

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ**

**Миодраг Р. Грбић**

**ФОРМИРАЊЕ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНАТА АРХИТЕКТОНСКИХ  
ОБЈЕКТА УПОТРЕБОМ ПОЛИМЕРА ОЈАЧАНИХ РЕЦИКЛИРАНИМ  
ВЛАКНИМА**

**Докторска дисертација**

**Београд, 2016.**

**UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF ARCHITECTURE**

**Miodrag R. Grbić**

**FORMING OF STRUCTURAL ELEMENTS OF ARCHITECTURAL OBJECTS  
USING RECYCLED FIBER REINFORCED POLYMER**

**Doctoral Dissertation**

**Belgrade, 2016.**

Ментор:  
Проф. Др Милан Глишић  
Редовни професор Универзитета у Београду – Архитектонског факултета

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

Проф. Др Милан Глишић  
Редовни професор Универзитета у Београду – Архитектонског факултета

Доц. др Ружа Окрајнов Бајић  
Доцент Универзитета у Београду – Архитектонског факултета

Проф. Др Весна Радојевић  
Редовни професор Универзитета у Београду – Технолошко Металуршког  
факултета

Доц. др Радојко Обрадовић  
Доцент Универзитета у Београду – Архитектонског факултета

Датум одбране докторске дисертације

---

Београд

# **ФОРМИРАЊЕ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНАТА АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА УПОТРЕБОМ ПОЛИМЕРА ОЈАЧАНИХ РЕЦИКЛИРАНИМ ВЛАКНИМА**

## **РЕЗИМЕ**

Докторска теза теоријски се позиционира у пољу трансдисциплинарног истраживања савремених пројектантских пракси у области архитектонског конструктерства, а представља научно истраживање о употреби рециклираних материјала као чинилаца композита који се може употребити као арматура или неки други елемент при формирању конструктивних елемената архитектонских објеката и могућности примене у ових материјала у пракси. Овакви резултати истраживања подразумевају унапређење пројектовања и реализације конструкција, као и склопова архитектонских објеката кроз увођење нових композитних материјала, а у функцији остварења еколошког квалитета зграда који је у складу са препорукама за одрживи развој грађења.

Циљ истраживања је успостављање практичних релација између постојећих података о композитним материјалима, постојеће регулативе која дефинише оквир употребе композита и експерименталног истраживања композита од полимера ојачаног рециклираним влакнима.

Општа методолошка теоријска позиција овог истраживања је базирана на научној методологији и користи компаративне методе као поступак упоређивања истих или сродних појава или утврђивања њихове сличности и разлика међу њима, аналитички и математички метод који поставља релације а што се проверава кроз експериментални метод ради потврде добијених карактеристичних параметара, али и обрнуто потврђује адекватност примене композитног материјала који је експериментално испитан.

У првом делу истраживања постављен је теоријски оквир рада, анализирани су референтни извори који дају увид у поље формирања композита, карактеристика композита, употребе, као и могућности имплементације

рециклираних материјала у процес производње композита а нарочито композита од полимера ојачаних влакнима.

Прво се дефинише шта је то композит, од чега се састоји, који се материјали примењују, а затим се анализирају својства композита од полимера ојачаних влакнима сачињених од материјала из примарне производње. Потом се приступа анализи података везаних за материјале који су погодни за рециклажу и употребу у производњи композита од рециклираних материјала.

Други део дисертације је конципиран као истраживање које се састоји из теоријског дела који се бави компаративном анализом извора и литературе у виду постојеће регулативе, правилника и упуштава из области употребе композитних материјала у архитектонском конструкторству и дефинисањем критеријума које композит треба да испуни, затим дела који даје поставке релација и израза на основу анализираних грађе и дефинисаних критеријума, и експерименталног дела који на основу постављених релација и израза проверава оправданост употребе испитиваног композита од полимера ојачаног рециклираним ПЕТ-стакло влакнима при формирању конструктивних елемената архитектонских објеката. Индиректно се сагледава и могућност употребе композита од рециклираних материјала при формирању конструктивних елемената архитектонских објеката уопште.

У другом делу се такође даје евалуација резултата спроведених истраживања и предлози за даљу употребу експериментално испитаног материјала од полимера ојачаног рециклираним ПЕТ-стакло влакнима.

Постављене хипотезе се проверавају кроз анализу података из области архитектонског конструкторства, поставком релација и експерименталном провером.

Оправданост овог рада произилази из потребе за изналажењем нових материјала и њихове употребе док се истовремено води рачуна о еколошким факторима, утицају на екосистем и одрживом развоју. Практична примена

результата састоји се у сагледавању могућности и смерница за даље истраживање ове области, као и примена експериментално испитаног композита од полимера ојачаног рециклираним влакнима за формирање конструктивних елемената архитектонских објеката.

У ширем смислу допринос истраживања се састоји у сагледавању и разумевању начина на који се сродне истраживачке области прилагођавају савременим променама приступа решавању проблема.

У ужем смислу рад је конципиран као прилог истраживањима у области архитектонског конструктерства. Допринос истраживања се састоји у сагледавању и разумевању начина на који се композитни материјали користе у архитектонском конструктерству, сагледавању обухвата регулативе из области архитектонског конструктерства везано за композите, постављање релација и израза који дефинисање понашања композита при формирању конструктивних елемената архитектонских објеката, иницијалног сагледавања потребних критеријума које треба испитати а везано за употребу композита формираних од рециклираних материјала.

Очекивани резултати истраживања су дубља и потпунија научна знања која произилазе из спознавања односа и веза између подсистема архитектонског објекта, конструкције и конструктивних материјала, а практична примена треба да омогући да се проблеми настали услед све оштријих еколошких стандарда превазиђу и да се притом постигнути квалитет у пројектовању и изградњи архитектонских објеката задржи или, уколико је то могуће, унапреди.

Кључне речи:

Полимери, композити, влакна, рециклажа (екологија), конструкција, технологија, архитектура

Научна област: Архитектура и урбанизам

Ужа научна област: Архитектонско конструктерство

УДК:

# **FORMING OF STRUCTURAL ELEMENTS OF ARCHITECTURAL OBJECTS USING RECYCLED FIBER REINFORCED POLYMER**

## **SUMMARY**

Theoretical position of Doctoral Dissertation is situated in transdisciplinary research area of contemporary design practices in the field of structural engineering in architecture and it presents the scientific research about the use of recycled materials as factors of composite which can be used as a reinforcement bar or some other element in forming structural elements of architectural objects, and features an application of these materials in practice. The results of research include improving the design and realisation of construction, and structures of architectural objects, through introduction of new composite materials which encourage ecological quality of the building, which is in accordance with recommendations for sustainable construction.

The aim of this research is to establish a practical relationship between existing composite materials data, the existing regulatory framework which defines the use of composite and experimental research of recycled fiber reinforced polymer composite.

Methodological approach of this research was based on a scientific methodology and use comparative method as a comparison process of the same or related phenomena, or establishing similarities and differences among them. Analytical and mathematical method we use to define a relation between them, which can be verified with experimental methods which confirms the obtained characteristic parameters and vice versa that confirm adequacy of composite material that is experimentally tested.

In the first part of the research the theoretical framework is set, references which provide insight in a field of composite formation where analysed as well as characteristic of composites, use of composites, and opportunities for implementing recycled materials in the manufacturing process of the composites, especially for fibre reinforced polymer composites.

First, thesis define composite, its structure and applied materials, then it analyzes properties of polymer composites reinforced with fibres composted of material

from primary production. Then, related data about materials which are suitable for recycling and use in production of composites from recycled materials are analysed.

Second part of dissertation is designed as a study that consist of theoretical part which deals with the comparative analysis of references and literature of the existing legislative framework, rules and guidelines in the field that define the use of composite materials in structural engineering in architecture, and defining criteria which composite need to fulfil. Next part gives relations and an expression based on analysed literature and defined criteria, followed by experimental part which verifies the justification of the use tested recycled PET-glass fiber reinforced polymer composite in the formation structural elements of architectural structures. Experimental part was based on set of relations and expressions. Indirectly, it perceives potential of using recycled composite material in forming structural elements of architectural structures in general.

The second part of Dissertation also provides evaluation of research results and gives suggestions for further use of experimentally tested recycled PET-glass fiber reinforced polymer material.

The proposed hypothesis has been verified through analysis of data from the field of structural engineering in architecture, making relations and by experimental verification.

Justification of this thesis stems from need to find new materials and their use, and at the same time caring about ecological factors, the impact on the ecosystem and sustainable development. The practical application of the results is to consider possibilities and guidelines for future research, as well as use of experimental tested recycled PET-glass fiber reinforced polymer composite for forming structural elements of architectural structures. In broad terms, contribution of a research consisted in analysing and understanding the ways in which a related research field can be adapted to contemporary changes of method of problem solving. In a narrow sense, thesis was conceived as a contribution of research in field of structural engineering in architecture. Contributions of research consists of analysing and understanding methods in which we are using composite materials in structural engineering of architectural



objects, as well as considering the coverage of regulations in the field of structural engineering in architecture related to composites, also including setting the relation expressions which define the behaviour of composites in forming of structural elements of architectural structures, and the initial consideration which we need to examine the field of using recycled fiber reinforced polymer composite. Expected results of research are better and more complete scientific knowledge that is result from perceiving relations between subsystems of architectural structures, construction and construction materials, and also practical application should be able to ensure that issues that are raised by the increasingly strict environmental standards and to overcome and thereby achieve quality of design and construction of architectural objects, maintain it on the same level or, if possible, to improve.

Key words:

Polymers, composites, fibers, recycling (ecology), construction, technology, architecture

Science field: Architecture and Urbanism

Narrow field: Structural engineering in architecture

UDC:

*Највећу захвалност дугујем архитекти, инжењеру, професору, ментору и пријатељу Милану Глишићу на свеукупној и неизмерној помоћи и разумевању.*

*Посебну захвалност, за огромну подршку, помоћ и разумевање током рада, дугујем доценту др Ружи Окрајнов-Бајић и доценту др Радојку Обрадовићу.*

*Изузетно се захваљујем професорки др Весни Радојевић, која је подржала мој рад и уложила труд да са својим сарадницима омогући ово истраживање.*

*Професору, др Петру Ускоковићу захваљујем се на успостављању сарадње са катедром за композитне материјала Технолошко-металуришког факултета Универзитета у Београду.*

*Професору, др Радославу Алексићу поштовање и неизмерну захвалност*

*Захвалио бих се и представницима привреде („Лафарге“, Институт ИМС, „Греентех“ НС)*

*Родитељима, породици и пријатељима дугујем захвалност за огромно разумевање, подршку и помоћ.*

$a$	– заштитни слој бетона
$A$	– површина попречног пресека бетона који окружује шипке и има исто тежиште као арматура подељена са бројем шипки ( $mm^2$ )
$\alpha_{\infty}$	– коефицијент утицаја скупљања и течења бетона
$A_a$	– површина затегнуте арматуре
$A_a'$	– површина притиснуте арматуре
$A_{bz}$	– затегнута површина бетона
$A_{frp}$	– површина попречног пресека арматурне шипке ( $mm^2$ )
$A_{frp,pot}$	– потребна површина композитне арматуре
$a_u$	– вредност ширине прслине
$d_b$	– пречник арматурне шипке ( $mm$ )
$d_c$	– растојање од затегнуте ивице пресека до тежишта затегнуте арматуре ( $mm$ )
$d_{cs}$	– намање растојање до од ивице бетона до тежишта шипке или $2/3$ растојања између шипки
$E_b$	– модул еластичности бетона
$E_c$	– модул еластичности бетона
$E_{frp}$	– модул еластичности композитне арматуре (MPa)
$f_{bk}$	– карактеристична чврстоћа бетона при притиску
$f_{b,stv}$	– стварна чврстоћа бетона при притиску
$f_{frp}$	– затезна чврстоћа арматурне шипке (MPa)
$h$	– статичка висина
$h_1$	– растојање од затегнуте ивице пресека до неутралне осе ( $mm$ )
$h_2$	– растојање од тежишта затегнуте арматуре до неутралне осе ( $mm$ )
$j$	– коефицијент за одреживање крака сила
$k_1$	– фактор положаја шипке =1,3 за хоризонталну арматуру са више од 300mm заштитног слоја =1 за све остале случајеве

$k_{11}$	– коефицијент зависан од статичког система и облика оптерећења
$k_4$	– фактор површине шипке који представља однос између напона пријањања бетон-композит и напона пријањања челик-композит овај фактор никад није већи од 1 а уколико нема података узима се 0,8
$k_b$	– коефицијент који зависи од везе бетон арматура за композит који има сличне карактеристике везивања као бетон =1 за композит који има лошије карактеристике везе >1 за композит који има боље карактеристике везе <1 у недостатку података =1,2
$k_m$	– коефицијент зависан од облика поречног пресека
$k_{tr}$	– попречни индекс арматуре
$k_u$	– коефицијент којим се одрђује дозвољен угиб носача у функцији распона и статичког система
$k_{vi}$	– коефицијент сигурности (којим се редукује дозвољени напон у композиту)
$l_d$	– дужина сидрења (mm)
$\mu$	– проценат армирања
$M_g$	– моменати савијања од дуготрајних
$\mu_{frr}$	– напон смицања између бетона и композита (пријањање) (MPa)
$M_{loma}$	– момент при ком долази до лома
$M_n$	– моменати савијања од укупних утицаја
$\mu_z$ (%)	– коефицијент армирања затегнуте површине бетона
$n$	– број шипки
$v$	– коефицијент сигурности
$\rho_{frr}$	– modularni odnos (композит/бетон)
$P$	– сила
$s$	– максимално растојање попречних шипки на дужини $l_d$
$\sigma_d$	– дозвољени напон затезања у композитнох арматури
$w$	– ширина прслине на затегнутој страни елемента (mm)

УВОД: ОБРАЗЛОЖЕЊЕ ТЕМЕ И ТЕОРИЈСКИ ОКВИР ИСТРАЖИВАЊА.....	1
1.1.ОБРАЗЛОЖЕЊЕ ТЕМЕ ИСТРАЖИВАЊА И ПОСТАВКА ПОЧЕТНИХ ХИПОТЕЗА.....	1
1.1.1. Уводне напомене о предмету истраживања.....	1
1.1.2. Проблем и предмет истраживања .....	3
1.1.3. Циљ истраживања.....	5
1.1.4. Задаци истраживања.....	5
1.1.5. Полазне хипотезе истраживања .....	6
1.2.ОБРАЗЛОЖЕЊЕ МЕТОДОЛОШКОГ ПРИСТУПА ТЕМИ ИСТРАЖИВАЊА.....	7
1.2.1. Научне методе истраживања .....	7
1.2.2. Генерална структура докторске дисертације.....	7
1.2.3. Научна оправданост и очекивани резултати истраживања.....	11
I – КОМПОЗИТИ – преглед и анализа .....	13
2. КОМПОЗИТИ И ЊИХОВА ПРИМЕНА.....	13
2.1. Шта су композити и историјски преглед развоја .....	13
2.2. Врсте композита-преглед.....	14
2.3. Влакнима ојачана полимер матрица (Fiber reinforced polymer – FRP)....	15
2.3.1. Влакна.....	16
2.3.1.1. Стаклена влакна.....	20
2.3.1.2. Карбонска влакна.....	21
2.3.1.3. Армидна влакна .....	22
2.3.2. Матрица .....	23
2.3.2.1. Епоксид.....	26
2.3.2.2. Винил естер .....	27
2.3.2.3. Полиестер .....	27

2.4. Примена композита са нарочитим освртом на влакнима ојачану полимер матрицу (Fiber reinforced polymer – FRP).....	28
3. УПОТРЕБА РЕЦИКЛИРАНИХ МАТЕРИЈАЛА У ПРОИЗВОДЊИ КОМПОЗИТА.....	32
3.1. Анализа података о материјалима, количинама и начинима рециклаже.	35
3.1.1. Стакло.....	35
3.1.2. Карбон.....	39
3.1.3. Армид.....	41
3.1.4. ПЕТ (Polyethylene Terephthalate).....	42
3.2. Разлози због којих је материјал из рециклаже погодан за производњу влакана и матрице код композитних материјала.....	44
3.3. Позитивне и негативне стране употребе рециклираних материјала.....	45
II – ФОРМИРАЊЕ КОНТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНАТА.....	46
4. ФОРМИРАЊЕ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНАТА АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА УПОТРЕБОМ КОМПОЗИТА КОЈИ САДРЖЕ РЕЦИКЛИРАНЕ МАТЕРИЈАЛЕ.....	46
4.1. Преглед постојеће регулативе која регулише примену композитних материјала (полимер матрице ојачане влакнима).....	48
4.1.1. Легислатива према правилницима у иностранству (преглед).....	49
4.1.2. Легислатива према правилнику републике србије.....	52
4.2. Критеријуми које композитна арматура начињена од рециклираних материјала треба да испуни.....	53
4.2.1. Топлотни коефицијент дилатације.....	53
4.2.2. Утицај екстремних температура.....	54
4.2.3. Пријањање - дужина сидрења.....	55
4.2.4. Прслине.....	58
4.2.5. Угиби.....	62

4.2.6. Коефицијенти сигурности .....	65
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО УТВРЂИВАЊЕ КАРАКТЕРИСТИКА КОМПОЗИТА САЧИЊЕНОГ ОД ДЕЛОМ РЕЦИКЛИРАНИХ МАТЕРИЈАЛА .....	72
5.1. Истраживачки приступ .....	72
5.2. Експериментално утврђивање карактеристика композитне арматуре намењеног даљој уградњи у конструктивне елементе архитектонских објеката .....	72
5.3. Експериментално утврђивање карактеристика конструктивног елемента армираног композитом.....	82
6. ЕВАЛУАЦИЈА РЕЗУЛТАТА И ПРЕДЛОЗИ ЗА ДАЉУ УПОТРЕБУ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА ОД ПОЛИМЕРА ОЈАЧАНИХ РЕЦИКЛИРАНИМ ВЛАКНИМА .....	97
6.1. Анализа резултата екперимената према критеријумима постављеним кроз анализу литературе.....	97
6.1.1. Затезна чврстоћа .....	97
6.1.2. Прслине и угиби .....	98
6.1.3. Провера стварног напона у арматури .....	101
6.1.4. Дужина сидрења .....	101
6.1.5. Цена.....	102
6.1.6. Отпорност на корозију .....	103
6.2. Предлози за даљу употребу композитних материјала од полимера ојачаних рециклираним влакнима као и композитног материјала испитаног експериментом.....	105
6.2.1. Формирање конструктивних елемената носиве (примарне) конструкције употребом композитне арматуре од полимера ојачане рециклираним пет стакло влакнима .....	105
6.2.2. Кровни елементи .....	106
6.2.3. Изгубљене оплате и корубе .....	109

6.2.4. Надвратне и надпрозорне греде .....	115
6.2.5. Фасадни елементи .....	118
6.2.6. Урбани мобилијар, ограде и елементи уређења .....	120
6.2.7. Остали елементи .....	124
6.2.8. Опште напомене .....	125
6.3. Остварење постављених циљева и реализација задатака истраживања	125
ЗАКЉУЧЦИ, ПРЕПОРУКЕ И ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА.....	128
БИБЛИОГРАФИЈА (ИЗВОРИ И ЛИТЕРАТУРА) .....	132
ЛИТЕРАТУРА (СПИСАК ЦИТИРАНЕ И ПОЗИВНЕ ЛИТЕРАТУРЕ) .....	132
<i>ОПШТА ЛИТЕРАТУРА</i> .....	133
<b>ПРИЛОГ:</b> .....	145
<b>Изјава о ауторству</b>	
<b>Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада</b>	
<b>Изјава о коришћењу</b>	



## **УВОД: ОБРАЗЛОЖЕЊЕ ТЕМЕ И ТЕОРИЈСКИ ОКВИР ИСТРАЖИВАЊА**

### **1.1. ОБРАЗЛОЖЕЊЕ ТЕМЕ ИСТРАЖИВАЊА И ПОСТАВКА ПОЧЕТНИХ ХИПОТЕЗА**

#### **1.1.1. Уводне напомене о предмету истраживања**

Напредак у истраживањима у области материјала који се користе за израду објеката неоспорно доприноси укупном развоју архитектонске струке, пружа нове могућности у вези са финалном обрадом, и доприноси развоју нових и другачијих архитектонских форми.

У свом делу „О архитектури“ Витрувије каже „У првој књизи сам писао о задатку архитектуре и о смислу те уметности, као и о градским зидинама и подели земљишта унутар њих, а даље по реду следи да говорим о храмовима и јавним и приватним зградама, и сразмери по којој мислим да треба да се граде, али мислим да то одложим док не објасним каква је практична вредност различитих материјала од којих се граде делови зграда у складу са одговарајућом употребом, и док не испричам од којих се елемената ти материјали састоје.“<sup>1</sup> и тако скреће пажњу на значај употребе материјала и схватање њихових карактеристика. Он се дотиче теме употребе материјала пре приче о архитектури објеката и сматра познавање материјала неопходном основом за даља истраживања у архитектури. Он, у свом даљем тексту, где пише „О природи ствари“, прича и о елементима као што су вода, ватра и атоми, од којих су материјали настали. „Пошто су изгледа све ствари начињене или настају спајањем тих елемената које је природа распоредила по бескрајним врстама ствари, мислим да треба да говорим о њиховим разликостима и практичним особеностима које показују у грађевинама, зато да они који се спремају да граде, кад то сазнају – не греше, већ да умеју да набаве прави материјал који одговара ономе што граде“.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Витрувије (Vitruvius), *O arhitekturi (Vitruvii de Architectura libri decem)*, уредник издања Душан Мрђеновић, превод са латинског Зора Бојић, Београд, Завод за уџбенике и Досије студио, 2009

До појаве армираног бетона доминантни материјали за градњу били су камен и дрво а у последњих два века ову улогу преузимају грађевински челик и армирани бетон.<sup>2</sup> Можемо се укратко осврнути на историју армираног бетона који се као нови, композитни материјал, јавља половином XIX века, у виду елемената армираних жичаном мрежом. У први мах у елементима који нису имали везе са конструкцијом архитектонских или грађевинских објеката. Кроз даљу употребу, експерименте и испитивања армирани бетон, поред челика, постаје најраспрострањенији материјал у грађевинарству.

„Међутим челик и армирани бетон имају проблеме различитих форми деградације који се јављају услед деценија лошег одржавања и прекомерне експлоатације овакви инфраструктурни системи се распадају “.<sup>2</sup> Због оваквог стања се тежи изналажењу нових материјала који треба да омогуће како санацију насталог проблема тако и формирање нових елемената отпорних на деградацију услед услова коришћења.

Ако наведеном додамо потребу за рециклирањем сировина зарад квалитетнијег живота планете и људи можемо констатовати да се указује потреба за новим материјалима који узимају у обзир еколошки аспект.

Ово нас доводи до ситуације да је све већа тенденција за рециклирањем услед смањене потршње енергије при процесу рециклаже у односу на процес производње сировина. Нпр. само рециклирањем ПЕТ-а уштеда енергије је 70% у односу на производњу нове сировине.<sup>3</sup>

Рециклирана влакна се користе у текстилној, аутомобилској и грађевинској индустрији. Њихова примена зависи од врсте влакана која се користе. Тако се нпр. рециклирана ПЕТ влакна примењују за израду одеће, намештаја, тепиха, пуњење јастука и душека. Стаклена влакна се користе за ојачавање бетона као композитног материјала, мада се код таквог упаривања јављају проблеми везани

---

<sup>2</sup> Bisby, L.A., Contributor: Fitzwilliam J., *ISIS Design Manual No. 2: An Introduction to FRP Composites for Construction*, A Canadian Network of Centres of Excellence, Department of Civil Engineering, Queen's University, October 2003

<sup>3</sup> "The price of virtue", *The Economist*, June 7, 2007. коришћено 12. децембра 2013. са <http://www.economist.com/node/9302727#sthash.134RT7pp.dpbs>

за реакције алкалних силиката. Корисно би било наћи начин да се овакви рециклирани материјали искористе и у конструктивним елементима архитектонских објеката као што је нпр. употреба рециклираног бетона нашла своју примену.

У овом раду биће разматране физичке, хемијске и експлоатационе карактеристике новог, композитног материјала, и могућности његове примене у објектима високоградње које пројектују архитекте – архитектонске објекте.

При прегледу литературе може се приметити да се помињу карактеристике рециклираних материјала сачињених од рециклираних влакана која се користе као слободна влакна али нема података како се понашају рециклирана влакна која ојачавају матрицу сачињену од полимера нити матрицу сачињену од рециклираних материјала. Постоје анализе и дефинисани начини употребе композитних материјала са нерциклираним влакнима тј. влакнима произведеним од нерциклиране сировине као и матрице од материјала из примарне производње.

Како би се смањио утицај загађења на животну средину, а задржале могућности и квалитет који пружају композитни материјали сачињени од влакнима ојачаних полимера потребно је испитати и анализирати карактеристике материјала као и анализом утврдити могућности и област примене наведених материјала код пројектовања архитектонских објеката.

### **1.1.2. Проблем и предмет истраживања**

Предмет истраживања докторске дисертације је примена рециклираних материјала у производњи композита и њиховој примени у формирању конструктивних елемената архитектонских објеката (носивих и неносивих), као и стварање услова за отпочињање експерименталних истраживања у овој области. Елементи носиве (примарне) конструкције су стубови, греде, плоче и носећи зидови, а елементи неносиве или привремено носиве (секундарне) конструкције

су елементи као што су кровни покривачи, надвратници, надпрозорници, фасадни елементи, корубе, изгубљене оплате и слично.

Да ли је овакав приступ адекватан и погодан проверава се кроз тестирање новог композитног материјала. Нови материјал је композит формиран од континуалних влакана сачињених од рециклираног ПЕТ-а (Polyethylene Terephthalate) и стакла интегрисаних у матрицу полимера.

Композит може бити у садејству са другим материјалима као што су бетон, челик, опекарски елементи и слично. Потребно је утврдити критеријуме по којима би се могла сагледати оваква интеракција и њене карактеристике а како би се обезбедило да формирану конструктивни елементи могу задовољити потребне захтеве примене.

Пројекат долази на свет и расте са датим материјалом: Материјал треба да прати пројектовање од иницијалне фазе, зато што он представља почетну тачку, пре него дестинацију техничког и формалног резоновања које води ка извођењу архитектонског дела.<sup>4</sup>

У оквиру истраживања посебна пажња је посвећена стратегијама за подизање нивоа одрживости изградње, представљеним у „Агенди за одрживу изградњу у Европи“ из 2001. године. коју је припремила радна група за одрживо грађење уз консултације у учествовању чланова Европске комисије, представника чланица земаља ЕУ и представника индустрије и привреде. Основно полазиште стратегија изнетих у наведеној Агенди, које је уједно и једно од основних полазишта овог истраживања, је дефиниција одрживе изградње. Ова дефиниција је дата на првој Интернационалној конференцији о одрживој изградњи, одржаној 1994. године. у Тампи, Флорида, УСА. Дефиниција каже да одржива изградња представља стварање и одговорно руковођење здравим изграђеним окружењем, заснованим на ефикасном коришћењу ресурса и еколошким принципима. Ово се може приметити и када се погледа нови законски оквир у области планирања и изградње у нашој земљи који узима у обзир принципе одрживог пројектовања и градње. Према Закону о планирању и изградњи Р. Србије („Сл. Гласник РС“, бр.

---

<sup>4</sup> "Space and architecture: new materials modifying the urban environment", Lund, Sweden, May, 2005

72/2009, 81/2009 – испр.,64/2010 – одлука УС, 24/2011, 2012/2012, 42/2013 и 50/2013) проистеклом из Националне стратегије одрживог развоја предвиђа се „уређење и коришћење простора засновано на начелима одрживог развоја“ и „обезбеђење одрживе градње применом техничких мера, стандарда и услова планирања, пројектовања, изградње и употребе објеката“.<sup>5</sup>

### **1.1.3. Циљ истраживања**

Основни циљ истраживања је унапређење пројектовања и реализације конструкција кроз увођење нових композитних материјала тј. групе композитних материјала, у функцији остварења еколошког квалитета зграда који је у складу са препорукама за одрживи развој грађења, а које се тичу ограничавања емисије загађујућих супстанци и одговорног коришћења материјалних ресурса, као и реализације архитектонских простора који доприносе квалитету живота људи.

Циљ овог истраживања је да се експериментално испитају и анализирају карактеристике материјала сачињеног од рециклираних материјала као нпр. влаканима ојачаног полимера и установи могућност примене тог материјала и њему сличних при формирању конструктивних елемената архитектонских објеката. Такође, циљ је да се укаже на установљену област и могућности примене нових материјала.

### **1.1.4. Задаци истраживања**

У складу са дефинисаним циљем истраживања, најважнији задаци истраживања који су постављени у дисертацији су следећи:

- успостављање прегледа материјала, начина рециклаже и формирања композитних елемената конструкције

---

<sup>5</sup> („Сл. Гласник РС“, бр. 72/2009, 81/2009 – испр.,64/2010 – одлука УС, 24/2011, 2012/2012, 42/2013 и 50/2013)

- експериментално утврђивање карактеристика елемената сачињених од полимера ојачаних рециклираним ПЕТ-стакло влакнима,
- експериментално утврђивање карактеристика конструктивног елемента чији је саставни део елемент сачињен од полимера ојачаних рециклираним ПЕТ-стакло влакнима,
- компаративна анализа карактеристика испитаног материјала са доступним резултатима из литературе за композите израђене од рециклираних и нерциклираних материјала, као и материјала у стандардној примени
- преглед и анализа важеће регулативе у иностранству, и поређење са важећим у Р.Србији везане за употребу композитних материјала и рециклираних материјала при изради композита
- предлог критеријума за оцену погодности примене материјала,
- дефинисање смерница за моделовање елемената архитектонских објеката сачињених од композита и отварање поља даљег истраживања зарад могуће имплементације употребе оваквих композита у прописе и праксу,
- утврђивање предности (бенефита) и недостатака композита израђених од рециклираних материјала, као и материјала одабраног за вршење експеримента као примера, а који се тичу формирања конструктивних елемената архитектонских објеката

#### **1.1.5. Полазне хипотезе истраживања**

**Основна хипотеза истраживања је да су ојачања, односно да је арматура, у виду композита од рециклираних материјала погодна за формирање конструктивних елемената архитектонских објеката (носивих и неносивих), обзиром на своје механичке карактеристике и отпорност на корозију, а што ће се показати кроз анализу литературе, доступних података и експеримент.**

Рециклирана влакна могу успешно заменити нерациклирана, а да тако добијени материјал одговара потребама постављеним при пројектовању архитектонских објеката тј. одговара захтевима које треба задовољити при формирању конструктивних и других елемената архитектонских објеката.

## **1.2. ОБРАЗЛОЖЕЊЕ МЕТОДОЛОШКОГ ПРИСТУПА ТЕМИ ИСТРАЖИВАЊА**

### **1.2.1. Научне методе истраживања**

За истраживања у оквиру предложене докторске дисертације коришћене су следеће научне методе истраживања:

Експерименталним методама испитане су физичке и механичке особине новог материјала и анализирана могућност примене истог у формирању конструктивних елемената архитектонских објеката.

У току израде докторске дисертације, за испитивање материјала коришћене су лабораторије Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, а анализирани су могућности примене наведеног материјала према његовим физичким и хемијским карактеристикама. Такође део испитивања урађен је у Институту ИМС у Београду и лабораторији предузећа „Лафарге“ д.о.о.

За оцену стања материјала, карактеристика материјала и поређење са важећим стандардима коришћене су методе компаративне анализе и аналитички поступак.

### **1.2.2. Генерална структура докторске дисертације**

Структуру рада чине следеће основне целине: (1) Увод: образложење теме и теоријски оквир истраживања, (2) Композити – преглед и анализа (3) Формирање

конструктивних елемената (4) Закључци и препоруке. На крају рада приказани су библиографски подаци (извори и општа литература), попис слика(илустрација), попис табела и прилози.

Уводни део рада (Увод: образложење теме и теоријски оквир истраживања) садржи два поглавља. У првом поглављу уводног дела (Образложење теме истраживања и поставка почетних хипотеза) дефинишу се основне поставке истраживања у дисертацији: образлаже се проблем и предмет истраживања, постављају се полазишта у виду хипотеза истраживања, даје се формулација истраживачких циљева и задатака. У другом поглављу (Образложење методолошког приступа теми истраживања) образлаже основна теоријска позиција и методе спровођења истраживања, даје се, у најкраћим цртама, структура дисертације и образлаже се научна оправданост и очекивани резултати.

Други део рада (Композити – преглед и анализа) подељен је на две целине.

У првој глави дисертације (Композити и њихова примена) у њеном првом поглављу (Шта су композити и историјски преглед развоја) говори се о томе шта заправо значи реч композит, шта су главне карактеристике елемента који је означем појом композит и историјски развој композита од првих примена на основу интуиције. У другом поглављу (Врсте композита-преглед) даје се преглед класификација композита и ово поглавље уствари представља кратак увод у даљу анализу. Треће поглавље (Влакнима ојачана полимер матрица) одређује даље анализе у смеру који разматра карактеристичну групу композита и садржи два подпоглавља која се баве сагледавањем компоненти која чине овакав композит, а то су влакна и матрице као и материјали који се користе за израду ових елемената. У четвртој поглављу (Примена композита са нарочитим освртом на влакнима ојачану матрицу) даје се преглед примене композита направљених од наведених материјала из примарне производње који се користе у пракси и додатно скреће пажња на примену оних композита који имају примењена влакна као елемент ојачања матрице.



Друга глава дисертације (Употреба рециклираних материјала као замене за материјала добијене примарном производњом) садржи увод о разлозима за рециклажу а затим у првом поглављу (Анализа података о количинама и начинима рециклаже) сагледавају се доступне информације а везано за начине реализовања процеса рециклаже, посебно по материјалима који се користе у производњи композита начињених од полимерне матрице и влакана, као и анализа података о количинама које су доступне за рециклажу и које се реално рециклирају уз повлачење паралеле са Р.Србијом и подацима који су доступни за територију Р.Србије. У другом поглављу (Разлози погодности материјала из рециклаже за производњу влакана и матрице код композитних материјала) говори се о разлозима који омогућавају употребу материјала из рециклаже за производњу композита; Треће поглавље (Позитивне и негативне стране употребе рециклираних материјала) сагледава карактеристике материјала из првог поглавља треће главе тј. њихове добре и лоше особине везано за наведену употребу у композитима.

Други део рада (Формирање конструктивних елемената) обухвата три главе у којима се анализирају потребни улазни подаци за оцену формирања конструктивних елемената, врши се експериментално утврђивање карактеристика одабраног композитног материјала као пробног модела као и евалуација резултата истраживања.

У трећој глави дисертације, а првој глави друге целине, (Формирање конструктивних елемената архитектонских објеката употребом композита који садрже рециклиране материјале) у првом поглављу (Преглед постојеће регулативе која регулише примену композитних материјала) даје се преглед постојеће регулативе у иностранству, а везано за употребу композита у виду влакнима ојачане полимер матрице, са освртом на постојећу регулативу Р.Србије која не познаје ову област и сагледава се потреба за променом постојеће регулативе и могућност промене; у другом поглављу (Критеријуми које композитна арматура начињена од рециклираних материјала треба да испуни) се на основу анализе литературе и регулативе која важи у иностранству и Републици Србији дају

критеријуми и дефинишу смернице које треба да задовољи композит при употреби у елементима конструкције архитектонских објеката. Уз то, сагледава се потребан математички тј. аналитички апарат за аналитичку анализу механичких карактеристика конструктивних елемената архитектонских објеката формираних употребом ојачања у виду композита и то као полимер матрице ојачане влакнима од рециклираних материјала.

Четврта глава дисертације (Експериментално утврђивање карактеристика композита сачињеног од делом рециклираних материјала) у првом поглављу (Истраживачки приступ) сажето описује експериментални приступ тј. фазе експеримента у истраживању; у другом поглављу (Експериментално утврђивање карактеристика композитне арматуре намењене даљој уградњи у конструктивне елементе архитектонских објеката) дат је опис и приказ тока експеримента којим су утврђене неке од карактеристика композита намењеног армирању конструктивних елемената; треће поглавље (Експериментално утврђивање карактеристика конструктивног елемента армираног композитом) дат је опис и приказ експеримента којим су утврђене карактеристике бетонских конструктивних елемената армираних композитом и карактеристике бетонских конструктивних елемената армираних челиком како би се касније могла извршити међусобна компаративна анализа ових елемената али и евалуација аналитички добијених резултата.

Пета глава (Евалуација резултата и предлози за даљу употребу композитних материјала од полимера ојачаних рециклираним влакнима) у свом првом поглављу (Анализа резултата експеримената према критеријумима постављеним кроз анализу литературе) анализира резултате експеримента, даје се евалуација карактеристика које су оптина тела показала и приступа се међусобној компаративној анализи резултата експеримената са подацима из литературе; у другом поглављу (Предлози за даљу употребу композитних материјала од полимера ојачаних рециклираним влакнима као и конкретног композитног материјала испитаног експериментом) дају се предлози употребе композита од полимера ојачаних рециклираним влакнима а везано за област којом се бави

архитектонско конструкторство. Четврто поглавље (Остварење постављених циљева и реализација задатка истраживања) се осврће на испуњење постављених циљева и задатака истраживања у целини.

Четврти део рада (Закључци и препоруке) износи сажето закључке спроведеног истраживања и поставља нова истраживачка питања која из њих проистичу.

На самом крају дисертације налазе се неопходни делови рада, који допуњавају научни апарат истраживања, а то су: Библиографија (извори и литература) и додаци и прилози.

### **1.2.3. Научна оправданост и очекивани резултати истраживања**

Истраживање се односи на проблематику развоја еколошки прихварљивих решења конструктивних елемената архитектонских објеката, а тиме и архитектонских објеката у целини, и као такво је научно и друштвено оправдано.

Очекивани резултати истраживања су дубља и потпунија научна знања која произилазе из спознавања односа и веза између подсистема архитектонског објекта, конструкције и конструктивних материјала. Практична примена треба да омогући да се проблеми, настали услед све оштријих еколошких стандарда превазиђу, а да се притом постигнути квалитет у пројектовању и изградњи архитектонских објеката задржи или, уколико је то могуће, унапреди.

У ширем смислу допринос истраживања се састоји у сагледавању и разумевању начина на који се сродне истраживачке области прилагођавају савременим променама приступа решавању проблема и мултидисциплинарности. У ужем смислу, рад је конципиран као прилог истраживањима у области архитектонског пројектовања и архитектонског конструкторства.

Очекивани резултати предложеног истраживања су:

- научна теоријска сазнања о потенцијалу увођења рециклираних материјала у употребу при формирању конструктивних елемената архитектонских објеката,
- преглед процеса који се користе при производњи композитних елемената који садрже рециклиране материјале,
- могућност операционализације стечених знања у области архитектонског пројектовања и архитектонског конструкторства као и сагледавање могућих праваца даљих истраживања
- указивање на потребу усаглашавања важећих правилника и законодавних решења која се тичу области везаних за архитектонско пројектовање и архитектонско конструкторство.

