

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Тијана М. Војновић

**МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЈЕ ОБЛАГАЊА
ФАСАДА КОМПОЗИТНИМ ПАНЕЛИМА
СА ЛИЦЕМ ОД КАМЕНА**

докторска дисертација

Београд, 2015

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ARCHITECTURE

Tijana M. Vojnović

**MODELS OF FAÇADE CLADDING
TECHNOLOGY USING STONE FACED
COMPOSITE PANELS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Ментор:

Др Александра Крстић-Фурунџић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Архитектонски факултет

Чланови комисије:

Др Александра Крстић-Фурунџић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Архитектонски факултет

Др Драгица Јевтић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Др Весна Матовић, ванредни професор,
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

Датум одбране докторске дисертације: _____, Београд.

МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЈЕ ОБЛАГАЊА ФАСАДА КОМПОЗИТНИМ ПАНЕЛИМА СА ЛИЦЕМ ОД КАМЕНА

Резиме: На територији Србије се опажа интензивни увоз природног камена, као и смањена примена и извоз домаћег стенског материјала у виду архитектонског камена. Релативно мали број каменолома се бави организованом експлоатацијом домаћег архитектонског камена, кога има у изобиљу. Такође се уочава природна тектонска испуцалост стенске масе Србије и додатна оштећења услед вишегодишње неадекватне експлоатације експлозивом. У овом контексту, истраживање се бави питањем искоришћења потенцијала домаћих ресурса архитектонског камена у сврху облагања фасада архитектонских објеката. У оквиру приказаног рада предложено је техничко-технолошко решење примене домаћег камена на фасади, односно формирану су модели композитних фасадних панела са лицем од каменог мозаика и подлоге од лакоагрегатног микроармираног цементног композита. Методом експеримента у лабораторијским условима утврђена су својства материјала подлоге панела и фасадног панела чиме је потврђена погодност употребе домаћег камена у сврху формирања композитних панела који се могу применити у оквиру ветреног фасадног склопа. Научни допринос истраживања се огледа у проширењу и унапређењу области технологије облагања архитектонских објеката каменом, проширењу области примене локалног стенског материјала у функцији облагања архитектонских објеката, и прилогу разматрања технолошког процеса настанка композитне облоге од камена путем израде пилот елемента. Резултати истраживања налазе практичну примену како у домаћој индустрији камена, тако и у грађевинској индустрији уопште.

Кључне речи: камен, Србија, фасадна облога, ветрени фасадни склоп, композитни панел, микроармирани цементни композит, лакоагрегатни цементни композит

Научна област: Архитектура и урбанизам

Ужа научна област: Архитектонске конструкције, материјали и физика зграда

УДК број: 692.23:691.21(043.3)

MODELS OF FAÇADE CLADDING TECHNOLOGY USING STONE FACED COMPOSITE PANELS

Summary: In Serbia, an intensive import of natural stone, along with a reduced utilization and export of local rock material in the form of dimension stone is perceived. A relatively small number of quarries is engaged in an organized exploitation of dimension stone, despite the country's abundance of these resources. Natural tectonic fractures of the rock mass is observed, as well as the inadequate exploitation using explosives which additionally contributes to the overall rock damage. The research is concerned with the use of local dimension stone resources for the purpose of façade cladding. The study presents a technical and technological proposition of the local stone façade application by forming models of composite façade panels with a face of a stone mosaic and a lightweight aggregate fiber-reinforced cement composite base. Using experimental methods under laboratory conditions, the properties of the base materials and the façade cladding panels were determined. They confirmed the suitability of the local stone application for the purpose of creating composite panels which could be applied within a ventilated façade system. The research contributes to widening the scope of knowledge and also advance the field of building cladding technology using stone. It also contributes to widening the scope of knowledge within the field of local rock material application for the purpose of building cladding. It further contributes to the consideration of a technological process of creating a composite cladding panel by means of a pilot element production. The results of the research have a practical application within the local stone industry and in the overall building industry.

Keywords: stone, Serbia, façade cladding, ventilated façade system, composite panel, fiber-reinforced cement composite, lightweight aggregate cement composite

Scientific field: Architecture and urbanism

Area of expertise: Building construction, materials and building physics

UDK number: 692.23:691.21(043.3)

Садржај:

I УВОД.....	1
I.1 Уводне напомене о теми	1
I.2 Претходна анализа информација о предмету и проблему истраживања.....	3
I.3 Проблем и предмет истраживања	7
I.4 Циљ и задаци истраживања.....	8
I.5 Полазне хипотезе.....	9
I.6 Научне методе истраживања.....	10
I.7 Структура докторске дисертације.....	11
I.8 Остварени резултати и научни допринос дисертације.....	12
II ОДРЕДНИЦЕ ЗА ПРОЈЕКТОВАЊЕ ФАСАДНОГ СКЛОПА И ФАСАДНОГ ПАНЕЛА.....	14
II.1 УЛОГА ФАСАДНОГ ОМОТАЧА	15
II.2 ВЕТРЕНИ ФАСАДНИ СКЛОП	20
II.2.1 Макроклиматски фактори	22
II.2.2 Микроклиматски фактори.....	23
II.2.3 Штетне последице утицаја дифузије водене паре.....	24
II.2.4 Природна вентилација унутар ветреног ваздушног слоја фасадног зида.....	25
II.2.5 Предности и мане ветреног фасадног склопа.....	26
II.2.6 Систем ношења тешких елемената облоге у оквиру ветреног фасадног склопа	28
II.2.7 Спојнице код ветреног фасадног склопа	31
II.3 ОДРЖИВИ РАЗВОЈ У АРХИТЕКТУРИ И ГРАЂЕВИНАРСТВУ	33
II.3.1 Одрживи дизајн и превенција загађења у архитектури.....	34
II.3.2 Одреднице одрживог грађевинског материјала	38
II.4 ТЕХНИЧКИ ПРОПИСИ И СТАНДАРДИ.....	40
II.5 ЗАКЉУЧАК.....	44

III РАЗМАТРАЊЕ МАТЕРИЈАЛА И СКЛОПА ФАСАДНОГ КОМПОЗИТНОГ ПАНЕЛА	46
III.1 КАМЕН У СВОЈСТВУ ОБЛОГЕ КОМПОЗИТНОГ ПАНЕЛА	46
III.1.1 Класификација стена и њихова комерцијална подела	47
III.1.2 Класификација камена	50
III.1.3 Архитектонски камен	51
III.2 АРХИТЕКТОНСКИ КАМЕН СРБИЈЕ	55
III.2.1 Карбонатне стене на подручју Србије.....	56
III.2.1.1 Карбонатне стене површинског копа Клисуре.....	58
III.2.1.2 Карбонатне стене површинског копа Тисница	61
III.2.1.3 Карбонатне стене површинског копа Скржут.....	64
III.2.1.4 Карбонатне стене површинског копа Струганик	67
III.2.2 Магматске стене на подручју Србије	70
III.2.2.1 Гранити стенске масе Букуље.....	71
III.2.3 Преглед могућности примене изабраног архитектонског камена.....	75
III.2.4 Преглед и примена осталог архитектонског камена Србије.....	76
III.3 ТАНКЕ ФАСАДНЕ ПЛОЧЕ ОД КАМЕНА	80
III.3.1 Основне предности употребе танких фасадних плоча од камена	80
III.3.1.1 Декоративност.....	81
III.3.1.2 Аспект одрживости	81
III.3.2 Танке фасадне плоче од камена у експлоатацији.....	82
III.3.2.1 Термална хистереза.....	82
III.3.2.2 Отпорност на удар	86
III.3.2.3 Ефлоресценција.....	87
III.3.2.4 Остали недостаци фасадних плоча од камена.....	89
III.4 КОМПОЗИТНИ ФАСАДНИ ПАНЕЛИ СА ЛИЦЕМ ОД КАМЕНА	90
III.4.1 Преглед композитних панела са монолитном облогом од камена	90
III.4.1.1 Композитни панели са алуминијумском саћастом подлогом.....	91
III.4.1.2 Композитни панели са подлогом од лакоагрегатног цементног композита	94
III.4.1.3 Композитни панели са керамичком подлогом	96
III.4.1.4 Композитни панели са подлогом од стакла	97
III.4.2 Преглед композитних панела са облогом у виду каменог мозаика.....	99
III.4.2.1 Композитне плоче малих димензија.....	99

III.4.2.2 Префабриковани панели спратних димензија.....	100
III.4.3 Основне предности примене композитних панела са лицем од камена.....	100
III.4.3.1 Тежина.....	101
III.4.3.2 Чврстоћа при савијању.....	102
III.4.3.3 Водопропустљивост.....	103
III.4.3.4 Декоративност.....	103
III.4.3.5 Аспект одрживости.....	104
III.4.3.6 <i>LEED</i> сертификација.....	105
III.4.4 Композитни панели са лицем од камена у експлоатацији.....	105
III.4.4.1 Термална хистереза.....	106
III.4.4.2 Отпорност на удар.....	107
III.4.4.2.1 Удар ветра и атмосферске непогоде.....	107
III.4.4.2.2 Експлозија.....	108
III.4.4.3 Отпорност на сеизмичке утицаје.....	108
III.4.4.4 Отпорност на пожар.....	109
III.4.4.5 Ефлоресценција.....	110
III.5 ЦЕМЕНТНИ КОМПОЗИТ У СВОЈСТВУ ПОДЛОГЕ.....	111
III.5.1 Разматрање цементних композита ојачаних влакнима.....	112
III.5.2 Разматрање лакоагрегатних цементних композита.....	116
III.5.2.1 Цементни композити са агрегатом од експандиране глине.....	118
III.5.2.2 Цементни композити са агрегатом од дробљене опеке.....	123
III.5.3 Разматрање лакоагрегатних микроармираних цементних композита.....	127
III.5.4 Разматрање полимерима модификованих цементних композита.....	128
IV ТЕХНИЧКО-ТЕХНОЛОШКО РЕШЕЊЕ КОМПОЗИТНОГ ФАСАДНОГ ПАНЕЛА СА ЛИЦЕМ ОД КАМЕНА.....	132
IV.1 ПРОЈЕКТОВАЊЕ КОМПОЗИТНОГ ФАСАДНОГ ПАНЕЛА.....	132
IV.1.1 Избор компонентних материјала.....	132
IV.1.2 Дефинисање пројектног задатка.....	133
IV.2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО ИСТРАЖИВАЊА.....	135
IV.2.1 Програм експерименталних истраживања.....	135
IV.2.2 Компонентни материјали.....	139
IV.2.2.1 Камен.....	139
IV.2.2.2 Цемент.....	140

IV.2.2.3 Вода.....	140
IV.2.2.4 Агрегат	140
IV.2.2.4.1 Речни песак	141
IV.2.2.4.2 Дробљена опека	142
IV.2.2.4.3 Експандирана глина.....	143
IV.2.2.5 Влакна у својству микроарматуре.....	144
IV.2.2.6 Латекс	146
IV.2.2.7 Суперпластификатор	147
IV.2.3 Пројектовање састава малтерских мешавина	148
IV.2.4 Прва фаза експерименталних истраживања.....	157
IV.2.4.1 Испитивање својстава малтера у свежем стању	158
IV.2.4.1.1 Справљање малтерских мешавина.....	158
IV.2.4.1.2 Конзистенција свежег малтера.....	161
IV.2.4.1.3 Запреминска маса свежег малтера	166
IV.2.4.2 Испитивање својстава очврслог малтера	168
IV.2.4.2.1 Запреминска маса очврслог малтера.....	168
IV.2.4.2.2 Чврстоћа при савијању	172
IV.2.4.2.3 Чврстоћа при притиску.....	176
IV.2.4.2.4 Упијање воде.....	180
IV.2.4.2.5 Отпорност при дејству мраза	183
IV.2.4.2.6 Брзина простирања ултразвука	188
IV.2.4.2.7 Динамички модул еластичности	190
IV.2.4.2.8 Скупљање цементног малтера услед сушења.....	192
IV.2.5 Друга фаза експерименталних истраживања	196
IV.2.5.1 Приањање малтера за камену облогу методом <i>Pull-off</i>	198
IV.2.5.2 Термичка компатибилност – испитивање приањања малтера за камену облогу након дејства мраза методом <i>Pull-off</i>	204
IV.2.5.3 Чврстоћа при савијању композитног фасадног панела	208
IV.2.5.4 Гранична сила лома на месту жљеба	212
IV.2.5.5 Маса панела	216
IV.2.5.6 Испитивање појаве ефлоресценције.....	216
IV.2.6 Реализација модела фасадног композитног панела са лицем од камена.....	217
IV.3 ТЕХНОЛОГИЈА ОБЛАГАЊА КОМПОЗИТНИМ ПАНЕЛИМА СА ЛИЦЕМ ОД КАМЕНА.....	220
IV.3.1 Технолошки процес производње панела.....	223

IV.3.2	Технологија транспорта.....	226
IV.3.3	Технологија монтаже.....	228
IV.3.3.1	Систем ношења фасаде.....	228
IV.3.3.2	Спојнице.....	231
IV.3.4	Заштита површине од камена.....	231
IV.4	ОБЛИКОВНИ АСПЕКТ.....	234
IV.5	АСПЕКТ ОДРЖИВОСТИ.....	239
IV.6	АСПЕКТ ЕКОНОМИЧНОСТИ.....	241
V	ЗАВРШНА РАЗМАТРАЊА.....	243
V.1	ДИСКУСИЈА.....	243
V.1.1	Дискусија резултата експерименталних истраживања.....	243
V.1.2	Компаративна анализа.....	250
V.2	ЗАКЉУЧАК.....	256
V.3	ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА.....	262
	ЛИТЕРАТУРА.....	264
Прилог 1	Категоризација камена.....	280
Прилог 2	Извод из стандарда SRPS B.B3.200 (1994).....	282
Прилог 3	Техничка својства примењеног камена.....	283
Прилог 4	Резултати испитивања портланд-композитног цемента.....	285
Прилог 5	Чврстоћа панела при савијању: дијаграм сила-угиб.....	286
Прилог 6	Дејство ветра.....	287
	Биографија аутора.....	290
	Изјава о ауторству	
	Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада	
	Изјава о коришћењу	

Попис слика:

- Слика 1** Састав ветреног фасадног склопа (Romila, 2013)
- Слика 2** Ношење појединачних плоча од камена анкерима (Watts, 2013)
- Слика 3** Ношење плоча од камена тракастим носачима који плоче прихватају непосредно (Табаш)
- Слика 4** Ношење плоча од камена тракастим носачима који плоче прихватају по ивицама елемента посредством трна (Tehnomarket)
- Слика 5** Ношење плоча од камена тракастим носачима који плоче прихватају по полеђини елемента (невидљивим спојем) преко заливених котви (Tehnomarket)
- Слика 6** Ношење панела са подлогом од цементног композита и лицем од камена тракастим носачима који плоче прихватају по полеђини елемента (невидљивим спојем) преко керамичких чаура уграђених у сам елемент (Alsecco)
- Слика 7** Камен са локалитета Сирогојно: а) *Сирогојно-црвени* (брушена површина) (Matović i Vojnović Ćalić, 2015), б) *Булог* (брушена површина) (Piero Zanella srl)
- Слика 8** Кречњак *Тисница*: а) са строматолитима (резана површина), б) са црвено-ружичастим онкоидима (резана површина) (Matović i Vojnović Ćalić, 2015)
- Слика 9** Кречњак *Скржут*: а) светло смеђи варијетет (полирана површина) (Matović i Vojnović Ćalić, 2015), б) варијетет црвенкастих тонова (брушена површина) (аутор)
- Слика 10** Кречњак *Струганик*: а) цепане ломљене плочице б) резане плоче (Brzak), в) равна природна површина камена (Matović i Vojnović Ćalić, 2015)
- Слика 11** Гранит *Шутица* (полирана површина)
- Слика 12** Гранит *Равно Бучје* : а) паљена површина; б) полирана површина, в) штокована површина (Mermeri i graniti Vučić [MGV])
- Слика 13** Дацит *Славковица* : а) буња, б) коцка (Granit Pešcar)
- Слика 14** Мермери Србије: а) *Венчац бели* (Stone Contact), б) *Плави ток* (Piero Zanella srl)
- Слика 15** Камени елементи произведени од шкриљца са локалитета Владичин Хан (Brzak)
- Слика 16** *Finlandia Hall*: а) конкавно савијање првобитне облоге од *Carrara* мермера, б) конвексно савијање новопостављене облоге од *Carrara* мермера (Grelk et al., 2007)
- Слика 17** Лом фасадне камене плоче а) *One South La Salle Street*, Чикаго (Loughran, 2006), б) Робна кућа Београд, Макензијева 57, Београд (аутор)

- Слика 18** Трагови ефлоресценције: *National Museum of the American Indian*, Вашингтон (Loughran, 2006)
- Слика 19** Пресек кроз композитни панел са алуминијумског саћастом подлогом произвођача *StonePly* (StonePly)
- Слика 20** Причвршћивање *StonePly* панела: а) Z-котвом, б) скривеним завртњима (StonePly)
- Слика 21** Причвршћивање *StonePly* панела: а) силиконом - вертикални пресек кроз систем структуралне зид-завесе, б) хоризонтални пресек кроз систем класичне зид-завесе (StonePly)
- Слика 22** Лучни композитни панел са алуминијумском саћастом подлогом (Wenzou Microthin Stone Co. Ltd.)
- Слика 23** Композитни панел са подлогом од лаког бетона *Airtec Stone* (Alsecco UK Ltd.)
- Слика 24** Композитни панели произвођача Alsecco а) ветрени фасадни склоп са панелом *Airtec Stone*, б) фасадни склоп са панелом *Alprotect Stone XL* (Alsecco UK Ltd.)
- Слика 25** Композитни панел са керамичком подлогом (E-Rising International Limited)
- Слика 26** Композитни панел са подлогом од стакла *Dura-Lite Translucent Glass-Backed Natural Stone Panels*: а) приказ разноврсности панела, б) пресек кроз панел (GPI Design/ GPI International)
- Слика 27** Композитни панел са подлогом од стакла: а) панел произвођача TerraCore (TerraCore Panels), б) панел са лицем од мермера у систему зид-завесе *E.N.S.A.D. - Euple Nationale Supérieure des Arts Décoratifs*, Париз (Loughran, 2006)
- Слика 28** Композитне плоче малих димензија: а) неправилне геометрије, б) квадратног облика (CuraStone)
- Слика 29** Префабриковани панел са лицем од камена (Marble Mosaics, лична преписка, март 13, 2014)
- Слика 30** Демонстрација манипулације композитним панелом са алуминијумском саћастом подлогом (Wenzou Microthin Stone Co. Ltd.)
- Слика 31** Лом дела камене облоге: а) лом код класичне облоге, б) одломљени део композитне плоче је придржан подлогом (StonePly)
- Слика 32** Скупљање узорака малтера током времена (Muravlјov i dr., 2002)
- Слика 33** Фактор ефикасности класичног (NWC) и лакоагрегатног бетона (LWAC) (Moravia et al., 2010)
- Слика 34** Зависност чврстоће при притиску од учешћа различитих врста лаког агрегата од експандиране глине (А) и експандираног глинца - глиненог шкриљца (S) (Ke et al., 2009)

- Слика 35** Скупљање лакоагрегатног бетона са агрегатом од експандиране глине током времена (Bastos et al., 2005)
- Слика 36** Промена чврстоће при притиску у односу на проценат замене крупног агрегата од дробљене опеке (Debieb & Kenai, 2008)
- Слика 37** Скупљање лакоагрегатног бетона током времена са агрегатом од дробљене опеке (Debieb & Kenai, 2008)
- Слика 38** Камен употребљен у експерименталном истраживању: а) брушена површина кречњака *Скржуги*, б) полирана површина гранита *Шутица*
- Слика 39** Природни агрегат употребљен у експерименталном истраживању: а) речни песак 0/2 mm, б) речни песак 0/4 mm
- Слика 40** Дробљена опека употребљена у експерименталном истраживању: фракција 2/4 mm
- Слика 41** Агрегат употребљен у експерименталном истраживању: а) експандирана глина 0/2 mm, д) експандирана глина 1/4 mm
- Слика 42** Влакна употребљена у експерименталном истраживању: а) полипропиленска влакна (аутор), б) поливинил-алкохолна влакна (аутор), в) бубрежести пресек поливинил-алкохолних влакана (Kuraray)
- Слика 43** Гранулометријска крива серија Е, Е₁ и Е₂
- Слика 44** Гранулометријска крива серија М₁ и М₂
- Слика 45** Гранулометријска крива серија М₃ и М₄
- Слика 46** Апаратура за справљање узорака: а) стандардна лабораторијска мешалица, б) уграђивање узорака на вибро-столу
- Слика 47** Нега узорака: а) под влажном јутином тканином, б) на ваздуху
- Слика 48** Испитивање конзистенције методом распростирања: а) апаратура, б) пуњење конусног калупа
- Слика 49** Редукција издвајања воде применом влакана: а) еталонска серија Е, б) серија са влакнима и адитивима Е₂
- Слика 50** Стандардна лабораторијска вага
- Слика 51** Процентуална разлика вредности запреминске масе у свежем стању у односу на еталон Е
- Слика 52** Процентуална разлика вредности запреминске масе након 28 дана у односу на еталон Е
- Слика 53** Процентуална разлика вредности запреминске масе након 28 дана у односу на еталон Е₁ и Е₂
- Слика 54** Пад вредности запреминске масе током времена

- Слика 55** Испитивање чврстоће при савијању призматичних узорака: а) пре наношења оптерећења, б) након лома
- Слика 56** Процентуална разлика вредности чврстоће при савијању након 28 дана у односу на еталон Е
- Слика 57** Процентуална разлика вредности чврстоће при савијању након 28 дана у односу на еталон E_1 и E_2
- Слика 58** Прираштај вредности чврстоћа при савијању након 7 дана у односу коначне вредности
- Слика 59** Површина лома: а) узорак са речним песком E_1 , б) узорак са речним песком и дробљеном опеком M_1 , в) узорак са експандираном глином M_3
- Слика 60** Испитивање чврстоће при притиску на полуткама призматичних узорака
- Слика 61** Процентуална разлика вредности чврстоће при притиску након 28 дана у односу на еталон Е
- Слика 62** Процентуална разлика вредности чврстоће при притиску након 28 дана у односу на еталон E_1 и E_2
- Слика 63** Прираштај вредности чврстоћа при притиску након 7 дана у односу коначне вредности
- Слика 64** Испитивање упијања воде: а) сушница, б) ексикатор, в) потапање узорака у воду
- Слика 65** Процентуална разлика вредности упијања воде у односу на еталон Е
- Слика 66** Процентуална разлика вредности упијања воде у односу на еталоне E_1 и E_2
- Слика 67** Расхладна комора за замрзавање узорака
- Слика 68** Апаратура за испитивање брзине ултразвука
- Слика 69** Апаратура за испитивање резонантне фреквенције
- Слика 70** Припрема узорака и испитивање скупљања: а) припрема калуца, б) припремљени калуци са уграђеним реперима, в) испитивање скупљања уз помоћ компаратора, г) серија испитних узорака
- Слика 71** Скупљање цементног малтера услед сушења
- Слика 72** Процентуална разлика вредности скупљања након 360 дана у односу на еталон Е
- Слика 73** Процентуална разлика вредности скупљања након 360 дана у односу на еталоне E_1 и E_2
- Слика 74** Припрема компонентних материјала узорака: а) справљање малтера у мешалици са непокретним лопатицама, б) квашење плочица од камена пре уградње

- Слика 75** Подлоге од камена са резаном површином и површином са канелурама:
а) кречњак Скржут, б) гранит Шутица
- Слика 76** Све серије узорака припремљене за испитивање приањања малтера за подлогу од камена
- Слика 77** Припрема и испитивање узорака: а) исецање цилиндричних зареза, б) лепљење металног диска, в) тестирање узорка методом *Pull-off*
- Слика 78** Тип лома: а) испитна композиција, б) кохезиони лом преко подлоге, в) адхезиони лом, г) кохезиони лом преко малтера (Szemerey-Kiss, 2012)
- Слика 79** Резултати испитивања напона приањања методом *Pull-off*
- Слика 80** Остварени лом узорака: а) кохезиони лом преко камена, б) кохезиони лом преко малтера, в) адхезиони лом, г) мешовити лом
- Слика 81** Припремљени узорци камена са резаном површином и површином са канелурама: а) кречњак *Скржут*, б) гранит *Шутица*, в) изглед површина са канелурама
- Слика 82** Припрема узорака за тестирање приањања методом *Pull-off*: а) капиларно упијање воде преко површине камена, б) полагање узорака у пластичне вреће, б) и г) узорци припремљени за испитивање
- Слика 83** Резултати испитивања отпорности према дејству мрза методом *Pull-off*
- Слика 84** Остварени лом узорака: а) кохезиони лом преко камена, б) кохезиони лом преко малтера, в) адхезиони лом, г) мешовити лом
- Слика 85** Припрема узорака: а) калупи са каменим плочицама на вибро-столу, б) уграђени узорци
- Слика 86** Припремљени узорци
- Слика 87** Испитна диспозиција
- Слика 88** Испитивање чврстоће при савијању композитног фасадног панела: а) испитна композиција, б) испитна опрема, в) лом – појава пукотине на половини распона панела
- Слика 89** Површина лома узорка
- Слика 90** Припрема узорака: а) формирање калупа, б) припрема за уградњу малтера на вибро-столу, в) уграђени узорци, г) готови узорци
- Слика 91** Испитна диспозиција
- Слика 92** Деформација континуалне потконструкције
- Слика 93** Испитивање узорака: а) испитна диспозиција, б) лом узорка
- Слика 94** Површина лома узорака: а) серија М1 са дробљеном опеком, б) серија М3 са експандираном глином

- Слика 95** Испитивање потенцијалне појаве ефлоресценције: а) испитни узорци, б) капиларно упијање воде преко финално обрађеног – полираног лица од камена (гранита)
- Слика 96** Припрема узорака фасадне облоге: а) калуп са постављеним каменим плочицама припремљен за уградњу малтера на вибро-столу, б) узорак у процесу израде
- Слика 97** Модели фасадних композитних облога
- Слика 98** Модели фасадних панела на тракастој потконструкцији ТАВАЏ: а) панел М₁, б) панел М₃, в) и г) детаљ налегања жљеба на потконструкцију
- Слика 99** Захват фасадног панела а) каишевима (Abaco), б) појединачно А рамом (Svec & Jeffers, 1972), в) у групи, учвршћених вертикално (Табаш)
- Слика 100** Складиштење и транспорт фасадних елемената *AirtecStone*– композитних панела са лицем од камена се врши са елементима постављеним хоризонтално или вертикално (Alsecco)
- Слика 101** А рам за транспорт фасадних елемената (Abaco)
- Слика 102** Ношење плоча од камена тракастим носачима који плоче прихватају непосредно (Табаш)
- Слика 103** Детаљи склопа потконструкције (Табаш)
- Слика 104** Резана и полирана површина гранита *Шутица*
- Слика 105** Зависност чврстоћа при притиску и савијању након 7 и 28 дана
- Слика 106** Однос брзине ултразвука и чврстоће при притиску након 7 и 28 дана
- Слика 107** Дијаграми: а) однос запреминске масе и чврстоће при притиску након 28 дана, б) однос брзине ултразвука и чврстоће при притиску након 28 дана, в) однос вредности резонантне фреквенције и чврстоће при притиску након 28 дана и г) однос статичког модула еластичности и чврстоће при притиску након 28 дана

Попис табела:

- Табела 1** Преглед улога фасадног зида у односу на факторе спољашње средине формиран према ауторима Т. Херцог и др. и С. Варчек и др. (Herzog et al., 2004; Wartzeck et al., 2015)
- Табела 2** Преглед фактора осећаја угодности у унутрашњем простору формиран према ауторима Д. Ђорђевић и Т. Херцог и др. (Ђорђевић, 1990; Herzog et al., 2004)
- Табела 3** Преглед улога фасадног зида у односу на факторе унутрашње средине формиран према ауторима Д. Ђорђевић и С. Варчек и др. (Ђорђевић, 1990; Wartzeck et al., 2015)
- Табела 4** Концептуални оквир одрживог дизајна и превенције загађења у архитектури према Ким и Ригидон (Kim & Rigdon, 1998a)
- Табела 5** Класификација чврстих стена према генетској основи и сличности техничких и других својстава (Bilbija i Matović, 2009)
- Табела 6** Техничка својства кречњака ПК Клисура и захтеви квалитета за примену архитектонског камена (Matović, 2009)
- Табела 7** Техничка својства кречњака ПК Тисница и захтеви квалитета за примену архитектонског камена (Matović, 2009)
- Табела 8** Техничка својства кречњака ПК Скржут и захтеви квалитета за примену архитектонског камена (Matović, 2009)
- Табела 9** Техничка својства кречњака ПК Струганик и захтеви квалитета за примену архитектонског камена (Matović, 2009)
- Табела 10** Техничка својства камена северног дела комплекса Букуље (Kurešević, 2013).
- Табела 11** Преглед могућности примене изабраног кречњака (Matović i Vojnović Ćalić, 2015) и гранита
- Табела 12** Својства агрегата у виду речног песка
- Табела 13** Својства агрегата од дробљене опеке
- Табела 14** Својства агрегата у виду експандиране глине
- Табела 15** Технички подаци коришћених полипропиленских и поливинил-алкохолних влакана (Sika; Kuraray)
- Табела 16** Технички подаци за полимерни латекс Sika Latex произвођача Sika (Sika)
- Табела 17** Технички подаци за суперпластификатор Sika Viscocrete Techno 20 произвођача Sika (Sika)
- Табела 18** Пројектовани састав еталонске мешавине Е за справљање једне серије узорака

- Табела 19** Пројектовани састав малтерских мешавина E_1 и E_2 за справљање једне серије узорака
- Табела 20** Пројектовани састав малтерских мешавина M_1 и M_2 за справљање једне серије узорака
- Табела 21** Пројектовани састав малтерске мешавине M_3 и M_4 за справљање једне серије узорака
- Табела 22** Састав пројектованих малтерских смеша за справљање једне серије од три призматична узорка
- Табела 23** Приказ водоцементног, флуидноцементног и агрегатноцементног фактора пројектованих малтерских смеша
- Табела 24** Стварне количине материјала у 1 m^3 малтерске мешавине
- Табела 25** Резултати испитивања распрострања свежег малтера (Jevtić i Vojnović Ćalić, 2014)
- Табела 26** Резултати испитивања запреминске масе свежег малтера
- Табела 27** Резултати испитивања запреминске масе очврслог малтера (Jevtić i Vojnović Ćalić, 2014)
- Табела 28** Резултати испитивања запреминске масе очврслог малтера на узорцима који су намењени испитивању скупљања
- Табела 29** Резултати испитивања чврстоће при савијању током времена
- Табела 30** Резултати испитивања чврстоће при притиску током времена
- Табела 31** Резултати испитивања упијања воде малтерских смеша након 28 дана (Vojnović Ćalić, Jevtić i Krstić-Furundžić, 2015)
- Табела 32** Утврђивање отпорности при дејству мраза испитивањем чврстоћа при притиску
- Табела 33** Утврђивање отпорности при дејству мраза испитивањем чврстоћа при савијању
- Табела 34** Утврђивање отпорности при дејству мраза испитивањем чврстоћа при савијању
- Табела 35** Утврђивање отпорности при дејству мраза испитивањем чврстоћа при савијању
- Табела 36** Резултати испитивања брзине простирања ултразвука након 28 дана
- Табела 37** Резултати испитивања динамичког модула еластичности
- Табела 38** Статички модул еластичности
- Табела 39** Резултати скупљања цементног малтера услед сушења
- Табела 40** Резултати испитивања адхезије методом *Pull-off*

Табела 41 Резултати испитивања отпорности према дејству мраза методом
Pull-off

Табела 42 Чврстоћа при савијању f_{cs} фасадних панела M_1 и M_3

Табела 43 Резултати испитивања граничне силе лома

Табела 44 Маса панела

Табела 45 Класификација облоге према облику елемената камене облоге

Табела 46 Класификација облоге према завршној обради камена

Табела 47 Класификација облоге према разноврсности употребљеног камена

Табела 48 Класификација облоге према разноврсности обраде камена

Табела 49 Класификација облоге према скулпторалности

Табела 50 Класификација облоге према обради спојница

Табела 51 Однос чврстоћа при савијању и притиску

Табела 52 Техничка својства испитиваних панела и материјала и елемената за
упоређење

I УВОД

I.1 Уводне напомене о теми

У оквиру грађевинске индустрије Србије опажа се интензивни увоз природног камена, праћен смањеном применом и извозом домаћег стенског материјала у виду архитектонског камена, кога у оквиру земље има у изобиљу. Значај домаћих лежишта није у довољној мери запажен и релативно мали број каменолома се бави организованом експлоатацијом стенског материјала (Matović i Vojnović Ćalić, 2015). Узрок оваквог стања је, између осталог, и недовољна истраженост стенског потенцијала Србије. У том смислу, закључак трибине поводом Стратегије управљања минералним ресурсима Србије наглашава да треба прецизније дефинисати групе неметаличних сировина које се могу користити у области грађевинске индустрије и њихове локалитете (Udruženje inženjera u rudarstvu, n.d.).

У Србији се врши значајнија организована експлоатација кречњачка који се користи као архитектонски камен. Активни су површински копови источне и западне Србије: *Струганик* (Мионица – Струганик), *Тисница* (Жагубица), *Скржут* (Ужице) и *Клисура* (Ужице –Сирогојно) (Matović, 2009; Matović i Vojnović Ćalić, 2015). Ови кречњаци поседују задовољавајућу декоративност и варијетет боја. Осим кречњака, врши се активна експлоатација гранита *Шутица*, *Плоче* и *Буковик* магматског комплекса Букуље. У оквиру стенске масе Србије уочена је природна тектонска испуцалост и појава накнадних прелина услед вишегодишње неадекватне експлоатације експлозивом.

Истраживање које следи се води проблемом искоришћења потенцијала домаћих ресурса архитектонског камена у сврху облагања фасада архитектонских објеката. У оквиру представљеног рада предлаже се техничко-технолошко решење примене домаћег камена на фасади, односно формирају се модели композитних фасадних панела са лицем од каменог мозаика и подлоге од лакоагрегатног микроармираног цементног композита.

Услед испуцалости стенске масе и често немогућности издвајања блока комерцијалних димензија, предлаже се употреба архитектонског камена у виду каменог мозаика, чиме се увећава њено искоришћење и умањује количина каменог отпада. У складу са трендом одрживости може се приметити да се применом архитектонског камена у танким плочама врши уштеда необновљивог ресурса, стенског материјала естетских квалитета. У контексту глобалног тренда бриге о животној средини треба приметити да употреба локалног камена доприноси очувању окружења смањењем загађења ваздуха приликом транспорта. Примена домаћег камена такође има улогу у очувању локалног идентитета - идентитета места. Предлогом техничко-технолошког решења композитног фасадног панела са лицем од домаћег камена истовремено се даје подстицај развоју домаће индустрије камена и грађевинске индустрије.

Као што се може приметити, у оквиру истраживања се разматрају *композитни материјали* који се могу дефинисати као „вештачки створени материјали, састављени од најмање два или више хемијски различитих материјала, при чему постоје јасно утврђене границе раздвајања између саставних компонената, како на микроструктурном, тако и на макроструктурном нивоу. Тако добијени материјали одликују се синтезом најбољих својстава својих компонената, а често имају и карактеристике које конституенти појединачно не показују“ (Radonjanin, Malešev i Folić, 1999, str. 119). У оквиру овог истраживања термин *композитни панел* се односи на систем фасадног панела који се састоји од подлоге сачињене од композитног материјала и танке облоге од камена.

