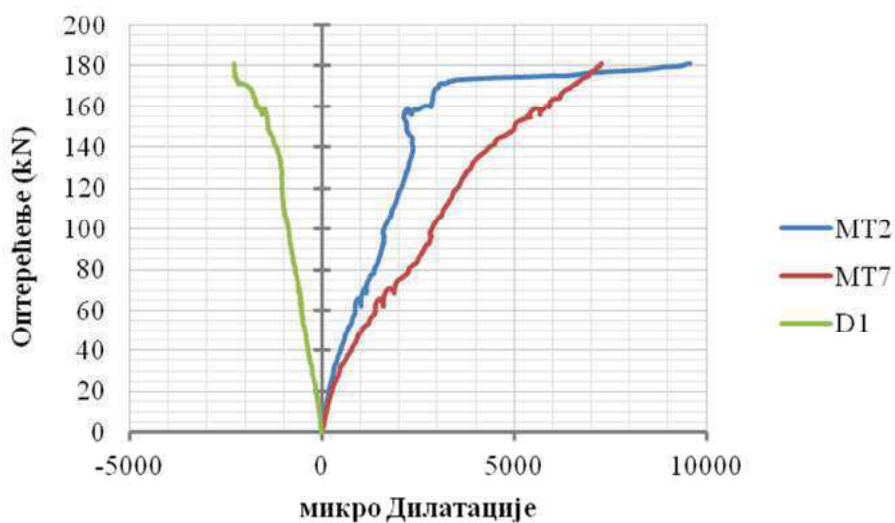


Слика 6-49: Графички приказ угиба у зависности од нанетог оптерећења греде Б-Ц

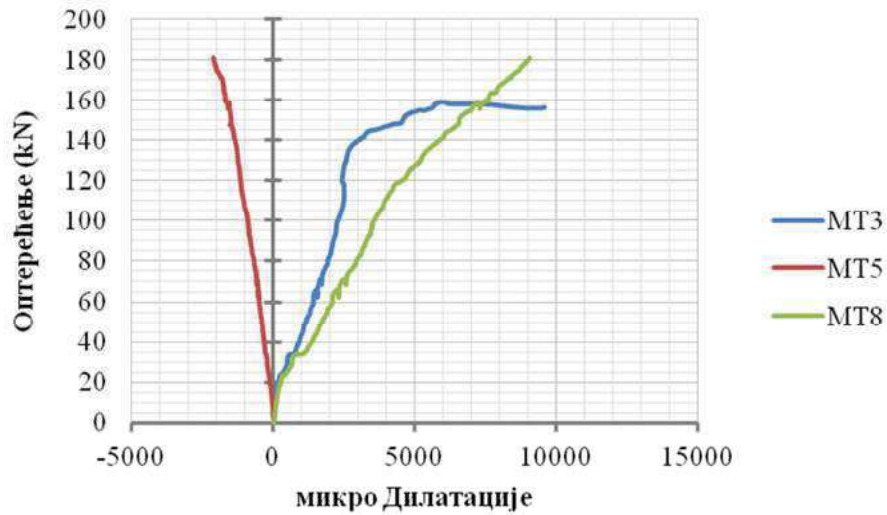
Дијаграми зависности између оптерећења и дилатација у бетону, челичној и ФРП арматури добијени при оптерећивању гредног носача Б-Ц дати су на *Сликама 6-50* (пресек I), *6-51* (пресек II) и *6-52* (пресек III). Течење челичне арматуре се јавља при оптерећењу од приближно 150 kN (*Слике 6-50* до *6-52*) после чега силу затезања у пресецима преузима додатна ФРП арматура. С обзиром да до лома носача долази већ при оптерећењу од 182 kN, искоришћење ЦФРП арматуре није потпуно и износи око 70% (*Слике 6-50* до *6-52*).



Слика 6-50: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT4), челичној арматури (MT1) и ФРП арматури (MT6) у пресеку I греде Б-Ц

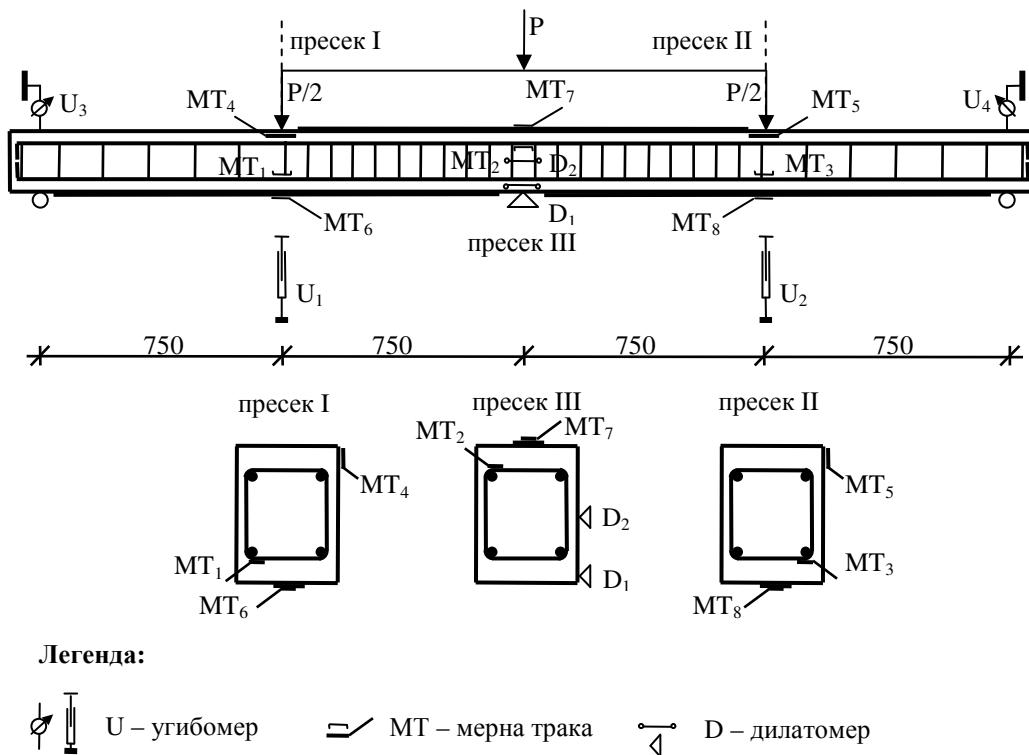


Слика 6-51: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (D1), челичној арматури (MT2) и ФРП арматури (MT7) у пресеку II греде Б-Ц



Слика 6-52: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT5), челичној арматури (MT3) и ФРП арматури (MT8) у пресеку III греде Б-Ц

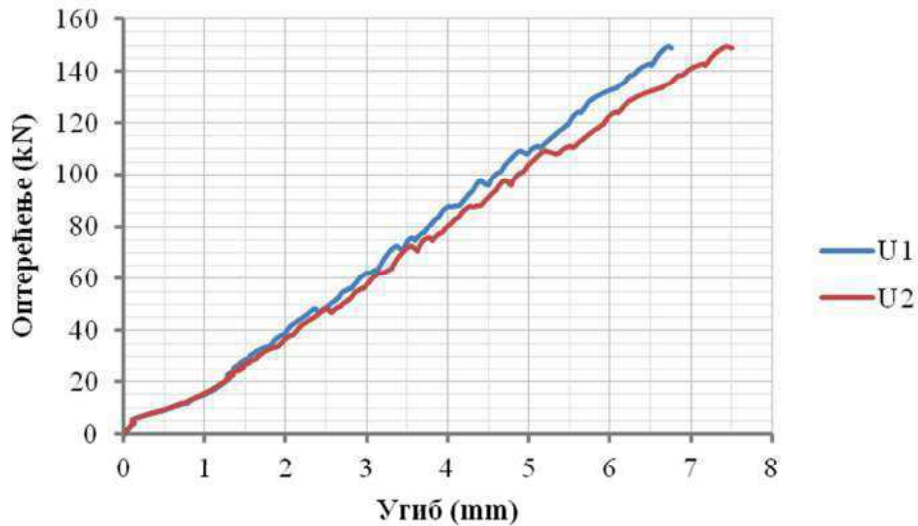
Континуални гредни носач Б-ЕЦ



Слика 6-53: Распоред инструмената на гредном носачу Б-ЕЦ

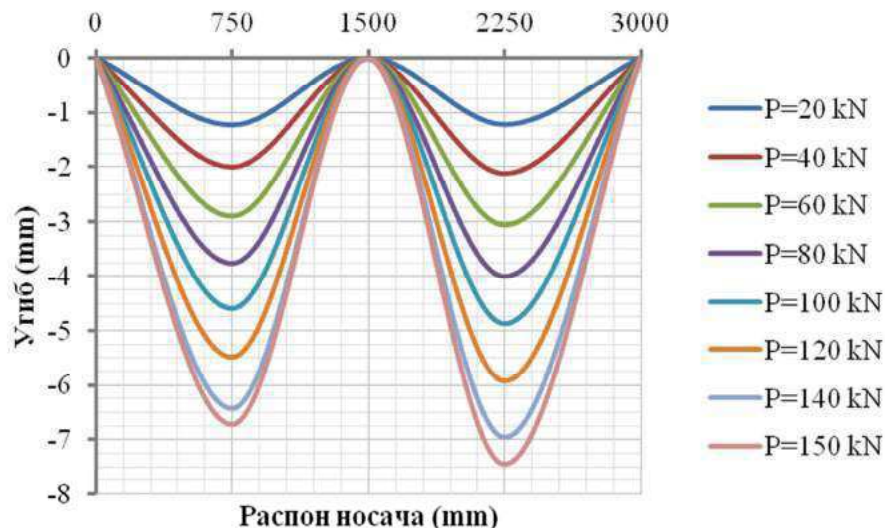
Криве зависности између оптерећења и угиба гредног носача ојачаног ЦФРП ламинатима су приближно линеарне све до појаве отказа (failure) (Слика 6-54).

Максимално оптерећење је за 50 % веће у односу на контролну греду док су вредности максималних угиба најмање у односу на све испитане носаче.



Слика 6-54: Дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U_1) и пресеку II (U_2) греде Б-ЕЦ

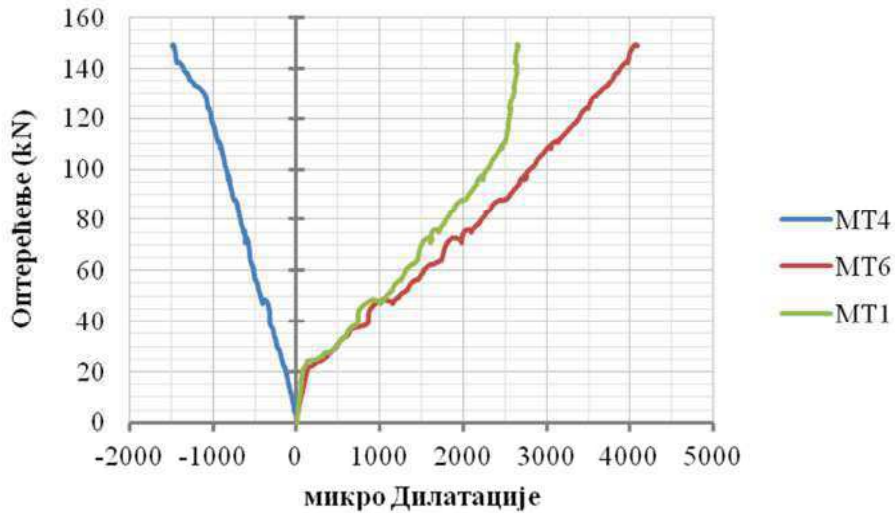
На Слици 6-31 дат је графички приказ угиба греде Б-ЕЦ, у зависности од нанетог оптерећења.



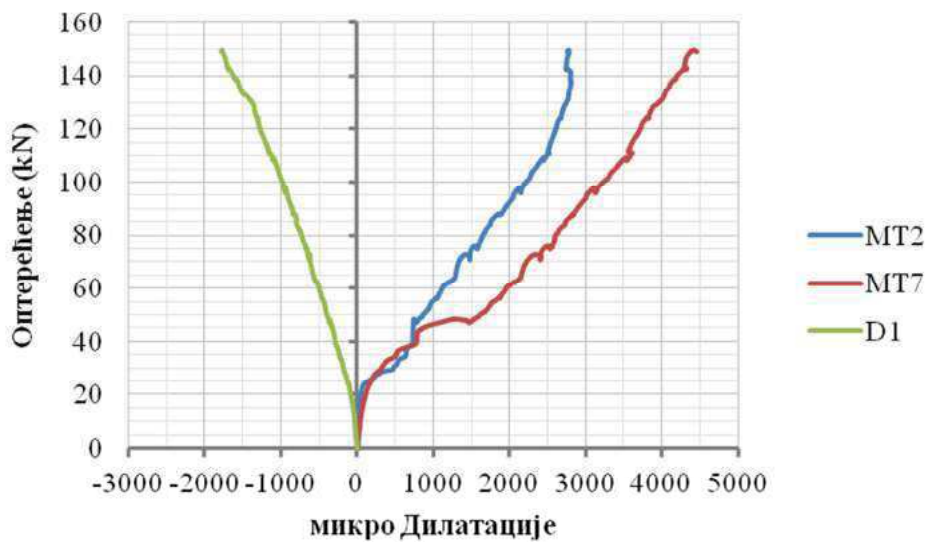
Слика 6-55: Графички приказ угиба у зависности од нанетог оптерећења греде Б-ЕЦ

Дијаграми зависности између оптерећења и дилатација у бетону, челичној и ФРП арматури добијени при оптерећивању гредног носача Б-ЕЦ дати су на Сликама 6-

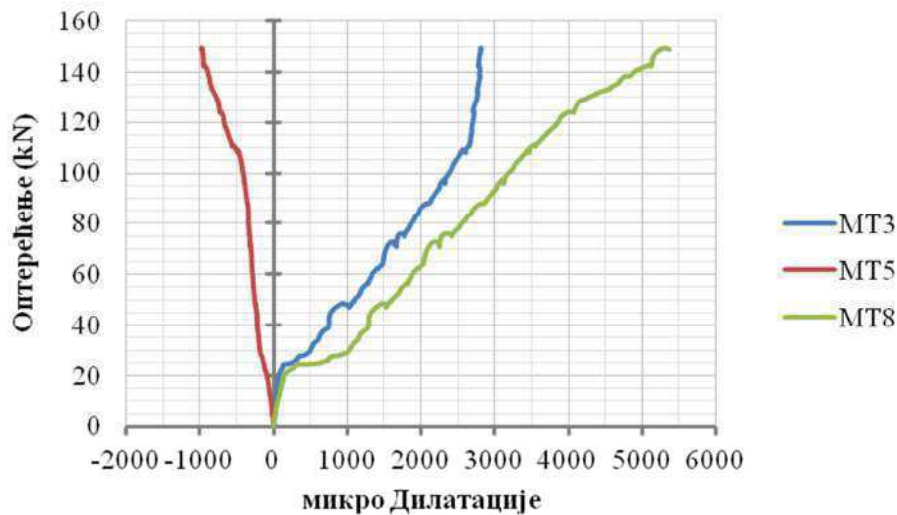
56 (пресек I), 6-57 (пресек II) и 6-58 (пресек III). За разлику од осталих испитиваних гредних носача, није уочено течење челичне арматуре па се на дијаграмима могу уочити област пре појаве прелина и област после појаве прелина до лома.



Слика 6-56: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT4), челичној арматури (MT1) и ФРП арматури (MT6) у пресеку I греде Б-ЕЦ



Слика 6-57: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (D1), челичној арматури (MT2) и ФРП арматури (MT7) у пресеку II греде Б-ЕЦ



Слика 6-58: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у бетону (MT5), челичној арматури (MT3) и ФРП арматури (MT8) у пресеку III греде Б-ЕЦ

6.7 Анализа експерименталних резултата

6.7.1 Опште

Анализа експериментално добијених резултата извршена је упоређивањем мерених величина угиба и дилатација код ојачаних греда са вредностима измереним на контролној, неојачаној греди.

Експерименталном анализом обухваћено је ојачавање континуалних гредних носача применом две методе:

1. уградњом ФРП арматуре облика шипке у заштитном слоју бетона (НСМ метода) и
2. спољашњим лепљењем ФРП ламината на површини бетона (ЕБ метода).

У истраживању су коришћени ламинати и шипке са карбонским влакнима (ЦФРП арматура) и шипке са стакленим влакнима (ГФРП арматура).

6.7.1 Анализа угиба

Један од најбитнијих показатеља понашања гредних носача под утицајем оптерећења је угиб, због чега је у овом истраживању посебна пажња посвећена његовој анализи. Вредност угиба је интегрална величина која обједињује оптерећење, распон, и крутост носача, па самим тим његова анализа даје најпотпунију слику понашања

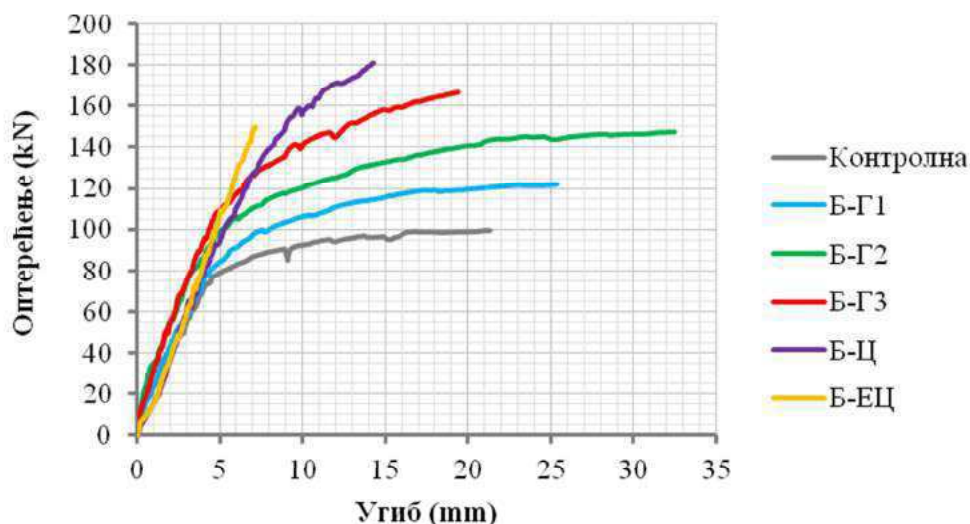
носача. Мерење угиба је вршено линеарним претварачима померања (LVDT) при чему су вредности читаване аквизицијским системом (MGC plus), уз примену одговарајућег софтвера (SATMAN).

Упоредна анализа угиба ојачаних греда извршена је у односу на контролну, неојачану греду, при чему је армирање челичном арматуром код свих греда било идентично (Слика 6-1). Криве зависности између оптерећења и угиба пресека у средини поља контролне греде и ојачаних греда приказане су на Слици 6-59.

На дијаграму се могу уочити карактеристичне зоне при наношењу оптерећења:

- ✓ зона пре појаве прслина,
- ✓ зона после појаве прслина а пре појаве течења челика и
- ✓ зона после појаве течења челика до лома пресека.

Понашање испитиваних носача до појаве првих прслина је готово идентично, после чега ојачани носачи показују већу крутост и већу носивост.

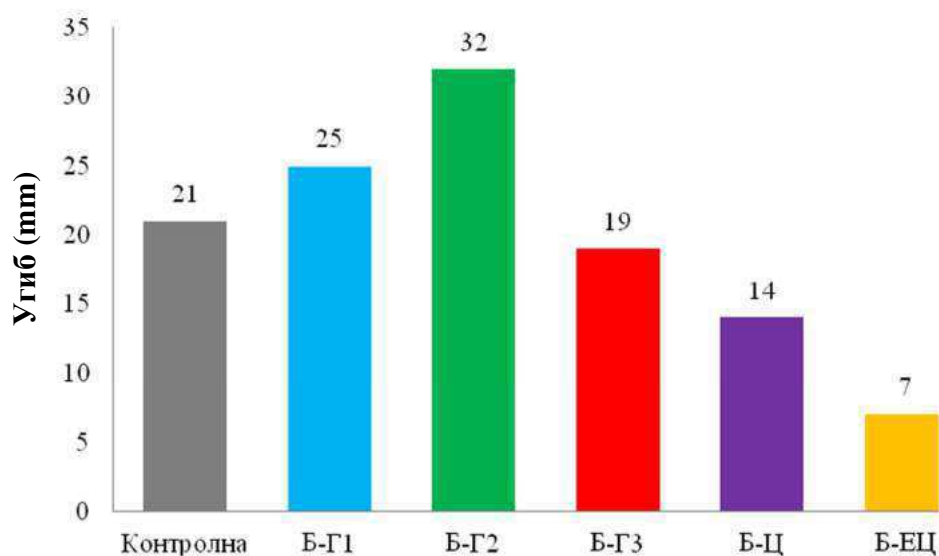


Слика 6-59: Дијаграм угиба у половини распона за различите варијанте ојачања

На Слици 6-60 приказано је упоређење максималних вредности угиба у средини поља испитаних гредних носача. Уочено је да:

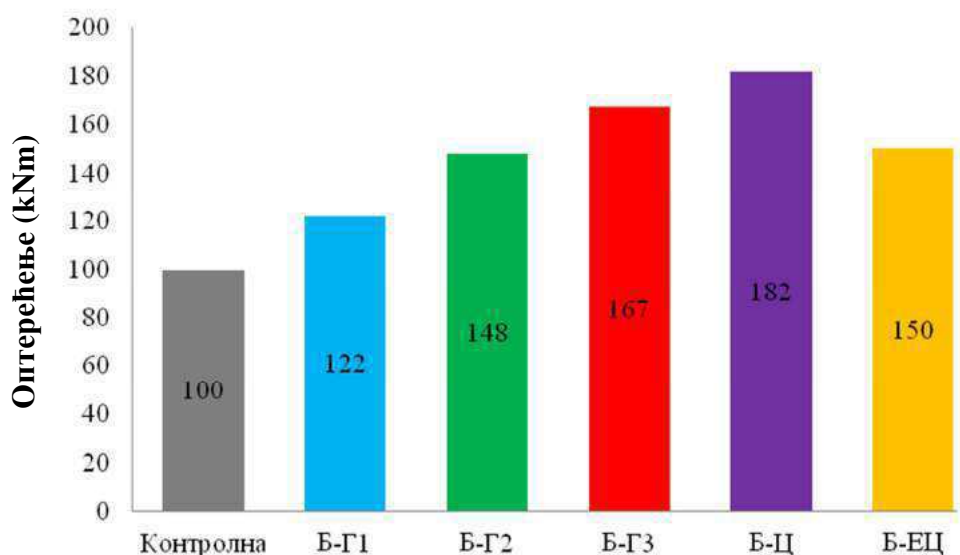
- ✓ Максимални угиб код гредних носача ојачаних НСМ методом ГФРП арматурним шипкама износи 32 mm у случају греде Б-Г2 што је за 50 % већи угиб у односу на угиб неојачане греде;
- ✓ Максимални угиб гредног носача ојачаног НСМ методом ЦФРП арматурним шипкама (Б-Ц) износи 14 mm што је за 33 % мање него код неојачане греде;

- ✓ Максимални угиб гредног носача ојачаног ЦФРП ламинатима (Б-ЕЦ) износи 7 mm што је за 67 % мање у односу на угиб неојачане греде.



Слика 6-60: Упоредње максималних угиба у половини распона ојачаних греда у односу на угиб контролне греде

На Слици 6-61 приказано је упоређење максималне носивости испитаних гредних носача.