Практична примена резултата састоји се у сагледавању могућности и смерница за даље истраживање ове области.

Дисертација представља научно истраживање о употреби рециклираних материјала као чинилаца композита који се може употребити као арматура или неки други елемент при формирању конструктивних елемената архитектонских објеката, и могућности примене у ових материјала у пракси. Овакви резултати истраживања подразумевају унапређење пројектовања и реализације конструкција, као и склопова архитектонских објеката кроз увођење нових композитних материјала, а у функцији остварења еколошког квалитета зграда који је у складу са препорукама за одрживи развој грађења

## **I – КОМПОЗИТИ – преглед и анализа**

### **2. КОМПОЗИТИ И ЊИХОВА ПРИМЕНА**

#### **2.1. Шта су композити и историјски преглед развоја**

Композит (лат. Compositum) или у преводу састављено, договор, пакт, концензус. Као такав композит је комбинација (композиција) минимално два различита материјала како би се комбиновањем њихових особина добио нови, јединствени, материјал са бољим карактеристикама. Ово је комбиновање стандардних или есенцијалних карактеристика материјала при чему компоненте задржавају своје идентитете. Композит преузима карактеристике примарних материјала а у одабиру композита настоји се изабрати онај који комбинује добре или најбоље карактеристике сваког од материјала који учествује у формирању а које су потребне за адекватну употребу новог композитног материјала као обједињене целине.

Употребу композитних материјала кроз историју можемо пратити од времена древног Египта и Месопотамије, око 2000 година пре нове ере. Још тада су биљна влакана, најчешће влакна житарица, у комбинацији са муљем и блатом коришћена за израду грађевина. „Како би се ефикасно градило коришћењем блата неопходно је било ојачати га да не би дошло до пуцања при сушењу. Најчешће ојачање су биле биљне сламке, али исто тако су коришћени и разни други материјали као што су балега (садржи биљна влака), животињска влакна, песак или грит.“<sup>6</sup>

Наведени напредак код употребе композита у градитељству је омогућио боље карактеристике објекта, дуготрајност, отпорност и слично, а њега следи напредак у војној сфери који треба поменути, у питању је монголски композитни

---

<sup>6</sup> Palaces and Temples in Ancient Mesopotamia, [http://www.usc.edu/dept/LAS/wsrp/information/REL499\\_2011/Palaces%20and%20Temples%20in%20Ancient%20Mesopotamia.pdf](http://www.usc.edu/dept/LAS/wsrp/information/REL499_2011/Palaces%20and%20Temples%20in%20Ancient%20Mesopotamia.pdf), коришћено 08.12.2015. године

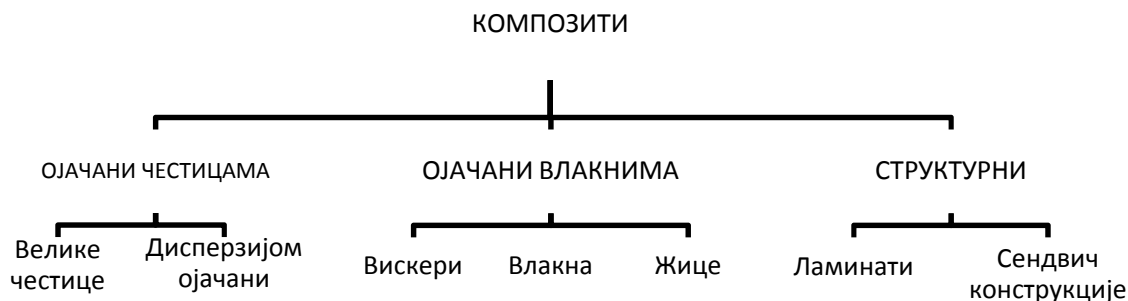
лук који је омогућио монголима (Џингис-кан Темуцину) освајање огромних територија. За овај композитни лук се може рећи да је дуго био најмоћније оружје заслужно за овакву доминацију.

Кроз историју развој композита је имао значајну улогу али исто тако треба нагласити да нагли развој композитних материјала креће тек у двадесетом веку, и то као резултат појаве пластике као што је винил, полиестер, полистирен и слично. Ови полимери се појављују почетком двадесетог века и долази до убрзавања процеса производње и употребе композита а нарочито од раних педесетих година на овамо. У том периоду почиње масовна примена у индустрији и то аутомобилској, војној, авио, хемијској, прерађивачкој, итд. Изузетни помаци су додатно узрок развоја свемирских технологија и аеронаутике.

## 2.2. Врсте композита-преглед

Композите можемо делити према врсти матрице и према врсти ојачања.<sup>7</sup>

Према врсти матрице делимо их на композите са матрицом од полимера, керамике и метала. А према врсти ојачања на оне који имају ојачања у виду честица, влакана и на структурне композите.<sup>7</sup>



Слика 1. Подела композита према врсти ојачања \_ схема

<sup>7</sup> [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1369657197-0-materijaliiikompoziti2013.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1369657197-0-materijaliiikompoziti2013.pdf)

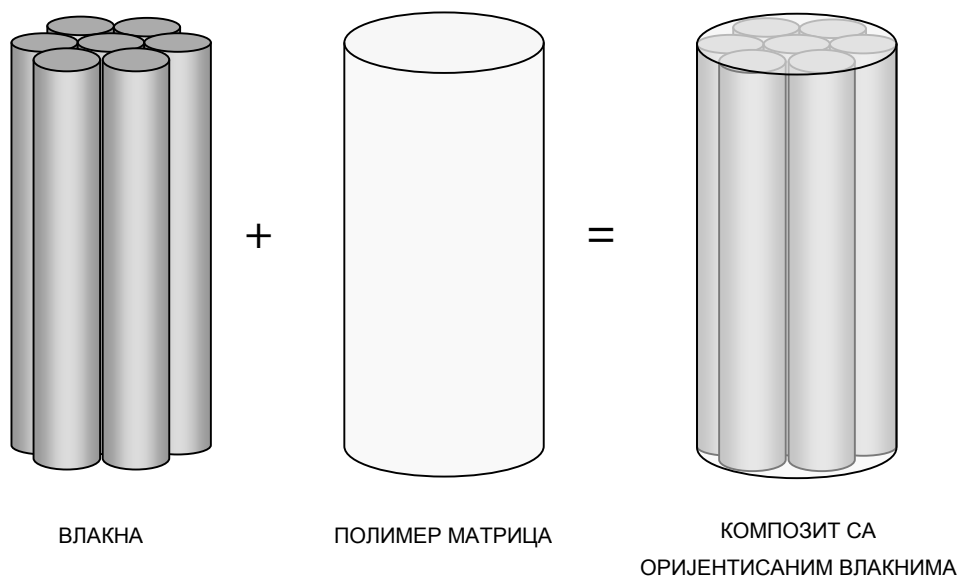
### 2.3. Влакнима ојачана полимер матрица (Fiber reinforced polymer – FRP)

Влакнима ојачана полимер матрица јесте комбинација полимера који се понаша као везиво (ламинатор) доприноси дуктилности, жилавости и преноси оптерећење на влакна, и влакана која носе велики проценат оптерећења повереног композитном елементу. Влакна дакле обезбеђују структурне перформансе потребне композиту и могу варирати према хемиском саставу, форми и слично.

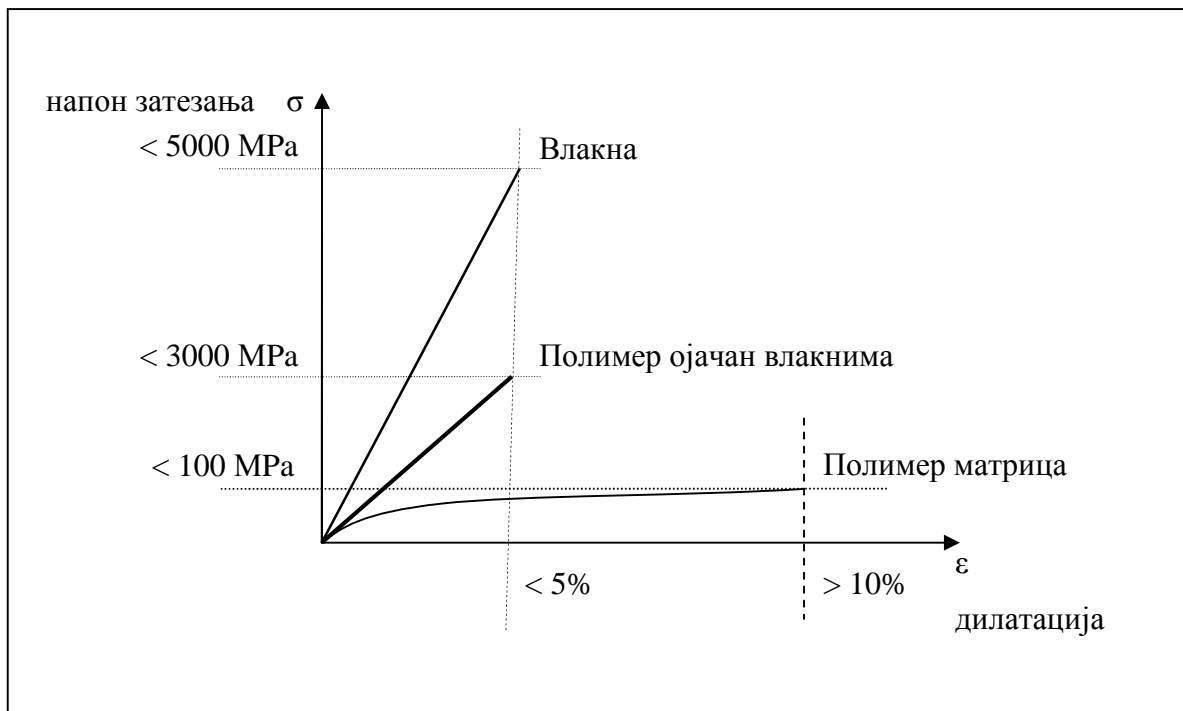
Композити ојачани влакнима према врсти влакана могу бити<sup>7</sup>:

- композити са дисконтинуалним влакнима
  - овакви композити по правилу имају случајно (хаотично) усмерена влакна
- композити са континуалним влакнима
  - композити са континуалним влакнима имају усмерена влакна која могу бити усмерена у једном правцу, у више ортогоналних праваца или у више праваца који нису нужно ортогонални

Комозити ојачани континуалним влакнима спадају у анизотропне материјале обзиром да су својства много боља у правцу пружања влакана.



Слика 2. Основне компоненте које чине композит са усмереним влакнима



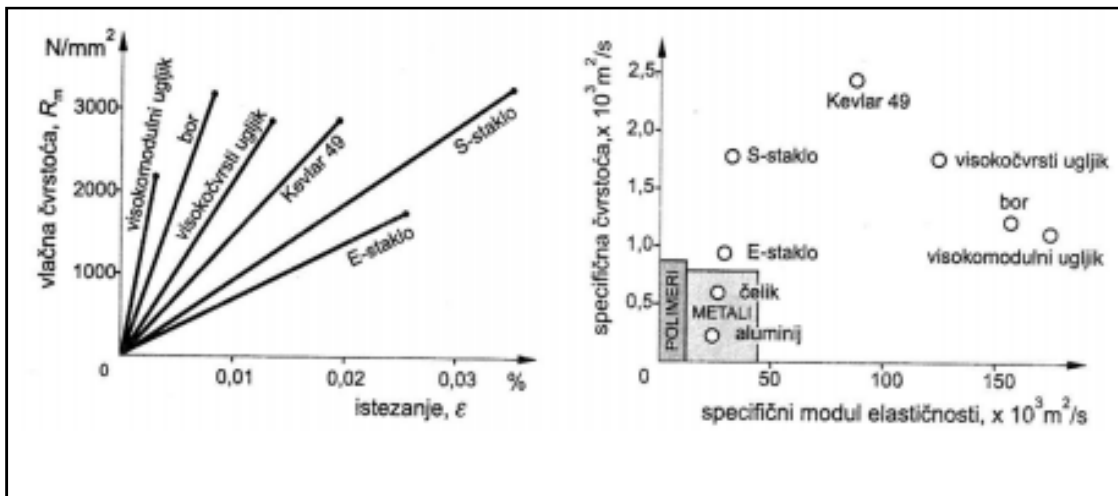
Слика 3. Дијаграм напон-дилатација за полимер ојачан влакнима – принцип

На слици 3. дат је график који показује независне дијаграме напон-дилатација за групацију материјала, тачније полимера од којих се формира матрица и групацију материјала од којих су начињена влакна, као и дијаграм напон-дилатација за композит који се формира њиховом интракцијом. Добијени материјал има дијаграм напон-дилатација који оквирно одговара средњим вредностима у односу на дијаграме материјала матрице и влакана.

### 2.3.1. Влакна

Влакна обезбеђују потребне карактеристике при формирању композита. Дакле, влакна дају чврстоћу и крутост те из тог разлога требају бити чврста, крута и лагана. Температуре топљења влакана требају бити високе и потребни су и високи модули еластичности или чврстоће. Потребно је и да карактеристике не варирају битно од влакна до влакна која се користе при формирању композита тј. константан квалитет влакана и уједначеност њиховог пречника.



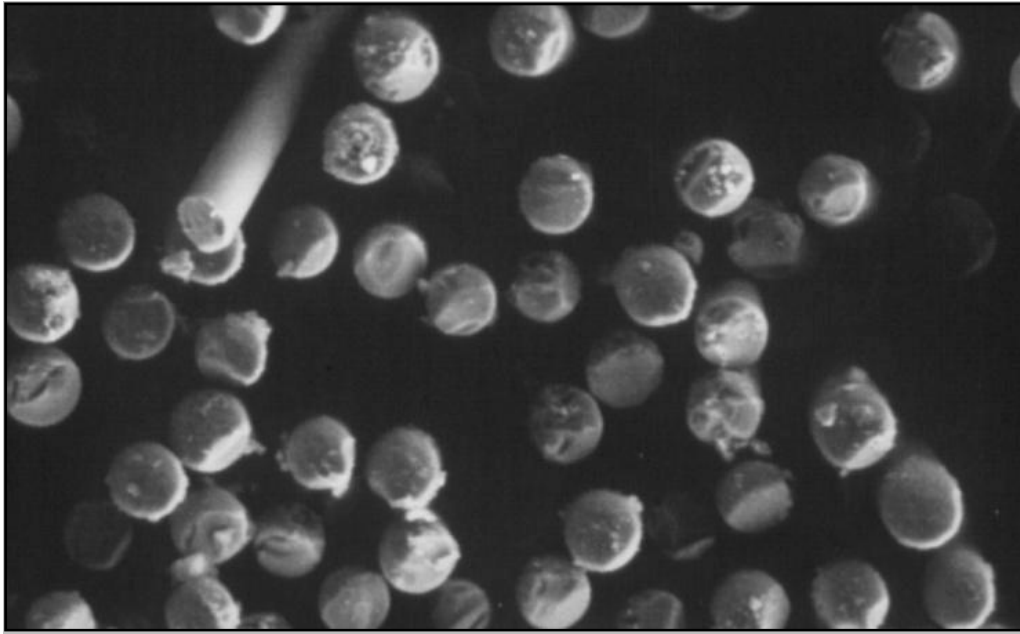


Слика 4. Дијаграми чврстоћа неких влакана у зависности од материјала <sup>8</sup>

Дијаграм на слици 4 лево показује дијаграм напон-деформација за различита влакна у односу на материјале од којих су направљена. Дијаграм на слици 4. десно показује зоне у којима се налазе у односу на материјале од којих су направљена тј. специфичне вредности чврстоће и модула еластичности влакана.

Када су у питању димензије влакана потребно је осврнути се на на однос пречник-дужина. Овај однос је код континуалних влакана, тј. влакана које можемо сматрати континуалним, је изузетно велики. Пречници влакана се крећу у мерама које одговарају микронима (слика 5) а дужине континуалних влакана одговарају укупним димензијама композирних елемената које се у архитектонским конструкцијама крећу у метрима. Мале димензије пречника влакана због својих хемијских карактеристика тј. веза које молекули формирају даје влакнима велику чврстоћу.

<sup>8</sup>[https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1369657197-0-materijaliiikompoziti2013.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1369657197-0-materijaliiikompoziti2013.pdf)



Слика 5. Приказ влакана посматраних кроз електронски микроскоп

Влакна се могу разликовати према материјалу, врсти, дужини, пречнику, итд.

Према материјалу од ког су направљени можемо дати следећу поделу:

- природна
  - дрво
  - лан
  - конопља
  - животињског порекла
  
- стаклена
- карбонска
- армидна
- базалтна
- борна

За комерцијалну употребу погодна су стаклена, карбонска, армидна и полиестер, док остала можемо сврстати у погодна за специјалну употребу тј. употребу у специјалним случајевима.

Одавде можемо закључити да избор материјала за влакна, процес производње влакана, као и облик и величина влакана битно утичу на њихову цену а тиме и на финалну цену композитног елемента намењеном употреби за ојачање елемената конструкције. Треба имати у виду да се повећање цене не огледа искључиво у повећању цене материјала већ и у цени производње, количини радне снаге која се утроши, времену потребном за израду, степену стручности потребном за рад у процесу, квалитету опреме која се користи и слично.

Влакна се начешће производе, складиште и продају у калемовима тзв. „Roving“ (Слика 6) у форми праменова у виду паралелних влакана у праменовима или неком виду уплетених нити.



Слика 6. Намотаји влакана

Могу бити и у виду платана у којима могу бити усмерена у једном или више смерова.

Сва влакна морају проћи процес облагања неким материјалом како би влакна била заштићена од оштећења, како би влакна била импрегнирана и како би се међусобно могла боље повезати а тиме се обезбедила боља међусобна интеракција и омогућило боље везивање са материјалом од кога се састоји матрица у коју се влакна уграђују.

У даљем тексту можемо се осврнути на карактеристике неких од наведених влакана у подели:

#### **2.3.1.1. Стаклена влакна**

Стаклена влакна су по питању употребе и најраспрострањеније због најниже цене у односу на перформансе. Производе се топљењем сировине и континуираним извлачењем изузетно танких влакана дебљине које крећу од неколико микрона.

Карактеристике ових влакана су велика чврстоћа, задовољавајући тј. адекватни модули еластичности, специфична густина и маса као и ниска топлотна проводљивост.

Стаклена влакна су своју примену нашла у изради конструктивних елемената разних врста тј. елемената који дају структурну чврстоћу производима у које се уграђују а у великој мери заобишла текстину индустрију и сличне примене због крутости и потребе да по правилу буду заштићена матрицом јер у супротном лако долази до пуцања влакана и нежељених ефеката по кориснике.

Што се тиче специфичне тежине стаклених влакана она је већа него код неких других материјала који се користе као влакнаста ојачања у композитима али је далеко повољнија од нпр. челика (око три пута су лакша). Ова влакна имају и релативно низак модул еластичности.

Тип влакна	Густина (g/cm <sup>3</sup> )	Затезна чврстоћа (Мра)	Модул еластичности (Гра)	Дилатација (%)
A-glass	2,44	3300	72	4,8
AR-glass	2,7	1700	72	2,3
C-glass	2,56	3300	69	4,8
D-glass	2,11	2500	55	4,5
E-glass	2,54	3400	72	4,7
ECR-glass	2,72	3400	80	4,3
R-glass	2,52	4400	86	5,1
S-glass	2,53	4600	89	5,2

Табела 1. Механичке карактеристике стаклених влакана у зависности од типа стакла<sup>10</sup>

У пракси се често користе за производњу композитних ојачања бетонских конструкција у виду различитих елемената (шипке, цеви, траке, итд.).

### 2.3.1.2. Карбонска влакна

Карбонска влакна се производе процесом пиролизе у ком пролазе кроз стабилизацију, карбонизацију и графитизацију. Овај поступак даје влакна која имају изузетно добре карактеристике по питању чврстоће, еластичног модула и специфичне тежине а пречник влакна се креће у димензијама од неколико микрона.

Модули еластичности су врло високи и крећу се у распону од 250-1000 GPa

- стандардни, 250-300 GPa
- средњи, 300-350 GPa
- високи, 350-550 GPa
- ултра високи, 550-1000 GPa

Код карбонских влакана затезне чврстоће иду преко 4000 МПа.

Изузетан напредак технологије омогућава константан пад цене и све већу употребу овог материјала при ојачању конструкција. Ова влакна се најчешће

<sup>10</sup> <http://www.build-on-prince.com/glass-fiber.html#sthash.lqXCENOW.dpbs>

користе код санације архитектонских-грађевинских конструкција и као елементи ужади за преднапрезање услед потребе да се у конструктивне елементе унесу изузетно велике силе.

Карактеристике ових влакана су велике чврстоће и модули еластичности, њихова специфична тежина и отпорност на спољашње утицаје.

### 2.3.1.3. Армидна влакна

Армидна влакна се ћемо можда лакше се могу објаснити уколико кажемо да је у питању кевлар. Заправо кевлар је само подгрупа армида. Ова влакна се производе од полиамида у процесу екструзије.

Ова влакна су изузетно лака тј. имају малу специфичну тежину и велику затезну чврстоћу и задовољавајуће до добре модуле еластичности. Негативне стране су мала чврстоћа на смицање и лоша отпорност на спољне утицаје (изложеност влази, ултраљубичастој светлости и слично).

Тип влакна	Густина (g/cm <sup>3</sup> )	Затезна чврстоћа (Мпа)	Модул еластичности (Gpa)	Дилатација (%)
Kevlar 29	1,44	2920	83	3,5
Kevlar 49	1,44	3600	124	2,9
Kevlar 149	1,47	3450	179	1,5
Techora T-200	1,44	3000	70	4,4
Twaron	1,44	3000	80	3,3
Twaron HM	1,44	3000	124	2

Табела 2. Механичке карактеристике стаклених влакана у зависности од типа стакла<sup>11</sup>

<sup>11</sup> <http://www.build-on-prince.com/aramid-fibers.html#sthash.W0cbhLye.dpbs>

### 2.3.2. Матрица

Матрица као везни елемент влакана обезбеђује интеракцију (обезбеђује међусобни пренос силе) између појединачних влакана и тиме их удружује, односно суперпонира, у једну целину. Такође обезбеђује положај влакана тако да буду равномерно распоређена по композитном елементу који формирају. Како су влакна обложена матрицом она истовремено има улоху и да заштити влакна од спољашњих утицаја.

Материјал од ког је сачињена матрица по својим хемијским карактеристикама мора бити компатибилан са материјалом од ког су сачињена влакна.

Веза између матрице и влакана је кључна за постизање што бољих механичких тј. конструктивних карактеристика композита.

„Молекули изграђени од врло великог броја атома везаних хемијским везама, који називају се макромолекули (грч. такго- велики). Макромолекули могу бити природног порекла (целулоза, беланчевине, природни каучук) или добијени синтетским путем (полиетен, полистирен, полиамиди, полиестри итд.). Није у питању само број атома, већ и начин како су они повезани у макромолекулу, тако да за различите макромолекулске супстанце граница може да буде при различитом броју атома у молекулу.”<sup>12</sup>

У овом раду се бавимо полимер матрицама иако оне могу бити од различитих материјала.

Полимером је првобитно називан молекул који се састоји из много (грч. poli - много) конститутивних јединица - основних понављајућих мотива - делова (грч. meros - део).

“Данас се према IUPAC-у (Интернационална унија за чисту и примењену хемију) полимер дефинише као супстанца састављена од молекула који се

---

<sup>12</sup> R. Aleksic, I. Zivkovic, P. Uskokovic, *Kompozitni materijali*, TMF, Beograd, 2015. Strane 504-505

одликују вишеструким понављањем конститутивних јединица у молекулском ланцу и толико су велики да им се својства не мењају значајно ако се у молекулски ланац угради или од њега откине неколико конститутивних јединица.”<sup>12</sup>

Молекулска и надмолекулска структура полимера полимерних материјала има одлучујући утицај на својства, прераду и примену полимера. Молекулска структура обухвата хемијску грађу мономера, начин на који су молекули мономера повезани у макромолекул, моларну масу и расподелу моларних маса макромолекула, облик макромолекула-линеарност, разгранатост, умреженост и конфигурацију полимерних ланаца-стерео изомерија и изомерија. Молекулска структура полимера се не мења променом физичког стања полимера, које може да настане променом температуре или деформацијом под дејством спољних напона. До промене конституције полимера може да дође уколико наступе хемијске промене или деградација, односно уколико дође до кидања ковалентних веза у макромолекулском ланцу.<sup>12</sup>

Под надмолекулском структуром подразумева се паковања макромолекула у просторно издвојене целине различитог степена сређености, облика и распореда у простору.

Полимери се могу класификовати према различитим критеријумима, као што су порекло, хемијски састав мономера и начин њиховог повезивања у макромолекуле, механизам реакције настајања, својства и начин прераде, затим према областима примене итд.

Класификација полимера према карактеристичним својствима и области примене. Према овим критеријумима, полимерни материјали се деле на три основне групе: термопластичне, термоочвршћујуће и еластомере.<sup>12</sup>

Према томе полимер матрице могу бити сврстане у две групе, термопластичне и термоочвршћавајуће (терморективне), обзиром да еластомери због својих карактеристика великих деформација не одговарају примени која је предмет истраживања.



Једна је група термопластичних полимера. Под термопластичним полимерима подразумевају се аморфни и делимично кристални полимерни материјали састављени од линеарних или разгранатих макромолекула; при повишеној температури омекшавају и прелазе у течно стање - растоп. У стању растопа могу се лако, помоћу одговарајућег алата (калупа), обликовати у предмете врло сложених облика јер при хлађењу задржавају добијени облик. Операција топљења и обликовања се може понављати више пута што значи да може бити обликована у сваком тренутку.

Друга је група термоочвршћавајућих полимера. Под термоочвршћујућим полимерима подразумевају се олигомери или смеше мономера, олигомера и полимера које очвршћују за време прераде, при повишеној температури или при дејству светлости. Очвршћавање је последица хемијских реакција, које воде иреверзибилном густом умрежавању реакционе смеше и настајању производа који више не може да се топи и прерадом мења добијени облик.

У групу термопластичних полимера спадају полиетилени, најлон, полифенилен-сулфид, политетрафлуор- етен, полиетеретеркетони и полиамиди, итд.

У групу термоочвршћавајућих полимера спадају фенол-формалдехидне смоле, алкидне и епоксидне смоле и незасићени полиестри.

Карактеристике понашања при изложености матрице температури дефинишу и могућности обликовања и примене композита.

Материјали који су погодни за формирање матрице у композитима према већ наведеном треба да имају хемијске карактеристике које одговарају материјалима влакана, односно, што боље механичке карактеристике по питању преношења сила међу влакнима али и што мању специфичну тежину како би композит био лакши. Материјали који се најчешће користе за израду матрице имају у односу на наведена влакна вишеструко мању запреминску тежину.

Полимери су због својих добрих механичких карактеристика и мале специфичне тежине погодни за употребу у формирању матрица код композита. Невероватан развој полимера је врло интензиван и велики су помаци у истраживањима и примени када су у питању полимери.

Битне карактеристике су хемијска и температурна стабилност, скупљање при производњи или обради, апсорпција влаге.

Три групације полимера као материјала су у најчешћој употреби, и то су:

- Полиестери
- Винил естери
- Епоксиди

Мање заступљени али се такође примењују и

- Полиуретан
- Полипропилен

### **2.3.2.1. Епоксид**

Епоксиди или епокси полимери се најчешће користе као вишекомпонентни раствори код којих мешањем компоненти долази до процеса полимеризације. Полимеризација може да се обавља на собној температури. Овакви полимери имају одличне механичке карактеристике и стабилност, добру отпорност на температуре, отпорност на хемикалије, док су лоше стране знатно већа цена у односу на полиестере и винил естере.

Код примена у архитектури и грађевини можемо споменути и проблем код накнадног обликовања јер је релативно отпоран на температуру па нема начина којим би се привремено допустило обликовање већ то мора бити урађено при самој производњи композитног елемента. Тачније када се примењује температура долази до деструкције матрице а самим тим до даље неупотребљивости елемента.

Има изузетну моћ адхезије и одличне карактеристике када је у питању везивање при наношењу на друге материјале.

Овакав начин апликације у виду вишекомпонентних смола, као и одлична адхезија, одговара радовима који се врше при санацији објеката.

### **2.3.2.2. Винилестер**

Винили или винил естери су слични по хемиској структури епокси полимерима (епоксидима) али их често грешком сврставају у полиестре због обраде која је сличнија полиестерима. Њихове карактеристике су сличније епоксидима. Отпорни су на хемијске утицаје, апсорпцију воде и на скупљање. Јефтинији су од епоксида али и незнатно скупљи од полиестера.

Погодни су за употребу у композитима које уграђујемо у бетонске елементе конструкција.

### **2.3.2.3. Полиестер**

Због ниске цене у односу на већину других полимера и једноставност обраде ова врста полимера је најзаступљенија. Различити полиестери су доступни за употребу а њихове карактеристике варирају знатно у односу на изабрани полиестер.

Типичан представник полиестера је ПЕТ (Polyethylene Terephthalate)

ПЕТ је врло лаган и постојан. Поседује врло добро својство у односу на апсорпцију влаге и гасова.

ПЕТ је могуће ојачати стакленим влакнима. Тачка топљења ПЕТ-а се креће између 250 и 290°C.

Издвојен је и преглед који су најчешће употребљавани полимери у односу на тип влакана тј. материјале од којих су влакна израђена.

Тип влакана за ојачање	Најчешће употребљавани полимери за матрице	Унапређене карактеристике
Стаклена	UP, EP, PA, PC, POM, PP, PBT, PET, PE, VE	чврстоћа, еластичност, отпорност на темп.
Дрвена	PE, PP, ABS, HDPE, PLA	чврстоћа на савијање, модули еластичности при затезању, затезна чврстоћа
Карбон	EP, UP, VE, PA	еластичност, затезна чврстоћа, притисна чврстоћа
Армид	EP, UP, VE, PA	еластичност, затезна чврстоћа, притисна чврстоћа
Неорганска једињења	Semicrystalline Thermoplastics, UP	изотропно скупљање, абразија, притисна чврстоћа

Табела 3. Врсте полимера погодне за употребу према типу влакана<sup>13</sup>

#### 2.4. Примена композита са нарочитим освртом на влакнима ојачану полимер матрицу (Fiber reinforced polymer – FRP)

Развој композита како је већ поменуто почиње пре више хиљада година али у последњих 50 до 70 година поприма значајне размере. Од другог светског рата на овамо појављују се полимери који имају много боље карактеристике и омогућавају много ширу примену. Такође се развија и технологија која омогућава производњу влакана изузетно малих пречника чије се димензије мере у микронима (микрометрима) па чак и нанометрима. Оваква влакна имају велике чврстоће и у спреси великог броја влакана добијамо материјале са изузетним карактеристикама.

<sup>13</sup> G. Erhard, Hanser Gardner Publications, Designing with Plastics, , 2006

Као и код осталих помака и овде војна, аеро и свемирска индустрија и технологија померају границе примене ових материјала. Ово је могуће захваљујући концентрисаним и великим улагањима у истраживања и развој технологије.

Из примене у наведеним сферама ова технологија полако прелази у свакодневну употребу па сада композитне материјале можемо видети у свакодневном животу и употреби. Од делова аутомобила, чамаца, санитарнија, намештаја, у протетским помагалима, рачунарским компонентима и кућиштима, преко реквизита у екстремним спортовима, у елементима боличких соба, операционим салама, итд.

Крајем шездесетих и почетком седамдесетих година прошлог века композити се појављују и као арматура бетонских конструкција. Шипке композита у виду матрице ојачане полимерима појављују се тек крајем седамдесетих и почетком осамдесетих година прошлог века.

Примећено је да примена челичне арматуре у конструкцијама које су изложене факторима као што су влага, нагризање сољу и слично изискује огромне трошкове одржавања конструкција. Како стоји у извештају „ASCE” из 2005. године готово 40% мостова у САД-у је оштећено наведеним утицајима на конструкцију.

На основу овога се рецимо у САД-у и Канади озбиљно почела разматрати могућност употребе полимера ојачаних влакнима. Осамдесетих су почела истраживања и испитивања а паралелно се то дешавало и у Јапану и Европи.

Овако нагло успињање полимера а тиме и композита мора бити подржано великим напорима да се примена дефинише кроз постављену регулативу и динамично условљава њено генерисање и израду. Ово се у највећој мери проверава и испитује експерименталним путем па се још скреће пажња да је заступљеност научно-истраживачког сектора овде изузетно велика.

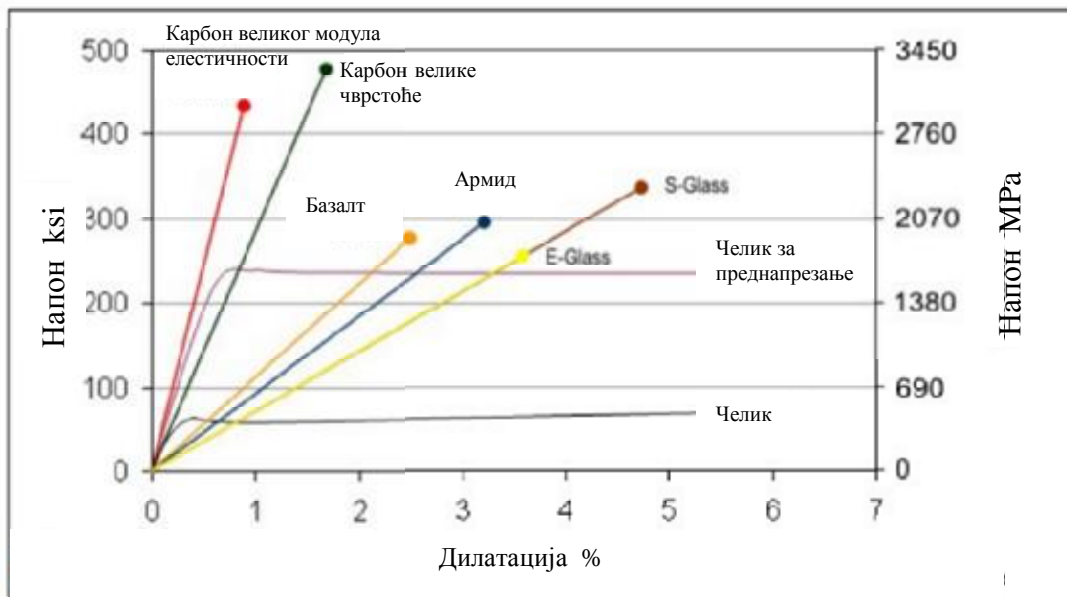
Преглед добрих и лоших особина може да нам помогне у разумевању начина употребе и сагледавању области примене.

Предности композита од полимера ојачаних влакнима	Мане композита од полимера ојачаних влакнима
Висока подужна затезна чврстоћа	не постоји велико издужење тј. пластична деформација
Отпорност на корозију	Мала смичућа чврстоћа
Неосетљиви на магнетно поље	Мали модул еластичности (зависи од влакана)
Висока отпорност на замор (зависи од врсте влакана)	Осетљивост матрице на ултраљубичасто зрачење
Мала специфична тежина	Лоша отпорност неких композита са стакленим влакнима и армидним влакнима на алкане средине
Изолатори (електро и топлотни)	Висок коефицијент температурног ширења управно на правац влакана
	Осетљивост на пожар (високе температуре) и по том питању зависи од врсте матрице и заштитног слоја бетона

Табела 4. Предности и мане композитних материјала од полимера ојачаних влакнима

Назив произвођача	Затезна чврстоћа (МПа)	Модул еластичности (GPa)	Дилатација (%)
<b>КОМПОЗИТ СА КАРБОНСКИМ ВЛАКНИМА</b>			
V-ROD	1596	120	1,3
Aslan	2068	124	1,7
Leadline	2250	147	1,5
NEFMAC	1200	100	1,2
<b>КОМПОЗИТ СА СТАКЛЕНИМ ВЛАКНИМА</b>			
V-ROD	710	46,4	1,5
Aslan	690	40,8	1,7
NEFMAC	600	30	2

Табела 5. Предности и мане композитних материјала од полимера ојачаних влакнима<sup>2</sup>



Слика 7. Поређење карактеристика челичне армирање и композитне армирање према типу влакана <sup>14</sup>

На слици 7. је графички приказ дијаграма напон-дилатација за већину композитних армирањих шипки од полимера ојачаних влакнима преклопљених са дијаграмима напон-дилатација у челичној армирању. А на основу овог дијаграма можемо уочити да сви композити од полимера ојачаних влакнима имају мањи модул еластичности од челика, осим композита од карбона са великим модулом еластичности, а што се види из нагиба дијаграма у делу за који вађу Хуков закон.

<sup>14</sup> <http://www.build-on-prince.com/frp-reinforcement.html#sthash.nNJlewVI.he5gqpvI.dpbs>

### 3. УПОТРЕБА РЕЦИКЛИРАНИХ МАТЕРИЈАЛА У ПРОИЗВОДЊИ КОМПОЗИТА

Зашто рециклирати? Зато што рециклирање чува сировине, енергију, штити животну средину и смањује гомилање отпада на депонијама и ван њих. Зато што се количина отпада гомила изузетно брзо па се брзо мора и реаговати. Што пре усавршимо начине рециклаже и поновне употребе материјала мање ћемо нашкодити природи и лакше успрети да спречимо негативне ефекте потрошачке производње коју смо успоставили. Зато што је друштвено, економски и морално одговорно.

Рециклажа је процес употребе отпада као материјала у поновној (новој) производњи. То подразумева коришћење материјала, којима је завршен век употребе, у прављењу нових производа или као извора енергије.