Појам *модел* је дефинисан као „приказ система који омогућава истраживање његових својстава и у неким случајевима предвиђање будућих исхода“ (InvestorWords). Друга, шира дефиниција, описује овај термин као „графичку, математичку, физичку или вербалну представу, или поједностављену верзију концепта, феномена, односа, структуре, система или аспекта стварног окружења... Будући да је већина објеката и феномена компликована (садрже бројне компоненте) и превише сложена (у односима) да би се разумели у целини, модел садржи само оне карактеристике које су од примарног значаја за оног ко је модел поставио“ (BusinessDictionary). У ужем смислу модел у оквиру овог истраживања представља концепт и остварење пилот елемента фасадног панела. У ширем

смислу, концепт и остварење узорака цементног композита се такође могу сматрати моделом, како је и он сам један сложен систем.

I.2 Претходна анализа информација о предмету и проблему истраживања

Истраживање се бави успостављањем техничко-технолошког решења композитног фасадног панела са лицем од камена. У том светлу, неопходно је прикупити и анализирати одговарајућу информациону основу поводом захтева савременог фасадног склопа, панела и његових компонентних материјала.

Анализа информација о перформансама савременог фасадног склопа и облоге

Опште одреднице за пројектовање савременог фасадног склопа и облоге су сагледане кроз анализу претходно систематизованих научно истраживачких радова домаћих и страних аутора (Blumenau, 1974; Ђорђевић, 1990; Herzog, Krippner & Lang, 2004; Martinković, 1985; Petrović i Nedić, 1995; Wartzeck, Herrmann, Krammer & Sturm, 2015). Анализирана су општа својства спољног омотача у односу на утицаје спољашње и унутрашње средине. У том контексту, помиње се и примена ветреног фасадног склопа, који ће се усвојити као решење система облагања у оквиру ове дисертације (Ђорђевић, 1990, 1996; Romila, 2013; University of Alaska, 2003).

Аспект одрживости пројектантских одлука и употребе грађевинског материјала (који у случају ове дисертације улази у састав предложеног фасадног панела) је такође истражена тема (Berge, 2009; Kim & Rigdon, 1998a, 1998b; Roux & Aleksander, n.d.). Прикупљена литература разматра утицај ових параметара на окружење током целокупног животног циклуса и систематизује повољна својства одрживости, попут примене природних материјала, поновне употребе, рециклаже, и слично.

Домаћа и страна регулатива детаљније третирају услове које савремена фасадна облога треба да испуни. На првом месту, постављају се захтеви поводом физичко-механичких својстава и трајности. Пошто панели попут предложених нису обрађени у оквиру регулативе, консултовани су прописани стандарди који се

у свајају као референтни за истраживање, првенствено са темом камених и фиберцементних плоча за вертикално облагање архитектонских објеката (ASTM C1186-08, 2012; SRPS B.B3.200, 1994; SRPS EN 12467, 2014).

Анализа информација о композитним панелима са лицем од камена

Анализом тржишта композитних фасадних панела уочена је њихова разноврсност, специфична својства и понашање током експлоатације. Предложени композитни фасадни панели се налазе у пресеку два скупа фасадних елемената. Први скуп чине композитни панели са лицем од камена и подлогом од различитих материјала (лакоагрегатни цементни композит, алуминијумска саћаста подлога, керамичка подлога и подлога од стакла) који се ослањају на конструкцију архитектонског објекта преко потконструкције (E-Rising; GPI Design/GPI International; StonePly; TerraCore Panels; Wenzou Microthin Stone Co. Ltd.). У други скуп се убрајају композитни (мозаик) панели са лицем од камена различитих димензија, од спратних висина у систему префабрикације до композитних плоча мањих димензија, које се уграђују мокрим поступком (CuraStone; StonePanel). Информациону грађу која разматра наведене композитне фасадне елементе првенствено чине електронски извори: презентације, каталози и технички листови појединих произвођача и дистрибутера. Најистакнутији пример технологије облагања каменом представља систем *Airtec Stone* компаније Alsecco. Доступни патенти детаљније описују састав и технологију израде, као и ослањања појединих композитних фасадних елемената са лицем од камена (Bauer & Lynam, 1990; Bourke, 1976; Hodges, 1976; Robinson, 1980). Примарни извори, првенствено радови са научних скупова, детаљније образлажу резултате лабораторијских испитивања, поједина својстава и понашање композитних фасадних панела током експлоатације (Scheffler & Kneezel, 2007).

Може се приметити да у оквиру стручне литературе недостаје синтеза и систематизација теоријско-емпиријских знања о композитним фасадним панелима са лицем од камена (поготово мозаика). Доступни извори, углавном електронски, представљају разматрања појединачних решења од стране произвођача. Разматрања у оквиру публикација и периодике су малобројна. Предложено

истраживање, између осталог, има за циљ да прошири теоријско-емпиријска сазнања из ове области.

Анализа информација о саставним материјалима композитног фасадног панела- камену и цементном композиту

Тему домаћег (првобитно југословенског, касније српског) архитектонског и техничког камена, односно његову распрострањеност и могућност примене, су опширно истражили и дали допринос у виду литературе аутори др Ненад Билбија и др Весна Матовић (Bilbija, 1982; Bilbija i Matović, 2009; Matović, 2009). Њихово истраживање је проширено извештајима домаћих аутора са темом могућности експлоатације и примене првенствено архитектонског камена са простора Србије (Cvetkovska Ocokoljić, 2011; Dimitrijević, 2013; Gajić, Matović, Vasić, i Srećković-Batočanin, 2011; Kurešević, 2013; Vasić, 2012). Предложено истраживање ће разматрати врсте камена доступне на домаћем тржишту чија су својства у највећој мери истражена.

Наредна група истраживања се бави приказом предности примене и узрока оштећења танких камених плоча током експлоатације (Grelk, Christiansen, Schouenborg & Malaga, 2007; Kourkoulis, 2006; Loughran, 2006; Naggatz & Gerns, 2007; Scheffzük & Nikolayev, 2008; Schouenborg, Grelk & Malaga, 2007; Siegesmund, Mosch, Scheffzük & Nikolayev, 2008). Ово научно поље је делимично истражено, и захтева додатна разматрања узрока насталих оштећења.

У контексту домаће индустрије, за подлогу композитног фасадног панела је предложен цементни композит. Разматрана је употреба микроармираног и лакоагрегатног композита у сврху формирања одговарајуће подлоге панела. Анализира су теоријско-емпиријска истраживања која извештавају о својствима, примени и технологији израде елемената од овог материјала (Bentur & Mindess 2007; Chandra & Berntsson, 2002; Clarke, 2005; Hannant, 1987; Kind-Barkauskas, Kauhsen, Polónyi & Brandt, 2002; Rixon & Mailvaganam, 1999; The Institution of Structural Engineers, 1999).

Микроармирани бетони и малтери представљају композитне материјале добијење армирањем цементне матрице равномерно распоређеним влакнима. Научници Лабораторије за материјале Института за материјале и конструкције Грађевинског

факултета Универзитета у Београду: др Михајло Мурављов, др Драгица Јевтић и др Димитрије Закић, су дали допринос првенствено у области бетона и малтера ојачаних полипропиленским влакнима (Jevtić, 2013; Jevtić i Zakić, 2002, 2006; Jevtić, Zakić i Savić, 2011; Muravljov, 1999; Muravljov, Živković, Jevtić i Zakić, 2002; Zakić, 2001a, 2001b, 2010). Такође су, на основу прикупљене литературе, вршена разматрања лакоагрегатних цементних композита са агрегатом од експандиране глине (Bastos, Sousa & Melo, 2005; Bogas, Nogueira & Almeida, 2014; Ke, Beaucour, Ortola, Dumontet & Cabrillac, 2009; Moravia, Gumieri & Vasconcelos, 2010; Stojiljković i Denisenko, 1999) и дробљене опеке (Bektas, Wang & Ceylan, 2009; Cachim, 2009; Debieb, 2008; Hansen, 1992; Janković, 2000, 2001; Janković, Bojović, Nikolić, Lončar i Romakov, 2010; Janković, Nikolić, Bojović, Lončar i Romakov, 2011; Jevtić, Zakić i Harak, 2002; Jevtić, Zakić, Markičević, Pavlović i Terzić, 2006; Pakvor, Kasaš i Kekanović. 1999; Poon & Chan, 2006; Radoičić, 1997). Пошто су микроармирани и лакоагрегатни цементни композити у употреби дужи низ година, постоји значајна информациона основа теоријско-емпиријских разматрања ових материјала. Како су бетони и малтери и сами композитни материјали, истраживања у сврху унапређења својстава су константна.

Спроведено је теренско истраживање доступности влакана и агрегата, као и технолошког статуса домаћег тржишта (Sika; Sprajić; Liapor). Такође је извршена анализа светског тржишта танких фасадних плоча од микроармираног цементног композита која пружа увид у њихов састав, технологију израде и спроведена лабораторијска испитивања. Електронски извори описују танке фасадне фиберцементне плоче за облагање архитектонских објеката са стакленим – произвођача Rieder, поливинил-алкохолним – произвођача Eternit, и целулозним влакнима – произвођача James Hardie.

Анализа информација о технологији облагања фасада

За област технологије грађења, односно облагања фасада, током истраживања су анализирани извори у виду опште литературе. Домаћи и страни аутори су представили предности префабрикације и индустријализације, као и смернице поводом технологије израде, транспорта и монтаже грађевинских елемената

(Krastavčević, 1996; Krstić, 1995; Krstić, 2003; McEvoy, 2014; Staib, Dörrhäfer & Rosenthal, 2008).

I.3 Проблем и предмет истраживања

Предмет истраживања су композитни фасадни панели са лицем од камена, односно разматрање могућности формирања техничко-технолошког решења таквог елемента. Истраживање обухвата и шире разматрање својстава фасадних облога са циљем дефинисања пројектантских одредница. Предмет истраживања такође обухвата одабране материјале, првенствено цементне композите различитог састава, односно разматрање њихове разноврсности, својстава и могућности примене у саставу композитног фасадног панела.

Средишњи *проблем* истраживања представља оптимална примена доступног домаћег камена у склопу фасадне облоге, односно успостављање задовољавајућег техничко-технолошког решења композитног панела са лицем од камена. Теоријско одређење проблема истраживања првенствено почива на научним законитостима грађевинске физике ветреног фасадног склопа и теоријским разматрањима употребе грађевинског материјала са аспекта одрживости, односно, његовог утицаја на окружење током целокупног животног циклуса. Рад се истовремено ослања на разматрање доступних теоријско-емпиријских истраживања технологије израде, својстава и понашања током експлоатације различитих композитних панела са лицем од камена и њихових саставних компоненти. Истраживање се заснива на научним чињеницама, законитостима и теоријама које третирају разноврсност, особености и могућности примене домаћег стенског материјала у виду архитектонског камена. Такође се разматрају теоријске поставке које се тичу могућности примене лакоагрегатног и микроармираног цементног композита у сврху израде подлоге композитног панела.

I.4 Циљ и задаци истраживања

Циљ истраживања представља унапређење технологије облагања фасада архитектонских објеката домаћим каменом, односно успостављање оптималног техничко-технолошког решења фасадног композитног панела са лицем од камена и подлогом од цементног композита, који се може применити у склопу ветрене фасаде. Циљ такође обухвата научно образложење прихваћеног решења, односно прилог теоријско-емпиријским разматрањима у оквиру области технологије облагања композитним фасадним панелима са лицем од камена.

Из постављених циљева произилазе следећи *задаци* истраживања:

- анализа и објашњење идентификованих одредница за пројектовање фасадног склопа и панела,
- избор фасадног склопа и компонентних материјала панела на основу дефинисаних одредница уз образложење избора,
- идентификација и анализа стенског материјала на територији Србије, који је погодан за примену у виду архитектонског камена, односно за облогу предложеног панела,
- анализа основних својстава фасадних плоча од камена,
- анализа и систематизација композитних фасадних панела са лицем од камена и разматрање њихових основних својстава,
- анализа својстава одабраних цементних композита – лакоагрегатних, микроармираних и полимерима модификованих композита,
- пројектовање композитног фасадног панела на основу дефинисаних одредница и закључака претходних истраживања,
- експериментално испитивање цементних композита и фасадног панела уз анализу и објашњење резултата,
- анализа технологије облагања фасада архитектонских објеката предложеним композитним панелима са лицем од камена,
- предлог обликовних могућности композитног фасадног панела са лицем од камена,
- разматрање аспекта одрживости и економичности примене предложених композитних фасадних панела са лицем од камена,

- синтеза истраживања и упоређење остварених цементних композита и композитних панела са референтном литературом, регулативом и сличним производима.

I.5 Полазне хипотезе

Након темељног разматрања предмета истраживања за предложено научно истраживање формиране су следеће *хипотезе*:

X1: *Домаћи камен се може користити за формирање композитних панела чиме се остварују перформансе погодне за формирање склопа ветрене фасадне облоге.* На територији Републике Србије налазе се лежишта стенског материјала који је погодан за формирање композитних фасадних панела са лицем од камена. У контексту домаће индустрије, за подлогу композитног фасадног панела предлаже се употреба цементног композита. Микроармирани и лакоагрегатни малтери поседују својства која погодују формирању одговарајуће подлоге. Разматрајући сличне реализоване примере из праксе и литературе, може се претпоставити да се уз поштовање првобитно дефинисаних пројектантских одредница може формирати фасадни елемент са лицем од камена који је погодан за примену у оквиру ветреног фасадног склопа.

X2: *Домаћим каменом се може формирати камени мозаик у виду композитног панела.*

Честа појава природне тектонске испуцалости стенске масе на територији Србије и накнадних оштећења узрокованих вишегодишњом неадекватном експлоатацијом експлозивом намећу разматрање примене камена у виду плоча за облагање мањих димензија. На основу сличних реализованих композитних фасадних облога може се претпоставити да се овим плочама може формирати камени мозаик у виду композитног панела са подлогом од цементног композита који се тако може применити у оквиру склопа ветрене фасаде.

I.6 Научне методе истраживања

Информациона грађа се, осим у виду писаних извора, прикупља техником интервјуа и теренским истраживањем. При формирању информационе основе користи се општи научни метод анализе садржаја прикупљене грађе која се критички анализира, селекује и систематизује по основним областима које рад третира.

Детаљном анализом и синтезом садржаја литературе која се бави утицајима на спољни омотач, функцијама спољног омотача објекта, применом ветреног фасадног склопа, употребом грађевинског материјала са аспекта одрживости и техничким условима у оквиру регулативе, постављају се основне одреднице за пројектовање композитног фасадног панела са лицем од камена.

Студијом случаја одабраног стенског материјала Србије и анализом његових својстава, поставља се основ за избор архитектонског камена у улози облоге предложених фасадних панела. Студијом случаја се врши анализа композитних фасадних панела који су присутни на светском тржишту. Анализом садржаја референтне литературе дефинишу се својства и понашање при експлоатацији фасадних плоча од камена и композитних панела са лицем од камена. Истим методом се спроводи анализа одабраних лакоагрегатних, микроармираних и полимерима модификованих цементних композита.

Научном методом експеримента у контролисаним лабораторијским условима, спроводи се испитивање првенствено физичко-механичких својстава и трајности цементних композита и склопа фасадног панела. Опсервацијом и упоредном анализом забележених резултата инструменталних мерења, усвајају се модели композитног фасадног панела.

Укратко, на основу теоријског, експликативног и аналитичког дела истраживања, успостављеног општим научним методама, формира се научна база на којој се заснивају варијанте цементног композита и модела композитног фасадног панела. Конкретном научном методом експеримента над реализованим узорцима, као и њиховим упоређењем са референтном регулативом и комерцијалним фасадним

производима, недвосмислено се доказују хипотезе о могућности употребе домаћег камена у саставу композитног фасадног панела који налази примену у оквиру ветреног фасадног склопа.

I.7 Структура докторске дисертације

Рад се састоји од пет главних поглавља: *Увод, Одреднице за пројектовање фасадног склопа и фасадног панела, Разматрање материјала и склопа композитног фасадног панела, Техничко-технолошко решење композитног фасадног панела са лицем од камена и Завршна разматрања.*

У *Уводу* се образлаже тема, предмет и проблем истраживања, даје увид у литературу, разматрају циљеви и задаци истраживања, хипотезе, као и научни методи истраживања, даје преглед структуре докторске дисертације и врши процена научне оправданости и резултата истраживања.

Поглавље *Одреднице за пројектовање фасадног склопа и фасадног панела* садржи анализу и објашњење идентификованих пројектантских одредница. У том смислу се разматрају улоге које има фасадни омотач, предности употребе ветреног фасадног склопа, пројектантске одлуке и избор материјала у складу са принципом одрживости и технички прописи и стандарди који су релевантни за истраживање. Такође се образлажу пројектантске одлуке усвојене на основу претходно наведених пројектантских одредница.

Поглавље *Разматрање материјала и склопа композитног фасадног панела* се бави применом камена у својству фасадне облоге, прелиминарном селекцијом и образложењем избора у оквиру архитектонског камена Србије, као и разматрањем примене класичног система облагања фасада каменом. У оквиру овог поглавља се такође разматрају својства композитних фасадних панели са лицем од камена који су присутни на светском тржишту, предност њихове употребе, као и могућност примене микроармираног и лакоагрегатног цементног композита у својству подлоге предложеног панела.

Поглавље *Техничко-технолошко решење композитног фасадног панела са лицем од камена* се првенствено бави реализацијом композитног панела са лицем од домаћег камена и подлогом од лакоагрегатног микроармираног цементног композита. Пројектују се модели композитних фасадних панела, предлаже програм експерименталног истраживања и врше лабораторијска испитивања, анализирају и образлажу резултати испитивања првенствено физичко-механичких својстава и трајности панела. Даље се анализира технологија облагања предложеним фасадним панелом, односно технологија производње, транспорта и монтаже. Коначно се разматра обликовни аспект, као и аспекти одрживости и економичности облагања овим композитним панелом.

У оквиру *Завршних разматрања* се врши дискусија резултата експерименталних истраживања и компарација остварених модела фасадних панела са референтним стандардима и фасадним облогама које су присутне на тржишту. Такође се сумирају резултати рада, проверавају хипотезе и предлажу наредна истраживања. На самом крају рада су дати преглед литературе, прилози и биографија аутора.

I.8 Остварени резултати и научни допринос дисертације

Остварени доприноси предметног истраживања за ужу научну област *Архитектонске конструкције, материјали и физика зграда* су:

- проширење и унапређење области технологије облагања архитектонских објеката каменом;
- научном аргументацијом се показује применљивост домаћег стенског материјала за облагање архитектонских објеката;
- прилог развоју технолошког процеса израде композитне облоге од камена путем израде пилот елемента;
- увођење актуелног тренда избора пројектантских поступака и грађевинског материјала са аспекта одрживости у поступак пројектовања композитних фасадних панела са лицем од камена.

Остварени научни доприноси истраживања се конкретније огледају у постигнутим резултатима истраживања:

- дефинисање одредница за пројектовање композитних панела са лицем од камена;
- систематизација постојећих теоријско-емпиријских сазнања о композитним фасадним панелима са лицем од камена и танким фасадним плочама од камена;
- теоријско-емпиријска разматрања избора примењених материјала;
- преглед неопходних научних чињеница о архитектонском камену Србије;
- методолошки приступ проблему реализације композитног панела са лицем од камена;
- формирање модела оптималних техничко-технолошких решења композитних фасадних панела са лицем од камена у складу са дефинисаним пројектантским одредницама;
- формирање модела технологије облагања фасада пројектованим композитним панелима са лицем од камена.

Примена резултата истраживања очекује се у употреби наведених пројектантских одредница и методолгије приликом формирања нових фасадних облога, посебно сличних карактеристика са предложеним композитним панелима. Примена добијених резултата се очекује у науци - као полазиште за даља истраживања на тему облагања сличним композитним панелима.

Практична примена резултата истраживања се огледа у понуђеном варијетету модела фасадних панела који се могу применити у пракси- производити и директно применити у својству спољне облоге архитектонског објекта. Резултати истраживања налазе практичну примену како у домаћој индустрији камена, тако и у грађевинској индустрији уопште.

II ОДРЕДНИЦЕ ЗА ПРОЈЕКТОВАЊЕ ФАСАДНОГ СКЛОПА И ФАСАДНОГ ПАНЕЛА

Појам *омотач зграде* се односи на надземне делове објекта који одвајају унутрашњи од спољашњег простора (Ђорђевић, 1990), односно испуњавају предуслов да им је једна површина у додиру са спољашњом средином (Martinković, 1985). Спољни омотач објекта чине две физичко-функционалне целине, односно два јасно дефинисана елемента: фасадни омотач и кровни покривач. У одређеним случајевима се, међутим, ова два елемента спајају у јединствени кровно-фасадни омотач зграде (Petrović i Nedić, 1995). Делови спољашњег омотача објекта могу се дефинисати као спољашње преграде, које по положају могу бити вертикалне, косе или хоризонталне, а по намени покретне (врата и прозори) или непокретне (Martinković, 1985).

У оквиру истраживања се посвећује пажња искључиво теми фасадног омотача. Фасаде се могу дефинисати као видни, најчешће вертикални и дводимензионални делови спољног омотача објекта. *Видни, вертикални и дводимензионални* се могу схватити као релативни појмови (Blumenau, 1974; Herzog et al., 2004).

Истраживање се првенствено бави формирањем модела фасадне облоге, а затим се даје предлог технологије облагања фасада архитектонских објеката предложеним елементима. Као предмет истраживања је одабран композитни панел са лицем од камена.

Приликом пројектовања елемената облоге и предлагања технологије облагања, који испуњавају савремене захтеве облагања фасада, на првом месту је потребно утврдити улогу фасадне облоге у оквиру система архитектонског објекта. Како пракса и наука указују на предности ветреног фасадног склопа у савременим условима градње вишеслојних фасадних зидова, образложиће се овај избор облагања. У контексту актуелне глобалне бриге за животну средину, обратиће се пажња на утицај избора пројектантских поступака и конститутивних материјала облоге на окружење. Најзад, неопходно је осврнути се на прописану техничку регулативу, која пружа прецизније пројектантске смернице и услове.

III.1 УЛОГА ФАСАДНОГ ОМОТАЧА

Формирање оптималног предлога система фасадног зида, а самим тим и фасадне облоге, у великој мери зависи од улога које спољашња преграда преузима у овину целокупног система архитектонског објекта. Улога (функција), а затим и пројектантско решење, зависе од утицаја фактора спољашње и унутрашње средине, односно од захтева пријатног боравка корисника у оквиру објекта.

По правилу, на спољашње услове се не може утицати, осим избором локације. Улога, односно, задаци фасаде представљају одговор на непроменљиве специфичне локалне спољне услове и захтеве угодног боравка корисника у унутрашњем простору. Ови захтеви се, у односу на намену простора, постављају накнадно, приликом процеса пројектовања (Herzog et al., 2004). Сам начин коришћења простора ствара специфичне унутрашње услове, који такође имају великог утицаја на спољну преграду. У овом светлу, потпунија дефиниција улоге фасадног зида би била – да омеђи унутрашњи простор, а потом и да га заштити од негативних утицаја спољашње и унутрашње средине (Ђорђевић, 1990).

Спољашње факторе средине у великој мери чине климатски услови који утичу на формирање спољашње преграде у смислу испуњења захтева грађевинске физике. Основни фактори спољашње средине и резултујуће улоге спољашњег зида су приказани у Табели 1.

У зависности од специфичних услова спољашње средине, могу се у одређеној мери размотрити и додатна статичка и динамичка оптерећења, стања шока (сеизмички шок, топлотни шок), деформације (услед промене температуре и влажности материјала) и слично.

За представљено истраживање је посебно значајан допринос фасадне облоге у естетском и амбијенталном смислу, као и допринос потврди идентитета места и примени локалних ресурса. Из наведених разлога, за видни, завршни слој елемента фасадне облоге, предлаже се употреба локалног материјала – стенског материјала са подручја Србије, који испуњава наведене услове.

Табела 1 Преглед улога фасадног зида у односу на факторе спољашње средине формиран према ауторима Т. Херцог и др. и С. Варчек и др. (Herzog et al., 2004; Wartzcek et al., 2015)

No	Фактори спољашње средине	Улога фасадног зида
1	Сунчево зрачење (осветљење)	Заштита од директних сунчевих зрака и бљеска, регулација осветљења, замрачивање, UV заштита, пропуштање дневног осветљења
2	Сунчево директно зрачење (топлота)	Топлотна заштита од загревања спољне површине омотача услед сунчевог зрачења и топлог ваздуха који узлазно струји по фасади, пасивни топлотни добици
3	Температура ваздуха (лето и зима)	Топлотна заштита, топлотна акумулација, избегавање топлотних мостова, непропустљивост на ваздух
4	Атмосферске падавине, испарења, влажност ваздуха	Заштита од продора воде, косих ударних падавина, сливања воде (филм) по фасади, водонепропустљивост, одвођење атмосферског талоба, паронепропустљивост ¹ , одвођење водене паре и спречавање појаве кондензата
5	Ветар	Механичка отпорност и заштита од продувавања
6	Мирис (непријатан) и штетне супстанце у ваздуху	Непропустљивост на ваздух (заптивеност)
7	Бука (која се преноси ваздухом)	Заштита од буке
8	Механички утицаји	Отпорност на утицаје, стабилност свих елемената и делова
9	Сопствена тежина	Статичка носивост
10	Пожар	Отпорност на дејство пожара и контрола ширења пожара
11	Урбано окружење	Естетски квалитет и амбијентална вредност (идентификација)
12	Социо-културални контекст	Одраз намене простора, власника или корисника, тренутка и места у ком је објекат изграђен
13	Локални ресурси	Употреба локалних ресурса као одраз рационалног грађења и бриге о природној средини
14	Прљање (услед прашине и чађи)	Отпорност на прљање и могућност једноставног одржавања
15	Поглед у унутрашњост објекта	Ограђујућа улога (визуелно)

¹ У случају ветреног фасадног склопа, који омогућава одвођење водене паре путем ветреног ваздушног међупростора, уколико је удаљење фасадне облоге од термоизолације и основне масе зида одговарајућих димензија (и са задовољавајућом вентилацијом), могуће је искључити парну брану из састава ветреног склопа (Žegarac, Stanković, Jovanović Popović i Simic, 1995).

Улога фасадног зида је, такође, да задовољи услове угодног боравка корисника у унутрашњем простору. Преглед основних фактора осећаја угодности су приказани у Табели 2.

Табела 2 Преглед фактора осећаја угодности у унутрашњем простору формиран према ауторима Д. Ђорђевић и Т. Херцог и др. (Ђорђевић, 1990; Herzog et al., 2004)

No	Фактори угодног боравка у унутрашњем простору
1	Температура ваздуха
2	Влажност ваздуха
3	Брзина струјања ваздуха
4	Температура унутрашњих површина
5	Квалитет ваздуха (састав, чистоћа, мириси итд.)
6	Интензитет звука
7	Квантитет и квалитет осветљења (увођење дневног осветљења)
8	Визуре ка спољашњој средини
9	Одвајање приватне од јавних зона
10	Заштита од повреда
11	Заштита од пожара (ако је неопходно)
12	Ограничење токсичног оптерећења

Параметри осећаја угодности се опажају субјективно. Осим наведених чинилаца, треба напоменути да и психолошки фактори (материјал и боја), као и културолошки аспекти могу играти значајну улогу. На пример, мерљиве променљиве које утичу на угодност у топлотном смислу (No 1-5, Табела 2), заједно са географским подручјем, навикама, одећом, активностима и индивидуалном сензибилношћу, одређују ниво угодности у том смислу (Herzog et al., 2004).

Унутрашње факторе који утичу на формирање фасадног омотача диктирају намена, поменути услови угодног боравка у оквиру архитектонског објекта и

начин коришћења унутрашњег простора. Основни утицаји унутрашње средине и резултујуће улоге спољашњег зида су приказани у Табели 3.

Табела 3 Преглед улога фасадног зида у односу на факторе унутрашње средине формиран према ауторима Д. Ђорђевић и С. Варчек и др. (Ђорђевић, 1990; Wartzeck et al., 2015)

No	Фактори унутрашње средине	Улога фасадног зида
1	Температура унутрашњег ваздуха	Топлотна заштита, избегавање топлотних (хладних) мостова, топлотна акумулација, непропустљивост на ваздух
2	Влажност ваздуха	Пропуштање и одвођење влаге, спречавање појаве кондензата
3	Пожар	Отпорност на дејство пожара и контрола ширења пожара
4	Бука	Заштита од буке
5	Механички утицаји	Отпорност на механичке утицаје
6	Прљање	Отпорност на прљање и могућност једноставног одржавања хигијене

Фасада, дакле, има заштитну и регулишућу функцију. Има улогу прелазне, граничне зоне која пружа одговор на задате утицаје и по потреби их мења, регулише или од њих штити. Има задатак да изолује, заптије (херметизује), пригуши, филтрира, сачува (акумулира), преусмери, обезбеди физичку баријеру и слично (Herzog et al., 2004).

Осим наведених чинилаца који утичу на формирање фасадне преграде, *Правилник о техничким нормативима за пројектовање и извођење завршних радова у грађевинарству* (1990, члан 25-26) наводи да је, између осталог, пројектовањем и извођењем завршних радова на објектима неопходно осигурати: безбедност приликом употребе и одржавања, трајност², као и рационалност и економичност у погледу трошкова израде и одржавања током експлоатације објекта.

² Трајност је у оквиру стандарда *BS 7543* (citirano u McEvoy, 1994) дефинисана као способност објекта и његових делова да врше захтеване функције током одређеног временског периода и под утицајем различитих фактора:

- климатски фактори - попут промена у амбијенталној температури, атмосферски гасови, загађивачи ваздуха (смог и честице морске воде), циклуси смрзавања-одмрзавања и ветар;

Од свих утицаја који делују на фасадни омотач, за следећи корак истраживања ће бити од највећег интереса унутрашњи и спољашњи климатски услови, односно макроклиматски и микроклиматски фактори.

-
- биолошки фактори - попут микроорганизама, инсеката и биљака;
 - фактори оптерећења - стална напрезања попут пузања или повремена попут земљотреса;
 - хемијски и физички фактори - попут некомпатибилних материјала или контамираног тла;
 - фактори употребе - попут хабања и кидања материјала током свакодневног коришћења.

II.2 ВЕТРЕНИ ФАСАДНИ СКЛОП

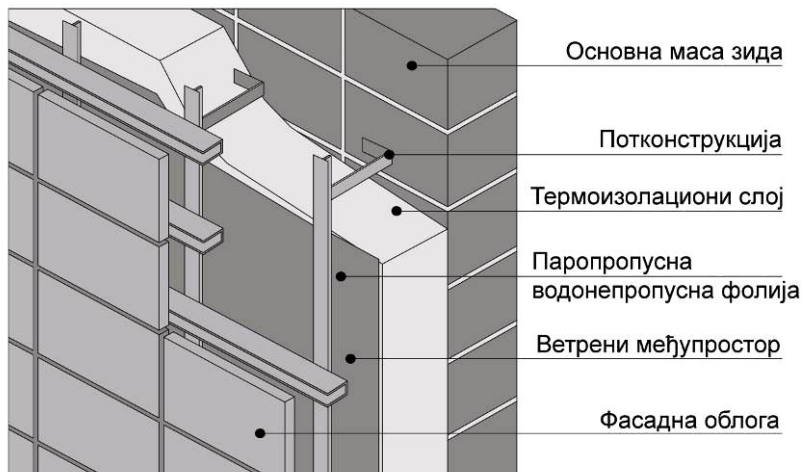
На спољне преграде у сваком тренутку делују спољашњи – макроклиматски, и унутрашњи – микроклиматски фактори. Једна од најраспрострањенијих штетних појава проузрокована овим утицајима је стварање кондензата унутар фасадног зида или на његовим површинама (Ђорђевић, 1990). Ветрене фасаде, или како се још називају – *хладне фасаде* (Knaack, Klein, Wilow & Auer, 2014) највећи допринос дају у елиминисању негативног утицаја дифузије водене паре.

Монолитна спољна преграда, односно хомогени састав омотача од само једног материјала, тешко може испунити захтеве топлотних перформанси савремених објеката (Herzog et al., 2004). Услови савремене технологије грађења најчешће захтевају примену вишеслојних система, код којих сваки слој има специфичну улогу и сходно томе својства, која доприносе унапређењу перформанси целокупног склопа. Варијабилност употребљених слојева омогућава прилагођавање разноврсним спољним условима. Најчешће састав спољног омотача садржи три основна слоја који морају бити међусобно компатибилни (Ђорђевић, 1990):

1. основна маса зида - која може имати и конструктивну улогу;
2. термоизолациони слој - са спољашње стране основне масе зида;
3. фасадна облога - која има заштитну и естетску улогу.

Увођење ветреног међупростора између основне масе зида са термоизолацијом и спољне фасадне облоге представља унапређење вишеслојног фасадног система, првенствено у погледу елиминације водене паре и појаве кондензата. Овакав склоп фасадног зида доприноси неометаној дифузији и одвођењу водене паре природном вентилацијом, што је посебно повољно у зимском периоду. Значајан је и допринос у смањењу утицаја сунчевог зрачења у летњем периоду, односно унапређењу осећаја угодности у унутрашњем простору. Ветрени фасадни системи се састоје од шест основних компонената (Слика 1):

1. основна маса зида;
2. потконструкција - која се мора ослонити на конструктивни елемент;
3. термоизолациони слој;
4. паропропусна водонепропусна фолија;
5. ветрени међупростор;
6. фасадна облога.



Слика 1 Састав ветреног фасадног склопа (Romila, 2013)

У погледу грађевинске физике, најштетније утицаје по фасадни зид имају падавине и ветар. У циљу заштите од продора влаге у унутрашњост фасадног зида под утицајем ветра и кише, препоручује се одвајање термоизолационог слоја од ветреног међупростора паропропусном водонепропусном фолијом. Код затворених спојница, атмосферска вода не пролази кроз фасадну облогу. Пролази само кроз отворене спојнице и дренира се преко полеђине фасадне облоге или лица фолије постављене преко слоја термоизолације. Струјање ветра кроз отворене спојнице са собом може унети капљице воде директно у унутрашњост основне масе зида (University of Alaska, 2003).

У наредним поглављима ће се приказати кратак преглед спољашњих и унутрашњих климатских параметара, њихов утицај на ветрени фасадни омотач зграде и принцип функционисања ветрених фасада, како би се указало на предности њихове примене. Такође ће се размотрити основни системи ношења

тешких фасадних панела, у оквиру ветреног фасадног склопа, којима припада елемент обухваћен овим истраживањем.

II.2.1 Макроклиматски фактори

Из приказаних функција фасадног омотача (поглавље II.1) може се видети његова улога у заштити унутрашњег простора од разноврсних климатских утицаја спољашње средине како би се, између осталог, обезбедили услови за угодан боравак у унутрашњем простору. Од спољашњих - макроклиматских утицаја, за функционисање ветреног фасадног склопа, значајни су (Ђорђевић, 1990):

- температура ваздуха и изложеност сунчевом зрачењу,
- влажност ваздуха,
- атмосферске падавине - киша, снег и град,
- ветар.

Под утицајем сунчевог зрачења, температура омотача зграде може бити знатно виша од температуре ваздуха који је окружује, док по престанку деловања сунчевог зрачења, може бити и нижа – током друге половине дана и ноћу. Тада се могу стећи услови за стварање кондензата. На површинску температуру делова омотача зграде првенствено утиче изложеност директном утицају сунчевог топлотног зрачења. Она такође зависи од боје, структуре и фактуре материјала облоге, што даље утиче на дисперзију, односно рефлексију топлотних зрака. Светли материјали мање подлежу загревању од тамнијих, док се глатки и сјајни материјали са израженом рефлексијом, попут метала и фолија, мање загревају лети, а зими могу остварити и температуре ниже од околног ваздуха (после подне и ноћу). Описане појаве су значајне за температурне дилатације облоге.