Слика 6-61: Упоредње максималних носивости ојачаних греда у односу на носивост контролне греде

Највеће повећање носивости код гредних носача ојачаних НСМ методом ГФРП арматурним шипкама уочено је код греде Б-Г3 и оно је за 37 % веће у односу на греду

Б-Г1, односно за 13 % веће у односу на греду Б-Г2. Носивост гредног носача ојачаног НСМ методом ЦФРП арматурним шипкама већа је за 9 % у односу на носач ојачан НСМ методом ГФРП арматурним шипкама при истом начину ојачања. Носивост греда ојачаних НСМ методом већа је него у случају примене ЕБ методе ојачања. При истој аксијалној крутости ојачања, гредни носач ојачан НСМ методом је имао за 21 % већу носивост него гредни носач ојачан ЕБ методом.

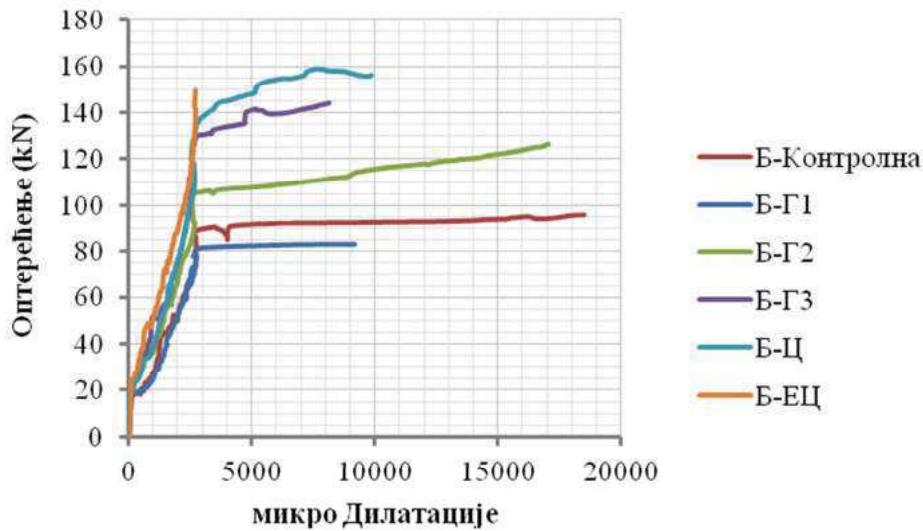
С обзиром на четири пута нижу цену ГФРП арматуре у односу на ЦФРП арматуру, у случајевима где крутост носача није од пресудног значаја, предност треба дати ГФРП арматури.

Индекс дуктилности код греда ојачаних ГФРП арматуром (Б-Г1, Б-Г2 и Б-Г3) има задовољавајуће вредности ($ИД = 4 \div 5$), док код греде ојачане ЦФРП арматуром дуктилност је веома мала ($ИД = 1,5$). Греда ојачана ЦФРП ламинатом (Б-ЕЦ) није показала никакву дуктилност при чему је максимални угиб те греде најмањи у поређењу са осталим гредама (*Слика 6-61*).

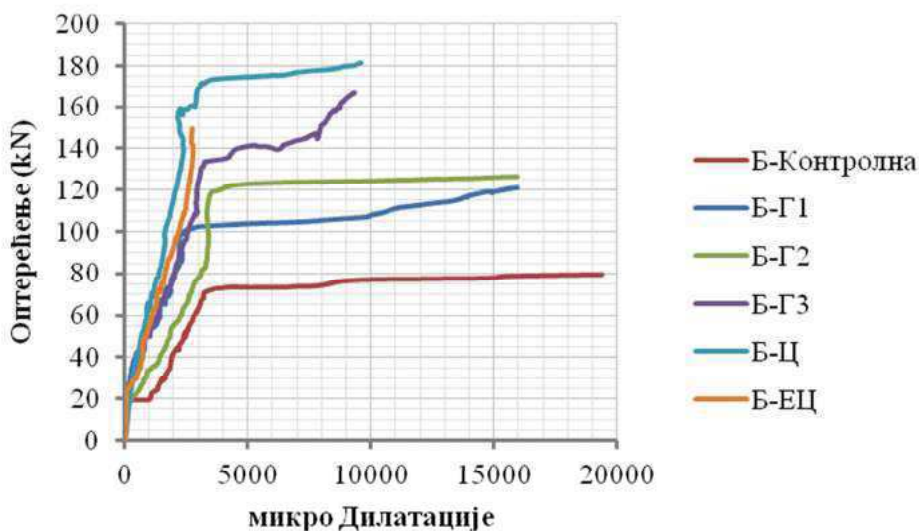
6.7.2 Анализа дилатација у челичној арматури

Дијаграм зависности између оптерећења и дилатација у затегнутој челичној арматури за испитиване гредне носаче приказани су на *Слици 6-62* (пресек у средини поља) и *Слици 6-63* (пресек над ослонцем). Из дијаграма се може уочити да су дилатације у затегнутој челичној арматури занемарљиво мале све до појаве прелина у бетону, после чега нелинеарно расту до појаве течења у челичној арматури. Последња фаза од течења челичне арматуре до отказа има још израженију нелинеарност. Са дијаграма на *Сликама 6-62* и *6-63* уочено је да:

- ✓ Ојачавањем континуалних греда НСМ методом ГФРП арматуром постигнуто је повећање оптерећења при коме долази до течења челичне арматуре од 14 % код гредног носача Б-Г1, 70 % код гредног носача Б-Г2 и 86 % код гредног носача Б-Г3;
- ✓ Ојачавањем континуалне греде НСМ методом ЦФРП арматуром (греда Б-Ц) постигнуто је повећање оптерећења при коме долази до течења челичне арматуре од 100 % у односу на неојачану греду;
- ✓ Код континуалне греде ојачане ЕБ методом ЦФРП ламинатима (греда Б-ЕЦ), није уочена појава течења челичне арматуре.



Слика 6-62: Дијаграм зависности између оптерећења и просечне дилатације у затегнутој челичној арматури у пресеку у средини поља за испитиване гредне носаче



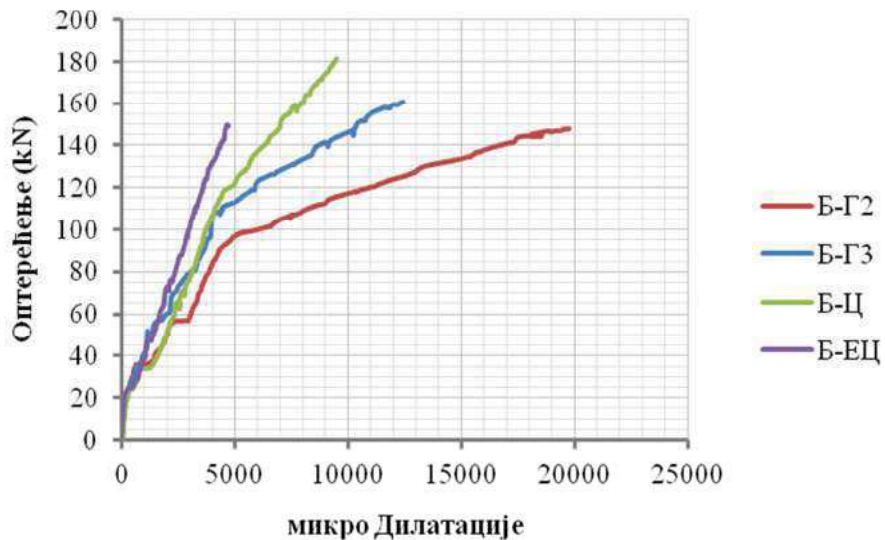
Слика 6-63: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у затегнутој челичној арматури у пресеку над ослономцем за испитиване гредне носаче

6.7.3 Анализа дилатација у ФРП арматури

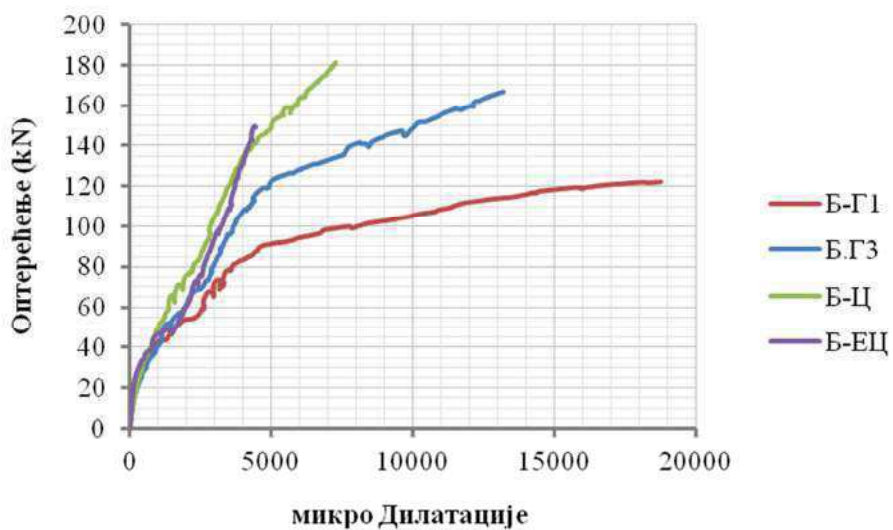
Дијаграм зависности између оптерећења и дилатација у ФРП арматури за испитиване гредне носаче приказани су на *Слици 6-64* (пресек у средини поља) и *Слици 6-65* (пресек над ослономцем).

Упоређивањем максималних мерених дилатација у ФРП арматури са граничним дилатацијама ГФРП и ЦФРП арматуре при затезању уочено је да је максимално

искоришћење ГФРП арматуре код гредних носача Б-Г1 и Б-Г2. Код осталих гредних носача није потпуно искоришћење додатне ФРП арматуре и оно је најмање у случају ојачања ЦФРП ламинатима када је искоришћење приближно 40 %.



Слика 6-64: Дијаграм зависности између оптерећења и просечне дилатације у ФРП арматури у пресеку у средини поља за испитиване гредне носаче

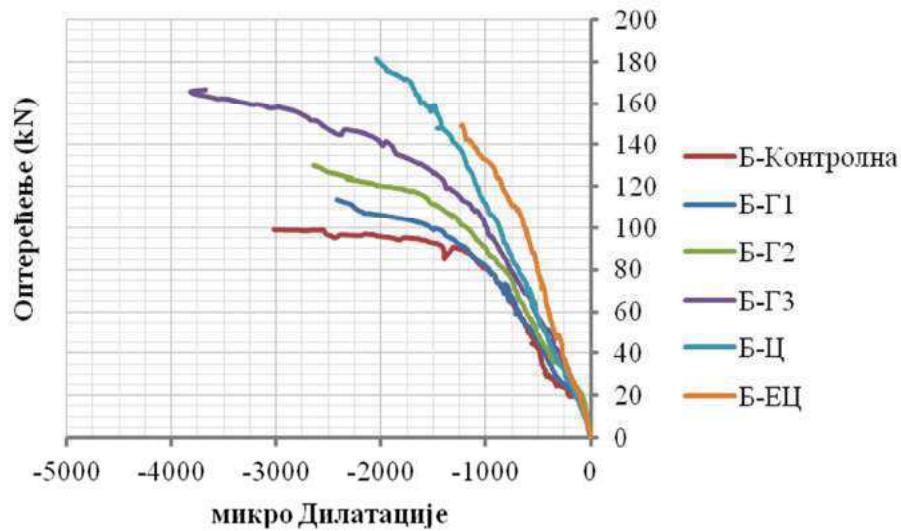


Слика 6-65: Дијаграм зависности између оптерећења и дилатације у ФРП арматури у пресеку над ослонцем за испитиване гредне носаче

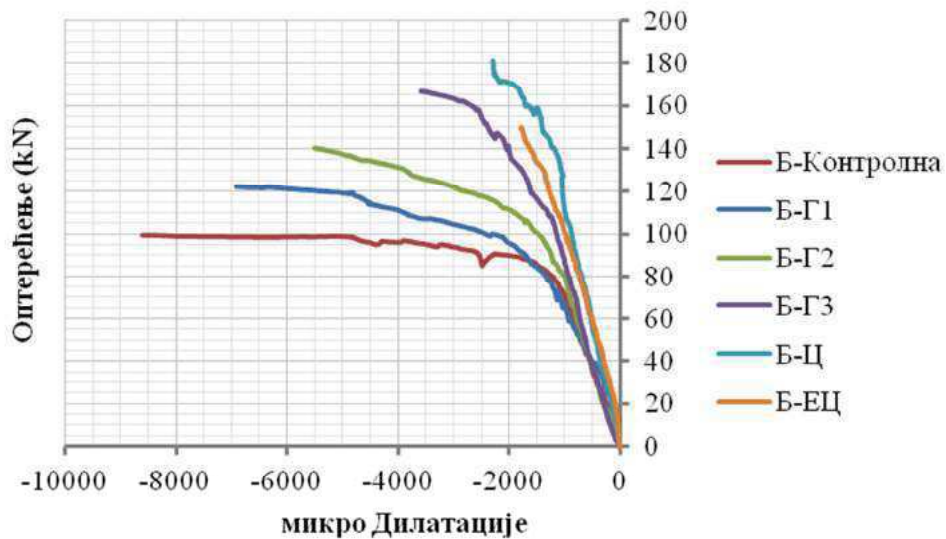
6.7.4 Анализа дилатација у бетону

Дијаграм зависности између оптерећења и дилатација у бетону за испитиване гредне носаче приказани су на Слици 6-66 (пресек у средини поља) и Слици 6-67 (пресек над ослонцем).

Из приказаних дијаграма се може уочити да су дилатације у бетону компатибилне са онима у затегнутој челичној арматури до појаве првих прелина у бетону. После тога дилатације су нелинеарне, при чему је та нелинеарност израженија након појаве течења челичне арматуре.



Слика 6-66: Зависности између оптерећења и просечне дилатације у бетону у пресеку у средини поља за испитиване гредне носаче



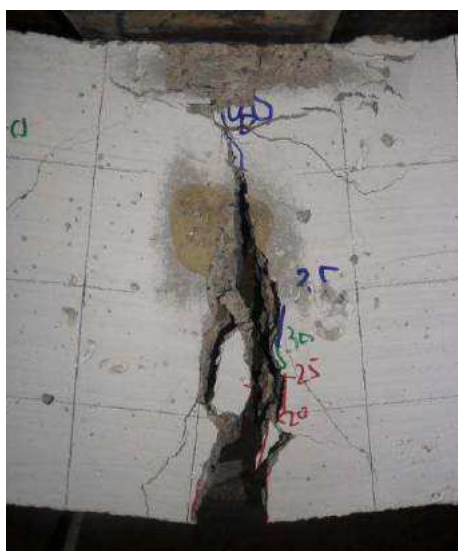
Слика 6-67: Зависности између оптерећења и дилатације у бетону у пресеку над ослоњцем за испитиване гредне носаче

6.7.5 Облици отказа (лома) носача

Контролна (неојачана) греда



Слика 6-68: Деформација контролне греде под оптерећењем



Слика 6-69: Лом пресека у средини поља контролне греде



Слика 6-70: Лом пресека над ослоном контролне греде

На Сликама 6-68 до 6-70 приказан је облик лома контролног (неојачаног) гредног носача. Запажа се да лом греде настаје достизањем граничне дилатације челичне арматуре при затезању најпре над средњим ослоном а затим и у пољу. Тиме долази до формирања пластичних зглобова односно формирања механизма лома носача. Максимална остварена сила износила је 100 kN, после чега су деформације расле без прираштаја силе.

Континуални гредни носач Б-Г1



Слика 6-71: Диспозиција греде Б-Г1



Слика 6-72: Распоред прлина и лом пресека у пољу



Слика 6-73: Распоред прлина и лом пресека над ослоњцем



Слика 6-74: Карактеристичне прлине у епоксидном лепку (поглед одозго)



Слика 6-75: Распоред прлина над ослоњцем (задња страна носача)

На *Сликама 6-72 до 6-75* приказан је облик лома гредног носача Б-Г1 који је ојачан ГФРП арматуром у зони негативних момената над средњим ослонцем. Запажа се најпре лом пресека у пољу, достизањем граничне дилатације челичне арматуре која је праћена мрвљењем бетона (*Слика 6-72*). Формирање механизма лома настаје услед лома пресека над ослонцем (*Слике 6-73 и 6-75*) до кога долази услед мрвљења бетона, без одвајања ФРП система за ојачање. Носивост овог гредног носача је 122 kN, а уочена је изузетна деформабилност и отказ без великог оштећења носача.

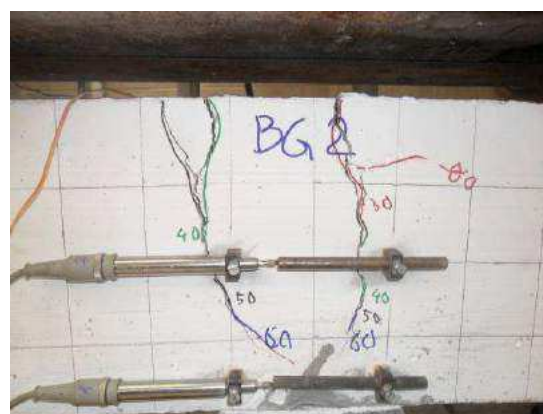
Континуални гредни носач Б-Г2



Слика 6-76: Деформација греде Б-Г2 под оптерећењем



Слика 6-77: Ојачање носача ГФРП арматуром у пољу



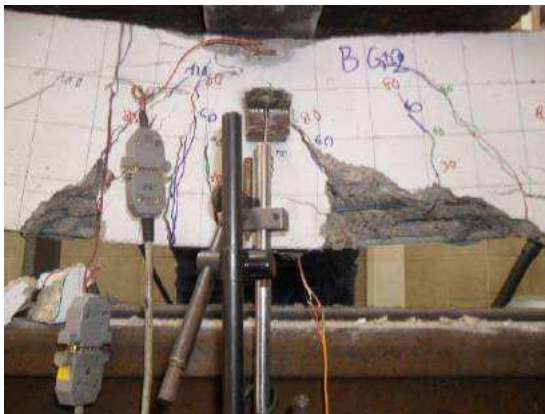
Слика 6-78: Лом пресека над ослонцем



Слика 6-79: Мрвљење бетона у зони аплицирања силе



Слика 6-80: Распоред прлина и лом пресека у пресеку над ослонцем (горња страна носача)



Слика 6-81: Лом пресека у пољу настао одвајањем бетона



Слика 6-82: Карактеристичне попречне прлине у бетону које пресецају прорез са епоксидном испуном (доња страна греде)

На Сликама 6-76 до 6-82 приказан је облик лова гредног носача ојачаног ГФРП арматуром у зони позитивних момената (доња страна носача) који настаје поступним наношењем пробног оптерећења све до лова. Уочен је најпре лом пресека над средњим ослонцем услед достизања граничне дилатације челичне арматуре при затезању (Слике 6-78 и 6-80). Формирање механизма лова настаје услед лова пресека у пољу који се јавља одвајањем бетона у висини подужне челичне арматуре (Слика 6-81). Уочено је мрвљење бетона у зони аплицирања силе (Слика 6-79). Попречне прелине у бетону са доње стране греде пресецају прорез са епоксидном испуном (Слика 6-82). Носивост овог носача је 148 kN, деформабилност је добра, а лом настаје уз значајно оштећење носача (Слика 6-81).

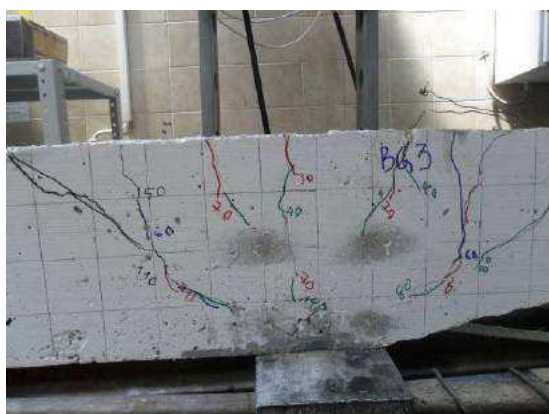
Континуални гредни носач Б-Г3



Слика 6-83: Одвајање бетона у висини заштитног слоја бетона (предња страна носача)



Слика 6-84: Одвајање бетона у висини заштитног слоја бетона (задња страна носача)



Слика 6-85: Карактеристичан распоред прлина у пресеку над ослоњцем



Слика 6-86: Распоред прлина и мрвљење бетона у зони аплицирања силе



Слика 6-87: Карактеристичан распоред прлина (горња страна носача)



Слика 6-88: Прсине у бетону које просецају прорез са ојачањем и епоксидном исуном на горњој страни носача

На *Сликама 6-83 до 6-88* приказан је облик лома гредног носача ојачаног ГФРП арматуром у зони негативних момената над средњим ослонцем (горња страна носача) и у зони позитивних момената (доња страна носача) који настаје поступним наношењем пробног оптерећења све до лома. Запажа се да лом настаје одвајањем на споју епоксида и бетона услед чега долази до одвајања бетона у висини заштитног слоја (*Слике 6-83 и 6-84*). Носивост овог гредног носача је велика ($P_u=167$ kN), али лом је изненадан уз снажан прасак и уз велико оштећење носача. Уочено је мрвљење бетона у зони аплицирања силе (*Слика 6-79*). Попречне прслине у бетону и са доње стране и са горње стране греде пресецају прорез са епоксидном испуном (*Слика 6-82*). Деформабилност је мања у односу на остале носаче код којих је ојачавање извршено коришћењем ГФРП арматуре.

Континуални гредни носач Б-Ц



Слика 6-89: Лом гредног носача Б-Ц1 настао губитком приањања ЦФРП арматуре

На *Сликама 6-89 до 6-93* приказан је облик лома гредног носача ојачаног ЦФРП арматуром у зони негативних момената над средњим ослонцем (горња страна носача) и у зони позитивних момената (доња страна носача) који настаје поступним наношењем пробног оптерећења све до лома. Запажа се да отказ настаје одвајањем на споју епоксида и бетона услед чега долази до одвајања бетона у висини заштитног слоја (*Слика 6-89*). Носивост овог гредног носача је у поређењу са осталим испитиваним гредним носачима највећа ($P_u=182$ kN), али деформабилност је изузетно мала тако да до лома долази изненада уз велико оштећење носача.



Слика 6-90: Карактеристичан распоред прлина над средњим ослоњцем



Слика 6-91: Карактеристичан распоред прлина у пресеку у средини поља



Слика 6-92: Одвајање бетона у висини заштитног слоја бетона и распоред прлина



Слика 6-93: Пррине у бетону које пресецају прорез са ојачањем и епоксидном испуном са доње стране носача

Континуални гредни носач Б-ЕЦ



Слика 6-94: ЦФРП ламинат залепљен на горњој страни носача



Слика 6-95: Губитак везе на споју бетона и епоксидног лепка на доњој страни носача



Слика 6-96: Одвајање бетона у висини заштитног слоја бетона



Слика 6-97: Губитак везе на споју бетона и епоксидног лепка на горњој страни носача

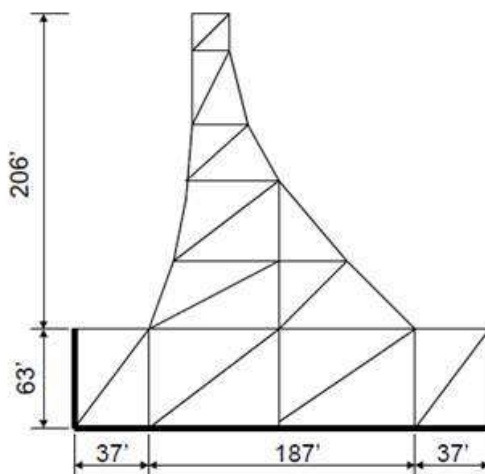
Понашање греде ојачане споља лепљеним ламинатима (ЕБ методом) до тренутка одлепљивања ламината је слично понашању греде ојачане уградњом ФРП арматуре у заштитном слоју бетона (НСМ методом). Отказ настаје због наглог одвајања ламината услед губитка везе на споју бетона и епоксидног лепка (Слика 6-95 и 6-97) после чега долази до одвајања бетона у висини заштитног слоја (Слика 6-96). Запажа се ранији отказ овог система у односу на НСМ методу, што смањује ефективност поступка. Максимално оптерећење је 150 kN а деформабилност носача није на задовољавајућем нивоу, односно знатно је смањена дуктилност на овај начин ојачаног гредног носача.