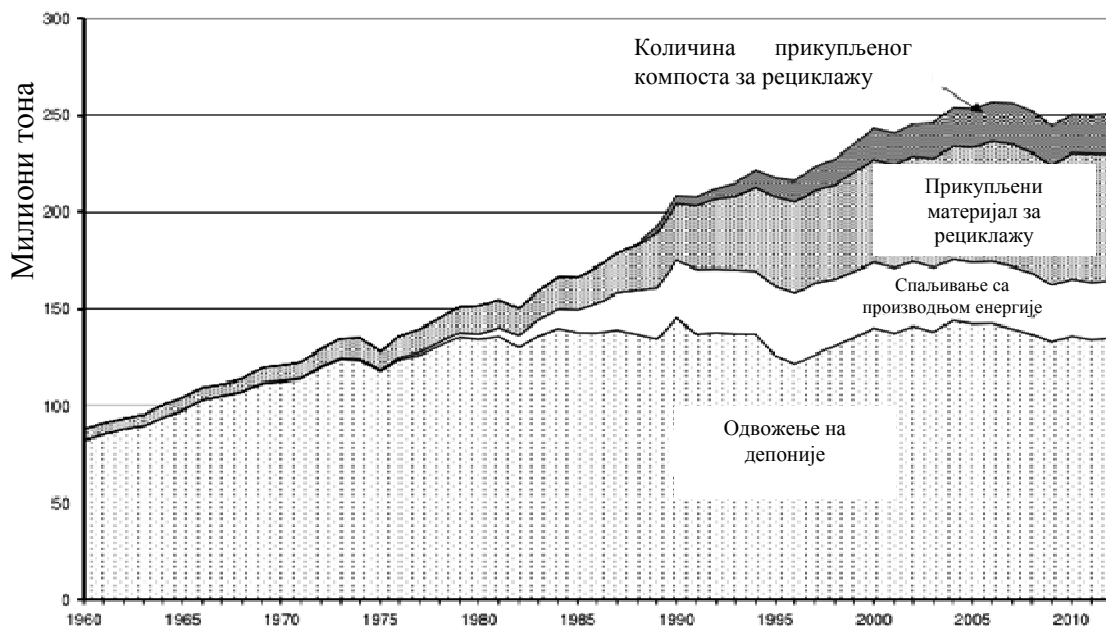
Постоји више начина тј. врста рециклаже. Најчешће се мисли на поновну хемијску обраду материјала којом се материјал доводи у стање које задовољава поновну употребу. Такође можемо мислити и на механичку или термичку зарад поновне употребе материјала који се рециклира. Може бити и мешовита. Свакако рециклажа је свако враћање нечега коришћеног и одбаченог или непотребног у поновну употребу. Поновно пуштање у циклус експлоатације.

Поправљање стандарда живљења за последицу има да се повећава куповна моћ, са њом и куповина а то значи и више отпада. Такође константан раст светске популације значи и повећање количине отпада. Нови трендови живљења додатно доприносе повећању количине отпада (слика 8).<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> [www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2012\\_msw\\_dat\\_tbls.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2012_msw_dat_tbls.pdf)





Слика 8. Управљање чврстим комуналним отпадом, вредности у милионима тона за период од 1960 до 2012 године <sup>14</sup>

Рециклажа подразумева поновно коришћење ресурса који су прошли фазу употребе. Овим смањујемо загађивање околине како опасним хемиским једињењима тако и чврстим отпадом па и гасовима који доприносе ефекту стаклене баште. Спречавамо деградацију и уништавање природних станишта, глобално загревање, итд. Рециклажа смањује потрошњу енергената и сировина а тиме омогућава и смањивање употребе сировина у виду нафте, угља, гаса, итд.

Смањује се и потреба за дрветом што доводи до очувања шума. Све наведено доприноси укупном стању животне околине, флоре и фауне па и побољшању (стицању) услова за нормалан и здрав живот људи.

Треба се још једном осврнути на финансијске ефекте рециклаже јер капитал одлично сагледава ту категорију и само уколико препозна повољне факторе испуњени су услови за увођење наведене праксе. А управо услови се препознају у виду смањења цене производње, смањења количине сировина потребних за производњу и ниже цене рециклираног материјала у односу на материјал из примарне производње.

У Србији локалне самоуправе и јавна предузећа која се баве комуналним отпадом покушавају да уведу праксу прикупљања отпада са селекционим одвајањем по врстама отпада погодним за рециклажу. У односу на западне развијене земље Србија доста заостаје у погледу рециклаже. Заостаје и свест грађана по питању важности рециклаже за добробит друштва и природе.

Рециклажа је у највећој мери сведена на сакупљаче секундарних сировина. Ово је у доброј мери стихијско решење које се појавило само од себе а по највише као последица лошег социјалног стања одређених социјалних група.

Може се још приметити да сировине које имају нижу цену по јединици мере најчешће имају и мањи удео у прикупљеној количини отпада за рециклажу.

	РЕПУБЛИКА СРБИЈА <sup>1</sup>		
	2007	2008	2009
<b>Индустријски производи од рециклираног отпада у тонама</b>			
Од гвожђа и нелегираног челика	261115	205954	307852
Од легираног челика	-	-	83
Од бакра и легура бакра	1991	2996	1056
Од алуминијума и легура алуминијума	3660	1882	1789
Од цинка и легура цинка	544	488	52
Од олова и легура олова	1273	929	144
Од осталих метала	650	-	10
Од папира	42667	50167	36344
Од текстила	1	-	-
Од гуме	609	93	1456
Од пластичних маса	249	413	306
Од уља и мазива	-	-	3
Од дрвета	360	403	282
Извор података: Републички завод за статистику			
<sup>1</sup> Од 1999. без података за АП Косово и Метохија			

Табела 6. Подаци Завода за статистику Р.Србије <sup>16</sup>

<sup>16</sup> <http://webrzs.stat.gov.rs/WebSite/Public/PageView.aspx?pKey=2>

Добро је да постоји воља на нивоу локалних самоуправа. Неке локалне самоуправе ово препознају због проблема који се јављају на терену као што је недостатак простора за одлагање, појава дивљих депонија, појава већег загађења у природним стаништима на њиховим територијама и слично.

Ова воља уз додатну стимулацију од стране државе и ЕУ почиње давати позитивне резултате али се на томе још мора радити. Повољно је и што мања цена радне снаге у овом трнутку може делимично заменити овакав неодговарајући однос грађана према рециклажи отпада који продукују. Ова слика се још може поправити додатним ангажовањем државе у виду доношења прописа и државних органа који те прописе требају спровести у дело путем адекватне контроле.

### **3.1. Анализа података о материјалима, количинама и начинима рециклаже**

Овде треба издвојити неке од материјала који се користе за производњу влакана и матрица за већ поменуте композите. Сагледано је које су разлике у квалитету материјала из примарне производње и рециклираног материјала.

У предходном делу рада већ је напоменуто да су за комерцијалну употребу погодна стаклена, карбонска, армидна и полиестер влакна док остала можемо сврстати у погодна за употребу у специјалним случајевима.

Већа потрошња може оправдати финансије и организацију која мора бити уложена па ће из ових разлога фокус бити на наведеним комерцијалним материјалима, анализу података о овим материјалима и њихових особина везаних за процес рециклаже.

#### **3.1.1. Стакло**

Стакло има добар удео у количини укупног отпада који се генерише те је рециклирање овог ресурса значајно како би се смањило загађење и таложње отпада. Стакло из отпада се може поново употребљавати и погодно је за даљу производњу. Од њега се може правити читава палета производа, преко чаша,

флаша, и сличних предмета за кућну употребу па до стаклених влакана за употребу у индустрији и грађевини.

До сада су већ развијени начини прикупљања стаклених отпадака по већ поменутом систему селекције како од стране оних који се баве прикупљањем тако и од стране оних који отпад одлажу.

У овако организованом процесу прикупљања може се приступити и раздвајању по одређеним карактеристикама стаклених отпадака као што хемијски састав, боја, могућност даље прераде и слично.



Слика 9. Преоцес рециклаже стаклене амбалаже <sup>17</sup>

Предности рециклаже стакла како се наводи организација WWF (WORLD'S WILD LIFE) <sup>18</sup> огледа се у:

- уштеди енергије а у односу на производњу стакла из сировина.  
Ломљено (рециклирано) стакло се топи на мањим температурама па се тиме смањује количина употребљене енергије.

<sup>17</sup> <http://www.gpi.org/recycling/glass-recycling-facts>

<sup>18</sup> [http://wwf.panda.org/about\\_our\\_earth/teacher\\_resources/project\\_ideas/recycling\\_glass/](http://wwf.panda.org/about_our_earth/teacher_resources/project_ideas/recycling_glass/)

- Смањењу загађења ваздуха у току процеса за 20% и повезаног загађења воде за 50%
- Смањењу отпада које се одлаже и таложи на депонијама

Стакло је идеалан материјал за рециклажу обзиром да не долази до деградације карактеристика материјала у току експлоатације при нормалној употреби. Ово се може видети и у подацима које даје ГПИ (GLASS PACKAGING INSTITUTE – GPI-Glass Container Association of America).

Осим што се може рециклирати са 100% искоришћености прикупљеног материјала и што не деградира у процесу коришћења и рециклаже ГПИ предочава следеће предности везане за рециклажу стакла.<sup>19</sup>

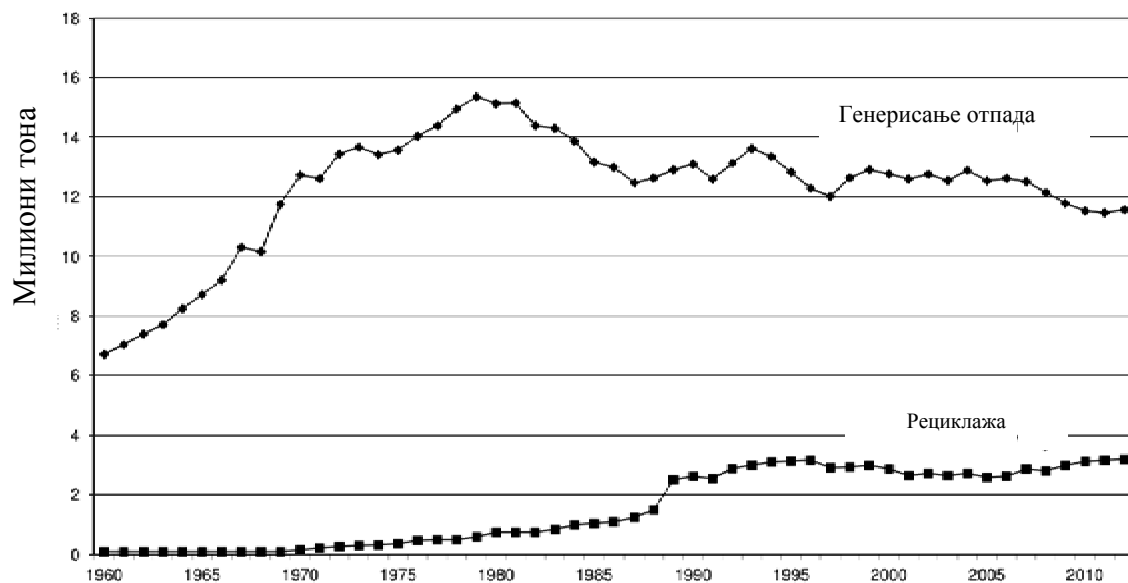
- Рециклирано стакло може заменити до 95% сировине које се користе у процесу производње
- Корист произвођеча се огледа у: Смањењу емисије штетних супстанци и количини употребљених сировина, продужењу века трајања опреме за производњу (нпр. пећи за топљење) и уштеди енергије
- Рециклирано стакло увек има удео у састојцима који се користе при производњи. Што је већи удео то је мања потрошња енергије за топљење у пећима. Ово чини рециклирање стакла исплативо на дуге стазе, смањује цену производње и повољно утиче на очување животне средине.
- Више од тоне сировина (1,2 тоне) се сачува употребом 1 тоне рециклираног стакла
- За сваких 10% рециклираног стакла употребљеног у производњи потрошња енергије се смањи за 2-3%.

<sup>19</sup> <http://www.gpi.org/recycling/glass-recycling-facts>

- На сваких шест тона рециклираног стакла употребљеног у процесу производње емисија угљен диоксида се смањи за једну тону
- Рециклажа 1000 тона стакла генерише преко 8 радних места

Постоји део стакла који доспе у рециклажу а не може се употребити за поновну производњу и који се због удела контаминације материјала честицама прљавштине или слично користи за филтере, пескирање, као агрегет у бетонским елементима поплочања или неке друге сврхе.

Велика Британија тренутно рециклира око 34% амбалажног стакла. У односу на Швајцарску и Финску које рециклирају и до 90% амбалажног стакла то је мали проценат.<sup>20</sup> Сједињене Америчке Државе такође рециклирају око 35% стакла.



Слика 10. Генерисање стакленог отпада и рециклажа у преиоду од 1960 до 2012 године<sup>21</sup>

<sup>20</sup> <https://dl.dropboxusercontent.com/u/21130258/resources/InformationSheets/Glass.htm>

<sup>21</sup> [www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2012\\_msw\\_dat\\_tbls.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2012_msw_dat_tbls.pdf), Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States Tables and Figures for 2012 U.S. EPA Office of Resource Conservation and Recovery February 2014 - U.S. Environmental Protection Agency EPA

### 3.1.2. Карбон

Карбон који се најчешће добија из нафте и гаса има одличне карактеристике у погледу еластичности и чврстоће. Може се добијати рециклажом на више различитих начина.

Рециклажа композита којима је истекао рок употребе, најчешће због својстава матрице или због разних механичких оштећења, а у које су уграђена карбонска влакна, своди се на резање ових композита на ситније делове и термичку обраду ради уклањања материјала који чини матрицу. На овај начин производе се кратка влакна за која је потребно развијати начине примене и производње када је у питању употреба у композитима са усмереним влакнима.

Рециклажа искоришћених хемиских деривата нафте и рециклажа отпада органеске индустрије типа агро или шумарке индустрије може послужити да се произведу континуална карбонска влакна од рециклираног карбона из наведених извора. Што се може посматрати кроз неке од примера истраживања, употребе и начина рециклаже.

У чланку „Recycled carbon fiber update: Closing the CFRP lifecycle loop“ часописа Свет композита (CompositesWorld) изнети су подаци у којима је приказано да рециклирана карбонска влакна (RCF) пружају смањење цене у опсегу од 30 до 40 % у односу на карбонска влакна од материјала из примарне производње (VCF). Такође се износе подаци о квалитету материјала након рециклаже па видимо да рециклирана карбонска влакна (RCF) имају такорећи исте карактеристике као карбонска влакна од материјала из примарне производње (VCF), и та чврстоћа не пада испод 80% у односу на (VCF). С тим што је највећи утицај има тренутни начин рециклаже који подразумева да се композити из којих се влакна рециклирају сецају на комадиће што даље подразумева да су и рециклирана влакна кратка.<sup>22</sup>

---

<sup>22</sup> Ginger Gardiner, Source: Composites Technology, <http://www.compositesworld.com/articles/recycled-carbon-fiber-update-closing-the-cfrp-lifecycle-loop>

Научници Империялног колеџа у Лондону (Imperial College London) и Универзитета Нотингем у Нотингему (The University of Nottingham's , Nottingham, U.K.) су успели да направе композитне плоче са усмереним рециклираним влакнима (RCF) у епокси матрици са 44% влакана које имају модул еластичности од 80 GPa и затезну чврстоћу од 422 MPa.<sup>21</sup>

Овакви резултати дају оправдање развијању метода употребе рециклираних карбонских влакна (RCF).

Још један вид рециклаже карбона можемо видети У Уједињеним америчким државама на примеру финансирања производње карбонских влакана високих перформанси из обновљивих извора као што је отпад агро и шумарске производње а од стране Департмана за енергију САД (US Department of Energy - DOE) у висини од 12 милиона долара. Оваква карбонска влакна произведена из биомасе би требало да буду јефтинија и једноставнија за производњу. А бенефити за очување животне средине требало би да буду много већи у односу на производњу карбонских влакана класичним методама из гаса и нафте.<sup>23</sup>

У студији „Isothermal Crystallization Kinetics, Morphology, and Mechanical Properties of Biocomposites Based on Poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) and Recycled Carbon Fiber“ можемо видети да рециклирани карбон који је коришћен у истраживању стиже у виду влакана дужине од преко 300 mm који се добија термооксидационом декомпозицијом композита на температури од 550°C како би се издвојила влакна од матрице.<sup>24</sup>

---

<sup>23</sup> <http://bioplasticsnews.com/2014/02/17/carbon-fiber-from-biomass/>

<sup>24</sup> Isothermal Crystallization Kinetics, Morphology, and Mechanical Properties of Biocomposites Based on Poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) and Recycled Carbon Fiber, [https://www.researchgate.net/publication/263943429\\_Isothermal\\_Crystallization\\_Kinetics\\_Morphology\\_and\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Biocomposites\\_Based\\_on\\_Poly3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate\\_and\\_Recycled\\_Carbon\\_Fiber](https://www.researchgate.net/publication/263943429_Isothermal_Crystallization_Kinetics_Morphology_and_Mechanical_Properties_of_Biocomposites_Based_on_Poly3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate_and_Recycled_Carbon_Fiber)



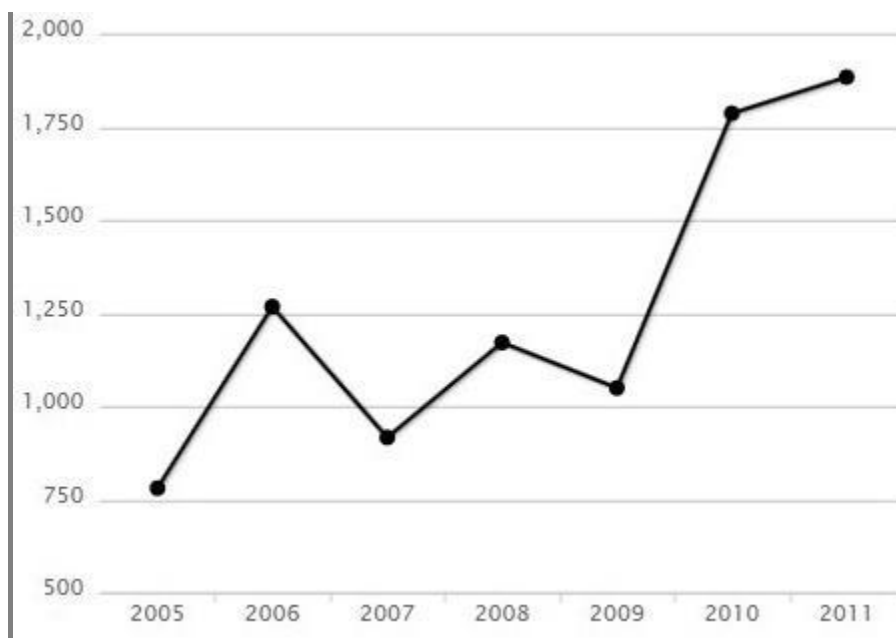
### 3.1.3. Армид

Армид је материјал који се најчешће користи у производњи прслука за заштиту од оружаних пројектила, заштитне опреме као што су рукавице и слично, такође, има примену при производњи оптичких и других каблова, итд. Овај материјал може се посматрати по питању рециклаже слично као и карбон. Најчешће се прикупљен одбачен материјал сече на ситније делове и тако распреда у кратка влакна.

Наравно и рециклажа овог материјала смањује емисију штетних гасова, мање загађења воде која се употребљава у процесу производње и слично.

Смањење емисије угљен диоксида иде и до 50% у односу на примарну производњу.

Подаци фирме „Teijin Aramid“ показују да се количина рециклираног армида повећава из године у годину. Ова фирма такође развија рециклажу која треба да обезбеди континуална влакна.<sup>25</sup>



Слика 11. Количина материјала који су доступни за рециклажу у тонама у периоду од 2005. до 2011. године<sup>25</sup>

<sup>25</sup> <http://www.tejinaramid.com/recycling/>

### 3.1.4. ПЕТ (Polyethylene Terephthalate)

Разлика између ПЕТ-а из примарне производње и рециклираног ПЕТ-а употребљеног у производњи различитих елемената визуелно је неприметна. Ову разлику је могуће детектовати тек на испитивањима и то са малим одступањима због учећа малог процента нечистоћа и поновног подвргавања термичкој обради материјала. Одступања се још јављају услед деградације материјала услед деловања сунчевих зрака и температуре.

Насупрот овим одступањима уштеда и утицај на очување животне средине су огромни. Рециклирањем ПЕТ-а постиже се уштеда енергије је 70% у односу на производњу нове сировине.<sup>26</sup> Бенефит рециклирања се не огледа само у уштеди енергије и избегавању негативног утицаја који производња те потребне енергије има на животну средину већ и у враћању ПЕТ отпада који би завршио као загађивач у процес производње, а тиме и одстрањивање тог отпада из природног окружења. Оваква употреба рециклираног ПЕТ материјала захтева и око 70% мање емисије сумпор диоксида и скоро 90% мање употребе воде у процесу.<sup>27</sup>

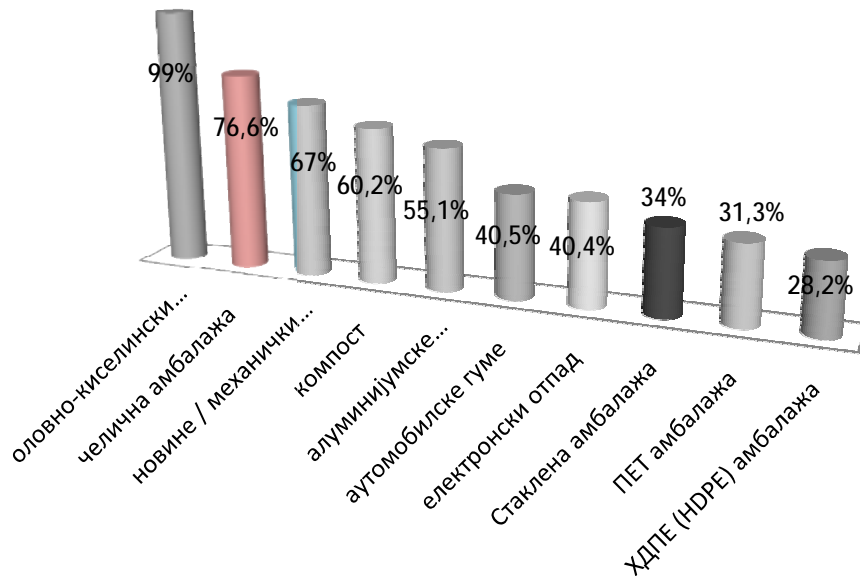
Према Америчкој Агенцији за заштиту животне средине ЕПИ (U.S. Environmental Protection Agency - EPA) неке од карактеристика ПЕТ-а су<sup>28</sup>:

- ПЕТ-у је потребно између 100 и 400 година да се распадне на депонији или у природном окружењу
- Од пет дволитаских флаша може да се произведе довољно влакана од којих се може направити једна скијашка јакна.
- Енергијом која се уштеди рециклажом једне флаше може се напајати компјутер у трајању од 25 минута.
- Рециклажом десет тона ПЕТ-а смањи се емисија гасова одговорних за ефекат стаклене баште у количини коју произведу три аутомобила за годину дана.

<sup>26</sup> "The price of virtue", The Economist, Jun 7, 2007.

<sup>27</sup> <http://www3.epa.gov/epawaste/education/pdfs/toolkit/tools-m.pdf>

<sup>28</sup> [www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/)

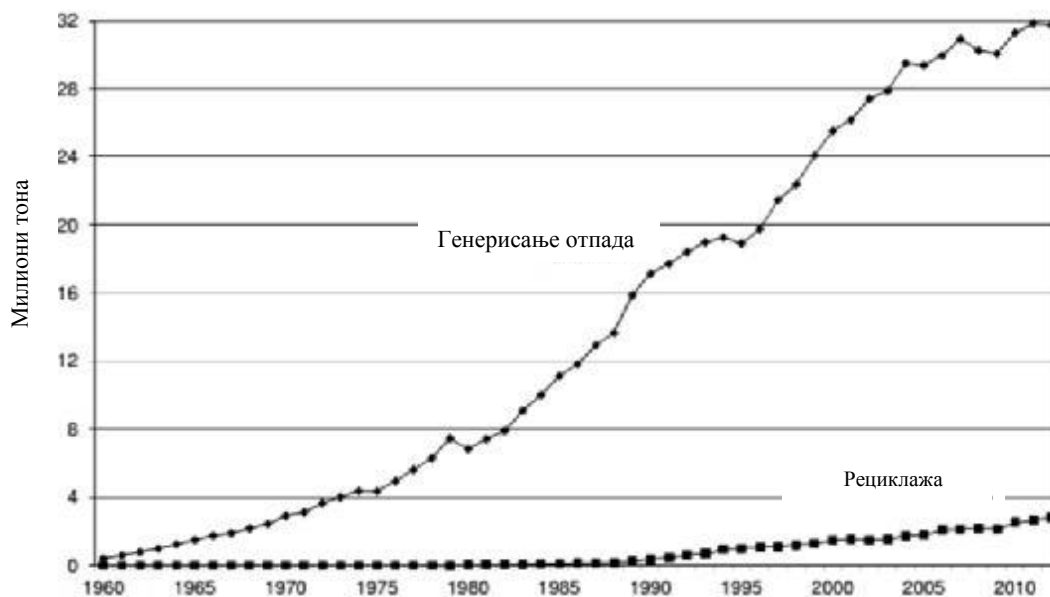


Слика 12. Процентулна количина рециклираних сировина у 2013 у САД-у<sup>29</sup>

Материјал	Рециклирано (у милионима тона)	Гасови који изазивају ефекат стаклене баште а који су елиминисани услед рециклаже	Број аутомобила који би произвео наведену количину гасова који изазивају ефекат стаклене баште у милионима
<b>папир и картон</b>	43	149	31
<b>стакло</b>	3,2	1	0,21
<b>метали</b>			
челик	5,8	9,5	2
алуминијум	0,7	6,4	1,3
остали метали	1,37	5,9	1,2
<b>укупно метали</b>	<b>7,87</b>	<b>21,8</b>	<b>4,5</b>
<b>пластика</b>	<b>3</b>	<b>3,6</b>	<b>0,76</b>
<b>гума и кожа</b>	<b>1,24</b>	<b>0,6</b>	<b>0,127</b>
<b>текстил</b>	<b>2,3</b>	<b>5,8</b>	<b>1,2</b>
<b>дрво</b>	<b>2,47</b>	<b>3,8</b>	<b>0,789</b>
<b>остали отпад</b>			
храна и друго	1,84	1,7	0,308
компост	20,6	1,04	0,22
* Укључен је отпад из резиденцијалних, комерцијалних и индустријских извора			

Табела 7. Бенефити у виду смањења емисије гасова који изазивају ефекат стаклене баште<sup>30</sup>

<sup>29</sup> Advancing Sustainable Materials Management: 2013 Fact Sheet Assessing Trends in Material Generation, Recycling and Disposal in the United States Jun 2015  
[www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013\\_advncng\\_sm\\_fs.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013_advncng_sm_fs.pdf)



Слика 13. Генерисање пластичног отпада и рециклажа у периоду од 1960 до 2012 године <sup>20</sup>

### 3.2. Разлози због којих је материјал из рециклаже погодан за производњу влакана и матрице код композитних материјала

Добре стране материјала из рециклаже смо набројали у предходном поглављу. Оне подразумевају поновну употребу материјала који је завршио свој експлоатациони циклус и треба да се одложи или уништи, смањивање трошкова како одлагања тако и производње нових количина и утрошка нових сировина за производњу, смањење штетних утицаја на животну средину у виду емисије гасова који узрокују ефекат стаклене баште, загађења воде, утрошка енергије и енергената, расипање отпада по природним стаништима и угрожавање природног окружења, као и могућност коришћења ових материјала са незнатно редукованим конструктивним карактеристикама.

Као негативне стране можемо поменути баш то смањење конструктивних карактеристика и то јесте један од предмета даљих истраживања.

<sup>30</sup> [www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013\\_advncng\\_sm\\_fs.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013_advncng_sm_fs.pdf)

### 3.3. Позитивне и негативне стране употребе рециклираних материјала

Позитивне стране се могу констатовати у поређењу са стандардним материјалима као што су нпр. челици за армирање бетонских конструкција јер и са овако незнатно редукованим особинама задржавају карактеристике које им дају предност.

Из табеле 4. која је приказана у раду, може се видети да имамо приближно једнак број предности и мана, а то само указује на правце даљег развоја и истраживања како би се мане елиминисале а предности искористиле.

Предности су висока подужна затезна чврстоћа, отпорност на корозију, неосетљивост на магнетно поље, висока отпорност на замор (зависи од врсте влакана и може бити и предност и недостатак), мала специфична тежина и особина да су великом већином изолатори (електро и топлотни).

На пример неки од наведених композита имају и много боље модуле еластичности који у односу на челик чији је модул 200GPa, иду и до 400 GPa што је случај код рециклираног карбона.

Мане су што не постоји пластична деформација тј. материјали доживљавају крти лом, мала чврстоћа на смицање, мали модул еластичности (зависи од влакана па тако када су у питању карбонска влакна ово не може бити дефинисано као мана), осетљивост матрице на ултраљубичасто зрачење (ово важи за већину полимер матрица), лоша отпорност неких композита са стакленим влакнима и армидним влакнима на алкане средине (ово зависи и од матрице у којој се влакна налазе), висок коефицијент температурног ширења управно на правац влакана, осетљивост на пожар (високе температуре) и по том питању зависи од врсте матрице и заштитног слоја бетона.

## II – ФОРМИРАЊЕ КОНТРУКТИВИХ ЕЛЕМЕНАТА

### 4. ФОРМИРАЊЕ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНАТА АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА УПОТРЕБОМ КОМПОЗИТА КОЈИ САДРЖЕ РЕЦИКЛИРАНЕ МАТЕРИЈАЛЕ

Као увод даје се хронолошки историјски развој документације која се бави употребом полимера ојачаних влакнима за армирање бетона према<sup>31</sup>:

- Прве употребе као арматуре у бетону се сматрају седамдесете године двадесетог века.  
**1996.**
- Европски комитет за бетон (EUROCRETE) издаје прво упутство за употребу полимера ојачаних влакнима за армирање бетона  
**1997.**
- Јапанско друштво грађевинских инењера (JSCE) издаје сет упутстава за употребу полимера ојачаних влакнима за армирање бетона  
**1999.**
- Шведска издаје национални правилник за употребу полимера ојачаних влакнима за армирање бетона  
**2000.**
- Канадска асоцијација за стандардизацију (CSA) издаје први правилник за употребу бетона армираног полимером ојачаног влакнима за израду мостова тј. мостовских конструкција. (CAN/CSA 56-00)  
**2001.**
- Канадска мрежа центара изврности (ISIS CANADA RESEARCH NETWORK) издаје упутство за употребу полимера ојачаних влакнима за армирање бетона
- Амерички институт за бетон (ACI) Комитет 440 издаје прву верзију правилника за употребу полимера ојачаних влакнима у армираом бетону (440 IR)

---

<sup>31</sup> PH.D. THESIS - LIMIT STATES DESIGN of CONCRETE STRUCTURES REINFORCED with FRP BARS, Rafaelo Fico

### **2002.**

- Канадска асоцијација за стандардизацију (CSA) издаје препоруке за пројектовање објеката од бетонских елемената армираних полимером ојачаног влакнима (CAN/CSA S806-02)
- Холандски (CUR Building & Infrastructure) издаје сет препорука за пројектовање објеката од бетонских елемената армираних полимером ојачаног влакнима

### **2003.**

- Амерички институт за бетон (ACI) Комитет 440 издаје другу верзију правилника за употребу полимера ојачаних влакнима у армираном бетону (440 IR)

### **2006.**

- Национални савет за истраживање (Италија) (CNR) објављује препоруке за употребу полимера ојачаних влакнима у армираном бетону (CNR-DT-203/2006)
- Амерички институт за бетон (ACI) Комитет 440 издаје трећу верзију правилника за употребу полимера ојачаних влакнима у армираном бетону (440 IR)

Поред наведеног треба додати да Европа има правилник који регулише ову област и он је мењан од 1996. до данас више пута, а такође да је међу првима издала правилник и препознала потребу да се ова област регулише али и укључи у употребу. Осим тога неке европске земље као што је Велика Британија, Италија, Норвешка, Холандија имају своје засебне правилнике који додатно дефинишу ову област.

Правилници су у највећој мери базирани на правилницима који важе за армирање бетонских елемената челиком тако да се може успоставити паралела са устаљеном праксом и да се даље могу извући одређени закључци и поређења.

#### **4.1. Преглед постојеће регулативе која регулише примену композитних материјала (полимер матрице ојачане влакнима)**

Легислатива која уређује област коришћења композита начињених од полимер матрице ојачане влакнима у садејству са бетоном углавном је заснована на модификацији оне регулативе која је намењена бетонским конструкцијама армираним челичном арматуром. Ова регулатива се најчешће базира на граничним стањима, изменама према особинама ових композита и резултатима експерименталних истраживања бетонских конструктивних елемената армираних оваквим материјалима.

Код одређивања количине композитног арматуре треба узети у обзир велике чврстоће на затезање и најчешће мали модул еластичности (осим за неке високовредне карбоне). Однос напона и еластичности је много већи код полимер матрица ојачаних влакнима и та особина знатно утиче на расподелу напрезања у елементу тј. по пресеку елемента конструкције у који је композитна арматура уграђена. Ово значи да је за услове који одговарају челичној арматури при употреби полимера ојачаних влакнима исте површине попречног пресека неутрална оса померена ближе притиснутој ивици пресека. А ово даље значи да је већа површина укупног попречног пресека изложена затезању а да је притиснута површина пресека изложена већем притиску по јединици површине. Одавде можемо констатовати на основу наведеног да је за исти пресек и површину арматуре евидентно измењен дијаграм угиба па је и мања отпорност елемента на смицање.

Такође можемо запазити да постоје два приступа прорачуну конструктивних елемената армираних композитима у виду матрице полимера ојачане влакнима.

Један упоређује номиналне вредности напона у композиту (уз коефицијент сигурности) са стварним оптерећењем (ово одговара стандардима који важе у САД) а други је упоређивање критичних вредности карактеристичних напона за композит и упоређивање са критичним оптерећењем (ово одговара Еурокод



стандардима). Другим речима фактор умањења номиналних вредности напона из америчких стандарда по својој природи одговара фактору увећања оптерећења према европским стандардима. Добијене вредности, наравно у зависности од важећих усвојених фактора сигурности, приближно су једнаке па се могу упоређивати.

Код овако армираних елемената конструкције као и код армирања челиком постоје три типа лома при чистом савијању која се могу десити у пресеку.

Први је лом по бетону, други балансирани по бетону и арматури и трећи по арматури. Тачније лом по бетону ће се десити уколико је проценат армирања који је усвојен већи од процента који је потребан за балансирани лом и обратно уколико је мањи доћи ће до лома по арматури.

Значи да је потребно да се према максималном очекиваном оптерећењу одреди количина арматуре тј. проценат армирања која обезбеђује балансирани или истовремени лом по бетону и по арматури што обезбеђује максимално искоришћење оба материјала па се затим одредити у коју зону лома желимо да поставимо пресек.

Овде још треба напоменути да је потребно обратити пажњу на непостојање напона великих издужења код композита већ долзи до моменталног лома композита, а ово даље значи да само уколико се деси лом по бетону овај лом можемо сматрати ломом који у некој мери одговара дуктилном.

#### **4.1.1. Легислатива према правилницима у иностранству (преглед)**

##### **САД**

Важећи стандарди у САД-у дати су од стране Америчког института за бетон (ACI) „Design guidelines for structural concrete reinforced with FRP Bars“ ACI 440.1R-06, 2006. Овај правилник начињен је на основу резултата екперименталних истраживања и као што је већ наведено ослања се на правилник о употреби челичне арматуре при армирању бетонских пресека (ACI 318-02, 2002)

Овај стандард се заснива на ставу да је због кртог лома могуће одредити се за већ наведене ломове по бетону или по арматури и тиме контролисати понашање елемента при прекорачењу носивости. Оба начина су прихватљива уколико се обезбеди несметана експлоатација конструкције.

Недостатак дуктилности може се умањити усвајањем већих фактора тј. коефицијената сигурности него при армирању челичном арматуром.

У „Reinforced Concrete Design with FRP Composites“ By Hota V.S. GangaRao, Narendra Taly, P. V. Vijay издање из 2006. године каже се да правилник ACI 318-02, 2002 тежи да се задовољи адекватна дуктилност па се из тог разлога у правилнику ACI 440.1R-06 за композите скреће пажња да је ломом по бетону могуће обезбедити сигурност која донекле одговара дуктилности а у виду резерве као неке врсте пластичне деформације коју елемент доживљава.<sup>32</sup>

Овај правилник је за смицање усвојио коефицијенте сигурности који важе за челичну арматуру а за савијање су дефинисани нови коефицијенти сигурности карактеристичних вредности у зависности од типа лома.

Такође су дефинисани и коефицијенти сигурности услед утицаја средине у којој се елементи налазе а који директно утичу на напон затезања услед дуготрајних утицаја при експлоатацији конструктивних елемената.

Правилник даје ограничења по питању ограничења при напрезању, издужења, величина дозвољених прслина и слично. Напомиње се и да се конструктивни елементи подвргнути напонима савијања морају пројектовати тако да дилатације, па тиме и угиби буду ограничени. Ово се постиже одређивањем адекватне крутости пресека.

Дефинисана су и различита ограничења која важе за различите типове композита и различите материјале од којих су направљени (vlakна и матрице).

---

<sup>32</sup> Hota V.S. GangaRao, Narendra Taly, P. V. Vijay, Reinforced Concrete Design with FRP Composites“, 2006.

## ЕВРОПСКА УНИЈА

Правилници који важе на територији Европске уније варирају али овде ћемо поменути правилник Велике Британије (BS8110, 1997) и Еурокоде (ENV 1992-1-1, 1992). Правилници садрже коефицијенте сигурности за материјале и за крутост који узимају у обзир краткотрајно и дуготрајно оптерећење. Ови правилници су у великој мери на страни сигурности јер узимају знатно веће коефицијенте сигурности у поређењу са осталим наведеним правилницима. Такође ови правилници не праве разлику према врсти лома у бетонском елементу армираном композитном арматуром.

Ово рецимо није случај са италијанским правилником (CNR-DT 203/2006) који, јер је знатно новији, ипак узима у обзир научне доприносе који су од деведесетих година дали значајне помаке у области употребе композита за армирање бетонских конструкција, као и правилнике неких других држава као што су Јапан, САД и Канада. Овај правилник као пожељан лом дефинише лом по бетону због делимичне компензације дуктилности.

## ЈАПАН

Јапанско удружење грађевинских инжењера (JSCE) издало је правилник 1997. године који је такође модификована верзија правилника за примену челичне арматуре у бетонским конструкцијама. Овај правилник узима у обзир факторе сигурности и за материјал и за оптерећење. Ови фактори су нешто већи него код челика. Узима се у обзир врста лома али се не може закључити коју врсту лома фаворизују ови фактори сигурности јер се не наводи конкретно који је лом најпожељнији.

Овај правилник такође даје карактеризацију и вредности за различите композите зависно од материјала који се комбинују при формирању композита.

## РУСИЈА

У Руској Федерацији важећи правилник је издат 2012. године (ГОСТ 31938-2012) и он узима у обзир само карактеристике композита и не даје јасне одреднице о начину комбиновања ове композитне арматуре и бетона у бетонским конструкцијама.