Сваки материјал, у зависности од сопственог коефицијента температурног ширења (α_T), је подложен запреминским деформацијама при променама температуре. Напрезања услед ових појава могу неповољно утицати на класичне непроветраване спољне преграде са монолитно везаном облогом узрокујући оштећења попут пуцања и отпадања. Код проветраваних спољних преграда,

елемент облоге се за основну масу зида причвршћује местимично – преко држача који дозвољавају потребна дилатирања. На тај начин се превазилазе неповољна оштећења и унапређује трајност фасадног склопа.

Влага која утиче на спољну преграду објекта се манифестује у виду влажности ваздуха и атмосферских падавина (кише, снега, града). Функција фасадне облоге је да штити објекат од атмосферских падавина, што подразумева водонепропустљивост, која најчешће подразумева и повећану отпорност на дифузију водене паре. Из тих разлога, код непроветраног склопа долази до нагомилавања влаге у слоју испод фасадне облоге. Међутим, код проветраваних спољних омотача, ваздушни међупростор иза фасадне облоге омогућава неометану дифузију без обзира на високу дифузну отпорност, односно отпорност на упијање воде саме облоге.

За циркулацију ваздуха унутар ваздушног међупростора, значајно је и дејство ветра. Под његовим утицајем, брзина струјања у ветреном међупростору се може вишеструко повећати, као и интензивирати конвективна струјања уз саму површину фасадне облоге (Ђорђевић, 1990).

II.2.2 Микроклиматски фактори

Фасадни склоп је осим спољашњим климатским дејствима, перманентно изложен и утицајима унутрашњег климата. Најважнији елементи микроклимата (стања ваздуха), који утичу на факторе угодности боравка у унутрашњем простору су (Ђорђевић, 1990):

- температура ваздуха,
- влажност ваздуха,
- брзина струјања ваздуха,
- температура унутрашњих површина,
- састав и чистоћа ваздуха, мириси и сл.

За проветравање омотаче су најбитнија прва два фактора – температура и влажност унутрашњег ваздуха, док струјање ваздуха у унутрашњем простору и

температура унутрашњих површина (спољне преграде) немају значајнијег утицаја на процес проветравања. Састав, чистоћа ваздуха и мириси такође нису од значаја за процесе у проветраваном склопу.

Утицај климатских фактора на објекат је комплексан, посебно при једновременом дејству више фактора (температуре и влаге, као и атмосферских падавина и ветра), што и представља неповољнију ситуацију за спољни омотач.

II.2.3 Штетне последице утицаја дифузије водене паре

Једна од најраспрострањенијих штетних појава која се јавља под утицајем макроклиматских и микроклиматских фактора код вишеслојних спољних омотача је стварање кондензата унутар елемента омотача или на његовим површинама. Штетне последице кондензата узрокују смањену трајност материјала (нпр. труљење), пад термоизолационих својстава материјала натопљених влагом, стварање буђи, тамних и влажних мрља са унутрашње стране спољног зида, појаву ефлоресценције (у води растворљивих соли) на површини фасадне облоге као и пуцање и отпадање делова фасадне облоге услед дејства мраза (Ђорђевић, 1990).

Код традиционалних вишеслојних фасадних зидова, уочена су штетна дејства услед нагомилавања затворене дифузне влаге у слоју иза фасадне облоге (Ђорђевић, 1990):

- пуцање плоча од камена или керамике услед експанзије подлоге од малтера при мржњењу;
- отпадање керамичких плочица са уским спојницама услед комбинованог дејства влаге у малтеру (бубрења) и напонима термичких дилатација плочица;
- појава ефлоресценције (беличастих мрља) између плочица – услед испирања растворљивих соли из малтера кроз фуге, и на фасадној облози – услед испирања растворљивих соли из малтера и саме облоге (нпр. фасадне опеке);

- лускање завршног површинског слоја од акрила или синтетичког материјала, који штити фасаду од продора кише, има улогу парне бране и спречава неометану дифузију водене паре;
- корозија елемената за причвршћивање и отпадања елемената фасадне облоге услед нагомилавања дифузне влаге испод саме паронепропусне облоге (облога од ребрастог лима).

Значајно је напоменути да се кондензат не ствара само у зимском, већ и током летњег периода, када се рачуна на исушивање спољног зида (Ђорђевић, 1990).

II.2.4 Природна вентилација унутар ветреног ваздушног слоја фасадног зида

Природну вентилацију унутар ветреног ваздушног слоја фасадног зида покрећу две појаве: термички узгон (термичка узгонска сила – *ефекат димњака*) и ветар. Кретање ваздуха термичким узгоном је иницирано разликом у притисцима, која се јавља захваљујући разлици у густинама, односно температурама ваздуха. Интензитет циркулације ваздуха унутар ветреног међупростора зависи од разлике у температурама између спољног ваздуха и ваздуха у међупростору, геометријских карактеристика међупростора (појаве препрека), димензија међупростора, дужине проветравања, димензија отвора (или величине делова облоге и спојница). Дужина проветравања – висинска разлика између улазног и излазног отвора, се код затворених спојница може простирати између једне или више спратних висина (препоручује се максимално 4-5 етажа) или само кроз висину парапета³ (Ђорђевић, 1990). Повећавањем вертикалне дужине проветравања, повећава се и разлика у притисцима међу њима и интензивира се циркулација ваздуха. Димензије проветраног међупростора се проверавају прорачуном. Минимална ширина ветреног слоја износи 2 cm без препрека (Romila, 2013), а ради толеранција у извођењу грубих грађевинских радова, пожељно је остварити минимални слој од 4-5 cm (Табашевић, 2014).

³ Максимална висина канала треба да буде мања од 18 m, док извесне норме препоручују висину до 3 m (Romila, 2013).

Ваздух се креће од зоне вишег ка зони нижег ваздушног притиска. Када је унутрашња температура ваздуха виша од спољашње, ваздух улази кроз ниже отворе на фасади, а излази кроз више. Смер вентилације се мења када је унутрашња температура ваздуха нижа од спољашње температуре.

Природна вентилација се унутар ваздушног међупростора одвија и под утицајем ветра, чији су брзина и смер променљиви. Тако, на пример, ветар неједнаким интензитетом притиска површину спољног зида, а те варијације могу изазвати активна струјања ваздуха иза фасадне облоге (University of Alaska, 2003). Утицај ветра се такође огледа у дејству кроз отворене спојнице облоге, чиме се остварује повећана запремина циркулације ваздуха, односно, може се вишеструко повећати запремина измењеног ваздуха у јединици времена унутар ветреног међупростора (Ђорђевић, 1990). Дакле, под утицајем ветра, брзине струјања у ветреном међупростору се могу вишеструко повећати. Тако долази и до повећаног расхлађивања фасадног зида, што је неповољно у зимском периоду и захтева додатну термоизолацију. Током летњег периода, када су температурне разлике између спољашњег ваздуха и ваздуха у међупростору знатне, високе температуре у ветреном слоју је могуће ублажити повећаном брзином струјања, чиме се постиже и већа угодност у унутрашњости објекта.

Често је дејство ових утицаја на ветрени међупростор – термичке узгонске силе и ветра, комбиновано. Ове појаве могу деловати заједно или у опозицији.

II.2.5 Предности и мане ветреног фасадног склопа

Поред одвођења дифузне влаге и елиминисања кондензата, ветрени фасадни склоп има и низ других предности у односу на класичну спољну преграду (Ђорђевић, 1990; NFT-SL Fassadentechnik GmbH):

- интензивније исушивање материјала позитивно утиче на трајност целокупног склопа, док термика остаје сува и у функцији;
- могућност елиминисања кондензата независно од врсте облоге и њеног дифузног отпора омогућава шири избор фасадне облоге и обраде;

- унапређена заштитна улога спољне облоге од атмосфералија, пошто је омогућена примена материјала са већом дифузном отпорношћу;
- могућност елиминисања кондензата без обзира на годишње доба, спољашње и унутрашње климатске услове, са погодношћу примене у влажним срединама и микроклиматима;
- ублаживање утицаја сунчевог зрачења и високих температура у летњем периоду, односно унапређење осећаја угодности у унутрашњем простору, смањеним загревањем основне масе зида;
- елиминисање могућих оштећења услед температурног дилатирања облоге која је у оквиру ветреног фасадног склопа местимично везана за зид;
- смањење температурних разлика унутар ветреног фасадног склопа доприноси трајности материјала;
- унапређење заштите од звука – више од 15 dB унапређења у односу на класичан непроветравани зид.

Отварају се и даље могућности развоја и усавршавања ових система, поготово елемената облоге у смислу искорићења сунчеве енергије, попут фотоволтажних фасадних панела (*Airtec Photovoltaic*, Alsecco).

Проветравани међупостор може такође условити појаве са негативним утицајем на употребну вредност унутрашњег простора и безбедност склопа (Ђорђевић, 1990):

- појава могућих акустичних ефеката у проветраваном међупростору услед вибрација под утицајем ветра (посебно код металних облога);
- повећана угроженост од пожара, односно бржи пренос пламена у ветреном међупростору услед циркулације ваздуха (у зависности и од примењених материјала и њихове горивости).

II.2.6 Систем ношења тешких елемената облоге у оквиру ветреног фасадног склопа

Предложени композитни панели са лицем од камена се могу сврстати у тешке елементе облоге ветрених фасадних система, заједно са облогама од опеке, камена и бетона (Ђорђевић, 1990). Код облагања ветреног фасадног зида тешким елементима, можемо разликовати два начина ношења облога:

- тачкасто ношење преко појединачних котви (Слика 2),
- тракастим носачима који плоче прихватају:
 - непосредно (Слика 3), или
 - посредно, тако да између њих и плоча посредују додатни елементи – држачи плоча (Слика 4 и 5).

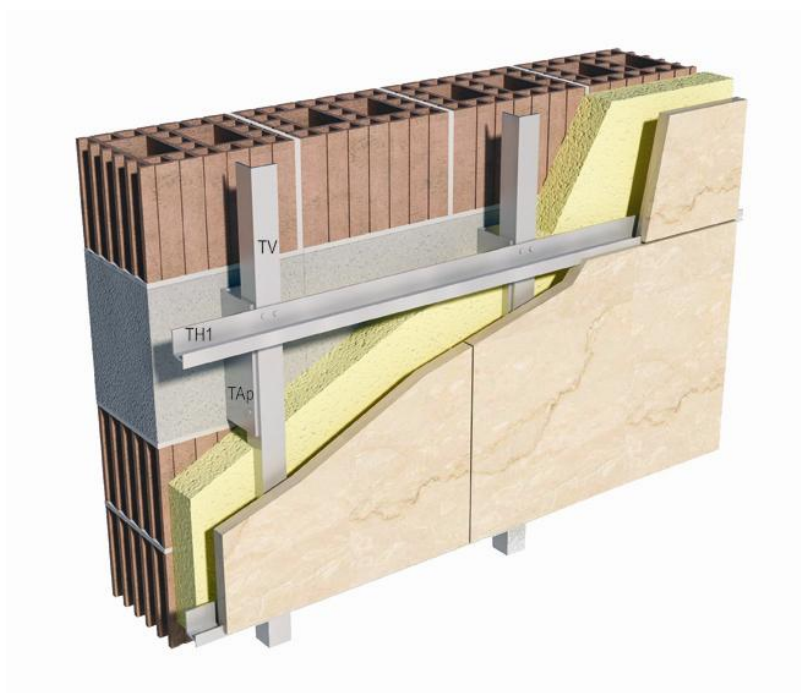
Код примене облога од цементних композита могуће је да се чаура за прихватање котве у процесу префабрикације угради у сам елемент (Слика 6). Како се примарни носачи фиксирају увек у носећи елемент објекта, системи са тракастим носачима имају ширу примену. Материјали који се најчешће користе за израду елемената за ношење фасада су инокс и алуминијум (Табашевић, 2014). Носивост потконструкције, зависно од типа облоге, тежине и распореда вешања, мора бити доказана статичким прорачуном.

Примена тракастих носача у односу на ношење појединачних плоча анкерима има одређених предности (Žegarac i dr., 1995):

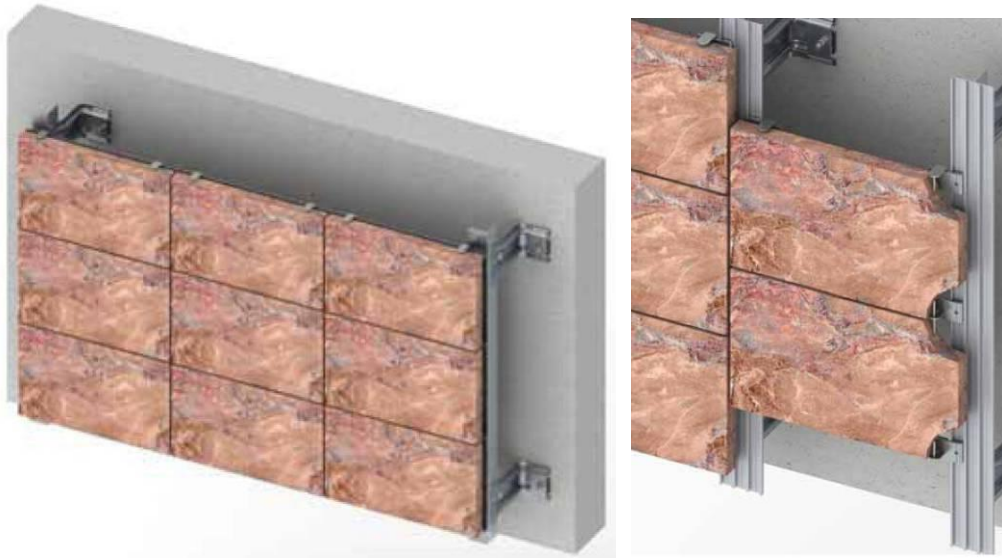
- имају ширу примену, како се примарна потконструкција може ослонити само за носећу конструкцију;
- тракастим носачима се смањује број топлотних мостова и угроженост буком;
- већа прецизност радова;
- већа брзина извођења радова.



Слика 2 Ношење појединачних плоча од камена анкерима
(Watts, 2013)



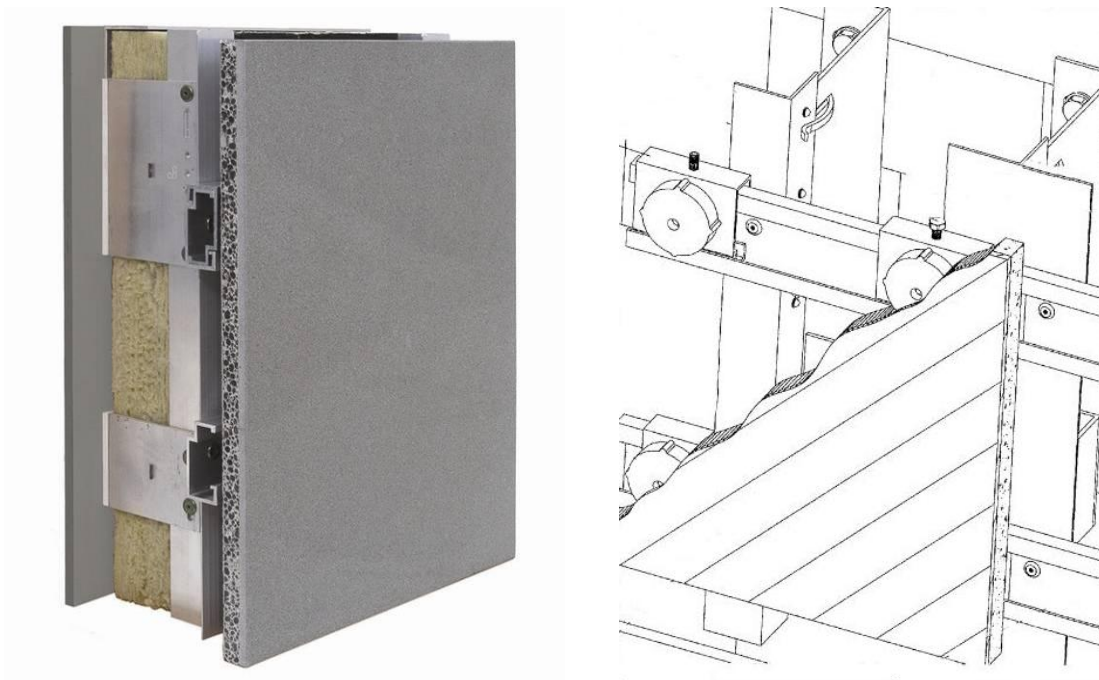
Слика 3 Ношење плоча од камена тракастим носачима
који плоче прихватају непосредно (Табаш)



Слика 4 Ношење плоча од камена тракастим носачима који плоче прихватају по ивицама елемента посредством трна (Tehnomarket)



Слика 5 Ношење плоча од камена тракастим носачима који плоче прихватају по полеђини елемента (невидљивим спојем) преко заливених котви (Tehnomarket)



Слика 6 Ношење панела са подлогом од цементног композита и лицем од камена тракастим носачима који плоче прихватају по полеђини елемента (невидљивим спојем) преко керамичких чаура уграђених у сам елемент (Alsecco)

Такође, непосредан начин ношења тракастим носачима пружа бољу носивост плоче по ослабљеном пресеку на месту везе, односно мања напрезања, што подразумева и смањену могућност оштећења плоча. Имајући у виду предметни композитни панел са лицем од камена, овакав начин ношења се може сматрати повољнијим. Овај систем додатно омогућава прецизнији рад и бржу монтажу (податак добијен у разговору са Табашевић – фирма Табаш, 2015).

II.2.7 Спојнице код ветреног фасадног склопа

Спојнице су између елемената облоге неопходне ради превенције оштећења фасадног система, односно прихватања померања узрокованих термичким некомпатибилностима облоге и носеће конструкције, деформацијама облоге услед промене температуре и влажности или услед статичких и динамичких утицаја на архитектонски објекат (слегања и течења носеће конструкције). Такође,

одговарајуће спојнице је пожељно пројектовати из практичних разлога, ради производне толеранције (одступања мера) елемената фасадног система (Žegarac i dr., 1995; Herzog et al., 2004).

Спојнице између плоча тешких елемената облоге се могу израдити као отворене – неиспуњене, или затворене – испуњене најчешће трајно еластичним материјалима који морају бити у стању да приме максимална прорачуната померања. Избор типа спојница је делом визуелна одлука, али делом и одлука која обезбеђује оптималну вентилацију ваздушног међупростора и адекватно просушивање целог система за конкретни случај. Примену неиспуњених спојница омогућава сам ветрени простор између фасадне облоге и основне масе зида који обезбеђује просушивање потенцијалне влаге која улази кроз њих. Код затворених спојница, вентилација је омогућена отворима на фасади (барем на дну и врху) како би се међупростор иза облоге адекватно сушио.

Потребна ширина спојница зависи првенствено од климатских утицаја на фасадни омотач, затим од димензија, материјала и боје плоча облоге (што утиче на термички рад облоге), од система облагања (примени крутих или еластичних спојева облоге и подлоге, мањој или већој слободи *рада* облоге), од тога да ли је спојница празна или испуњена, материјала испуне спојнице, и напрезања које материјал испуне може да поднесе. У односу на све наведене параметре, спојницу је потребно и рачунски доказати (Žegarac i dr., 1995). Ширине спојница између плоча од камена најчешће износе око 4 mm, али се из естетских разлога могу повећати до 12 mm (Watts, 2013).

II.3 ОДРЖИВИ РАЗВОЈ У АРХИТЕКТУРИ И ГРАЂЕВИНАРСТВУ

Одрживи развој подразумева подмиривање потреба садашњице без угрожавања могућности наредних генерација да обезбеде сопствене потребе (United Nations, n.d.)⁴. Циљ одрживог дизајна унутар архитектонске праксе је успостављање архитектонског решења које гарантује добробит и коегзистенцију три чиниоца животне средине: људи, осталих живих организама и неорганских елемената (Kim & Rigdon, 1998a).

У контексту одрживог развоја, пожељно је да градња, односно целокупни животни век објекта у што мањој мери неповољно утиче на природну средину. Тако је, између осталог, актуелан и *4R приступ* управљања отпадом који обухвата неке од кључних принципа одрживог развоја (Kareem & Pandey, 2013):

- *смањење отпада (reduce)* на самом извору;
- *поновну употребу (reuse)* елемената у оригиналном или модификованом облику за намену која је најчешће слична првобитној;
- *рециклажу материјала (recycle)* отпада до сировине – топљењем или дробљењем, издвајањем до изворних саставних материјала, који у виду сировине поново улазе у производни процес;
- *повратак уграђене енергије (recover)* термичким или хемијским третманом чиме се добија електрична енергија, гориво, хемијске сировине итд.

Уколико није могуће применити ни један од поменутих принципа, преостаје опција *одлагања* отпада на депонију, што представља најнеповољнији случај са аспекта очувања животне средине. При планирању архитектонског објекта треба унапред размишљати о наведеним принципима, како се ови методи успостављања одрживог развоја изнова појављују током његовог целокупног животног циклуса. Идеја одрживог развоја ће се у оквиру овог истраживања сагледати кроз одреднице одрживог дизајна и одрживог грађевинског материјала.

⁴ “...meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.” (United Nations, n.d.)

II.3.1 Одрживи дизајн и превенција загађења у архитектури

Концептуални оквир одрживог дизајна и превенције загађења се може формирати на три нивоа: принципима, стратегијама и њиховим методама. Принципи се могу груписати у области: економија и ресурси, дизајн животног циклуса и хуманистички дизајн (Табела 4). Област економије и ресурса разматра могућност смањење употребе, поновне употребе и рециклаже елемената који сачињавају архитектонски објекат. Област дизајна животног циклуса пружа методологију анализе грађевинских процеса и њихових утицаја на животну средину. Област хуманистичког дизајна се фокусира на интеракције између човека и природне средине. Наведени принципи пружају широк преглед локалног и глобалног утицаја архитектонског остварења на околину (Kim & Rigdon, 1998a, 1998b). У циљу унапређења одрживости животне средине, архитектонски објекат мора интегрисати сва три принципа - током пројективања, изградње, експлоатације и одржавања, као и управљања грађевинским отпадом.

Табела 4 Концептуални оквир одрживог дизајна и превенције загађења у архитектури према Ким и Ригдон (Kim & Rigdon, 1998a)

Одрживи дизајн и превенција загађења		
Принципи		
Економија и ресурси	Дизајн животног циклуса	Хуманистички дизајн
Стратегије		
Очување енергије	Фаза пре изградње објекта	Очување природних услова
Очување вода	Фаза корисног живота објекта	Пројектовање урбане околине
Очување материјала	Фаза након корисног живота објекта	Дизајн угодног боравка

У оквиру предложеног концептуалног оквира, Ким и Ригдон (Kim & Rigdon, 1998a) набрајају низ стратегија и припадајућих метода у оквиру сваког од

наведених принципа. У овом раду ће бити поменуће оне стратегије и методе које су у корелацији са темом дисертације.

За остварење стратегије *очувања енергије* могу се, за предметно истраживање, сматрати значајним методе пасивног грејања и хлађења, као и избора материјала са ниском уграђеном енергијом (*low embodied energy*).⁵ Једна од метода *пасивног хлађења* помоћу ветреног фасадног склопа је претходно приказана у раду. Како је главни циљ принципа очувања енергије смањење потрошње фосилних горива, предложен је метод *избора материјала са ниском уграђеном енергијом*⁶. Избором таквог материјала, умањује се и збирни утицај објекта на животну средину. На пример, употребом локалних у поређењу са увозним материјалима истог типа врши се уштеда енергије за потребе транспорта⁷.

Остварење стратегије *очувања материјала* се, између осталог, ослања на методе поновне употребе елемената, употребе рециклираних материјала и материјала који се могу даље рециклирати. Предност *поновне употребе и рециклаже* се огледа у очувању енергије која је уграђена у грађевински елемент. У грађевинској индустрији, бетон се све више гледа као производ у који се могу уградити различите врсте рециклираних материјала попут рециклиране опеке, аутомобилских гума и слично. Такође, и сам бетон се може *даље рециклирати* и употребити у виду агрегата у саставу новопроектване рецептуре. Елементи од

⁵ Уграђена енергија представља количину енергије која се утроши током животног циклуса производа, односно, укључује енергију која је неопходна за производњу, транспорт и одлагање одређеног производа (U.S. Department of Energy).

⁶ У литератури се могу наћи оквирни подаци вредности уграђених енергија за поједине материјале коришћене током предметног истраживања. Уграђена енергија каменних блокова (гранит, кречњак, пешчар) износи 0,5 MJ/kg, а орнаменталног камена 1,5 MJ/kg. Уграђена енергија песка и шљунка износи 0,5 MJ/kg. Услед високог утрошка енергије за производњу свих опекарских производа, уграђена енергија гранула експандиране глине износи 3,0 MJ/kg (Berge, 2009)..

Екстракција и обрада камена захтева релативно мали утрошак енергије, доста нижи од оне потребне за справљање опеке или бетона. Производња елемената од камена није заслужна за значајна загађења ваздуха везана за потошњу енергије. Потрошња енергије при производњи производа од печене глине је веома висока, што се огледа у загађењу ваздуха у вези са за потрошњом енергије и емисијом CO₂ где се процес печења заснива на фосилним горивима (Berge, 2009).

⁷ И сама тежина каменог материјала указује да дистанце између каменолома и градилишта треба да буду кратке. Са енергетског аспекта, каменоломи дуж обала имају потенцијалну предност воденог транспорта. Мобилна постројења за експлоатацију камена треба премештати у мале каменоломе близу градилишта уз ангажовање локалне радне снаге (Berge, 2009).

камена се подједнако успешно рециклирају и употребљавају као агрегат. За елементе од камена и бетона генерално важи да су трајни, тако да постоји могућност њихове поновне употребе у оквиру нове грађевине⁸.

Ким и Ригдон (Kim & Rigdon, 1998a) даље предлажу поделу *животног циклуса* архитектонског објекта на три фазе: фаза пре изградње објекта, фаза корисног живота (века) објекта и фаза након корисног живота објекта. Животни циклус материјала следи овако постављен животни циклус објекта.

Фаза пре изградње објекта обухвата избор локације, пројектовање објекта и процесе везане за обезбеђивање грађевинског материјала до тренутка уградње. Предложени методи очувања животне средине подразумевају употребу материјала из обновљивих извора⁹, материјала издвојених без узроковања еколошке штете, рециклираних материјала и материјала који се могу рециклирати, као и трајних материјала ниских захтева одржавања (Kim & Rigdon, 1998a). Употреба *материјала из обновљивљивих извора* је по самој дефиницији одржива. Камени материјал - плоче за облагање и камени агрегат, као и глина за опекарске (печене) производе, су ресурси у коначним количинама и стога необновљиви. Из тих разлога се, уколико је то могуће, уместо необновљивих материјала треба одлучити за алтернативе са обновљивим материјалима. *Екстракција* сировина из обновљивих или коначних извора може сама по себи бити извор озбиљне *еколошке штете*. Трајна еколошка штета, која се односи на издвајање природних ресурса и производњу грађевинског материјала, укључује губитак станишта дивље природе, ерозију, загађење воде и ваздуха (Kim & Rigdon, 1998b). Употреба *рециклираних материјала* умањује количину отпада и потребу за депонијским простором који је у оскудици. Као што је већ речено, рециклирани материјали чувају уграђену енергију првобитног грађевинског елемента, која би другачије била изгубљена. Рециклажа такође умањује потрошњу

⁸ Посебно се мора размотрити поновна употреба и рециклажа опекарских производа, како је утрошак енергије при њиховој производњи релативно висок. С друге стране, утрошак енергије за издвајање и чишћење употребљених опекарских производа може износити само 0,5% енергије потребне за њихову производњу. Ови производи се такође се могу самлети у пуцолански прах и даље користити као сировина (Berge, 2009).

⁹ Обновљиви извори су они који се могу узгајати или издвојити из животне средине у квантитету који превазилази обим људске потрошње (Kim & Rigdon, 1998a). Необновљиви ресурси су они који се могу само једном издвојити из природе, и из тог разлога се називају залихама (Berge, 2009).

нових природних ресурса. *Трајни материјали*, попут камена и бетона, имају мању потребу за одржавањем агресивним средствима, па су корисници и радници у мањој мери изложени штетним хемикалијама током уградње и одржавања. Трајност материјала умањује потрошњу нових сировина у сврху замене дотрајалог грађевинског елемента и потребу за депонијским простором¹⁰.

Фаза корисног живота (века) објекта се односи на фазу изградње и фазу коришћења објекта. У складу са стратегијама одрживог дизајна, у оквиру ових фаза се разматра смањење утицаја штетних сировина и дугорочни утицаји изграђене средине на здравље корисника (Kim & Rigdon, 1998a). За овај рад је интересантан метод *употребе нетоксичних (мање токсичних) материјала*, што је од важности за здравље корисника и радника. Адхезиви који се користе у грађевинској индустрији могу годинама по изградњи објекта испаравати штетне састојке. Такође је битно *редовно одржавање нетоксичним средствима*. Природни материјали, попут камена, уопштено гледајући имају нижи ниво токсичности од фабрикованих материјала.

У фази након корисног живота (века) објекта грађевински материјал учествује у изградњи других објеката или постаје отпад. Стратегија одрживог дизајна се фокусира на смањење количине отпада помоћу *рециклаже и поновне употребе* архитектонских објеката и грађевинског материјала (Kim & Rigdon, 1998a). *4R* приступ управљања отпадом је претходно разматран, а у овом контексту треба поменути да се могу јавити потешкоће приликом раздвајања различитих компоненти објекта¹¹.

У оквиру принципа *хуманистичког дизајна*, за предметно истраживање је значајна стратегија *дизајна осећаја угодности*, која предлаже методе обезбеђивања топлотне, визуелне и акустичне угодности, визууре ка спољашњој средини, употребу нетоксичних материјала, материјала који не испуштају токсичне гасове

¹⁰ Животни век елемената од камена је, уопштено гледано, дужи од века архитектонског објекта у који је уграђен. С друге стране, трајност композита типа бетона зависи од квалитета израде, компонентних материјала, рецептуре и окружења у ком се објекат налази. У зависности од поменутих фактора, идентификовани су материјали са животним веком од 10, али и преко 100 година (цементни композити), па чак и преко 2000-3000 година (кречни композити). Производи од печене глине су веома трајни. Могуће је да опека печена на високим температурама оствари животни век од 1000 година (Berge, 2009).

¹¹ Елементи од камена који су уграђени сувим поступком, без малтера, су нарочито погодни за поновну употребу. Од опекарских производа, цреп је, уопштено гледано, погоднији за поновну употребу и рециклажу, како се уграђује уз помоћ мање количине малтера.

итд., параметре који су напоменути у поглављу II.1 – Табела 2. Предности ветреног фасадног склопа у смислу обезбеђења топлотне угодности су претходно описане у поглављу II.2.

II.3.2 Одреднице одрживог грађевинског материјала

Пажљива селекција одрживих грађевинских материјала је за архитекте најлакши начин имплементације принципа одрживог дизајна у сам архитектонски објекат. Кључни индикатор утицаја грађевинског материјала на животну средину је уграђена енергија, која представља утрошену енергију за издвајање сировина из окружења, производњу и транспорт производа (Roux & Alexander, n.d.). Посматрајући животни циклус објекта идентификовани су критеријуми за вредновање одрживости грађевинског материјала. Од значаја за ово истраживање су следећи: мере редукције отпада током производње, редукција уграђене енергије, употреба природних материјала, употреба локалних материјала, употреба нетоксичних материјала или мање токсичних материјала, трајност (дуготрајност), могућност поновне употребе и могућност рециклаже. Присуство једне или више ових карактеристика чине материјал одрживим (Kim & Rigdon, 1998b). Неки од критеријума се поклапају са методама успостављања одрживог дизајна и неће бити поново третирани.

Мере редукције отпада током производње се односе на рационалнији процес производње са мањим уделом неупотребљивог отпада и залажу се за његову даљу употребу или рециклажу. Као што је напоменуто, приликом добијања плочица од камена мањих димензија, јавља се мања количина отпада, а такође се лако могу произвести из отпадног каменог материјала¹². *Редукција уграђене енергије* се може остварити ревизијом производних процеса у правцу уштеде енергије. *Природни материјали* уопштено гледајући имају нижу уграђену енергију и

¹² Експлоатација и обрада стенског материјала резултује великом количином отпада. Овај отпад се, на пример, може употребити као агрегат за бетон или ситан камен за терацо под. Начин употребе ресурса и настанак отпада је делом условљен пројектантским решењем. Једноставна одлука, попут избора мањих варираних димензија елемената од камена, уместо већих, може резултовати упола мањом количином отпадног материјала (Berge, 2009).

токсичност од фабрикованих материјала. Захтевају мањи ниво обраде и тако у мањој мери штете животној средини. Такође, уградњом природног материјала у одређени грађевински елемент, такав производ бива у већој мери у складу са принципом одрживости. Употреба *локалних грађевинских материјала* скраћује транспортни пут, тако редукујући загађење вазуха. Експлоатација ових материјала такође доприноси локалној економији. На пример, декоративна употреба каменог материјала који је издвојен на другој страни земљине кугле није одговарајући избор у том смислу. Остали критеријуми за вредновање одрживости грађевинског материјала су детаљно разматрани у претходном поглављу.

II.4 ТЕХНИЧКИ ПРОПИСИ И СТАНДАРДИ

Током протеклих година одвија се процес хармонизације националне законодавне и техничке регулативе са регулативом Европске уније (ЕУ). Европски стандарди EN се у одређеној мери разликују од југословенских JUS стандарда, касније преименованих у српске SRPS стандарде, по питању безбедносних захтева, оцене усаглашености, заштите животне средине, као и нових материјала и технологија који се употребљавају у савременом грађевинарству. Недостатак усаглашености националних са европским и међународним стандардима може имати за последицу отежано спровођење техничких прописа, успостављање мреже акредитованих и овлашћених организација, као и пласирање производа и услуга на јединствено европско тржиште (Pavković Bugarski, 2006).

Уколико домаћа привреда жели да понуди услуге и производе европском тржишту, или земљама у окружењу, мора да испуни захтеве које прописује ЕУ. Примена нових материјала, технологија и испуњење захтева усаглашених са регулативом ЕУ могу бити предуслов за страна улагања у сектор грађевинарства (нпр. изградње и санације објеката), као и за помоћ ЕУ и појединих европских банака. Без CE ознаке, производи обухваћени директивом 89/106/ЕЕС – *Производи за грађевинарство* (1989), се не могу пласирати на јединствено европско тржиште. CE ознака говори да је производ у складу са хармонизованим европским стандардима које је прописао CEN (*The European Standards Organization*) или прихваћеном алтернативном регулативом, нпр. *European Technical Approval* (ETA). Са CE ознаком производи могу добити приступ тржишту ЕУ и *European Free Trade Association* (EFTA). Усаглашавање прописа са ЕУ омогућава да се утврди конкурентност домаћих производа и услуга на глобалном тржишту, динамика увођења нових технологија и реструктуирање привреде. Унапређење регулативе треба прихватити као развојну димензију у циљу остварења предности на глобалном тржишту и стицања сазнања о најновијим технологијама и захтевима које производи треба да испуне (McEvoy, 1994; Pavković Bugarski, 2006; Wellkang Tech Consulting).

У домену грађевинских материјала и производа, као занимљиви за приказано истраживање, издвајају се стандарди који се тичу малтера (бетона) и архитектонског камена, али и појединих фасадних облога попут камених и фиберцементних плоча. За предметно истраживање су првенствено значајни усвојени европски стандарди који се тичу малтера, серија стандарда *SRPS EN 1015 Metode ispitivanja maltera za zidanje (2008)*, који прописују процедуре испитивања физичко-механичких и технолошких својстава. У случају додатних испитивања малтера могу се следити још увек важећи бивши југословенски JUS, садашњи српски SRPS стандарди.