7 НУМЕРИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА

Циљ нумеричких истраживања је верификација експериментално добијених резултата основних мерених параметара (локалне и глобалне деформације, крутости, носивости), на испитиваним гредним носачима. Како су могућности експерименталног рада најчешће ограничене, један од циљева био је проверити могућност моделирања АБ континуалних греда ојачаних ФРП арматуром применом методе коначних елемената – МКЕ. Коришћен је, у научне сврхе често примењиван софтвер Ансис (ANSYS), у коме су моделирани континуални гредни носачи испитивани у експерименталном делу рада. Спроведена је нелинеарна анализа и дато је упоређење добијених резултата са експерименталним резултатима за различите степене оптерећења.

7.1 Опште напомене

Почеци методе коначних елемената – МКЕ (Finite Element Method – FEM) везују се за 1940-те али прва практична примена за моделирање бетонских конструкција јавља се двадесетак година касније, када је професор Рајмонд Кло (Raymond Clough) са Беркли универзитета (UC Berkly) извршио нумеричку анализу бетонске бране приказане на *Слици 7-1* (Barrett, 2013).



Слика 7-1: Прва мрежа коначних елемената коришћена при анализи бетонске бране методом коначних елемената (Barrett, 2013)

Иако је од тада прошло више од 50 година још увек не постоји јединствено мишљење о најбољем начину моделирања бетонских конструкција коначним елементима. Како је бетон један од најкомпликованијих материјала за моделирање, препорука водећих истраживача у овој области је да се материјални модел изабере у зависности од циља анализе. Најчешће методе за анализу бетонских конструкција коначним елементима су (Barrett, 2013): линеарно моделирање бетона при пројектовању конструкција и нелинеарно моделирање бетона.

7.1.1 Линеарно моделирање бетона при пројектовању конструкција

Када је циљ моделирања АБ елемената пројектовање конструкција, обично се примењује линеарно-еластични модел, при чему се модул еластичности за бетон нормалне чврстоће може приближно одредити према препоруци америчког института за бетон (ACI, 1999):

$$E_c = 4730 \sqrt{f'_c} \quad (7-1)$$

где је:

E_c – модул еластичности бетона,

f'_c – чврстоћа бетона при притиску.

У случају линеарног моделирања бетона, циљ анализе најчешће није детаљна анализа напона већ прорачун сила у пресецима. Користећи срачунате силе у пресецима одређује се потребна количина челичне арматуре која ће носити силу затезања, при

чему треба обезбедити да бетон може носити силу притиска у пресеку. Како је површина челичне арматуре знатно мања од површине попречног пресека бетона, не постоји потреба за њеним посебним моделирањем.

7.1.2 Нелинеарно моделирање конструкција

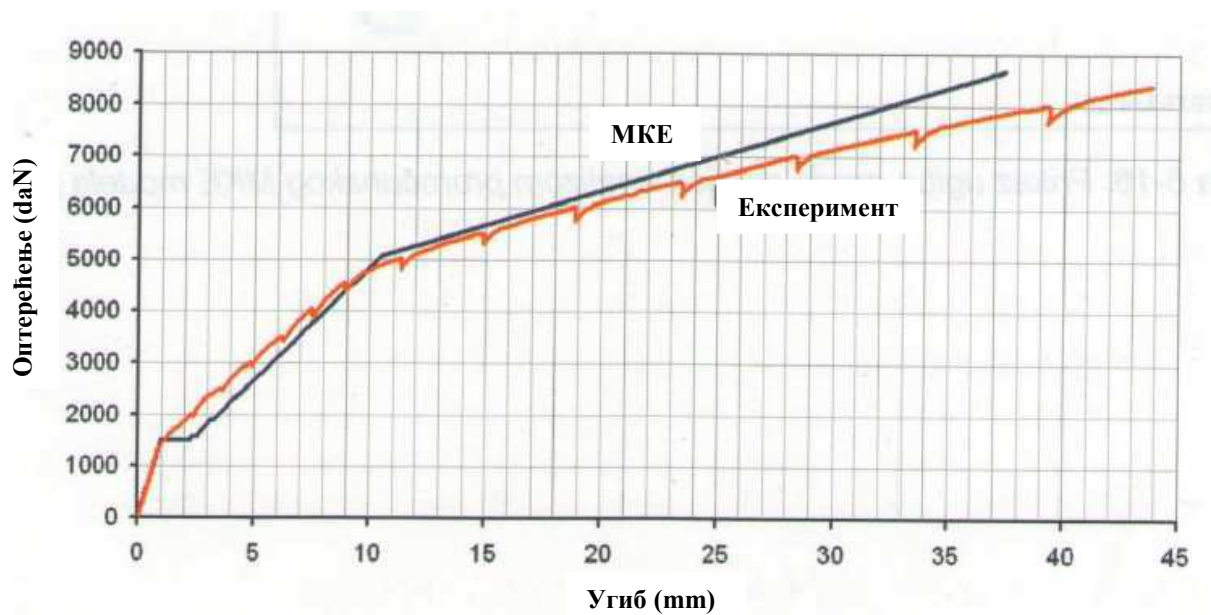
Ако су напони и деформације у бетону мали, он се понаша као линеарно еластичан материјал. Међутим, када напон на затегнутој ивици бетонског пресека достигне вредност дозвољеног напона при затезању, бетон пуца услед чега се смањује крутост пресека. Смањење крутости проузрокује „мекши“ одговор конструкције при даљем повећању оптерећења, услед чега долази до мрвљења бетона у притиснутом делу бетонског пресека. Симулирање овог комплексног понашања се најчешће спроводи у случају одређивања граничног оптерећења, анализе утицаја земљотреса или неких других изненадних утицаја. Да би се приказало стварно понашање бетона, може се применити микроконструктивно моделирање, што није практично за анализу реалних грађевинских конструкција у пуној величини. Због тога се препоручује другачији, феноменолошки приступ базиран на нелинеарном односу између напона и дилатације и нелинеарној површи лома. Изазов који се јавља при моделирању не чини само креирање модела који адекватно представља конструкцију, већ и модела који је поуздан и ефикасан, обзиром да су појава прслина, мрвљење и омекшавање бетона у потпуности нелинеарне карактеристике (Barret, 2013).

Приступ базиран на моделу „размазане“ прслине који је први представио Рашид 1968. године (Rashid, 1968), још увек је један од најбољих. Формирање прслина се симулира мењањем изотропне матрице крутости елемента ортотропном матрицом после формирања прслина. Вредност напона управних на правац прслине опада све док не дође до нуле. Једном када се прслине формирају, оне се могу отворати и затворати, али њихов правац остаје непромењен. Арматурни елемент се може или „размазати“ преко бетонског елемента, као што је Солид 65 (Solid 65) елемент у Ансису, или се моделирати споља, при чему има заједничке чворове са бетонским елементом. Овим начином моделирања могу се анализирати појава локалних прслина, деловање ударног оптерећења, као и анализа прогресивног лома код реалних грађевинских конструкција. У случајевима када се користи модел „размазане“ прслине неопходно је извршити анализу конвергенције резултата. Поред тога, препоручује се и експлицитнији приступ код задавања оптерећења у оваквим, екстремно нелинеарним случајевима, где велики

број међукорака у решавању једначина равнотеже, заједно са условима конвергенције базираним на померањима, може довести до ефикасније конвергенције проблема.

Поменути програм Ансис је светски признат софтвер за анализу конструкција, који се врло често користи у научне сврхе. Он се користи како за статичку, тако и за динамичку линеарну или нелинеарну анализу конструкција. Анализа се састоји у дискретизацији конструкције на елементарне делове за које су познате механичке и физичке карактеристике.

У многим истраживањима у којима су анализирани АБ гредни носачи ојачани ФРП арматуром, коришћен је софтвер Ансис, а добијени резултати су се добро слагали са резултатима експерименталних испитивања (Ранковић, 2010).



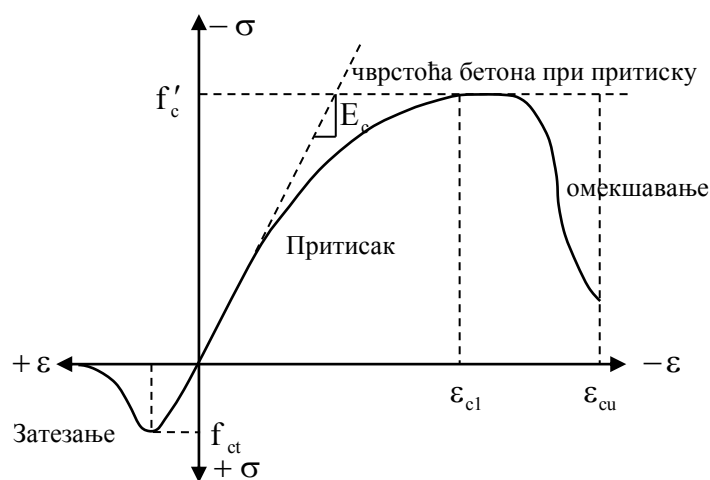
Слика 7-2: Оригинални дијаграм мерених и рачунских вредности оптерећење-угиб за гредни носач (Ранковић, 2010)

7.2 Модели материјала усвојени у анализи

7.2.1 Бетон

Бетон је квази-крт материјал, који се различито понаша при притиску и затезању, па је тако чврстоћа бетона при затезању (f_{ct}) отприлике 8-15 % од чврстоће бетона при притиску (f_c) (Shah et al., 1995.). На Слици 7-3 је приказан дијаграм зависности између напона и дилатације при аксијалном напрезању бетона (Bangash, 1989).

Дијаграм зависности између напона и дилатације за аксијално притиснут бетон је линеаран до приближно 30 % од чврстоће бетона при притиску, после чега је зависност између напона и дилатације нелинеарна. После достизања чврстоће бетона при притиску, крива опада (област омекшавања) све до евентуалног лома мрвљењем који се јавља при граничној дилатацији (ϵ_{cu}). При затезању, дијаграм зависности за бетон је приближно линеаран све до достизања чврстоће бетона при затезању. После достизања чврстоће бетона при затезању, јавља се пуцање бетона и опадање чврстоће постепено до нуле (Bangash, 1989).



Слика 7-3: Дијаграм зависности између напона и дилатације при аксијалном напрезању бетона (Bangash, 1989)

Потребни улазни подаци за моделирање бетона у Ансису су:

- ✓ модул еластичности бетона (E_c),
- ✓ чврстоћа бетона при притиску (f'_c),
- ✓ чврстоћа бетона при затезању (f_{ct}),
- ✓ Поасонов коефицијент (ν),
- ✓ коефицијент преноса напона смицања (β_t),
- ✓ зависност између напона и дилатације за бетон при аксијалном притиску.

На основу експерименталних резултата добијених сопственим лабораторијским испитивањем на епруветама усвојене су следеће вредности потребних параметара.

Модул еластичности:	$E_c = 25200 \text{ МПа};$
Чврстоћа бетона при притиску:	$f'_c = 32,3 \text{ МПа};$
Чврстоћа бетона при затезању:	$f_{ct} = 3,40 \text{ МПа};$
Поасонов коефицијент:	$\nu = 0,20.$

Коефицијент преноса напона смицања (β_t) представља стање површине прслине. Вредност овог коефицијента је између 0 и 1, где 0 представља глатку прслину (комплетан губитак преноса напона смицања), док 1 представља грубу прслину (без губитка преноса напона смицања). Вредност β_t , коришћена у већини нумеричких истраживања понашања АБ конструкција, варира између 0,05 и 0,25 (Bangash, 1989; Huuse et al., 1994; Nemmaty, 1998). Новије анализе урађене са различитим вредностима коефицијента преноса напона смицања у овим границама, указују на проблем конвергенције при ниским оптерећењима са коефицијентом преноса напона смицања мањим од 0,20. Због тога је у овом истраживању усвојен коефицијент преноса напона смицања од 0,20.

Зависност између напона и дилатације за бетон при аксијалном притиску

Ради конструкције криве зависности између напона и дилатације при аксијалном притиску који је неопходан при моделирању бетона у програму Ансис коришћени су изрази (7-2) и (7-3) (Desayi and Krishnan, 1964), као и израз (7-4) (Gere and Timoshenko, 1997):

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}}\right)^2}, \quad (7-2)$$

$$\varepsilon_{cl} = \frac{2f'_c}{E_c}, \quad (7-3)$$

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c}, \quad (7-4)$$

где је:

E_c – модул еластичности бетона,

f'_c – чврстоћа бетона при притиску,

ε_c – дилатација у бетону,

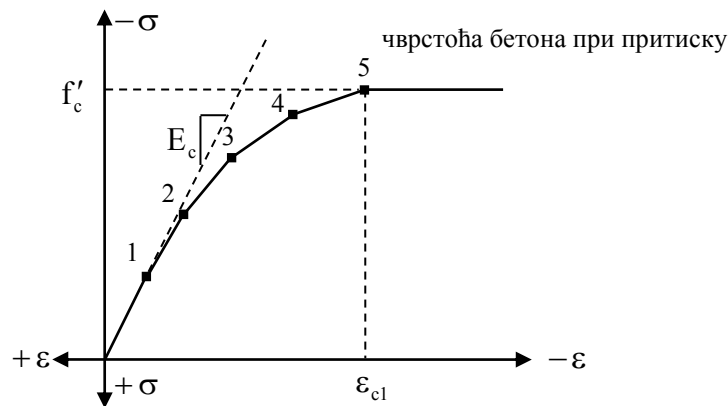
ε_{cu} – гранична дилатација бетона при притиску (дилатација мрвљења бетона),

ε_{cl} – дилатација у бетону која одговара чврстоћи бетона при притиску f'_c ,

σ_c – напон у бетону.

На *Слици 7-4* приказан је поједностављени (мултилинеарни) дијаграм зависности између напона и дилатације при аксијалном притиску који је коришћен у раду.

Поједностављени дијаграм зависности између напона и дилатација конструисан је са шест тачака које су повезане правим линијама. Дијаграм почиње од нултог стања напона и дилатација. Тачка 1 одговара вредности напона у бетону ($\sigma_c = 0,3f'_c$) и срачуната је према односу између напона и дилатација за бетон у еластичној области (7-4). Тачке 2, 3 и 4 су добијене на основу израза (7-2), при чему је дилатација (ϵ_{c1}) срачуната из израза (7-3). Тачка 5 одговара дилатацији (ϵ_{c1}) и чврстоћи при притиску бетона (f'_c). После достизања чврстоће при притиску претпостављено је идеално пластично понашање.



Слика 7-4: Поједностављени дијаграм зависности између напона и дилатације при аксијалном притиску бетона

Применом израза (7-2) и (7-3) срачунат је положај тачака и нацртан дијаграм зависности између напона и дилатације који је коришћен у раду.

$$\epsilon_{c1} = \frac{2f'_c}{E_c} = \frac{2 \cdot 32,3}{25200} = 0,002563 \text{ mm/mm}$$

$$\text{Тачка 1: } 0,3 f'_c = 9,69 \text{ МПа} \rightarrow \epsilon_1 = 0,000385$$

$$\text{Тачка 2: за } \epsilon_2 = 0,0008 \rightarrow \sigma_c = 18,37 \text{ МПа}$$

$$\text{Тачка 3: за } \epsilon_3 = 0,0013 \rightarrow \sigma_c = 26,06 \text{ МПа}$$

$$\text{Тачка 4: за } \epsilon_4 = 0,0019 \rightarrow \sigma_c = 30,90 \text{ МПа}$$

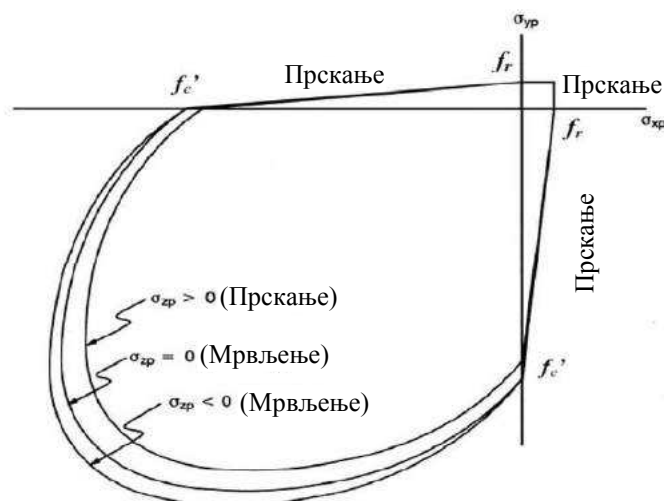
$$\text{Тачка 5: за } \epsilon_5 = 0,002563 \rightarrow \sigma_c = 32,30 \text{ МПа}$$

Критеријум лома за бетон

Употребљен материјални модел има опцију лома, како услед достизања чврстоће при затезању бетона, тако и лома мрвљењем бетона (достизања чврстоће при притиску бетона). Да би се дефинисала површина лома бетона, као и критеријум лома бетона при

просторном напонском стању, потребна су два улазна параметра: чврстоћа бетона при притиску и чврстоћа бетона при затезању при аксијалном напрезању (William and Warnke, 1975).

Пројекције три могуће површи лома у $(\sigma_{xp} - \sigma_{yp})$ равни приказане су на *Слици 7-5*, где су (σ_{xp}) и (σ_{yp}) главни напони који су различити од нуле у правцу (x) и (y) осе. Облик лома је функција знака главног напона у правцу (z) осе (σ_{zp}) . На пример, уколико су напони (σ_{xp}) и (σ_{yp}) негативни (притисак), а напон (σ_{zp}) је умерено позитиван (затезање), могућа је појава прелина у правцу управном на правац напона (σ_{zp}) . Међутим, уколико је $(\sigma_{zp} = 0)$ или умерено негативан, претпоставка је да ће доћи до мрвљења бетона (ANSYS, 2014).



Слика 7-5: Површине лома бетона (ANSYS, 2014)

Прелине се јављају у коначном елементу бетона када главни напон затезања у било ком правцу лежи ван површине лома. После појаве прелина претпоставља се да је модул еластичности коначног елемента у правцу паралелном правцу главног напона затезања једнак нули. Мрвљење се јавља када су сви главни напони негативни (напони притиска) и леже ван површине лома, а усваја се да је модул еластичности коначног елемента једнак нули у свим правцима (ANSYS, 2014) и коначни елемент нестаје.

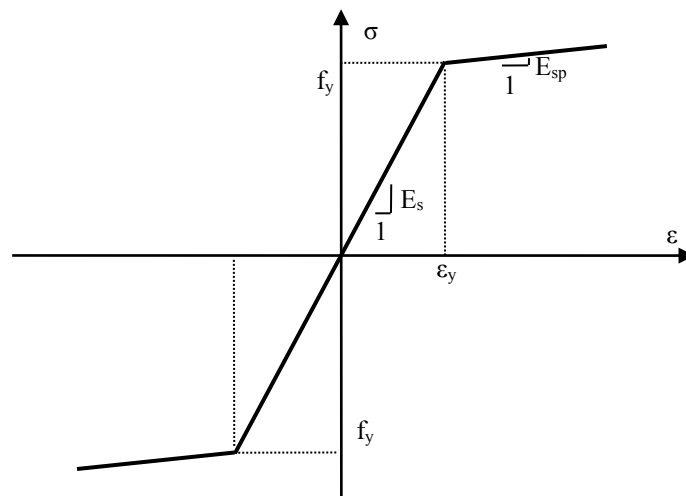
У бројним истраживањима је уочено да уколико је укључена опција мрвљења бетона долази до прераног лома коначних елемената модела бетонске греде (Kachlakev and Miller, 2001). Мрвљење бетона се најпре јавља у елементима непосредно испод оптерећења, а, као последица, јавља се мрвљење и околних елемената бетона чиме се

значајно смањује локална крутост. На крају се јављају велика померања модела и решења дивергирају.

У реалним проблемима лом бетона чистим притиском је мало вероватан. Секундарне дилатације затезања проузроковане Поасоновим ефектом јављају се управно на правац деловања оптерећења. Како је чврстоћа бетона при затезању изузетно мала, појава секундарних дилатација проузрокује појаву прелина и евентуални лом (Mindess and Young, 1981; Shah et al., 1995). Због тога је у овом истраживању могућност лома мрвљењем искључена.

7.2.2 Челична арматура и челичне плоче

Карактеристике челичне арматуре које су коришћене у нумеричком истраживању методом коначних елемената у овом раду, као што су модул еластичности, граница развлачења (напон течења) и чврстоћа при затезању добијене су од стране произвођача ових материјала. Усвојена је билинеарна зависност између напона и дилатације за арматурни челик са идентичним особинама при притиску и затезању (Слика 7-6) и Поасоновим коефицијентом од 0,30 (Gere and Timoshenko, 1997).



Слика 7-6: Дијаграм зависности између напона и дилатације за арматурни челик

Материјалне карактеристике за арматурни челик које су коришћене у раду су:

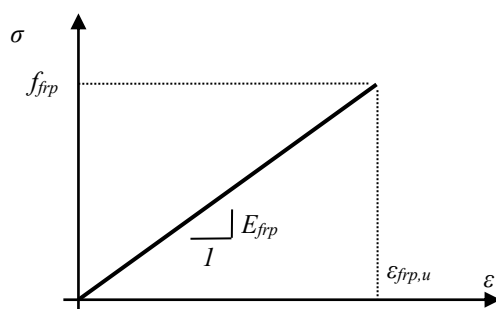
- ✓ модул еластичности: $E_s = 210 \text{ GPa}$;
- ✓ напон течења: $f_y = 400 \text{ MPa}$;
- ✓ Поасонов коефицијент: $\nu = 0,30$.

У моделима су додате челичне плоче на местима ослонаца и местима деловања концентрисаних сила како би се обезбедила равномернија расподела напона. Претпоставка је да су челичне плоче од линеарно еластичног материјала са истим материјалним карактеристикама као и арматурни челик.

7.2.3 ФРП арматура

Као што је и раније речено, ФРП материјали састоје се од два материјала који се комбинују на макроскопском нивоу. Први материјал су арматурна влакна која дају чврстоћу и крутост ФРП материјалу, која су утопљена у континуални полимер (матрицу) која их повезује (Kaw, 1997).

Особине ФРП арматуре нису исте у свим правцима. Она припада групи тзв. специјалних ортотропних материјала који су трансверзално изотропни, код којих су материјалне особине приближно исте у било ком правцу управном на правац влакана (Gibson, 1994; Kaw, 1997). За даљу анализу претпостављене су главне материјалне осе тако да је (x) правац влакана, а (y) и (z) су правци управни на (x) правац. У овом истраживању претпостављене су линеарно-еластичне особине ФРП арматуре (Слика 7-7), тј. поједностављена веза између напона и дилатација у правцу влакана за примењену ФРП арматуру.



Слика 7-7: Дијаграм зависности између напона и дилатације за ФРП арматуру

Улазни подаци потребни за моделирање ФРП арматуре коначним елементима су:

- ✓ број слојева,
- ✓ дебљина сваког слоја,
- ✓ оријентација влакана за сваки слој,
- ✓ модул еластичности ФРП арматуре за три правца (E_x , E_y и E_z),
- ✓ модул смицања ФРП арматуре за три равни (G_{xy} , G_{yz} и G_{xz}),

- ✓ главни Поасонов коефицијент за три равни (v_{xy} , v_{yz} и v_{xz}).

Локални координатни систем за ФРП слојевити површински елемент је дефинисан тако да је x правац у правцу влакана, док су y и z правци управни на x правац.