## КАНАДА

Канадска асоцијација за стандардизацију (CSA) свој први правилник издаје 2002. године (CAN/CSA-S806-02). Овај правилник даје карактеризацију и вредности за различите композите зависно од материјала који се комбинују при формирању композита. (CAN/CSA-S806-02) издат је у сагласности са законом о планирању и изградњи и пратећим правилницима (CSA A23.3, 2004). Заснован је на факторима сигурности који се примењују на перформансе тј. карактеристике материјала. Преузима однос према начину лома из правилника који важи на територији САД-а. У Канади је такође издато упутство за дизајнирање композитних елемената као полимер матрице ојачане влакнима за примену у армиранобетонским конструкцијама (ISIS CANADA, 2001) и новије (ISIS CANADA, 2007). Ово упутство даје увид у информације везане за комерцијално присутне композите ојачане влакнима. Као и остали документи до сада наведени и овај се базира на модификованим елементима и упутствима везаних за употребу челичне арматуре.

### **4.1.2. Легислатива према правилнику републике србије**

Важећи Правилник за бетон и армирани бетон (ПБАБ '87) регулише употребу бетонских и армирано бетонских конструкција у области високоградње. Овај правилник не познаје материјале као што су композити ојачани влакнима. Иако је издат 1987. године ово није била тема уврштена у правилник.

Већ 1992 године објављен је Еурокод који се бави овом проблематиком а то је непуних 5 година након издавања Правилника за бетон и армирани бетон 1987 (ПБАБ'87).

У поглављима 4.2. и 4.3. биће одређене релације и неке се од њих могу упоредити са елементима овог правилника а тиме покушати да сагледамо могућност прилагођавања овог правилника по примеру осталих правилника који су преузимали основу из регулативе намењене армирању бетонске конструкције челичном арматуром.

## **4.2. Критеријуми које композитна арматура начињена од рециклираних материјала треба да испуни**

### **4.2.1. Топлотни коефицијент дилатације**

Композити ојачани влакнима којима су влакна усмерена поанашају се као анизотропан материјал а самим тим имају и различите топлотне коефицијенте у различитим посматраним правцима.

Топлотни коефицијент дилатације композитне арматуре и правцу пружања влакана треба да буде што приближнији топлотном коефицијенту дилатације бетона да би се новоформиран елемент понашао као целина.

Ова карактеристика композитне арматуре начињене од рециклираних материјала у подужном правцу највише зависи од влакана која се користе у формирању композита а много мање од материјала од ког је начињена матрица. Ако упоредимо вредности које важе за композите од нерциклираних материјала можемо видети да су стаклена влакна по овом критеријуму најпогоднија јер имају приближно исти коефицијент термалне дилатације у подужном правцу као и бетон. Ово наравно зависи и од процента употребљених влакана у композиту. Што је већи проценат то је ближа и вредност коефицијента броју који важи за материјала од ког су начињена влакна.

Мање битна карактеристика јесте кофицијент термалне дилатације у попречном правцу од правца пружања влакана. Ова дилатација зависи претежно

од карактеристика материјала матрице и неколико пута је већа од коефицијента топлотне дилатације бетона. Ово ширење чак утиче позитивно на везу бетона и композитне арматуре јер повећава силу пријањања два материјала.

Вредности које важе за композитну арматуру од материјала из примарне производње смо већ навели у претходном делу рада, али ћемо их овде поновити ради боље прегледности.

Композитна шипка у односу на материјал од ког су влакна	подужни коефицијент термалне дилатације ( $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )	попречни коефицијент термалне дилатације ( $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
Армид	од -6 до 2	од 60 до 80
Карбон	од -2 до 0	од 23 до 32
Стакло	од 6 до 10	од 21 до 23
Бетон	12	

Табела 8. Топлотни коефицијенти дилатације за композитне арматурне шипке према материјалу од ког су влакна сачињена <sup>30</sup>

Поред овога, треба још напоменути да се тачна вредност за сваки новоформиран композитни материјал може и треба утврдити експерименталним путем.

#### 4.2.2. Утицај екстремних температура

Утицај високих температура одражава се негативно на композите који као матрицу или влакна имају полимере. Арматура која садржи полимере не може да гори јер је заштићена бетоном који је окружује па нема присуства кисеоника који би омогућио стварање пламена али то не значи да ће карактеристике овакве композитне арматуре остати непромењене. Напротив долази до опуштања веза на молекуларном нивоу у полимеру а то у ствари значи да полимер омекшава.

У канадском упутству за употребу композитне арматуре од полимера ојачаних влакнима, у делу 4.4.3. утврђено је да се температура где при којој долази до преласка полимера у меко-течно стање креће од 110°C на више и зависи од врсте полимера. Ова температура битно утиче на карактеристике композита.<sup>33</sup>

Ова температурна граница је знатно нижа код термопластичних полимера, и налази се између 110 и 250°C, за разлику од темореактивних чија граница иде и преко 400°C. Однос опадања чврстоће на савијање шипке композита код употребе темореактивних полимера је 2,5 а однос код термопластичних износи и 100. Експерименталним путем (иако је мало експеримената изведено а који се могу пронаћи у литератури) утврђено је да границе опадања носивости у самом композитном елементу износе око 40% за температуру од 100°C и 90% за температуру од 200°C.<sup>32</sup>

Температуре на којима долази до топљења влакана су много више и крећу се за стакло 980°C, за карбон 1650°C и армид који има сличне карактеристике као матрица износи у неким случајевима и 175°C мада може да иде до нешто више од 600°C.<sup>32</sup>

Још једном се скреће пажња да се за сваки производ од композита мора спровести експериментално утврђивање утицаја температуре како би се добили валидни резултати обзиром на то да се различити хемијски састави композита различито понашају под утицајем температуре.

#### **4.2.3. Пријањање - дужина сидрења**

Како би бетон могао да се армира потребно је остварити везу арматуре и бетона. Ово важи и за композитну арматуру. Ова веза треба да пренесе утицаје између бетона и композитне арматуре.

Параметри који утичу на везу су следећи:

---

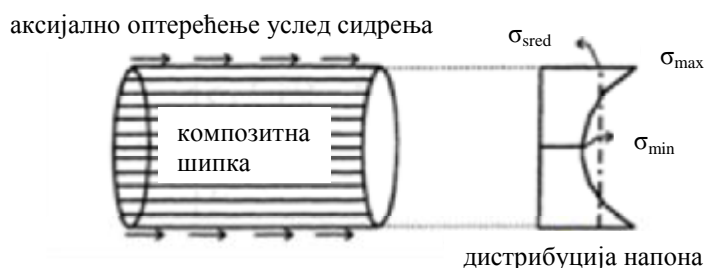
<sup>33</sup> Design Manual No. 3, "Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers", Intelligent Sensing for Innovative Structures Canada Corporation, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2007

- Пречник арматурне шипке од композита
- Дужина сидрења
- Облик арматуре
- Одлике површине шипке
- Чврстоћа бетона

Резултати који се могу наћи у литератури показују да је чврстоћа бетона директно повезана са начином на који долази до лома услед чупања арматуре из бетона.

Чврстоћа бетона у односу на смичућу чврстоћу површинског слоја директно дефинише начин лома при употреби композитних шипки арматуре ојачане влакнима. За бетоне чија је чврстоћа већа од 30 МПа, смицање се дешава унутар шипке арматуре од полимера ојачаних влакнима, односно долази до раскидања везе влакна и матрице која држи влакна у снопу.

То значи да чврстоћа везе, између бетона и композитне шипке од полимера ојачаног влакнима, а за квалитете бетона веће од 30 МПа, не зависи од чврстоће бетона. Међутим, уколико је чврстоћа бетона мања од 30 МПа начин лома се мења. У овом случају смицање се дешава у бетону који окружује арматурну композитну шипку, односно по омотачу арматуре, и понашање је директно повезано са карактеристиком употребљеног бетона.<sup>34</sup>



Слика 14. Дистрибуција напона затезања кроз композитну арматурну шипку<sup>34</sup>

Анализом канадског правлиника (CSA S806-02) могу се утврдити вредности дужина сидрења у функцији чврстоће бетона.

<sup>34</sup> BOND OF REINFORCEMENT IN CONCRETE, STATE OF ART REPORT, international Federation for Structural Concrete Task Group Bond Models, Lozana, Švajcarska, Avgust 2000



Дужина сидрења је најкраћа дужина шипке за коју се шипка може подвргнути сили која ће у њој изазвати напон кидања а да пре постизања тог напона не дође до чупања шипке из бетонског елемента.

Дужина сидрења према правилнику (CSA S806-02)

$$l_d * \pi * d_b * \mu_{frp} = A_{frp} * f_{frp}$$

- $l_d$  – дужина сидрења (mm)  
 $d_b$  – пречник арматурне шипке (mm)  
 $\mu_{frp}$  – напон смицања између бетона и композита (пријањање) (MPa)  
 $A_{frp}$  – површина попречног пресека арматурне шипке (mm<sup>2</sup>)  
 $f_{frp}$  – затезна чврстоћа арматурне шипке (MPa)

Дужина сидрења према канадском правилнику (CHBDC, 2006)

$$l_d = 0,45 * \frac{k_1 * k_4}{d_{cs} + k_{tr} \frac{E_{frp}}{E_s}} * \frac{f_{frp}}{f_{cr}} * A_{frp}$$

- $k_1$  – фактор положаја шипке  
 =1,3 за хоризонталну арматуру са више од 300mm заштитног слоја  
 =1 за све остале случајеве  
 $k_4$  – фактор површине шипке који представља однос између напона пријањања бетон-композит и напона пријањања челик-композит овај фактор никад није већи од 1 а уколико нема података узима се 0,8  
 $d_{cs}$  – намање растојање до од ивице бетона до тежишта шипке или 2/3 растојања између шипки  
 $k_{tr}$  – попречни индекс арматуре

који је наведен у поглављу 8.15.2.2 (СНВДС, 2006) и важи да је увек

$$d_{cs} + k_{tr} \frac{E_{frrp}}{E_s} \leq 2,5d_b$$

$d_b$  – пречник арматурне шипке (mm)

из 8.15.2.2 (СНВДС, 2006) попречни индекс арматуре  $k_{tr}$  је

$$k_{tr} = 0,45 \frac{A_{tr} * f_{frrp}}{10,5 * s * n}$$

$n$  – број шипки

$s$  – максимално растојање попречних шипки на дужини  $l_d$

10,5 – фактор је у (mm/N)

#### 4.2.4. Прслине

Прслине директно утичу на употребљивост конструкције. Код челичне арматуре појава прслина изазива и додатно излагање челика утицају спољашње средине. Из ових разлога правилници који важе за армиранобетонске конструкције ограничавају величину прслина. Тако је према Правилнику за бетон и армирани бетон из 1987. године (ПБАБ'87) величина прслина ограничена на 0,4mm. Ако погледамо сличне правилнике који важе у иностранству видећемо да та величина одговара величини прслина у наведеном правилнику.

Обзиром да Република Србија нема важећу регулативу за композитну арматуру можемо погледати у којим се границама крећу дозвољене вредности ширине прслина према неким од правилника који важе у иностранству у табели 9.

Правилник	Материјал	Изложеност	максимална дозвољена шитина прслине (w <sub>max</sub> )
Eurocode 2	челик	нормална	0.3mm
Model Code 1990	челик	нормална	0.3mm
JSCE (1997)	композит*	све	0.5mm
ACI 440.IR-06 CSA (2002)	композит*	унутра	0.7mm
ACI 440.IR-06 CSA (2002)	композит*	споља	0.5mm
IStructE (1999)	композит*	близу посматрача (корисника)	0.3mm
IStructE (1999)	композит*	далеко од посматрача (корисника)	>0.3mm

\* композит = полимер ојачан влакнима

C
Eur
Model

Табела 9. Максималне величине прслина према различитим стандардима<sup>35</sup>

Како је затезна чврстоћа влакана у композитној арматури најчешће већа од затезне чврстоће великих издужења код челичне арматуре а модули еластичности имају обрнут однос за наведено потребно је приступити провери прслина и угиба, јер уколико се искористи већа затезна чврстоћа композита то доводи до већих дилатација. Ово практично значи да пројектовање конструктивних армиранобетонских елемената са композитном арматуром од полимера ојачаних влакнима захтева приступ који нарочито узима у обзир дозвољене вредности прслина и угиба а тиме се долази до бољих искоришћености композитне арматуре. Ово такође подразумева да носивост композита не сме да прекорачи граничне вредности које су одређене редукацијом, вредности карактеристика композитних арматура према материјалу од ког су употребљена влакна за композит и коефицијентима сигурности за оптерећења.

Већа димензија прслине је дозвољена при употреби композита од полимера ојачаним влакнима јер композитна арматура није подложна корозији. Из овог разлога ограничења прслина су више естетске природе.

<sup>35</sup> Fib Bulletin No. 40, "FRP Reinforcement in RC Structures", International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2007

Такође ограничења прслина и угиба морају бити таква да не доведу кориснике у недоумицу да ли је безбедно користити објекат.

Битни фактори на које морамо обратити пажњу су начин коришћења конструкције због начина утицаја прслина и угиба, и визуелне ефекти прслина и угиба на кориснике и посматраче.

Уколико прслине и угиби из неког разлога а због специфичности употребе армиранобетонског елемента не представљају ограничење онда се као фактор за димензионисање може користити само услов носивости композитне арматуре.

Ако опет анализирамо регулативу која важи у Канади имамо два приступа. Један је ограничавање напрезања према максималној дилатацији у односу на дозвољене величине факторе редукције карактеристика материјала. Други је директно проверавање величине прслина.

Први нам говори колике су максималне дилатације које можемо допустити у композитној арматури.

Напрезање у арматури је ограничено према правилницима и важи за одређене типове материјала. Према ПБАБ'87 довољена дилатација у челичној арматури износи 10 ‰.

У упутству за примену композитне арматуре у армиранобетонским конструкцијама ISIS CANADA из 2007. још се каже да је ограничење прслина непоходно код елемената армираних челичном арматуром и да је величина ограничења 0,3mm за спољашње конструкције и 0,4mm за унутрашње конструкције док је код композитне арматуре то 0,5mm и 0,7mm (Табела 9.) респективно због отпорности композита на корозију.

Ово значи да су дозвољене прслине при употреби арматуре од полимера ојачаних влакима веће за 1,5 до 1,7 пута у односу случајеве употребе челичне арматуре. Упросечена вредост износи 5/3.

$$\varepsilon_{frp} = \frac{5}{3} * \varepsilon_s$$

Значи да дилатација може бити просечно већа за 1,67 пута. Ако ово све упоредимо са дозвољеним дилатацијама према ПБАБ'87 долазимо до вредности од 16,7 промила.

Дзвољени напон у композиној арматури је:

$$f_{frp} = E_{frp} \varepsilon_{frp}$$

И зависи од дилатације  $\varepsilon_{frp}$  до које смо дошли наведеним поступком.

Овакав приступ може доста ограничити максималну искоришћеност композитне арматуре, чак толико да остане знатно испод дозвољених вредности према факторима сигурности који се примењују на оптерећења.

Уколико желимо можемо приступити другом начину тј. директном прорачуну прслина. Према Gergely-Lutz једначини у упутству за примену композитне арматуре у армиранобетонским конструкцијама ISIS CANADA из 2007. године за композитну арматуру од полимера ојачаних вланима дата је једначина

$$w = 2,2 * k_b * \frac{f_{frp}}{E_{frp}} * \frac{h_2}{h_1} * (d_c * A)^{1/3}$$

Gде је

$w$  – ширина прслине на затегнутој страни елемента (mm)

$k_b$  – коефицијент који зависи од везе бетон арматура

за композит који има сличне карактеристике везивања као бетон =1

за композит који има лошије карактеристике везе >1

за композит који има боље карактеристике везе <1

у недостатку података =1,2

- $h_1$  – растојање од затегнуте ивице пресека до неутралне осе (mm)
- $h_2$  – растојање од тежишта затегнуте арматуре до неутралне осе (mm)
- $d_c$  – растојање од затегнуте ивице пресека до тежишта затегнуте арматуре (mm)
- $E_{f_{TP}}$  –модул еластичности композитне шипке (MPa)
- $A$  – површина попречног пресека бетона који окружује шипке и има исто тежиште као арматура подељена са бројем шипки (mm<sup>2</sup>)
- $f_{f_{TP}}$  – затезна чврстоћа арматурне шипке (MPa)

Сходно члану 114 правилника БАБ'87, прорачун према граничним стањима прслина није неопходан за армиранобетонске елементе са глатком арматуром ГА240/360 или са ребрастом арматуром РА400/500, који се налазе у средини слабе или средње агресивности, ако је за примењени пречник шипки  $\emptyset$  коефицијент армирања затегнуте површине бетона,  $\mu_z$ , изражен у процентима, испуњава услов

$$\mu_z (\%) \geq \emptyset / (k_p \times a_u)$$

при чему је вредност ширине прслине  $a_u \leq 0,2$  мм, коефицијент  $k_p$  за ГА240/3560 износи 35 а за ребрасту арматуру РА400/500 износи 30.

Коефицијент армирања затегнуте површине бетона,  $\mu_z$ , представља однос површине затегнуте арматуре  $A_a$  и затегнуте површине бетона  $A_{bz}$ .

$$\mu_z = A_a / A_{bz}$$

#### 4.2.5. Угиби

Угиби директно утичу, како се у члану 115. ПБАБ'87 истиче, на обезбеђење функционалности конструкције, посебно ради обезбеђења компатибилности деформација са опремом, уређајима, преградним зидовима, испунама, облогама,

изолацијама и слично, као и ради обезбеђења потребних нагиба за одводњавање, ради избегавања неповољних психолошких и естетских утисака и друго.

Величина угиба зависи и од површине попречног пресека арматуре у армиранобетонском елементу. На вредност угиба се може утицати директно повећањем или смањењем површине попречног пресека арматуре у пресеку елемента који се армира. Повећање површине попречног пресека при употреби композитних арматура потребно је због мањег модула еластичности композитних материјала у односу на челик. Уколико желимо да угиб остане непромењен тј. у границама угиба који усвајамо за елементе армиране челичном арматуром а који не зависе од врсте арматуре већ од начина употребе конструкције, морамо повећати површину попречног пресека што ће за последицу имати смањење стварних дилатација у арматури. Ово доводи до повећања утруса композитне арматуре што може бити један од битних фактора када је у питању економска исплативост.

Што се тиче угиба услед већих дозвољених дилатација у композитној арматури и разлике модула еластичности у односу на челичну арматуру очекивано је да угиби буду већи.

Дозвољени угиби се свакако морају ограничити и ова ограничења морају имати везе са употребом елемената у виду врсте конструкције (архитектонски објекти, привремене конструкције, итд), позиције елемента у конструкцији, врсте оптерећења. Овде се најчешће одређује величина угиба у функцији дужине распона елемента па се у правилницима дају као проценат дужине у облику  $L/n$  где је  $L$  распон  $1/n$  проценат.

Ове вредности за конструктивне елементе примарне конструкције архитектонских објеката се свакако могу користити за бетонске елементе армиране композитом али и за бетонске елементе армиране челиком.

Правилници који дефинишу правила за бетоне армиране композитима и бетоне армиране челиком најчешће имају исте или сличне вредности.

Правилници као што су европски (Eurocode 2) и амерички (ACI 318-05) имају следеће дефинисане вредности за дозвољене угибе:

Правилник	Тип конструкције	Ограничење угиба
Eurocode 2	естетски и функционални услов (квази стално оптерећење)	L/250
Eurocode 2	у односу на ношене елементе који нису конструктивни (квази стално оптерећење)	L/500
ACI 318-05	Кровови, међуспратне конструкције (сума сталног и покретног оптерећења)	
	мале шансе за оштећење због великих деформација	L/240
	велике шансе за оштећење због великих деформација	L/480
ACI 318-05	Елементи који не носе облоге и сличне неконструктивне материјале	
	Подови	L/360
	Равни кровови	L/180

Табела 10. Дефинисане дозвољене вредности угиба према (Eurocode 2) и (ACI 318-05)

Овим прегледом закључујемо да члан 117. ПБАБ'87, правилника Р. Србије може да послужи за одређивање максималне дозвољене димензије угиба.

Овај члан гласи: „Гранични угиби армиранобетонских елемената одређују се тако да буде обезбеђена функционалност конструкције објекта, имајући у виду и захтеве из пројектног задатка или машинског, технолошког, архитектонског и другог пројекта објекта. У недостатку захтева из става 1. овог члана, гранични угиби армиранобетонских елемената могу се одредити у функцији распона  $L/n$ . При чему се за коефицијент  $n$  оријентационо може усвојити вредност 300 за гредне елементе, вредност 150 за конзолне елементе, а вредност 750 за носаче кранских стаза.“

Сходно члану 118 правилника БАБ87, прорачун према граничним стањима деформација није неопходан за армирано бетонске елементе висине попречног пресека  $d$ , распона  $l$  и односа екстремних вредности момената савијања од дуготрајних и од укупних утицаја  $M_g / M_n$ , ако је испуњен услов



$$d/l \geq (k_u / (k_{11} \times k_m)) \times (1 + \alpha_{\infty} \times M_g / M_n)$$

где је  $k_u$  коефицијент којим се одрђује дозвољен угиб носача у функцији распона и статичког система,  $k_{11}$  коефицијент завистан од статичког система и облика оптерећења,  $k_m$  коефицијент завистан од облика поречног пресека, процента армирања и врсте примењене арматуре. Коефицијент утицаја скупљања и течења бетона  $\alpha_{\infty}$ , у функцији је односа површине притиснуте и затегнуте арматуре  $A_a' / A_a$ , за природно влажну средину износи

$$\alpha_{\infty} = 2 - 1,2 (A_a' / A_a) < 0,8$$

#### 4.2.6. Коефицијенти сигурности

Упоредићемо и коефицијенте сигурности који важе у неким од земаља у којима је уведена пракса употребе композита за армирање бетонских елемената и у којима су донети правилници и пратећа документација.

Ови коефицијенти зависе највише од типа влакна, а као што смо већ навели код свих материјала се ограничава искоришћеност материјала како би се обезбедила сигурност. Тачније због одступања у квалитету материјала или неправилности у структури може да дође до непредвиђеног лома услед максималне искоришћености напона, и течење материјала услед константне изложености оптерећењу такође има удео у одређивању коефицијената сигурности. Тако правилници редукују максималне чврстоће и уводе рачунске чврстоће. Према ПБАБ'87 рачунска чврстоћа бетона  $f_b$  редукована је у односу на марку бетона и износи од 0,7 до 0,55 за марке од 10 до 60 ретроспективно. Исто тако и композити од полимера ојачаних влакнима морају имати коефицијенте сигурности који зависе од ефекта деловања константног оптерећења и типа влакана тј. материјала од којих су влакна направљена.

Тако рецимо амерички стандарди према ACI 440.IR имају следеће коефицијенте сигурности:

тип влакна у композиту	стаклена влака	армидна влака	карбонска влакна
редукција	0.2	0.3	0.55

Табела 11. Коефицијенти сигурности за композитну арматуру према америчком правилнику (ACI 440.IR)

Затим (IstructE, 1999) даје следеће факторе где треба обратити пажњу на то да су они реципрочно постављени у односу на (ACI 440.IR):

тип влакна	стакло	армид	карбон
редукција	3,6	2,2	1,8

Табела 12. Коефицијенти сигурности за композитну арматуру према правилнику (IstructE, 1999)

Уколико се погледа колико износе реципрочне вредности добија се

тип влакна	стакло	армид	карбон
редукција	0.27	0.45	0.56

Табела 13. Реципрочне вредности коефицијената сигурности за композитну арматуру према правилнику (IstructE, 1999)

Упутство за примену композитне арматуре у армиранобетонским конструкцијама ISIS CANADA из 2007. године даје факторе према правилнику (CSA S806-02):

тип влакна	стакло	армид	карбон
редукција	0.75	0.75	0.75

Табела 14. Вредности коефицијената сигурности за композитну арматуру према правилнику (CSA S806-02)

Уз додатно ограничење за композит од полимера ојачан стакленим влакнима такође дат у CSA S806-02 у поглављу 7.1.2.3 где се каже „Када се користи композит од полимера ојачан стакленим влакнима при константном

оптерећењу помноженом фактором сигурности за то оптерећење искоришћење не сме прећи 30% максималног напона затезања влакана“ . Што у том случају даје **фактор за композит са стакленим влакнима у вредности од 0,2 до 0,25.**

У ОДНОСУ НА ИЗДВОЈЕНЕ АНАЛИЗИРАНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ И ОГРАНИЧЕЊА ИЗ ЛИТЕРАТУРЕ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТ СУ ИЗДВОЈЕНА СЛЕДЕЋА ЗАПАЖАЊА КАО БИТНА

#### Топлотни коефицијент дилатације

Код композитног материјала употребљеног за експеримент коефицијент термалног ширења зависи највише од стаклених влакана (за влакна износи према улазним подацима  $8 \times 10^{-6} \text{ m/(m.K)}$ ) па можемо сматрати да је врло блиска или чак иста као код композита направљеног од материјала из примарне производње. Дакле креће се око  $8-10 \times 10^{-6} \text{ m/(m.K)}$ .

#### Утицај екстремних температура

Како се обликовање елемената за армирање радило при деловању врелог ваздуха температуре између  $200^{\circ}\text{C}$  и  $330^{\circ}\text{C}$  и да се ради о термопластичној матрици за коју смо утврдили да на температури од  $140^{\circ}\text{C}$  почиње да омекшава можемо закључити да подаци и информације који се тичу утицаја екстремних температура могу да се примене и на овај композит и да је неопходно предузети неопходне мере при обезбеђивању отпорности конструкције на пожар или употребити овакву арматуру у елементима који немају посебне захтеве по питању противпожарне отпорности.

#### Прслине и угиби

Што се тиче прслина и угиба како немамо потребне улазне податке за прорачун очекиваних вредности урадићемо проверу података тако што ћемо резултате експеримента везане за прслине и угибе вратити у прорачун који смо навели у поглављу 4.2. а према упутству за примену композитне арматуре у армиранобетонским конструкцијама (ISIS CANADA) из 2007. године и тиме експериментално добити коефицијент  $k_b$  везе бетон-композитна арматура за конкретну композитну арматуру примењену у експерименту.

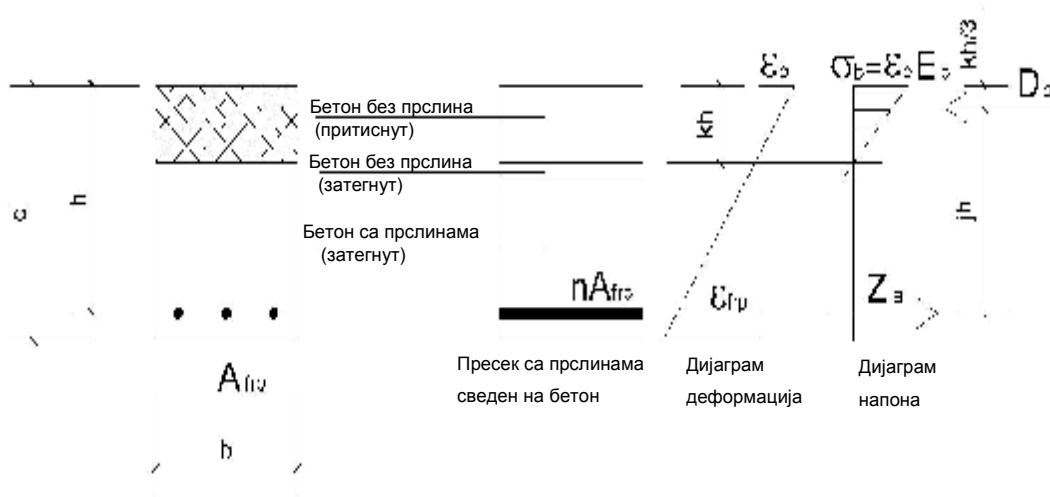
## Дужина сидрења

Дужину сидрења као непознаницу у експерименту елеминишемо повијањем арматуре за дужину од  $15\varnothing$  композитне арматуре и препуштањем елемента за по 20cm у односу на ослонце, а према резултатима екперимента, преко прслина, може се утврдити и  $k_d$  коефицијент у његовом тачном износу а тиме и израчунати потребне дужине сидрења за предложени материјал.

## Коефицијенти сигурности

Коефицијенте сигурности ћемо занемарити у приступању експерименту јер желимо да проверимо екстремне вредности по питању угиба, прслина, дилатација и лома. Касније при компарацији резултата експеримента и података из литературе и регулативе узећемо у обзир коефицијенте сигурности и дати поређења или резултате.

Поступком за прорачун напона у композитној арматури из упутства (ISIS CANADA) из 2007. године можемо одредити момент при ком долази до лома у композитној арматури ако нам је то потребно зарад извођења експеримента.



Слика15. Пресек армиранобетонског елемента са дијаграмима дилатација и напона<sup>33</sup>

$$n_{frp} = \frac{E_{frp}}{E_c}$$

$$\rho = \frac{A_{frp}}{b * d}$$

$$k = \sqrt{(\rho n_{frp})^2 + 2\rho n_{frp} - \rho n_{frp}}$$

$$j = 1 - \frac{k}{3}$$

$$f_{frp} = \frac{M_{loma}}{A_{frp} * j * d}$$

Одавде се можеме израчунати момент при ком долази до лома у композитној арматури а који касније јесте упоредив са резултатима експеримента.

$$M_{loma} = f_{frp} * A_{frp} * j * d$$

Због одабира опреме којом ће се вршити експеримент потребно је одредити очекивани момент који се јавља у пресецима па преко њега и силу која делује на елемент.

Након експеримента се могу дефинисати коефицијенти сигурности којима се одређују односи критичне и дозвољене вредности утицаја на елементе конструкције.

## Напомене

Потребно је експериментално проверити параметре набројане у поглављу 4.2. и дефинисати карактеристике сваког композитног материјала како у процесу првобитног креирања материјала тако и у постављеној производњи.

Обзиром да за композите од рециклираних материјала можемо сматрати композитима потребно је карактеристике употребљених материјала довести у границе које дефинишу правилници за употребу композитних материјала или обезбедити правилнике који ће додатно дефинисати правила и прописе употребе рециклираних материјала. У неким случајевима биће потребно додатно повећати корективне факторе који се користе у рачуну због веће шансе за појаву дефектних стања услед утицаја нечистоћа и употребе материјала пре рециклаже и у самом процесу рециклаже.

Преко аналитичких поступака из поглавља 4.2 може се поставити оквирна процена карактеристика новоформираног конструктивног елемента а тиме и проценити да ли постоји капацитет за даље истраживање и проверу потребних фактора.

## **5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО УТВРЂИВАЊЕ КАРАКТЕРИСТИКА КОМПОЗИТА САЧИЊЕНОГ ОД ДЕЛОМ РЕЦИКЛИРАНИХ МАТЕРИЈАЛА**

### **5.1. Истраживачки приступ**

Истраживачки приступ се базира на експериментима.

Експеримент 1 којим се утврђују карактеристике самих композитних елемената формираних тако да у себи садрже рециклиране материјале и то матрицу и влакна.

Након утврђивања ових карактеристика као улазних података приступа се експерименту 2 којим се утврђују карактеристике формираног конструктивног елемента бетонске конструкције армираног поменутиим композитом.

Експеримент 2 се састоји из прикупљања података за бетонске конструктивне елементе армиране композитном арматуром, али и елементе армиране класичном челичном арматуром ради касније могућности упоређивања резултата, како међусобно резултата самог експеримента тако и резултата експеримента са аналитички добијеним резултатима.

### **5.2. Експериментално утврђивање карактеристика композитне арматуре намењеног даљој уградњи у конструктивне елементе архитектонских објеката**

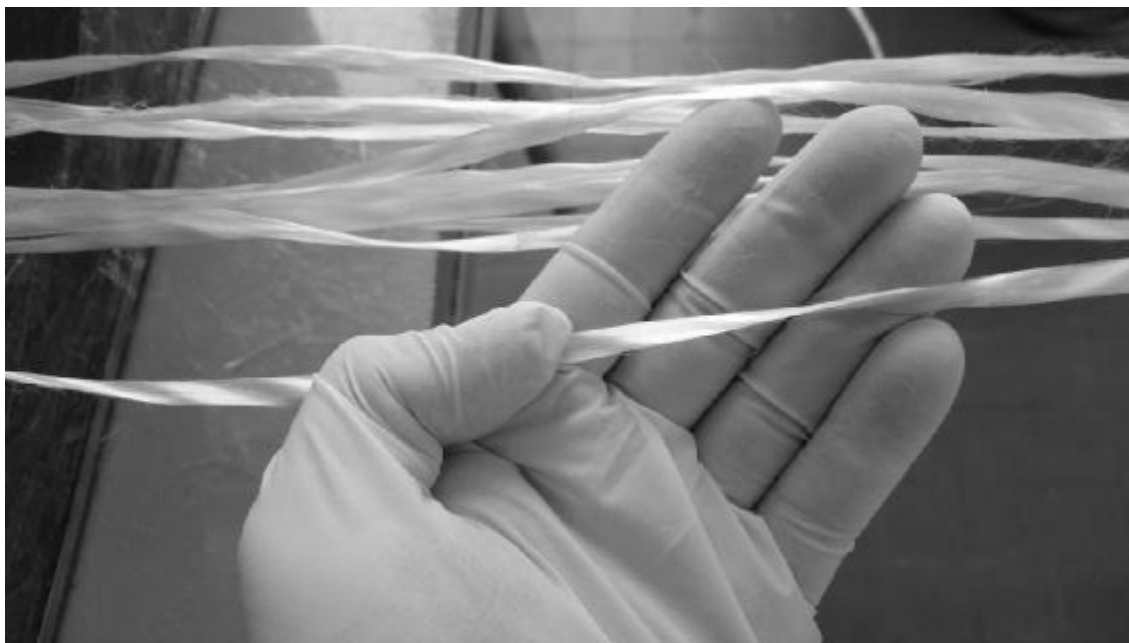
#### **ЕКСПЕРИМЕНТ 1**

За потребе овог рада анализиран је композит добијен вишегодишњим истраживањем лабораторије на Катедри за композитне материјале Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, а који се и даље налази у фази развијања због чега је и потребно урадити истраживање како би одредили даље смернице за развој. За претпоставку је узето да овај композит може бити погодан је као замена за класично употребљавану арматуру у конструктивним елементима



архитектонских објеката (арматуру ГА 240/360, РА 400/500, Б5006, итд.). Композит је сачињен од полимер матрице у коју су убачена влакна процесом термопластичне пултризије који ће бити објашњен у даљем тексту.

Процент рециклираног ПЕТ-а (Polyethylene Terephthalate) употребљеног у елементу је око 20% а тенденција је да се кроз даљи процес истраживања овај проценат повећа. Оваква влакна се састоје из стакленог влакна (парцијално од рециклираног стакла) и импрегнације материјалом ПЕТ-а која се наноси на стаклено влакно. Овако добијена влакна су већ композит и део ПЕТ-а који се на њима налази учествоваће у формирању полимер матрице. Део влакана се импрегнира ПЕТ-ом из примарне производње а настоји се да се употреба овог материјала смањи на најмању могућу меру (Слика 4.).



Слика 16. Мешавина стаклених и ПЕТ влакна из намотаја

Процес у самој лабораторији се састоји из екструзије ПЕТ-а који се наноси на стаклена влакана процесом екструзије на екструдеру (Слика 17), ова импрегнација се ради из ПЕТ Флекс материјала (Слика 18.) добијеног од рециклиране ПЕТ амбалаже.



Слика 17. Екстудер који се користи за наношење ПЕТ-а на стаклена влакна

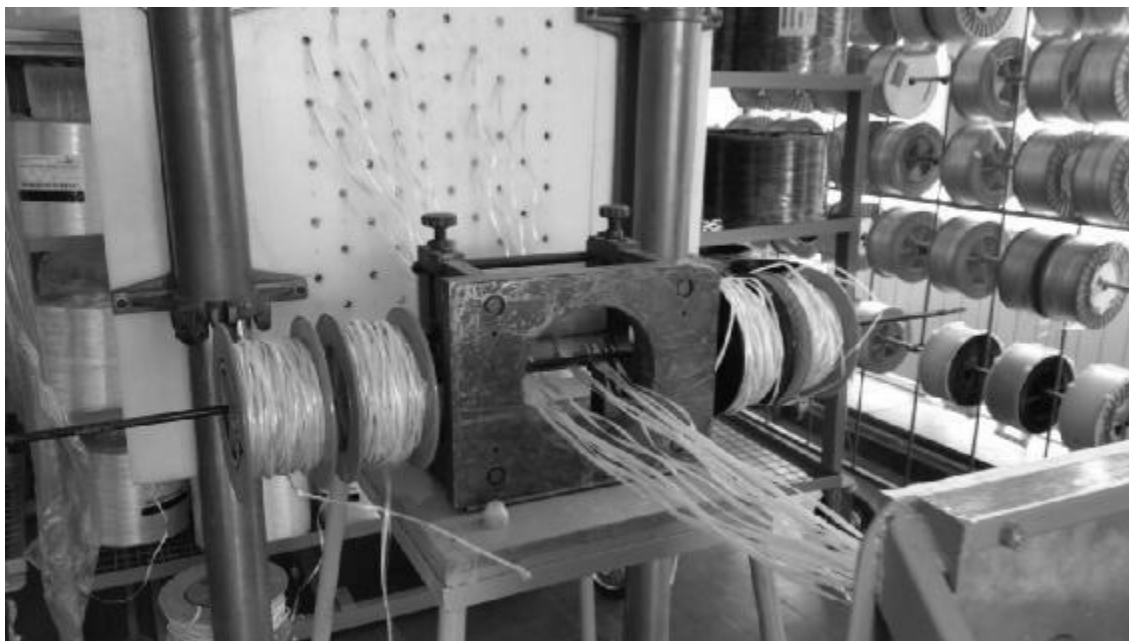


Слика 18. ПЕТ Флекс – материјал из рециклаже

Материјал ПЕТ Флекс је топло пран како би се уклониле нечистоће и како би се могло приступити екструзији. Материјал ПЕТ Флекс набављен је од фирме „Гринтек“ д.о.о. („Greentech“ d.o.o.) Нови Сад.

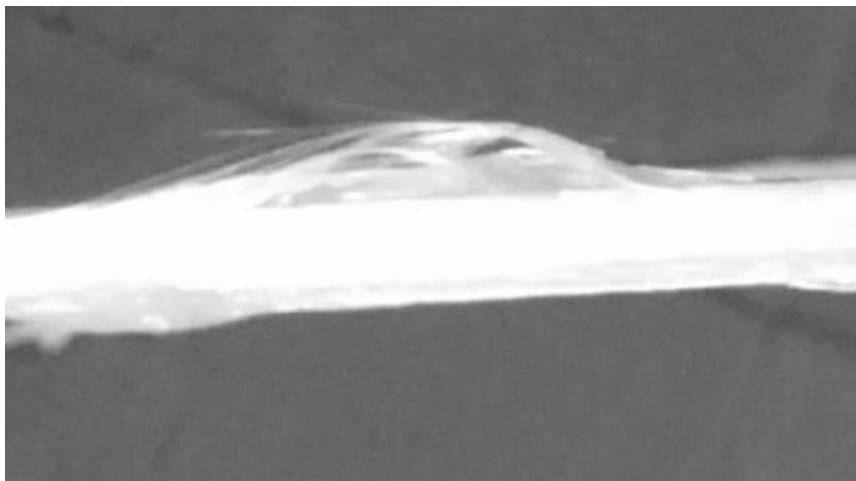
Материјал из примарне производње за производњу влакана набављен је од Микро-пак д.о.о. („Micro-пак d.o.o“) и састоји се из гранулата „JADE PET CZ-302“.