У оквиру предметног истраживања, није предвиђено испитивање камена као засебног материјала, већ су преузети актуелни резултати испитивања предузећа за екстракцију одређене врсте стенског материјала. Међутим, од интереса су стандарди који разматрају облоге од камена. Стандард *SRPS B.B3.200 Prirodni kamen, ploče za oblaganje – Tehnički uslovi (1994)*, који није био обавезан – већ информативан (Правилник о измени правилника о југословенском стандарду за природни камен, 1996, члан 1), је повучен и на његово место су дошли европски стандард усвојени без измена:

- SRPS EN 1469 Prirodni kamen – Ploče za oblaganje zidova – Zahtevi (2009);
- SRPS EN 12057 Proizvodi od prirodnog kamena – Modularne ploče – Zahtevi (2008);
- SRPS EN 12058 Prirodni kamen – Ploče za podove i stepeništa – Zahtevi (2009);
- SRPS EN 1341 Ploče od prirodnog kamena za spoljašnje popločavanje – Zahtevi i metode ispitivanja (2009).

За разлику од првобитног стандарда, усвојени европски стандарди не прописују нумеричке вредности које камени материјал мора да испуни како би се оценио као погодан за облагање хоризонталних или вертикалних површина (осим чврстоће при савијању и отпорности на дејство мраза камених плоча за спољно хоризонтално облагање SRPS EN 1341 (2009)). Битна разлика усвојених EN

стандарда у односу на повучени SRPS B.B3.200 (1994) је то што се природни камен не испитује као сировина за производњу плоча за облагање, већ се плоче испитују као финални производ за специфичне услове примене. Испитивања укључују и одређене методе које раније нису примењиване у домаћој средини, а на пример, једнооксијална чврстоћа при притиску више није актуелна када је у питању испитивање архитектонског камена. Повлачењем стандарда SRPS B.B3.200 (1994) нестали су и прецизни критеријуми за класификовање испитиваног камена како би се пројектантима олакшао адекватан избор архитектонског камена (Ivović, Marčeta i Delić-Nikolić, 2009; Matović i Vojnović Ćalić, 2015). И након повлачења, домаће лабораторије су наставиле да испитују квалитет камена и издају атесте према стандарду SRPS B.B3.200 (1994).

Захтеви које третира усвојени стандард SRPS EN 1469 (2009) се односе на: визуелни угођај, чврстоћу при савијању, силу при лому на месту рупе за анкере, упијање воде при атмосферском притиску, реакцију на пожар, капиларно упијање воде, стварну и привидну запреминску масу и укупну отворену порозност, отпорност на дејство мраза, отпорност на топлотни шок и паропропустљивост, без дефинисаних критеријума за одређену намену.

Спецификација производа и методе испитивања другачије врсте фасадних облога – фиберцементних (влакнастоцементних) равних плоча, су дефинисане стандардом SRPS EN 12467 (2014). Осим димензионалних толеранција, овај стандард прописује методе испитивања чврстоће при савијању, водонепропустљивости, паропропусности, захтеве трајности, отпорности на пожар и безбедности, реакције на пожар и ослобађања штетних материја.

Из свега наведеног и доступне литературе, као најбитније методе, односно минималан обим испитивања фасадних облога (од камена) се препознају чврстоћа при савијању и сила лома на месту везе са потконструкцијом (Crnković i Šarić, 2012; Lammert & Hoigard, 2007; Pires, Amaral, Rosa & Camposinhos, 2011; Yu & Chan, 2001). Поред тога, у оквиру предметног истраживања је пожељно установити својства повезаности (адхезије) два различита материјала панела, као и својства трајности под утицајем атмосферских услова.

Уз све поменуте стандарде, свакако треба консултовати и постојеће домаће правилнике који могу бити у корелацији са предметним истраживањем: *Правилник о техничким нормативима за бетон и армирани бетон* (1987) и *Правилник о техничким нормативима за бетон и армирани бетон справљен са природном и вештачком лакоагрегатном исуном* (1990).

II.5 ЗАКЉУЧАК

На основу претходно разматраних одредница за пројектовање фасадног склопа и елемента фасадне облоге, улога фасадног омотача, ветреног фасадног склопа, аспекта одрживости при пројектовању и употребљених материјала, могу се донети пројектантске одлуке везане за постављање модела фасадне облоге која је предмет овог истраживања.

За материјал облоге се бира камен Србије. Ова одлука је вођена чињеницом да домаћих ресурса архитектонског камена има у изобиљу, а на њих није обрађена довољна пажња, односно нису у широкој употреби, организовано експлоатисани нити у довољној мери истражени. Предности избора домаћег (локалног) материјала се огледају у близини места уградње, чиме се смањује потрошња енергије приликом транспорта и загађења ваздуха, а самим тим и смањује уграђена енергија коначног производа. Употребом овог материјала на фасади се, у оквиру региона, такође наглашава специфичан дух места и подржава развој домаће индустрије.

Опредељење за употребу плочица од камена (10 x 10 x 1cm) се води чињеницом да се на овај начин ствара мања количина отпада, односно да се плочице малих димензија могу произвести и од отпадног материјала. Овим се увећава проценат искоришћења стенске масе и оптимизује издвајање природног ресурса. Тектонска испуцалост стенске масе Србије подржава овај приступ. Додатно се може приметити да употребом тање сеченог камена, фасадне површине имају уједначенију боју и текстуру.

Одлука о примени предложене фасадне облоге у оквиру ветреног фасадног система је донета ради претходно представљених предности оваквог приступа у оквиру поглавља II.2. Највећи допринос ветрене фасаде дају у елиминацији водене паре и кондензата који представљају главне узрочнике оштећења фасада. Пасивнио хлађење у летњем периоду, успостављено преко ваздушног међупростора, доприноси унапређењу осећаја угодности боравка у унутрашњем простору и енергетској рационализацији објеката.

Избор непосредног начина ношења фасадног панела тракастим носачима је донет првенствено ради боље носивости облоге по ослабљеном пресеку на месту везе. Осим тога овај систем омогућава прецизнији рад и бржу инсталацију, има ширу примену, смањује број топлотних мостова и угроженост буком.

Предлог за формирање композитног панела са лицем од камена је донет на основу предности његове примене које ће бити приказане у наставку рада. У овом тренутку је битно рећи да се целокупни предложени панел може рециклирати и употребити као агрегат у саставу новопроектваног цементног композита.

Одлука о примени композита који је заснован на употреби цемента је донета ради доступности овог материјала на домаћем тржишту и ради задовољавајућих физичко-механичких својстава, трајности и нетоксичности које елементи од овог материјала остварују.

Опредељење за агрегат од дробљене опеке иде у прилог одрживости, односно рециклажи материјала. Избор агрегата од експандиране глине се води првенствено смањењем тежине фасадне облоге, што доприноси одрживости у смислу смањеног утрошка материјала на потконструкцију и конструкцију.

На основу прегледане регулативе, као најбитније методе испитивања предложених модела фасадних облога се издвајају чврстоћа при савијању и сила лома на месту везе са потконструкцијом. У оквиру истраживања је такође потребно установити својства везе (адхезије) између облоге од камена и подлоге од цементног композита, као и својства трајности, односно температурне компатибилности.

III РАЗМАТРАЊЕ МАТЕРИЈАЛА И СКЛОПА ФАСАДНОГ КОМПОЗИТНОГ ПАНЕЛА

Да би фасадни панел у највећој мери испунио задатке наведене у претходном делу рада, одабрани су одговарајући компонентни материјали и склоп фасадног елемента. Кабинетским и теренским истраживањем које је претходило формирању модела фасадне облоге, разматрана су својства задатих компонената предметног панела и сличних облога у употреби.

У наредним поглављима је приказана оправданост избора предложених саставних материјала. Првенствено је разматрана погодност примене домаћег камена у функцији облагања, а затим и предост употребе каменог материјала на фасади и његово понашање у експлоатацији на примеру танких камених фасадних плоча на потконструкцији. Потом је приказана могућност употребе композитних панела са лицем од камена кроз преглед фасадних елемената и одговарајућих система облагања који су пласирани на светском тржишту. Наведене су и предности њихове примене у односу на танке фасадне плоче од камена. Коначно су разматрана својства предложених материјала подлоге – цементних композита, који ће ући у састав пројектованих модела фасадних панела.

III.1 КАМЕН У СВОЈСТВУ ОБЛОГЕ КОМПОЗИТНОГ ПАНЕЛА

За облогу композитног панела се предлаже камен, материјал који се са дугом традицијом током историје архитектуре примењује као видно лице фасаде. На територији Србије се запажају различити стенски материјали са одговарајућим квалитетима за предвиђену намену, који се већ користе при облагању унутрашњих и спољашњих површина. Облагање фасада танким плочама од камена на потконструкцији, такође има дугог века примене. Драгоцена искуства њихове експлоатације могу бити од користи прилом успостављања предложених

модела фасадних панела који се, у складу са савременим токовима технологије облагања, такође ослањају преко потконструкције.

У наредним поглављима ће се првенствено дати кратак преглед могуће класификације стена и природног камена, као и дефинисати појам архитектонског камена. Прегледом критеријума вредновања стенске масе у сврху експлоатације лежишта ће се пружити ближи увид у аспекте који утичу на економичност употребе архитектонског камена појединих каменолома. Потом ће се разматрати могућност примене камена са територије Србије у сврху облагања архитектонских објеката. У оквиру детаљне анализе, представиће се одабран архитектонски камен задовољавајућег квалитета који се налази у активној организованој експлоатацији. Коначно ће се разматрати предности примене танких фасадних плоча од камена и њихово понашање у експлоатацији.

III.1.1 Класификација стена и њихова комерцијална подела

Класификација петрографских врста омогућава бољи преглед генетског порекла, хемијских и технолошких специфичности и систематски додељује одређеним врстама специфична својства. Ђорђевић са сарадницима (Ђорђевић, Ђорђевић и Миловановић, 1991) даје класификацију стена по генетској основи на магматске, седиментне и метаморфне стене. На основу ове поделе аутори Билбија и Матовић (Bilbija i Matović, 2009) разврставају чврсте стене које налазе примену у грађевинарству према генетској основи и сличности техничких и других својстава у оквиру Табеле 5.

С друге стране, у пракси - индустрији камена, такође је прихваћена комерцијална подела стена на *граните* и *мермере*¹³. У групу *гранита* се осим правих, петролошких гранита, сврставају и друге магматске стене и поједине метаморфне које се због своје изразите тврдоће, понашања при обради и употреби могу поредити са гранитима. Ту се налазе сијенити, диорити, порфирити, дијабази,

¹³ Комерцијални називи често не одговарају истоименим научним (петрографским) називима стена, те Илић (Ilić, 1997) наглашава да их треба писати под наводницима. У оквиру дисертације су ови називи истакнути курсивом.

габрови, гнајсеви и слично¹⁴. У групу *мермера* се поред генетски дефинисаних мермера сврставају и све друге карбонатне, па и не типично карбонатне стене, односно стене осетно мање тврдоће од *гранита*, које се лако секу и глачају. Тако се могу окарактерисати сви тврди и умерено тврди кречњаци. Билбија (Bilbija, 1982) предлаже практичну поделу стена на шест општих група. Ова класификација истовремено указује на петролошки карактер, обрадивост, општи изглед и, у одређеној мери, техничка својства стена.

Табела 5 Класификација чврстих стена према генетској основи и сличности техничких и других својстава (Bilbija i Matović, 2009)

Магматске стене	Седиментне стене	Метаморфне стене
-гранит, гранодиорит, кварцдиорит	-бреча и конгломерат -пешчар	-мермер -аргилошист
-диорит, монцонит, сјенит, алкални сјенит	-карбонатне стене: кречњак, доломит, креда, травертин, мермерни оникс, бигар	-гнајс -кварцит
-дацит, андезит, трахит -габро, норит	-туф	-мигматит -талкшист
-базалт, дијабаз, долерит -перидотит -вулканско стакло		

Гранити обухватају изразито тврде силикатне стене које се обрађују технологијом гранита, и које под дејством атмосфералија задржавају сјај и општи изглед. У виду архитектонског камена, примена им је свестрана, а због добре отпорности према хабању, погодне су и за фреквентне подне површине.

Мермери обухватају тврде и средње тврде карбонатне стене које се врло добро и релативно лако обрађују технологијом мермера. Тврдоћа и лакоћа обраде су знатно испод оне која карактерише групу *гранита*. Под дејством атмосфералија мењају свој основни изглед – губе сјај и зависно од пигментације мање или више деколоришу. У зависности од техничких својстава имају ужу или ширу примену.

¹⁴ Таквом класификацијом у пракси је прихваћено да се габро из Јабланице (Б и Х) назива *Јабланички гранит*.

Генерално су погодне за примену у ентеријеру, иако се одређене врсте већ традиционално користе и у екстеријеру.

У две поменуте групе спадају стене које ће бити детаљније обрађене у оквиру истраживања, а осим њих у литератури се детаљније описују и финопорозне мекане стене, травертини, оникси и шкриљци. У ових шест општих група могу се, са малим изузецима уврстити све наше данас познате врсте архитектонског камена (Bilbija, 1982).

Италијански стандард UNI 8458 (UNI 8458, 1983, citirano u Bilbija i Matović, 2009) осим на групу *гранита* и *мермера* предлаже даљу поделу на *травертине*, као и на групу *стена* које нису погодне за површинску обраду полирањем. С друге стране, према стандарду SRPS EN 12670 (2007) прихваћена је комерцијална подела стена на *граните*, *мермере*, *пешчаре*, *кристаласте шкриљце*, *аргилошисте* и *трахите*. Према наведеном стандарду комерцијална дефиниција термина *гранит* гласи: „компактан природни камен који може да се углача; употребљава се у декоративне сврхе и зидање, а углавном се састоји од минерала тврдоће између 5 и 7 по Мосовој (Mohs) скали, као што су кварц и фелдспат, односно подразумева гранит према научној дефиницији, друге плутонске стене и вулканске стене порфирске структуре, метаморфне стене минералног састава сличног гранитоидима као што су гнајс и др.“ Исти стандард представља и дефиницију термина *мермер*: „компактан природни камен погодан за глачање, који се користи у декоративне сврхе и зидање и који се углавном састоји од минерала тврдоће 3 и 4 по Мосовој скали (као што су калцит, доломит или серпентин), односно подразумева мермере по научној дефиницији и циполино мермере, као и друге врсте природног камена који имају способност да се глачају до високог сјаја: кречњачки мермери, кречњаци, доломити, карбонатне брече, травертини и серпентинити.“

У стручној литератури не постоји опште призната класификација архитектонског камена. У пракси се користе критеријуми са аспекта поља примене, тврдоће, способности обрађивања, општег изгледа и боје. Са аспекта примене, корисна је подела коју предлаже SRPS B.B3.200 (1994) на камен за унутрашње и спољашње примене, односно за хоризонтална и вертикална облагања.

III.1.2 Класификација камена

У оквиру научне области геологије се под појмом *стене* подразумева „сваки природно настали минерални агрегат који чини саставни део земљине коре“, док је у инжењерству прихваћено да се под овим појмом подразумевају „само чврсте стене¹⁵, док се везане¹⁶ и неvezане¹⁷ стене сврставају под појмом тла“ (Bilbija i Matović, 2009, str. 2). Појам *камена* се разликује од појма *стене*. Према истим ауторима, *камен* представља „комад стене (чврсте стене) релативно малих димензија, одвојен из њене природне средине (стенске масе) природним или вештачким путем“, као и „комад стене обликован и обрађен за одређене сврхе: камени блокови за зидање, камена коцка за путеве, камен за споменике, млевени камен, дробљени камен и др.“ (Bilbija i Matović, 2009, str. 2).

У савременој примени камена, грубо се могу издвојити три области у којима се за једну исту петрографску врсту могу поставити различити захтеви у погледу својстава (Bilbija i Matović, 2009):

- камен као материјал за грађење,
- камен као полазна сировина за производњу грађевинских материјала,
- камен у индустрији.

Даље се камен као материјал за грађење (грађевински камен) обзиром на област примене и захтеве квалитета може поделити на (Bilbija i Matović, 2009):

- технички камен,
- архитектонски камен.

¹⁵ Чврсте стене карактерише то да „између минералних зрна постоји, претежно или искључиво, чврста веза остварена кристализацијом (кристализациона веза) или преко цементујуће материје која потпуно или делимично испуњава простор између минералних зрна“, што узрокује да је њихово понашање при оптерећењу „блиско понашању тврдых тела“ (Bilbija i Matović, 2009, str. 1).

¹⁶ Везане (глиновите) стене карактерише веза између минералних честица која се остварује „преко опни воде које обавијају честице и држе се електромагнетним силама“, из чега произилазе „основне својства везаних стена – везаност и пластичност, тј. својство да се не расипају у сувом стању и да се деформишу у влажном стању без рушења структуре“ (Bilbija i Matović, 2009, str. 1).

¹⁷ Невезане стене су сипка тела код којих је веза између минералних зрна остварена трењем (Bilbija i Matović, 2009).

Техничким камен представља камен који се користи у инжењерским конструкцијама. Инжењерске области у којима налази примену су: хидроградња, путоградња, изградња железничких пруга, бетонске конструкције, зидане камене конструкције и слично. У зависности од утицаја којима се излаже у оквиру конструкције, камен мора да поседује одређене физичко-механичке карактеристике и временску трајност (Bilbija i Matović, 2009).

Ш.1.3 Архитектонски камен

Архитектонски камен представља камен који поред основне функционалне улоге има и декоративно својство садржано у општем изгледу, облику и распореду бојених елемената површине камене плоче (Begović i Tanasijević, 1997). Такође се користи термин *архитектонско-грађевински камен* (односно *архитектонски грађевински камен*) и равноправно *украсни грађевински камен*¹⁸ (Пић, 1997). Као синоним за архитектонски камен, користи се и термин *димензионисани камен*. Термин *димензионисани камен* (*dimension stone*) се дефинише у америчком стандарду ASTM C119-14 (2014) као: „природни камен изабран, клесан или резан до одређених или назначених облика или величина“ и искључује ломљени и дробљени камен који се користи за агрегате и путеве, пунила или хемијски сировински материјал.

Једно од основних својстава камена на основу ког се доноси одлука о његовој примени у функцији архитектонског камена је његова *декоративност*. Елементи изгледа који утичу на декоративност камена и имају велику улогу при његовом избору су, осим фактуре која се своди на површинску обраду камена, текстура и боја (Žegarac i dr., 1995).

Текстура чврсте стене се односи на просторни распоред минералних састојака у њеној маси и испуњеност њеног простора (Bilbija i Matović, 2009), односно текстура је условљена односом појединих компоненти у простору и њиховом

¹⁸ Појам *украсни камен* осим архитектонско-грађевинског (украсно грађевинског) камена обухвата меморијални, скулпторски и галантеријски камен. Галантеријски камен служи за прављење украсних и употребних предмета (вазни, фигурина и др.), односно *камене галантерије* (Пић, 1997).

оријентацијом (Протић, 1984). Могу се издвојити два основна типа текстуре: хомогена текстура – без доминантног смера, и усмерена – код које су састојци у одређеној мери оријентисани у односу на неку раван или правац. Хомогена текстура је својствена за знатан број магматских и седиментних, а усмерена за већи број метаморфних стена. Текстури које се односе на испуњеност простора у маси стене могу бити: компактна – када је маса стене у потпуности испуњена чврстом супстанцом, порозна – када стена садржи поре мањег промера, и порозно-шупљикава – када стена садржи шупљине правилног или неправилног облика (Bilbija i Matović, 2009).

Боју камена одређује боја доминантног минерала и његов хемијски састав, често и нека примеса. Чврсте стене се уопштено могу поделити у монохромне и полихромне. Код монохромних, једна боја је распоређена са извесном равномерношћу у маси, док се код полихромних јасно могу издвојити две или више боја (Bilbija i Matović, 2009). Униформна боја је у општем случају пожељна код употребе камена за облагање већих површина, попут фасада.

Поред декоративности Стојковић (1997) предлаже још шест критеријума вредновања лежишта архитектонског камена у сврху исплативости његове експлоатације. Он наводи критеријуме (Stojković, 1997):

- декоративни критеријум,
- материјални критеријум,
- употребни критеријум,
- комерцијални критеријум,
- локацијски критеријум,
- експлоатациони критеријум,
- производни критеријум.

Декоративни критеријум

Након претходно наведеног, може се додати да је декоративност критеријум на основу ког се постиже највећа економска вредност камена и лежишта, јер одређује потражњу која произилази из лепоте, оригиналности, и реткости изгледа.

Посебно су цењене ретке боје попут зелене, светло жуте, љубичасте, плаве и слично.

Материјални критеријум

Физичко-механичка својства се разматрају на основу резултата лабораторијских испитивања која се могу фокусирати само на најбитнија својства за дату намену. Технолошка својства, односно обрадљивост подразумева подложност архитектонског камена обради и завршном обликовању. Трајност се односи на постојаност изгледа и самог камена на самом месту уградње.

Употребни критеријум

Примена камена у највећој мери зависи од његових физичко-механичких својстава, постојаности изгледа и трајности уопште. Одговарајућим избором и уградњом камена се обезбеђује и његова трајност. Најцењеније врсте архитектонског камена карактерише универзалност, односно свестрана примена у архитектонском и уметничком смислу.

Комерцијални критеријум

Комерцијални критеријум се односи на цењеност и потражњу архитектонског камена као робе, првенствено у виду блока, а затим и као финалног производа. Ове показатеље одређује квалитет камена – употребна својства и декоративност, квалитет блока – димензије, целовитост и изотропност, проценат изрезаних плоча по кубном метру које квалитетом и димензијама задовољавају захтеве стандарда и тржишта, као и остали параметри који утичу на цену његове производње.

Локацијски критеријум

Локацијски критеријум обухвата транспортне услове, инфраструктуру и еколошке услове. Еколошки аспект производње све више заокупља пажњу законодавства,

пошто експлоатација камена може оставити неизбрисиве трагове на изгледу, а обрада на квалитету човекове средине.

Експлоатациони критеријум

За исплативост савремене производње архитектонског камена су важне димензије, облик и квалитет сирових блокова. Могућност издвајања блокова комерцијалних димензија¹⁹ је један од најважнијих чинилаца вредности лежишта. Повољан коефицијент искоришћења (без много јаловинског отпада), уједначеност изгледа и квалитета стенске масе, као и могућност додатног искоришћења рестлова (ситна галантерија, ивичњаци, коцка, терацо агрегат, технички камен, индустријска пунила и др.) такође значајно учествују у укупној оцени. Применљивост комерцијалних блокова у индустријској обради такође зависи од конфигурације опреме којом се врши експлоатација у оквиру каменолома и опреме у производњи.

Производни критеријум

Потенцијал неког лежишта је већи уколико постоји или је извесно да ће постојати услови за континуирану производњу комерцијалних блокова у дужем, вишедеценијском периоду. При разматрању овог критеријума треба узети у обзир и традицију производње и обраде архитектонског камена у окружењу налазишта, главни концепт развоја региона, економске, материјалне и људске ресурсе садашњег или потенцијалног друштвеног или приватног власника датог налазишта и слично.

Од наведених критеријума, у даљем раду ће се разматрати они који одређују погодност изабраног камена за облагање спољашњих и унутрашњих површина према условима које прописује национални стандард SRPS B.B3.200 (1994) који нема обавезујућу примену.

¹⁹ Комерцијални блок се добија прекрајањем примарног блока или се директно реже на димензије које тражи тржиште. Прерађивачи купују комерцијални блок према *пријемној моћи* гатера или кружне тестере. Комерцијални блок има серијски број, ознаку рудника из ког је извађен, тежину (ређе запремину), о њему се води писана евиденција (Maksimović, 2006).

III.2 АРХИТЕКТОНСКИ КАМЕН СРБИЈЕ

У последње три декаде, потражња за природним каменом у сврху облагања се континуално повећава (Siegesmund & Snethlage, 2011). Овај тренд је резултат естетских квалитета, могућности површинске обраде, трајности, широке употребе и једноставног одржавања камена (Siegesmund & Török, 2011). Производни капацитети и капацитети обраде, уз ниску цену рада, у земљама са великим избором егзотичног и по цени приступачног декоративног камена попут Кине, Индије, Бразила и Јужне Кореје, у отвореној конкуренцији надмашују локалне индустрије камена (Snethlage, 2011; Terezopoulos, 2004). Ова чињеница може бити главни разлог пада производње у многим европским земљама, посебно малим и економски неразвијеним земљама Балкана.

Грађевинска индустрија на територији Србије употребљава у великој мери увозни камен у архитектонске сврхе²⁰. Значај локалних лежишта није адекватно опажен и поред обиља ових драгоцених ресурса. Предметно истраживање, између осталог, проналази значај у скретању пажње на потенцијал и предности употребе домаћег архитектонског камена у светлу бриге о животној средини, подстицању развоја домаће економије, увођења ликовног елемента од националног значаја у архитектонско стваралаштво Србије, као и у афирмацији локалних вредности. Из наведених разлога, за предлог облоге модела фасадних панела се разматра употреба домаћег камена (који је предмет активне организоване експлоатације стенске масе) као што је случај са мезозојским карбонатним стенама Србије и стенама северног дела терцијарног магматског комплекса Вардарске зоне.

²⁰ Подаци Завода за статистику Републике Србије о увозу и извозу гранита у Србију у периоду од 1990. до 2011. и о производњи гранита у Србији у периоду од 1992. до 2009. године (цитирано у Кугељевић, 2013) сведоче о интензивном увозу и практично замрлој производњи гранита који се користи као архитектонски камен.

III.2.1 Карбонатне стене на подручју Србије

Распрострањеност, економична експлоатација и обрада, као и задовољавајућа техничка својства карбонатних стена, условиле су да се данас највећи број активних каменолома Србије бави њиховом експлоатацијом. Експлоатација осталог стенског материјала се углавном врши у мањем обиму од стране локалног становништва.

На квалитет кречњака утичу његова петролошка својства, хемијски састав и физичко-механичка својства. У зависности од намене, на одређене карактеристике се обраћа већа пажња. Када се кречњаци користе као архитектонски камен, поред физичко-механичких својстава, важну улогу имају структурно-текстура својства, боја, обрадљивост, могућност добијања монолита и минерални састав (Matović, 2009).

Физичко-механичка својства карбонатних стена у оквиру Србије варирају од лежишта до лежишта, што се одражава на њихов начин експлоатације, производњу и употребу у виду грађевинског материјала (Matović, 2009). Ове стене представљају највећи извор грађевинског камена на територији Србије. Оне налазе примену у виду техничког и архитектонског камена, као и у разним индустријским гранама (производњи креча, металургији, индустрији стакла итд.). Као технички камен карбонатне стене представљају најважнију сировину у производњи агрегата за путоградњу, хидроградњу и изградњу железничких пруга. Као архитектонски камен карбонатне стене се користе као декоративни елемент за спољашње и унутрашње облагање. Пигментирани кречњаци имају ограничену примену у екстеријеру, с обзиром да током релативно кратког времена, изложени деловању атмосфералија, показују мање или више видне хроматске промене. Ова појава је нарочито изражена код кречњака са органским пигментом (Bilbija i Matović, 2009).

Карбонатне стене, односно мезозојски кречњаци, су широко распрострањене у западној и источној Србији, а обухватају кречњаке, доломитске кречњаке и ретко чисте доломите (Matović, 2009). Најраспрострањенији су мезозојски кречњаци, и

то чисти кречњаци, због чега је и највећи број каменолома отворен у тим зонама (Matović, 2009). У Србији се врши значајна експлоатација следећег стенског материјала у виду архитектонског камена: у западном делу земље каменолома Клисуре, Скржут и Струганик, а у источном делу каменолома Тисница.

Услед тектонске испуцалости кречњака поменутих лежишта, ограничена је могућност њихове примене у индустрији архитектонског камена (Matović i Vojnović Ćalić, 2015). Као што ће се видети из наредних поглавља, основна текстурна карактеристика посматраних кречњака је слојевитост²¹, са елементима који се карактеришу као слојеви²² и банци²³. Као интерни текстурни облици, који могу допринети декоративности, јављају се грудваста (нодуларна²⁴) грађа, ламинација²⁵ и стилолитски шавови²⁶ (нпр. Клисура), или строматолити²⁷ и фенестре²⁸ (нпр. Тисница).

²¹ Слојевитост је појава јасног издвајања појединих слојева. Слој у општем смислу представља геолошко тело претежно једнородног литолошког састава, које је од стенске масе одвојено неким типом дисконтинуитета. Слојна површ код седиментних стена представља било коју површину која дели стенску масу на слојеве (Benac, 2013; Geološki informacioni sistem Srbije [GeolISS]).

²² Термин *слој* у ужем смислу представља слој дебљине 5-60cm (GeolISS).

²³ Банак представља слој дебљине 60-200 cm (GeolISS).

²⁴ Нодуларна или сочиваста текстура садржи сочивца 1 и више cm дебљине и до преко 10 cm дужине, која су раздвојена лапоровитим материјалом (Протић, 1984).

²⁵ Ламинација представља тип интерне слојевитости код које депозициона структура има дискретне до дифузне планарне елементе које формирају плочасти или листасте слојеви малих димензија (или зрна) оријентисаних паралелно или под углом у односу на екстерну слојну површину (GeolISS).

²⁶ Стилолити представљају генетски дисконтинуитет стена. То су неравне површине дуж којих два дела исте стене залазе један у други и између којих се у већини случајева налазе танке наслагне нерастворног, најчешће глиновитог материјала (Протић, 1984).

²⁷ Строматолити су органско-седиментне структуре настале као резултат развоја и метаболичких активности микроорганизама (Neuendorf, Mehl & Jackson, 2005).

²⁸ Фенестре су направилне шупљине разноликих облика у оквиру седимента, најчешће величине 1-3 mm. Одлика су фенестралне текстуре (Протић, 1984).

Ш.2.1.1 Карбонатне стене површинског копа Клисуре

Лежиште Клисуре се налази у западној Србији, 22 km јужно од Ужица, у атару села Сирогојно, на североисточном ободу Златиборског масива. Заузима површину од 0,12 km² и карактерише га добра саобраћајна повезаност преко магистралне саобраћајнице Београд-Подгорица. У индустрији архитектонског камена ови кречњаци су познати под комерцијалним називом *Сирогојно-црвени* (у варијететима црвене боје) и *Булог* (у варијететима сиве боје). На локалитету Клисуре се већ пет деценија врши експлоатација камених блокова.

Петролошке карактеристике у својству декоративности и експлоатације

Основна текстурна одлика кречњака *Клисуре* је слојевитост (Matović, 2009). Слојеви дебљине од неколико до 50-60 cm прелазе у банке просечне дебљине 1 m. Као интерни текстурни облици јављају се грудваста (нодуларна) текстура, ламинација и стилолитски шавови. Декоративности ових кречњака доприноси и боја која варира од тамно сиве и сиве у најнижем делу литолошког стуба, преко ружичасте и ружичасто-црвене у средишњем, до јарко црвене боје у највишим слојевима. Атрактивном изгледу такође доприносе очуване љуштуре различитих макрофосилних²⁹ врста. Хомогеност боје локално прекидају кавернозне³⁰ шупљине и прслине запуњене крупнокристалним сиво-белим калцитом (CaCO₃) (Matović, 2009).

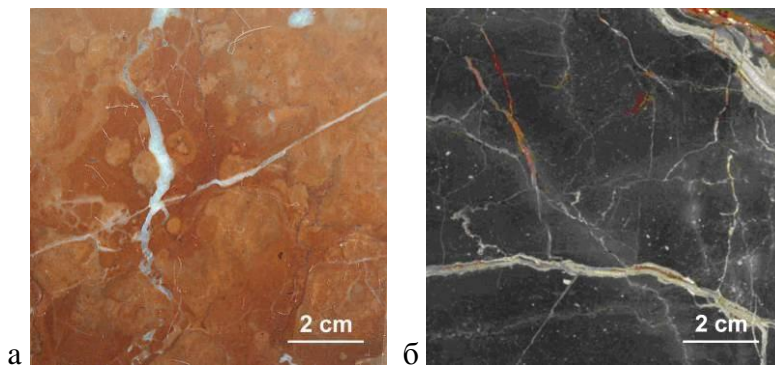
Текстурни облици и боја имају двоструки утицај на економску вредност камена. Банковитост и слојевитост отежавају издвајање комерцијалних блокова највише *A категорије*³¹ и умањују проценат искоришћености блока. Грудваста грађа и атрактивна црвена боја доприносе декоративности стенске масе као сировине за

²⁹ Фосили који се могу проучавати без употребе микроскопа (U.S. Geological Survey).

³⁰ Кавернозна порозност се јавља код стена растворљивих у води, настаје као последица физичко-хемијског дејства воде на стену при чему се пукотине и прслине проширују и настају шупљине, канали и каверне често великих димензија (Vasiljević, n.d.).

³¹ Комерцијални блок А класе представља обликован камени блок дужине преко 2,5 m, висине преко 1,6 m и ширине преко 1 m, уједначене боје и структуре без пукотина (MGV).

производњу архитектонског камена. С друге стране, нехомогеност боје у лежишту (варијације од сиве до црвене боје - Слика 7) умањује економску вредност (Matović, 2009).



Слика 7 Камен са локалитета Сирогојно:

- а) *Сирогојно-црвени* (брушена површина) (Matović i Vojnović Ćalić, 2015),
б) *Булог* (брушена површина) (Piero Zanella srl)

Квалитет и могућност употребе

Стенска маса површинског копа Клисура је, према средњој вредности садржаја карбонатне компоненте (CaCO_3 - 97,61%), изграђена од хемијски чистог кречњака (Matović, 2009). Према резултатима испитивања физичко-механичких својстава (Табела б), кречњак *Клисура* припада категорији тешког (према запреминској маси), компактног (према порозности) и тврдог камена (према отпорности на хабање), са врло малим упијањем воде и високом чврстоћом при притиску, који је такође отпоран на дејство мраза (Прилог 1).

Према критеријумима стандарда за техничке услове за плоче за облагање од природног камена (SRPS В.В3.200, 1994) (Прилог 2) препоручује се употреба кречњака површинског копа Клисура за следеће намене:

- облагање унутрашњих вертикалних површина,
- облагање унутрашњих хоризонталних површина умереног и интензивног пешачког саобраћаја,
- облагање спољашњих вертикалних површина до 30 m изнад коте терена,
- облагање спољашњих хоризонталних површина умереног пешачког саобраћаја.

Табела 6 Техничка својства кречњака ПК Клисура

и захтеви квалитета за примену архитектонског камена (Matović, 2009)

Техничка својства кречњака ПК Клисура (средња вредност од 12 мерења)		Технички услови за за архитектонски грађевински камен (SRPS В.В3.200)									
		Унутрашње облагање				Спољашње облагање					
		Хоризонталне површине			Вер. по.	Хоризонталне површине			Вертикалне површине		
		ух- 1	ух- 2	ух- 3	ув	сх- 1	сх- 2	сх- 3	св- 1	св- 2	св- 3
Чврстоћа при притиску (МПа):	171	100	#	#	#	140	120	#	160	140	#
- у сувом стању											
- у водозасићеном стању	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
- после дејства мрза	152	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Чврстоћа при савијању (МПа)	14,41	12	8	6	#	18	12	8	18	12	8
Отпорност на хабање (cm ³ /50cm ²)	18,44	14	25	35	#	12	14	18	#	#	#
Запреминска маса (kg/ m ³):											
- са порам и шупљинама	2690	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
- без пора и шупљина	2710	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
Порозност (%)	0,8	#	#	#	#	5	7	#	5	#	#
Упијање воде (%)	0,15	1	3	#	#	1	2	3	1	2	#
Постојаност на дејство мрза (губитак масе %)	постојан	-	-	-	-	<5	<5	<5	<5	<5	<5

Услови квалитета се не утврђују, али се прилажу резултати испитивања
- Услови квалитета нису прописани

- ух-1** Врло интензиван пешачки саобраћај – робне куће, хотели, болнице, јавни објекти, пословне зграде, индустријски објекти, биоскопи и слично.
- ух-2** Интензиван пешачки саобраћај – продавнице, самопослуге, стамбене зграде, музеји, ресторани, школе и слично.
- ух-3** Умерен пешачки саобраћај – библиотеке, архиве, књижаре, чекаонице и слично.
- сх-1** Врло интензиван пешачки, а повремено и аутомобилски саобраћај – тргови, пешачке зоне, улице, трговачки центри и слично.
- сх-2** Интензиван пешачки саобраћај – паркови, шеталишта, терасе, пешачке зоне у близини споменика и слично.
- сх-3** Умерен пешачки саобраћај.
- св-1** Објекти преко 30 m висине изнад терена.
- св-2** Објекти висине од 10 до 30 m изнад терена.
- св-3** Објекти висине до 10 m изнад терена.