Особине изотропних материјала, као што су модул еластичности и Поасонов коефицијент, идентичне су у свим правцима, због чега индекси нису потребни. Ово није случај са специјалним ортотропним материјалима код којих су индекси неопходни да дефинишу особине у различитим правцима. На пример, $E_x \neq E_y$ и $v_{xy} \neq v_{yx}$. E_x је модул еластичности у правцу влакана док је E_y модул еластичности у правцу у управном на правац влакана. Коришћење Поасонових коефицијената за ортотропне материјале узрокује забуну, због чега су подаци за ортотропни материјали у програму Ансис садржани у коефицијенту v_{xy} или главном (major) Поасоновом коефицијентом. Главни Поасонов коефицијент је однос дилатација у y и x правцу када је оптерећење у правцу влакана док је величина v_{yx} мањи (minor) Поасонов коефицијент који је мањи од v_{xy} , док је модул еластичности E_x већи од модула еластичности E_y . Изразом (7-5) дат је однос између v_{xy} и v_{yx} (Kaw, 1997).

$$v_{yx} = \frac{E_y}{E_x} v_{xy} \quad (7-5)$$

Вредности ових коефицијената усвојене су на основу проспеката произвођача и литературе, а приказане су табеларно (Табела 7-1).

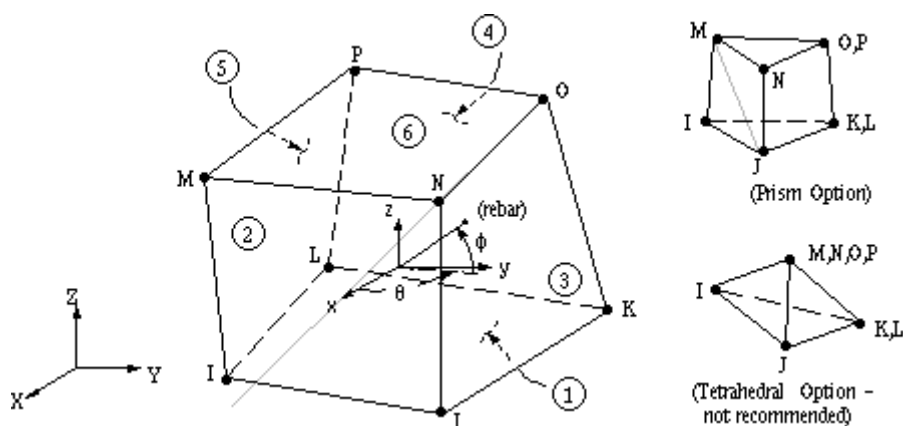
Табела 7-1: Карактеристике ФРП материјала (Kachlakev and McCurry, 2000)

	Модул еластичности	Главни Поасонов коефицијент	Чврстоћа при затезању	Модул смицања	Дебљина ламеле (пречник шипке)
ФРП	(МПа)	/	(МПа)	(МПа)	(mm)
ЦФРП	$E_x=150000$	$v_{xy}=0,22$	2000	$G_{xy}=61475$	1,4 (Ø8)
	$E_y=115000$	$v_{xz}=0,22$		$G_{xz}=61475$	
	$E_z=115000$	$v_{yz}=0,30$		$G_{yz}=44234$	
ГФРП	$E_x=40800$	$v_{xy}=0,26$	760	$G_{xy}=16190$	(Ø10)
	$E_y=13600$	$v_{xz}=0,26$		$G_{xz}=16190$	
	$E_y=13600$	$v_{yz}=0,30$		$G_{yz}=5230$	

7.3 Типови усвојених коначних елемената

7.3.1 Армирани бетон

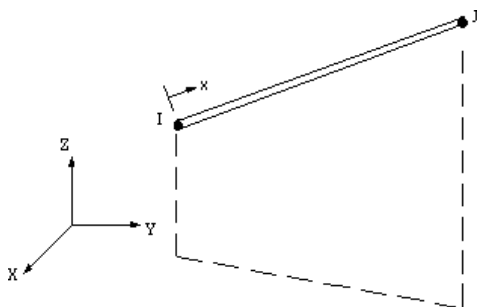
Запремински коначни елемент Солид 65 (Solid 65), који има осам чворова са по три степена слободе у сваком чвору (транслације у чворовима у правцима координатних оса X, Y и Z), коришћен је за моделирање бетона. Солид 65 се користи за моделирање бетона при чему постоји могућност да се у оквиру овог коначног елемента моделира и арматурни челик. Сем бетона примењује се при моделирању армираних композита, као што је фиберглас, и геолошких материјала, као што су стене. Најважнија особина овог елемента је могућност третирања нелинеарних материјалних особина. Могућа је појава прлина у три ортогонална правца, мрвљење бетона, пластичних деформација и течење бетона. Арматура моделирана овим елементом има способности затезања и притиска али не и смицања а могућа је и анализа пластичних деформација и течења. У случају моделирања челичне арматуре Солид 65 елементом ограничава се слобода формирања мреже коначних елемената и тачног дефинисања положаја арматуре (Кукарас, 2007). Због тога је у овом раду челична арматура моделирана линијским елементом Линк180 (Link180). Геометрија и положај чворова за коначни елемент Солид 65 приказани су на *Слици 7-8*.



Слика 7-8: Геометрија и положај чворова коначног елемента Солид 65 (ANSYS, 2014)

Елемент Линк 180 који је коришћен за моделирање челичне арматуре је просторни коначни елемент који има два чвора на крајевима, сваки са по три степена слободе (транслације у правцима координатних оса X, Y и Z). Овај елемент такође има способност пластичних деформација, течења, омекшавања као и могућност великих

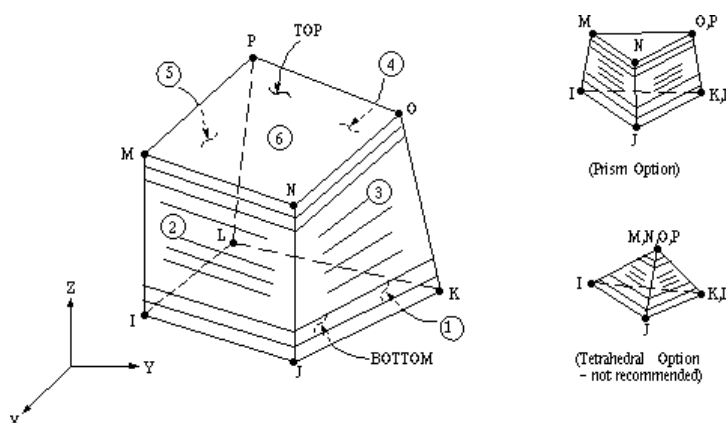
деформација. Геометрија и положај чворова за овај тип елемента приказани су на *Слици 7-9*.



Слика 7-9: Геометрија и положај чворова коначног елемента Линк 180 (ANSYS, 2014)

7.3.2 ФРП арматура

Солид 46 (Solid 46), слојевита верзија конструктивног елемента Солид 45 (Solid 45) пројектован за моделирање танких љуски или тела, коришћен је за моделирање ФРП арматуре. Елемент може да садржи до 250 различитих материјалних слојева са различитим оријентацијама и ортотропним материјалним карактеристикама за сваки слој. Уколико је потребно формирати више од 250 слојева, доступна је улазна конститутивна матрица. Елемент има три степена слободе у сваком чвору (транслације у правцима координатних оса X, Y и Z). Геометрија и положај чворова за овај тип елемента приказани су на *Слици 8-10*.

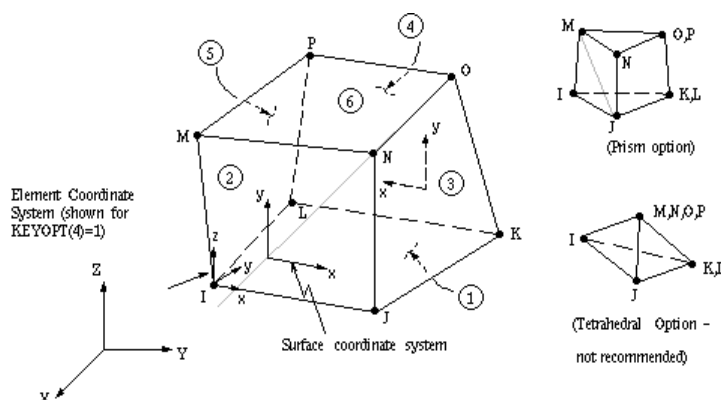


Слика 7-10: Геометрија и положај чворова коначног елемента Солид 46 (ANSYS, 2014)

7.3.3 Челичне плоче

Коначни елемент са осам чворова, Солид 45 (Solid 45), коришћен је за моделирање ослоначких челичних плоча. Сваки чвор овог елемента има три степена

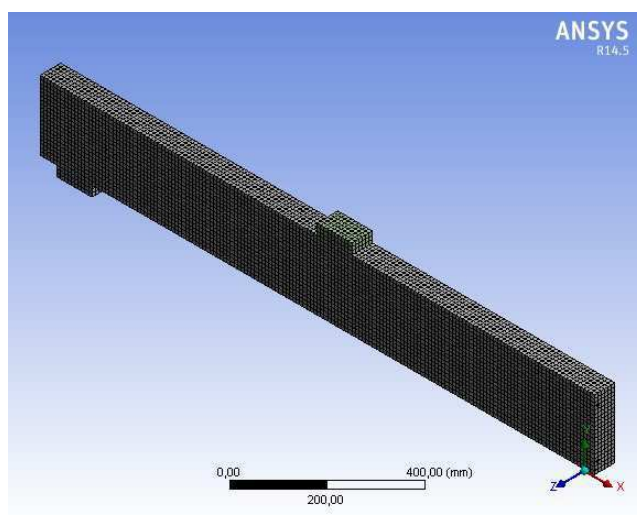
слободе у сваком чвору (транслације у правцима координатних оса X, Y и Z). Елементом се могу описати појаве пластичности, течења, очвршћавања, великих деформација и великих дилатација. Геометрија и положај чворова за овај тип елемента приказани су на *Слици 7-11*.



Слика 7-11: Геометрија и положај чворова коначног елемента Солид 45 (ANSYS, 2014)

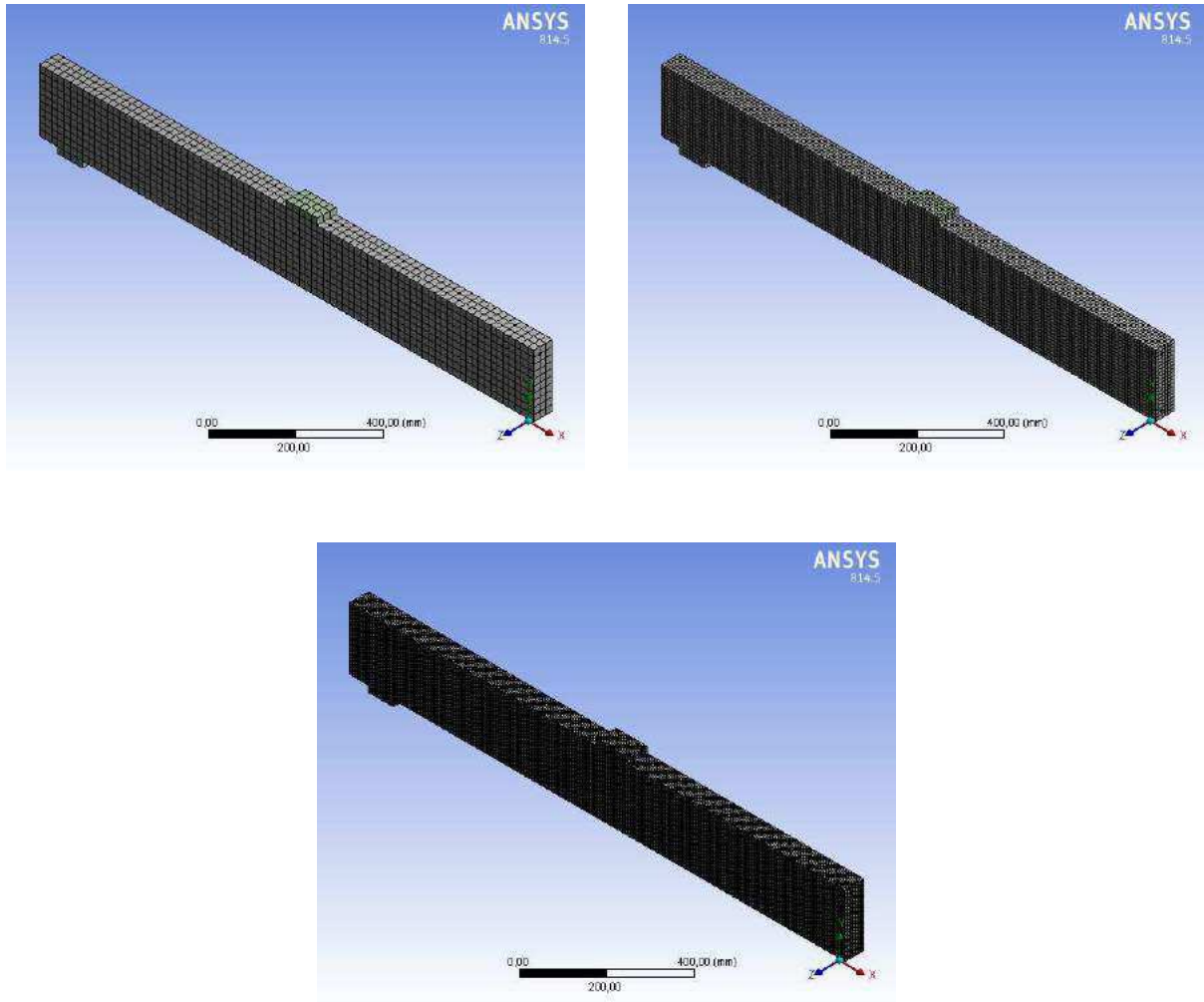
7.4 Усвојени прорачунски модел испитиваних гредних носача и мрежа коначних елемената

У циљу рационалнијег прорачуна искоришћена је симетрија анализираних носача. Моделирана је четвртина АБ гредног носача, уз симулацију граничних услова за изабрани статички систем (*Слика 7-12*). Моделирање је извршено на основу механичких карактеристика самоуграђујућег бетона, челичне арматуре, епоксидног лепка и ГФРП арматуре које су дефинисане у поглављу 7.2 при чему је претпостављена пуна прионљивост између материјала.



Слика 7-12: Прорачунски модел четвртине АБ греде моделиране коначним елементима

Врло важан сегмент при прорачуну прином методе коначних елемената је правилан избор мреже коначних елемената. Уколико је мрежа превише густа рапидно расте потребно време за прорачун, а уколико је мрежа превише груба не могу се добити употребљиви резултати. Због тога је неопходно извршити студију конвергенције резултата преко неког од прорачунских параметара. У овом истраживању је извршена студија конвергенције угиба пресека у половини распона (Слика 7-13 и Табела 7-2) на основу које је усвојена димензија коначног елемента од 10 mm.



Слика 7-13: Прорачунски модели четвртине контролне греде са 2587, 19736 и 155968 елемената

Табела 7-2: Студија конвергенције резултата према густини мреже елемената

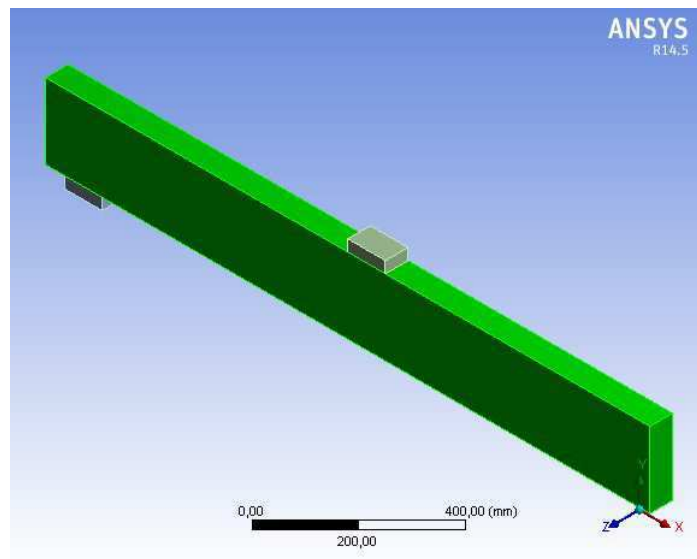
Модел	Број елемената	Димензије елемената (mm)	Угиб (mm)
1	2587	20×20×20	5,850
2	19736	10×10×10	5,868
3	155968	5×5×5	5,878

7.5 Резултати нумеричке анализе

Циљ анализе путем нумеричког модела је упоређење са експерименталним резултатима и приказ карактеристичних фаза кроз које пролази носач током наношења оптерећења. Истражена је област линеарног понашања и појава прве прслине, нелинеарна област до појаве течења у затегнутој челичној арматури и област од појаве течења до лома.

Упоређење резултата нумеричке и експерименталне анализе показано је преко дијаграма угиба и дилатација у ФРП арматури. Уочене разлике су неминовне због идеализације механичких карактеристика узорка гредног елемента и апроксимација у нумеричком моделу. Локална несавршеност првенствено бетона на споју цементног камена и агрегата је један од разлога неслагања резултата. Поред тога, у нумеричком моделирању претпостављена је идеална прионљивост челика и бетона, епоксидног лепка и бетона, као и епоксидног лепка и ФРП арматуре. Међутим, експериментално је доказано да при вишим нивоима оптерећења долази до губитка прионљивости због чега се јављају извесна одступања у резултатима нумеричке и експерименталне анализе.

Контролни гредни носач

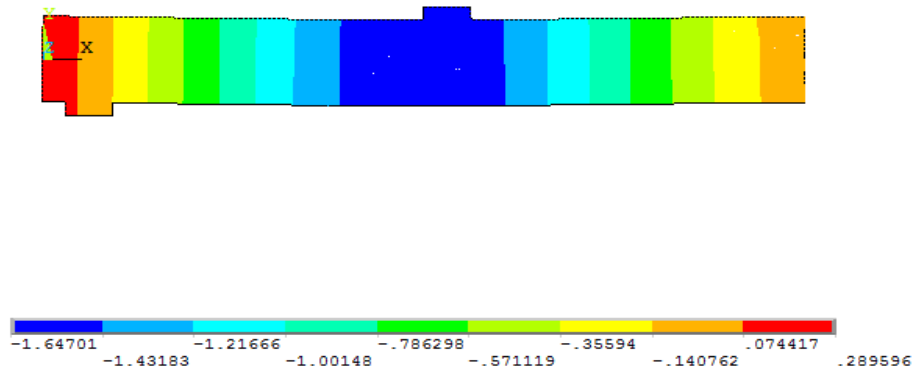


Слика 7-14: Прорачунски модел контролног гредног носача

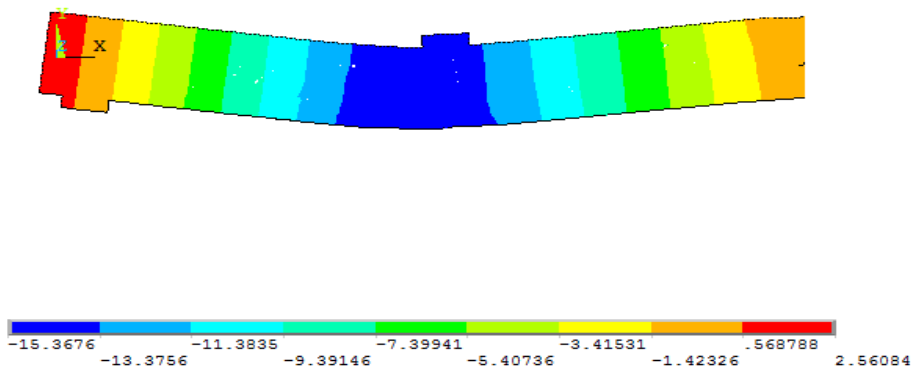
За анализу контролног гредног носача усвојен је модел четвртине греде (Слика 7-14) који у случају контролне греде има 92093 елемената и 19736 чворова.

На Слици 7-15 приказан је деформисани облик носача са вредностима угиба при различитим степенима пробног оптерећења.

а)

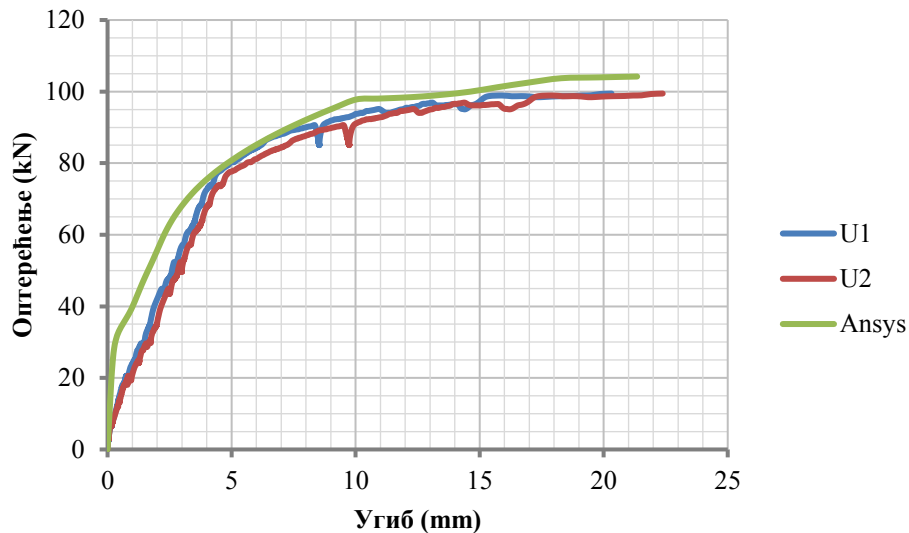


б)



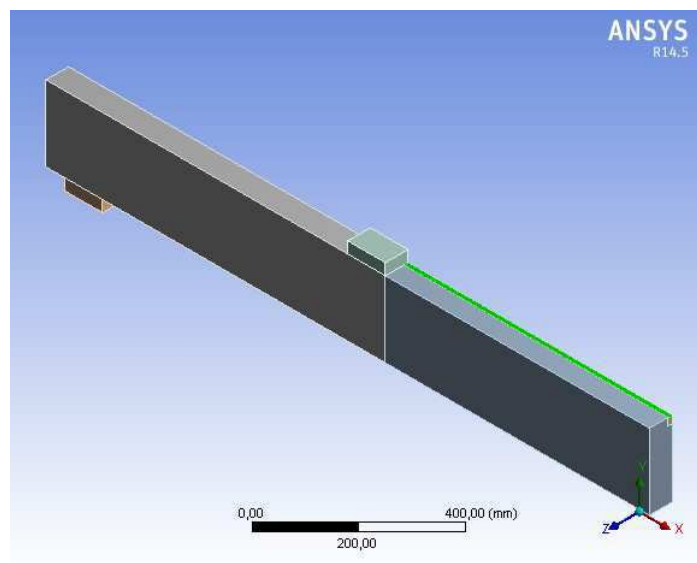
Слика 7-15: Приказ деформисаног носача са вредностима угиба при пробном оптерећењу од: а) $P=50\text{ kN}$; б) $P=100\text{ kN}$

На основу добијених вредности угиба при различитим нивоима оптерећења урађен је графички приказ и дато упоређење са експерименталним резултатима (Слика 7-16). На дијаграму се може уочити извесно неслагање резултата експерименталне и нумеричке анализе при чему модел МКЕ показује, генерално, већу крутост пре свега због идеализација које су усвојене при моделирању бетона и челичне арматуре.