Следи процес пултрузије који се уобичајено користи у производњи композитних елемената од влакнима ојачаних полимера. Ово је потпуно аутоматизовани процес који подразумева увлачење влакана добијених екструзијом са намотаја у сноповима (Слика 19.), за термореактивни процес њихово провлачење кроз базу полимера у течном стању како би се формирала матрица и затим даље провлачење кроз калуп са грејачима по ком се формира облик елемента приликом чега долази до процеса полимеризације матрице и добијања коначног композитног конструктивног елемента.



Слика 19. Повлачење материјала у процес пултрузије

Код процеса термопластичне пултрузије која је примењена у овом случају разлика је у томе што је део полимер матрице већ нанесен на влакна (Слика 20.) па се влакна само увлаче у калуп и загревају.



Слика 20. Полимер нанесен на влакна

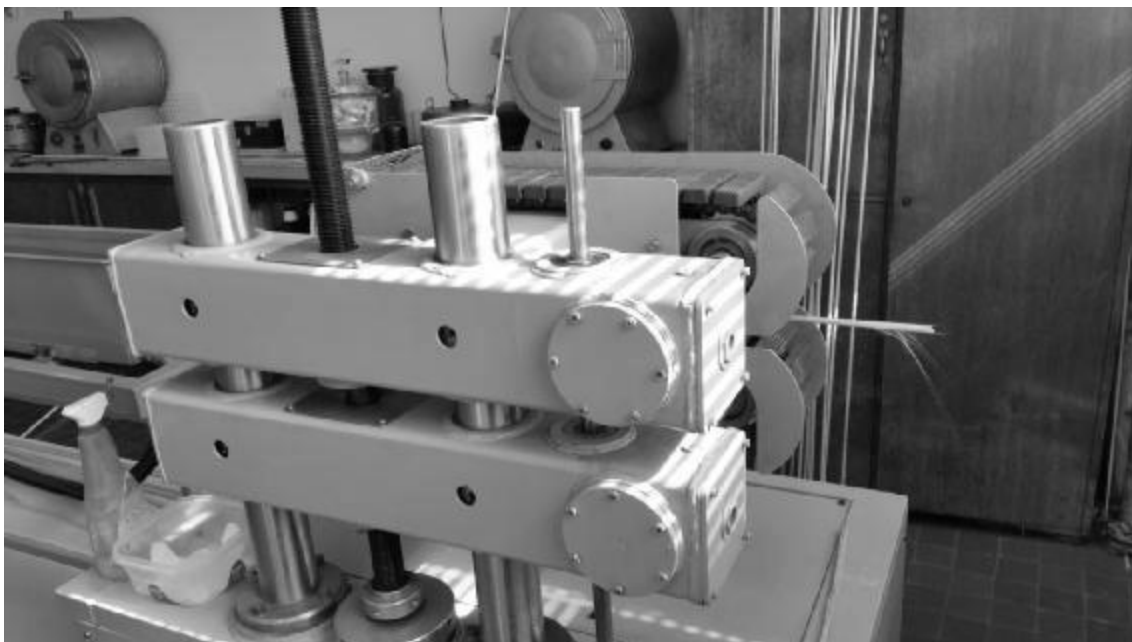
Процес пултрузије је континуиран процес који пружа могућност производње елемената великих дужина (Слика 21.).



Слика 21. Производна линија - процес пултрузије

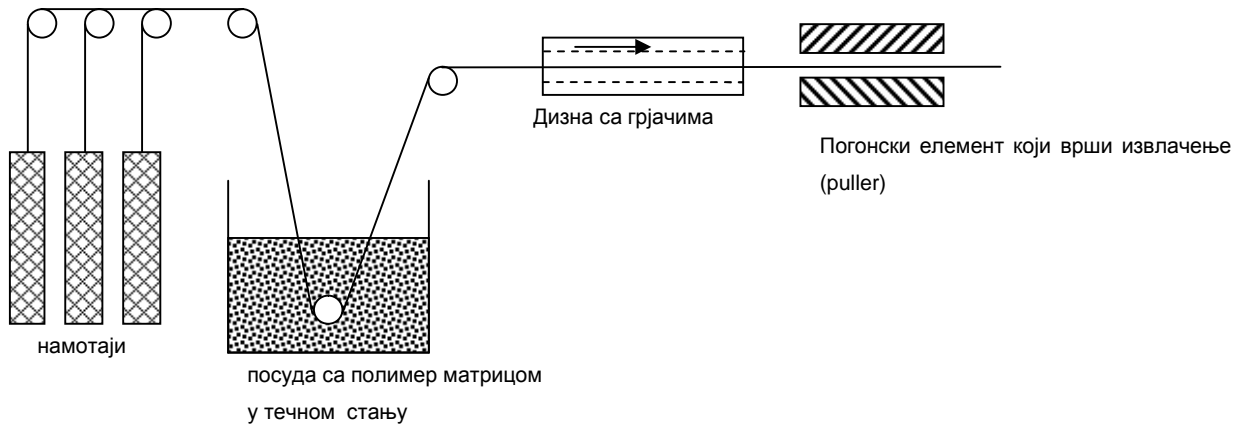
Предност термопластичне пултрузије се односи на избегавање употребе полимера у течном стању код којих има токсичних и канцерогених испарења. Овим се додатно штити здравље учесника у процесу производње композита, доприноси заштити животне средине и смањењу загађења.

У процесу пултрузије погон материјала је остварен извлачењем. Тачније на крају се налази погонски елемент који очврслу шипку композитне арматуре извлачи а тиме повлачи и нови материјал у процес производње. (Слика 22.)

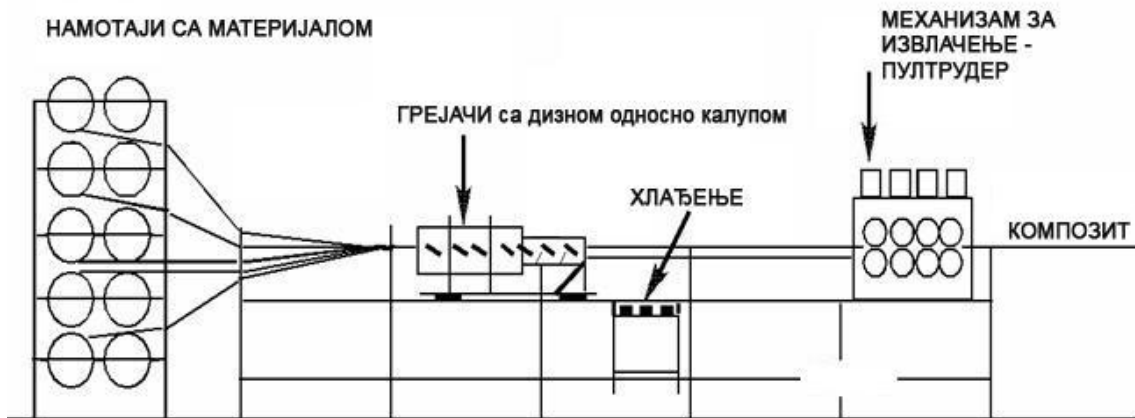


Слика 22. Погонски елемент у процесу пултрузије (пултрудер)

Композитни елементи добијени на овај начин имају влакна која се простиру у једном правцу што их чини анизотропним.



Слика 23. Процес пултрузије са термореактивним полимером у течном стању<sup>33</sup>

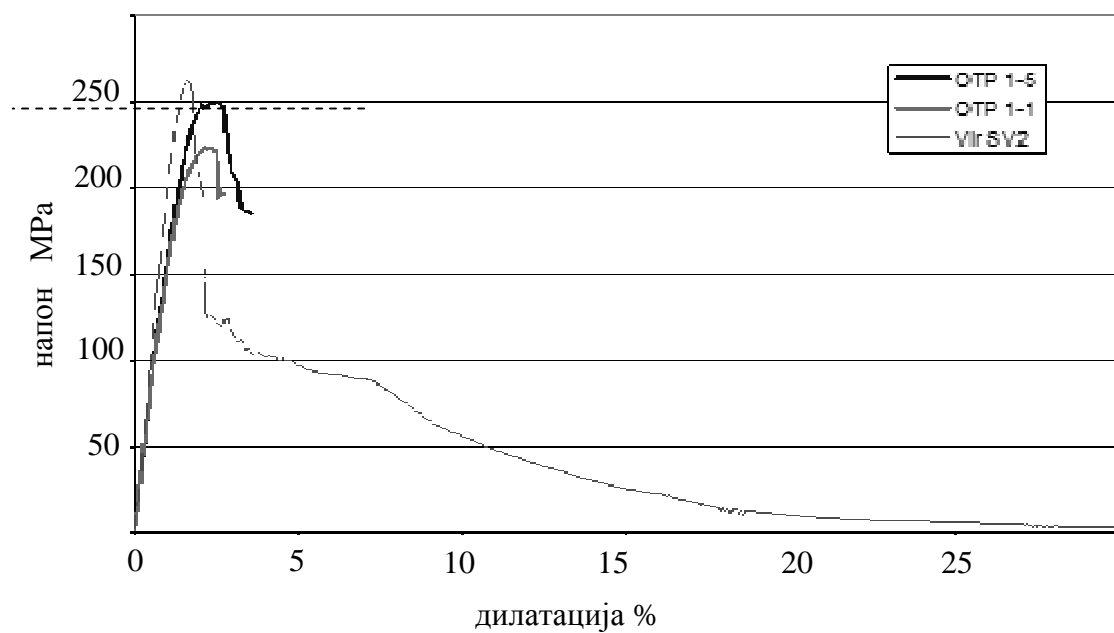


Слика 24. Процес пултрузије са термопластичним полимером

Даља испитивања на затезање, смицање и притисак вршена су у лабораторији Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

Како је материјал произвођен на прекиде, прва производна серија је дала мале количине композита који је био довољан за тестирање на хидрауличкој кидалици. Друга производна серија, готово годину дана касније, дала је материјал за уградњу у бетонске елементе ради експеримента. И на другој производној серији је урађена екпериментална провера затезне чврстоће на хидрауличкој кидалици.

Прва производна серија - Резултати са екперименталног утврђивања затезне чврстоће дају следеће резултате:



Слика 25. Дијаграм напон – дилатација ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) за прву производну серију композитних шипки

Добијена је затезна чврстоћа од 226 до 248 МПа при дилатацији од 3%. У даљем раду приказане су фотографије експеримента (Слика 26. и 27.)

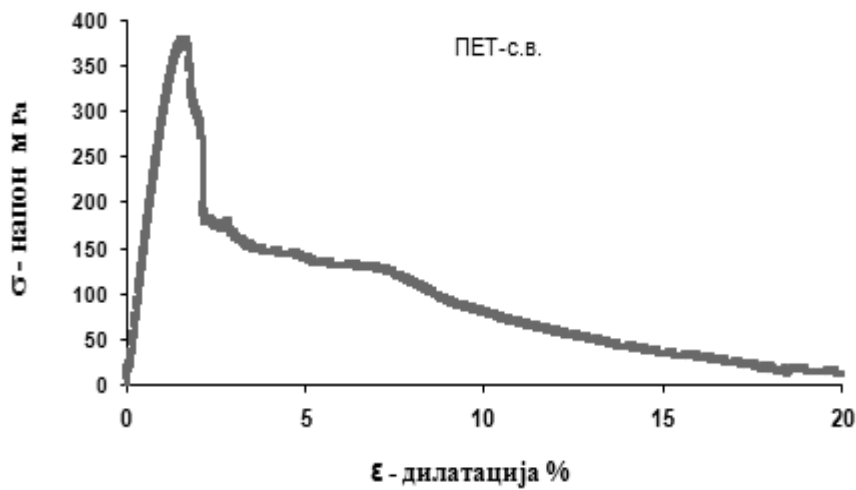


Слика 26. Експериментално кидање материјала из прве производне серије композитних шипки



Слика 27. Деламинација при експерименталном кидању композитног материјала прве производне серије композитних шипки

Друга производна серија - Произведено је 100m композитних шипки димензија 6-8mm. Резултати са екперименталног утврђивања затезне чврстоће даје следеће резултате:



Слика 28. Дијаграм напон – дилатација ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) за другу производну серију композитних шипки

Добијена је затезна чврстоћа од 375 МПа при дилатацији од 2,14 %. Модул еластичности 17,5GPa. Експеримент (Слика 29.)





Слика 29. Експериментално кидање композитног материјала из друге производне серије композитних шипки

Треба истаћи да је материјал добијен на овај начин термопластичан и да се елементи овог композита могу накнадно обликовати за разлику од композитних шипки сачињених од термореактивних полимера које се користе у свету а покушавају да направе продор и на домаће тржиште, па тако и остваре примену у пракси.

Морамо још да приметимо да услед непостојања константне производње и провере долази до варирања у квалитету композитних шипки.

### **5.3. Експериментално утврђивање карактеристика конструктивног елемента армираног композитом**

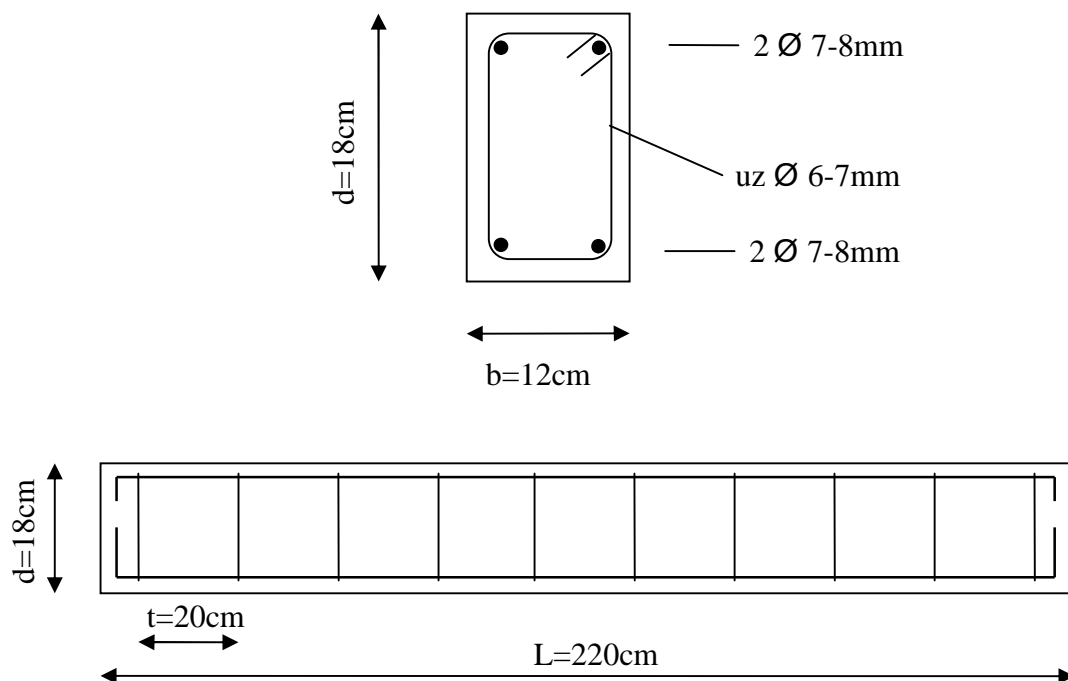
#### **ЕКСПЕРИМЕНТ 2**

Са резултатима који дају податке о карактеристикама композита намењеног армирању конструктивних елемената из поглавља 4.2. као улазним подацима приступљено је даљој уградњи арматуре у бетонске елементе и испитивању карактеристика тих бетонских конструктивних елемената.

Изабрани бетонски елементи су греде димензија 12cm x 18cm x 220cm, док је заштитни слој арматуре 2cm. Избор димензија је начињен имајући на у виду потенцијалну иницијалну примену за „секундарне елементе конструкције“ у преградним зидовима (надвратнике, серклаже, итд.). Оваква примена не би захтевала моменталну промену правилника и законских аката а подржала би евентуалну истраживачку делатност и даљи развој оваквих композитних арматура.

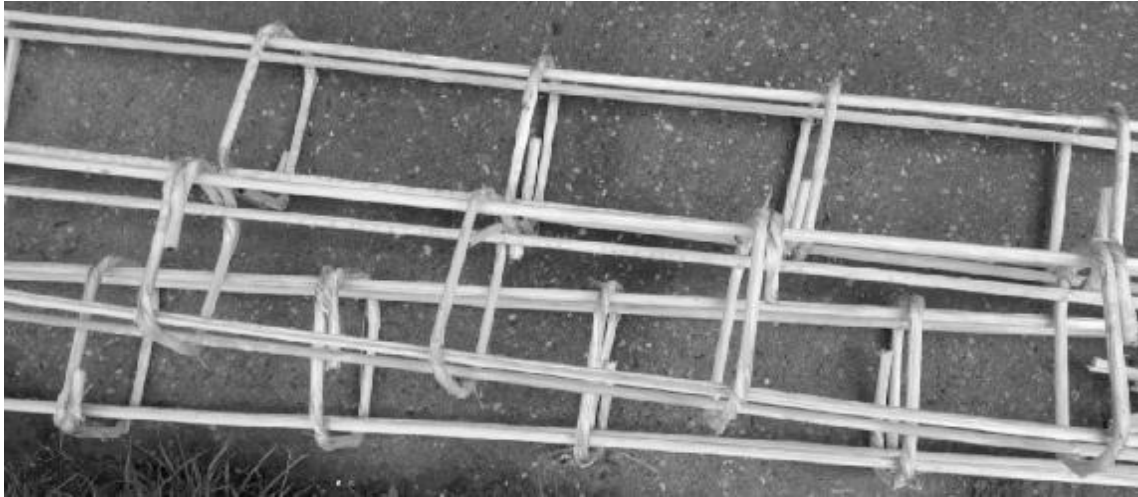
Коришћен је бетон средње вредности чврстоће 49,76 МПа проверене на дан испитивања, а произведен је и уграђен у фабрици бетона „Лафарге“ д.о.о. („Lafarge“ d.o.o.), и при уградњи су узети узорци за потврду чврстоће бетона у експерименту. При справљању бетона коришћен је цемент (Portland cement) СЕМ I 42.5R са адитивима.

Распоред композитних шипки дат је на следећем цртежу:

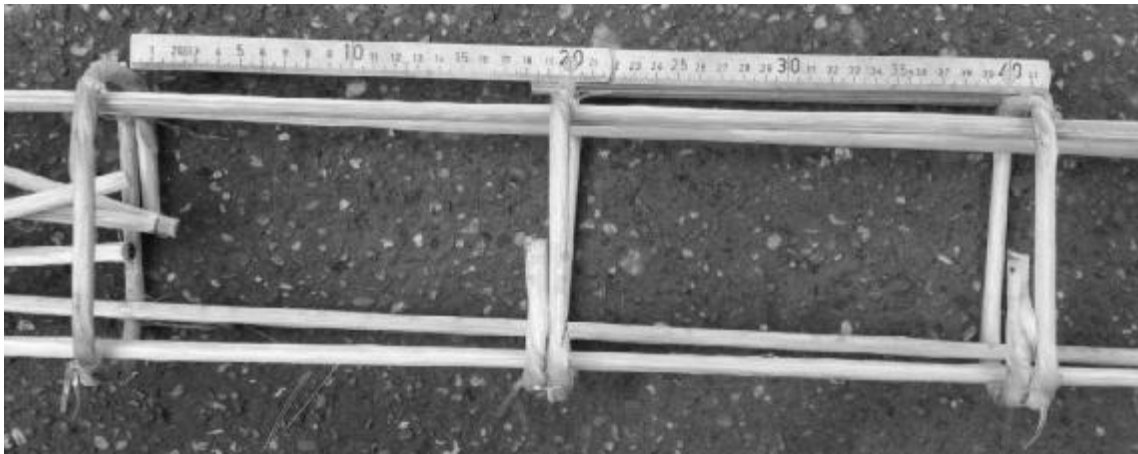


Слика 30. Шема армирања бетонског елемента

Припремљена композитна арматура везивана је у арматурни кош ПЕТ нитима како би избегли свако присуство метала у гредном армиранобетонском елементу и постављена је у глатку оплату третирану оплатним уљем и наливена бетоном. Варирање димензије шипке последица је производног процеса.



Слика 31. Арматурни кош од композитне арматуре



Слика 32. Распоред узенгија од композитне арматуре



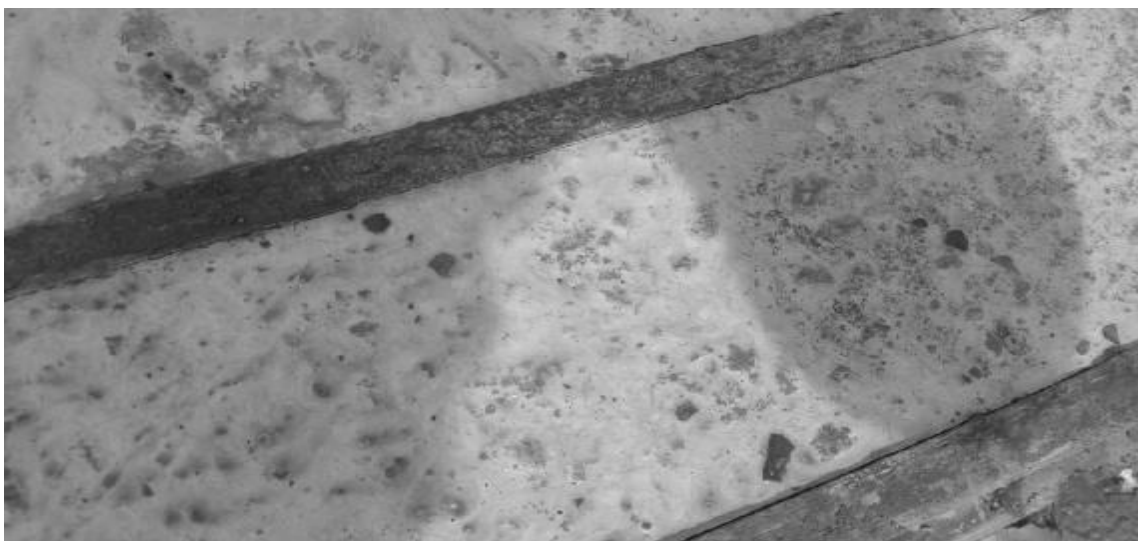
Слика 33. Арматурни кошеви у калупу пре ливења бетонске смеше



Слика 34., 35. и 36. Ливење бетона у калупе



Слика 37. Изливени бетон у калупу



Слика 38. Очврсну бетонски елемент пре вађења из калупа

Испитивање бетонских елемената (греда) је вршено у Институту ИМС у Београду.

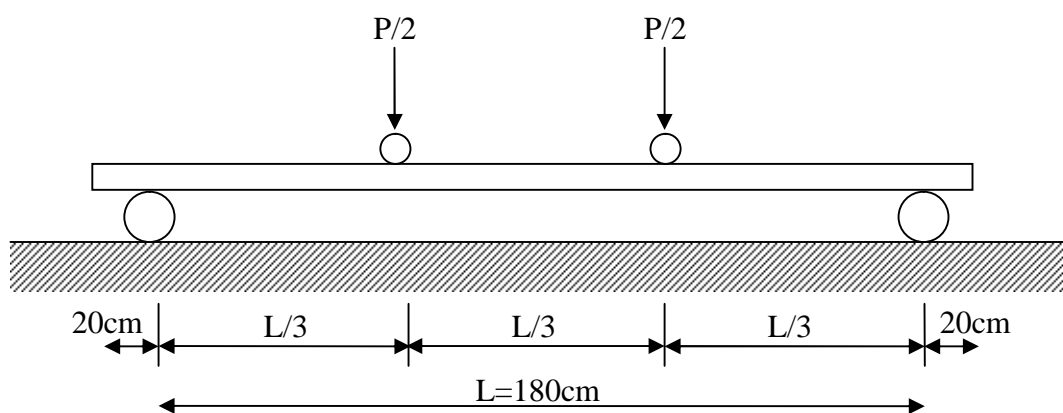
На дан испитивања греда са уграђеном арматуром од композита рађено је испитивањечврстоће бетона ломљењем бетонских узорака узетих при изради греда. Све греде су израђене од истог материјала справљеног у једном циклусу производње. На дан испитивања ломљено је два узорка. Ово испитивање потврђује чврстоћу бетона у гредама са следећим резултатима:

Број узорка	Запреминска маса	Чврстоћа при притиску коцке 20/20cm
	kg/m <sup>3</sup>	MPa
1	2403	49,67
2	2405	49,85

Табела 15. Измерене вредности чврстоће бетона на дан извођења експеримента

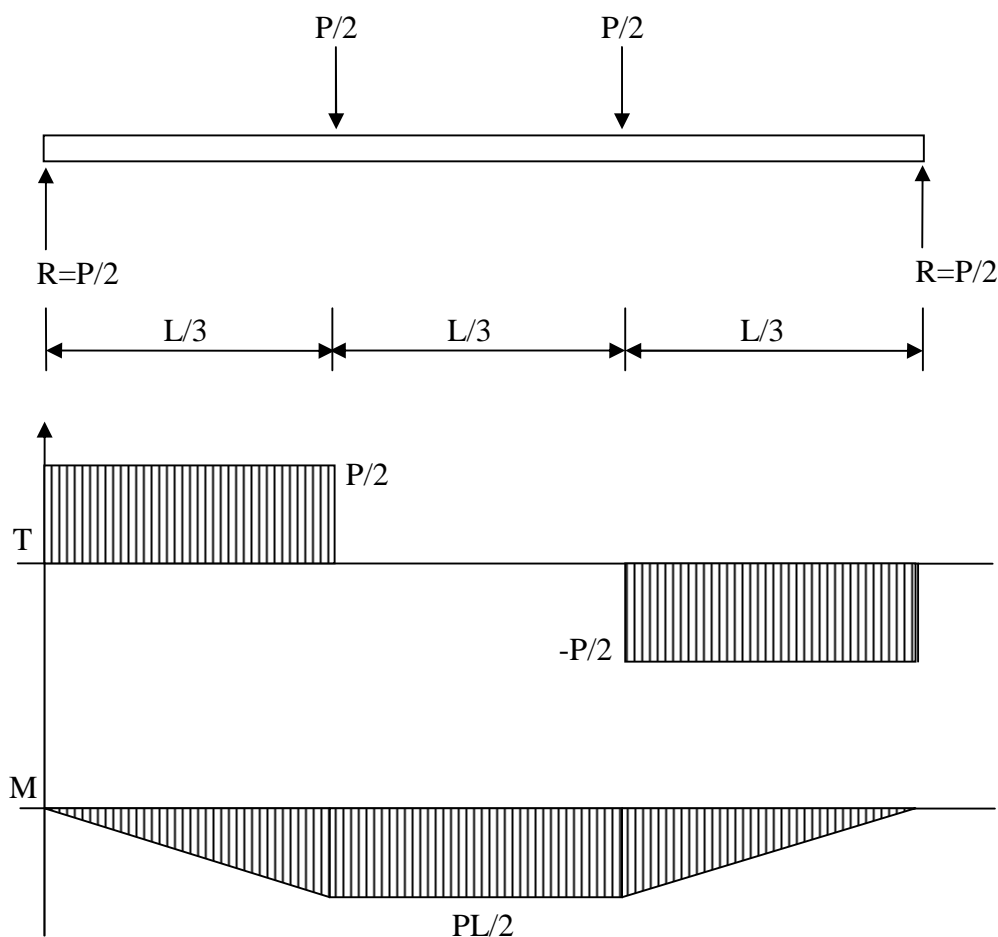
Ове вредности одговарају марци бетона МБ45.

При испитивању бетонских елемената (греда) које је вршено у Институту ИМС прикупљене су информације о насталим прлинама, угибима, напону лома елемента. Лом је рађен наношењем сила на трећинама распона.



Слика 39. Шема наношења оптерећења на гредни елемент

Овакав начин дозвољава да на средњој трећини буде услов чистог савијања без трансверзалне силе.



Слика 40. Статичка шема са дијаграмом момената савијања и трансверзалних сила

Зарад одабира опреме за вршење експеримента, а како је већ наведено у поглављу 4.2. и употребом образаца за одређивање момента при ком долази до лома, одређује се наведени момент а затим и сила којом треба деловати на гредни елемент. Овај податак је потребан због опсега рада хидруличних преса, одабира динамометра и сл.

### ОДРЕЂИВАЊЕ $M_{loma}$ И СИЛЕ $P/2$

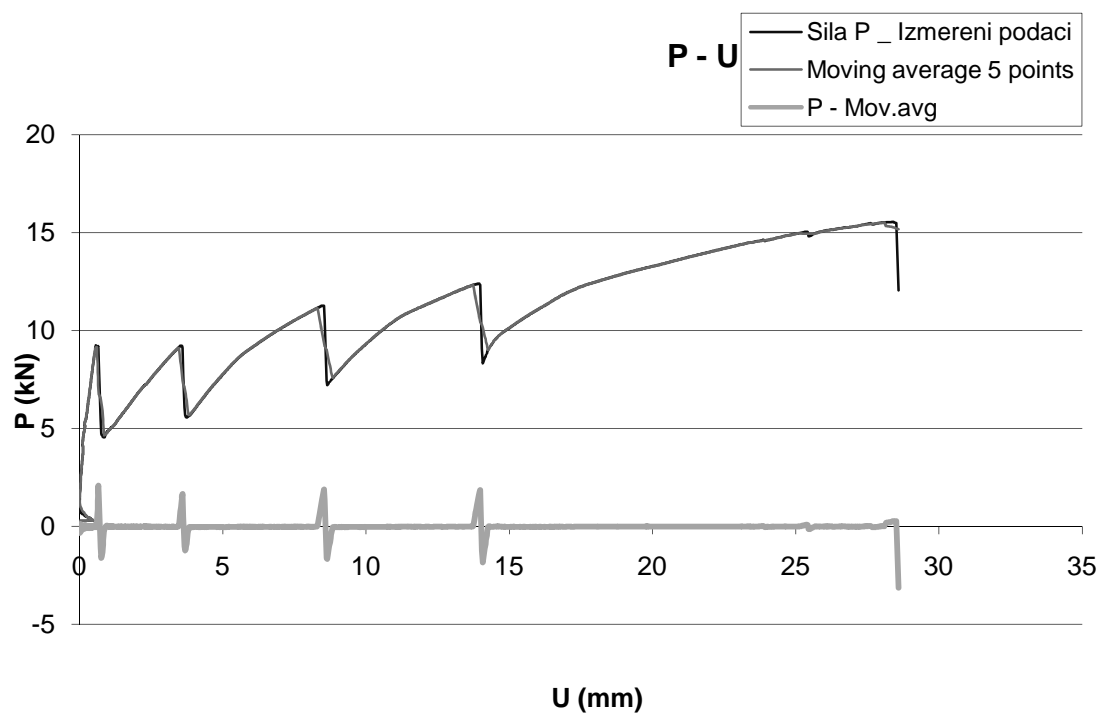
$E_{fpr} =$	$=$	17,5 G.Pa
$f_{b,stv} =$	$=$	49,65 M.Pa
$E_b = 9,25\sqrt{(f_{bk}+10)}$	$=$	35,1 G.Pa
$n_{fpr} = E_{fpr}/E_b$	$=$	0,499
$b =$	$=$	12,0 cm
$d =$	$=$	18,0 cm
$a =$	$=$	2,0 cm
$h = d - a$	$=$	16,0 cm
$A_{fpr} = 2\Phi 8$	$=$	0,89 cm <sup>2</sup>
$\mu = A_{fpr}/bh$	$=$	0,46 %
$k = (\sqrt{(\mu \cdot n_{fpr})^2 + 2m \cdot n_{fpr}}) - m \cdot n_{fpr}$	$=$	0,487
$x = kd$	$=$	7,791 cm
$j = 1 - k/3$	$=$	0,838
$f_{fpr} =$	$=$	375 M.Pa
$M_{loma} = f_{fpr} \cdot A_{fpr} \cdot j \cdot h$	$=$	4,47 kNm
$P/2 = M_{loma}/(L/3) = M_{loma}/0,6$	$=$	7,46 kN

Табела 16. Одређивање момента лома и силу  $P/2$  која узрокује момент лома

Испитивано је 3 узорка армирана композитном арматуром са рециклираним ПЕТ-стакло влакнима у матрици од полимера ради избегавања случајне грешке или дефекта у материјалу, један узорак са челичном глатком арматуром ГА и један контролни узорак за припрему опреме, баждарење и проверу опреме. Композитни узорци су означени бројевима 1,2 и 3 а узорак са челичном глатком арматуром са ознаком 4. Контролни узорак за баждарење је без ознаке и има у себи челичну глатку арматуру. Узорци су испитивани следећим редоследом. Прво је опрема подешена ломљењем пробног узорка а затим су редом ломљени узорци 2,3,1 и на крају узорак број 4. Тим редом ће резултати и бити приказани.