III.2.1.2 Карбонатне стене површинског копа Тисница

Површински коп Тисница се налази у источној Србији, 1 km од центра Жагубице. Лежиште припада северном ободу планине Бељаница, а правцем север-југ пресечено је реком Тисницом. Простире се на површини од 0,12 km². Добру саобраћајну повезаност омогућава регионални пут Пожаревац-Жагубица (Živković i Raunović, 2000).

Петролошке карактеристике у својству декоративности и експлоатације

У стенској маси каменолома Тисница јављају се слојевити и банковити кречњаци са честим интерним текстурним облицима: строматолитима (са таласасто повијеним ламинама³² на растојању од 1-5 mm), фенестрама и стилолитима. Декоративним својствима кречњака Тисница доприноси и разноликост боја. Она варира од сиве боје грудвастих кречњака, преко ружичасте, сивкасто-наранцасте и светло црвене, док светло наранцаста и светло смеђа боја карактеришу кречњаке горње половине литолошког стуба. Изгледу доприносе и очуване љуштуре макрофосилних фрагмената (димензија до 4 cm), као и лоптасте форме онкоида³³ атрактивне црвено-ружичасте боје и концентричне грађе (Слика 8) (Matović, 2009).

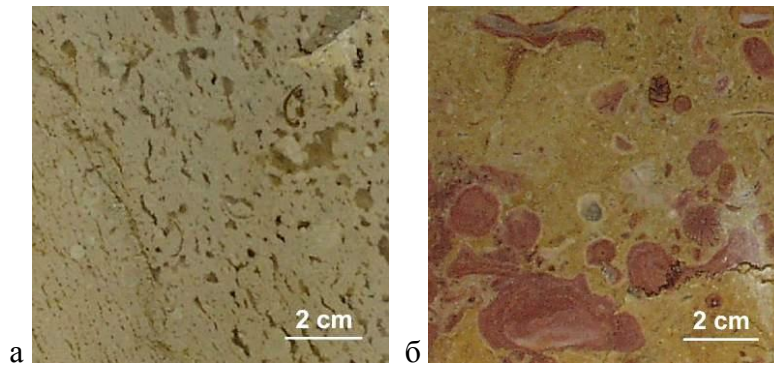
Квалитет и могућност употребе

Стенска маса површинског копа Тисница је изграђена од хемијски чистог и лапоровитог кречњака (Matović, 2009). Према испитаним физичко-механичким својствима (Табела 7) овај кречњак припада категорији тешког (према запреминској маси), мало порозног (према порозности) и тврдог камена (према

³² Ламина (лиска) код седиментних стена представља слој дебљине најчешће мање од 1 cm (Протић, 1984), односно испод 5 mm (GeolISS).

³³ Онкоиди су обавијена зрна неправилно грудвастог облика са карбонатним овојем од неправилних микритиских ламина које належу једна преко друге, обично без јасне концентричне грађе (Tišljar, 2001)

отпорности на хабање), са врло малим упијањем воде и средње високом чврстоћом при притиску, који је такође отпоран на дејство мрза (Прилог 1).



Слика 8 Кречњак *Тисница*: а) са строматолитима (резана површина),
б) са црвено-ружичастим онкоидима (резана површина)
(Matović i Vojnović Ćalić, 2015)

На површинском копу Тисница обавља се експлоатација архитектонског и техничког камена. Према критеријумима стандарда за техничке услове за плоче за облагање од природног камена (SRPS В.В3.200, 1994) (Прилог 2) препоручује се употреба кречњака површинског копа Тисница за следеће намене:

- облагање унутрашњих вертикалних површина,
- облагање унутрашњих хоризонталних површина умереног и интензивног пешачког саобраћаја,
- облагање спољашњих вертикалних површина до 30 m изнад коте терена,
- облагање спољашњих хоризонталних површина умереног пешачког саобраћаја.

Табела 7 Техничка својства кречњака ПК Тисница

и захтеви квалитета за примену архитектонског камена (Matović, 2009)

Техничка својства кречњака ПК Тисница (средња вредност од 16 мерења)		Технички услови за за архитектонски грађевински камен (SRPS B.B3.200)									
		Унутрашње облагање				Спољашње облагање					
		Хоризонталне површине			Вер. по.	Хоризонталне површине			Вертикалне површине		
		ух- 1	ух- 2	ух- 3	ув	сх- 1	сх- 2	сх- 3	св- 1	св- 2	св- 3
Чврстоћа при притиску (МПа):	143	100	#	#	#	140	120	#	160	140	#
- у сувом стању											
- у водозасићеном стању	119	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
- после дејства мраза	103	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Чврстоћа при савијању (МПа)	16,23	12	8	6	#	18	12	8	18	12	8
Отпорност на хабање (cm ³ /50cm ²)	17,0	14	25	35	#	12	14	18	#	#	#
Запреминска маса (kg/ m ³):											
- са порама и шупљинама	2670	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
- без пора и шупљина	2700	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
Порозност (%)	1,3	#	#	#	#	5	7	#	5	#	#
Упијање воде (%)	0,36	1	3	#	#	1	2	3	1	2	#
Постојаност на дејство мраза (губитак масе %)	постојан	-	-	-	-	<5	<5	<5	<5	<5	<5

Услови квалитета се не утврђују, али се прилажу резултати испитивања

- Услови квалитета нису прописани

ух-1 Врло интензиван пешачки саобраћај – робне куће, хотели, болнице, јавни објекти, пословне зграде, индустријски објекти, биоскопи и слично.

ух-2 Интензиван пешачки саобраћај – продавнице, самопослуге, стамбене зграде, музеји, ресторани, школе и слично.

ух-3 Умерен пешачки саобраћај – библиотеке, архиве, књижаре, чекаонице и слично.

сх-1 Врло интензиван пешачки, а повремено и аутомобилски саобраћај – тргови, пешачке зоне, улице, трговачки центри и слично.

сх-2 Интензиван пешачки саобраћај – паркови, шеталишта, терасе, пешачке зоне у близини споменика и слично.

сх-3 Умерен пешачки саобраћај.

св-1 Објекти преко 30 m висине изнад терена.

св-2 Објекти висине од 10 до 30 m изнад терена.

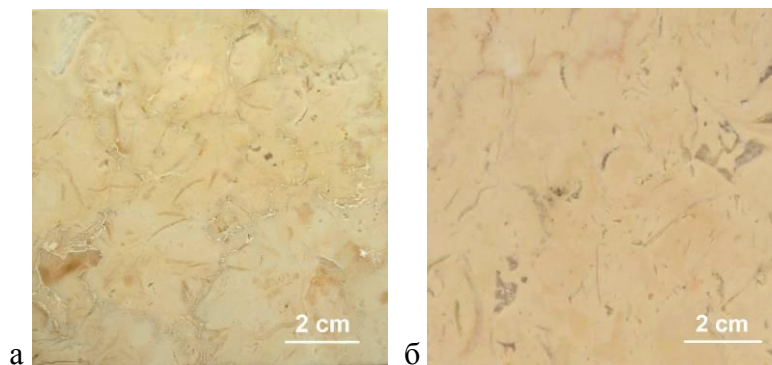
св-3 Објекти висине до 10 m изнад терена.

Ш.2.1.3 Карбонатне стене површинског копа Скржут

Површински коп Скржут се налази у западној Србији, у Ужичком региону, на удаљености 15 km од Ужица, и припада североисточном ободу Златиборског масива. Протеже се на површини од 4000 m². Карактерише га директна саобраћајна повезаност са производним погном у Ужицу, као и бројни путни правци до потрошачких центара широм Србије. Отворен је 1960. године и још увек је активан.

Петролошке карактеристике у својству декоративности и експлоатације

Основни текстурни облик кречњака је дебелослојевитост и банковитост (Matović, 2009). Најчешћа дебљина слоја је око 50 cm, а банка око 1-2 m. Банковитост благог пада (12-35°) и велике дебљине омогућава хомоген квалитет и лакше вађење блокова. С друге стране, испуцалост стенске масе умањује могућност добијања блокова комерцијалних димензија. Као чест интерни текстурни облик јављају се стилолитски шавови дуж којих је депонована глиновита компонента. Стилोलити су управни на слојевитост, јављају се око фрагмената макрофауне и нарушавају хомогеност кречњака. Осим естетског, њихово присуство отежава и производне процесе сечења блока, смањује проценат искоришћености блока и утиче на финално глачање површине. Декоративности кречњака значајно доприноси хомогеност боје. Она варира у нијансама светло смеђих и црвенкастих тонова. Естетском утиску доприносе и често присутне очуване љуштуре различитих макрофосилних врста (рудисти, пужеви и шкољке). Фосилни остаци се истичу смеђкастим, сивкастим и беличастим тоновима (Слика 9) (Matović, 2009).



Слика 9 Кречњак *Скржут*:

- а) светло смеђи варијетет (полирана површина) (Matović i Vojnović Čalić, 2015),
 б) варијетет црвенкастих тонова (брушена површина) (аутор)

Квалитет и могућност употребе

Стенску масу површинског копа Скржут граде хемијски чисти кречњаци са високим садржајем карбонатне (CaCO_3) компоненте (98,76%) (Matović, 2009). Према испитаним физичко-механичким својствима (Табела 8), овај тип кречњака припада категорији тешког (према запреминској маси), компактног (према порозности) и тврдог камена (према отпорности на хабање), са врло малим упијањем воде и средње високом чврстоћом при притиску, који је такође отпоран на дејство мраза (Прилог 1).

Према критеријумима стандарда за техничке услове за плоче за облагање од природног камена (SRPS В.В3.200, 1994) (Прилог 2) препоручује се употреба кречњака површинског копа Скржут за следеће намене:

- облагање унутрашњих вертикалних површина,
- облагање унутрашњих хоризонталних површина умереног и интензивног пешачког саобраћаја,
- облагање спољашњих вертикалних површина до 10 m изнад коте терена,
- облагање спољашњих хоризонталних површина умереног пешачког саобраћаја.

Табела 8 Техничка својства кречњака ПК Скржуг
и захтеви квалитета за примену архитектонског камена (Matović, 2009)

Техничка својства кречњака ПК Скржуг (средња вредност од 6 мерења)		Технички услови за за архитектонски грађевински камен (SRPS B.B3.200)									
		Унутрашње облагање				Спољашње облагање					
		Хоризонталне површине			Вер. по.	Хоризонталне површине			Вертикалне површине		
		ух- 1	ух- 2	ух- 3	ув	сх- 1	сх- 2	сх- 3	св- 1	св- 2	св- 3
Чврстоћа при притиску (МПа):	137	100	#	#	#	140	120	#	160	140	#
- у сувом стању											
- у водозасићеном стању	122	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
- после дејства мраза	112	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Чврстоћа при савијању (МПа)	13,36	12	8	6	#	18	12	8	18	12	8
Отпорност на хабање (cm ³ /50cm ²)	16,50	14	25	35	#	12	14	18	#	#	#
Запреминска маса (kg/ m ³):											
- са порама и шупљинама	2670	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
- без пора и шупљина	2700	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
Порозност (%)	0,92	#	#	#	#	5	7	#	5	#	#
Упијање воде (%)	0,19	1	3	#	#	1	2	3	1	2	#
Постојаност на дејство мраза (губитак масе %)	постојан	-	-	-	-	<5	<5	<5	<5	<5	<5

Услови квалитета се не утврђују, али се прилажу резултати испитивања

- Услови квалитета нису прописани

ух-1 Врло интензиван пешачки саобраћај – робне куће, хотели, болнице, јевни објекти, пословне зграде, индустријски објекти, биоскопи и слично.

ух-2 Интензиван пешачки саобраћај – продавнице, самопослуге, стамбене зграде, музеји, ресторани, школе и слично.

ух-3 Умерен пешачки саобраћај – библиотеке, архиве, књижаре, чекаонице и слично.

сх-1 Врло интензиван пешачки, а повремено и аутомобилски саобраћај – тргови, пешачке зоне, улице, трговачки центри и слично.

сх-2 Интензиван пешачки саобраћај – паркови, шеталишта, терасе, пешачке зоне у близини споменика и слично.

сх-3 Умерен пешачки саобраћај.

св-1 Објекти преко 30 m висине изнад терена.

св-2 Објекти висине од 10 до 30 m изнад терена.

св-3 Објекти висине до 10 m изнад терена.

Ш.2.1.4 Карбонатне стене површинског копа Струганик

Површински коп Струганик се налази у западној Србији, у атару села Струганик удаљеном око 30 km од Ваљева. Ово подручје, лоцирано у западном појасу Вардарске зоне, је део северног обода масива Маљена. Обухвата површину од 0,32 km². Каменолом је асфалтним путем повезан са Мионицом, а тиме и Ибарском магистралом са Београдом и Чачком, односно путем Мионица - Ваљево са западном Србијом и Б и Х. На површинском копу Струганик већ више од три деценије траје експлоатација каменних плоча - тесаника за разне врсте архитектонских облагања.

Захваљујући лакој обради, ниској цени, широкој примени, естетским квалитетима и доступним резервама, примена Струганичких кречњака је у екстеријеру и ентеријеру последњих година у порасту, нарочито у западној Србији. Данас, више од седамдесет каменолома обавља активну експлоатацију кречњака у области Струганика и шире, али услед недовољне истражености, ове стене имају још увек ограничену примену у грађевинарству (Гајић и др., 2011).

Петролошке карактеристике у својству декоративности

Основни текстурни облик појављивања кречњака је слојевитост са доминантном дебљином слојева од 5-15 cm. Експлоатација се врши дуж слојних површи – примарних површи механичког дисконтинуитета (Matović, 2009). Секундарне површи постављене управно на њих редукују процентуалну искоришћеност стенске масе утичући на економичност експлоатације. Слојне површи су равне или стилитске, а на њиховим површима се могу наћи биогени текстурни облици као и трагови богате животне активности. Од интерних текстурних облика јавља се хоризонтална ламинација, стилитски шавови и разноврсна конкрециона³⁴

³⁴ Конкреције представљају округласте творевине које су настале акумулацијом минералне материје у порама седимента око неког језгра или центра (Протић, 1984).

тела рожнаца³⁵. Кречњаци су компактни, са хомогеном сивом бојом (Слика 10), коју нарушава једино присуство тамно сивих до сиво-плавих конкреција рожнаца (Matović, 2009).



Слика 10 Кречњак *Струганик*:

- а) цепане ломљене плочице б) резане плоче (Brzak),
в) равна природна површина камена (Matović i Vojnović Ćalić, 2015)

Квалитет и могућност употребе

Стенску масу површинског копа Струганик, граде кречњаци, глиновити кречњаци и лапорци са средњим садржајем карбонатне (CaCO_3) компоненте за цело лежиште од 87,39% (Matović, 2009). Према физичко-механичким својствима (Табела 9), кречњак *Струганик* припада категорији тешког (према запреминској маси), мало порозног (према порозности), и тврдог камена (према отпорности на хабање), са врло малим упијањем воде и средње високом чврстоћом при притиску, који је такође отпоран на дејство мраза (Прилог 1).

³⁵ Рожнаци спадају у седиментне, силикатне стене високе тврдоће (GeolISS).

Табела 9 Техничка својства кречњака ПК Струганик
и захтеви квалитета за примену архитектонског камена (Matović, 2009)

Техничка својства кречњака ПК Струганик (средња вредност од 18 мерења)		Технички услови за за архитектонски грађевински камен (SRPS B.B3.200)									
		Унутрашње облагање					Спољашње облагање				
		Хоризонталне површине			Вер. по.	Хоризонталне површине			Вертикалне површине		
		ух- 1	ух- 2	ух- 3	ув	сх- 1	сх- 2	сх- 3	св- 1	св- 2	св- 3
Чврстоћа при притиску (МПа):	134	100	#	#	#	140	120	#	160	140	#
- у сувом стању											
- у водозасићеном стању	120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
- после дејства мраза	129	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Отпорност на хабање (cm ³ /50cm ²)	19,36	14	25	35	#	12	14	18	#	#	#
Запреминска маса (kg/ m ³):											
- са порама и шупљинама	2650	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
- без пора и шупљина	2700	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
Порозност (%)	2,0	#	#	#	#	5	7	#	5	#	#
Упијање воде (%)	0,4	1	3	#	#	1	2	3	1	2	#
Постојаност на дејство мраза (губитак масе %)	постојан	-	-	-	-	<5	<5	<5	<5	<5	<5

Услови квалитета се не утврђују, али се прилажу резултати испитивања
- Услови квалитета нису прописани

- ух-1** Врло интензиван пешачки саобраћај – робне куће, хотели, болнице, јавни објекти, пословне зграде, индустријски објекти, биоскопи и слично.
- ух-2** Интензиван пешачки саобраћај – продавнице, самопослуге, стамбене зграде, музеји, ресторани, школе и слично.
- ух-3** Умерен пешачки саобраћај – библиотеке, архиве, књижаре, чекаонице и слично.
- сх-1** Врло интензиван пешачки, а повремено и аутомобилски саобраћај – тргови, пешачке зоне, улице, трговачки центри и слично.
- сх-2** Интензиван пешачки саобраћај – паркови, шеталишта, терасе, пешачке зоне у близини споменика и слично.
- сх-3** Умерен пешачки саобраћај.
- св-1** Објекти преко 30 m висине изнад терена.
- св-2** Објекти висине од 10 до 30 m изнад терена.
- св-3** Објекти висине до 10 m изнад терена.

Према критеријумима стандарда за техничке услове за плоче за облагање од природног камена (SRPS B.B3.200, 1994) (Прилог 2) препоручује се употреба кречњака површинског копа Струганик за следеће намене:

- облагање унутрашњих вертикалних површина,
- облагање унутрашњих хоризонталних површина умереног и интензивног пешачког саобраћаја,
- облагање спољашњих вертикалних површина до 10 m изнад коте терена,
- облагање спољашњих хоризонталних површина умереног пешачког саобраћаја.

Квалитет и начин експлоатације зависе од екстерних и интерних текстурних облика, тако да изражена слојевитост неких варијетета, условљава експлоатацију у виду танких плоча и димензије готових производа. Могу се произвести плоче дебљине 2-3 cm са лицем природног изгледа. Ограничена примена је углавном узрокована недовољно истраженим карактеристикама ових кречњака, које су неопходне за испуњавање захтева за примену архитектонског камена. Отпорност на хабање је једини фактор који лимитира примену кречњака *Струганик* као украсног камена (Gajić i dr., 2011; Matović, 2009).

III.2.2 Магматске стене на подручју Србије

Према физичко-механичким својствима гранити и сродне стене се не налазе на самом врху лествице, али су и поред тога синоним за чврсте, тврде и кроз време постојане материјале. Из тих разлога гранити имају, од свих стена које се примењују у грађевинарству, највећу разноврсност примене. Понајвише се користе у индустрији архитектонског камена, за облагање вертикалних и хоризонталних површина. Могу се полирати до високог сјаја, а таква обрада може и поред агресивних атмосферских услова (нпр. урбаних средина) остати дуго непромењена. Гранит се релативно лако одржава. Може се прати под високим притиском, третирати хемијским препаратима за чишћење или одржавати другим

методама без оштећења. Стенске масе гранита и сродних стена су углавном простране и погодне за експлоатацију. Имају могућност производње монолита великих димензија, а стенске масе могу имати висок степен искоришћења. Чврстоћа и тврдоћа гранита га такође чине погодним за примену у оквиру лаких композитних система облагања фасада - нпр. танка облога од гранита (5-10 mm) се лепи на лагану саћасту алуминијумску подлогу. При примени гранита је примећено веома мало проблема, а највећи узрок представља неодговарајући избор камена (Bilbija i Matović, 2009; Hunt, 2005).

Домаће тржиште има све већу потражњу за оваквом врстом камена, али своје захтеве задовољава углавном из увоза (Kurešević, 2013). На територији Србије, детаљно су истражене могућности примене архитектонског камена у оквиру терцијарних магматских комплекса Вардарске зоне (дела који је у саставу Србије без Косова и Метохије) (Kurešević, 2013). Вардарска зона представља регионалну геотектонску јединицу која је позиционирана у централном делу Балканског полуострва (Kurešević, 2013). У овој зони се налази највећи број магматских комплекса Србије. При избору стенског материјала са овог подручја у сврху спољашњег облагања, треба обратити пажњу на радиоактивност, појаву пирита³⁶ због кога се не препоручује за спољну примену, степен алтерисаности, распаднутости, тектонизираности стенске масе и неповољног лучења³⁷ (Kurešević, 2013). У оквиру ове зоне опажа се погодност примене и активна организована употреба архитектонског камена у оквиру магматског комплекса Букуље.

III.2.2.1 Гранити стенске масе Букуље

Магматски комплекс Букуље се налази око 60 km јужно од Београда, западно од Аранђеловца. Отворен је на површини од око 40 km². Саобраћајна повезаност ове

³⁶ Пирит (FeS₂) представља сулфид гвожђа. Сулфида у додиру са атмосфералијама оксидишу, у рђу стварајући истовремено и сумпорну киселину (H₂SO₄) која разара минералну супстанцу. Комаде камена који садрже и једва видљиве скупине пирита треба одстранити из грађевинског материјала који се користи за спољашњу употребу (Marić, 1951; Bilbija i Matović, 2009).

³⁷ Лучење представља појаву издвајања магматског тела у правилне делове услед контракција стенске масе за време њеног хлађења (Đorđević i dr., 1991).

области је релативно повољна – асфалтним путевима је повезана са аутопутем Београд – Кагујевац и Ибарском магистралом. Са аспекта архитектонског камена интересантан је искључиво северни део магматског комплекса Букуље (Kurešević, 2013). Тектонска и хидротермална активност су у јужном делу масива изазвале интензивну тектонизацију, алтерацију и распадање. Осим тога, примећена је повишена концентрација урана (Kurešević, 2013).

Петролошке карактеристике у својству декоративности и експлоатације

Експлоатација архитектонског камена северног дела масива се врши у каменоломима *Шутица, Плоче и Буковик*. У површинској зони дубине 2-3 m, стенска маса се раздваја у плоче дебљине 5-50 cm. Ка дубини, она постаје хомогена са системом пукотина које издвајају крупне паралелопипедне блокове дужине до око 5 m и висине до око 1,5 m (Kurešević, 2013). Одвајање блокова по се врши по аплитским жицама³⁸ које су на међусобним растојању од 5 cm до 10 m (Kurešević, 2013). Стенска маса је светло сиве боје, зрнасте структуре³⁹ (ситнозрна до средњезрна – Прилог 1), уједначеног изгледа са равномерним распоредом састојака и са местимично израженом планпаралелном текстуром⁴⁰. Камен се добро сече, задржава оштрину ивица и политуру (до високог сјаја) под атмосферским утицајима. Као неповољна својства могу се издвојити променљивост крупноће зрна - прелаз из зрнасте у порфиرويدну структуру⁴¹, и често присуство жица (Слика 11) (Kurešević, 2013).

³⁸ Аплити су жичне магматске стене (гранити) изграђене од кварца, фелдспата и веома мале количине бојених минерала који понекад изостају. Најчешће су ситнозрне грађе, а јављају се у виду танких жица велике дужине. Беле су боје, понекад светлосиве, увек светлије од матичног плутона који прате (Ђорђевић и др., 1991). Жична стена је магматска стена образована очвршћавањем магматског растопа у плитким деловима земљине коре, испод саме површине (GeolISS).

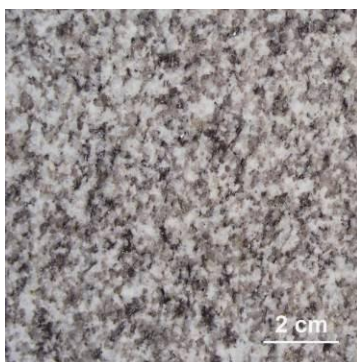
³⁹ Зрнаста структура је структура магматских стена која се одликује присуством кристала, а одсуством стакла (GeolISS).

⁴⁰ Планпаралелна текстура настаје услед струјања или благих притисака приликом консолидације стене, која се огледа у оријентацији стубастих или листастих минерала у стени. Ови минерали се могу груписати у траке (Ђорђевић и др., 1991).

⁴¹ Порфирска структура изливних магматских стена се одликује присуством већих кристала унутар основне масе сачињене од финих, микроскопски невидљивих кристала или стакла (GeolISS).

Квалитет и могућност употребе

Стенску масу магматског комплекса Букуље, у погледу хемијског састава, у проценту већем од 70% сачињава силицијум-диоксид SiO₂ (табела резултата хемијских анализа на основу Filipović i dr., 1978 i Dražević, 1999, citirano u Kurešević, 2013). Оцена квалитета камена северног дела магматског комплекса Букуље се може извести на основу утврђених физичко-механичких својстава (Табела 10). Овај гранит припада категорији тешког (према запреминској маси), мало порозаног (према порозности), и тврдог камена (према отпорности на хабање), са врло малим упијањем воде и средње високом чврстоћом при притиску (у сувом стању), који је такође отпоран на дејство мраза (Прилог 1).



Слика 11 Гранит *Шутица* (полирана површина)

Према критеријумима стандарда за техничке услове за плоче за облагање од природног камена (SRPS В.В3.200, 1994) (Прилог 2) препоручује се употреба гранита северног дела магматског комплекса Букуље за следеће намене:

- облагање унутрашњих вертикалних површина,
- облагање унутрашњих хоризонталних површина умереног и интензивног пешачког саобраћаја,
- облагање спољашњих вертикалних површина до 30 m изнад коте терена,
- облагање спољашњих хоризонталних површина умереног пешачког саобраћаја.

Табела 10 Техничка својства камена северног дела комплекса Букуље (Kurešević, 2013).

Техничка својства камена северног дела магматског комплекса Букуље*		Технички услови за за архитектонски грађевински камен (SRPS В.В3.200)									
		Унутрашње облагање				Спољашње облагање					
		Хоризонталне површине			Вер. по.	Хоризонталне површине			Вертикалне површине		
		ух-1	ух-2	ух-3	ув	сх-1	сх-2	сх-3	св-1	св-2	св-3
Чврстоћа при притиску (МПа):	170	100	#	#	#	140	120	#	160	140	#
- у сувом стању		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
- у водозасићеном стању		146	-	-	-	-	-	-	-	-	-
- после дејства мраза	141	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Чврстоћа при савијању (МПа)	14,41	12	8	6	#	18	12	8	18	12	8
Отпорност на хабање (cm ³ /50cm ²)	15,71	14	25	35	#	12	14	18	#	#	#
Запреминска маса (kg/ m ³):											
- са порам и шупљинама	2630	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
- без пора и шупљина	2660	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
Порозност (%)	1,87	#	#	#	#	5	7	#	5	#	#
Упијање воде (%)	0,43	1	3	#	#	1	2	3	1	2	#
Постојаност на дејство мраза	постојан	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
Постојаност на дејство Na ₂ SO ₄ - (губитак масе %)	постојан	-	-	-	-	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Топлотно ширење (mm/m)**	0,559	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+

- # Услови квалитета се не утврђују, али се прилажу резултати испитивања
 - Услови квалитета нису прописани
 + Задовољавајући резултати испитивања према важећим стандардима

- ух-1** Врло интензиван пешачки саобраћај – робне куће, хотели, болнице, јавни објекти, пословне зграде, индустријски објекти, биоскопи и слично.
ух-2 Интензиван пешачки саобраћај – продавнице, самопослуге, стамбене зграде, музеји, ресторани, школе и слично.
ух-3 Умерен пешачки саобраћај – библиотеке, архиве, књижаре, чекаонице и слично.
сх-1 Врло интензиван пешачки, а повремено и аутомобилски саобраћај – тргови, пешачке зоне, улице, трговачки центри и слично.
сх-2 Интензиван пешачки саобраћај – паркови, шеталишта, терасе, пешачке зоне у близини споменика и слично.
сх-3 Умерен пешачки саобраћај.
св-1 Објекти преко 30 m висине изнад терена.
св-2 Објекти висине од 10 до 30 m изнад терена.
св-3 Објекти висине до 10 m изнад терена.

* Напомена: приказани подаци потичу из пет извештаја о испитивању извршених у периоду 1997.-2008. године, и додатних испитивања од стране аутора Л. Курешевић 2010. године.

**Напомена: Топлотно ширење је испитивано према стандарду ISO 10545-8

Ш.2.3 Преглед могућности примене изабраног архитектонског камена

У односу на петрографска својства, код приказаних карбонатних стена - *Клисура*, *Тисница*, *Скржута* и *Струганика*, је као доминантна текстурна форма примећена слојевитост. Танки слојеви и банаци, заједно са испуцалом стенском масом ограничавају димензије комерцијалног блока и умањују процентуалну употребљивост стенске масе. С друге стране, интерне текстурне форме и разноликост боја доприносе њиховој високој декоративности (*Клисура*, *Тисница* и *Скржута*). Граните северног дела магматског комплекса Букуље одликује банковитост и масивност. И поред испуцалости стенске масе постоји могућност издвајања комерцијалних блокова.

Табела 11 Преглед могућности примене изабраног кречњака (Matović i Vojnović Ćalić, 2015) и гранита

Врста камена		Технички услови за за архитектонски грађевински камен (SRPS В.В3.200)									
		Унутрашње облагање				Спољашње облагање					
		Хоризонталне површине			Вер. по.	Хоризонталне површине			Вертикалне површине		
		ух-1	ух-2	ух-3	ув	сх-1	сх-2	сх-3	св-1	св-2	св-3
Кречњак	Клисура		+	+	+			+		+	+
	Тисница		+	+	+			+		+	+
	Скржута		+	+	+			+			+
	Струганик		+	+	+			+			+
Гранит	Буковички гранит		+	+	+			+		+	+

+ препоручена примена

- ух-1** Врло интензиван пешачки саобраћај – робне куће, хотели, болнице, јевни објекти, пословне зграде, индустријски објекти, биоскопи и слично.
- ух-2** Интензиван пешачки саобраћај – продавнице, самопослуге, стамбене зграде, музеји, ресторани, школе и слично.
- ух-3** Умерен пешачки саобраћај – библиотеке, архиве, књижаре, чекаонице и слично.
- сх-1** Врло интензиван пешачки, а повремено и аутомобилски саобраћај – тргови, пешачке зоне, улице, трговачки центри и слично.
- сх-2** Интензиван пешачки саобраћај – паркови, шеталишта, терасе, пешачке зоне у близини споменика и слично.
- сх-3** Умерен пешачки саобраћај.
- св-1** Објекти преко 30 m висине изнад терена.
- св-2** Објекти висине од 10 до 30 m изнад терена.
- св-3** Објекти висине до 10 m изнад терена.

У погледу физичко-механичких својстава одабране стене су тешке, мало порозне до компактне, тврде, веома малог упијања воде и средње високе до високе чврстоће при притиску. Према техничким својствима посматраног камена, у Табели 11 су прегледно приказане препоруке за њихову употребу

Као што се може видети из Табеле 11, посматране стене имају потенцијала за примену у виду архитектонског камена, односно за примену у оквиру композитног панела са лицем од камена према техничким и естетским квалитетима. Предлог предметног истраживања за примену каменних плочица мањих димензија проналази оправдање у тектонској испуцалости стенске масе.

Ш.2.4 Преглед и примена осталог архитектонског камена Србије

Поред значајније организоване експлоатације претходно представљених стенских маса, у Србији се у мањој мери врши експлоатација и других локалитета. Преглед појединих локалитета од интереса за предметно истраживање ће бити представљен у оквиру наредног поглавља. Детаљнији преглед домаћих ресурса се може наћи у литератури аутора Билбија и Матовић (Bilbija i Matović, 2009).

Магматске стене

И поред велике распрострањености, гранити и сродне стене Србије су слабо у употреби у виду архитектонског камена услед изостајања декоративних својстава. Изостају појаве крупнозрних, порфиroidних и обојених варијетета (Bilbija i Matović, 2009). С друге стране, многи гранити се и бирају ради монотоног изгледа површина. За обимне пројекте се мора размотрити могућност набавке довољних количина камена унутар одређеног дијапазона варијација, ради уједначеног изгледа већих површина (Hunt, 2005).

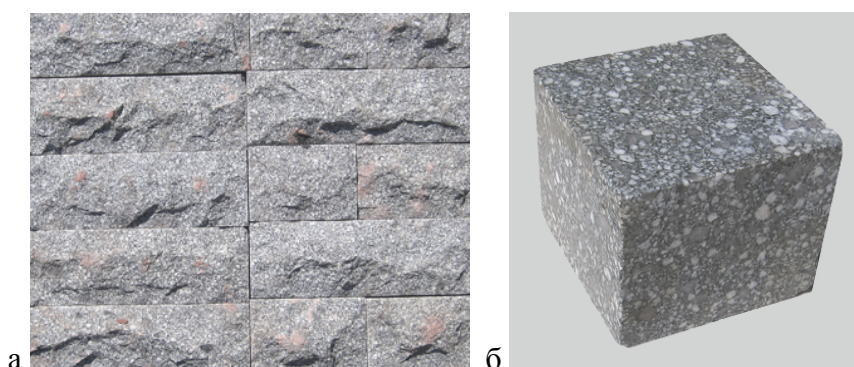
У источној Србији се врши организована експлоатација гранита Равно Бучје (Кална), задовољавајућих физичко-механичких својстава са аспекта

архитектонског камена (Слика 12). Међутим, овај структурно и хроматски декоративан гранит је обезвређен садржајем ксенолита⁴² (Bilbija i Matović 2009).



Слика 12 Гранит *Равно Бучје* : а) паљена површина; б) полирана површина, в) штокована површина (Mermeri i graniti Vučić [MGV])

У дацитној маси Славковице, највише експлоатисаној магматској стенској маси средином прошлог века, се у једном периоду обављала експлоатација у више од двадесет каменолома. Данас је на том подручју активан једино каменолом Љута стена (Слика 13). Овај дацит се реже у танке плоче за облагање фасада. Запажено је да на плочама временом долази до хроматских промена - окерасторђасте пигментације, услед оксидације садржаног сулфида гвожђа (Bilbija i Matović, 2009). Овим каменом је обложена фасада Етнографског музеја у Београду.



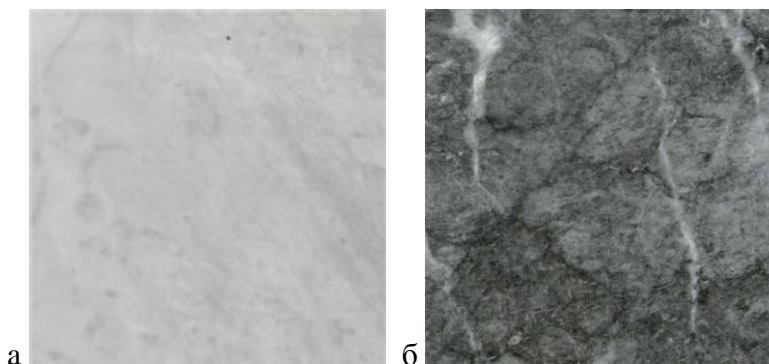
Слика 13 Дацит *Славковица* : а) буња, б) коцка (Granit Pešcar)

⁴² Ксенолит- у дословном значењу :“страно парче стене унутар друге стене“. Неке стене садрже у себи комаде других, обично старијих стена. Ови комади отпали су са зидова канала којима је текла вулканска лава, те су се помешали са лавом и на крају очврснули али без тога да су и сами прошли кроз процес топљења. Могу се уочити и голим оком (Тегија еволуције).