Слика 7-16: Упоредни дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U1) и пресеку II (U2) контролне греде добијени експериментално и применом MKE (Ansys)

Континуални гредни носач Б-Г1



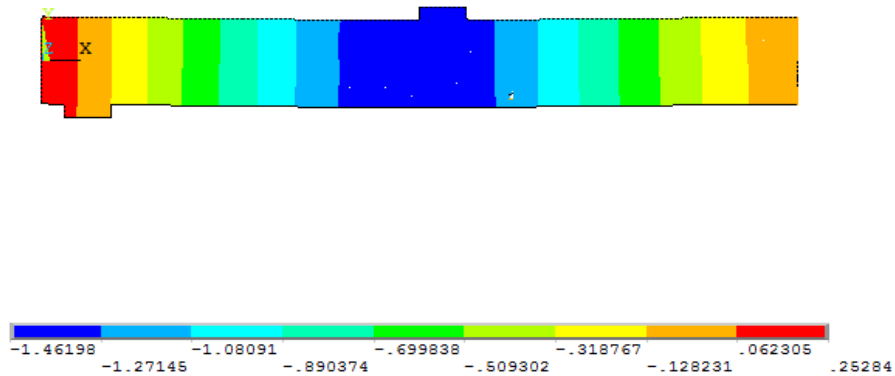
Слика 7-17: Прорачунски модел гредног носача Б-Г1

За анализу гредног носача Б-Г1 усвојен је модел са 20190 елемената и 94642 чвора. На Слици 7-18 приказан је деформисани облик носача са вредностима угиба при различитим степенима пробног оптерећења.

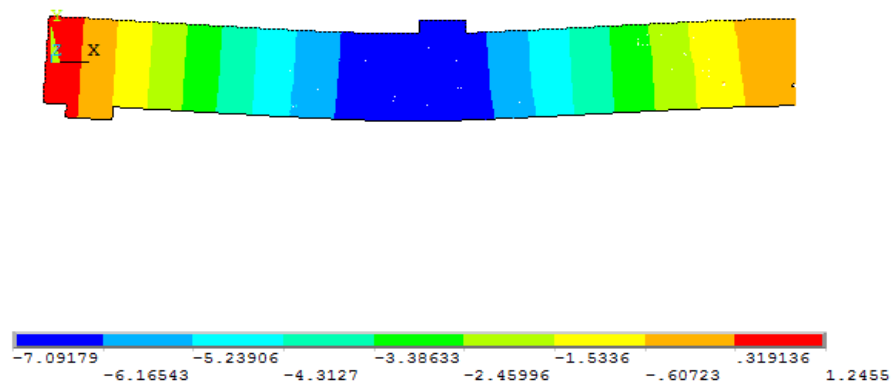
На основу нумерички одређених вредности угиба и дилатација у ФРП арматури при различитим степенима (корацима) оптерећења, извршено је поређење са резултатима добијеним експерименталним испитивањем (Слике 7-19 и 7-20). На дијаграму зависности између оптерећења и угиба се уочава делимично одступање

експериментално добијених вредности угиба у односу на вредности угиба које су добијене применом нумеричке анализе МКЕ. Разлози овог неслагања леже у усвојеним идеализованим карактеристикама компонентних материјала, као и у идеализацији веза између бетона, челичне арматуре, епоксидног лепка и ФРП арматуре.

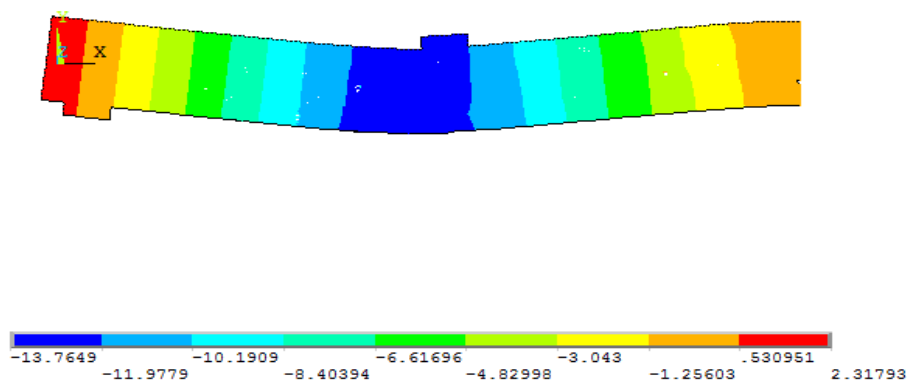
а)



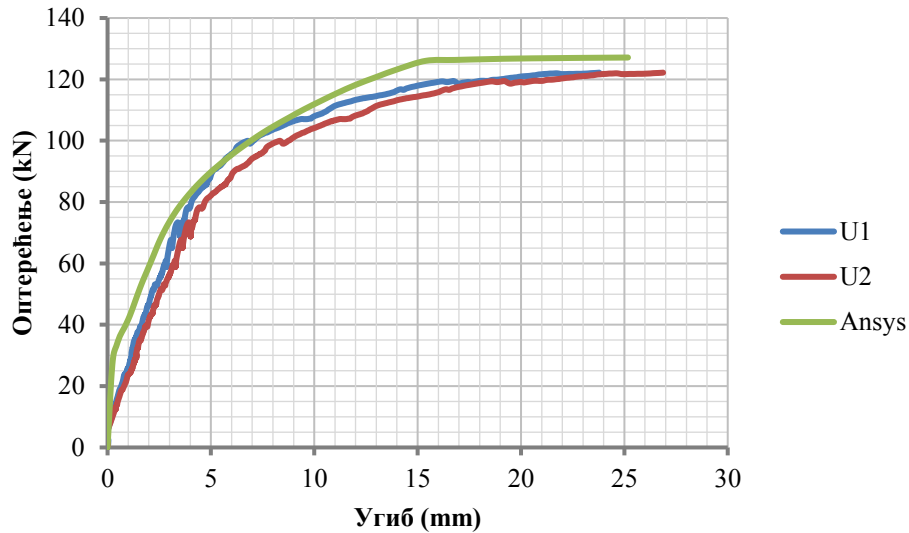
б)



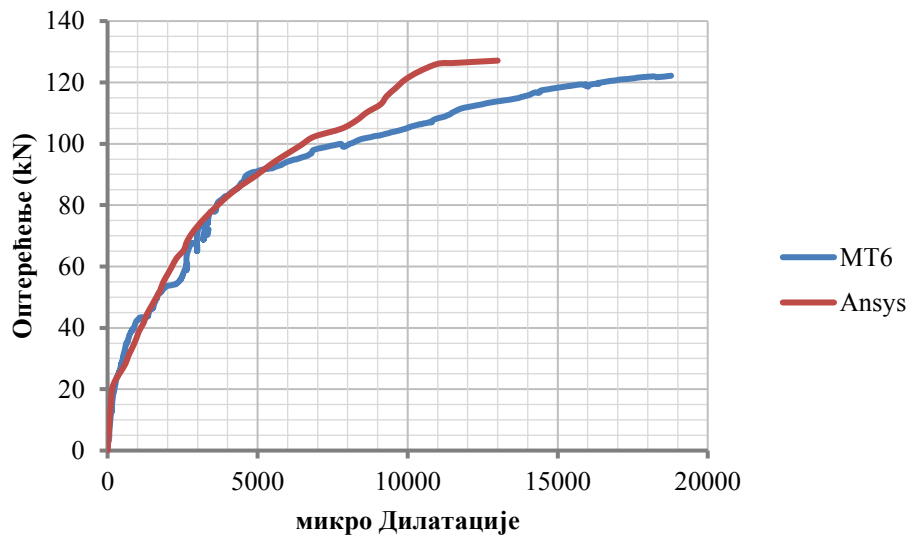
в)



Слика 7-18: Приказ деформисаног носача са вредностима угиба при пробном оптерећењу од: а) $P=40 \text{ kN}$; б) $P=80 \text{ kN}$; в) $P=120 \text{ kN}$



Слика 7-19: Упоредни дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U1) и пресеку II (U2) греде Б-Г1 добијени експериментално и применом МКЕ (Ansys)

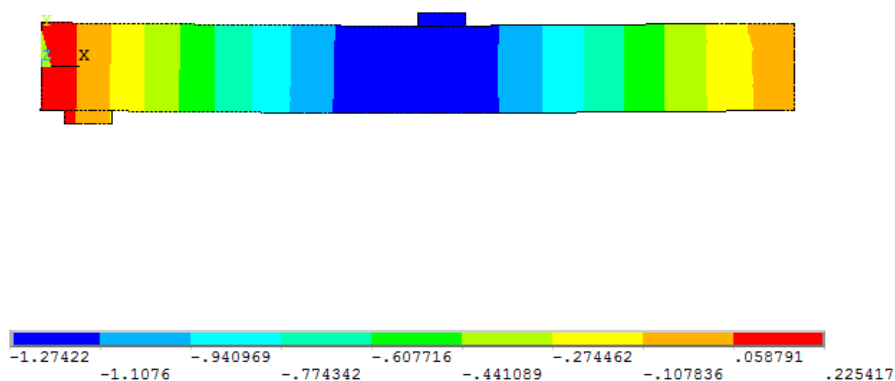


Слика 7-20: Упоредни дијаграм дилатација у ФРП арматури у пресеку III греде Б-Г1 добијени експериментално (MT6) и нумеричком анализом применом МКЕ (Ansys)

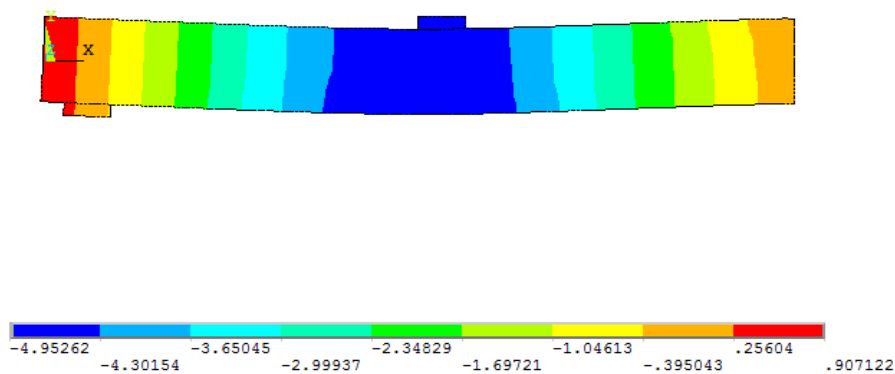
Континуални гредни носач Б-Г2

За анализу гредног носача Б-Г2 усвојен је модел са 20265 елемената и 95617 чворова. На Слици 7-21 приказан је деформисани облик носача при различитим степенима оптерећења.

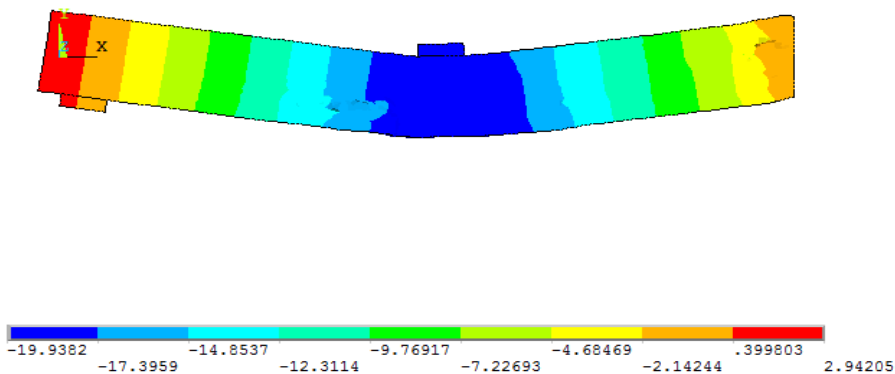
a)



б)

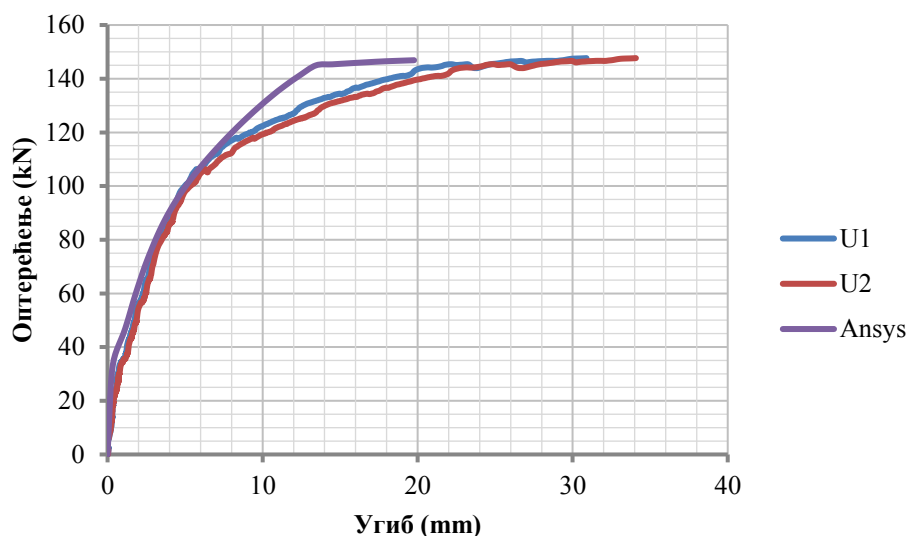


в)

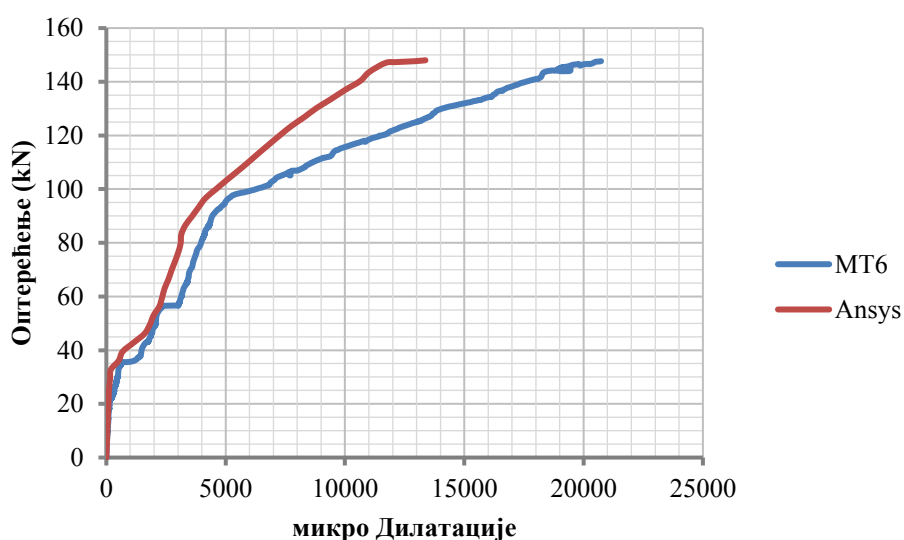


Слика 7-21: Приказ деформисаног носача са вредностима угиба при пробном оптерћењу од: а) $P=50 \text{ kN}$; б) $P=100 \text{ kN}$; в) $P=145 \text{ kN}$

На Сликама 7-22 и 7-23 приказани су упоредно дијаграми угиба и дилатација у ФРП арматури добијени експериментално и нумеричком анализом применом МКЕ.



Слика 7-22: Упоредни дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U1) и пресеку II (U2) греде Б-Г2 добијени експериментално и применом МКЕ (Ansys)



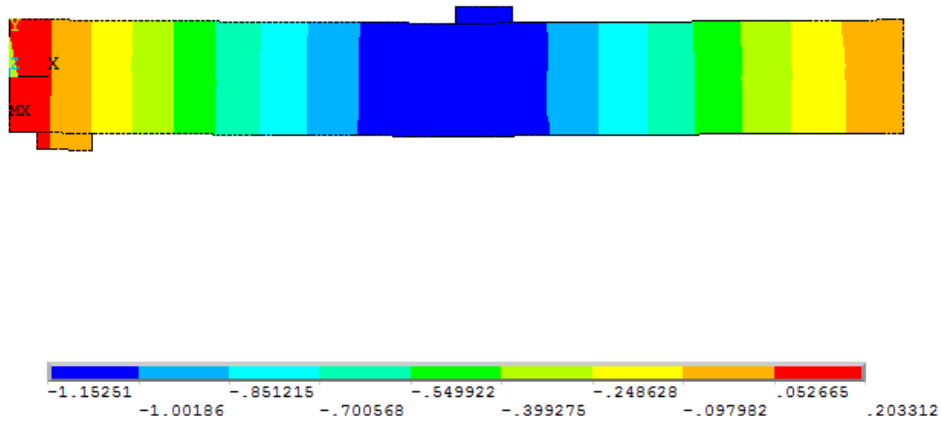
Слика 7-23: Упоредни дијаграм дилатација у ФРП арматури у пресеку I греде Б-Г2 добијени експериментално (МТ6) и нумеричком анализом применом МКЕ (Ansys)

У почетном, линеарном домену нумерички модел и експериментални резултати се потпуно поклапају. Фаза до појаве течнења у челичној арматури показује врло добро слагање резултата када су у питању угиби (Слика 7-22) и извесна одступања у случају дилатација у ФРП арматури (Слика 7-23). После почетка течнења челичне арматуре јављају се знатнија одступања услед веће крутости нумеричког модела.

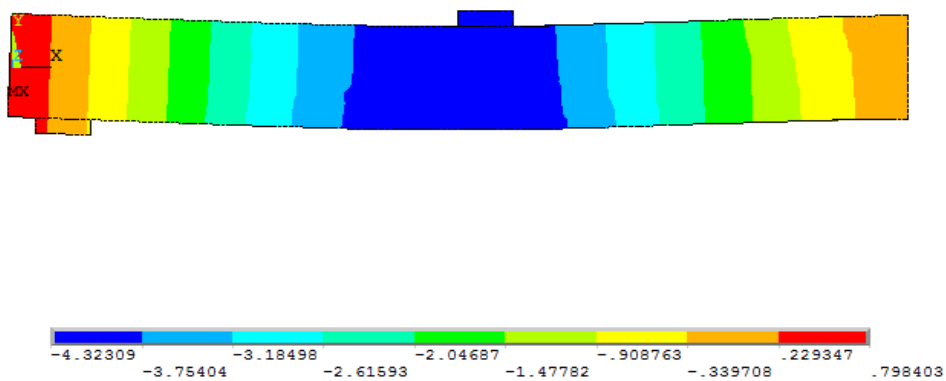
Континуални гредни носач Б-ГЗ

За анализу континуалног гредног носача Б-ГЗ усвојен је модел са 20335 елемената и 96955 чворова. На *Слици 7-24* приказан је деформисани облик носача при различитим степенима оптерећења.

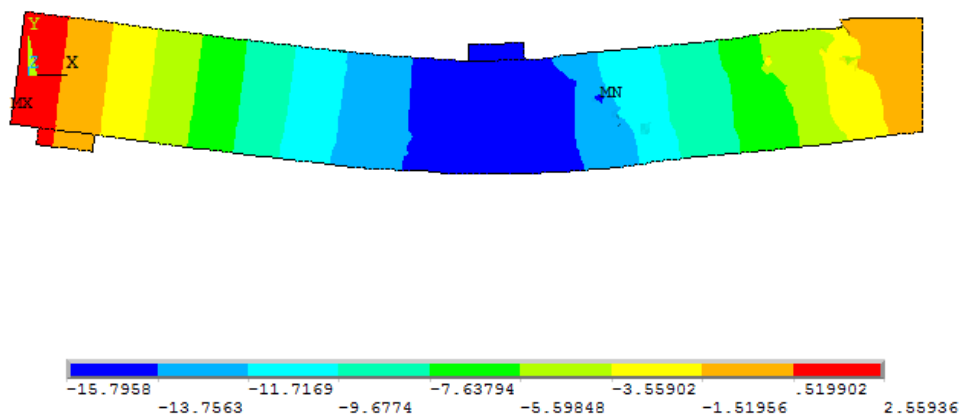
а)



б)



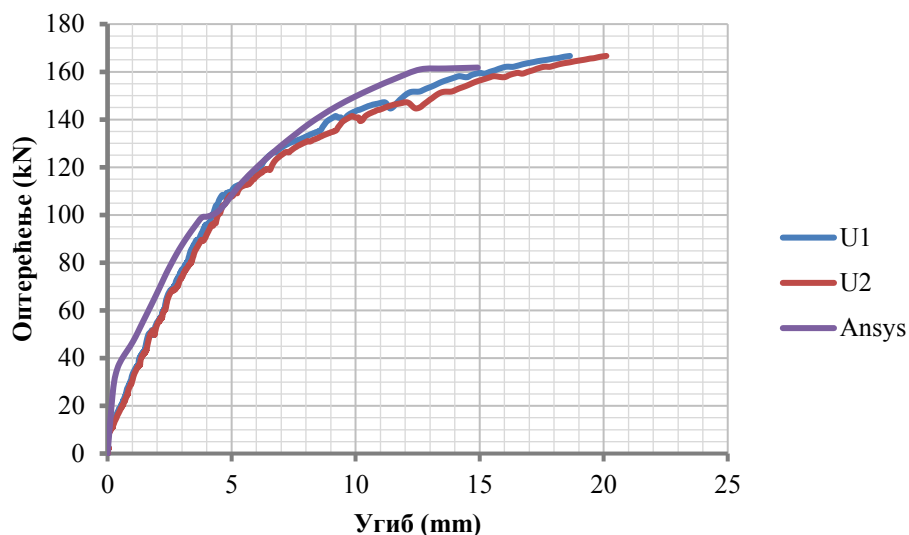
в)



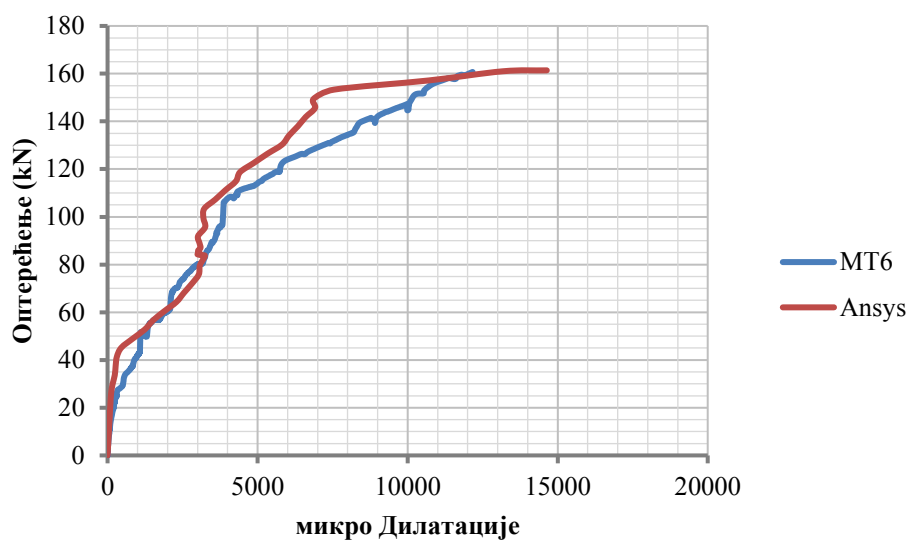
Слика 7-24: Приказ деформисаног носача са вредностима угиба при пробном оптерећењу од: а)

$P=50\text{ kN}$; б) $P=100\text{ kN}$; в) $P=165\text{ kN}$

На основу нумерички одређених вредности угиба и дилатација у ФРП арматури при различитим степенима (корацима) оптерећења, извршено је поређење са резултатима добијеним експерименталним испитивањем (Слике 7-25 и 7-26). На дијаграмима зависности се уочава добро слагање експериментално добијених вредности са вредностима добијеним применом нумеричке анализе МКЕ



Слика 7-25: Упоредни дијаграм зависности између оптерећења и угиба у пресеку I (U1) и пресеку II (U2) греде Б-Г3 добијени експериментално и применом МКЕ (Ansys)



Слика 7-26: Упоредни дијаграм дилатација у ФРП арматури у пресеку I греде Б-Г3 добијени експериментално (MT6) и нумеричком анализом применом МКЕ (Ansys)

8 ЗАВРШНЕ НАПОМЕНЕ

На основу бројних, пре свега експерименталних, а затим теоријских и нумеричких истраживања уочено је да се капацитет носивости на савијање армиранобетонских (АБ) греда значајно повећава њиховим ојачавањем арматуром од ФРП материјала. Већина ових истраживања бави се понашањем носача статичког система проста греда, оптерећених са две концентрисане силе (four point load), а много чешћи случај у реалним конструкцијама је статички систем континуалног носача, који је знатно мање истраживан. Поред тога, у домаћој грађевинској регулативи још увек нема практичних препорука, ни прописа и стандарда за примену било ког система ојачања ФРП арматуром и углавном се користе препоруке и софтвери светски признатих произвођача ових производа. Због тога је један од циљева истраживања био да се ојачавање континуалних гредних носача арматуром од ФРП материјала додатно истражи теоријски и експериментално и приближи научној и стручној јавности у области грађевинског конструктерства.