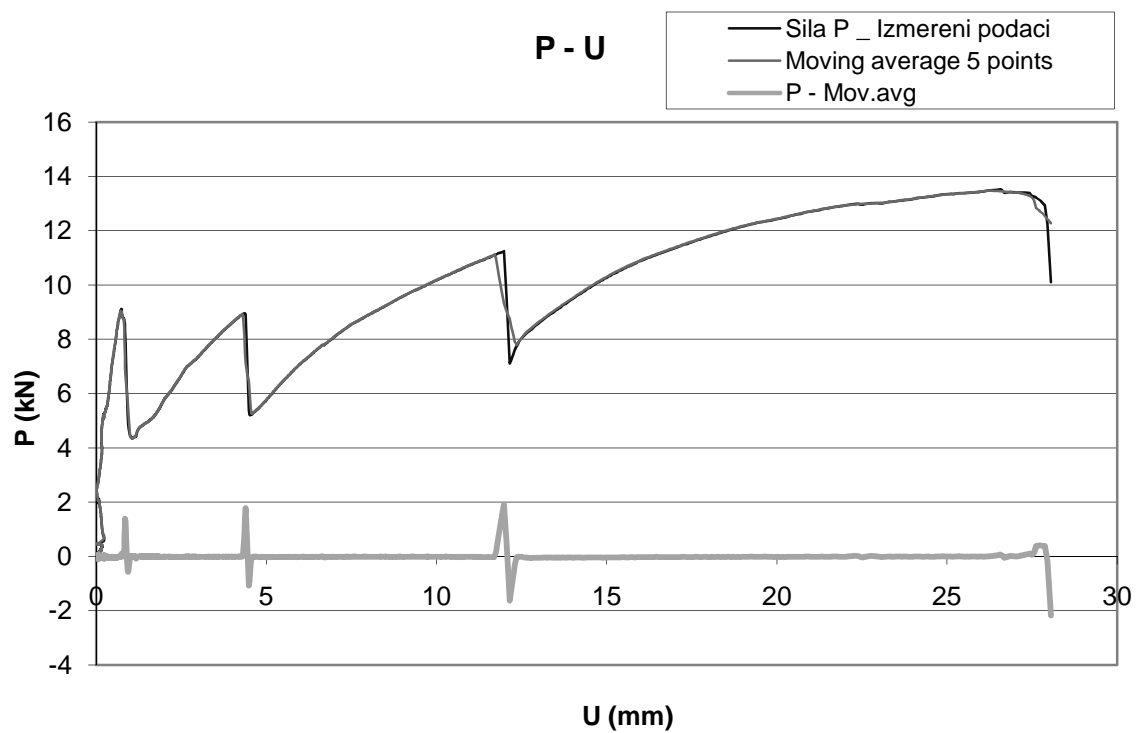
Приступљено је ломљењу наведена четири елемента и добијени су следећи резултати:



Слика 41. Дијаграм сила-угиб \_ композитна арматура греде \_ узоракса ознаком 2 \_ оптерећен до лома



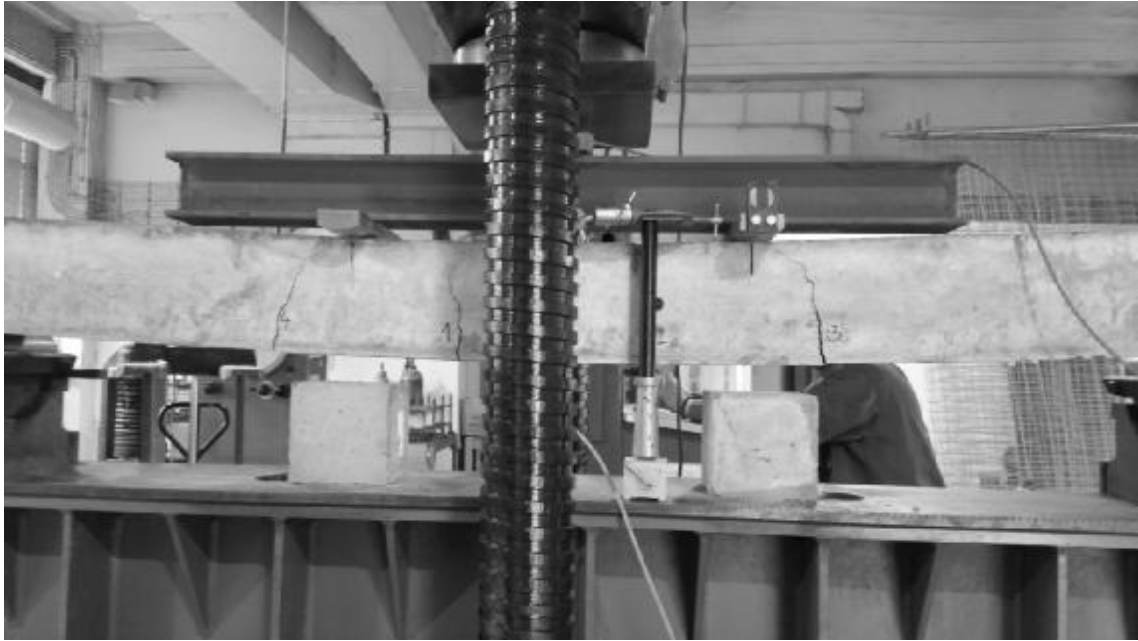
Слика 42. Формирање прелина на узорку са ознаком 2



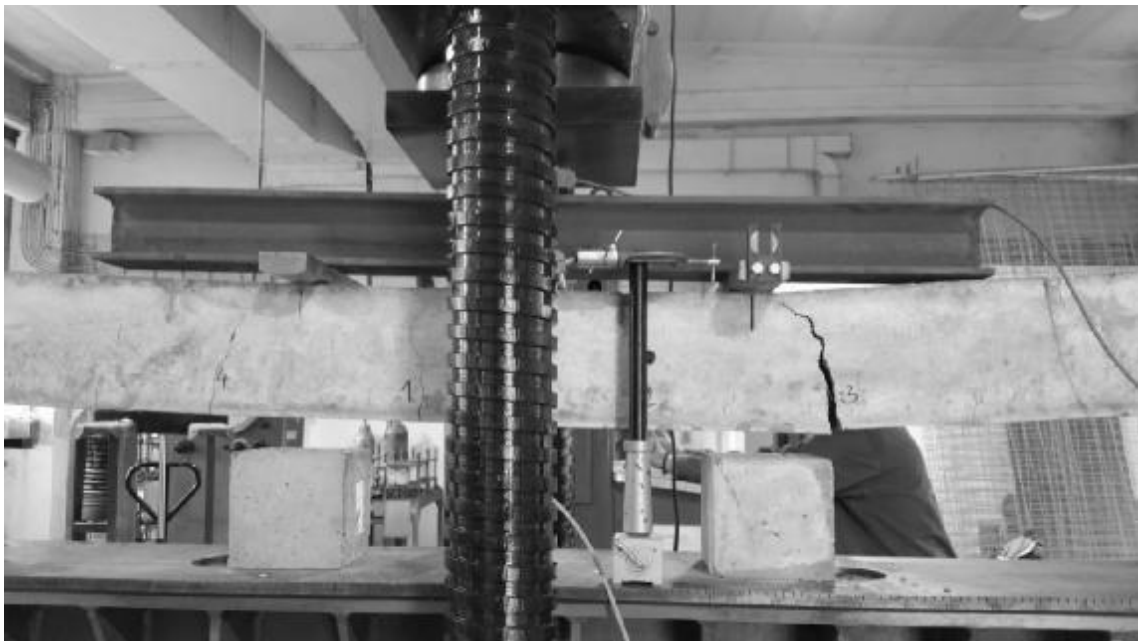
Слика 43. Дијаграм сила-угиб \_ композитна арматура греде \_ узорак са ознаком 3 \_ оптерећен до лома



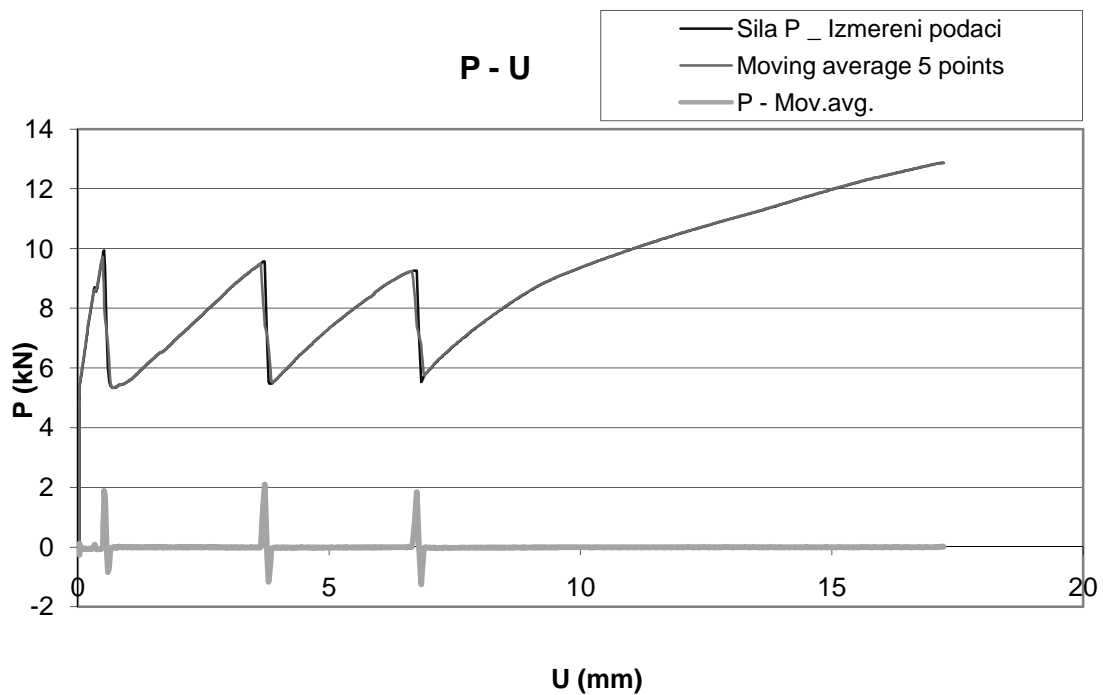
Слика 44. Почетак наношења силе на узорку са ознаком 3



Слика 45. Прслине непосредно пре лома по арматури на узорку са ознаком 3



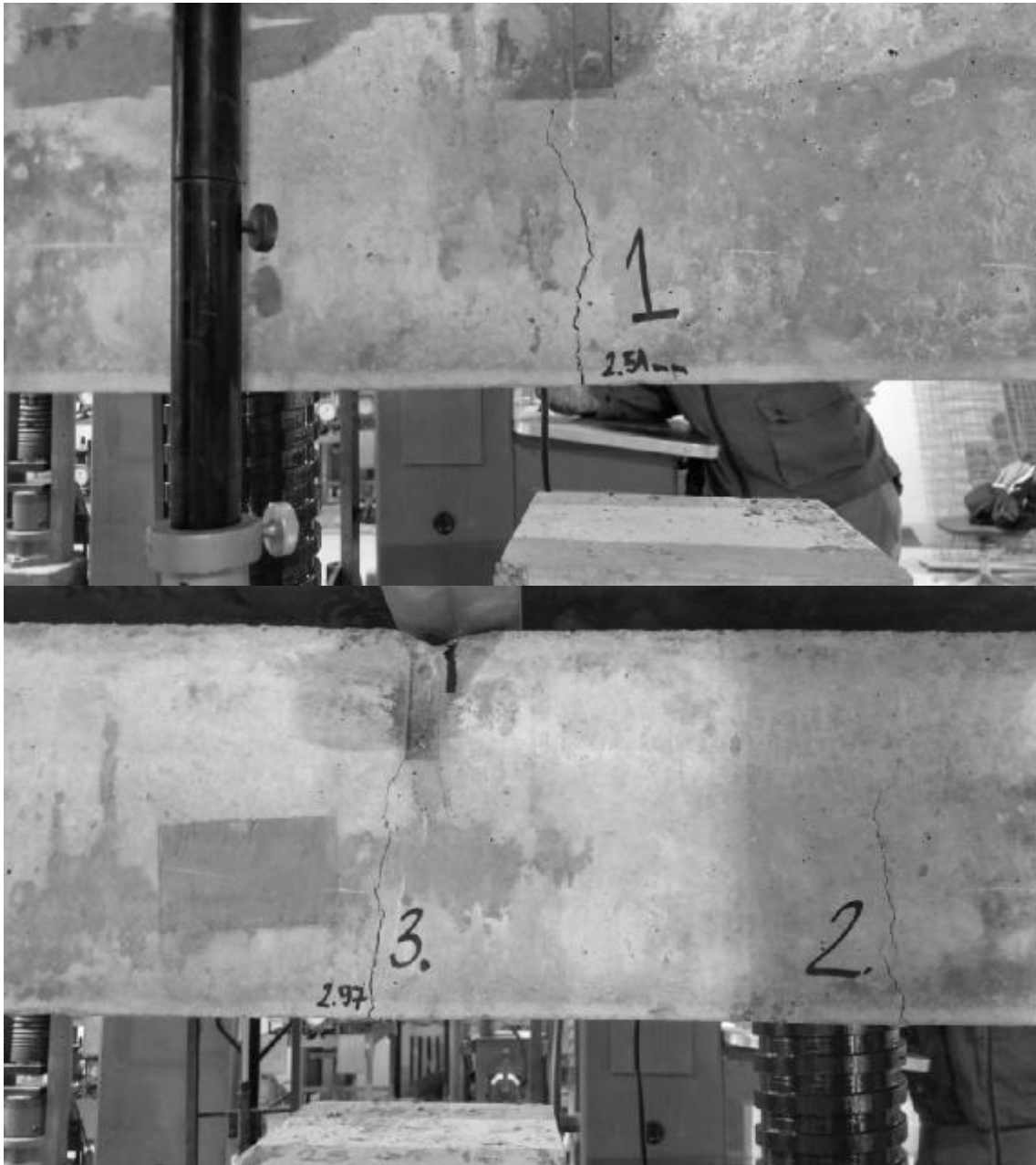
Слика 46. Лом по арматури узорка са ознаком 3 на прслини са ознаком 3



Слика 47. Дијаграм сила-угиб \_ композитна арматура греде \_ узорак са ознаком 1 \_ оптерећена до силе од 12,875 kN па потом растерећена



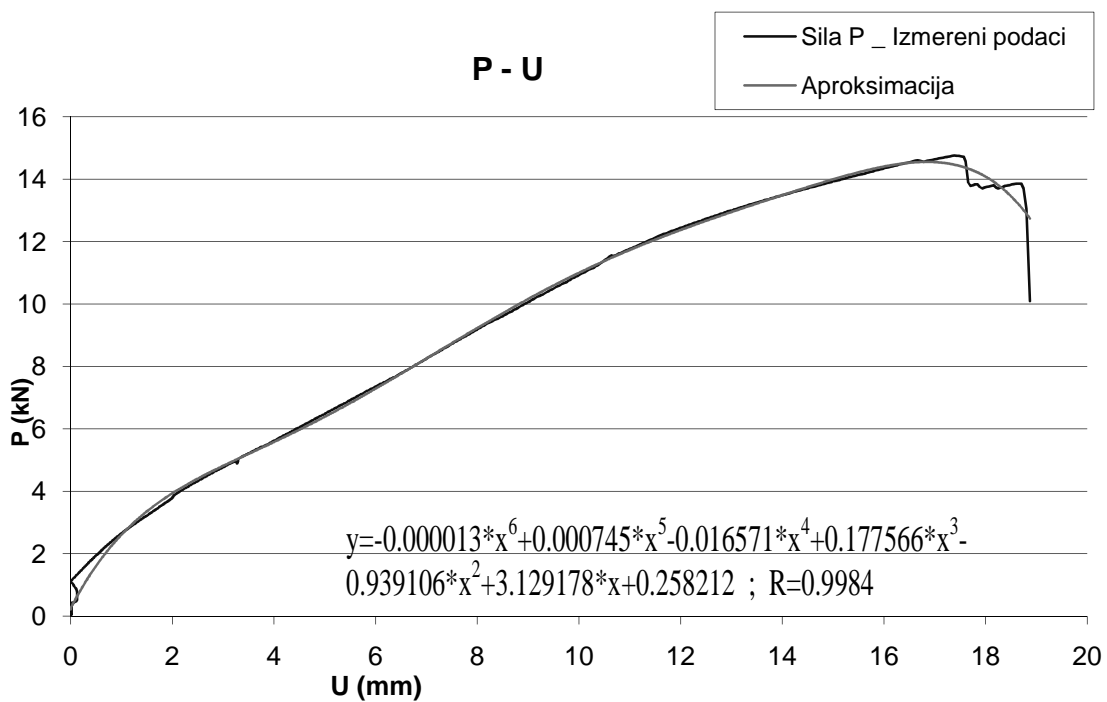
Слика 48. Формирање и означавање прве прслине на узорку са ознаком 1



Слика 49. Мерење величине прлина при сили од 12,875 kN на узорку са ознаком 1 – прва формирана прлина са ознаком 1и друга прлина са ознаком 3 поред којих је уписана вредност у милиметрима



Слика 50. Враћање у првобитни положај греде након растерећења греде на узорку са ознаком 1

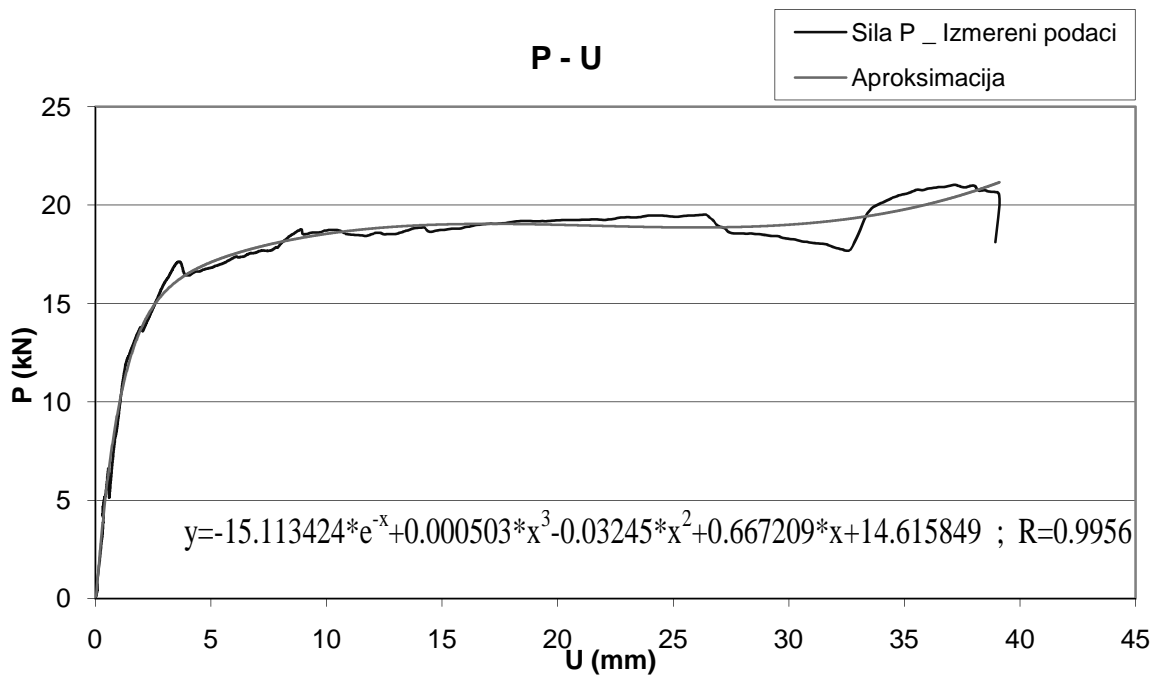


Слика 51. Дијаграм сила-угиб \_ композитна арматура греде \_ узорак са ознаком 1 \_ поново оптерећена до лома \_ са апроксимативном формулом

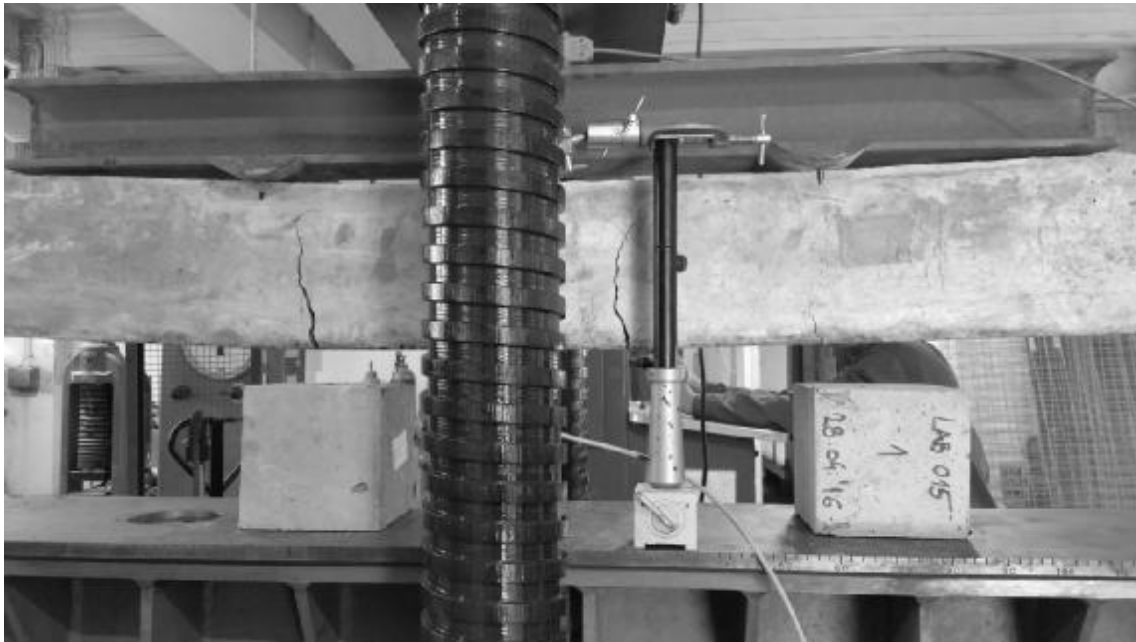


Слика 52. Излед пресека након лома са деламираним композитном арматуром - узорак са ознаком 1

Поред испитивања бетонских елемената са композитном арматуром урађено је испитивање једног узорка са челичном арматуром (ГА 240/360), са ознаком 4, ради упоређивања резултата са подацима из праксе и литературе, као и са испитаним елементима армираних композитном арматуром.



Слика 53 Дијаграм сила-угиб \_ глатка арматура греде ГА 240/360 \_ узорак са ознаком 4 \_ оптерећен до лома \_ са апроксимативном формулом



Слика 54. Формирање прслина на узорку са ознаком 4

Графици сила-угиб дају при формирању прслине дају падове у вредности силе услед промене геометрије носача коју преса не може да испрати и зато се формирају падови вредности на графику. Ово међутим даје могућност одређивања тачне вредности силеи угиба при формирању прслина.



## **6. ЕВАЛУАЦИЈА РЕЗУЛТАТА И ПРЕДЛОЗИ ЗА ДАЉУ УПОТРЕБУ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА ОД ПОЛИМЕРА ОЈАЧАНИХ РЕЦИКЛИРАНИМ ВЛАКНИМА**

### **6.1. Анализа резултата експеримента према критеријумима постављеним кроз анализу литературе**

Резултати експеримента се могу поредити како са подацима из литературе везаним за карактеристике композитне арматуре рађене од не рециклираних материјала и подацима из литературе о карактеристикама стандардних арматура.

#### **6.1.1. Затезна чврстоћа**

Резултати затезне чврстоће композитне арматуре од полимера ојачаног влакнима добијени на кидалици у лаборатори Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду показују разлике у затезним чврстоћама, а ниже добијене вредности, овај композит гурају близу прага употребљивости у носивим (примарним) елементима конструкције.

У два наврата тестирани су узорци материјала. Размак између тестирања је око годину дана. Ова пауза је узрокована потребама и обавезама, како лабораторије тако и особља Технолошко-металуршког факултета. Једно тестирање је било пробно при постављању процеса и рецептуре за производњу испитиваног композита и дало је резултате затезне чврстоће од 230МПа до 250 МПа. У другом тестирању, након више од годину дана тестиран је материјал произведен непосредно за потребе уградње у бетонске елементе коришћене у овом експерименту, показало се да се резултати произведеног материјала разликују за око 30% и имају вредност од 375МПа.

Одавде можемо закључити да је процес производње потребно константно контролисати и да проблеми настају услед производње која није константна.

Услед промењених услова и карактеристика материјала долази до промене карактеристика композита. Рецимо рециклирани ПЕТ је показао да, иако произвођач ове сировине покушава да контролише квалитет, материјал ипак даје

друге карактеристике као нпр. температуру топљења која се разликује и тако долази до слабије ламинације и лошијег пријањања за влакна у композиту.

Одавде можемо закључити да је контрола квалитета рециклираног материјала изузетно битна за процес производње композита.

Такође обзиром на релативно ниске затезне чврстоће за композитне материјале, приближно једнаке квалитету GA240/360 или RA400/500 али и обзиром на коефицијенте сигурности који за челик износи око 0,5-0,6, а за композит са стакленом арматуром при употреби у елементима примарне конструкције који према анализираним иностраним правницима износи приближно 0,2-0,25, може се закључити да композитни материјал произведен у лабораторији Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду у овом тренутку није погодан за коришћење у виду арматуре у елементима носиве (примарне) конструкције архитектонских објеката, док у елементима који морају поседовати конструктивна својства (секундарни конструктивни елементи) или трпе мала напрезања за које је, према упутству ISIS CANADA из 2007. коефицијент сигурности 0.75, могу се даље анализирати добијени резултати. Предлог је употреба за армирање бетонских елемената као што су корубе и оплате (изгубљене оплате), фасадне облоге, урбани мобилијар, елементи унутрашњих и спољних ограда у оквиру архитектонских објеката, кровни панели тј. кровни покривачи, итд. Ови елементи које можемо назвати секундарним елементима и који се третирају као неносиви конструктивни елементи или привремено носиви (нпр. елементи изгубљене оплате и слично) директно утичу на формирање примарних конструктивних елемената архитектонских објеката.

### **6.1.2. Прслине и угиви**

Анализом добијених прслина које имају вредности непосредно пред лом од 2,97 можемо утврдити коефицијент пријањања бетона и композитне арматуре и он износи:

$$k_b = \frac{w}{\frac{f_{frp}}{E_{frp}} * \frac{h_2}{h_1} * (d_c * A)^{1/3} * 2,2} = 1,54 * 10^{-3}$$

Gde је

- $w$  – ширина прслине на затегнутој страни елемента (mm)
- $k_b$  – коефицијент који зависи од везе бетон арматура  
за композит који има сличне карактеристике везивања као бетон =1  
за композит који има лошије карактеристике везе >1  
за композит који има боље карактеристике везе <1  
у недостатку података =1,2
- $h_1$  – растојање од затегнуте ивице пресека до неутралне осе (mm)
- $h_2$  – растојање од тежишта затегнуте арматуре до неутралне осе (mm)
- $d_c$  – растојање од затегнуте ивице пресека до тежишта затегнуте арматуре (mm)
- $E_{frp}$  – модул еластичности композитне шипке (MPa)
- $A$  – површина попречног пресека бетона који окружује шипке и има исто тежиште као арматура подељена са бројем шипки (mm<sup>2</sup>)
- $f_{frp}$  – затезна чврстоћа арматурне шипке (MPa)

Овај податак даље треба проверити кроз тест чупања који ће се спровести у неком од предвиђених наредних истраживања.

Дозвољени угиб према табели 10. Из поглавља 4.2 се креће од L/500, за употребу елемента који су ношени, до L/180 за равне кровове, што износи за одабрани распон елемента у експерименту (180cm) између 3,6mm до 10 mm. Док у правилнику за бетон и армирани бетон ПБАБ'87 ове вредности одговарају L/300 за гредне елементе и L/150 за конзоле.

У табели 15 стоји преглед угиба у тренутку појаве прслина за све узорке на којима је рађено испитивање.

Узорак бетона	прва преслика		друга преслика		трећа преслика		четврта преслика		Зона у којој се врши армирање челиком добијеним малим преслика							
	сила (МПа)	угај (mm)	сила (МПа)	угај (mm)	сила (МПа)	угај (mm)	сила (МПа)	угај (mm)	сила (МПа)	угај (mm)	сила (МПа)	угај (mm)	сила (МПа)	угај (mm)	сила (МПа)	угај (mm)
2	5,1	0,75	8,95	4,25	11,24	11,90	/	/	/	/	/	/	11,52	26,57	/	/
3	5,2	0,65	5,2	5,55	11,27	8,52	12,383	13,944	/	/	/	/	15,54	38,4	/	/
1.40 12.875MN	9,95	0,53	3,57	3,7	10,55	6,23	/	/	/	/	/	/	14,63	26,65	/	/
1.00 10.000	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	20,96	38,09	/	/
4	5,1	0,41	5,58	0,57	13,6	1,96	13,8	1,96	17,14	3,66	18,74	10,32	15,53	26,42	20,96	38,09

Табела 17. Максимални добијени угиби , на армиранобетонском елементу, а према критеријуму вредности силе у тренутку формирања прелине

### 6.1.3. Провера стварног напона у арматури

Провера напона у арматури након извршеног експеримента врши се убацивањем добијених параметара за силу тј. момент савијања срачунат преко силе која је измерена при лому армиранобетонског гредног елемента, у изрази из поглавља 4.2.

ОДРЕЂИВАЊЕ НАПОНА $f_{fr}$		
$E_{fpr} =$	$=$	17,5 G.Pa
$f_{b,stv} =$	$=$	49,65 M.Pa
$E_b = 9,25\sqrt{(f_{bk}+10)}$	$=$	35,1 G.Pa
$n_{fpr} = E_{fpr}/E_b$	$=$	0,499
$b =$	$=$	12,0 cm
$d =$	$=$	18,0 cm
$a =$	$=$	2,0 cm
$h = d - a$	$=$	16,0 cm
$A_{fpr} = 2\Phi 8$	$=$	0,89 cm <sup>2</sup>
$\mu = A_{fpr}/bh$	$=$	0,46 %
$k = (\sqrt{(\mu \cdot n_{fpr})^2 + 2m \cdot n_{fpr}}) - m \cdot n_{fpr}$	$=$	0,487
$x = kd$	$=$	7,791 cm
$j = 1 - k/3$	$=$	0,838
$f_{fr} =$	$=$	375 M.Pa
$P/2 =$	$=$	7,77
$M_{loma} = (P/2) \cdot (L/3)$	$=$	4,66 kNm
$f_{fr} = M_{loma}/(A_{fpr} \cdot j \cdot h)$	$=$	390,66 M.Pa

Табела 18. Одређивање напона у композитној арматури у односу на на силу  $P/2$  која узрокује момент лома

Добијени напон лома као и дилатације премашују рачунати напон лома за незнатне вредности што потврђује да изабрани метод прорачуна одговара потребама предвиђања понашања елемента на основу улазних података у виду затезних чврстоћа добијених експерименталним путем.

### 6.1.4. Дужина сидрења

Дужина сидрења, при употреби у бетона чврстоће преко 30 МПа, директно зависи од затезне чврстоће композитне арматуре јер, како смо већ навели, при

овим чврстоћама бетона, смицање се дешава унитар арматурне шипке од полимера ојачаних влакнима, односно долази до раскидања везе влакна и матрице која држи влакна у снопу.

### **6.1.5. Цена**

Тачну цену не можемо израчунати из разлога количински мале производње у истраживачке сврхе али можемо дати оквирну процену.

Цена композита од стаклених влакана у епоксидној матрици према ценовнику у прилогу, фирме „Композит арматура“ д.о.о. износи 0,54 евра по метру дужном, без ПДВ-а, за пречник композитне шипке од 10mm. Из једне тоне ове композитне арматуре добија се 7325m дужних арматурне шипке пречника 10mm, тако да из овог односа можемо срачунати оквирну цену од 3790,08 € за једну тону. Цена композитне арматуре произведене у лабораторији Технолошко-металуршког факултета у Београду, због ниже цене ПЕТ материјала у односу на епоксидне смоле, мора бити нижа од наведене цене за композитну арматуру фирме „Композит арматура“ д.о.о. али се нећемо бавити тачним прорачуном јер за испитивани композит није успостављена серијска производња па ћемо се задржати на претпоставци.

Под условом да усвојимо наведену цену од 3790,08 € по тони и ако знамо да је затезна чврстоћа ове композитне арматуре блиска затезној чврстоћи глатке челичне арматуре ГА, можемо да усвојимо наведену цену од 3790,08 € по тони, а експериментом на кидалици показано је да може достићи и вредности ребрасте арматуре РА (шипке композитне арматуре из прве производне серије), можемо добити оквирне вредности као смерницу за даља разматрања.

Цена једног килограма челичне арматуре креће се око 0,83 € без ПДВ-а, што даје цену једне тоне од 6515 € Из једне тоне челика добија се 1600 m дужних челичне арматурне шипке пречника 10mm која има тежину од 0,62kg по метру дужном. Како је затезна чврстоћа приближно једнака код челичне арматуре и композитне арматуре употребљене у експерименту, можемо да кажемо да замењујући пречници одговарају у односу 1/1, па за вредност од 1000 евра можемо набавити 1931,34 m композитне арматуре из експеримента пречника 10 mm или 245,58 m челичне арматуре такође пречника 10 mm. Однос ове две

величине даје разлику од 1685,76 m што је 87,3% у корист композитне арматуре, или 7,86 пута више композитне арматуре према истом пречнику са истим или сличним карактеристикама по питању затезне чврстоће.

Овде можемо још рачунати и коефицијенте умањења механичких карактеристика дате у поглављу 4.2. како би добили рачунске напоне за челичну и композитну арматуру.

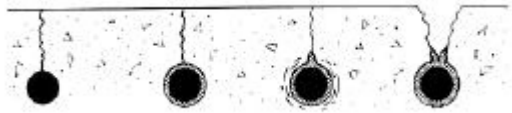
Из прегледа правилника у поглављу 4.2. види се да се рачунска затезна чврстоћа челичне арматуре редукује на приближно 60% од напона великих издужења, док се за композитну, када се користи у конструктивним елементима, она редукује на приближно 20% од затезне чврстоће при кидању. Из ове рачунице долазимо до разлике од 61% у корист композитне арматуре.

Ако се пак, композитна арматура употребљена у експерименту, користи у елементима који нису примарна конструкција, где се за композитну арматуру рачунска чврстоћа добија као 75% вредности затезне чврстоће при кидању, добија се 89,8% у корист композитне арматуре у односу на челичну глатку арматуру ГА.

Из наведеног видимо да је цена композитне арматуре изузетно повољна и да може, по критеријуму цене, успешно парирати арматури израђеној од челика.

#### **6.1.6. Отпорност на корозију**

Обзиром на материјале од којих је композит сачињен треба напоменути отпорност на корозију као врло погодну позитивну особину. Ова особина даје добар и ваљан разлог за употребу композитних материјала. Избегавају се неповољни утицаји бубрења услед настанка корозије а тиме и деградације бетонске конструкције (Слика 46.)



Слика 46. Развијање прелине услед дејства корозије на челичну арматуру<sup>36</sup>



1 – бетон

2 – челична арматура

3 – корозија по површини арматуре

Слика 47. Врсте деградације бетона услед дејства корозије на челичну арматуру<sup>37</sup>

Према свему напред наведеном може се закључити да је у овом тренутку могућност примене композита од полимера ојачаног рециклираним ПЕТ-стакло влакнима, произведеног на Технолошко-металуршком факултету у Београду, у носивој (примарној) конструкцији, ограничена обзиром на недостатак регулативе и на релативно ниске затезне чврстоће композита који је тестиран у експерименту.

<sup>36</sup> <http://www.gaa.com.au/uploads/images/Galv%20Reo.JPG>

<sup>37</sup> <http://www.scielo.mec.pt/img/revistas/cpm/v33n3/33n3a03f1.jpg>



## **6.2. Предлози за даљу употребу композитних материјала од полимера ојачаних рециклираним влакнима као и композитног материјала испитаног експериментом**

### **6.2.1. ФОРМИРАЊЕ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНАТА НОСИВЕ (ПРИМАРНЕ) КОНСТРУКЦИЈЕ УПОТРЕБОМ КОМПОЗИТНЕ АРМАТУРЕ ОД ПОЛИМЕРА ОЈАЧАНЕ РЕЦИКЛИРАНИМ ПЕТ СТАКЛО ВЛАКНИМА**

Композити од рециклираних материјала, како рециклираних влакана тако и матрице, кроз експериментално утврђивање, својим карактеристикама, показују потенцијал који их може квалификовати за формирање конструктивних елемената архитектонских објеката. Услови за примену оваквих композита минимално подразумевају испуњавање наведених захтева утврђених анализом литературе у глави 4, тачније укључују задовољавање захтева постојећих правилника који регулишу област употребе композитних материјала од полимера ојачаних влакнима уз напомену да се експериментално мора утврдити и степен редукције физичких и механичких особина због могућег одступања истих услед процеса експлоатације који предходи рециклажи и поновној употреби, као и утицаја самог процеса рециклаже на перформансе и карактеристике материјала.

Треба нагласити да на територији Републике Србије, услед недостатка законске регулативе, и даље не би требало употребљавати композитне материјале од полимера ојачаних влакнима. И поред недостатка регулативе, композити налазе своју примену у санацији објеката уз домишљатост пројектаната којима би увођење адекватне регулативе изузетно помогло. Доношење регулативе која треба да регулише област употребе композита од полимера ојачаних влакнима је неминовност, а овим истраживањем указујемо на ту чињеницу и потребу да се то уради у што краћем року. Такође ово истраживање даје увид у даљи развој композита уз укључивање друштвено одговорног фактора који се тиче рециклирања и очувања животне средине.

Како би оваква истраживања, у пољу које се бави употребом рециклираних материјала, дала пуни допринос потребна је регулатива која би у првом кораку

регулисала употребу композита од материјала из примарне производње, а тиме омогућила даље дефинисање прописа и за композите од рециклираних материјала.

Препорука је да се, обзиром на недостајућу регулативу везану за ову област, при прорачуну елемената армираних композитима поштују чланови 114. И 118. ПБАБ'87 Републике Србије дата у поглављу 4.2.

Могућност примене композита од рециклираних материјала, произведеног у лабораторији Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, у конструктивним елементима архитектонских објеката по питању носиве (примарне) конструкције може се разматрати под условом да се унапреде механичке карактеристике материјала и при томе обезбеди константност истих кроз процес производње за шта постоје индикације у виду пробних тестирања.

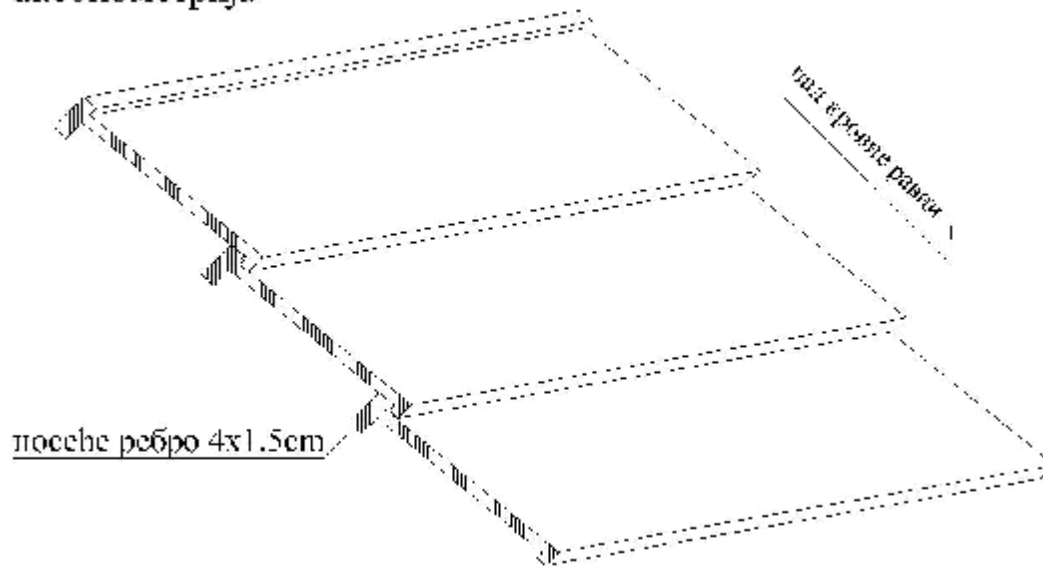
Потребно је постићи константност квалитета улазних рециклираних материјала, прилагодити процедуре квалитетима материјала који се користе при производњи и постићи константност процеса производње, а у виду услова процеса који утичу на формирање веза између матрице и влакана. Како је процес развијања овог новог материјала и даље у току може се сматрати да евентуално добијени бољи резултати могу квалификовати овај материјал за примену.

### **6.2.2. КРОВНИ ЕЛЕМЕНТИ**

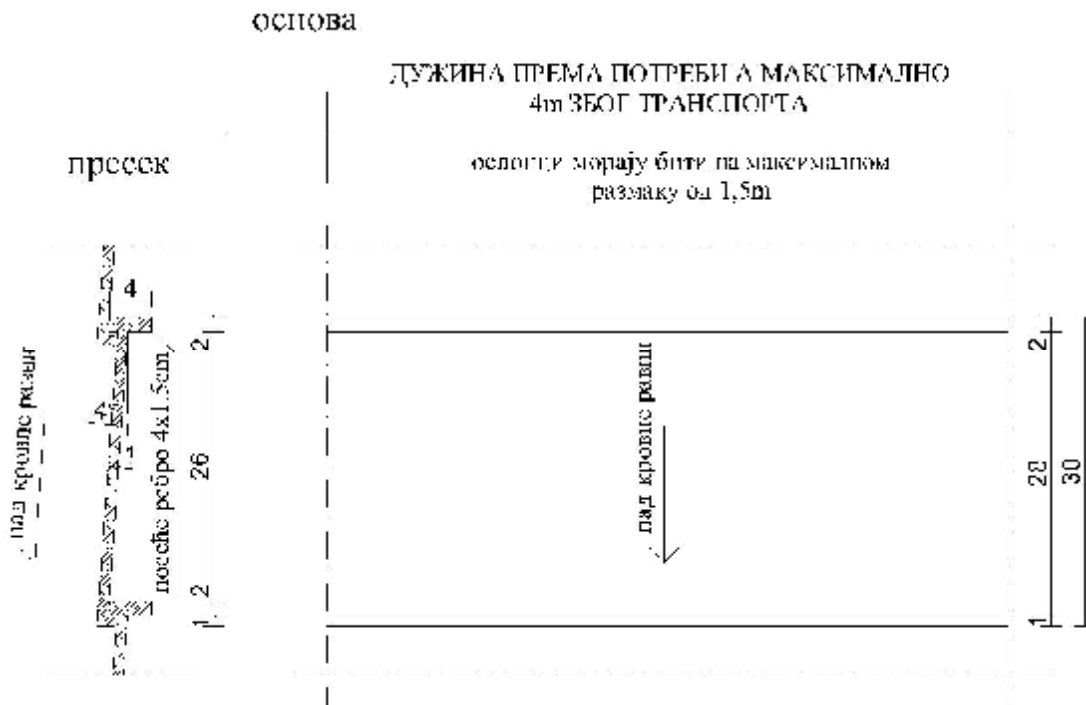
Кровни елементи у виду кровних покривача или панела могу се формирати употребом композитних армираних шипки, које смо испитали експерименталним путем, и при том формирању може се рачунским путем потврдити њихова способност да прихвате оптерећења од снега и ветра. У графичким прилозима дају се предлози димензија и обликовања елемената који се формирају у металним калупима уз вибрирање, а од бетона високих чврстоћа са ситнозрним агрегатом армираних композитним шипкама од рециклираних материјала произведеним по технологији постављеној на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду а чије су карактеристике утврђене експериментално.