Метаморфне стене

Из групе метаморфних стена, само је неколико домаћих врста нашло значајнију примену. Примена се заснива на декоративним квалитетима - боји и шари, хемијској чистоћи, текстурним карактеристикама које омогућавају добијање веома танких форми, као и склопу и минералном саставу који омогућавају скулпторско обликовање. Могу бити различитих физичко-механичких својстава, али без екстремних разлика какве се срећу у другим генетским групама. Економским значајем и обимом примене издвајају се мермери и аргилошисти.

Мермери у Србији имају ограничено распрострањење, а број лежишта у експлоатацији је мали. Бројне појаве ових стена су истраживане уз крајњу оцену да нису економски исплативе, првенствено због тектонске поломљености, односно немогућности добијања блокова комерцијалних димензија. Активна експлоатација се одвија на подручју планине Венчац код Аранђеловца, где се вади квалитетни бели мермер под комерцијалним називом *Венчац бели* (Слика 14а). Тим мермером је обложена црква Св. Ђорђа на Опленцу. Тамносиви мермер повољних својстава, под називом *Плави ток* (Слика 14б), који током времена показује умерену промену општег изгледа, експлоатише се на локалитету Мандина стена код Пожеге (Вилбија и Матовић, 2009).



Слика 14 Мермери Србије:

а) *Венчац бели* (Stone Contact), б) *Плави ток* (Piero Zanella srl)

Аргилошисти имају наглашену способност ка цепању. Цепањем једноставним алатима могуће је раздвајати плоче мањих површина (нпр. 50 x 50cm) дебљине 5-

6 mm или веће плоче површине неколико m² дебљине више центиметара. То је један од најстаријих материјала за покривање кровова и у ту сврху се и данас користи.

У Србији не постоји организована експлоатација аргилошиста. У околини Владичиног Хана у зони фације *зелених шкриљаца* вади се од стране локалног становништва, веома квалитетан сивозелени шкриљац са кливажом који омогућава цепање у врло танке плоче (Слика 15). Плоче одабраног квалитета су погодне за поплочавање стаза и вертикалних површина зидова. Поседује задовољавајућу временску трајност (Bilbija i Matović, 2009).



Слика 15 Камени елементи произведени од шкриљаца
са локалитета Владичин Хан (Brzak)

III.3 ТАНКЕ ФАСАДНЕ ПЛОЧЕ ОД КАМЕНА

Камен у функцији савремене фасадне облоге преузима декоративну и заштитну улогу при облагању бетонских и челичних конструкција (Crnković i Šarić, 2012). Показало се да употреба камена као фасадне облоге носи мање трошкове животног циклуса и да је у већем складу са животном средином у поређењу са сличним производима од цементних композита, стакла или челика. Ипак, уочена повијања и издужења танких плоча, првенствено од мермера и кречњака, узроковала су пораст трошкова одржавања, безбедносни ризик и негативан публицитет (Schouenborg et al., 2007).

Са градњом виших архитектонских објеката, постављен је циљ смањења тежине фасадних елемената са олакшаном потконструкцијом. 1960.-тих година су се стекли технолошки услови за производњу камених плоча дебљине 3cm, што је погодновало економским тежњама и рационалном приступу пројектовања система облагања. Међутим, примени танких камених плоча није претходило знање засновано на испитивању и истраживању. Неодговарајућа процена трајности и чврстоћа⁴³ је резултирала разноврсним оштећењима плоча у експлоатацији (Loughran, 2006; Naggatz & Gerns, 2007).

III.3.1 Основне предности употребе танких фасадних плоча од камена

Основне предности употребе танких фасадних плоча од камена се односе на њихова декоративна својства и својства која се могу сврстати под аспект одрживости, попут трајности материјала, могућности поновне употребе или рециклаже.

⁴³ Чврстоћа камена у механичком смислу се може дефинисати као својство које карактерише његову способност да се одупре деловању спољних сила које теже да изазову разарајућу деформацију (Bilbija i Matović, 2009).

Ш.3.1.1 Декоративност

Избор камена према критеријуму декоративности је заснован на визуелном изгледу камена који зависи од текстурно-структурних карактеристика, састава и боје. Овај критеријум нема објективних и квантитативних показатеља. Односи се на лепоту шара и боја, али и реткост изгледа. Посебно су цењене боје које се ретко јављају: зелена, светло жута, љубичаста, плава и др. На декоративност могу утицати и одређена технолошка својства камена, попут глачања и полирања. Специфична шара се најбоље испољава на свежим и мокрым или полираним пресецима камена. Декоративност не сме бити искључиви критеријум при избору камена. Правилан одабир мора бити пропраћен и техничким критеријумима (Crnković, 1979; Stojković, 1997).

Ш.3.1.2 Аспект одрживости

Камен у великој мери одговара одрживом материјалу. Одрживост материјала се посматра кроз све фазе животног циклуса. Поједини процеси на том путу који штете животној средини се не могу избећи, али се могу ублажити. Мерама ублаживања утицаја могу се смањити или потпуно елиминисати дејства активности експлоатације ресурса на човекову околину. Ревизијом производних процеса се може додатно допринети одрживости материјала.

Камен као природни материјал захтева једноставан технолошки поступак обраде чиме у малој мери утиче на животну средину. Захваљујући нижој токсичности, није штетан по раднике и кориснике објекта. Камен је један од најтрајнијих материјала. Правилним избором, уградњом и одржавањем може остварити дуг животни век. Замена трајних материјала је ређа, а тиме и мањи утицај на животну средину. Фасадне камене плоче се могу рециклирати или поново употребити по завршетку експлоатационог века објекта, уколико се могу једноставно од њега одвојити. Тиме се умањује потреба за депонијским простором и потрошња природних ресурса. Камен се у виду танких фасадних плоча може применити у

оквиру ветреног фасадног склопа који доприноси енергетској рационализацији зграда.

Приликом разматрања аспекта одрживости највећи недостатак представља ограниченост резерви стенског материјала. Камен се, као необновљив материјал, у природи налази у коначним количинама. У том смислу није одржив материјал, иако у многим аспектима подржава тренд одрживости. Оптималном, рационалном експлоатацијом резерве треба штедљиво трошити⁴⁴.

Ш.3.2 Танке фасадне плоче од камена у експлоатацији

Као највећи недостаци танких фасадних плоча издвајају се могућа појава термалне хистерезе, лома услед механичког удара и ефлоресценције. Примећено је да ове појаве у одређеној мери зависе од примењеног камена и система облагања каменим плочама.

Ш.3.2.1 Термална хистереза

У литератури је описан велики број оштећења, првенствено мермерних фасадних облога. Примећено је да се мермерна облога повија, мења запремину и губи чврстоћу. Највише пажње је посвећено белом *Carrara* мермеру, како је најраспрострањенији и највише коришћен тип мермера⁴⁵. Оштећења су приписана појави која се назива термална хистереза (*thermal hysteresis*) (Loughran, 2006). Хистереза (или хистерезис) представља „трајање неког дејства и по престанку узрока који га је изазвао“, односно „заостајање дејства силе у материјалу или супстанци и после њене промене“ (Поповић и Мирковић, 1978).

⁴⁴ Оцена камена као еколошког, односно одрживог материјала је заснована на критеријумима аутора Ј. Ким и Б. Ригдон (Kim & Rigdon, 1998b).

⁴⁵ Иако се у раду обрађује деградација *Carrara* мермера, многе облоге од овог материјала су имале и повољне перформансе - нису подлегле савијању.

Термална хистереза може преобразити танку плочу од камена (првенствено мермера) на конкаван или конвексан начин. Деформације се јављају услед повишених температура и различитих температурних фаза лица и полеђине плоче, које резултују различитим опсегом ширења. На тај начин, камен изложен температурним варијацијама се деформише, а да се никада не врати у првобитно стање. Термалну хистерезу прати промена изгледа, запремине, појава прслина и пад чврстоћа материјала – првенствено чврстоћа при савијању⁴⁶. У најгорем случају долази до лома у тачки ослонца и пада плоче. Понављањем термалних циклуса, плоче могу деградирати до ступња слободног грануларног материјала (*sugaring effect*) (Loughran, 2006). Многи истакнути објекти су морали заменити облоге од мермера након 30-40 година експлоатације по цени од више милиона долара (*Amoco Building- Chicago, Richmond City Hall- Virginia, Houston Concert Hall- Florida, SCOR Tower- Paris, IBM Tower-Brussels, Finlandia Hall- Helsinki*). Ради наведених појава порасла је забринутост око безбедне употребе ове врсте камена на фасади (Grelk et al., 2007).

Мермер се првенствено састоји од минерала калцита. Кристали калцита се при загревању понашају анизотропно, што значи да се шире у различитој мери у различитим правцима. При хлађењу, кристали се не враћају у првобитно стање. Ова појава резултира трајним ширењем мермера, повећаном могућношћу апсорпције, и смањењем чврстоћа (Loughran, 2006). Савијају се и мермери сачињени од доломита (Grelk et al., 2007). Анизотропно температурно ширење калцита и доломита узрокује грануларну декохезију, али без присуства воде, односно влаге, деградација је малог обима (Schouenborg et al., 2007). Тако је и закључено је да је предуслов за ову врсту деградације комбинација повишених температура, односно температурних варијација, и присуство влаге, као и слободне воде унутар пора мермера⁴⁷ (Schouenborg et al., 2007).

⁴⁶ Није уочена корелација између степена савијања и губитка чврстоће. То је посебно забрињавајуће како постоји потенцијални ризик озбиљног губитка чврстоће без евидентног савијања облоге. Амплитуда савијања је пропорционална димензијама плоче (Grelk et al., 2007).

⁴⁷ Влага у камену се може наћи у облику воде од кише, подигнуте влаге из тла и кондензоване влаге на хладним зидним површинама. Ова се влага леђи у капиларним цевчицама, транспортује растворљиве соли или полако разлаже карбонатне стене (Winkler, 1996).

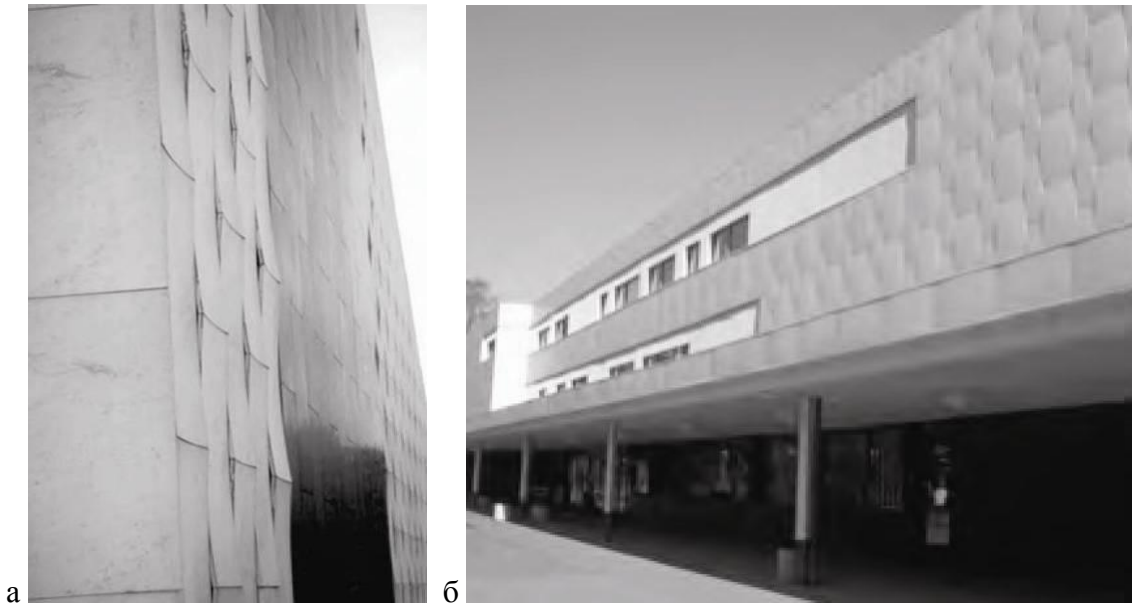
Изражени топлотни циклуси се везују за примену грађевинског материјала на јужној страни објекта уз дејство неповољних климатских услова, попут оних који се сусрећу у северним европским земаљама (Grelk et al., 2007). Примећено је да излагање већим температурним разликама има већи негативан утицај на плоче⁴⁸.

Објекат *Finlandia Hall* архитекте Алвара Алта (Alvar Aalto) представља најпознатији и најконтроверзнији пример деформисања мермерне фасаде (Слика 16). Плоче од *Carrara* мермера, дебљине 30 mm и димензија до 140 cm, су причвршћене са по четири котве, две са сваке стране вертикалне спојнице. Само пар година након облагања, плоче су почеле да се значајно криве и убрзо се појавила опасност од њиховог пада. Разарање плоча се такође огледало у оштећењу површина, пуцању око тачака ослонаца и нарушеном изгледу. Плоче на северној страни су у мањој мери подлегле деформацијама од плоча на источној, западној и јужној страни. Одређени панели су се савили са амплитудом од 50 mm, а чврстоћа при савијању је пала за више од 50%. Поједини панели су и пали.

Ради уважавања архитектонског дела, старе плоче су замењене новим плочама од *Carrara* мермера, али са вишим чврстоћама при савијању и флексибилним системом ослањања који дозвољава потребна дилатирања. Котве су премештене по хоризонталним спојницама. Максимална величина панела је умањена за 20%, унапређене су термоизолација и вентилација. Након шест месеци уочена су повијања, а након пар година, чврстоћа при савијању се смањила за 20-30%. Нове плоче од скоро истог типа *Carrara* мермера су се повиле ка споља – конвексно, док су се првобитне плоче (скоро све) повиле конкавно - ка унутра⁴⁹. Није утврђен разлог оваквог понашања (Grelk et al., 2007; Loughran, 2006).

⁴⁸ Савијање је примећено на свим висинама и свим странама објекта, али су амплитуде варирале од оријентације фасаде. Појава савијања је мање изражена на фасадама са мањим температурним разликама. Најмање амплитуде савијања су обично уочене на северним фасадама, како нису изложене великим температурним циклусима под дејством сунчевог зрачења. Савијање учесталије примећује на вишим деловима објекта што се може објаснити локалним варијацијама ветра, влажности и температура које постају екстремније са висином (Grelk et al., 2007) .

⁴⁹ Примећено је да се исти мермер савија и на конкаван и на конвексан начин на истој фасади на блиским позицијама. На позицијама где су температурне варијације мање екстремне, параметри попут избора материјала играју важнију улогу. На јужној, источној и западној страни објекта где су температуре генерално више, температура је далеко најбитнији утицајни фактор. Треба приметити да постоји јасна разлика између смера савијања примећеног *in situ* и резултата лабораторијских испитивања. У пракси, смер је скоро *произвољан*, док је у контролисаним



Слика 16 *Finlandia Hall*: а) конкавно савијање првобитне облоге од *Carrara* мермера, б) конвексно савијање новопостављене облоге од *Carrara* мермера (Grelk et al., 2007)

Термална хистереза није карактеристична за један тип мермера. Повијање је уочено код мермера различитог састава и структуре. Ова појава није приписана одеђеном климату⁵⁰. Описане деформације су уочене код објеката различитих старости и плоча разних дебљина и димензија, које су причвршћене на различит начин. Ипак, уочено је да плоче прихваћене малтером имају мању тенденцију повијања. Разлог могу бити мање температурне разлике између лица и наличја плоче, које се развијају код таквог фасадног склопа. Иако се највише извештава о повијању мермерних плоча, деформације су такође примећене код кречњака и гранита (Grelk et al., 2007; Schouenborg et al., 2007; Siegesmund et al., 2008; Winkler, 1996).

условима лабораторије, увек ка вишим температурама. Овај феномен је тешко објаснити (Schouenborg et al., 2007).

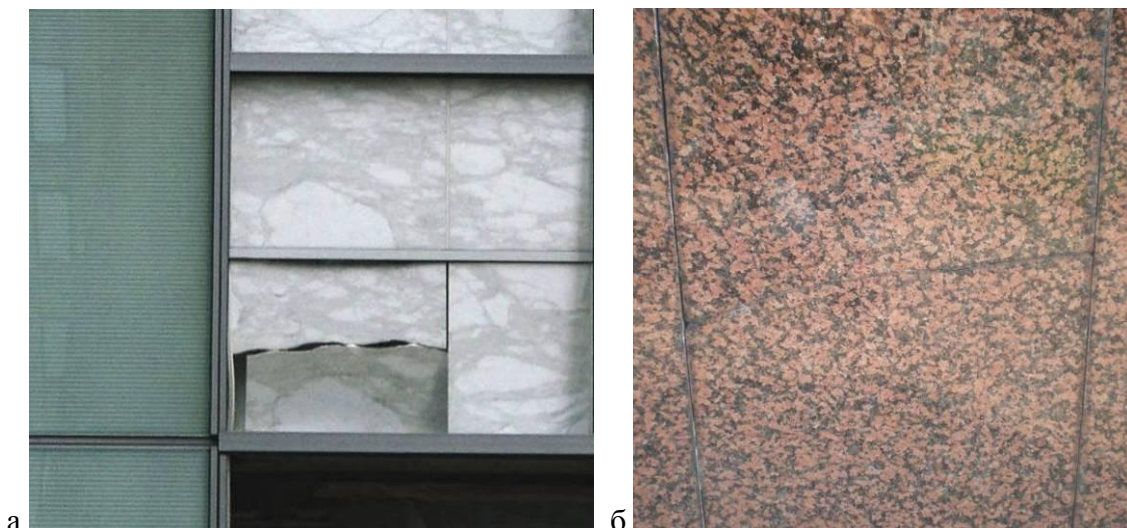
⁵⁰ Не постоје докази да је неки посебни климат типичан за услове који воде трајном савијању, ширењу и губитку чврстоће при савијању. Ипак дневне температурне варијације и извор влаге су заједнички за све локације (Grelk et al., 2007). Примери савијања мермера и кречњака под сопственом тежином су уочени у земљама са обилним падавинама, попут западне Европе, северног и источног дела Северне Америке и источног Тексаса (Winkler, 1996).

При избору камена, треба дати приоритет техничким својствима. Естетске карактеристике се брзо мењају деградирањем неодговарајућег примењеног камена. Камен је природан материјал и склон је варијацијама својстава која се додатно мењају под утицајем атмосферских прилика. Чврстоће камена истог каменолома могу значајно варирати, тако да испитивање узорака код обимних пројеката треба вршити током целокупног процеса изградње (Loughran, 2006).

Ш.3.2.2 Отпорност на удар

Фасадни елементи се пројектују тако да без лома могу издржати равномерно распоређено оптерећење, попут оптерећења од ветра. Међутим, доста мање концентрично оптерећење може довести до лома танког фасадног елемента од камена (Слика 17). Оптерећења узрокована механичким ударом су већа на приземном нивоу, па се у том случају препоручује (додатно) прихватање плоче малтером.

Основна својства која утичу на чврстоће су дебљина плоче и порозност природног камена. *The Indiana Limestone Institute* препоручује да се тамошњи кречњак сече на димензије не мање од 5 cm (2 инча). Супротно томе у континенталној Европи се примењује тање сечен кречњак, обично између 3 и 4 cm. При употреби кречњака треба водити рачуна о накнадном смањењу његове дебљине под утицајима атмосферских агенаса. Губитак камена од пар милиметара, код плоче дебљине 3 cm, може представљати проблем. С обзиром да кречњак најчешће има знатно мању чврстоћу при притиску и савијању од гранита, код танких панела ово излагање атмосферским утицајима и губитак чврстоћа може брзо довести до оштећења, јер камен није у могућности да издржи оптерећење од сопствене тежине и ветра (Loughran, 2006).



Слика 17 Лом фасадне камене плоче а) *One South La Salle Street*, Чикаго (Loughran, 2006), б) Робна кућа Београд, Макензијева 57, Београд (аутор)

Ш.3.2.3 Ефлоресценција

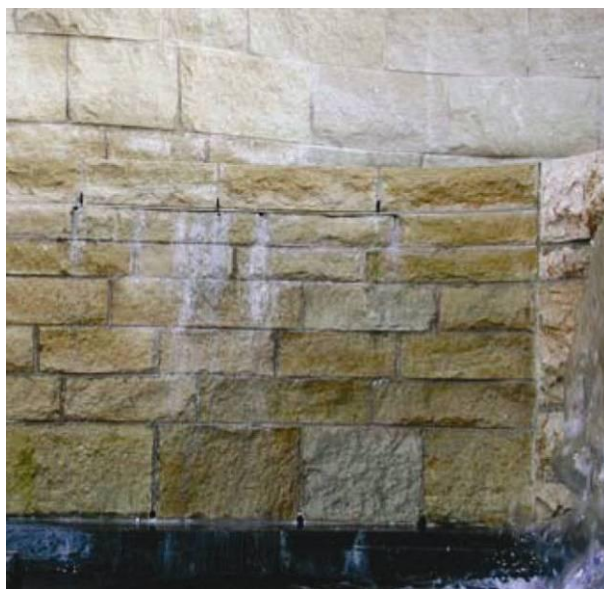
Ефлоресценција је појава која се најчешће јавља код фасада од камена, опеке и бетона. Представља наслага растворљивих једињења (соли) које слободна вода износи на површину објекта (Слика 18). Сматра се синдромом новоизграђених објеката (*new building bloom*). Може нестати у кратком временском периоду, пошто се зид новонасталог објекта исуши, а кишница спере фасадну површину од наслага. Међутим, ако се извор проблема не санира, ефлоресценција може годинама пратити објекат. Насlage пудерастих соли се могу увећавати. Њихово таложење унутар пора камена може изазвати механичка оштећења, односно слабљење кохезионих веза између минерала, и временом довести до дезинтеграције камена. Ипак, ефлоресценција је најчешће само естетски проблем (Loughran, 2006).

Узроци ефлоресценције су различити, али су поједини фактори увек присутни. Слободна вода која раствара једињења соли се првенствено мора кретати кроз пресек зида. Растворљива једињења морају бити унутар или у непосредној близини фасадног склопа, а слободна вода мора пронаћи пут до лица фасаде. При ефлоресценцији, соли формирају флекe, пудерасте или кристаласте насlage на

површини фасаде. Појава и интензитет ефлоресценције је обично у вези се саставом малтера који је примењен код фасадног склопа (Loughran, 2006).

Ефлоресценција се најчешће јавља по завршетку радова. Услед слабе заштите објекта од атмосферских утицаја, у фасадни зид може продрети влага. По завршетку радова вода из унутрашњости фасадног зида почиње да избија на површину, носећи са собом растворљива једињења соли. Ефлоресценција не би требало да се поново јави када се резерве соли истроше.

Ефлоресценција је уобичајена у зимским месецима, јер ниже температуре успоравају процес испаравања воде. Тада насlage соли не испаравају са водом, већ остају иза површине зида (субефлоресценција). Из тих разлога ова појава преовлађује код северно оријентисаних зидова. Лети, испаравање влаге из зида може бити интензивно. Влага се релативно брзо креће кроз зид до његове површине, остављајући мање насlage соли на свом путу. Ефлоресценција се такође може јавити након кишног периода у касну јесен, зиму или рано пролеће, кад је испаравање значајно спорије, а температуре ниже. У контакту камене фасаде са тлом такође може доћи до појаве ефлоресценције (Loughran, 2006).



Слика 18 Трагови ефлоресценције: *National Museum of the American Indian*, Вашингтон (Loughran, 2006)

Ефлоресценција се може уклонити лакше него остали типови флека на фасадним зидовима. Наслаге соли су растворљиве у води и могу се спрати обичном кишницом. Ефлоресценција наставља да се појављује све док постоји извор присутних растворљивих једињења и кретање слободне воде кроз спољни зид. Заустављање извора воде је неопходно за елиминисање појаве ефлоресценције. Одговарајуће фасадне облоге су кључан фактор у спречавању даљег увођења воде у склоп спољног зида (Loughran, 2006).

Ш.3.2.4 Остали недостаци фасадних плоча од камена

Осим поменутих проблема пројектовања савремених фасада, који утичу на декоративност и функционалност облоге, јављају се додатни на које треба обратити пажњу при примени фасадних плоча од камена, као и композитних панела. Са естетског аспекта битно је улађивање шара свих плоча на фасади. Само једна плоча другог тона или постављена тако да јој се шаре протежу у правцу другачијем од суседних, може довести до визуелне nelaгодности. Такође треба обратити пажњу на обраду камена (полирање, пескарење, термички поступак и сл.) која мења боју и утисак који оставља камена облога.

Флеке представљају естетски проблем, а вода је њихов најчешћи узрочник. Потребно је испројектовати адекватно одвођење воде од фасаде. Да не би дошло до промене боје, код плоча од камена са већим степеном апсорпције воде неопходан је хидрофобни третман. Контакт са неадекватним заптивачима у спојницама такође може изазвати промену боје камена. Силиконска уља или пластификатори који се додају у сврху унапређења модула еластичности одређених заптивача могу довести до појаве флека. Треба избегавати примену камена третираног различитим препаратима за попуњавање несавршености. Ове смоле нису стабилне под дејством ултравиолетног зрачења, односно сунчевих зрака, и могу бледети. Да би се избегла појава флека, сви производи који се користе при облагању морају се испитати ради утврђивања компатибилности са примењеним каменом.

III.4 КОМПОЗИТНИ ФАСАДНИ ПАНЕЛИ СА ЛИЦЕМ ОД КАМЕНА

Обрада камена савременим технологијама омогућава сечење камена на веома танке плоче дебљине неколико милиметара. Танко сечени камен представља декоративну глазуру панела која без доброг упоришта не би нашла широку примену. Квалитетна подлога омогућава и ширу примену оваквог панела у односу на класичну камену облогу. Доступни на тржишту, лагани, чврсти, отпорни на удар и савитљиви, композитни панели проналазе примену у ентеријерима и екстеријерима авиона, бродова, возова, унутар лифтова, као облога стубова и слично.

Композитни панел са лицем од камена чине: танка плоча од камена (3-5 mm) и чврста подлога. Подлога може бити од различитог материјала у зависности од намене. Два саставна елемента су повезана јаким адхезивом при дејству високих температура и притиска. Композитни панели се могу произвести са облогом од било ког природног камена попут гранита, мермера, кречњака, шкриљца или пешчара.

III.4.1 Преглед композитних панела са монолитном облогом од камена

У наставку рада дат је преглед основних типова композитних панела са лицем од камена за спољну употребу који су заступљени на светском тржишту. У литератури и на тржишту се најчешће могу наћи композитни панели са алуминијумском саћастом подлогом. Присутни су и композитни панели са подлогом од керамике, лакоагрегатног бетона и стакла. Осим представљених, на тржишту се појављује још врста у различитим комбинацијама, попут декоративног камена на подлози од камена са слабијим естетским, а повољнијим физичко-механичким својствима.

Ш.4.1.1 Композитни панели са алуминијумском саћастом подлогом

Композитни панел са алуминијумском саћастом подлогом, технологија преузета из ваздухопловне индустрије, се састоји првенствено од саћастог језгра које је са обе своје стране обложено танком плочом од алуминијума или фибергласа. За такву подлогу се везује природни камен по избору, који се накнадно обрађује по жељи. Док подлога пружа крутост и чврстоћу, камен представља декоративну облогу отпорну на временске услове. Спајање ова два слоја се врши епоксидним лепком који се користи у ваздухопловној индустрији. Јачина и трајност везе се постиже применом високих температура и притиска како би епоксидни лепак зашао у поре камена. Панели се могу причврстити за фасадни зид или носећу потконструкцију помоћу силиконског адхезива, механичком везом или применити у систему зид-завесе.

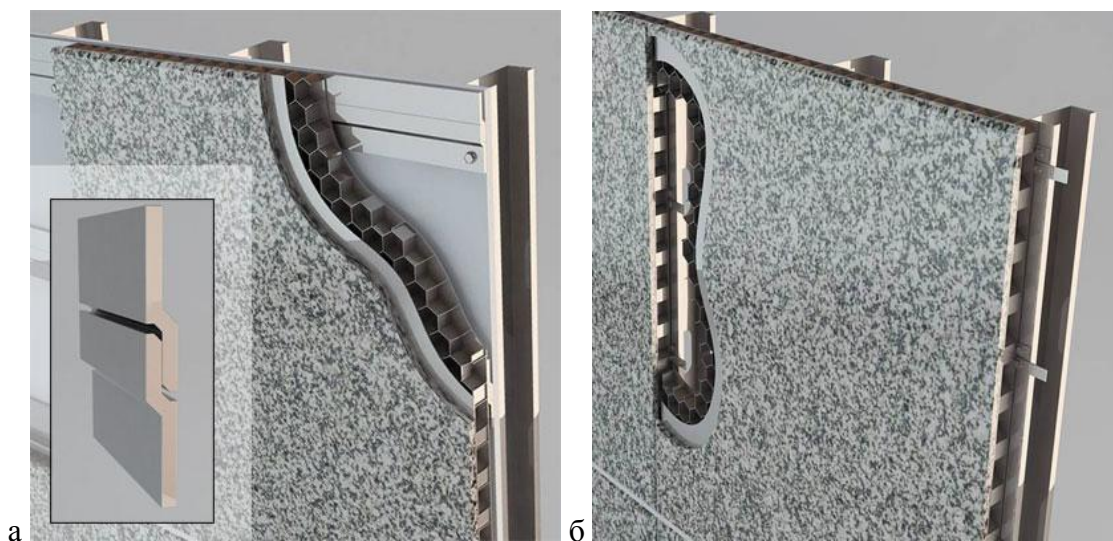


Слика 19 Пресек кроз композитни панел са алуминијумског саћастом подлогом произвођача *StonePly* (*StonePly*)

Композитни панел произвођача *StonePly* је чврста и лагана облога са 60 пута већом отпорношћу на удар од гранитане плоче. Алуминијумско саћасто језгро обложено танком алуминијумском плочом са обе стране, ствара слој водоотпорне заштите отпорне и на дејство пожара. На овакву подлогу епоксидним лепком, који подноси напоне од око 220.000 kg/m^2 , је везана танка плоча од камена по избору (Слика 19). Тежина панела износи око 18 kg/m^2 , укупна дебљина 14-24 mm, а

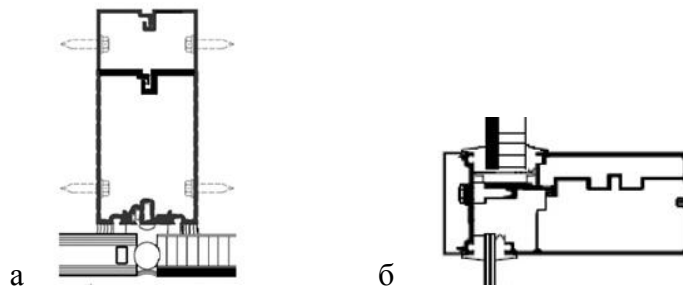
стандардне димензије 1524 x 2845 mm. По потреби, могуће је произвести панеле и већих димензија (StonePly).

Захваљујући малој тежини, панели *StonePly* се могу монтирати силиконским адхезивом. Механички се могу монтирати уз помоћ система са Z-спојницом. Тракасти Z- носачи од алуминујума се причвршћују за носећу конструкцију, а потом се Z-котве на полеђини префабрикованог панела умећу у постављене носаче (Слика 20а). Панели *StonePly* се такође могу монтирати помоћу скривених завртњева. Анкери префабрикованих панела су испуштени ван панела ка спојницама. Панели се завртњевима преко анкера причвршћују на носећу потконструкцију. Потом се заптивном еластичном траком кружног пресека и заптивном масом скривају завртњи (Слика 20б). Панел *StonePly* тежи попут стакла дебљине 1 cm. Танак је и релативно великих површина, па се може применити у оквиру појединих постојећих система зид-завеса (Слика 21) (*StonePly*).



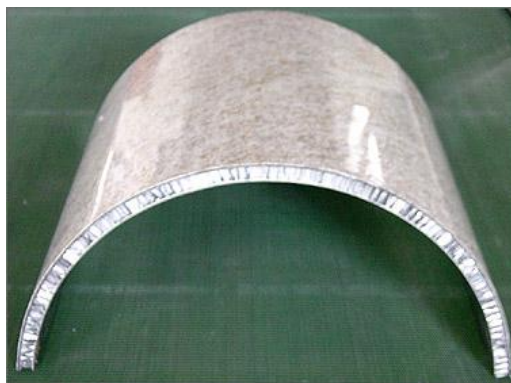
Слика 20 Причвршћивање *StonePly* панела:
а) Z-котвом, б) скривеним завртњима (*StonePly*)

Димензија спојница зависи од димензија панела. Најчешће коришћена заптивна маса код панела *StonePly* је силикон. Силикон пружа задовољавајућу отпорност на атмосферске услове, једноставно се примењује и може прихватити значајна померања. Употребљава се са траком кружног пресека од екструдиране пене.



Слика 21 Причвршћивање *StonePly* панела: а) силиконом - вертикални пресек кроз систем структуралне зид-завесе, б) хоризонтални пресек кроз систем класичне зид-завесе (*StonePly*)

Један од панела присутних на нашем тржишту је композитни панел кинеског произвођача *Wenzou Microthin Stone*. Танка плоча од природног камена дебљине 3-5 mm (6-7 mm за термички обрађен камен) је ојачана алуминијумским саћастим језгром дебљине 16 mm које је обложено танким алуминијумским плочама или плочама од фибергласа. Стандардне димензије панела износе 600 x 1200 mm. Могуће је, у зависности од избора камене облоге, израдити и дужине до 2400 mm (*Mobicomm d.o.o.*; *Wenzou Microthin Stone Co. Ltd.*).



Слика 22 Лучни композитни панел са алуминијумском саћастом подлогом (*Wenzou Microthin Stone Co. Ltd.*)

Иста компанија производи лаке лучне панеле од природног камена са алуминијумском саћастом подлогом (Слика 22). Лаки панел са танким слојем

камена дебљине 1 mm и укупне дебљине од 20 mm налази примену у облагању стубова у екстеријеру и ентеријеру. Стандардни панели су пречника 800-3000 cm. Дужина лука може износити до 800 mm, а висина стуба до 1500 mm (Mobicomm d.o.o.).

Ш.4.1.2 Композитни панели са подлогом од лакоагрегатног цементног композита

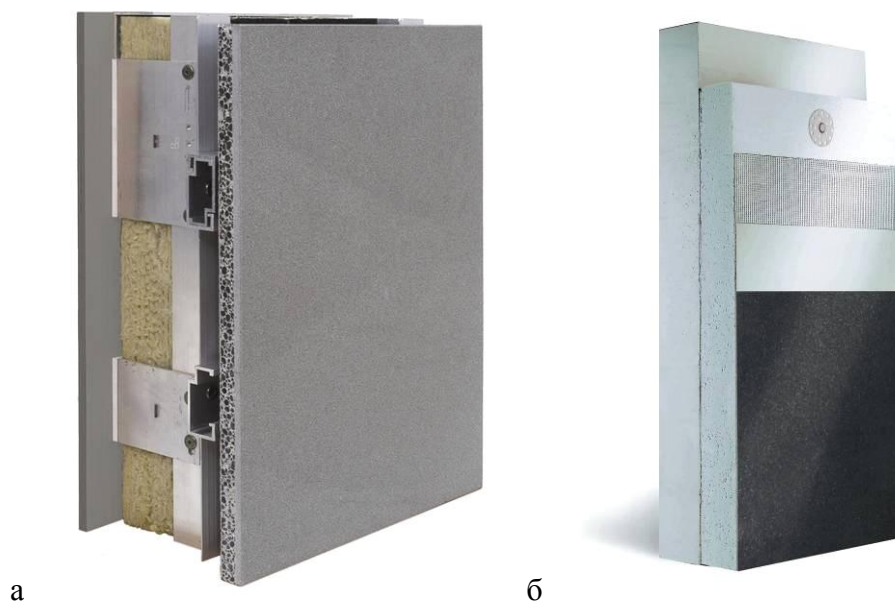
Композитни панели са подлогом од лакоагрегатног цементног композита спајају танку плочу од камена за олакшану подлогу, првенствено ради смањења сопственог опретећења на конструкцију објекта (Слика 23).