Тежиште рада представљају експериментална испитивања шест АБ континуалних гредних носача ојачаних ФРП арматуром, изложених утицају краткотрајног статичког оптерећења.

Ојачавање континуалних носача је извршено на два начина:

1. уградњом арматурних шипки на бази стаклених (ГФРП) и карбонских (ЦФРП) влакана у заштитном слоју бетона (НСМ метода), и

2. лепљењем ламината од карбонских влакана на затегнутој површини греде (ЕБ метода).

Резултати мерених угиба носача у средини оба поља, дилатација у бетону, челичној и ФРП арматури приказани су у виду дијаграма зависности између оптерећења и мерених параметара за све испитане греде, после чега је извршена и њихова упоредна анализа. Приказани су облици лома испитиваних носача зависно од методе и поступка ојачања. Поред експерименталних испитивања, развијен је математички модел за прорачун носивости пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром, оптерећене на савијање. Написан је програм М_к.м у Матлабу (MATLAB R2014a) чијом применом су одређене криве зависности између момента и кривине пресека ојачаних различитом количином ГФРП, односно ЦФРП арматуре. Коришћењем програма М_к.м анализирани су утицаји различитих параметара (врста и количина ФРП арматуре, чврстоћа бетона при притиску и проценат армирања унутрашњом челичном арматуром) на носивост пресека греде ојачане ФРП арматуром. Нумеричко истраживање обухвата нелинеарну анализу експериментлно испитиваних носача применом софтвера Ансис (ANSYS).

8.1 Закључци спроведених истраживања

У овом раду, на основу спроведених сопствених истраживања везаних за могућност примене ФРП арматуре у ојачавању АБ континуалних гредних носача изведене су две групе закључака. Прва група закључака односи се на анализу пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром применом програма М_к.м. Другу групу чине закључци који се односе на гранична стања континуалних носача ојачаних ФРП арматуром, изложених дејству краткотрајног оптерећења.

На основу анализе добијених дијаграма зависности између момента савијања и кривине пресека АБ греде ојачане ФРП арматуром (*Слике 5-12 до 5-32*), као и дијаграма зависности између граничног момента савијања и површине ФРП арматуре при различитим вредностима чврстоће бетона при притиску и процента армирања челичном арматуром (*Слике 5-34 до 5-78*), изведени су следећи закључци:

- ✓ Облик везе момент-кривина је битна карактеристика АБ пресека од које у значајној мери зависи понашање АБ греде у целини. На добијеним дијаграмима зависности између момента савијања и кривине пресека АБ греде ојачане различитом количином стаклене и карбонске ФРП арматуре уочене су три

карактеристичне области: 1) до појаве прслине у пресеку, 2) од појаве прслине до појаве течења челичне арматуре и 3) од појаве течења арматуре до лома пресека.

- ✓ На вредност момента појаве прслине (M_{cr}) ФРП арматура има минималан утицај без обзира на врсту и количину додатне арматуре.
- ✓ На вредност момента течења (M_y), као и на вредност граничног момента савијања (M_u) ФРП арматура има значајан утицај, при чему је повећање момента течења и граничног момента савијања веће у случају ЦФРП арматуре, као последица веће чврстоће при затезању у односу на ГФРП арматуру.
- ✓ Потребан проценат армирања спољашњом ФРП арматуром треба одредити у сваком појединачном случају ојачавања, с обзиром да на моменат носивости пресека утичу и чврстоћа бетона при притиску и проценат армирања унутрашњом челичном арматуром. У случају када је чврстоћа бетона при притиску мала, као и у случају када је велики проценат армирања унутрашњом челичном арматуром, примена додатне ФРП арматуре губи на значају јер долази до лома пресека услед мрвљења бетона, при чему је мало искоришћење носивости ФРП арматуре.

На основу спроведених експерименталних испитивања, као и нумеричке анализе, произашла је друга група закључака везаних за гранична стања континуалних носача ојачаних ФРП арматуром, изложених дејству краткотрајног оптерећења. Иако је испитиван релативно мали број континуалних гредних носача (један контролни и пет ојачаних) могу се, сагласно циљевима истраживања, формулисати следећи закључци:

- ✓ На основу дијаграма зависности између оптерећења и угиба, уочљиве су три карактеристичне области: 1) линеарно понашање до појаве прслина у бетону, 2) нелинеарно понашање од појаве прслина до појаве течења у затегнутој челичној арматури и 3) изразито нелинеарно понашање од појаве течења у челичној арматури до лома.
- ✓ У домену еластичних деформација, до појаве прслина, нема битних разлика у понашању носача, без обзира на начин ојачавања.
- ✓ Примена ФРП арматуре за ојачавање АБ континуалних гредних носача, чак и при малој количини додатне арматуре може значајно да повећа носивост на савијање. Ово је потврђено ојачавањем додатним стакленим и карбонским ФРП шипкама којима је постигнуто повећање носивости у односу на контролну

(неојачану) греду од 22% до 82%, у зависности од врсте и положаја ФРП ојачања, као и ојачавањем ФРП тракама, којима је постигнуто повећање носивости од 50%.

- ✓ Употребом ГФРП шипки може се остварити повећање носивости континуалних носача без обзира на положај ојачања што је потврђено спроведеним експериментом. Ојачавањем у горњој зони изнад средњег ослонца постигнуто је незнатно повећање носивости за 22%, док се ојачавањем у доњој зони оба поља носивост повећава за 48%, а ојачавањем и у горњој зони изнад средњег ослонца и у доњој зони оба поља постигнуто је повећање од 67%, у односу на носивост контролне (неојачане) греде.
- ✓ Употребом ЦФРП шипки, захваљујући њиховој већој чврстоћи при затезању, може се значајније повећати носивост континуалних носача у поређењу са употребом ГФРП шипки. Ипак, уочено је повећање носивости од свега 9 % код греде ојачане ЦФРП шипкама у односу на носивост греде ојачане ГФРП шипкама. Разлози незнатног повећања носивости леже у превременом отказу гредног носача ојачаног ЦФРП шипкама.
- ✓ Иако се и стаклене и карбонске ФРП шипке могу користити у оквиру НСМ методе за повећање носивости континуалног носача, на избор материјала могу утицати и други чиниоци. На пример, због ниже цене у односу на ЦФРП арматуру, ГФРП арматура може бити економичнија у већини случајева ојачавања, али у случајевима када је деформабилност ограничавајући услов, треба користити ЦФРП арматуру због њеног већег модула еластичности.
- ✓ Примена НСМ методе ојачања има низ предности у односу на ЕБ методу ојачања, како са аспекта граничног стања носивости, тако и у погледу деформабилности. Предност примене ЕБ методе у односу на НСМ методу је у погледу економичности, с обзиром да је потребна количина епокидне испуне знатно мања.
- ✓ Ојачавање ГФРП шипкама не утиче негативно на дуктилност континуалних носача, што потврђује и индекс дуктилности испитаних носача ($ID > 4$). За разлику од њих, дуктилност носача ојачаног ЦФРП шипкама није задовољавајућа ($ID < 2$). Разлог веће дуктилности носача ојачаних ГФРП арматуром лежи у мањем модулу еластичности те арматуре у односу модулу еластичности ЦФРП арматуре. Мала дуктилност носача ојачаних карбонским шипкама и ламинатима лежи у превременом отказу ових носача услед смањене

прионљивости ЦФРП шипки односно, одвајања ФРП ламината од површине бетона.

- ✓ У случају ојачавања НСМ методом, уочени облици отказа су били различити за два типа ФРП шипки. Код гредних носача ојачаних ГФРП шипкама, отказ се јавио у зони сидрења услед губитка прионљивости на међувези бетон-епоксидна испуна, док код греде ојачане ЦФРП шипкама, до отказа је дошло услед губитка прионљивости између ЦФРП шипке и околног епоксидног лепка. У случају ЦФРП арматуре, губитак прионљивости се може објаснити малом адхезијом између глатке површине ЦФРП шипки и епоксидне испуне.
- ✓ Отказ носача ојачаног ЕБ методом је настао одвајањем ламината на споју бетона и епоксидног лепка, због прекорачења напона затезања у бетону. Примењен је најчешћи облик обраде везе, без посебне обраде површине бетона на контакту са ламинатом.
- ✓ Нумерички поступак нелинеарне анализе АБ континуалних гредних носача ојачаних ФРП арматуром изузетно је комплексан али даје употребљиве резултате, што је у дисертацији упоређењем са експерименталним вредностима и показано.
- ✓ Резултати добијени МКЕ анализом модела гредних носача поклапају се са експерименталним све до појаве течења затегнуте челичне арматуре. После појаве течења челика, срачунати угиби и дилатације применом МКЕ су мање у односу на угибе и дилатације добијене експерименталним испитивањем. Разлози неслагања резултата добијених експерименталним испитивањем и применом МКЕ су пре свега у локалној несавршености првенствено бетона на споју цементног камена и агрегата, као и претпостављеној идеалној прионљивости између бетона, епоксидног лепка и ФРП арматуре.
- ✓ Сви закључци засновани су на анализи резултата спроведених истраживања. За извођење општијих закључака неопходно је створити већу базу експерименталних података који би се добили испитивањима у лабораторијским и теренским условима.

8.2 Препоруке за будућа истраживања

Ојачавање армиранобетонских конструкција применом ФРП арматуре има много предности у односу на конвенционалне начине ојачавања. Примена НСМ методе, која у нашој земљи још увек није заступљена у пракси, представља врло атрактивно поље за будућа истраживања.

У овом раду је дат одговор на нека питања везана за ојачавање континуалних гредних носача направљених од самоупраћујућег бетона. Првенствени циљ је био да се дође до рационалног избора врсте ФРП арматуре, методе и начина ојачања континуалних гредних носача.

Истраживања би требало усмерити у следећим правцима:

- ✓ Експериментално испитивање понашања АБ континуалних гредних носача ојачаних ФРП арматуром при динамичком оптерећењу;
- ✓ Истраживање примене уских трака и испуна прореза на бази цемента за ојачавање у оквиру НСМ методе;
- ✓ Истраживање начина за спречавање одвајања споља залепљених ламината код ЕБ методе;
- ✓ Формирање нумеричких модела којим би се различити облици лома, који се јављају код носача ојачаних ФРП арматуром, могли анализирати и предвидети;
- ✓ Реална нумеричка симулација међусобних веза између бетона и епоксидне испуне, као и епоксидне испуне и ФРП арматуре.

ПРИЛОЗИ

Прилог 1: Програм M_k.m

```
%Skrip datoteka za odredjivanje dijagrama zavisnosti izmedju momenta savijanja (M) i
%krivine preseka (k)
disp(' ')
disp('GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE POPRECNOG PRESEKA')
disp(' ')
b=input(' Unesite sirinu poprecnog preseka u mm b=');
h=input(' Unesite visinu poprecnog preseka u mm h=');
Ab=b*h;
disp(' ')
fprintf(' Povrsina poprecnog preseka grede Ab= %f mm^2',Ab )
disp(' ')
Ib=b*h^3/12;
disp(' ')
fprintf(' Moment inercije grede Ib= %f mm^4',Ib )
disp(' ')
disp(' ')
c_dole=input(' Unesite debljinu zastitnog sloja u donjoj zoni u mm c_dole=');
c_gore=input(' Unesite debljinu zastitnog sloja u gornjoj zoni u mm c_gore=');
disp(' ')
disp('DIMENZIJE ARMATURE')
disp(' ')
Fi_uzeng=input(' Unesite precnik uzengije u mm Fi_uzeng=');
Fi_dole=input(' Unesite precnik armature u donjoj zoni u mm Fi_dole=');
Fi_gore=input(' Unesite precnik armature u gornjoj zoni u mm Fi_gore=');
disp(' ')
disp('UDALJENJA ARMATURE OD PRITISNUTE IVICE PRESEKA')
disp(' ')
d_dole=h-c_dole-Fi_uzeng-Fi_dole/2;
d_gore=c_gore+Fi_uzeng+Fi_gore/2;
fprintf(' Udaljenje armature u gornjoj zoni d_gore= %f mm',d_gore )
disp(' ')
fprintf(' Udaljenje armature u donjoj zoni d_dole= %f mm',d_dole )
disp(' ')
d_frp=input(' Unesite udaljenje frp armature od pritisnute ivice u mm d_frp=');
disp(' ')
```



```

y_dole=h-d_dole;
y_gore=h-d_gore;
y_frp=h-d_frp;
disp(' ')
disp('KARAKTERISTIKE CELICNE ARMATURE')
disp(' ')
As1=input(' Unesite površinu armature u donjoj zoni u mm^2 As1=');
As2=input(' Unesite površinu armature u donjoj zoni u mm^2 As2=');
Es=input(' Unesite modul elastičnosti celika u MPa Es=');
f_s_y=input(' Unesite granicu tecenja celika u MPa f_s_y=');
Eps_s_y=f_s_y/Es;
fprintf(' Dilatacija tecenja celika Eps_s_y= %f,Eps_s_y )
disp(' ')
Esp=input(' Unesite procenat ojačanja celika:');
Esp=Esp/100;
disp(' ')
Dilatacija_celik=[0; Eps_s_y; 0.01];
Napon_celik=[0; f_s_y; f_s_y+(0.01-Eps_s_y)*Esp*Es];
plot(Dilatacija_celik,Napon_celik)
xlabel('Dilatacija ( )')
ylabel('Napon (MPa)')
title('Veza napona i dilatacija za armaturni celik')
disp(' ')
disp('KARAKTERISTIKE FRP ARMATURE')
disp(' ')
Afrp=input(' Unesite površinu frp armature u donjoj zoni u mm^2 Afrp=');
Efrp=input(' Unesite modul elastičnosti FRP armature u MPa Efrp=');
f_frp_ult=input(' Unesite zateznu cvrstocu frp armature u MPa f_frp_ult=');
disp(' ')
Eps_frp_ult=f_frp_ult/Efrp;
fprintf(' Dilatacija kidanja frp armature Eps_frp_ult= %f,Eps_frp_ult )
disp(' ')
Dilatacija_FRP=[0; Eps_frp_ult];
Napon_FRP=[0; f_frp_ult];
plot(Dilatacija_FRP,Napon_FRP)
xlabel('Dilatacija ( )')
ylabel('Napon (MPa)')
title('Veza napona i dilatacija za FRP armaturu')
disp(' ')
Kapa=input(' Unesite redukcionni faktor odnosno pretpostavljeni stepen iskoriscenja FRP armature Kapa=');
Eps_frp_ult_red=Kapa*Eps_frp_ult;
fprintf(' Redukovana dilatacija kidanja frp armature Eps_frp_ult_red= %f,Eps_frp_ult_red )
disp(' ')
Dilatacija_FRP=[0; Eps_frp_ult];
Napon_FRP=[0; f_frp_ult];
Dilatacija_FRP_red=[0; Eps_frp_ult_red];
Napon_FRP_red=[0; f_frp_ult*Kapa];
plot(Dilatacija_FRP,Napon_FRP,':r',Dilatacija_FRP_red,Napon_FRP_red,'-b',linewidth,2)
xlabel('Dilatacija ( )')
ylabel('Napon (MPa)')
title('Veza napona i dilatacija za FRP armaturu sa redukcionim faktorom')
disp(' ')
disp(' ')
disp('KARAKTERISTIKE BETONA')
disp(' ')
f_c_prim=input(' Unesite pritisnu cvrstocu betona u MPa f_c_prim=');
Ec=3202*((f_c_prim+8)^(0.587));
fprintf(' Modul elastičnosti betona Ec= %f MPa,Ec )
disp(' ')
Eps_c_fcprim=2*f_c_prim/Ec;

```

```

fprintf(' Dilatacija betona pri pritisnoj cvrstoci Eps_c_fcprim= %f,Eps_c_fcprim )
disp(' ')
GranicaElasticnostiBetona=0.3*f_c_prim;
fprintf(' Granica elasticnosti betona 0.3*f_c_prim= %f MPa',GranicaElasticnostiBetona )
disp(' ')
Eps_c_elast=GranicaElasticnostiBetona/Ec;
fprintf(' Dilatacija betona na granici elasticnosti Eps_c_elast= %f,Eps_c_elast )
disp(' ')
n=Es/Ec;
n_frp=Efrp/Ec;
f_c_r=0.6*(f_c_prim^(1/2));
fprintf(' Zatezna cvrstoca betona fcr= %f MPa',f_c_r )
disp(' ')
Atransf1=(n-1)*As1;
Atransf2=(n-1)*As2;
Atransf_frp=(n_frp-1)*Afrp;
y_td=(b*h^2/2+Atransf1*y_dole+Atransf2*y_gore+Atransf_frp*y_frp)/(b*h+Atransf1+Atransf2+Atransf_frp);
y_tg=h-y_td;
Igb=b*y_tg^3/12+b*y_tg*(y_tg/2)^2+b*y_td^3/12+b*y_td*(y_td/2)^2+Atransf1*(d_dole-
y_tg)^2+Atransf2*(y_tg-d_gore)^2+Atransf_frp*(y_tg-d_frp)^2;
Mcr=f_c_r*Igb/y_td;
Mcr=Mcr/1e6;
fprintf(' Moment pojave prsline Mcr= %f kNm',Mcr )
disp(' ')
Eps_c_cr=f_c_r/Ec;
RO_c=Eps_c_cr/y_tg
fprintf(' Dilatacija betona pri pojavi prsline Eps_c_cr= %f,Eps_c_cr )
disp(' ')
Eps_c_ult=input(' Unesite granicnu dilataciju betona u mikrodilatacijama Eps_c_ult=');
disp(' ')
md=input(' Unesite broj mikrodilatacija na kojima se vrsi iteracija=');
disp(' ')
BrojIteracija=Eps_c_ult/md;
Eps_c_ult=Eps_c_ult*1e-6;
disp(' ')
fprintf(' Broj iteracija je: %f,BrojIteracija )
disp(' ')
disp(' ')
fprintf(' Prava-parabola dijagram zavisnosti' )
disp(' ')
f_c_mat=zeros(BrojIteracija,1);
Eps_c_mat=zeros(BrojIteracija,1);
Eps_c=0;
f_c_mat(1)=0;
for k=1:BrojIteracija;
    Eps_c=Eps_c+md*1e-6;
    if Eps_c<Eps_c_fcprim;
        f_c_mat(k+1)=f_c_prim*(2*Eps_c/Eps_c_fcprim-(Eps_c/Eps_c_fcprim)^2);
        Eps_c_mat(k+1)=Eps_c;
    else Eps_c<Eps_c_fcprim;
        f_c_mat(k+1)=f_c_prim;
        Eps_c_mat(k+1)=Eps_c;
    end
end
plot(Eps_c_mat,f_c_mat);
xlabel('Dilatacija (')');
ylabel('Napon (MPa)');
title('Prava-parabola veza napona i dilatacije za beton');
axis([0, Eps_c_ult*1.2, 0, f_c_prim*1.2]);
Bezveze=input(' Unesite broj mikrodilatacija na kojima se vrsi iteracija=');

```

```

c_mat=zeros(BrojIteracija,1);
M_mat=zeros(BrojIteracija,1);
RO_mat=zeros(BrojIteracija,1);
Eps_c_mat=zeros(BrojIteracija,1);
Eps_s2_mat=zeros(BrojIteracija,1);
Eps_s1_mat=zeros(BrojIteracija,1);
Eps_frp_mat=zeros(BrojIteracija,1);
C_c_mat=zeros(BrojIteracija,1);
Ief_mat=zeros(BrojIteracija,1);
hcr_mat=zeros(BrojIteracija,1);
Eps_c=0;
Eps_s2=0;
Eps_s1=0;
Eps_frp=0;
Eps_c_t=0;
M=0;
hcr=0;
Ief=0;
for k=2:BrojIteracija;
    Eps_c=Eps_c+1e-6*md;
    if Eps_c<Eps_c_cr;
        c=y_tg;
        Eps_s2=Eps_c*(c-d_gore)/c;
        Eps_s1=Eps_c*(d_dole-c)/c;
        Eps_frp=Eps_c*(d_frp-c)/c;
        Eps_c_t=Eps_c*(h-c)/c;
        f_c=Eps_c*Ec;
        f_s2=Eps_s2*Es;
        f_s1=Eps_s1*Es;
        f_frp=Eps_frp*Efrp;
        f_c_t=Eps_c_t*Ec;
        C_c=1/2*b*c*f_c;
        C_s2=As2*f_s2;
        T_c=b*(h-c)*f_c_t/2;
        T_s1=As1*f_s1;
        T_frp=Afrp*f_frp;
        M=(C_c*2/3*c+C_s2*(c-d_gore)+T_c*2/3*(h-c)+T_s1*(d_dole-c)+T_frp*(d_frp-c))*1e-6;
        RO=Eps_c/c;
        RO_mat(k,1)=RO;
        c_mat(k,1)=c;
        hcr_mat(k,1)=h;
        Ief=b*h^3/12;
        Ief_mat(k,1)=Ief;
        M_mat(k,1)=M;
        Eps_c_mat(k,1)=Eps_c;
        Eps_s2_mat(k,1)=Eps_s2;
        Eps_s1_mat(k,1)=Eps_s1;
        Eps_frp_mat(k,1)=Eps_frp;
        Eps_ct_mat(k,1)=Eps_c_t;
    elseif Eps_c<Eps_c_elast;
        syms c
        hcr=(1+Eps_c_cr/Eps_c)*c;
        Eps_s2=Eps_c*(1-d_gore/c);
        Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
        C_c=1/2*Eps_c*Ec*b*c;
        C_s2=Eps_s2*Es*As2;
        T_s1=Eps_s1*Es*As1;
        T_c=0.5*Eps_c_cr*Ec*b*(hcr-c);
        Eps_frp=Eps_c*(d_frp/c-1);
        T_frp=Eps_frp*Efrp*Afrp;
    end
end