Предлог формирања префабрикованог кровног елемента

аксонометрија



Слика 48. Аксонометрија предложеног префабрикованог префабрикованог елемента као кровног покривача



Слика 49. Пресек и основа предложеног префабрикованог елемента као кровног покривача

## АНАЛИЗА ОПТЕРЕЋЕЊА

Сопствена тежина елемента	0,06 kN/m
Снег и ветар $1,00\text{kN/m}^2 * 0,3\text{m}$	<u>0,33 kN/m</u>
Укупно	0,39 kN/m

Равномерно расподељено оптерећење на носачу за чији статички систем усвајамо просту греду распона 1,5 метара па је максимални момент савијања једнак

$$\frac{q * l^2}{8} = 0.39 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * \frac{(1.5\text{m})^2}{8} = 0.11 \text{ kNm}$$

Уколико је елемент дужине 4m обзиром да су му ослонци на максимално 1m добија се статички систем континуалног носача који има повољније утицаје.

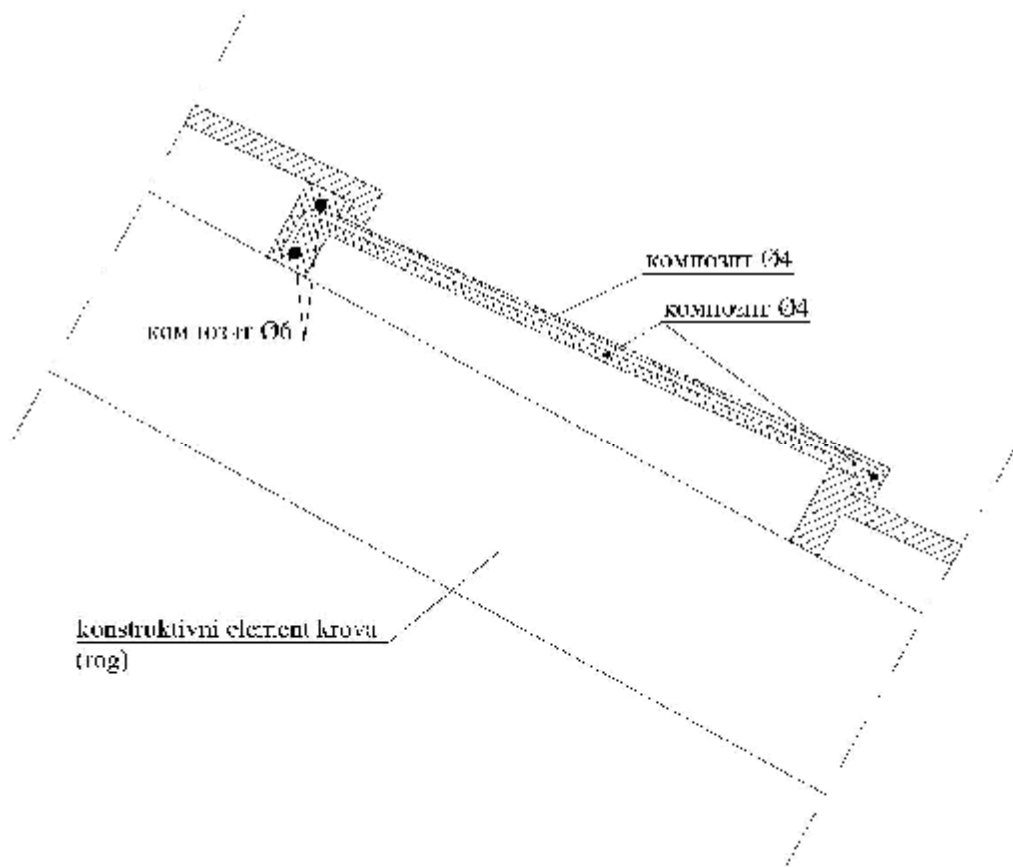
У транспорту носи само сопствену тежину па је оптерећење једнако

$$0.06 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * \frac{(4\text{m})^2}{8} = 0.12 \text{ kNm}$$

### ОДРЕЂИВАЊЕ ПОТРЕБНЕ АРМАТУРЕ

Mn=	0,12 kNm
v=	1,5
Mloma =	0,18 kNm
Efpr =	= 17,5 G.Pa
fbk =	= 60 M.Pa
Eb = $9,25\sqrt{(fbk+10)}$	= 38,1 G.Pa
fgrp =	= 390,0 M.Pa
kvi=	= 1,3
$\sigma_d$ =	= 300,0 MN
ngrp = Efpr/Eb	= 0,460
b=	= 2,0 cm
d=	= 4,0 cm
a=	= 0,6 cm
h= d-a	= 3,4 cm
Afpr.pot = Mloma/(\(\sigma_d \cdot j \cdot h\))	= 0,24 cm <sup>2</sup>
Усвојено: 1Ф6	= 0,28 cm <sup>2</sup>
$\mu$ = Afpr/bh	= 4,12 %
k = $(\sqrt{(\mu \cdot n_{fpr})^2 + 2m \cdot n_{fpr}}) \cdot m \cdot n_{fpr}$	= 0,822
x = kd	= 2,794 cm
j = 1 - k/3	= 0,726

Табела 19. Одређивање потребне површине попречног пресека арматуре за префабриковани кровни елемент



Слика 50. Диспозиција арматуре у префабрикованом елементу

### 6.2.3. ИЗГУБЉЕНЕ ОПЛАТЕ И КОРУБЕ

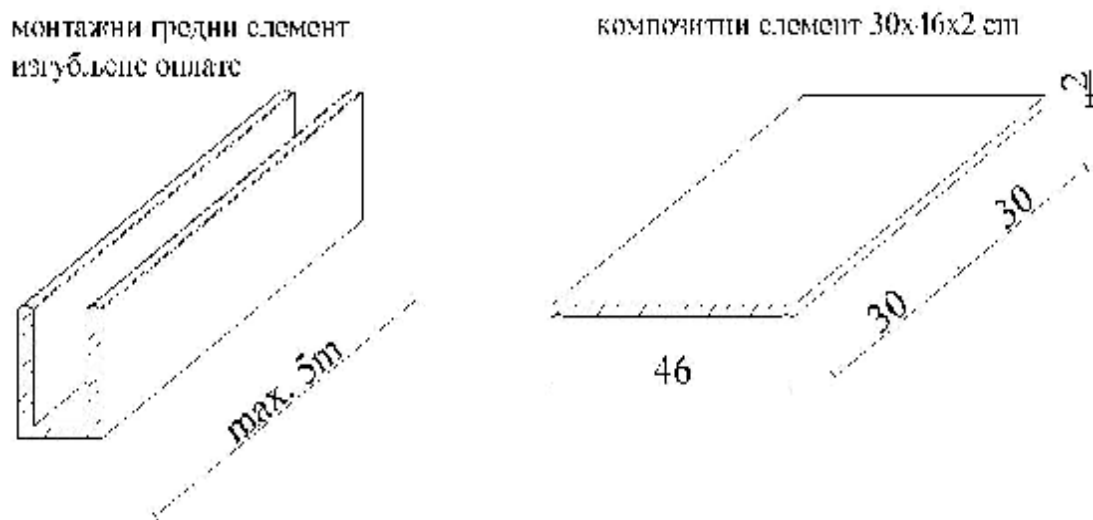
Формирање конструктивних елемената архитектонских објеката зависи у многоме и од технологије и начина формирања самих конструкција. Ово имплицира да се овакав композитни материјал може употребити као елемент за обликовање и заштиту конструкције у фази формирања тј. ливења армиранобетонских елемената армираних према важећим правилницима.

Оваква оплата или калуци могу имати функцију оплате која остаје уграђена у елемент и након његовог формирања.

Обзиром да као елемент изгубљене оплате са конструктивним елементом функционише као спрегнут вишеделни пресек повећава носивост примарне конструкције.

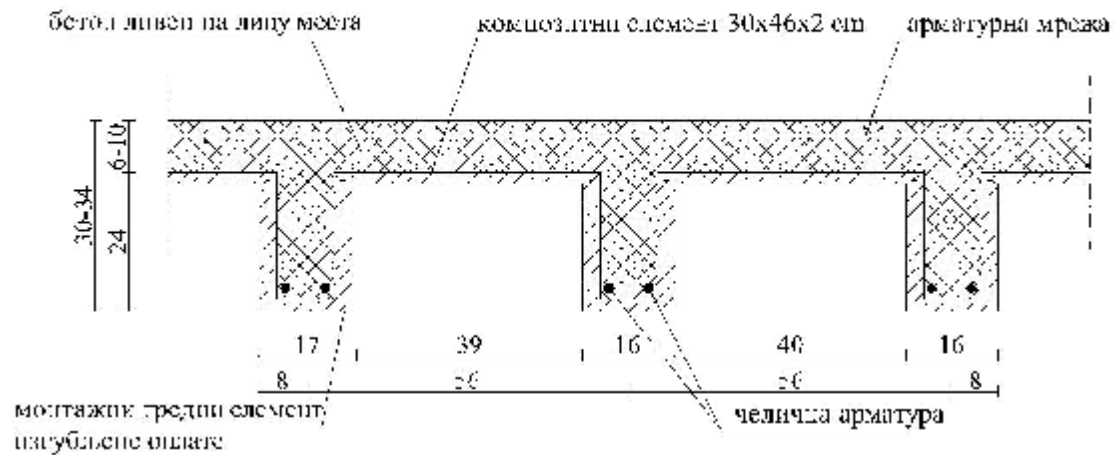
Формирање оплатних елемената подразумева формирање композитних елемената у калупима који одговарају жељеној форми од бетона са ситнозрним агрегатом армираног композитним шипкама од рециклираних материјала произведеним по технологији постављеној на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду.

Профилација елемената изгубљене оплате обезбеђује носивост на распонима који одговарају распонима конструкције или постављању подупирача. Пошто изгубљена оплата остаје уграђена у елемент конструкције, а притом је префабриковани елемент што омогућава бољу завршну обраду у металним калупима, може послужити као завршна обрада површине са веома добрим визуелним карактеристикама.



Слика 51. Аксонометрија предложеног префабрикованог елемента као изгубљене оплате за формирање мешуспратне носеће конструкције

### пресек кроз таваницу



Слика 52. Пресек међуспратне носеће конструкције и префабрикованог елемента изгубљене оплате

### АНАЛИЗА ОПТЕРЕЋЕЊА (за плочу од 10cm)

Сопствена тежина елемента	0,36 kN/m
Ношени терет (бетонска маса)	2,04 kN/m
Укупно	2,40 kN/m

Равномерно расподељено оптерећење на носачу за чији статички систем усвајамо просту греду распона 1,5 метара па је максимални момент савијања једнак

$$q \cdot l^2 / 8 = 2,43 \text{ kN/m} \cdot 5 \text{ m} \cdot 5 \text{ m} / 8 = 7,6 \text{ kNm}$$

$$\frac{q \cdot l^2}{8} = 2,43 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \frac{(5 \text{ m})^2}{8} = 7,6 \text{ kNm}$$

Уколико је елемент масималне дужине 5m

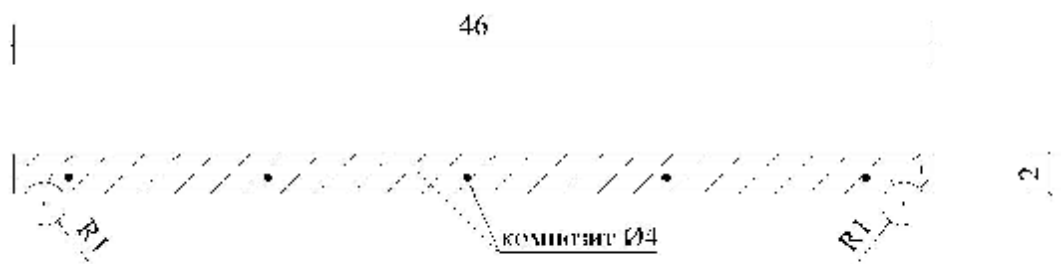
При транспорту носи само сопствену тежину па је оптерећење једнако

$$0,06 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \frac{(4 \text{ m})^2}{8} = 0,12 \text{ kNm}$$

### ОДРЕЂИВАЊЕ ПОТРЕБНЕ АРМАТУРЕ

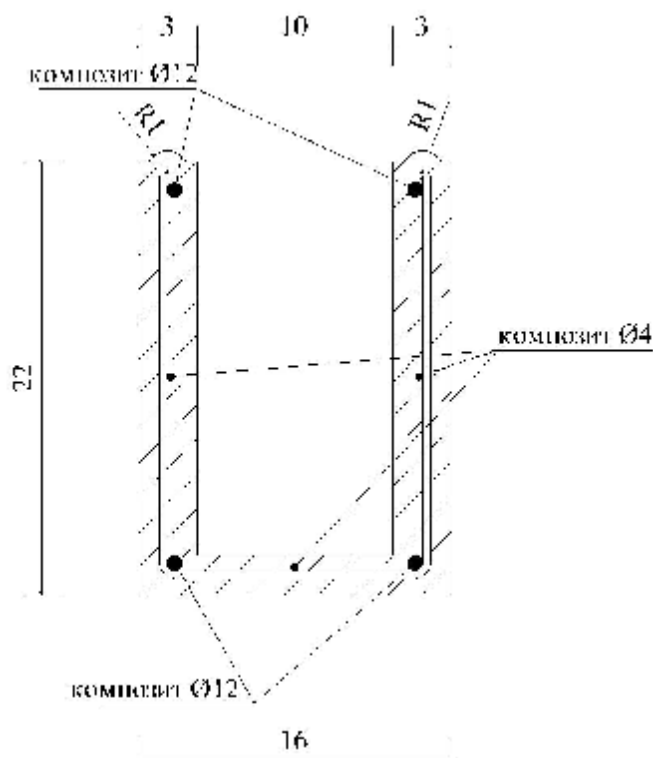
Mn=	7,5 kNm
v=	1,5
Mloma =	11,25 kNm
E <sub>fpr</sub> =	= 17,5 G.Pa
f <sub>bk</sub> =	= 60 M.Pa
E <sub>b</sub> = 9,25√(f <sub>bk</sub> +10)	= 38,1 G.Pa
f <sub>fpr</sub> =	= 390,0 M.Pa
k <sub>vi</sub> =	= 1,3
σ <sub>d</sub> = f <sub>fpr</sub> · k <sub>vi</sub>	= 300,0 M.Pa
n <sub>fpr</sub> = E <sub>fpr</sub> /E <sub>b</sub>	= 0,460
b=	= 6,0 cm
d=	= 22,0 cm
a=	= 1,0 cm
h= d-a	= 21,0 cm
A <sub>fpr,pot</sub> = M <sub>loma</sub> /(σ <sub>d</sub> ·j·h)	= 2,33 cm <sup>2</sup>
Усвојено: 2Φ12	= 2,26 cm <sup>2</sup>
μ = A <sub>fpr</sub> /bh	= 1,79 %
k = (√(μ·n <sub>fpr</sub> ) <sup>2</sup> + 2m·n <sub>fpr</sub> ) - m·n <sub>fpr</sub>	= 0,702
x = kd	= 14,733 cm
j = 1 - k/3	= 0,766

Табела 20. Одређивање потребне површине попречног пресека арматуре за префабриковани елемент изгубљене оплате



Слика 53. Диспозиција арматуре у префабрикованом елементу

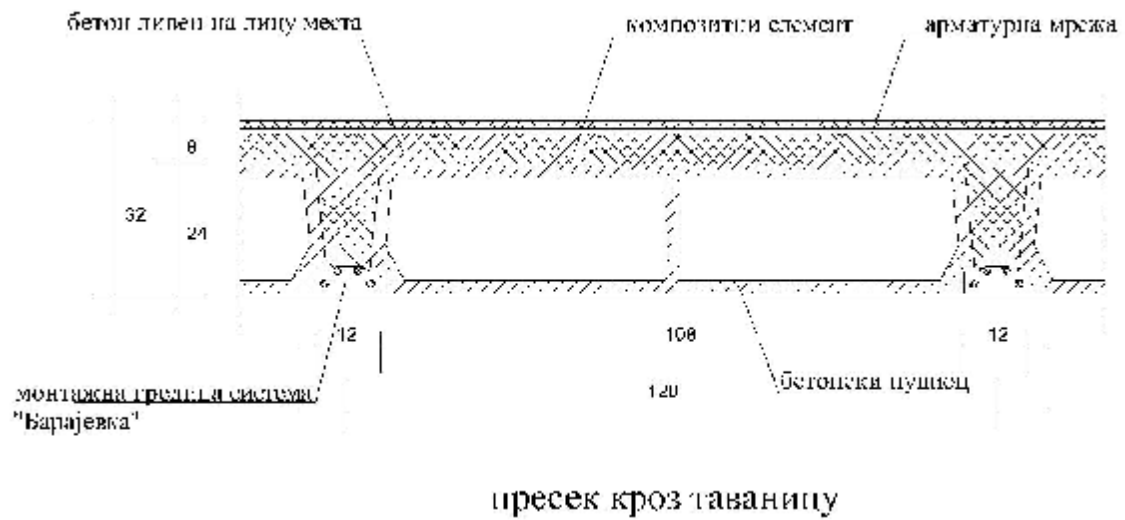




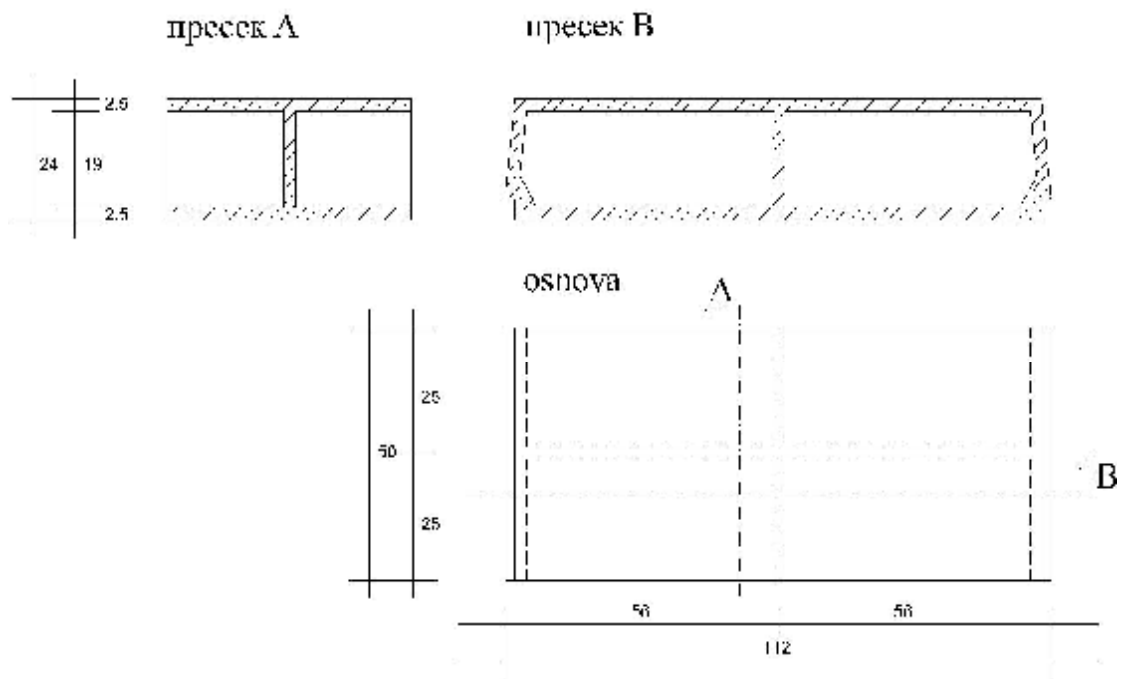
Слика 54. Диспозиција арматуре у префабрикованом елементу

Коруба, пуниоц или испуна као базни елемент за формирање конструкције може се формирати композитима од рециклираних материјала. Обзиром на механичке карактеристике које дозвољавају савладавање већих распона могуће је формирати пуниоце који имају веће распоне него стандардни пуниоци од опеке. Оваква употребна омогућила би економичнију употребу примарне конструкције која се формира према корубама и која након што бетон очврсне преузима функцију преноса оптерећења док корубе остају као елемент испуне. Овакви пуниоци могли би да премосте веће распоне а тиме смање потребу за нпр. употребом подупирача и оплате.

У графичким прилозима дају се предлози димензија и обликовања елемената од бетона са ситнозрним агрегатом армираних композитним шипкама од рециклираних материјала произведеним по технологији постављеној на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду. Такође се даје прорачун који даје оквирну процену савладаних распона при употреби оваквих елемената.



Слика 55. Пресек међуспратне носеће конструкције и префабрикованог елемента - корубе



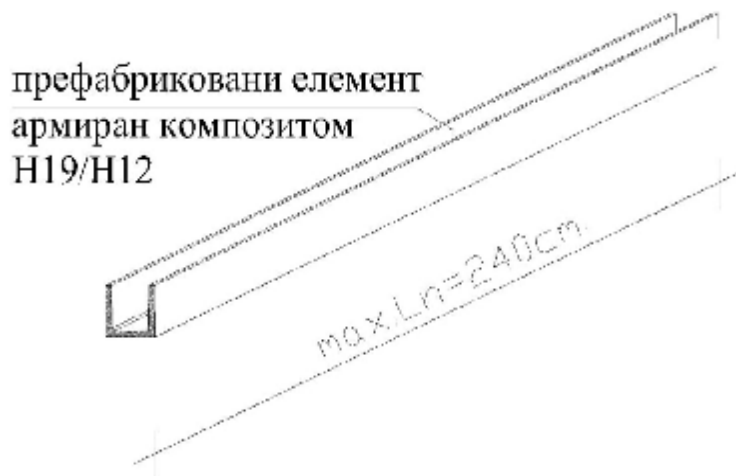
Слика 56. Основа и пресеци префабрикованог елемента – корубе за формирање међуспратне носеће конструкције

#### 6.2.4. НАДВРАТНЕ И НАДПРОЗОРНЕ ГРЕДЕ

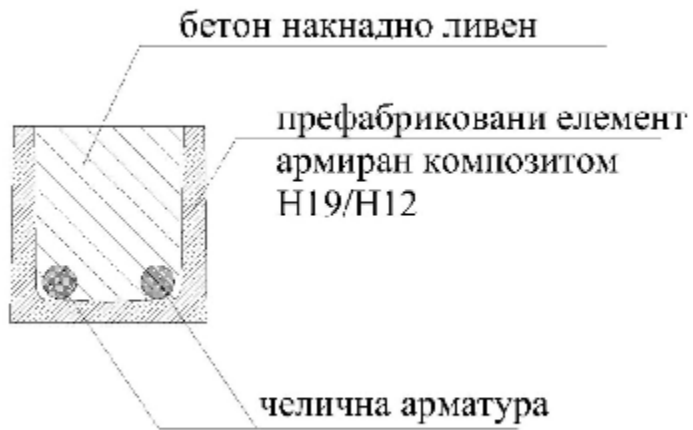
Надвратне и надпрозорне греде могу се формирати на лицу места тј. на самом градилишту као полупрефабриковани елементи који се као изгубљена оплата постављају на пројектовану позицију, а затим се у изгубљену оплату поставља челична арматура која преузима конструктивну улогу након стезања бетонске масе. Овакви елементи префабриковане изгубљене оплате могу се формирати употребом композитних арматурних шипки које смо испитали експерименталним путем. При том формирању може се рачунским путем потврдити њихова способност да прихвате оптерећења од снега и ветра.

У графичким прилозима дају се предлози димензија и обликовања елемената од бетона са ситнозрним агрегатом армираних композитним шипкама од рециклираних материјала произведеним по технологији постављеној на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду.

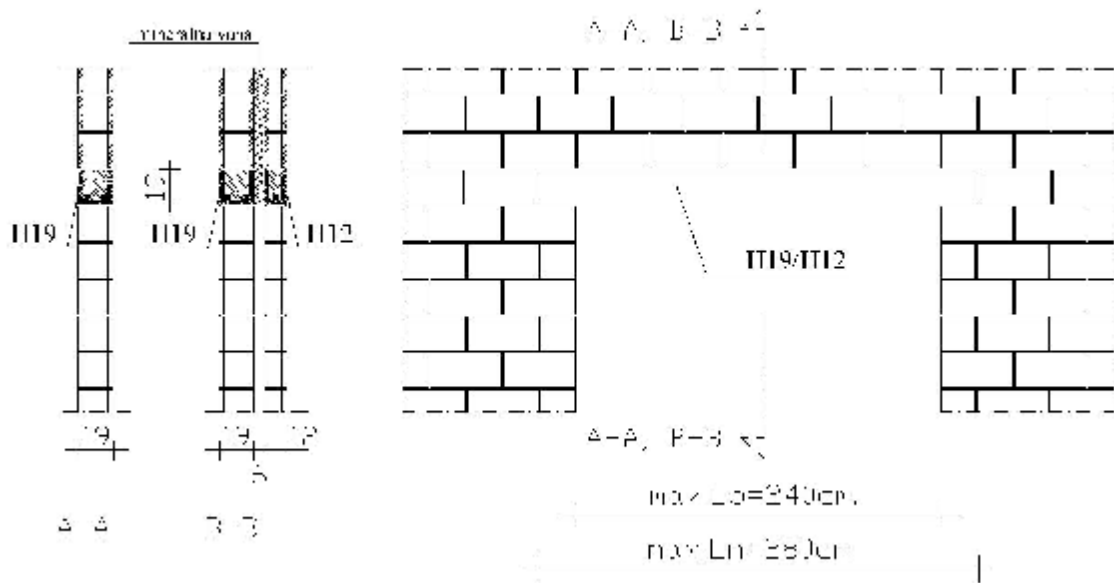
Такође прорачун даје процену савладивих распона при употреби оваквих елемената.



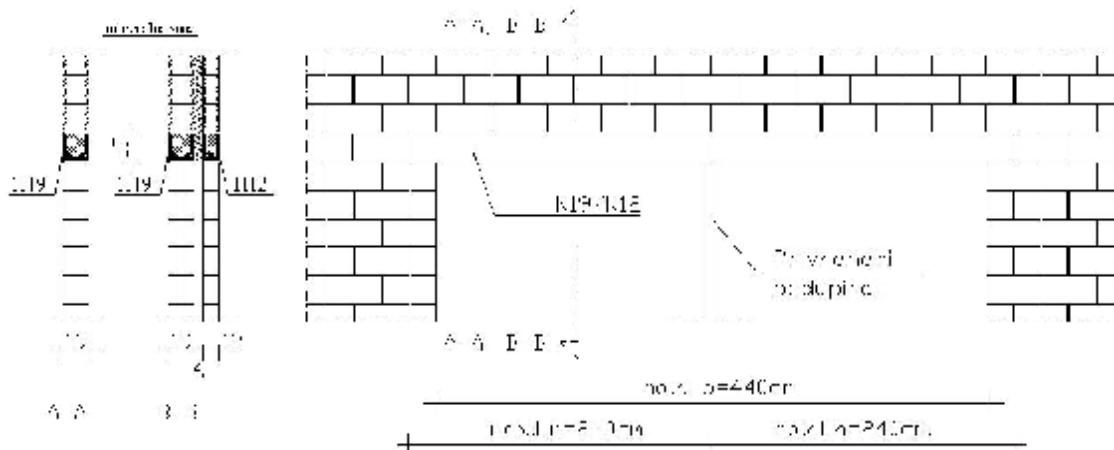
Слика 57. Аксонометријски приказ префабрикованог елемента надпрозорника-надвратника



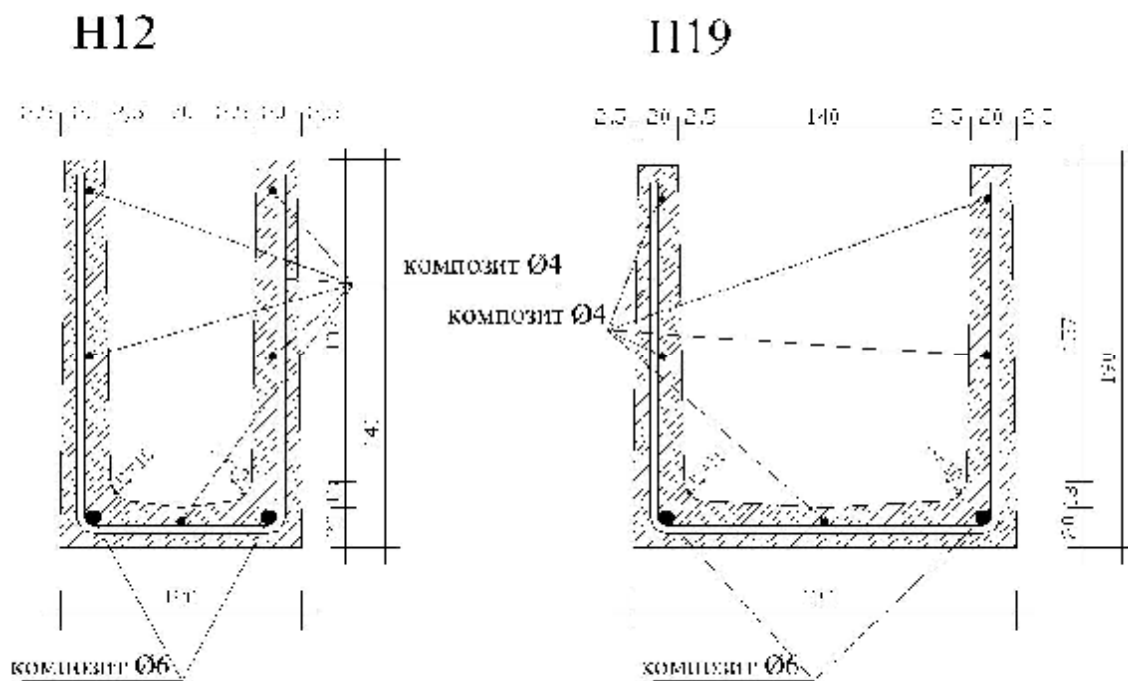
Слика 58. Пресек формираног елемента надпрозорника-надвратника



Слика 59. Диспозиција елемента у зиду за распон до 240 cm



Слика 60. Диспозиција елемента у зиду за распон преко 240 cm са подупирачем у фази монтаже



Слика 61. Диспозиција композитне арматуре префабрикованог елемента

### 6.2.5. ФАСАДНИ ЕЛЕМЕНТИ

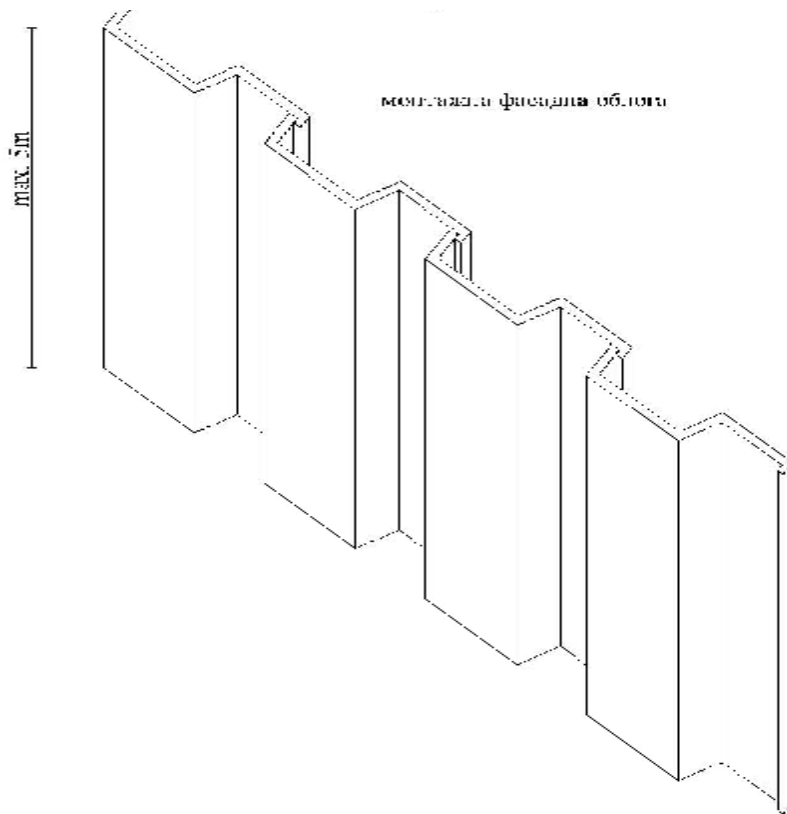
Фасадни елементи архитектонских објеката у виду панела или линијских елемената (брисолеји и слично) могу се формирати употребом композитних арматурних шипки, које смо испитали експерименталним путем, и при том формирању може се рачунским путем потврдити њихова способност да прихвате оптерећења од снега и ветра. Као и код кровних елемената и елемената партера начињених од бетона, тј. код елемената који се налазе у спољној средини која је агресивнија по питања утицаја на употребљене материјале, врло важна особина је отпорност на корозију. Деградација услед утицаја корозије на челичну арматуру у елементима доводи до деградације самих фасадних елемената (Слика ...).



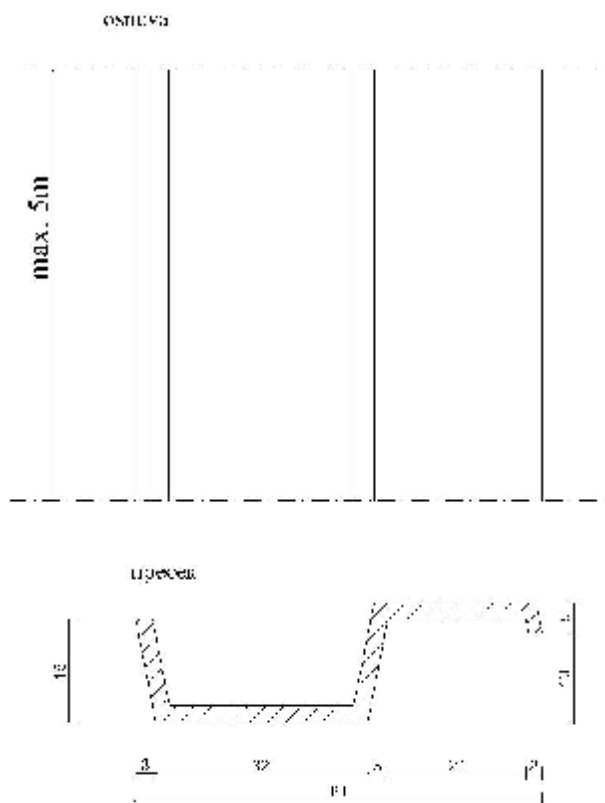
Слика 62. Фасадни елементи деградирани корозијом<sup>38</sup>

---

<sup>38</sup> [http://www.drc-associates.com/albums/concrete/images/t\\_Genesee3.jpg](http://www.drc-associates.com/albums/concrete/images/t_Genesee3.jpg)



Слика 63. Предложено решење монтажног фасадног елемента - аксонометрија



Слика 64. Предложено решење фасадног елемента – основа и пресек

## 6.2.6. УРБАНИ МОБИЛИЈАР, ОГАРДЕ И ЕЛЕМЕНТИ ПАРТЕРНОГ УРЕЂЕЊА

Врло важна особина код елемената који се налазе у спољној средини која је агресивнија по питања утицаја на употребљене материјале је отпорност на корозију. Деградација услед утицаја корозије (Слика ...) на челичну арматуру у елементима доводи до деградације елемента. За елементе партерног уређења везаним за архитектонске објекте мора бити обезбеђена трајност и постојаност иако су најчешће неискоришћени елементи по питању оптерећења. Овакви елементи су најчешће армирани минаималним процентима армирања, а арматура служи да прихвати непланиране напоне затезања у бетону услед утицаја топлотних дилатација, влаге и инцидентних (непланираних) оптерећења.

Зелени зидови као елементи у архитектури који су додатно изложени утицају влаге и воде услед тога што служе као станиште биљака јесу још једна од примена где би некорозивно својство композита дошло до изражаја и понудило могуће ређење формирања оваквих елемената.

Фонтане, као елемент партерног уређења који трпи утицаје воде такође можемо узети у разматрање.



Слика 65. Деградација бетона услед утицаја корозије и инцидентног оптерећења<sup>39</sup>

<sup>39</sup> <http://assets.inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2011/08/2asean-martindale-outside-the-planter-boxes-05.jpg>





Слика 66. Деградиција бетона услед неадекватног армирања<sup>40</sup>



Слика 67. Деградиција бетона услед утцаја корозије<sup>41</sup>



Слика 68. Деградиција бетона услед утцаја инцидентног оптерећења<sup>42</sup>

<sup>40</sup> <http://www.blogto.com/upload/2011/05/2011523-street-caution.jpg>

<sup>41</sup> [https://d12m281y1f13f0.cloudfront.net/images102/figure\\_54\\_concrete\\_corrosion\\_rebar\\_expansion.jpg](https://d12m281y1f13f0.cloudfront.net/images102/figure_54_concrete_corrosion_rebar_expansion.jpg)

<sup>42</sup> [http://www.eastrand-walling.co.za/img/Concrete\\_Walling/Services/CrackedPanelsConcretePrecastWall.jpg](http://www.eastrand-walling.co.za/img/Concrete_Walling/Services/CrackedPanelsConcretePrecastWall.jpg)



Слика 69. Елементи партерног уређења погодни за армирање композитом<sup>43</sup>



Слика 70. Фонтана као елемент партерног уређења погодног за армирање композитом<sup>44</sup>



Слика 71. Жардињера као елемент партерног уређења погодног за армирање композитом<sup>45</sup>

<sup>43</sup> <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/d0/e2/37/d0e237e168ffd09cb884032c20bf4e79.jpg>

<sup>44</sup> <http://plastolux.com/wp-content/uploads/2013/10/anthonypaul1.jpg>

<sup>45</sup> <http://precast.org/wp-content/uploads/2013/11/Advantage-Precast-Planter.jpg>



Слика 72. Клуа као елемент партерног уређења погодног за армирање композитом<sup>46</sup>



Слика 73. Ограда као елемент партерног уређења погодног за армирање композитом<sup>47</sup>



Слика 74. Префабриковани елемент оградe погодан за армирање композитом<sup>48</sup>

---

<sup>46</sup> [http://www.escofet.com/upload/productos/j06\\_grande\\_producto\\_02.jpg](http://www.escofet.com/upload/productos/j06_grande_producto_02.jpg)

<sup>47</sup> [http://cdn.monolithic.org/vault/img/2013/03/07/51390c2bc29e06981300000f/large\\_sequence1.jpg](http://cdn.monolithic.org/vault/img/2013/03/07/51390c2bc29e06981300000f/large_sequence1.jpg)

<sup>48</sup> <http://cficoncrete.com/wp-content/gallery/precast-ranch-rail-fencing/concrete-fence-rails.jpg>



Слика 75. Ограда као елемент партерног уређења погодог за армирање композитом<sup>49</sup>

### 6.2.7. ОСТАЛИ ЕЛЕМЕНТИ

Шахтови, бетонске цеви, резервоари, ограде саобраћаница, итд.



Слика 76. Инсталациона цев као елемент погодан за армирање композитом<sup>50</sup>

<sup>49</sup> [http://www.gardenfencinglondon.com/wp-content/uploads/2014/05/security-concrete-fences-700x300\\_c.jpg](http://www.gardenfencinglondon.com/wp-content/uploads/2014/05/security-concrete-fences-700x300_c.jpg)

<sup>50</sup> [http://www.olmetitaly.com/public/categorie/foundation\\_pole2\\_1.jpg](http://www.olmetitaly.com/public/categorie/foundation_pole2_1.jpg)

### 6.2.8. Опште напомене

Радам није обухваћено разматрање детаља ослоначких веза.