Слика 23 Композитни панел са подлогом од лаког бетона *Airtec Stone* (Alsecco UK Ltd.)

Композитни панели *Airtec Stone* произвођача Alsecco су погодни за примену у оквиру ветреног фасадног склопа. Састоје се од камене плоче дебљине 5-10 mm и подлоге од лакоагрегатног цементног композита (*lightweight aerated clay concrete base*) дебљине 19 mm. Овакав панел је до 60% лакши од пуне камене плоче (Alsecco UK Ltd.). Површина панела износи до 4,7 m², са димензијама 3,75 x 1,25 m у зависности од квалитета камена. Тежина панела износи 37-42 kg/m², а укупна дебљина 25-29 mm. Панеле, отпорне на удар, носи лака алуминијумска потконструкција без видних елемената монтаже. Монтирају се преко котви и

керамичких чаура које се уграђују у подлогу панела током производње (Слика 24а).



Слика 24 Композитни панели произвођача Alsecco а) ветрени фасадни склоп са панелом *Airtec Stone*, б) фасадни склоп са панелом *Alprotect Stone XL* (Alsecco UK Ltd.)

Композитни панели *Alprotect Stone XL* произвођача Alsecco су погодни за облагање и заштиту спољних зидова и плинти приземних етажа које су подложне ударним оштећењима. Тежина панела износи 33-45 kg/m², дебљина 25-29 mm, а површине се крећу до 0,72 m². Танке плоче од природног камена на подлози од лаког бетона се полажу у малтер уз помоћ или без котви (Слика 24б) (Alsecco UK Ltd.).

Ш.4.1.3 Композитни панели са керамичком подлогом

Нове технологије омогућавају спој танке плоче од камена и танке подлоге од керамике (порцелана) коју карактерише мала апсорпција воде. Камен, попут мермера може бити порозан материјал подложен пропуштању влаге и воде. Спој између мермерне плоче и керамичке подлоге је водонепропусан и заједно са керамичком подлогом обезбеђује да влага, растворљиве соли и друга разарајућа једињења не стигну са тла или зида до мермерне облоге и обрнуто. Захваљујући међусобној компатибилности мермера и керамике, подлога осим заштитне има и улогу у унапређењу физичко-механичких својстава панела. Велику предност представља и мала тежина.



Слика 25 Композитни панел са керамичком подлогом
(E-Rising International Limited)

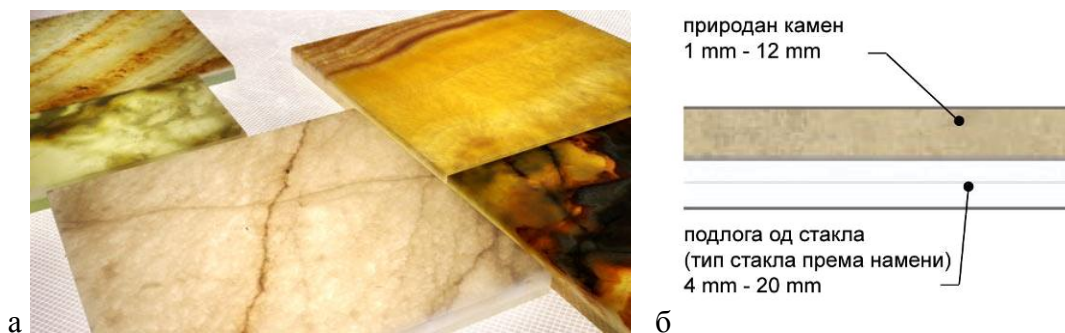
Композитни панел произвођача E-RISING International Limited се састоји од танке мермерне плоче дебљине 3 mm која је посебним адхезивом спојена за керамичку подлогу од 9 mm (Слика 25). Ови композитни панели на тај начин комбинују привлачну боју и текстуру природног мермера са чврстом подлогом. Панели су знатно су чвршћи од класичних камених плоча, веома се једноставно монтирају и транспортују. У поређењу са класичним каменим плочама приказују унапређену чврстоћу при савијању и отпорност на удар. Отпорније су на температурне промене, кисела и алкална једињења, предају мање сопствено оптерећење конструкцији објекта и имају уједначену боју и текстуру захваљујући камену који

се сече у танке плоче. Са укупном дебелином од 12 mm, максималне стандардне димензије износе 0,8 x 0,8 m. У функцији фасадне облоге се могу полагати у малтер или механички анкеровати у зависности од димензија и примене (E-Rising International Limited).

Ш.4.1.4 Композитни панели са подлогом од стакла

Основна предност композитних панела од камена са подлогом од стакла је њихова делимична прозрачност. Прозрачни панел током дана у унутрашњост објекта пропушта природно, док ноћу исијава вештачко осветљење.

Сечењем на само неколико милиметара оникс, гранит и мермер постају прозирни материјали. На подлози од стакла задржавају то својство. Спајањем облоге од камена са подлогом од стакла, добијају се панели већих површина и чврстоће. За облагање ентеријера могу се употребити разне врсте стакла, док се за фасадно облагање користи каљено или термоизолационо стакло.



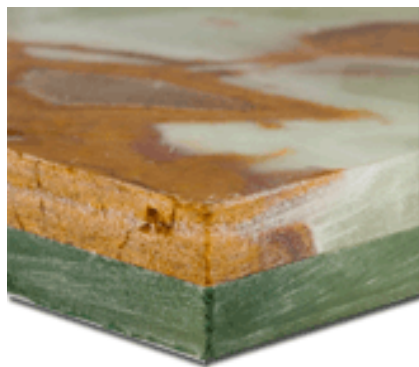
Слика 26 Композитни панел са подлогом од стакла *Dura-Lite Translucent Glass-Backed Natural Stone Panels*: а) приказ разноврсности панела, б) пресек кроз панел (GPI Design/ GPI International)

Димензије панела произвођача Dura-Lite се разматрају за сваки пројекат посебно. Укупна дебелина панела износи до 50 mm, а облоге од камена до 12 mm (Слика 26). Носи се у систему зид-завесе. Применом панела већих површина умањује се учесталост спојева и носеће потконструкције, чиме се елиминишу линије сенки.

Употребом панела већих површина долази до изражаја и природна лепота камена, а захваљујући сечењу блока у танке плоче шаре се могу боље упарити. Димензије зависе и од избора камена.

Тежина панела износи око $2,7 \text{ kg/m}^2$ по 1 mm дебљине. Овакав панел може бити три пута лакши и три пута већих чврстоћа у односу на класичну плочу од камена исте површине. Лаки панели омогућавају примену олакшане носеће потконструкције, једноставнији транспорт и бржу монтажу, што се одражава на смањење трошкова облагања фасада (GPI Design/ GPI International).

Композитни панел произвођача TerraCore се састоји од танке прозрчане камене облоге која је причвршћена епоксидним лепком за подлогу од каљеног стакла дебљине 6 mm (Слика 27а). Овај композитни панел од оникса или мермера се осим у ентеријеру може применити и у екстеријеру топлијег климата. Укупна дебљина зависи од дебљине камене плоче и најчешће износи између 12 mm и 18 mm. Тежина панела износи око 44 kg/m^2 а димензије до 1,2 x 1,2 m (TerraCore Panels).



а



б

Слика 27 Композитни панел са подлогом од стакла: а) панел произвођача TerraCore (TerraCore Panels), б) панел са лицем од мермера у систему зид-завесе *E.N.S.A.D. - Ecole Nationale Supérieure des Arts Décoratifs*, Париз (Loughran, 2006)

Ш.4.2 Преглед композитних панела са облогом у виду каменог мозаика

У оквиру претходног поглавља су представљени композитни панели са подлогом од цементног композита произвођача Alsecco. У наредном делу ће се приказати поједине облоге и панели који својом цементном подлогом обухватају више камених плоча или плочица.

Ш.4.2.1 Композитне плоче малих димензија

Композитни панели мањих димензија се користе при облагању ентеријера и екстеријара. Састоје се од камених плочица различите површинске обраде и подлоге од лаког цементног композита, ојачаног стакленим влакнима.



Слика 28 Композитне плоче малих димензија:
а) неправилне геометрије, б) квадратног облика (CupaStone)

Стандардне димензије плоча произвођача CupaStone неправилних геометрија износе 61 x 15,2 cm и 60 x 20 cm, квадратних 30 x 30 cm, а могућа је израда плоча и других димензија (Слика 28). Дебљина плоча износи 20-60 mm, а тежина 45-96 kg/m³. Постављају се мокрым поступком или механичким путем, преко уграђених котви (CupaStone).

Ш.4.2.2 Префабриковани панели спратних димензија

Технологија грађења префабрикованим панелима спратних димензија са лицем од камена се већ може сматрати класичним системом градње.



Слика 29 Префабриковани панел са лицем од камена
(Marble Mosaics, лична преписка, март 13, 2014)

Камена облога префабрикованих спратних панела произвођача Marble Mosaics је, генерално гледано, дебљине 30 mm у случају гранита и 50 mm у случају кречњака (Слика 29). Израда панела се спроводи са лицем камена на доле. Појединачне камене облоге се анкерују уз помоћ котви за подлогу од армираног цементног композита у процесу префабрикације (Marble Mosaics, лична преписка, 2014).

Ш.4.3 Основне предности примене композитних панела са лицем од камена

Композитни панели са лицем од камена показују унапређење својстава у односу на класичне плоче од камена, првенствено по питању тежине, водопропустљивости, као и виших чврстоћа при савијању. Композитни панели са алуминијумском саћастом подлогом су у литератури и на тржишту најраспрострањенији представници ових панела, тако да се овде наведена својства првенствено односе на фасадне облоге тог типа. Ови панели приказују

унапређења карактеристика у најширем смислу. Треба узети у обзир да други типови композитних панела са лицем од камена могу имати другачија својства.

III.4.3.1 Тежина

Композитни панели са лицем од камена могу имати мање тежине од класичних камених плоча (класична облога од камена тежи преко 130 kg/m^2). Стандардни композитни панел са алуминијумском саћастом подлогом је за 30-50% (чак 80%) лакши од пуне камене плоче. Применом композитних панела олакшава се носећа потконструкција и смањује оптерећење на објекат. Њима се једноставно манипулише, врши се бржа монтажа посебно при облагању вишеспратница и уштеда радне снаге, као и укупних трошкова (Слика 30).



Слика 30 Демонстрација манипулације композитним панелом са алуминијумском саћастом подлогом (Wenzou Microthin Stone Co. Ltd.)

Композитни панели са саћастом подлогом су посебно погодни за обнову архитектонских објеката. Пошто незнатно доприносе оптерећењу конструкције, њима се може облагати преко постојеће фасаде. Тиме се смањује утрошак времена, укупни рад и трошкови за уклањање постојеће фасадне облоге (Building and Construction Authority, n.d.; Stone Ply).

Ш.4.3.2 Чврстоћа при савијању

Композитни панели са алуминијумском саћастом подлогом приказују унапређене чврстоће при савијању у односу на класичне плоче од камена. Резултати испитивања ових панела показују да механичким својствима доминира алуминијумска подлога (Scheffler & Kneezel, 2007). Испитивани су узорци са лицем од травертина, кречњака и гранита. Закључено је да танка камена облога од травертина и кречњака нема или има тек незнатну улогу, док се једино применом гранита уочава пораст вредности чврстоћа при савијању. Претпоставља се да облога од гранита има утицаја ради боље компатибилности материјала и ефикасније расподеле оптерећења између два слоја. Резултати испитивања упућују да је варијабилност чврстоћа при савијању композитних панела знатно мања него код плоча од камена, највероватније јер тим својством доминира алуминијумска подлога.

Вршена су испитивања композитних панела са алуминијумском саћастом подлогом која је обложена фибергласом. Резултати показују да је при повишеним температурама дошло до пада чврстоћа при савијању, највероватније ради омекшавања фибергласа, лепка или обе компоненте. Испитивања указују да влага има незнатан утицај на чврстоћу при савијању, захваљујући доминантним својствима алуминијумске саћасте подлоге. Резултати испитивања такође потврђују да излагање атмосферским утицајима делује на пад чврстоћа. Значајан губитак проузрокован овим утицајима је примарно изазван деградацијом саћасте подлоге, са закључком да пројектантско решење панела мора бити засновано на трајности облоге од фибергласа и његове везе са алуминијумском подлогом⁵¹. Додатна испитивања падхезије аксијалним затезањем указују да напони приањања

⁵¹ Испитивани су панели који су се састојали од танке камене плоче дебљине 4,8-6,4 mm и алуминијумске саћасте подлоге дебљине 19,1 mm. Алуминијумска подлога је са обе стране била обложена фибергласом – влакнима ојачаном епоксидном облогом. Композитни панели обложени гранитом изложени испитивању убрзаног дејства атмосферских утицаја (*accelerated weathering*), након 100 циклуса смрзавања до -23,3°C и одмрзавања до 76.7 °C у раствору који симулира дејство киселих киша, показују минималан губитак чврстоће при савијању у односу на оне који нису изложени штетним утицајима (Scheffler & Kneezel, 2007).

надмашују чврстоћу камена, са најчешћим ломом преко камена (Scheffler & Kneezel, 2007).

Ш.4.3.3 Водопропустљивост

Композитни панели са лицем од камена показују смањену водопропустљивост у односу на класичне плоче од камена. Композити са алуминијумском саћастом подлогом која је обложена фибергласом или алуминијумском танком плочом *StonePly* нису водопропустљиви, чак ни са лицем од порозног камена попут травертина или кречњака. Облагање подлоге алуминијумом или фибергласом представља континуалну водонепропусну баријеру, па се на тај начин влага задржава ван објекта. Танке камене облоге композитних панела, попут гранита и већине мермера, имају мали степен апсорпције и не захтевају додатну заштиту. Код осталих облога - меканих кречњака и мермера, може се применити хидрофобно средство (*StonePly*).

Ш.4.3.4 Декоративност

Композитни панели са лицем од камена су подједнако декоративни као и класичне плоче од камена. Међутим, код класичних плоча од камена се може јавити проблем усаглашавања тона и текстуре фасадне површине. Издвајање већег броја тањих камених облога из једног блока, као код композитних панела, омогућава постизање уједначенијег тона и текстуре целокупне фасаде. Могућност израде већих површина панела омогућава флексибилност при пројектовању и на тај начин утиче на коначни утисак који објекат пружа (*StonePly*)

Ш.4.3.5 Аспект одрживости

Дизајн композитних панела са лицем од камена је у складу са принципом очувања животне средине. Лаки композитни панели смањују потрошњу горива и транспортне трошкове до 80% у односу на класичне производе за облагање фасада. Релативно мала тежина фасадног елемента олакшава и носећу потконструкцију чиме доприноси смањеној употреби материјала, односно нових ресурса (StonePly).

Примена композитног панела оптимизује употребу природног камена. Коефицијент искоришћења стенске масе је око три пута већи него код примене фасадних елемента од пуног камена. На пример, од 1 m³ природног камена може се израдити 135 m² композитних панела у односу на 45 m² класичних плоча од камена. Тиме се рационалније експлоатишу ограничени природни ресурси и промовише очување природног окружења. Поједине врсте стенског материјала потичу из каменолома са ограниченим резервама. Уз мању потрошњу камена, експлоатација се може вршити штедљиво током дужег временског периода.

Трајност композитног панела се ослања на трајност његових компонентних материјала. Трајни производ попут камена умањује количину отпада и пружа економске предности јер га не треба често мењати. Камен и подлога који се могу рециклирати, попут алуминијумске саћасте подлоге, унапређују ниво одрживости самог грађевинског елемента и објекта у који ће бити уграђен.

Композитне панеле карактерише нешто сложенији производни процес од класичних камених плоча. Композитни панел са подлогом од алуминијума се производи тако што се стенски блок првобитно исече на плоче одређене дебљине, са којима се може манипулисати без лома. Потом се подлога спаја адхезивом за обе стране камене плоче уз дејство уједначене повишене температуре и притиска по целој њеној површини. Када адхезив веже, камена плоча се сече по средини, на тај начин раздвајајући панеле. Панел се даље сече на пројектоване димензије, а површина камена се по потреби обрађује (Building and Construction Authority, n.d.; StonePly).

Приликом производног процеса панела *StonePly*, пажљиво се управља отпадом. Већина отпада се може рециклирати, попут алуминијума и камена, а вода се рециклира у оквиру фабричког постројења. Примењује се епоксидни лепак који је у складу са очувањем животне средине (*eco friendly*) и рециклирани алуминијум (*StonePly*).

III.4.3.6 LEED сертификација

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) Green Building Rating System, развијен од стране организације *U.S. Green Building Council*, представља бодовни систем, односно програм систематског дефинисања *зеленог* објекта. Циљ *LEED* сертификационог процеса је постизање перформанси у складу са животном средином, унапређење осећаја угодности корисника и економска добит.

Композитни панели са саћастом алуминијумском подлогом произвођача *StonePly* могу играти значајну улогу у добијању *LEED* сертификата, пошто претходно описана својства које се на овај производ односе, одговарају захтевима одрживог дизајна објекта⁵². Може се додатно навести да овакав панел има улогу у оптимизацији енергетских перформанси архитектонских објекта омогућавајући постављање додатне термоизолације захваљујући релативно малој дебљини производа. На основу *StonePly* облоге се може добити до 27 поена унутар *LEED* бодовног система (*StonePly*).

III.4.4 Композитни панели са лицем од камена у експлоатацији

На основу досадашњих доступних истраживања и искустава поводом понашања композитних панела са лицем од камена у експлоатацији, даје се увид у њихове перформансе у погледу термалне хистерезе, дејства механичких удара, сеизмичких утицаја, дејства пожара и појаве ефлоресценције. Класичне фасадне

⁵² *StonePly* има улогу у постизању кредита унутар области: Енергија и атмосфера, Материјали и ресурси, Унутрашњи квалитет ваздуха, Иновације и процес пројектовања (*StonePly*).

облоге од камена могу током експлоатације у том смислу показати одређене недостатке, које савремена технологија облагања композитним панелима може превазићи. Као и у претходном поглављу, наведена својства се приписују панелима са алуминијумском саћастом подлогом, док друге врсте композитних панела могу показати и другачије перформансе.

III.4.4.1 Термална хистереза

Уобичајену појаву термалне хистерезе фасадних камених плоча, услед влаге и изложености температурним циклусима, прати трајна запреминска деформација, губитак чврстоћа услед појаве прелина, повијање које додатно оптерећује спој са конструкцијом, лом и пад плоче. Пракса и спроведена испитивања су показала да се термална хистереза, уочена код класичних фасада од камена, може избећи облагањем фасада композитним панелима.

Касних осамдесетих година прошлог века, за облагање фасада су почели да се користе композитни панели који су се састојали од танке камене облоге дебљине 5 mm и алуминијумске саћасте подлоге од 40 mm. Рани пример ове иновативне технологије облагања *Carrara* мермером је остварен на објекту сајма у граду Карара (*Carrara*), јер је пројекат захтевао мање оптерећење од оног које се постиже са традиционалним каменим плочоама од 3 cm. Истраживања су потврдила да је панел изненађујуће отпоран на витоперење након лабораторијског третмана смрзавања у агресивној средини (Loughran, 2006).

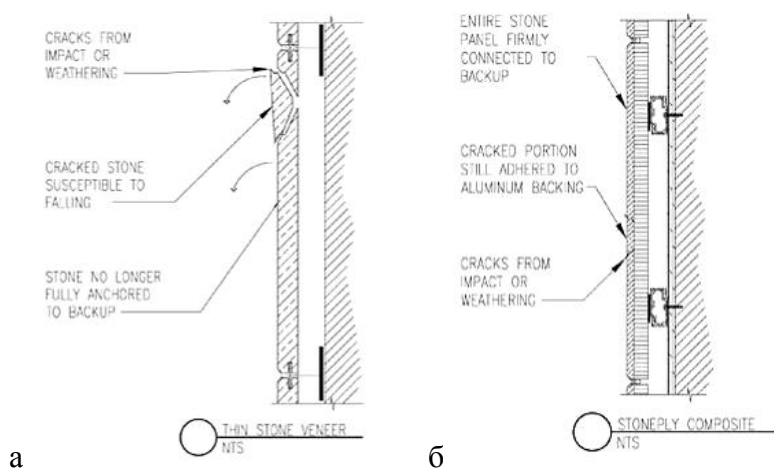
Резултати истраживања су потврдили да композитни панел са алуминијумском саћастом подлогом има способност димензионалне стабилности док су класичне камене плоче подлегле витоперењу. Испитивања су показала да *StonePly* панели не подлежу проблему термалне хистерезе, и то захваљујући својствима алуминијумске подлоге (*StonePly*).

Ш.4.4.2 Отпорност на удар

Осим боље чврстоће при савијању, композитни панели показују и бољу отпорност на удар. Ова својства се манифестују при удару ветра, атмосферским непогодама већих размера и експлозијама.

Ш.4.4.2.1 Удар ветра и атмосферске непогоде

Атмосферске непогоде могу изазвати скупоцене штете на архитектонском објекту, најчешће ударом предмета које носи ветар. Пошто су плоче од камена постајале све тање, њихова чврстоћа се знатно умањила. Под утицајем атмосферских прилика њихове перформансе слабе и оне постају подложне оштећењима. Изложени јачим налетима ветра ови елементи се могу оштетити или пасти само због неадекватне монтаже.



Слика 31 Лом дела камене облоге: а) лом код класичне облоге, б) одломљени део композитне плоче је придржан подлогом (StonePly)

Композитни панел *Stone Ply* је пројектован да издржи ударе од предмета које носи ветар брзине 15 m/s, а за које се претпоставља да би, на пример, сломили гранитну плочу дебљине 4 cm. Алуминијумска подлога се причвршћује за потконструкцију везом која подноси велика оптерећења и брзину ветра до 480 km/h. Танка камена

облога је целом површином придржана алуминијумском подлогом, која обезбеђује од пада део камене плоче који се може одломити (Слика 31) (StonePly).

Ш.4.4.2.2 Експлозија

При удару експлозије класичне камене облоге се леме, узрокују повреде и материјалну штету. Примена композитних панела отпорних на експлозију може унапредити безбедност. Захваљујући флексибилности и отпорности на удар, ови панели веома добро подносе удар експлозије

Композитни панел *Stone Ply* спаја декоративност камена са чврстоћом и флексибилношћу алуминијумског саћа. За разлику од саћасте подлоге обложене фибергласом, подлога обложена алуминијумским танким плочама омогућава задржавање фрагмената експлозије. Овакви панели могу заменити постојеће плоче од камена, као чвршће, лакше и безбедније облоге. Ради тога, ови панели су погодни за облагање анекса постојећих архитектонских објеката, модернизацију и обнову код којих се захтева одређени безбедносни фактор (StonePly).

Ш.4.4.3 Отпорност на сеизмичке утицаје

Композитни панел са саћастом алуминијумском подлогом је отпоран на сеизмичке утицаје. За разлику од класичних плоча од камена, ови панели се могу савијати, извијати и померати са конструкцијом без лома. Танка камена облога се, захваљујући микропукотинама у својој структури, прилагођава сваком кретњу алуминијумске подлоге. Исто својство савитљивости панел чини отпорним на експлозију.

Примена панела са алуминијумском саћастом подлогом има очигледних предности у подручјима која су подложна земљотресима. Лаки савитљиви панели успешније прате померања конструкције од крутих камених плоча. За разлику од њих, композитни панели могу поднети значајна извијања и вибрације без пуцања и лома. Одломљени део камене облоге не може отпасти, како је ова танка облога

преко целе површине ојачана подлогом. За примену у сеизмичким зонама, од велике важности су систем причвршћивања панела за конструкцију и дизајн спојница који омогућавају кретање панела заједно са конструкцијом.

Stone Ply панели са саћастим алуминијумским језгром који теже 16 kg/m² представљају мало оптерећење за конструкцију. Камен је целом површином везан за алуминијумску подлогу јачином везе од 240.000 kg/m². Најчешће врсте камена за облагање – гранит, мермер, кречњак и травертин, су успешно испитане на адхезију са подлогом у сеизмичким условима. Мала тежина панела омогућава безбедну везу са конструкцијом. Композитни панел се силиконском заптивком високих перформанси раздваја од суседних панела (*StonePly*).

Ш.4.4.4 Отпорност на пожар

Панели са алуминијумском саћастом подлогом су отпорни на пожар. Сачињени од незапаљивих материјала - камена и алуминијума, спојени помоћу епоксидног лепка, веома су безбедни.

Класични систем облагања – гранитна или мермерна плоча дебљине 4-8 cm причвршћена котвама од нерђајућег челика, може услед пожара постати извор опасности. И поред тога што камене плоче неће горети, неојачана облога може пући и расути се при високим температурама. Када се овај ефекат удружи са температурним шоком од хладне воде при ватрогасној интервенцији, долази до додатног пуцања камена. Најкритичније место представља ослабљен пресек рупе или жљеба за прихватање котве.

Испитивањем *Stone Ply* панела са алуминијумском подлогом дуготрајним излагањем дејству ватре и топлоте, веза камена и подлоге показује отпорност, а камен се одваја само у најситнијим одломцима (*StonePly*).

III.4.4.5 Ефлоресценција

Захваљујући својству водонепропустљивости, појава ефлоресценције је код композитних панела са алуминијумском саћастом подлогом веома ретка. Вода ретко продире у унутрашњост панела, кад на пример повуче влагу из тла. Уопштено, ефлоресценција је привремена појава захваљујући атмосферским падавинама које спирају насlage растворљивих соли са лица од камена. Пошто сав садржај соли изађе на површину елемента и спере га кишница, ефлоресценција не би требало да се поново јави (StonePly).

III.5 ЦЕМЕНТНИ КОМПОЗИТ У СВОЈСТВУ ПОДЛОГЕ

Композитни материјали се могу дефинисати као „вештачки створени материјали, састављени од најмање два или више хемијски различитих материјала, при чему постоје јасно утврђене границе раздвајања између саставних компонената, како на микроструктурном, тако и на макроструктурном нивоу. Тако добијени материјали се одликују синтезом најбољих својстава својих компонената, а често имају и карактеристике које конституенти појединачно не показују“ (Radonjanin i dr. 1999, str. 119).

Експериментална истраживања ће се вршити на цементним композитима типа малтера. Малтери представљају вештачке камене материјале засноване на употреби везива (најчешће цементног), воде (у сличају да је везиво неорганског-минералног порекла) и ситног агрегата (максималне крупноће до 4 mm). Такође се подразумева да се њихово уграђивање врши у релативно танком слоју (до 3 cm дебљине). Уколико су зрна агрегата крупнија (крупноће преко 4 mm), и уколико се уграђивање врши у виду елемената или слојева са дебљинама већим од 3 cm, говоримо о групи бетона. Пошто се малтери и бетони сврставају у исту категорију грађевинских материјала према већини суштинских параметара, наредна поглавља ће се бавити прегледом литературе која за предмет има један од поменутих композита (Muravlјov, 1991, citirano u Zakić, 2010).

У оквиру овог поглавља ће се разматрати својства цементних композита начињених од компонентних материјала који су у оквиру закључка поглавља II предложени за формирање модела фасадних панела. Обрадиће се цементни композити са агрегатом од дробљене опеке и експандиране глине, композити ојачани влакнима – посебно синтетичким, и модификовани адитивима типа полимера. Такође ће се разматрати поједини удружени утицаји наведених компонената.

III.5.1 Разматрање цементних композита ојачаних влакнима

Бетони и малтери ојачани влакнима (*fiber-reinforced concrete – FRC*) представљају композитне материјале код којих је матрица ојачана равномерно и насумично распоређеним влакнима. Најчешће су то композити засновани на ситном агрегату (песку) фракције 0/4 mm, крупном агрегату до 16 mm и цементном везиву (Jevtić i Zakić, 2006).

Уочени недостак цементних композита представља крт лом, првенствено услед напрезања затезањем или ударним оптерећењем. Ради унапређења дуктилности (капацитета деформације) и чврстоћа (најпре при затезању), у грађевинској индустрији се јавило интересовање за примену влакана. Њихова основна улога је да премосте прслине које се јављају услед оптерећења матрице и тако обезбеде дуктилност након прве појаве прслина. При том она имају улогу у каналисању већих у већи број мањих прслина, односно у контроли распореда (растојања) и ширине прслина (Bentur & Mindess, 2007; Hannant, 1978; Mindess, 2008).

Влакна могу бити природна – на пример целулозна, памучна, јутана, или вештачка – челична, синтетичка, минерална и слично. Дужина влакана варира од 3 mm до 64 mm, а пречник од неколико μm до око 1 mm. Пресек може бити различитог облика – кружан, полигоналан, бубрежаст итд. Влакна се могу класификовати у две категорије: микровлакна са пречником мањим од 0,3 mm и макровлакна са пречником већим од 0,3 mm (Banthia, Bindiganavile, Jones & Novak, 2012). Са становишта оријентације, влакна унутар цементне матрице могу заузети усмерен положај (1D), могу бити позиционирана у равни (2D) или просторно (3D). Оријентација влакана у односу на правац оптерећења игра значајну улогу, јер њихов допринос долази до изражаја приликом премошћавања насталих прслина (Bentur & Mindess, 2007). Веза између влакана и матрице може бити физичка или хемијска, путем трења или механичког сидрења које је омогућено третманом и деформацијама површине влакана или целокупном сложеном геометријом (куке), што представља и најефикаснији механизам везе. Осим тога, насумично распоређена влакна унутар матрице могу бити

монофиламентна (индивидуализована) или фибрилизвана (vlakна груписана у виду мрежице). Посебним техникама се могу уградити и дуге континуалне нити или простирке од влакана (Bentur & Mindess, 2007). Примењена vlakна могу бити високог (*high-modulus fibres*) или ниског модула еластичности (*low-modulus fibres*), где оквирну граничну вредност представља модул еластичности саме цементне матрице (10-30 GPa) (Hannant, 1978).

Основни фактори који утичу на својства композитног материјала су физичка својства влакана, матрице и интензитет везе између њих (Hannant, 1978), односно, при комплексној анализи појединог композита првенствено треба размотрити састав матрице, облик и распоред влакана и структуру контактне зоне између vlakна и матрице (Bentur & Mindess, 2007). У зависности и од наведених параметара, vlakна се при лому цементног композита могу одвојити и извући из матрице или пући. Излачење влакана је повољнији механизам лома, јер се тако утроши много више енергије него при њиховом пуцању (Mindess, 2008).

Vлакна се у бетонима и малтерима примењују у запреминском учећшу од 0,1-5%, што је условљено начином справљања и наменом. Низак садржај влакана од 0,1-0,3% се употребљава ради контроле напона изазваних запреминским променама услед исушивања или промена температуре и влажности средине. Дозирањем влакана преко 0,3%, долази и до унапређења жилавости, односно способности матрице да поднесе напрезања и након појаве првих прслина (Banthia et al., 2012).

Приликом справљања микроармираних бетона и малтера потребно време мешања треба продужити у односу на уобичејени начин справљања, како би се избегла појава нагомилавања влакана (*balling* ефекат) и vlakна правилно распоредила унутар цементне матрице. Примена влакана у малим количинама – до 1% запремински, не утиче значајно на промену конзистенције, уградљивости и обрадљивости свеже мешавине (Jevtić i Zakić, 2006).

Промене вредности чврстоћа при притиску и модула еластичности микроармираних композита могу бити слабо изражене. Међутим, независно од типа влакана, она могу допринети и значајном унапређењу дуктилности. Армирање влакнима може значајније поспешити чврстоће при затезању, савијању и смицању, које су код цементних композита уобичајено ниске.

Присуство влакана унутар цементне матрице смањује апсорпцију воде, чиме се повећава отпорност композита на дејство мрза и пенетрацију соли за одмрзавање. Додатак микроарматуре доприноси и смањењу запреминских дилатација скупљања, нарочито у пластичној фази, чиме долази до смањења броја прслина и њихових димензија, односно затварања потенцијалних путева за продор воде и других штетних материја у унутрашњост композита. Монофиламентна влакна, са изузетно великим бројем у јединици запремине (више стотина милиона у 1 m³), својим равномерним насумичним распоредом унутар матрице и малим димензијама додатно пресецају систем отворених капиларних пора које су у вези са спољашњом средином и успоравају дифузију воде. На тај начин се код младих малтера и бетона спречава неконтролисано издвајање воде (*bleeding*) на површини композита. Заједно са водом се издвајају и најфиније честице цемента и агрегата, стварајући површински филм слабих механичких својстава који је изузетно осетљив при ниским температурама. Додатак влакана цементним композитима може унапредити отпорност на хабање, адхезију за подлогу, отпорност при динамичким утицајима, отпорност на дејство пожара, а смањењити реолошке деформације (скупљања и течења) и др (Јевтић и Закић, 2006).

Увођење синтетичких влакана у релативно малим количинама, око 0,1% запремински, првенствено даје допринос у области смањења штетних ефеката скупљања и контроле пропагација прслина код цементних композита типа малтера и бетона (Јевтић и Закић, 2006).

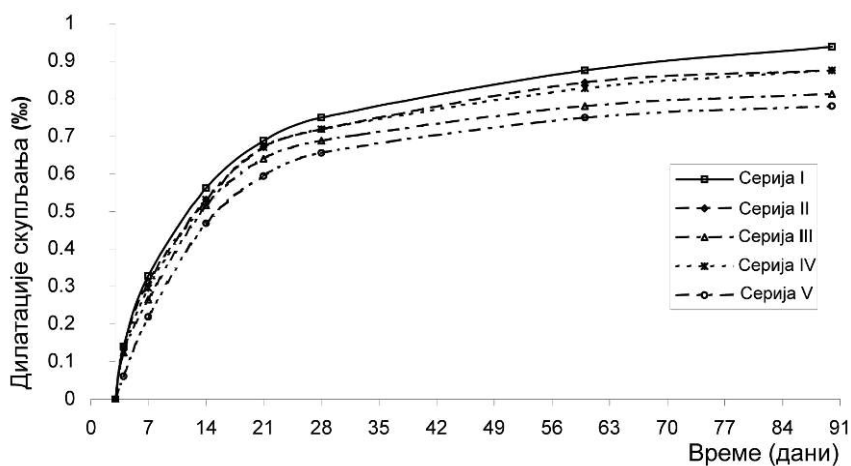
Истраживања су потврдила да је утицај увођења релативно мале количине полипропиленских микровлакна (0,1-0,5% у односу на укупну запремину) на запреминске масе композита у свежем и очврслом стању практично занемарљив (Закић, 2010).

Резултати експерименталних испитивања такође указују да се применом релативно мале количине (~0,1% од укупне запремине) монофиламентних полипропиленских влакана може у значајној мери утицати на механичка својства малтера. Након 90 дана, додатак полипропиленских влакана дужине 6 и 12 mm у количинама 0,6-0,9 kg/m³ је утицао на пораст чврстоће при притиску од око 8%, а

чврстоће при савијању од око 30% у односу на еталон без влакана (Jevtić i Zakić, 2002).