```

```

c=solve(C_c+C_s2-T_s1-T_frp-T_c);
c1=c(1);
c2=c(2);
c1=double(c1);
c2=double(c2);
if c1>0&c1<h
    c=c1;
else
    c=c2;
end
c;
hcr=(1+Eps_c_cr/Eps_c)*c;
Eps_s2=Eps_c*(1-d_gore/c);
Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
C_c=1/2*Eps_c*Ec*b*c/1e3;
C_s2=Eps_s2*Es*As2/1e3;
T_s1=Eps_s1*Es*As1/1e3;
T_c=0.5*Eps_c_cr*Ec*b*(hcr-c)/1e3;
Eps_frp=Eps_c*(d_frp/c-1);
T_frp=Eps_frp*Efrp*Afrp/1e3;
M=C_c*2/3*c+C_s2*(c-d_gore)+T_s1*(d_dole-c)+T_c*2/3*(hcr-c)+T_frp*(d_frp-c);
M=M/1e3;
RO=Eps_c/c;
RO_mat(k,1)=RO;
c_mat(k,1)=c;
M_mat(k,1)=M;
Ief=b*hcr^3/12;
Ief_mat(k,1)=Ief;
hcr_mat(k,1)=hcr;
Eps_c_mat(k,1)=Eps_c;
Eps_s2_mat(k,1)=Eps_s2;
Eps_s1_mat(k,1)=Eps_s1;
Eps_frp_mat(k,1)=Eps_frp;
elseif Eps_c<Eps_c_fcprim;
if Eps_s1<Eps_s_y;
syms c;
hcr=(1+Eps_c_cr/Eps_c)*c;
c_elast=c*Eps_c_elast/Eps_c;
c_plast=c-c_elast;
Eps_s2=Eps_c*(1-d_gore/c);
Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
f_c=f_c_prim*(2*Eps_c/Eps_c_fcprim-(Eps_c/Eps_c_fcprim)^2);
f_c_elast=0.3*f_c_prim;
C_c_elast=1/2*Eps_c_elast*Ec*b*c_elast;
C_c_plast_pravougaonik=Eps_c_elast*Ec*b*c_plast;
C_c_plast_trougao=1/2*(f_c-f_c_elast)*b*c_plast;
C_s2=Eps_s2*Es*As2;
T_s1=Eps_s1*Es*As1;
T_c=0.5*Eps_c_cr*Ec*b*(hcr-c);
Eps_frp=Eps_c*(d_frp/c-1);
T_frp=Eps_frp*Efrp*Afrp;
c=solve(C_c_elast+C_c_plast_pravougaonik+C_c_plast_trougao+C_s2-T_s1-T_frp-T_c);
c1=c(1);
c2=c(2);
c1=double(c1);
c2=double(c2);
if c1>0&c1<h;
    c=c1;
else
    c=c2;

```

```

end
c;
hcr=(1+Eps_c_cr/Eps_c)*c;
c_elast=c*Eps_c_elast/Eps_c;
c_plast=c-c_elast;
Eps_s2=Eps_c*(1-d_gore/c);
Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
C_c_elast=1/2*Eps_c_elast*Ec*b*c_elast/1e3;
C_c_plast_pravougaonik=Eps_c_elast*Ec*b*c_plast/1e3;
C_c_plast_trougao=1/2*(f_c-f_c_elast)*b*c_plast/1e3;
C_s2=Eps_s2*Es*As2/1e3;
T_s1=Eps_s1*Es*As1/1e3;
T_c=0.5*Eps_c_cr*Ec*b*(hcr-c)/1e3;
Eps_frp=Eps_c*(d_frp/c-1);
T_frp=Eps_frp*Efrp*Afrp/1e3;
M=C_c_elast*2/3*c_elast+C_c_plast_pravougaonik*(c_elast+c_plast/2)+
+C_c_plast_trougao*(c_elast+2/3*c_plast)+C_s2*(c-d_gore)+
+T_s1*(d_dole-c)+T_c*2/3*(hcr-c)+T_frp*(d_frp-c);
M=M/1e3;
RO=Eps_c/c;
RO_mat(k,1)=RO;
c_mat(k,1)=c;
M_mat(k,1)=M;
Ief=b*hcr^3/12;
Ief_mat(k,1)=Ief;
hcr_mat(k,1)=hcr;
Eps_c_mat(k,1)=Eps_c;
Eps_s2_mat(k,1)=Eps_s2;
Eps_s1_mat(k,1)=Eps_s1;
Eps_frp_mat(k,1)=Eps_frp;
else Eps_s1>Eps_s_y;
syms c;
hcr=(1+Eps_c_cr/Eps_c)*c;
c_elast=c*Eps_c_elast/Eps_c;
c_plast=c-c_elast;
Eps_s2=Eps_c*(1-d_gore/c);
Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
f_c=f_c_prim*(2*Eps_c/Eps_c_fcprim-(Eps_c/Eps_c_fcprim)^2);
f_c_elast=0.3*f_c_prim;
C_c_elast=1/2*Eps_c_elast*Ec*b*c_elast;
C_c_plast_pravougaonik=Eps_c_elast*Ec*b*c_plast;
C_c_plast_trougao=1/2*(f_c-f_c_elast)*b*c_plast;
C_s2=Eps_s2*Es*As2;
T_s1=(Eps_s_y*Es+Esp*Es*(Eps_s1-Eps_s_y))*As1;
T_c=0.5*Eps_c_cr*Ec*b*(hcr-c);
Eps_frp=Eps_c*(d_frp/c-1);
T_frp=Eps_frp*Efrp*Afrp;
c=solve(C_c_elast+C_c_plast_pravougaonik+C_c_plast_trougao+C_s2-T_s1-T_frp-T_c);
c1=c(1);
c2=c(2);
c1=double(c1);
c2=double(c2);
if c1>0&c1<h;
    c=c1;
else
    c=c2;
end
end
c;
Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
if Eps_s1<=0.01

```

```

hcr=(1+Eps_c_cr/Eps_c)*c;
c_elast=c*Eps_c_elast/Eps_c;
c_plast=c-c_elast;
Eps_s2=Eps_c*(1-d_gore/c);
Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
f_c=f_c_prim*(2*Eps_c/Eps_c_fcprim-(Eps_c/Eps_c_fcprim)^2);
f_c_elast=0.3*f_c_prim;
C_c_elast=1/2*Eps_c_elast*Ec*b*c_elast/1e3;
C_c_plast_pravougaonik=Eps_c_elast*Ec*b*c_plast/1e3;
C_c_plast_trougao=1/2*(f_c-f_c_elast)*b*c_plast/1e3;
C_s2=Eps_s2*Es*As2/1e3;
T_s1=(Eps_s_y*Es+Esp*Es*(Eps_s1-Eps_s_y))*As1/1e3;
T_c=0.5*Eps_c_cr*Ec*b*(hcr-c)/1e3;
Eps_frp=Eps_c*(d_frp/c-1);
T_frp=Eps_frp*Efrp*Afrp/1e3;
M=C_c_elast*2/3*c_elast+C_c_plast_pravougaonik*(c_elast+c_plast/2)+
+C_c_plast_trougao*(c_elast+2/3*c_plast)+C_s2*(c-d_gore)+T_s1*(d_dole-c)+T_c*2/3*(hcr-c)+
+T_frp*(d_frp-c);
M=M/1e3;
RO=Eps_c/c;
RO_mat(k,1)=RO;
c_mat(k,1)=c;
M_mat(k,1)=M;
Ief=b*hcr^3/12;
Ief_mat(k,1)=Ief;
hcr_mat(k,1)=hcr;
Eps_c_mat(k,1)=Eps_c;
Eps_s2_mat(k,1)=Eps_s2;
Eps_s1_mat(k,1)=Eps_s1;
Eps_frp_mat(k,1)=Eps_frp;
elseif Eps_s1>0.01;
syms c;
hcr=(1+Eps_c_cr/Eps_c)*c;
c_elast=c*Eps_c_elast/Eps_c;
c_plast=c-c_elast;
Eps_s2=Eps_c*(1-d_gore/c);
Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
f_c=f_c_prim*(2*Eps_c/Eps_c_fcprim-(Eps_c/Eps_c_fcprim)^2);
f_c_elast=0.3*f_c_prim;
C_c_elast=1/2*Eps_c_elast*Ec*b*c_elast;
C_c_plast_pravougaonik=Eps_c_elast*Ec*b*c_plast;
C_c_plast_trougao=1/2*(f_c-f_c_elast)*b*c_plast;
C_s2=Eps_s2*Es*As2;
T_s1=(Eps_s_y*Es+Esp*Es*(Eps_s1-Eps_s_y))*As1;
T_c=0.5*Eps_c_cr*Ec*b*(hcr-c);
Eps_frp=Eps_c*(d_frp/c-1);
T_frp=Eps_frp*Efrp*Afrp;
c=solve(C_c_elast+C_c_plast_pravougaonik+C_c_plast_trougao+C_s2-T_s1-T_frp-T_c);
c1=c(1);
c2=c(2);
c1=double(c1);
c2=double(c2);
if c1>0&c1<h;
    c=c1;
else
    c=c2;
end
c;
hcr=(1+Eps_c_cr/Eps_c)*c;
c_elast=c*Eps_c_elast/Eps_c;

```

```

c_plast=c-c_elast;
Eps_s2=Eps_c*(1-d_gore/c);
Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
f_c=f_c_prim*(2*Eps_c/Eps_c_fcprim-(Eps_c/Eps_c_fcprim)^2);
f_c_elast=0.3*f_c_prim;
C_c_elast=1/2*Eps_c_elast*Ec*b*c_elast/1e3;
C_c_plast_pravougaonik=Eps_c_elast*Ec*b*c_plast/1e3;
C_c_plast_trougao=1/2*(f_c-f_c_elast)*b*c_plast/1e3;
C_s2=Eps_s2*Es*As2/1e3;
T_s1=(Eps_s_y*Es+Esp*Es*(Eps_s1-Eps_s_y))*As1/1e3;
T_c=0.5*Eps_c_cr*Ec*b*(hcr-c)/1e3;
Eps_frp=Eps_c*(d_frp/c-1);
T_frp=Eps_frp*Efrp*Afrp/1e3;
M=C_c_elast*2/3*c_elast+C_c_plast_pravougaonik*(c_elast+c_plast/2)+
+C_c_plast_trougao*(c_elast+2/3*c_plast)+C_s2*(c-d_gore)+T_s1*(d_dole-c)+
+T_c*2/3*(hcr-c)+T_frp*(d_frp-c);
M=M/1e3;
RO=Eps_c/c;
RO_mat(k,1)=RO;
c_mat(k,1)=c;
M_mat(k,1)=M;
Ief=b*hcr^3/12;
Ief_mat(k,1)=Ief;
hcr_mat(k,1)=hcr;
Eps_c_mat(k,1)=Eps_c;
Eps_s2_mat(k,1)=Eps_s2;
Eps_s1_mat(k,1)=Eps_s1;
Eps_frp_mat(k,1)=Eps_frp;
end
end
else
if Eps_s1<Eps_s_y;
syms c;
hcr=(1+Eps_c_cr/Eps_c)*c;
c_elast=c*Eps_c_elast/Eps_c;
c_prom=c*Eps_c_fcprim/Eps_c;
c_plast=c_prom-c_elast;
c_const=c-c_prom;
Eps_s2=Eps_c*(1-d_gore/c);
Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
f_c=f_c_prim*(2*Eps_c/Eps_c_fcprim-(Eps_c/Eps_c_fcprim)^2);
f_c_elast=0.3*f_c_prim;
C_c_elast=0.15*f_c_prim*b*c_elast;
C_c_plast_pravougaonik=0.3*f_c_prim*b*c_plast;
C_c_plast_trougao=0.35*f_c_prim*b*c_plast;
C_c_const=f_c_prim*b*c_const;
C_s2=Eps_s2*Es*As2;
T_s1=Eps_s1*Es*As1;
T_c=0.5*Eps_c_cr*Ec*b*(hcr-c);
Eps_frp=Eps_c*(d_frp/c-1);
T_frp=Eps_frp*Efrp*Afrp;
c=solve(C_c_elast+C_c_plast_pravougaonik+C_c_plast_trougao+C_c_const+C_s2-T_s1-T_frp-T_c);
c1=c(1);
c2=c(2);
c1=double(c1);
c2=double(c2);
if c1>0&c1<h;
c=c1;
else
c=c2;

```

```

end
c;
hcr=(1+Eps_c_cr/Eps_c)*c;
c_elast=c*Eps_c_elast/Eps_c;
c_prom=c*Eps_c_fcprim/Eps_c;
c_plast=c_prom-c_elast;
c_const=c-c_prom;
Eps_s2=Eps_c*(1-d_gore/c);
Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
f_c=f_c_prim*(2*Eps_c/Eps_c_fcprim-(Eps_c/Eps_c_fcprim)^2);
f_c_elast=0.3*f_c_prim;
C_c_elast=0.15*f_c_prim*b*c_elast/1e3;
C_c_plast_pravougaonik=0.3*f_c_prim*b*c_plast/1e3;
C_c_plast_trougao=0.35*f_c_prim*b*c_plast/1e3;
C_c_const=f_c_prim*b*c_const/1e3;
C_s2=Eps_s2*Es*As2/1e3;
T_s1=Eps_s1*Es*As1/1e3;
T_c=0.5*Eps_c_cr*Ec*b*(hcr-c)/1e3;
Eps_frp=Eps_c*(d_frp/c-1);
T_frp=Eps_frp*Efrp*Afrp/1e3;
M=C_c_elast*2/3*c_elast+C_c_plast_pravougaonik*(c_elast+c_plast/2)+
+C_c_plast_trougao*(c_elast+2/3*c_plast)+C_c_const*(c_prom+c_const/2)+C_s2*(c-d_gore)+
+T_s1*(d_dole-c)+T_c*2/3*(hcr-c)+T_frp*(d_frp-c);
M=M/1e3;
RO=Eps_c/c;
RO_mat(k,1)=RO;
c_mat(k,1)=c;
M_mat(k,1)=M;
Ief=b*hcr^3/12;
Ief_mat(k,1)=Ief;
hcr_mat(k,1)=hcr;
Eps_c_mat(k,1)=Eps_c;
Eps_s2_mat(k,1)=Eps_s2;
Eps_s1_mat(k,1)=Eps_s1;
Eps_frp_mat(k,1)=Eps_frp;
elseif Eps_s1>Eps_s_y;
syms c
hcr=(1+Eps_c_cr/Eps_c)*c;
c_elast=c*Eps_c_elast/Eps_c;
c_prom=c*Eps_c_fcprim/Eps_c;
c_plast=c_prom-c_elast;
c_const=c-c_prom;
Eps_s2=Eps_c*(1-d_gore/c);
Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
f_c=f_c_prim*(2*Eps_c/Eps_c_fcprim-(Eps_c/Eps_c_fcprim)^2);
f_c_elast=0.3*f_c_prim;
C_c_elast=1/2*Eps_c_elast*Ec*b*c_elast;
C_c_plast_pravougaonik=0.3*f_c_prim*b*c_plast;
C_c_plast_trougao=0.35*f_c_prim*b*c_plast;
C_c_const=f_c_prim*b*c_const;
C_s2=Eps_s2*Es*As2;
T_s1=(Eps_s_y*Es+Esp*Es*(Eps_s1-Eps_s_y))*As1;
T_c=0.5*Eps_c_cr*Ec*b*(hcr-c);
Eps_frp=Eps_c*(d_frp/c-1);
T_frp=Eps_frp*Efrp*Afrp;
c=solve(C_c_elast+C_c_plast_pravougaonik+C_c_plast_trougao+C_c_const+C_s2-T_s1-T_frp-T_c);
c1=c(1);
c2=c(2);
c1=double(c1);
c2=double(c2);

```



```

if c1>0&c1<h;
    c=c1;
else
    c=c2;
end
c;
Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
if Eps_s1<=0.01;
    hcr=(1+Eps_c_cr/Eps_c)*c;
    c_elast=c*Eps_c_elast/Eps_c;
    c_prom=c*Eps_c_fcprim/Eps_c;
    c_plast=c_prom-c_elast;
    c_const=c-c_prom;
    Eps_s2=Eps_c*(1-d_gore/c);
    Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
    f_c=f_c_prim*(2*Eps_c/Eps_c_fcprim-(Eps_c/Eps_c_fcprim)^2);
    f_c_elast=0.3*f_c_prim;
    C_c_elast=0.15*f_c_prim*b*c_elast/1e3;
    C_c_plast_pravougaonik=0.3*f_c_prim*b*c_plast/1e3;
    C_c_plast_trougao=0.35*f_c_prim*b*c_plast/1e3;
    C_c_const=f_c_prim*b*c_const/1e3;
    C_s2=Eps_s2*Es*As2/1e3;
    T_s1=(Eps_s_y*Es+Esp*Es*(Eps_s1-Eps_s_y))*As1/1e3;
    T_c=0.5*Eps_c_cr*Ec*b*(hcr-c)/1e3;
    Eps_frp=Eps_c*(d_frp/c-1);
    if Eps_frp<Eps_frp_ult_red;
        T_frp=Eps_frp*Efrp* Afrp/1e3;
    else Eps_frp>Eps_frp_ult_red;
        T_frp=0;
    end
    M=C_c_elast*2/3*c_elast+C_c_plast_pravougaonik*(c_elast+c_plast/2)+
    +C_c_plast_trougao*(c_elast+2/3*c_plast)+C_c_const*(c_prom+c_const/2)+
    +C_s2*(c-d_gore)+T_s1*(d_dole-c)+T_c*2/3*(hcr-c)+T_frp*(d_frp-c);
    M=M/1e3;
    RO=Eps_c/c;
    RO_mat(k,1)=RO;
    c_mat(k,1)=c;
    M_mat(k,1)=M;
    Ief=b*hcr^3/12;
    Ief_mat(k,1)=Ief;
    hcr_mat(k,1)=hcr;
    Eps_c_mat(k,1)=Eps_c;
    Eps_s2_mat(k,1)=Eps_s2;
    Eps_s1_mat(k,1)=Eps_s1;
    Eps_frp_mat(k,1)=Eps_frp;
else Eps_s1>0.01;
    syms c
    hcr=(1+Eps_c_cr/Eps_c)*c;
    c_elast=c*Eps_c_elast/Eps_c;
    c_prom=c*Eps_c_fcprim/Eps_c;
    c_plast=c_prom-c_elast;
    c_const=c-c_prom;
    Eps_s2=Eps_c*(1-d_gore/c);
    Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
    f_c=f_c_prim*(2*Eps_c/Eps_c_fcprim-(Eps_c/Eps_c_fcprim)^2);
    f_c_elast=0.3*f_c_prim;
    C_c_elast=1/2*Eps_c_elast*Ec*b*c_elast;
    C_c_plast_pravougaonik=0.3*f_c_prim*b*c_plast;
    C_c_plast_trougao=0.35*f_c_prim*b*c_plast;
    C_c_const=f_c_prim*b*c_const;

```

```

C_s2=Eps_s2*Es*As2;
T_s1=(Eps_s_y*Es+Esp*Es*(Eps_s1-Eps_s_y))*As1;
T_c=0.5*Eps_c_cr*Ec*b*(hcr-c);
Eps_frp=Eps_c*(d_frp/c-1);
T_frp=Eps_frp*Efrp*Afrp;
c=solve(C_c_elast+C_c_plast_pravougaonik+C_c_plast_trougao+C_c_const+
+C_s2-T_s1-T_frp-T_c);
c1=c(1);
c2=c(2);
c1=double(c1);
c2=double(c2);
if c1>0&c1<h;
    c=c1;
else
    c=c2;
end
c;
hcr=(1+Eps_c_cr/Eps_c)*c;
c_elast=c*Eps_c_elast/Eps_c;
c_prom=c*Eps_c_fcprim/Eps_c;
c_plast=c_prom-c_elast;
c_const=c-c_prom;
Eps_s2=Eps_c*(1-d_gore/c);
Eps_s1=Eps_c*(d_dole/c-1);
f_c=f_c_prim*(2*Eps_c/Eps_c_fcprim-(Eps_c/Eps_c_fcprim)^2);
f_c_elast=0.3*f_c_prim;
C_c_elast=0.15*f_c_prim*b*c_elast/1e3;
C_c_plast_pravougaonik=0.3*f_c_prim*b*c_plast/1e3;
C_c_plast_trougao=0.35*f_c_prim*b*c_plast/1e3;
C_c_const=f_c_prim*b*c_const/1e3;
C_s2=Eps_s2*Es*As2/1e3;
T_s1=(Eps_s_y*Es+Esp*Es*(Eps_s1-Eps_s_y))*As1/1e3;
T_c=0.5*Eps_c_cr*Ec*b*(hcr-c)/1e3;
Eps_frp=Eps_c*(d_frp/c-1);
if Eps_frp<Eps_frp_ult_red;
    T_frp=Eps_frp*Efrp*Afrp/1e3;
else Eps_frp>Eps_frp_ult_red;
    T_frp=0;
end
M=C_c_elast*2/3*c_elast+C_c_plast_pravougaonik*(c_elast+c_plast/2)+
+C_c_plast_trougao*(c_elast+2/3*c_plast)+C_c_const*(c_prom+c_const/2)+
+C_s2*(c-d_gore)+T_s1*(d_dole-c)+T_c*2/3*(hcr-c)+T_frp*(d_frp-c);
M=M/1e3;
RO=Eps_c/c;
RO_mat(k,1)=RO;
c_mat(k,1)=c;
M_mat(k,1)=M;
Ief=b*hcr^3/12;
Ief_mat(k,1)=Ief;
hcr_mat(k,1)=hcr;
Eps_c_mat(k,1)=Eps_c;
Eps_s2_mat(k,1)=Eps_s2;
Eps_s1_mat(k,1)=Eps_s1;
Eps_frp_mat(k,1)=Eps_frp;
end
end
end
disp(' ')
fprintf(' Granicno stanje betona' )

```

```

disp(' ')
M_gr_betona=M
plot(RO_mat,M_mat)
xlabel('Krivina (°)')
ylabel('Moment savijanja (kNm)')
title('Dijagram zavisnosti momenta i krivine')
disp(' ')
fprintf(' Granicno stanje momenta' )
disp(' ')
[d e]=max(M_mat);
Mgr=d
RO_gr=RO_mat(e)
Eps_c_gr=Eps_c_mat(e)
Eps_s1_gr=Eps_s1_mat(e)
Eps_frp_gr=Eps_frp_mat(e)
M_mat_gr=M_mat(1:e);
RO_mat_gr=RO_mat(1:e);
Eps_c_mat_gr=Eps_c_mat(1:e);
Eps_s1_mat_gr=Eps_s1_mat(1:e);
Eps_frp_ma_grt=Eps_frp_mat(1:e);
Ief_mat_gr=Ief_mat(1:e);
hcr_mat_gr=hcr_mat(1:e);
plot(RO_mat_gr,M_mat_gr)
xlabel('Krivina (°)')
ylabel('Moment savijanja (kNm)')
title('Dijagram zavisnosti momenta i krivine')
A=[M_mat Ief_mat];
AB=Eps_s_y-Eps_s1_mat;
AB=abs(AB);
[d e]=min(AB);
M_tecanja=M_mat(e)
RO_tecanja=RO_mat(e)
Eps_s1_tecanja=Eps_s1_mat(e)
Eps_c_tecanja=Eps_frp_mat(e)
ABC=0.01-Eps_s1_mat;
ABC=abs(ABC);
[d e]=min(ABC);
M_gr_dil_cel=M_mat(e)
RO_gr_dil_cel=RO_mat(e)
Eps_s1_gr_dil_cel=Eps_s1_mat(e)
Eps_c_gr_dil_cel=Eps_c_mat(e)
Eps_frp_gr_dil_cel=Eps_frp_mat(e)
M_mat_gr_dil_cel=M_mat(1:e);
RO_mat_gr_dil_cel=RO_mat(1:e);
ABCD=Eps_frp_ult_red-Eps_frp_mat;
ABCD=abs(ABCD);
[d e]=min(ABCD);
M_gr_dil_frp=M_mat(e)
RO_gr_dil_frp=RO_mat(e)
Eps_s1_gr_dil_frp=Eps_s1_mat(e)
Eps_c_gr_dil_frp=Eps_c_mat(e)
Eps_frp_gr_dil_frp=Eps_frp_mat(e)
M_mat_gr_dil_frp=M_mat(1:e);
RO_mat_gr_dil_frp=RO_mat(1:e);
Eps_frp_gr_dil_frp/Eps_frp_ult_red;

```

ЛИТЕРАТУРА

ACI (1999). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-95*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ACI (2002). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-02*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ACI (2006). *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP bars, ACI 440.1R-06*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ACI (2007). *Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, ACI 440.R-07*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 104pp.

ACI (2008). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-08*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 45pp.

Aidoo, J., Harries, K. A., and Petrou, M. F. (2006). Full-scale experimental investigation of repair of reinforced concrete interstate bridge using CFRP materials. *Journal Bridge Engineering*, 11(3), pp. 350–358.