Сви елементи су рачунати са коефицијентом сигурности од 1,5 и редукацијом затезне чврстоће на 75% од вредности при којој долази до лома.

Освртом на предлоге употребе, установљено понашање елемената кроз експеримент, анализираних образаца, упоређивањем неких ограничења и услова из правилника, као и упутстава који важе у иностранству са важећим у Р. Србији можемо констатовати и да ПБАБ'87 (Правилник за бетон и армирани бетон из 1987. године) јесте добра основа за израду правилника за бетонске елементе армиране композитима од рециклираних материјала и то полимера ојачаних влакнима. Овај принцип коришћења правилника за армирање бетона челичном арматуром је спроведен у свим земљама у којима су усвојени правилници уз консултовање постављених правилника у другим земљама и експериментална испитивања и доказивања.

### 6.3. Остварење постављених циљева и реализација задатака истраживања

Примарни циљ истраживања је успостављање релација између конструктивних карактеристика композита начињених од рециклираних материјала са карактеристикама композита начињених од нерциклираних али и резултата ових анализа и истраживања са прописима који важе како код нас тако и у иностранству. Дат је преглед материјала који би били погодни за даља истраживања.

У оквиру истраживања успостављене су практичне релације између рециклираних сировина, материјала, композита, као и композитног материјала уграђеног у конструктивни армиранобетонски елемент. Ове релације се образлажу у поглављу 6.1. дисертације.

Секундарни циљ истраживања је да се у односу на постављене релације установи даљи оквир истраживања и да се дају препоруке за исти као и да се установи област примене композитног материјала произведеног на Технолошко-металуршком факултету за који су експериментално утврђене карактеристике у овом истраживању. Закључци се износе у оквиру поглавља 6. 2. - Предлози за даљу употребу композитних материјала од полимера ојачаних рециклираним влакнима.

Постављени задаци истраживања су у потпуности консекветно реализовани:

- дат је преглед материјала и процеса који се користе при производњи композитних елемената,
- експериментално су утврђене карактеристике елемената сачињених од полимера ојачаних рециклираним ПЕТ-стакло влакнима
- успостављена су научна теоријска сазнања о потенцијалу увођења рециклираних материјала у употребу при формирању конструктивних елемената архитектонских објеката,
- дефинисане су основне смернице за моделовање конструктивних елемената архитектонских објеката сачињених од композита и отворено је поље даљег истраживања зарад могуће имплементације употребе оваквих композита у прописе и праксу
- сагледана је могућност операционализације стечених знања у области архитектонског пројектовања и архитектонског конструкторства као и могући правци даљих истраживања
- Указано је на потребу усаглашавања важећих правилника и законодавних решења Р. Србије која се тичу области везаних за архитектонско пројектовање, архитектонско конструкторство и композитне материјале са

важећим светским и европским правилницима и законодавним решењима. А такође је приказана потреба за даљим преиспитивањем свих наведених правилника и решења са потребом за очувањем природе и животне околине уз уважавање научних истраживања која то могу подржати и омогућити.

## **ЗАКЉУЧЦИ, ПРЕПОРУКЕ И ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА**

Континуирани развој композита који се показао као развој који прати експоненцијалну криву. Продором нових технологија у ову област крчи се пут иновативним применама нових материјала, а тим се показује да ово поље истраживања има одличну преспективу.

Преглед, анализа и истраживање кроз овај рад показују широк распон могућности које композити од рециклираних материјала и њихова међусобна комбинација са бетонским елементима пружају. Технологија и хемија играју незаменљиву улогу у развоју композита. Исто тако без адекватних начина примене и предочавања потреба у оквиру праксе тешко можемо доћи до адекватних решења. Овакви материјали омогућавају да се карактеристике конструктивних елемената архитектонских објеката унапреде, па тиме и дозволе иновације у овом пољу примене.

Композитни материјали својим карактеристикама дају бољу функционалност елементима конструкције архитектонских објеката, као и процесе који ово омогућавају, а тиме дају напредак у архитектонском пројектовању, пројектовању конструкције, квалитету израде и завршне обраде, дуготрајности конструкције али и истраживању нових материјала, технологији израде и производње итд.

1. Рециклирани материјали могу послужити за производњу влакана и матрица од којих се формирају композити. На унапређењу технологија у овој области производње интензивно ради и да се спроводи се велики број истраживања, а обзиром да је ова грана технологије је у зачетку и постоји огромно поље неистажених могућности. Такође је могуће рециклирање и самих композита који су већ коришћени па их тиме и њих вратити у нови циклус употребе што даје додатни бенефит и разлог за употребу композитних материјала.



2. Област у оквиру архитектонског конструкторства за коју можемо закључити да је погодно користити конструктивне елементе армиране композитима од рециклираних материјала у овом тренутку, а обзиром на недостатак како регулативе тако и експериментално утврђених карактеристика, јесте неки вид секундарне конструктивне употребе (неносива и привремено носива конструкција) као што су формирање коруба и пунилаца, изгубљених оплата, елемената за кровне покриваче, фасадних елемената, елемента урбаног мобилијара, елемента партеног уређења, ојачања преградних зидова у виду серклажа, формирање изгубљених оплата за префабриковане надвратнике и надпрозорнике.

3. Композитни материјал од полимера ојачаног рециклираним влакнима, испитан у току овог истраживања погодан је за употребу при формирању конструктивних елемената архитектонских објеката и то неносећих или привремено носећих конструктивних елемената архитектонских објеката (секундарних елемената конструкције). Привремено носећи елементи подразумевају елементе који служе за формирање носећих (примарних) елемената конструкције (изгубљене самоносеће оплате, корубе и слично) а тиме индиректно учествују у формирању носеће конструкције у виду обликовања и обраде.

4. Одабрани материјали из рециклаже који су погодни за истраживање и евентуалну употребу у Р.Србији треба да узму у обзир економску ситуацију и опремљеност. Новији и технолошки захтевнији материјали као што су карбон и армид неоспорно подразумевају огромна улагања, што смо могли да видимо на примеру САД-а. Из овог разлога можемо констатовати да је технологија везана за рециклажу стакла и полимера многоструко прихватљивија до евентуалних остваривања бољих услова и стартних основа која ће свакако доћи из експеримената финансираних и остварених у иностранству.

Набројани материјали пружају могућности и за отклањање недостатака али и за даљи напредак са ограниченим ресурсима.

5. Увођење употребе композитних материјала у оквиру регулисане од стране државе и струке је неопходно јер уређивање ове области омогућава и употребу композита од рециклираних материјала при формирању конструктивних елемената архитектонских објеката.

6. Композити од полимера ојачаних влакнима начињени од рециклираних материјала учествују у елиминацији отпада који угрожава екосистем тиме што враћају ове материјале у поновну употребу.

7. Практична примена резултата састоји се и у сагледавању могућности и смерница за даље истраживање ове области и развој композитних материјала.

Смернице за даља истраживања:

- Потребно је испитати понашање композитних арматура и нарочито композитне арматуре од полимера ојачаних рециклираним ПЕТ-стакло влакнима у притиснутој зони јер то није био предмет овог рада а јесте битан параметар за употребу при формирању конструктивних елемената архитектонских објеката.

- Треба експериментално проверити понашање при чупању композитне арматуре из бетонског елемента и утврдити дужину сидрења.

- Неопходно је експериментално испитати понашање материјала при изложености температурним разликама и високим температурама како би се одредила компатибилност са противпожарним прописима.

- Потребно је извршити експериментална тестирања предложених елемената архитектонских објеката у поглављу 6.2.

8. На основу овог истраживања закључује се да при пројектовању конструктивних армиранобетонских елемената треба примењивати чланове 114. и 118. ПБАБ'87 до доношења прописа из ове области.

Значајно је напоменути да је ово истраживање које је започело као сарадња две катедре различитих факултета успешно покренуло како међусобну сарадњу факултета тако и сарадњу наведених факултета са привредом. Ова сарадња није искључиво у виду финансирања већ се огледа у техничкој сарадњи и помоћи. Остварена је сарадња и са произвођачем цемента и бетона „Лафарге“ д.о.о. („Lafarge” d.o.o.) који значајна улагања издваја за научно истраживачке сврхе и то са тенденцијом наставка добре праксе и помоћи, са лабораторијом ИМС и са произвођачима и прерађивачима рециклираних сировина од полимера „Гринтек“ д.о.о („Greentech“ д.о.о.)

## БИБЛИОГРАФИЈА (ИЗВОРИ И ЛИТЕРАТУРА)

### ЛИТЕРАТУРА (СПИСАК ЦИТИРАНЕ И ПОЗИВНЕ ЛИТЕРАТУРЕ)

1. Витрувије (Vitruvius), *O arhitekturi (Vitruvii de Architectura libri decem)*, уредник издања Душан Мрђеновић, превод са латинског Зора Бојић, Београд, Завод за уџбенике и Досије студио, 2009
2. Bisby, L.A., Contributor: Fitzwilliam J., *ISIS Design Manual No. 2: An Introduction to FRP Composites for Construction*, A Canadian Network of Centres of Excellence, Department of Civil Engineering, Queen's University, October 2003
3. "The price of virtue", *The Economist*, June 7, 2007. коришћено 12. децембра 2013. са <http://www.economist.com/node/9302727#sthash.134RT7pp.dpbs>
4. "Space and architecture: new materials modifyng the urban environment", May, 2005, Lund, Sweden
5. „Сл. Гласник РС“, бр. 72/2009, 81/2009 – испр.,64/2010 – одлука УС, 24/2011, 2012/2012, 42/2013 и 50/2013)
6. Palaces and Temples in Ancient Mesopotamia, [http://www.usc.edu/dept/LAS/wsrp/information/REL499\\_2011/Palaces%20and%20Temples%20in%20Ancient%20Mesopotamia.pdf](http://www.usc.edu/dept/LAS/wsrp/information/REL499_2011/Palaces%20and%20Temples%20in%20Ancient%20Mesopotamia.pdf), коришћено 08.12.2015. године
7. [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1369657197-0-materijaliikompoziti2013.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1369657197-0-materijaliikompoziti2013.pdf)
8. [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1369657197-0-materijaliikompoziti2013.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1369657197-0-materijaliikompoziti2013.pdf)
9. <http://www.fiberglass.name/UploadFiles/200751619110698.jpg>
10. <http://www.build-on-prince.com/glass-fiber.html#sthash.lqXCENOW.dpbs>
11. <http://www.build-on-prince.com/aramid-fibers.html#sthash.W0cbhLye.dpbs>
12. R. Aleksic, I. Zivkovic, P. Uskokovic, *Kompozitni materijali*, TMF, Beograd, 2015. Strane 504-505
13. *Designing with Plastics*, G. Erhard, Hanser Gardner Publications, 2006
14. <http://www.build-on-prince.com/frp-reinforcement.html#sthash.nNJlewVI.he5gqpvl.dpbs>
15. [www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2012\\_msw\\_dat\\_tbls.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2012_msw_dat_tbls.pdf)
16. <http://webrzs.stat.gov.rs/WebSite/Public/PageView.aspx?pKey=2>
17. <http://www.gpi.org/recycling/glass-recycling-facts>
18. [http://wwf.panda.org/about\\_our\\_earth/teacher\\_resources/project\\_ideas/recycling\\_glass/](http://wwf.panda.org/about_our_earth/teacher_resources/project_ideas/recycling_glass/)
19. <http://www.gpi.org/recycling/glass-recycling-facts>
20. <https://dl.dropboxusercontent.com/u/21130258/resources/InformationSheets/Glass.htm>
21. [www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2012\\_msw\\_dat\\_tbls.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2012_msw_dat_tbls.pdf), Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States Tables and Figures for 2012 U.S. EPA

- Office of Resource Conservation and Recovery February 2014 - U.S. Environmental Protection Agency EPA
22. Ginger Gardiner, Source: Composites Technology, <http://www.compositesworld.com/articles/recycled-carbon-fiber-update-closing-the-cfrp-lifecycle-loop>
  23. <http://bioplasticsnews.com/2014/02/17/carbon-fiber-from-biomass/>
  24. *Isothermal Crystallization Kinetics, Morphology, and Mechanical Properties of Biocomposites Based on Poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) and Recycled Carbon Fiber*, [https://www.researchgate.net/publication/263943429\\_Isothermal\\_Crystallization\\_Kinetics\\_Morphology\\_and\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Biocomposites\\_Based\\_on\\_Poly3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate\\_and\\_Recycled\\_Carbon\\_Fiber](https://www.researchgate.net/publication/263943429_Isothermal_Crystallization_Kinetics_Morphology_and_Mechanical_Properties_of_Biocomposites_Based_on_Poly3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate_and_Recycled_Carbon_Fiber)
  25. <http://www.teijinaramid.com/recycling/>
  26. "The price of virtue", The Economist, Jun 7, 2007.
  27. <http://www3.epa.gov/epawaste/education/pdfs/toolkit/tools-m.pdf>
  28. [www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/)
  29. Advancing Sustainable Materials Management: 2013 Fact Sheet Assessing Trends in Material Generation, Recycling and Disposal in the United States Jun 2015 [www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013\\_advncng\\_sm\\_fs.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013_advncng_sm_fs.pdf)
  30. [www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013\\_advncng\\_sm\\_fs.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013_advncng_sm_fs.pdf)
  31. PH.D. THESIS - LIMIT STATES DESIGN of CONCRETE STRUCTURES REINFORCED with FRP BARS, Rafaelo Fico
  32. Hota V.S. GangaRao, Narendra Taly, P. V. Vijay, Reinforced Concrete Design with FRP Composites", 2006
  33. Design Manual No. 3, "Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers", Intelligent Sensing for Innovative Structures Canada Corporation, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2007
  34. BOND OF REINFORCEMENT IN CONCRETE, STATE OF ART REPORT, international Federation for Structural Concrete Task Group Bond Models, Lozana, Švajcarska, August 2000
  35. Fib Bulletin No. 40, "FRP Reinforcement in RC Structures", International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2007.

#### ОПШТА ЛИТЕРАТУРА

1. Bisby, L.A., Contributor: Fitzwilliam J., ISIS Design Manual No. 2: An Introduction to FRP Composites for Construction, A Canadian Network of Centres of Excellence, Department of Civil Engineering, Queen's University, October 2003.

2. Design Manual No. 3, "Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers", Intelligent Sensing for Innovative Structures Canada Corporation, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2007
3. 2 CAN/CSA-S806-02 "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers", Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, 2007.
4. 3 CAN/CSA-S6-06 "Canadian Highway Bridge Design Code" Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, 2006.
5. 4 CAN/CSA-S807-10 "Specification for Fibre-Reinforced Polymers" Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, 2010.
6. Stacey, Michael, Polymers and Architecture: Do we need to specify a high fibre diet?, RIBA FRSA, Michael Stacey Architects, School of the Built Environment, University of Nottingham, коришћено 15. марта 2014. <http://www.compositesuk.co.uk/LinkClick.aspx?fileticket=51z23k8jRTU%3D>
7. „Сл. Гласник РС“, бр. 72/2009, 81/2009 – испр.,64/2010 – одлука УС, 24/2011, 2012/2012, 42/2013 и 50/2013
8. Bisby, L.A., Contributors: Ranger M. and Williams B.K., ISIS Design Manual No. 3: Reinforcing Structures with Fiber Reinforced Polymers, A Canadian Network of Centres of Excellence, Department of Civil Engineering, Queen's University, October 2003.
9. Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., and Lam, L., FRP strengthened concrete structures, Wiley, 2002.
10. Hollaway, L.C., and Head, P.R., Advanced polymer composites and polymers in the civil infrastructure, Elsevier, 2001.
11. Hollaway, L.C., Polymers and polymer composites in construction, Thomas Telford Ltd., London, UK, 1990.
12. Chawla, K.K. Composite materials: Science and engineering, Springer, 1998.
13. Moy, Stuart, ICE 2001. FRP composites: Life extension and strengthening of metallic structures, Institution of Civil Engineers, Design and practice guides. Thomas Telford Ltd., London, UK, 2001.
14. ACI Special Publication SP-215-9. Field Applications of FRP Reinforcement: Case Studies, Published by the American Concrete Institute, 2003.

15. Европска комисија, A sustainable Europe for a better world: A European strategy for Sustainable Development, коришћено 14. марта 2014. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52001DC0264&from=EN>
16. ACI 440.1R-15 "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars," ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2015.
17. ACI 440.3R-12 "Guide for Test Methods for Fiber Reinforced Polymers (FRP) for Reinforcing and Strengthening Concrete Structures," ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2012.
18. Concrete Engineering Series 23, "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials," Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, 1997.
19. Fib Bulletin No. 40, "FRP Reinforcement in RC Structures", International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2007.
20. Правилник за бетон и армирани бетон (ПБАБ'87)
21. CNR-DT 203/2006, "Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars", Italian National Research Council, Rome, Italy, 2007.

#### ПОПИС СЛИКА (ИЛУСТРАЦИЈА)

Слика 1. Подела композита према врсти ојачања \_ шема

[https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1369657197-0-materijaliiikompoziti2013.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1369657197-0-materijaliiikompoziti2013.pdf)

Слика 2. Основне компоненте које чине композит са усмереним влакнима

Bisby, L.A., Contributor: Fitzwilliam J., *ISIS Design Manual No. 2: An Introduction to FRP Composites for Construction*, A Canadian Network of Centres of Excellence, Department of Civil Engineering, Queen's University, October 2003

Слика 3. Дијаграм напон-дилатација за полимер ојачан влакнима – принцип

Слика 4. Дијаграми чврстоћа неких влакана у зависности од материјала

[https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1369657197-0-materijaliiikompoziti2013.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1369657197-0-materijaliiikompoziti2013.pdf)

Слика 5. Приказ влакана посматраних кроз електронски микроскоп

Bisby, L.A., Contributor: Fitzwilliam J., *ISIS Design Manual No. 2: An Introduction to FRP Composites for Construction*, A Canadian Network of Centres of Excellence, Department of Civil Engineering, Queen's University, October 2003

Слика 6. Намотаји влакана

<http://www.fiberglass.name/UploadFiles/200751619110698.jpg>

Слика 7. Поређење карактеристика челичне арматуре и композитне арматуре према типу влакана

<http://www.build-on-prince.com/frp-reinforcement.html#sthash.nNJewVI.he5gqpv1.dpbs>

Слика 8. Управљање чврстим комуналним отпадом, вредности у милионима тона за период од 1960 до 2012 године

<http://www.build-on-prince.com/frp-reinforcement.html#sthash.nNJewVI.he5gqpv1.dpbs>

Слика 9. Преоцес рециклаже стаклене амбалаже

<http://www.gpi.org/recycling/glass-recycling-facts>

Слика 10. Генерисање стакленог отпада и рециклажа у периоду од 1960 до 2012 године

[www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2012\\_msw\\_dat\\_tbls.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2012_msw_dat_tbls.pdf), Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States Tables and Figures for 2012 U.S. EPA Office of Resource Conservation and Recovery February 2014 - U.S. Environmental Protection Agency EPA

Слика 11. Количина материјала који су доступни за рециклажу у тонама у периоду од 2005. до 2011. године

<http://www.teijinaramid.com/recycling/>

Слика 12. Процентулна количина рециклираних сировина у 2013 у САД-у

Advancing Sustainable Materials Management: 2013 Fact Sheet Assessing Trends in Material Generation, Recycling and Disposal in the United States Jun 2015



[www.epa.gov/sites/production/files/2015-](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013_advncng_sm_fs.pdf)

[09/documents/2013\\_advncng\\_sm\\_fs.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013_advncng_sm_fs.pdf)

Слика 13. Генерисање пластичног отпада и рециклажа у преиоду од 1960 до 2012 године

<https://dl.dropboxusercontent.com/u/21130258/resources/InformationSheets/Glass.htm>

Слика 14. Дистрибуција напона затезања кроз композитну арматурну шипку  
BOND OF REINFORCEMENT IN CONCRETE, STATE OF ART REPORT,  
international Federation for Structural Concrete Task Group Bond Models, Lausanne,  
Switzerland,, Avgust 2000

Слика15. Пресек армиранобетонског елемента са дијаграмима дилатација и напона

Design Manual No. 3, “Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers”, Intelligent Sensing for Innovative Structures Canada Corporation, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2007

Слика 16. Мешавина стаклених и ПЕТ влакна из намотаја

Аутор

Слика 17. Екстудер који се користи за наношење ПЕТ-а на стаклена влакна

Аутор

Слика 18. ПЕТ Флекс – материјал из рециклаже

Аутор

Слика 19. Повлачење материјала у процес пултрузије

Аутор

Слика 20. Полимер нанесен на влакна

Аутор

Слика 21. Производна линија - процес пултрузије

Аутор

Слика 22. Погонски елемент у процесу пултрузије (пултрудер)

Аутор

Слика 23. Процес пултрузије са терморективним полимром у течном стању

Design Manual No. 3, “Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers”, Intelligent Sensing for Innovative Structures Canada Corporation, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2007

Слика 24. Процес пултрузије са термопластичним полимром

Аутор

Слика 25. Дијаграм напон – дилатација ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) за прву производну серију композитних шипки

Катедра за композитне материјале, лабораторија Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду

Слика 26. Експериментално кидање материјала из прве производне серије композитних шипки

Катедра за композитне материјале, лабораторија Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду

Слика 27. Деламинација при експерименталном кидању композитног материјала прве производне серије композитних шипки

Катедра за композитне материјале, лабораторија Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду

Слика 28. Дијаграм напон – дилатација ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) за другу производну серију композитних шипки

Катедра за композитне материјале, лабораторија Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду

Слика 29. Експериментално кидање композитног материјала из друге производне серије композитних шипки

Катедра за композитне материјале, лабораторија Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду

Слика 30. Шема армирања бетонског елемента

Аутор

Слика 31. Арматурни кош од композитне арматуре

Аутор

Слика 32. Распоред узенгија од композитне арматуре

Аутор

Слика 33. Арматурни кошеви у калупу пре ливења бетонске смеше

Аутор

Слике 34., 35. и 36. Ливење бетона у калупе

Аутор

Слика 37. Изливени бетон у калупу

Аутор

Слика 38. Очврснуо бетонски елемент пре вађења из калупа

Аутор

Слика 39. Шема наношења оптерећења на гредни елемент

Аутор

Слика 40. Статичка шема са дијаграмом момената савијања и трансверзалних сила

Аутор

Слика 41. Дијаграм сила-угиб \_ композитна арматура греде \_ узоракса ознаком 2 \_ оптерећен до лома

ИМС, Лабораторија за испитивање конструкција

Слика 42. Формирање прслина на узорку са ознаком 2

Аутор

Слика 43. Дијаграм сила-угиб \_ композитна арматура греде \_ узорак са ознаком 3 \_ оптерећен до лома

ИМС, Лабораторија за испитивање конструкција

Слика 44. Почетак наношења силе на узорку са ознаком 3

Аутор

Слика 45. Прслине непосредно пре лома по арматури на узорку са ознаком 3

Аутор

Слика 46. Лом по арматури узорка са ознаком 3 на прслини са ознаком 3

Аутор

Слика 47. Дијаграм сила-угиб \_ композитна арматура греде \_ узорак са ознаком 1

–

оптерећена до силе од 12,875 kN па потом растерећена

ИМС, Лабораторија за испитивање конструкција

Слика 48. Формирање и означавање прве прслине на узорку са ознаком 1

Аутор

Слика 49. Мерење величине прслина при сили од 12,875 kN на узорку са ознаком 1 – прва формирана прслина са ознаком 1и друга прслина са ознаком 3 поред којих је уписана вредност у милиметрима

Аутор

Слика 50. Враћање у првобитни положај греде након растерећења греде на узорку са ознаком 1

Аутор

Слика 51. Дијаграм сила-угиб \_ композитна арматура греде \_ узорак са ознаком 1

–

поново оптерећена до лома \_ са апроксимативном формулом

ИМС, Лабораторија за испитивање конструкција

Слика 52. Излед пресека након лома са деламинарираном композитном арматуром - узорак са ознаком 1

Аутор

Слика 53 Дијаграм сила-угиб \_ глатка арматура греде ГА 240/360 \_ узорак са ознаком 4 \_ оптерећен до лома \_ са апроксимативном формулом

ИМС, Лабораторија за испитивање конструкција

Слика 54. Формирање прслина на узорку са ознаком 4

Аутор

Слика 46. Развијање прслине услед дејства корозије на челичну арматуру

<http://www.gaa.com.au/uploads/images/Galv%20Reo.JPG>

Слика 47. Врсте деградације бетона услед дејства корозије на челичну арматуру

<http://www.scielo.mec.pt/img/revistas/cpm/v33n3/33n3a03f1.jpg>

Слика 48. Аксонометрија предложеног префабрикованог елемента као кровног покривача

Аутор

Слика 49. Пресек и основа предложеног префабрикованог елемента као кровног покривача

Аутор

Слика 50. Диспозиција арматуре у префабрикованом елементу

Аутор

Слика 51. Аксонометрија предложеног префабрикованог елемента као изгубљене оплате за формирање међуспратне носеће конструкције

Аутор

Слика 52. Пресек међуспратне носеће конструкције и префабрикованог елемента изгубљене оплате

Аутор

Слика 53. Диспозиција арматуре у префабрикованом елементу

Аутор

Слика 54. Диспозиција арматуре у префабрикованом елементу

Аутор

Слика 55. Пресек међуспратне носеће конструкције и префабрикованог елемента - корубе

Аутор

Слика 56. Основа и пресеци префабрикованог елемента – корубе за формирање међуспратне носеће конструкције

Аутор

Слика 57. Аксонометријски приказ префабрикованог елемента надпрозорника-надвратника

Аутор

Слика 58. Пресек формираног елемента надпрозорника-надвратника

Аутор

Слика 59. Диспозиција елемента у зиду за распон до 240 cm

Аутор

Слика 60. Диспозиција елемента у зиду за распон преко 240 cm са подупирачем у фази монтаже

Аутор

Слика 61. Диспозиција композитне арматуре префабрикованог елемента

Аутор

Слика 62. Фасадни елементи деградирани корозијом

[http://www.drc-associates.com/albums/concrete/images/t\\_Genesee3.jpg](http://www.drc-associates.com/albums/concrete/images/t_Genesee3.jpg)

Слика 63. Предложено решење фасадног елемента - аксонометрија

Аутор

Слика 64. Предложено решење фасадног елемента – основа и пресек

Аутор

Слика 65. Деградација бетона услед утцаја корозије и инцидентног оптерећења

<http://assets.inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2011/08/2asean-martindale-outside-the-planter-boxes-05.jpg>

Слика 66. Деградација бетона услед неадекватног армирања

<http://www.blogto.com/upload/2011/05/2011523-street-caution.jpg>

Слика 67. Деградација бетона услед утцаја корозије

[https://d12m281y1f13f0.cloudfront.net/images102/figure\\_54\\_concrete\\_corrosion\\_rebar\\_expansion.jpg](https://d12m281y1f13f0.cloudfront.net/images102/figure_54_concrete_corrosion_rebar_expansion.jpg)

Слика 68. Деградација бетона услед утцаја инцидентног оптерећења

[http://www.eastrand-walling.co.za/img/Concrete\\_Walling/Services/CrackedPanelsConcretePrecastWall.jpg](http://www.eastrand-walling.co.za/img/Concrete_Walling/Services/CrackedPanelsConcretePrecastWall.jpg)

Слика 69. Елементи партерног уређења погодни за армирање композитом

<https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/d0/e2/37/d0e237e168ffd09cb884032c20bf4e79.jpg>

Слика 70. Фонтана као елемент партерног уређења погодог за армирање  
КОМПОЗИТОМ

<http://plastolux.com/wp-content/uploads/2013/10/anthonyapaul1.jpg>

Слика 71. Жардињера као елемент партерног уређења погодог за армирање  
КОМПОЗИТОМ

<http://precast.org/wp-content/uploads/2013/11/Advantage-Precast-Planter.jpg>

Слика 72. Клупа као елемент партерног уређења погодог за армирање композитом

[http://www.escofet.com/upload/productos/j06\\_grande\\_producto\\_02.jpg](http://www.escofet.com/upload/productos/j06_grande_producto_02.jpg)

Слика 73. Ограда као елемент партерног уређења погодог за армирање  
КОМПОЗИТОМ

[http://cdn.monolithic.org/vault/img/2013/03/07/51390c2bc29e06981300000f/large\\_sequfence1.jpg](http://cdn.monolithic.org/vault/img/2013/03/07/51390c2bc29e06981300000f/large_sequfence1.jpg)

Слика 74. Префабриковани елемент ограде погодан за армирање композитом

<http://cficoncrete.com/wp-content/gallery/precast-ranch-rail-fencing/concrete-fence-rails.jpg>

Слика 75. Ограда као елемент партерног уређења погодог за армирање  
КОМПОЗИТОМ

[http://www.gardenfencinglondon.com/wp-content/uploads/2014/05/security-concrete-fences-700x300\\_c.jpg](http://www.gardenfencinglondon.com/wp-content/uploads/2014/05/security-concrete-fences-700x300_c.jpg)

Слика 76. Инсталациона цев као елемент погодан за армирање композитом

[http://www.olmetitaly.com/public/categorie/foundation\\_pole2\\_1.jpg](http://www.olmetitaly.com/public/categorie/foundation_pole2_1.jpg)

## СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 1. Механичке карактеристике стаклених влакана у зависности од типа  
стакла

<http://www.build-on-prince.com/glass-fiber.html#sthash.IqXCEN0W.dpbs>

Табела 2. Механичке карактеристике стаклених влакана у зависности од типа  
стакла

<http://www.build-on-prince.com/aramid-fibers.html#sthash.W0cbhLye.dpbs>

Табела 3. Врсте полимера погодне за употребу према типу влакана

G. Erhard, Hanser Gardner Publications, Designing with Plastics, , 2006

Табела 4. Предности и мане композитних материјала од полимера ојачаних влакнима

Табела 5. Предности и мане композитних материјала од полимера ојачаних влакнима

Bisby, L.A., Contributor: Fitzwilliam J., ISIS Design Manual No. 2: An Introduction to FRP Composites for Construction, A Canadian Network of Centres of Excellence, Department of Civil Engineering, Queen's University, October 2003

Табела 6. Подаци Завода за статистику Р.Србије

<http://webrzs.stat.gov.rs/WebSite/Public/PageView.aspx?pKey=2>

Табела 7. Бенефити у виду смањења емисије гасова који изазивају ефекат стаклене баште

[www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013\\_advncng\\_sm\\_fs.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013_advncng_sm_fs.pdf)

Табела 8. Топлотни коефицијенти дилатације за композитне арматурне шипке према материјалу од ког су влакна

[www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013\\_advncng\\_sm\\_fs.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013_advncng_sm_fs.pdf)

Табела 9. Максималне величине прелина према различитим стандардима

Bulletin No. 40, "FRP Reinforcement in RC Structures", International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2007

Табела 10. Дефинисане дозвољене вредности угиба према (Eurocode 2) и (ACI 318-05)

Eurocode 2 и ACI 318-05

Табела 11. Коефицијенти сигурности за композитну арматуру према америчком правилнику (ACI 440.IR)

ACI 440.IR

Табела 12. Коефицијенти сигурности за композитну арматуру према правилнику (IstructE, 1999)

IstructE, 1999

Табела 13. Реципрочне вредности коефицијената сигурности за композитну арматуру према правилнику (IstructE, 1999)

Аутор

Табела 14. Вредности коефицијената сигурности за композитну арматуру према правилнику (CSA S806-02)

CSA S806-02

Табела 15. Измерене вредности чврстоће бетона на дан извођења експеримента

Аутор

Табела 16. Одређивање момента лома и силе  $P/2$  која узрокује момент лома

Аутор

Табела 17. Максимални добијени угиби, на армиранобетонском елементу, а према критеријуму вредности силе у тренутку формирања прслине

Аутор

Табела 18. Одређивање напона у композитној арматури у односу на на силу  $P/2$  која узрокује момент лома

Аутор

Табела 19. Одређивање потребне површине попречног пресека арматуре за префабриковани кровни елемент

Аутор

Табела 20. Одређивање потребне површине попречног пресека арматуре за префабриковани елемент изгубљене оплате



**ПРИЛОГ:**

## БИОГРАФИЈА АУТОРА

Миодраг Грбић рођен је 21. октобра 1981. године у Београду. У периоду од 1988. до 1996. похађао је ОШ "Васа Живковић" у Панчеву. Године 1996. уписао је ЕТШ "Никола Тесла" у Панчеву, где је матурирао 2000. године.

Основне студије на Архитектонском факултету уписује 2003. године и завршава их у року са просечном оценом 8,43. Мастер студије наставља на истом факултету – усмерење архитектонске технологије и завршава у року, са просечном оценом 9,85. Дипломски рад/Мастер на тезу "Цивилни аеродром Батајница" одбранио је оценом 10 (десет).

Од 2006. до 2008. године учествује у извођењу наставе на Архитектонском факултету Универзитета у Београду као демонстатор волонтер.

Од 2006. до 2008. године био је члан Студентског Парламента Архитектонског факултета, Универзитета у Београду. У периоду од 2006. до 2007. био је и уредник дела сајта Архитектонског факултета.

Од 2006. до 2007. године био је члан Савета Архитектонског факултета, Универзитета у Београду.

Школске 2007/2008 године добитник стипендије "Најбољих 50 студената града Панчева" коју додељује Скупштина града Панчева.

Након регулисања војне обавезе редовно одслужењем војног рока, 2009. године уписује докторске студије на Архитектонском факултету у Београду.

Одлуком Научно-наставног већа Архитектонског факултета бр. 01-2305/2-8.14. од 07.10.2009. године ангажован је школске 2009/2010 године, у јесењем семестру, као сарадник у извођењу наставе на предмету: Мастер студио М6, на Департману за архитектонске технологије.

Одлуком Научно-наставног већа Архитектонског факултета бр. 01-355/2-8.18. од 24.02.2010. године ангажован је школске 2009/2010 године, у пролетњем семестру, као сарадник на предмету: Конструктивне карактеристике примењених материјала, на Департману за архитектонске технологије.

Одлуком Научно-наставног већа Архитектонског факултета бр. 01-2626/2-4.4. од 8.11.2010. године ангажован је школске 2010/2011 године, у јесењем семестру, као сарадник у извођењу наставе на предмету: Мастер студио М6, на Департману за архитектонске технологије

Од 2011. Године запослен је на Архитектонском факултету Универзитета у Београду на Катедри за Статику конструкција и Департману за архитектонске технологије. Учествовао је у настави на више предмета на катедри и департману. Кандидат поседује вишегодишње искуство рада у настави на Архитектонском факултету у Београду. Од 2006. до 2008. године радио је као демонстратор и стручни сарадник, а од 20011. године запослен је на Архитектонском факултету Универзитета у Београду на Департману за архитектонске технологије, у звању асистента за ужу научну, односно уметничку област Архитектонско конструктерство. У настави је учествовао на предметима:

- Механика и отпорност материјала (права година основних студија)
- Принципи конструисања архитектонских објеката (права година основних студија)
- Конструктивне карактеристике промењених материјала (друга година основних академских студија)
- Студио пројекат АК (друга година основних академских студија)
- Изборни предмет 1 \_ Огледи из конструкција (трећа година основних академских студија)
- Семинар 5 \_ Технологија и реализација \_ Пројектовање конструкција објеката применом рачунарских програма (права година мастер академских студија)
- Семинар 5 \_ Технологија и реализација \_ Израда арматурних детаља применом рачунарских програма (права година мастер академских студија)
- Пројекат 1 \_ Студио (права година мастер академских студија, први семестар)
- Семинар АТ (права година мастер студија први семестар)
- Пројекат 2 \_ Усмерење АТ (Архитектонске технологије) - Студио (права година мастер академских студија, други семестар)
- Семинар АТ (друга година мастер академских студија, други семестар)
- Пројекат 3 – Усмерење АТ. (Архитектонске технологије) - Студио (друга година мастер академских студија, трећи семестар)
- Семинар АТ (друга година мастер академских студија, трећи семестар)
- Изборни предмет 3 (друга година мастер академских студија)
- Мастер пројекат М9

Стручни испит прописан за дипломираног инжењера архитектуре је положио 2010. године. Као члан пројектанског тима пројектовао је и вршио надзор над већим бројем објеката високоградње, у земљи и иностранству.

Објавио је неколико писаних радова на конгресима у земљи и иностранству. Течно говори и пише енглески језик, а служи се и немачким. Бави се облашћу Технологије бетона, Високовредним бетонима, Конструкцијама објеката високоградње, Применом нових метода и материјала у конструкцијама, Пројектовањем архитектонских објеката.

Такође, кандидат је ангажован у раду више комисија, организационих одбора, и у координацији и апликацији за научно-истраживачке пројекте на Архитектонском факултету. Од 2013. године члан је Комисије за припрему акредитације студијског програма Архитектонског факултета према *RIBA* стандардима. Од 2012. године члан је Комисије за спровођење пријемног испита а од 2013. године члан је Комисије припрему пријемног испита на Архитектонском факултету.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани—а      Миодраг Р. Грбић  
број индекса

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

**ФОРМИРАЊЕ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНАТА АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА  
УПОТРЕБОМ ПОЛИМЕРА ОЈАЧАНИХ РЕЦИКЛИРАНИМ ВЛАКНИМА**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 10.05.2016 године



Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије  
докторског рада**

Име и презиме аутора: Миодраг Р. Грбић

Број индекса:

Студијски програм:

Наслов рада:

**ФОРМИРАЊЕ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНАТА АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА  
УПОТРЕБОМ ПОЛИМЕРА ОЈАЧАНИХ РЕЦИКЛИРАНИМ ВЛАКНИМА**

Ментор: Др. Милан Глишић, редовни професор

Потписани/а: Миодраг Р. Грбић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 10.05.2016 године



Прилог 3.

**Изјава о коришћењу**

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

**ФОРМИРАЊЕ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНАТА АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА УПОТРЕБОМ ПОЛИМЕРА ОЈАЧАНИХ РЕЦИКЛИРАНИМ ВЛАКНИМА**

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

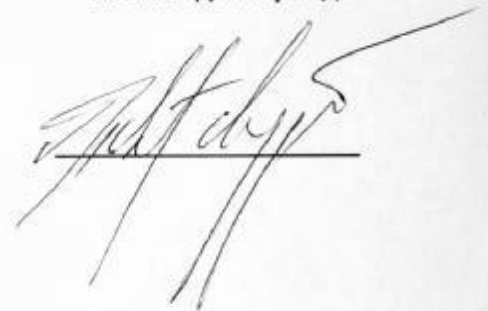
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

**Потпис докторанда**

У Београду, 10.05.2016 године



1. Ауторство – Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.