Akbarzadeh, H. and Maghsoudi, A. (2010). Experimental and analytical investigation of reinforced high strength concrete continuous beams strengthened with fiber reinforced polymer. *Materials & Design*, 31(3), pp.1130-1147.

Alias, M. N. and Brown, R. (1992). Damage to composites from electrochemical process, *Corrosion*, 48, pp. 373-378.

Alkhrdaji, T., Nanni, A., Chen, G. and Barker, M., (1999). Upgrading the Transportation Infrastructure: Solid RC Decks Strengthened with FRP, *Concrete International: Design and Construction*, 21(10), pp. 37-41.

Alkhrdaji, T., Nanni, A. and Mayo, R. (2000). Upgrading Missouri Transportation Infrastructure: Solid Reinforced-Concrete Decks Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer Systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1740, pp.157-163.

Arduini, M. and Nanni, A. (1997). Behavior of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets, *Journal of Composites for Construction*, 1(2), pp. 63-70.

Aslani, F. and Nejadi, S. (2012). Mechanical properties of conventional and self-compacting concrete: An analytical study. *Construction and Building Materials*, 36, pp.330-347.

- Asplund, S. O. (1949). Strengthening Bridge Slabs with Grouted Reinforcement. *Journal of the American Concrete Institute*, 20(6), pp. 397-406.
- Atkinson, R. H. and Schuller, M. P. (1992). Development of Injectible Grouts for the Repair of Unreinforced Masonry. In: *Workshop on Effectiveness of Retrofitting of Stone and Brick Masonry Walls in Seismic Areas*. Milan, Italy: Dept. of Structural Engineering, Politecnico di Milano.
- Badawai, M. (2007). *Monotonic and Fatigue Flexural Behaviour of RC Beams Strengthened with prestressed NSM CFRP Rods*. PhD thesis. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- Bajić, N. (1985). *Prilog nelinearnoj analizi armiranobetonskih elemenata*. Doktorska disertacija. Građevinski fakultet, Beograd.
- Bangash, M. Y. H. (1989). *Concrete and Concrete Structures: Numerical Modeling and Applications*. London, England: Esvier Science Publishers Ltd.
- Bank, L. (2006). *Composites for construction*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.
- Bank, L. C., Barkatt, A. and Gentry, T. R. (1995). Accelerated test methods to determine the long-term behavior of FRP composite structures: environmental effects. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 14(6), pp. 559-587.
- Barret, P. (2013). *How to Model Concrete using Finite Elements*. [blog] Engineering advantage. Available at: <https://caeai.com/blog/how-model-concrete-using-finite-elements> [Accessed 7 Sep. 2015].
- Barros, J. A. O., and Fortes, A. (2005). Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. *Cement and Concrete Composites*, 27(4), pp.471-480.
- Barros, J. A. O. and Dias, S. J. E. (2006). Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams. *Journal Cement and Concrete Composites*, 28(3), pp. 276-292.
- Blankenship, L. T., White, M. N. and Puckett, P. M. (1989). Vinyl ester resins: versatile resins for composites, In: *34th International SAMPE Symposium*. 34, pp. 234-245.
- Blaschko, M., Nierdermeier, R. and Zlich, K. (1998). Bond failure modes of flexural members strengthened with FRP. In: *Proceedings of Second International Conference on Composite Materials*. Paris, July 5-9.
- Blaschko, M. (2001). *Zum tragverhalten von betonbauteilen mit in schlitze eingeklebten CFK-lamellen*. Bericht 8/2001 aus dem Konstruktiven Ingenieurixia (in German). Germany: TU Munchen, 147 pp.
- Blaschko, M. (2003). Bond behaviour of CFRP strips glued into slits. In: *Proceedings FRPRCS-6*. Singapore: World Scientific; pp. 205-214.
- Bosiljkov, V. (2003). SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement and Concrete Research*, 33(9), pp.1279-1286.
- Burke, P. J. (2008). *Low and High Temperature Performance of Near Surface Mounted FRP Strengthened Concrete Slabs*. Msc thesis. Queen's University, Kingston, Ontario, Canada. 193 pp.
- Castel, A., Vidal, T. and François, R. (2010). Bond and cracking properties of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 24(7), pp.1222-1231.
- Coccia, S., Ianniruberto, U. and Finaldi, Z. (2008). Redistribution of Bending Moment in Continuous Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer. *ACI Structural Journal*, 105(3), pp. 318-326.
- Connolly, M., King, J., Shidaker, T. and Duncan, A. (2005). Pultruding polyurethane composite profiles: practical guidelines for injection box design, component metering equipment and processing, presented at the Composites 2005 Convnetion and Trade Show, September 28-30, American Composites Manufactures Association, Columbus, OH.
- Domone, P. (2007). A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 29(1), pp.1-12.
- De Lorenzis, L. (2000). *Strengthening of RC structures with near surface mounted FRP rods*. University of Missuouri – Rolla. USA.
- De Lorenzis, L., Nanni, A. and La Tegola A. (2000). Strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods. In: *Advancing with Composites*. Milan, Italy. International Meeting on Composite Materials, PLAST 2000, pp. 9-11.

- De Lorenzis, L., Miller B., Nanni, A. (2001). Bond of Fiber-Reinforced Polymer Laminates to Concrete. *ACI Materials Journal*, 98(3), pp 256-264.
- De Lorenzis, L., (2002). *Strengthening of RC structures with near surface mounted FRP rods*. PhD Thesis. Department of Innovation Engineering. University of Lecce. Italy.
- De Lorenzis, L., Rizzo, A. and La Tegola, A. (2002). A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete. *Composites Part B: Engineering*, 33(8), pp.589-603.
- De Lorenzis, L. and Nanni, A. (2002). Bond between Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods and Concrete in Structural Strengthening. *ACI Structural Journal*, 99(2), pp. 123-133.
- De Lorenzis, L. (2004). Anchorage Length of Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods for Concrete Strengthening—Analytical Modeling. *ACI Structural Journal*, 101(3), pp. 375-386.
- De Lorenzis, L., Lundgren, K., Rizzo, A. (2004). Anchorage Length of Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Bars for Concrete Strengthening—Experimental Investigation and Numerical Modeling. *ACI Structural Journal*, 101(2), pp. 269-278.
- De Lorenzis, L. and Teng, J. (2007). Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *Composites Part B: Engineering*, 38(2), pp.119-143.
- Desayi, P. and Krishnan, S. (1964). Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete. *ACI Journal Proceedings*, 61(3), pp. 345-350.
- Deuring, M. (1993). Strengthening of RC with prestressed fiber reinforced plastic sheets. EMPA Research Report 224, Dübendorf, Switzerland.
- EFNARC (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, pp.32.
- EFNARC (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use, pp.66.
- El-Hacha, R. and Rizkalla, S. H. (2004). Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Flexural Strengthening of Concrete Structures. *ACI Structural Journal*, 101(5), pp. 717-726.
- El-Mogy, M., El-Ragaby, A. and El-Slaway, E. (2011). Effect of Transverse Reinforcement on the Flexural Behavior of Continuous Concrete Beams Reinforced with FRP. *Journal of composites for construction*, 15(5), pp.672-681.
- Emmons, P., Thomas, J. and Sabnis, G.M. (2001). “New strengthening technology for blue circle cement silo repair and upgrade”, *Proceedings of FRP Workshop US-AID*, Cairo, Egypt.
- EN 206-9:2010 (2010). Additional rules for Self-Compacting Concrete (SCC), pp. 27.
- Fardis, M. N., and Khalili, H. (1981). Concrete encased in fiber-glass reinforced plastic. *ACI Structural Journal*, 78(6), pp. 440-446.
- Fib, bulletin.14 (Task group 9.3), (2001). *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report on the design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures*. International Federation for Structural Concrete, Lausanne.
- Garrity, S. W. (1995). Retro-Reinforcement – A proposed repair System for Masonry Arch Bridges. In: *First International Conference on Arch Bridges*. Bolton, UK: pp. 557-566.
- Gere, J. M. and Timoshenko, S. P. (1997). *Mechanics of materials*. Boston, USA: PWS Publish Company.
- Goldsworthy, B. (1954). The continuous extrusion of RP. In: *9th SPI RPD Conference*. Chicago: February 3-5, Section 13.
- Grdić, Z. (2011). *Tehnologija betona*. Niš, Srbija: Građevinsko arhitektonski fakultet u Nišu, Univerzitet u Nišu.
- Grdic, Z., Despotovic, I. and Toplicic-Curcic, G. (2008). Properties of self-compacting concrete with different types of additives. *Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering*, 6(2), pp.173-177.
- Hassan, T. and Rizkalla, S. (2003). Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips. *J. Compos. Constr.*, 7(3), pp.248-257.
- Hassan, T. and Rizkalla, S. (2004). Bond Mechanism of Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Bars for Flexural Strengthening of Concrete Structures. *ACI Structural Journal*, 101(6), pp. 830-839.

- Hemmaty, Y. (1998). Modeling of the shear force transferred between cracks in reinforced and fibre reinforced concrete structures. In: *ANSYS conference*. Pittsburgh, Pennsylvania: vol. 1.
- Holschemacher, K. and Klug, Y. (2002). *A database for the evaluation of hardened properties of SCC*. Leipzig Annual Civil Engineering Report No.7, University of Leipzig, Germany.
- Huyse, L., Hemmaty, Y. and Vandewale, L. (1994). Finite element modeling of fiber reinforced concrete beams. In: *ANSYS conference*, vol. 2, Pittsburgh, Pennsylvania.
- Qiong, H., Wei – hua, Y. and Wen – zhohg, Z. (2008). The formula for stress – strain curves of Self – Compacting Concrete. *China Academic Journal Electronic Publishing Hous*, pp:70-72.
- Ilić, A. i Šešić, J. (2010). Neke fizičko-mehaničke osobine samougradivog betona. *Izgradnja*, 2010, 64(7-8), pp. 429-439.
- ISIS Educational Module 2, (2006). *An Introduction to FRP Composites for Construction*. A Canadian Network of Centres of Excellence.
- ISIS Educational Module 4, (2004). *An Introduction to FRP Strengthening of Concrete Structures*. A Canadian Network of Centres of Excellence.
- Itterbeack V. P., Pannentier, B. and Couberg, K. (2011). Does Self-Compacting Concrete still folow Eurocode2 specifications? *Concrete Technology*, 4, pp. 50-55.
- Jansze, W. (1997). *Strengthening of reinforced concrete members in bending by externally bonded steel plates*. PhD dissertation. TU Delft, The Netherlands.
- Kachlakev, D. and McCurry, D. Jr. (2000). *Simulated Full Scale Testing of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composites: Experimental Results and Design Model Verification*. United States Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Kachlakev, D. and Miller, T. (2001). *FE Modeling of Reinforced Concrete Structures, Strengthened with FRP Laminates*. Final Report SPR 316, Oregon State University, Department of Transportation.
- Karatas, M., Turk, K. and Ulucan, Z. (2010). Investigation of bond between lap-spliced steel bar and self-compacting concrete: The role of silica fume. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(3), pp.420-428.
- Katsumata, H., Kobatake, Y. and Takeda, T. (1988). A study on strengthening with carbon fiber for earthquake-resistant capacity of existing reinforced concrete columns. In: *9th World Conference on Earthquake Engineering*. Tokyo-Kyoto, August 2-9, Vol VII, pp. 517-522.
- Kaw A. K. (1997). *Mechanics of Composite Materials*. Florida, USA: CRC Press, ISBN 0-8493-9656-5.
- Kukaras, D. (2007). *Eksperimentalno-teorijska analiza i računsko modeliranje ponašanja montažnih nosača spojenih visokovrednim zavrtnjevima*. Doktorska disertacija. Građevinski fakultet Subotica.
- Kumar, R., Singh, B. and Bhargava, P. (2011). Flexural capacity predictions of self-compacting concrete beams using stress–strain relationship in axial compression. *Magazine of Concrete Research*, 63(1), pp.49-59.
- Luis, A. M. (2004). *Implementation of Self-Consolidating Concrete (SCC) for Prestressed Concrete Girders*. Master Thesis. Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Malešev, M. i Radonjanin, V. (2008). Svojstva samougrađujućeg betona u zavisnosti od vrste i količine mineralnog dodatka. *Materijali i Konstrukcije*, 51(4), pp. 88-104.
- Mays, G. C. and Hutchinson, A. R. (1992). *Adhesives in civil engineering*. Cambridge Universtiy Press.
- Meier, U. (1987). Bridge repair with high performance composite materials. *Materials & Technik*, (4), pp. 125-128.
- Mindess, S. and Young, J. F. (1981). *Concrete*. Englewood Cliffs, N.J., USA: Prentice-Hall, 1981 – Technology&Engineering.
- Milošević, B. (2016). *Eksperimentalno-teorijska analiza graničnih stanja linijskih nosača od samougrađujućeg betona sa recikliranim agregatom*. Doktorska disertacija. Građevinsko-arhitektonski fakultet Niš, Univerzitet u Nišu.
- Mňahončáková, E., Pavlíková, M., Grzeszczyk, S., Rovnaníková, P. and Černý, R. (2008). Hydric, thermal and mechanical properties of self-compacting concrete containing different fillers. *Construction and Building Materials*, 22(7), pp.1594-1600.

- Nanni, A. (1995). Concrete repair with externally bonded FRP reinforcement: examples from Japan. *Concrete International*, pp. 22-26.
- Nordin, H. and Täljsten, B. (2003). Concrete beams strengthened with CFRP. A study of anchor lengths. In: proceedings 10th conference on structural faults and repair. London. UK.
- Nordin, H. and Täljsten, B. (2006). Concrete Beams Strengthened with Prestressed Near Surface Mounted CFRP. *J. Compos. Constr.*, 10(1), pp.60-68.
- Oehlers, D. J. and Moran, J. P. (1990). Premature failure of externally plated reinforced concrete beams. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 116(4), pp. 978-995.
- Okamura, H, and Ozawa, K. (1995). Mix-design for Self-Compacting Concrete, Concrete Library. *JSCE*, 25, pp.107-120.
- Park, P. and Paulay, T. (1974). *Reinforced Concrete Structures*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Parretti, R. and Nanni, A. (2004). Strengthening of RC Members Using Near-Surface Mounted FRP Composites: Design Overview. *Advances in Structural Engineering*, 7(6), pp.469-483.
- Porta, A., Nanni, A., Manfredi G. and Cosenza E. (2001). "Design criteria for RC beam-column joints seismically upgraded with composites", *Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering - CICE 2001*, J.-G. Teng, Ed., Hong Kong, China, Vol. 1, pp. 919-926.
- Prasad, M. L. V., Kumar, P. R. and Oshima, T. (2009). Development of analytical stress-strain model for glass fiber reinforced self compacting concrete. *International Journal of Mechanic Solids*, 4(1), pp. 25-37.
- Правилник за бетон и армирани бетон – БАБ 87 (1987).
- Quattlebaum, J. B., Harries, K. A., and Petrou, M. F. (2005). Comparison of three flexural retrofit systems under monotonic and fatigueloads. *Journal Bridge Engineering*, 10(6), pp. 731–740.
- Ranković, S., Folić, R. and Mijalković, M. (2008). Ojačanje AB greda FRP armaturom postavljenom unutar zaštitnog sloja betona. *Zbornik radova GAF Niš*, 23, str. 39-47.
- Ranković, S. and Folić, R. (2009). Adhesiveness („Bond Effect“) of Fiber Reinforcement Polymer Bars in the NSM FRP Method of Strengthening, In: *Eleventh national and fifth international scientific meeting INDIS 2009*. Novi Sad: November 25-27, pp. 463-470.
- Rankovic, S., Folic, R. and Mijalkovic, M. (2010). Effects of RC beams reinforcement using near surface mounted reinforced FRP composites. *Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering*, 8(2), pp.177-185.
- Ranković, S. (2011). *Eksperimentalno-teorijska analiza graničnih stanja armiranobetonskih linijskih nosača ojačanih sprezanjem sa NSM vlaknastim kompozitima*. Doktorska disertacija. Građevinsko-arhitektonski fakultet Niš, Univerzitet u Nišu.
- Ranković, S., Folić, R. and Mijalković, M. (2013). Flexural behaviour of RC beams strengthened with NSM CFRP and GFRP bars – experimental and numerical study. *Romanian Journal of Materials*, 43 (4), pp. 377-390.
- Rashid, Y. (1968). Ultimate strength analysis of prestressed concrete pressure vessels. *Nuclear Engineering and Design*, 7(4), pp.334-344.
- Rosenboom, O. A. and Rizkalla, S. (2007). Fatigue behavior of prestressed concrete bridge girders strengthened with various CFRP systems. *ASCE Journal of Composites for Construction*, pp. 764-776.
- Schwartz, M. M. (1997). Composite Materials, Vol. II. In: *Fabrication and Applications*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Seracino, R., Jones, N. M., Ali, M. S. M., Page, M. W. and Oehlers, D. J. (2007). Bond strength of near-surface mounted FRP strip to-concrete joints,. *Journal of Composites for Construction*, 11(4), pp. 401-409.
- Sena Cruz, J. and Barros, J. (2002). Bond behavior of carbon laminate strips into concrete by pull-out bending tests. In: *Proceedings of the international symposium "Bond in concrete - from research to standards"*. Budapest, pp.614-621.
- Shah SP, Swartz SE, Ouyang C. (1995): „Fracture mechanics of concrete“, John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.

- Sonebi, M. (2004). Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans. *Cement and Concrete Research*, 34(7), pp.1199-1208.
- Sourcebook, (2006), Sourcebook Industry Directory, Ray Publishing, Wheat Ridge, CO.
- Spadea, G., Bencardino, F. and Swamy, R. N. (1998). Structural behavior of composite RC beams with externally bonded CFRP. *Journal of Composites for Construction*, 2(3), pp. 132-137.
- Su, N., Hsu, K. and Chai, H. (2001). A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(12), pp.1799-1807.
- Suresh Babu, T., Seshagiri Rao, M.V. and Rama Seshu, D. (2008). Mechanical properties and stress – strain behaviour of self compacting concrete with and without glass fiber. *Asian Journal of Civil Engineering*, 9(5), pp: 457-472.
- Szabó, Z. and L. Balázs, G. (2007). Near surface mounted FRP reinforcement for strengthening of concrete structures. *Periodica Polytechnica Civil Eng.*, 51(1), p.33.
- Taerwe, L., Vasseur, L. and Matthys, S. (2009). External strengthening of continuous beams with CFRP. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Alexander et al (eds)*, pp. 43-53.
- Täljsten, B., Carolin, A. and Nordin, H. (2003). Concrete structures strengthened with near surface mounted reinforcement of CFRP. *AN International Journal*, 6(3), pp. 201-213.
- Teng, J. G., Zhang, J. W. and Smith, S. T. (2002). Interfacial Stresses in Reinforced Concrete Beams Bonded with a Soffit Plate: a Finite Element Study. *Construction and Building Materials*, 16(1), pp. 1-14.
- Teng, J. G., De Lorenzis, L., Wang, B., Rong, L., Wong, T. N. and Lam, L. (2006). Debonding failures of RC beams strengthened with near-surface mounted CFRP strips. *Journal of Composites for Construction*, 10(2), pp. 92-105.
- Torres-Acosta, A. A. (2002). Galvanic corrosion of steel in contact with carbon-polymer composites II: Experiments in concrete. *Journal of Composites for Construction*, 6(2), pp. 116-122.
- Triantafillou, T. and Plevris, N. (1992). Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials. *Materials and Structures*, 25(4), pp.201-211.
- Tumialan, J. G., Morbin, A., Nanni, A. and Modena, C. (2001). *Shear strengthening of masonry walls with FRP composites*. COMPOSITES 2001, Convencion and Trade Show, Composites Fabricators Association, Tampa, FL USA.
- Uysal, M. (2012). The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 37, pp.533-540.
- Vasseur, L., Matthys, S. and Taerwe, L. (2006). Analytical study of a 2-span reinforced concrete beam strengthened with fibre reinforced polymer. *IABSE Symposium Report*, 92(10), pp.39-46.
- Warren, G. E., (1998). Waterfront Repair and Upgrade, Advanced Technology Demonstration Site No. 2: Pier 12, Naval Station San Diego, California. Site Specific Report SSR-2419-SHR, Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California.
- White, J. R. and Turnbull, A. (1994). Weathering of polymers: mechanisms of degradation and stabilization, testing strategies and modeling. *Journal of Materials Science*, 29(3), pp. 584-613.
- William, K.J. and Warnke, E. P., (1975): „Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete“, Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol. 19, ISMES, Bergamo, Italy (pp.174).
- Wolanski A. (2004): „Flexural behaviour of reinforced and prestressed concrete beams using finite element analysis“, Master thesis, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin.
- Yost, J. R., Gross, S. P., Dinehart, D. W. and Mildenberg, J. J. (2007). Flexural behavior of concrete beams strengthened with near-surface mounted CFRP strips. *ACI Structural Journal*, 104(4), pp. 430-437.
- Živković, S. (2007). Samozbijajući beton – svojstva i tehnologija. *Građevinski kalendar*, pp. 234-304.

БИОГРАФИЈА

Жарко И. Петровић рођен је 07.09.1974. године у Нишу. Основну школу, као и гимназију општег смера завршио је у Нишу.

Грађевински факултет у Нишу, смер конструкције уписао је 1993. године, а дипломирао 2002. године на конструктивном смеру са просечном оценом 8,40 (осам и 40/100) и оценом 10 (десет) на дипломском раду.

Последипломске студије на Грађевинско–архитектонском факултету Универзитета у Нишу, смер Конструкције и конструктивни системи грађевинских објеката уписао је школске 2002/2003. и прописане испите положио са просечном оценом 9,83 (девет и 83/100). Магистарску тезу под називом **Гранично стање лома статички неодређених решеткастих носача** одбранио је 10.02.2011. године на Грађевинско-архитектонском факултету у Нишу.

Професионалну каријеру кандидат мр Жарко И. Петровић дипл. инж. грађ. започео је одмах након дипломирања ангажовањем у настави као асистент приправник на Грађевинско–архитектонском факултету у Нишу. На катедри за Техничку механику и теорију конструкција ангажован је у школској 2003/2004. години на предметима Статика конструкција 1, Статика архитектонских конструкција и Пластичност и гранична анализа конструкција.

Радни однос заснива 2004. године на Грађевинско-архитектонском факултету у Нишу, као асистент-приправник на Катедри за Техничку механику и теорију конструкција.

Мр Жарко И. Петровић је до сада публикувао као аутор или коаутор 24 рада, од чега 5 у часописима међународног значаја, а учествовао је на више домаћих и међународних конгреса. Био је истраживач на научном пројекту под називом „Експериментална и теоријска истраживања реалних веза армирано-бетонских и спрегнутих конструкција при статичком и динамичком оптерећењу“ (Евиденциони број 16001), који је финансиран од стране Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије у периоду 01.04.2008-31.12.2010. год.

Кандидат је ожењен и има двоје деце. Активно се служи енглеским језиком.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом
Експериментално-теоријска анализа граничних стања армиранобетонских
континуалних греда од самоупраћујућег бетона ојачаних влакнима
армираним полимерима (Fiber-reinforced polymer – FRP)

која је одбрањена на Грађевинско-архитектонском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:

Жарко Петровић

Жарко И. Петровић

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације:

Експериментално-теоријска анализа граничних стања армиранобетонских

континуалних греда од самоуграђујућег бетона ојачаних влакнима

армираним полимерима (Fiber-reinforced polymer – FRP)

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:

Жарко И. Петровић

Жарко И. Петровић

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

Експериментално-теоријска анализа граничних стања армиранобетонских

континуалних греда од самоуграђујућег бетона ојачаних влакнима

армираним полимерима (Fiber-reinforced polymer – FRP)

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити 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 прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:

Жарко Петровић

Жарко И. Петровић