Такође је потврђено да се при употреби $0,9 \text{ kg/m}^3$ монофиламентних полипропиленских влакана остварује редуција упијања воде за око 5% (Zakić, 2001b). Влакна могу делотворно пресецати систем отворених капиларних пора. Њихов додатак такође може утицати на водонепропустљивост редукијом запреминских деформација скупљања, односно редукијом пропација прслина

Резултати испитивања малтера и бетона са додатком полимерних влакана су показала значајно смањење дилатација скупљања у најранијим и каснијим фазама очвршћавања (пластично и хидрауличко скупљање). Претходна експериментална испитивања у Лабораторији за материјале Института за материјале и конструкције Грађевинског факултета Универзитета у Београду су показала да примена полипропиленских влакана дужина 6 и 12 mm са учешћем од $0,6-0,9 \text{ kg/m}^3$ има утицаја на смањење скупљања малтера услед сушења за 6,72-16,74 % при старости од 90 дана (Слика 32) (Muravljov i dr., 2002).



Напомена: Серија I: еталонска серија без влакана

Серије II-V: серије са учешћем полипропиленских влакана $0,6-0,9 \text{ kg/m}^3$

Слика 32 Скупљање узорка малтера током времена

(Muravljov i dr., 2002)

Резултати испитивања адхезије аксијалним затезањем указују да додаток монофиламентних полипропиленских влакана (у количини $0,9 \text{ kg/m}^3$) унапређује напон приањања малтера за бетонску подлогу. При употреби влакана дужине 6 mm унапређење износи 11,8-14,7%, док при примени влакана дужине 12 mm износи 72,6-85,5%. Малтер је уграђиван на подлогу премазану цементним млеком или цементним млеком са додатком мање количине влакана. Остварене вредности напона приањања код микроармираних малтера су износиле 1,09-2,04 МПа (Zakić, 2001a). Испитивања прионљивости методом *pull-off* за подлогу од камена потврђују унапређење и до 100% употребом синтетичких микровлакна са учешћем од $0,9 \text{ kg/m}^3$ и одређеним учешћем хидратисаног креча у оквиру састава малтера. Остварене вредности уз примену влакана су износиле 0,312-0,753 МПа (Jevtić, 2013).

III.5.2 Разматрање лакоагрегатних цементних композита

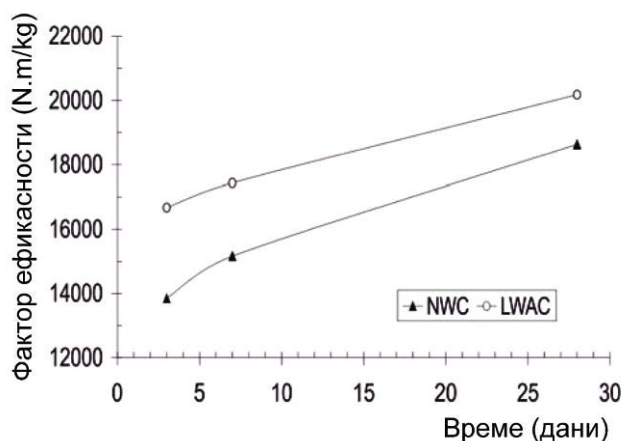
Стандард SRPS EN 206-1 (2011) дефинише бетон нормалне тежине (*normal-weight concrete*) запреминске масе у сувом стању $> 2000 \text{ kg/m}^3$ и $\leq 2600 \text{ kg/m}^3$. У оквиру овог стандарда лаки бетон (*light-weight concrete*) је описан као композит који се производи коришћењем лаког агрегата у целини или делимично у односу на укупну количину примењеног агрегата и који у сувом стању има запреминску масу $\geq 800 \text{ kg/m}^3$ и $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$. У оквиру истраживања ће се ови композити називати лакоагрегатни бетони, како би се направила јесна разлика од једнозрних-каверозних и ћелијастих композита који су такође ниских запреминских маса.

SRPS EN 206-1 (2011) даље дефинише агрегате нормалне тежине (*normal-weight aggregate*) као агрегате запреминске масе зрна у сувом стању $> 2000 \text{ kg/m}^3$ и $< 3000 \text{ kg/m}^3$, а лаке агрегате (*light-weight aggregate*) као агрегате минералног порекла запреминске масе зрна у сувом стању $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$ или запреминске масе у сувом растреситом стању $\leq 1200 \text{ kg/m}^3$.

Лакоагрегатни бетон се разликује од класичног бетона порозном природом (углавном захваљујући агрегату) и нижим вредностима чврстоћа. Својства ових бетона су уско повезана са својствима агрегата који их сачињавају. Лаки агрегати

могу бити природни или вештачки. Основни извор природних агрегата представљају вулканске стене, док се вештачки производе термичким процесима у фабричким погонима од сировина које имају способност експандирања. Ове материјали могу бити индустријски производи (стакло), индустријски нуспроизводи (летећи пепео) или природни попут глине (Chandra & Berntsson, 2002).

Највећа предност лакоагрегатних бетона се огледа у нижој запреминској маси, која може износити и 20-25% од вредности класичних бетона. Захваљујући овом својству, односно смањењу оптерећења на конструкцију, могу се остварити мање димензије и редуковати ојачање конструктивних елемената, што даље умањује трошкове изградње. Смањење масе доприноси и повољнијем понашању објекта при деловању сеизмичких сила. Захваљујући ниском коефицијенту топлотне проводљивости ови композити унапређују топлотну заштиту објекта и доприносе смањеној потрошњи енергије. Такође, показују унапређену отпорност на дејство пожара. Специфичност лакоагрегатних бетона је виша вредност односа између чврстоћа и запреминске масе, односно виши *фактор ефикасности* у том смислу (Слика 33) (Moravia et al., 2010).



Слика 33 Фактор ефикасности класичног (NWC) и лакоагрегатног бетона (LWAC) (Moravia et al., 2010)

У наредним поглављима ће се разматрати поједина својства лакоагрегатних цементних композита са агрегатом од експандиране глине и дробљене опеке која су од важности за даље истраживање.

III.5.2.1 Цементни композити са агрегатом од експандиране глине

Агрегат од експандиране глине се добија печењем глиновите сировине у ротационим пећима на високим температурама. Тако настају грануле приближно лоптастог облика са фином порозном унутрашњом структуром и храпавом или глатком компактном, тврдом кором у виду стакласте опне, од чије чврстоће зависи чврстоћа произведеног композита.

Својства цементних композита са агрегатом од експандиране глине у свежем и очврслом стању се у одређеној мери разликују од класичних бетона. За постизање исте конзистенције свеже мешавине, ови лакоагрегатни бетони захтевају додатну количину воде у односу на класичне бетоне, како би се надокнадио већи капацитет упијања воде лаког агрегата. Упијање воде крупних фракција агрегата износи 10-30%, а дробљеног песка и до 40% првобитне масе агрегата. У самој цементној пасти упијање воде се умањује за 30-50%. Приликом уграђивања крутих конзистенција ових бетона, може доћи до појаве раслојавања, односно избацивања крупних зрна агрегата на површину (Stojiljković i Denisenko, 1999).

Захваљујући повећаном упијању воде, агрегат од експандиране глине има утицаја на формирање структуре цементне матрице. Зрна порозног агрегата увлаче воду из цементне пасте попут *микро пумпи*, кратко је задржавају, а затим враћају цементној пасти током очвршћавања и сушења. Током овог процеса – *самовакумирања*, се у раним фазама ствара чвршћи и компактнији слој цементне матрице око зрна агрегата. У каснијој фази хидратације, по смањењу количине воде у цементној матрици, зрно агрегата ослобађа воду стварајући погодне услове за продужену хидратацију - унутрашњу негу, што доприноси и смањењу скупљања матрице. Захваљујући повећаном упијању воде, испод зрна агрегата не долази до стварања цепова испуњених водом који смањују запреминску масу,

утичу на пад механичких својстава, као и на постојаност очврслог класичног бетона. Стварање капилара такође изостаје (Stojiljković i Denisenko, 1999).

Запреминска маса бетона са агрегатом од експандиране глине је нижа него код класичних бетона, захваљујући запреминској маси зрна која се креће у распону од 500-1500 kg/m³ (Stojiljković i Denisenko, 1999). У зависности од поменутог својства у очврслном стању, ови бетони се могу класификовати као термоизолациони (500-900 kg/m³), конструкцијско-термоизолациони (900-1400 kg/m³) и конструкцијски (1400-1800 kg/m³) (Muravljov i Jevtić, 2003).

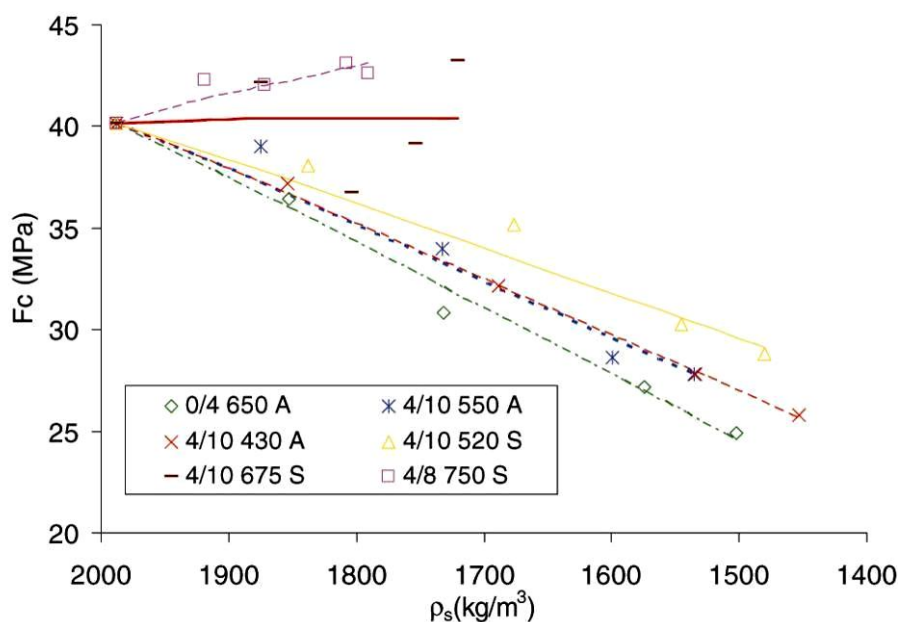
Чврстоћа при притиску бетона са агрегатом од експандиране глине је нижа од чврстоће класичног бетона, првенствено захваљујући нижој запреминској маси (Chandra & Berntsson, 2002). Код класичног бетона, чврстоћа композита је мања од чврстоће каменог агрегата, па до лома најчешће долази преко цементне матрице, ређе по контакту између зрна и цементне матрице, а веома ретко преко зрна. Код бетона са агрегатом од експандиране глине, до лома долази преко агрегата и цементне матрице, а ретко по контакту. Може се рећи да чврстоћа квалитетнијег каменог агрегата не утиче у великој мери на чврстоћу при притиску класичног бетона, док чврстоћа агрегата од експандиране глине непосредно утиче и то у већој мери што је заступљеност лаког агрегата већа, а запреминска маса агрегата мања. Такође, чврстоћа при притиску бетона од експандиране глине, као и код класичног бетона, зависи од водоцементног фактора (Stojiljković i Denisenko, 1999).

Резултати испитивања указују да однос употребљеног каменог и лаког агрегата типа експандиране глине, при мањим количинама употребљеног цемента (126 kg/m³), не утиче у великој мери на већ ниске вредности чврстоћа при притиску. Применом веће количине цемента (155-214 kg/m³), повећање запреминског учешћа лаког агрегата ситне и крупне фракције - почевши од 50% па до 90%, доводи до пада чврстоћа при притиску до 54%. Такође је примећено да прираштај чврстоћа којих лакоагрегатног и класичног бетона прати сличан тренд (Bastos et al., 2005).

Резултати истраживања такође указују да потпуна замена крупне фракције каменог агрегата експандираном глином узрокује пад чврстоћа при притиску од

22-28% при учешћу цемента од $373-655 \text{ kg/m}^3$. Прираштај чврстоћа у односу на трећи дан је након 7 и 28 дана код класичног бетона је забележио више вредности - 10% и 38%, у односу на 6% и 23% код лакоагрегатног бетона (Moravia et al., 2010).

Наредно истраживање потврђује да при употреби агрегата од експандиране глине, најситније фракције природног песка (0/2 mm) и цемента у количинама од $415-754 \text{ kg/m}^3$, варирање учешћа лаког агрегата у опсегу од 12,5-45% укупне запремине композита ($153-550 \text{ kg/m}^3$) смањује вредности чврстоћа при притиску до око 35% (Слика 34) (Ke et al., 2009).



Слика 34 Зависност чврстоће при притиску од учешћа различитих врста лаког агрегата од експандиране глине (А) и експандираног глинца - глиненог шкриљца (S) (Ke et al., 2009)

Чврстоће при савијању бетона са агрегатом од експандиране глине су такође ниже у поређењу са класичним бетонима. Истраживања показују да чврстоћа при савијању расте са учешћем цемента до 67% и са смањењем учешћа лаког агрегата типа експандиране глине са 90% на 50% запремински - до 49%. Такође, је

примећен однос између чврстоће при савијању и притиску од 0,27 (Bastos et al., 2005).

Упијање воде бетона са агрегатом од експандиране глине је веће у односу на класичне бетоне ради високе порозности лаког агрегата. Резултати истраживања упијања воде потапањем и капиларног упијања показују пораст за око 50% и 40% респективно, са порастом учешћа агрегата од експандиране глине од 55% до 90% запремински (Bastos et al., 2005).

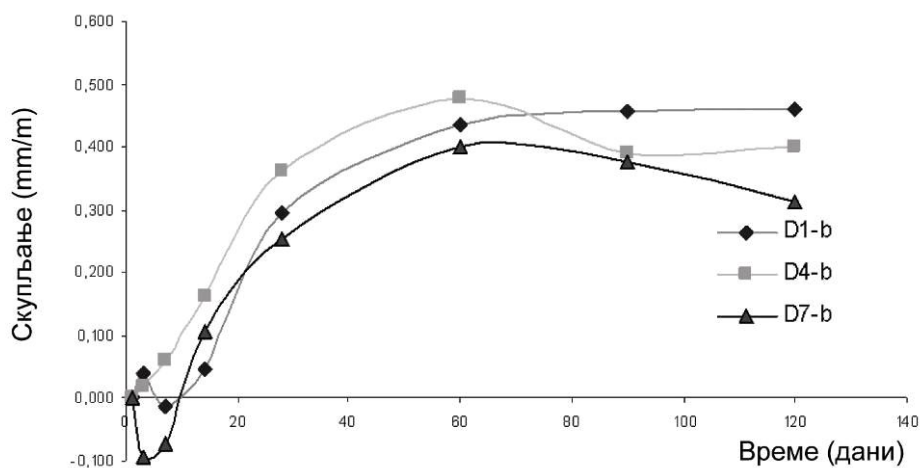
Модул еластичности малтера и бетона са агрегатом од експандиране глине је знатно мањи од модула еластичности класичних композита при истим чврстоћама при притиску, захваљујући мањем модулу еластичности агрегата у односу на камени агрегат. Динамички модул еластичности бетона са агрегатом од експандиране глине се креће у широком опсегу од 5-24 GPa (Stojiljković i Denisenko, 1999). Модул еластичности генерално расте са повећањем чврстоћа и запреминском масом (Bastos et al., 2005), односно опада са учешћем лаког агрегата (Ke et al., 2009).

Резултати испитивања потврђују да статички модул еластичности бетона са крупном фракцијом агрегата од експандиране глине варира у распону од 15 GPa - 17 GPa и износи у просеку трећину вредности у односу на класичан бетон. Ово указује на већи капацитет лакоагрегатног бетона да апсорбује мале деформације попут оних узрокованих скупљањем, што може смањити унутрашње напоне, односно стварање микропрлина и унапредити трајност у поређењу са класичним бетоном (Moravia et al., 2010).

Скупљање цементних композита представља смањење њихове запремине услед различитих утицаја, од којих су најважнији одвијање процеса хидратације и промене влажности цементног тела у току процеса очвршћавања. У самом бетону, скупљање се смањује захваљујући армирајућем ефекту агрегата и то у већој мери што су зрна агрегата на мањој међусобној удаљености. Током скупљања, у цементној матрици се јављају напони затезања, који узрокују појаву микропрлина, док се у агрегату јављају напони притиска. Пошто агрегат од експандиране глине има нижи модул еластичности, односно већу деформабилност

од класичног каменог агрегата, он пружа слабији отпор скупљању цементне матрице, што узрокује повећано скупљање (Stojiljković i Denisenko, 1999).

Резултати испитивања указују да је прираштај скупљања лакоагрегатног бетона са крупном фракцијом експандиране глине нижи од класичног бетона у раном добу, али виши у каснијој фази. Након 30 дана скупљање лакоагрегатног бетона са учешћем од 0,25-0,425 m³/m³ износи 50-80% вредности класичног бетона, а након једне године 132-166%. Ова појава се објашњава унутрашњом негом бетона, односно продуженом хидратацијом, током ране фазе очвршћавања. Након 7-30 дана, када унутрашња нега губи на значају, почиње нагли раст стопе скупљања лакоагрегатног бетона у односу на класичан. Парцијална замена природног лаким песком је узроковала пораст скупљања у свим добима, које је након годину дана износило дуплу вредност у поређењу са класичним бетоном (Bogas et al., 2014). И друга истраживања потврђују да се скупљање повећава са процентом учешћа агрегата од експандиране глине (Слика 35) (Bastos et al., 2005).



Напомена: D1-b: са запреминским учешћем лаког агрегата од 90%,
D4-b: са запреминским учешћем лаког агрегата од 65%,
D7-b: са запреминским учешћем лаког агрегата од 50%

Слика 35 Скупљање лакоагрегатног бетона са агрегатом од експандиране глине током времена (Bastos et al., 2005)

Генерално посматрано, лакоагрегатни цементни композити, осим наведених својстава, имају побољшану отпорност на удар. Нижи модул еластичности и већа деформабилност агрегата пружа унапређен отпор на удар у односу на класичне композите тог типа. Такође, лакоагрегатни цементни композити, поготово са ситним природним агрегатом, потенцијално имају већу отпорност на мраз у односу на класичне композите исте чврстоће. Конструктивни лакоагрегатни бетони су показали већу отпорност на дејство пожара ради стабилности лаког агрегата (Newman, 1993).

Ш.5.2.2 Цементни композити са агрегатом од дробљене опеке

Грађевинска индустрија је после прехранбене индустрије највећи потрошач природних сировина. Један од циљева одрживости је драстично смањење експлоатације сировина, посебно необновљивих ресурса попут каменог агрегата (Berge, 2009). Грађевинска индустрија је истовремено велики произвођач отпада који настаје у фази изградње и рушења објеката. Овај материјал (шут) се најчешће одлаже на дивљим депонијама или употребљава за насипање терена. У циљу очувања необновљивих ресурса природних агрегата, негативног утицаја њихове експлоатације на животну средину и смањења отпада (депонијског простора), потребно је пронаћи начин за поновну употребу одбаченог материјала. Цементни композити типа бетона, са учешћем агрегата од 60-80% у укупној запремини, се често виде као прикладно место за смањење учешћа природних и уградњу рециклираних агрегата. Свако смањење потрошње природних ресурса има значајну улогу у очувању животне средине (Cachim, 2009).

Отпадни материјали попут опеке и црепа, одговарајуће одабрани и очишћени, се могу поново употребити или рециклирати, односно самлети и просејати, чиме се добијају сировине за производњу нових елемената (Corinaldesi, Giuggiolini & Moriconi, 2002). Остали извори дробљене грађевинске керамике су: керамички лом, односно шкарт из фабрика за производњу грађевинске керамике, и природно печена глина, која је често присутна на местима експлоатације угља (Muravljov i

Jevtić, 2003). Делимичном или потпуном супституцијом природног агрегата дробљеном опеком, мењају се својства класичних бетона и малтера.

При справљању бетонских и малтерских мешавина, агрегат од дробљене опеке се може претходно наквасити или у процес мешања увести сув. За постизање исте конзистенције неопходно је додати већу количину воде него код класичних смеша, услед високог процента упијања воде овог агрегата. За постизање исте конзистенције као код класичних цементних композита, при употреби рециклираног агрегата и природног песка, количину воде је потребно повећати за око 5%. Ако се користи рециклиран и ситан и крупан агрегат разлика у потребној води је око 15% (Hansen, 1992). Пошто је тешко контролисати водоцементни однос при употреби ситног рециклираног агрегата, а веће дозирање воде утиче на смањење чврстоћа и трајности бетона, коришћење ситног рециклираног агрегата се не препоручује (Janković, 2001).

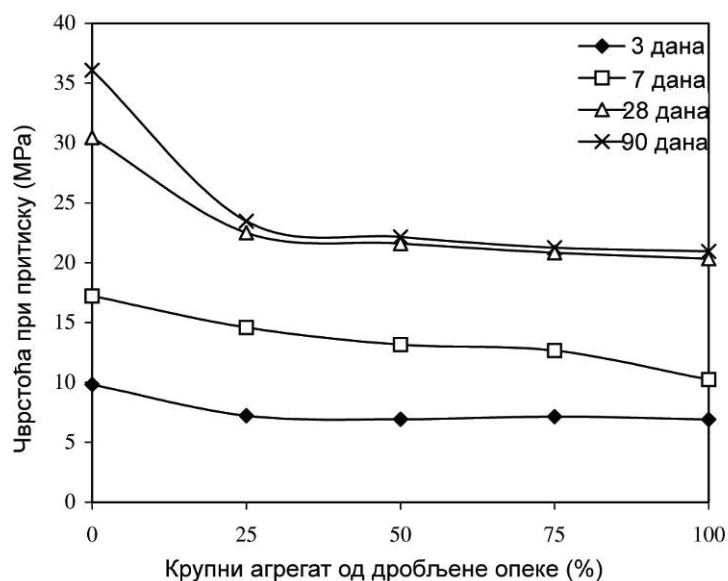
Запреминска маса цементних композита са агрегатом од дробљене опеке је нижа од оних са природним агрегатом и износи од 1780 kg/m^3 до 2100 kg/m^3 , у зависности од запреминске масе и учешћа рециклираног лома (Pakvor i dr., 1999; Debieb & Kenai 2008).

У општем случају, примећено је да чврстоћа при притиску бетона с дробљеном опеком опада са увећањем процента учешћа овог лаког агрегата. Уочено је да учешће дробљене опеке до 20% од укупне масе агрегата у виду речног песка (фракције до 4,75 mm) нема утицаја на пад чврстоћа при притиску (Bektas et al., 2009). Исто се односи и на 15% запреминске замене крупног природног агрегата у бетонима, док се са 30% супституције уочава умањење вредности до 20%, у зависности од квалитета опеке (Sachim, 2009). Експериментална истраживања су такође утврдила пад вредности чврстоће при притиску код бетона (фракције до 15 mm) након 28 дана од 35%, 30% и 40%, при потпуној замени крупног, ситног, односно крупног и ситног природног агрегата дробљеном опеком, респективно (Слика 36) (Debieb & Kenai, 2008).

Захваљујући пуцоланском дејству најситнијих честица добљене опеке, код ових композита може доћи до значајног прираштаја чврстоћа при притиску и након

контролних 28 дана. Након 90 дана прираштај у односу на контролне вредности може износити 30% до 40% (Hansen, 1992).

Такође је уочена пропорционалност између вредности чврстоћа при притиску и савијању. Експериментална истраживања су показала пад вредности чврстоћа при савијању при потпуној замени природног агрегата - крупног, ситног, односно крупног и ситног, од 33%, 36% и 46%, респективно (Debieb & Kenai, 2008).



Слика 36 Промена чврстоће при притиску у односу на проценат замене крупног агрегата од дробљене опеке (Debieb & Kenai, 2008)

Апсорпција воде знатно расте са порастом учешћа дробљене опеке у укупној запремини бетонске мешавине (Roop & Chan, 2006). У зависности од температуре печења, односно компактности опеке од које потиче, упијање воде овог агрегата се креће од 15% до 30% (Pakvor i dr., 1999; Jevtić i dr., 2006). Овај агрегат се потпуно засити већ након тридесетоминутног боравка у води, док се за период од 24 h апсорпција увећа за само 2% (Hansen, 1992). Тако је експериментално утврђено да супституција 100% природног агрегата у бетонима (крупноћа <16 mm) одређује упијање од ~20%, док код бетона са учешћем дробљене опеке од 25% у укупној маси агрегата упијање износи само ~9% масе сувог узорка (Janković i dr., 2010).

Утврђена је и веза између запреминске масе (учешћа агрегата од дробљене опеке), упијања воде и отпорности на мраз. Показало се да повећање учешћа агрегата од дробљене опеке од 25-100% у укупној маси агрегата негативно утиче на отпорност на мраз, како присуство воде може изазвати оштећења при циклусима замрзавања и одмрзавања (Јанковић и др., 2010). Након 25 циклуса смрзавања на ваздуху и одмрзавања у води, показало се да бетон са агрегатом од дробљене опеке упија два пута више воде него класичан бетон (Hansen, 1992).

Бетони са агрегатом од дробљене опеке високе запреминске масе и чврстоће при притиску 32 МПа, имају модул еластичности од око 15 GPa, што је у поређењу са класичним бетонима (30-35 GPa) исте чврстоће при притиску и састава знатно ниже. Разлог за нижи модул еластичности ових бетона произилази из веће деформабилности агрегата (Pakvor i dr., 1999).

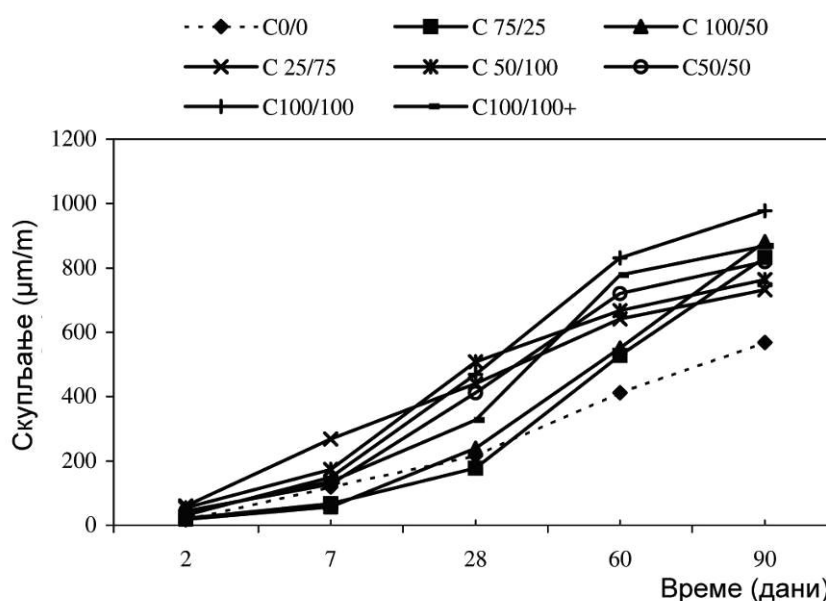
На основу података из литературе (Hansen, 1992) код бетона са дробљеном опеком модул еластичности достиже вредности између половине и две трећине модула еластичности обичног бетона исте чврстоће.

Истраживања показују да модул еластичности прати пад чврстоће при притиску са процентом замене природног агрегата. Смањење од 30%, 40% и 50% модула еластичности је примећено заменом крупног, ситног и обе фракције агрегата, респективно, у односу на бетоне са природним агрегатом (Debieb & Kenai, 2008).

Бетон на бази дробљене опеке остварује веће скупљање од класичног бетона, што се може објаснити мањим модулом еластичности агрегата и смањењем отпорности на деформације скупљања цементне пасте. Коначна вредност скупљања бетона са рециклираним агрегатом од опеке је 20-60% већа него код класичног бетона (Слика 37) (Hansen, 1992).

Током првих месеци скупљање знатно касни, што се објашњава задржавањем воде у самом агрегату као код композита са експандираном глином (Pakvor i dr., 1999). Истраживања показују да потпуна замена природног крупног агрегата дробљеном опеком доводи до одлагања интензивног скупљања током 28 дана, да би коначне вредности скупљања биле више. Применом ситног и крупног агрегата од дробљене опеке, код младог бетона скупљање прати деформације класичног композита, док при већој старости показује више вредности.

Мањи коефицијент топлотне проводљивости, температурног ширења и мањи модул еластичности утичу на унапређење отпорности на пожар цементних композита са агрегатом од дробљене опеке. Захваљујући производном процесу уз присуство високих температура, агрегат је под дејством пожара стабилан уколико је сув. Код наквашеног композита, унутрашњи притисак паре може изазвати оштећења (Hansen, 1992).



Напомена: C - масена замена крупног (%) / ситног (%) рециклираног агрегата

Слика 37 Скупљање лакоагрегатног бетона током времена са агрегатом од дробљене опеке (Debieb & Kenai, 2008)

III.5.3 Разматрање лакоагрегатних микроармираних цементних композита

Лакоагрегатни бетони и малтери, у поређењу са класичним композитима исте чврстоће при притиску, имају ниже вредности механичких својстава и повећану кртост. Ради унапређења својстава вршена су истраживања комбинација различитих лаких агрегата и влакана. Примећена су унапређења дуктилности, као и чврстоћа при притиску, савијању и затезању, нарочито употребом челичних влакана (Hassanpour, Shafigh & Mahmud, 2012).

Малобројна експериментална истраживања малтера заснованих на агрегату од дробљене опеке армираних полипропиленским влаканима са умереним учешћем микроарматуре (~0,1% од укупне запремине) показују незнатне промене вредности чврстоћа при притиску у односу на композите без влакана. При већем дозирању влакана од 0,5% и 1%, ова вредност опада и за 25%. Чврстоћа при савијању расте са умереним учешћем влакана од 0,1% за 5%, а од 1% учешћа чак и за 50% (Corinaldesi et al., 2002; Radoičić, 1997; Vytlačilová, 2011). С друге стране, испитивања потврђују пораст вредности чврстоћа при притиску малтера (крупноћа 0/8 mm) од 5-16% и чврстоће при савијању од 4-25% у односу на узорке без полипропиленске микроарматуре, а у зависности од учешћа ситне фракције (0/4 mm) речног агрегата. Истраживања указују да додатак полипропиленских микровлакана унутар малтера са агрегатом од рециклиране опеке у количинама од 1% могу смањити деформације скупљања и до 17% (Jevtić i dr., 2002; Jevtić i Zakić, 2006). Такође је примећено да додатак полипропиленских микровлакана малтерима на бази дробљене опеке практично не утиче на својство упијања воде постепеним потапањем (Narak, 2001).

Уочено је да додатак полипропиленских влакана дужине 15 mm у запреминском проценту од 1% у смешу са агрегатом од експандиране глине (крупноће 5-25 mm), одређеном количином силикатне прашине и суперпластификатора незнатно утиче на пад чврстоћа при притиску и затезању (око 1,0 % и 2,0 % респективно). Смањење скупљања износи око 20% (Chen & Liu, 2005).

III.5.4 Разматрање полимерима модификованих цементних композита

Бетони и малтери модификовани полимерима се добијају додавањем мономера или полимера у дисперзном, прашкастом или течном облику свежој мешавини. Полимером модификовани бетон представља материјал сачињен од две матрице које се међусобно прожимају: органске – која је производ полимеризације, и неорганске – која настаје хидратацијом цемента (Radonjanin i dr., 1999; Janković, 2000). Хидратација цемента и стварање полимерне фазе се одвијају неометано и паралелно. Присуство ове две матрице унапређује чврстоће при затезању и

притиску, адхезију за подлогу, водоотпорност и отпорности на абразију, као и хемијску отпорност у поређењу са класичним малтерима и бетонима. Степен унапређења зависи од типа полимера полимерцементног односа, водоцементног односа, садржаја увученог ваздуха и режима неге (Rixom & Mailvaganam, 1999).

Полимерима модификовани цементни композити се справљају додавањем полимерне дисперзије припремљеној води или хомогенизованој мешавини на крају процеса мешања. Увођење полимера производи ефекат суперпластификатора. Увећањем полимерцементног односа, услед присуства полимерних честица, пратећег увлачења ваздуха и дисперзивног деловања површински активних емулгатора који обезбеђују ефекат *кугличних лежајева*, потребна количина воде за справљање жељене конзистенције се може смањити и за 30%. Из тог разлога додаток полимера повољно утиче на уградљивост и обрадљивост смеша. Смањује се издвајање воде и унапређује стабилност, кохезивност и хомогеност смеше. Модификовани бетони и малтери бележе већи проценат увученог ваздуха, који може умањити чврстоће при притиску, али и поспешити отпорност на дејство мраза.

Оптимална својства модификованих цементних композита се добијају при комбинованом режиму неге. У почетном периоду се препоручује нега у влажној средини која погодује стварању цементне матрице, а затим нега на ваздуху што погодује стварању полимерне матрице. Предложени режим неге се састоји од 7 дана у влажној, а затим у сувој средини (Janковић, 2001).

Чврстоћа при притиску модификованих цементних композита се са повећањем полимерцементног односа незнатно повећава у односу на класичне бетоне након контролних 28 дана. Међутим, захваљујући продуженој хидратацији у току периода суве неге, ради високе способности задржавања воде захваљујући стварању непропусних полимерних мембрана, примећује се интензиван прираштај чврстоћа у периоду до 6 месеци након уграђивања.

Чврстоћа при затезању и савијању модификованих бетона је генерално већа у односу на класичне бетоне и малтере и расте са повећањем полимерцементног односа. Чврстоћа при затезању се може повећати и до 50%, и такође је одликује значајнији прираштај до старости од 6 месеци.

Са повећањем полимерцементног фактора модификовани композити током испитивања бележе мање упијање воде, водопропустљивост и паропропустљивост, што се може објаснити чињеницом да су поре (0.01-0.1 μm) запуњене полимером или прекривене површинским полимерним мембранама.

Скупљање при сушењу се са повећањем полимерцементног односа може смањити, захваљујући задржавању воде у материјалу. Такође, полимерне мембране прекривају микропрслине које се стварају услед скупљања цемента и спречавају њихово даље ширење. Модификовани композити су отпорнији при дејству мрза захваљујући мањој порозности, односно нижем водоцементном фактору и већем проценту увученог ваздуха.

Захваљујући значајној разлици у модулу еластичности латекса и цементне матрице (0.001–10 GPa и 10–30 GPa, респективно) модификовани цементни малтери и бетони имају унапређену деформабилност и модул еластичности у поређењу са класичним. (Rixom & Mailvaganam, 1999). Модификовани композити такође бележе веће напоне приањања (нарочито у сувој средини) (Radonjanin i dr., 1999).

Унапређење својстава композита типа малтера и бетона додавањем и полимера и влакана обично превазилази очекивано кумулативно побољшање увођењем поједине компоненте, производећи синергетски ефекат. Увођење полимера код композита армираних влакнима доводи до значајног унапређења чврстоћа и жилавости ради унапређења везе између влакана и матрице. Додатак полимера унапређује уградљивост свеже мешавине и тако може допринети равномернијем распоређивању влакана, као и увођењу влакана у већем броју (Bentur & Mindess, 2007).

Истраживањем утицаја додатка полимера бетонима са агрегатом од дробљене опеке уочено је повећање количине увученог ваздуха и мање запреминске масе. Са повећањем полимерцементног односа смањен је модул еластичности бетона. Полимерна матрица је утицала на повећање отпорности модификованих бетона на дејство воде и мрза. Смањено је скупљање након 6 месеци до 35%. По питању претпостављеног пораста чврстоће при притиску и савијању добијени резултати нису показали доследан тренд (Janković, 2000, 2001).

Комбинована употреба полимерних латекса са адитивима типа суперпластификатора и силикатне прашине пружа знатна унапређења у односу на класичне малтере. Применом акрилног латекса и суперпластификатора је уочена продужена уграљивост и супериорна прионљивост модификованих малтера (Rixom & Mailvaganam, 1999).

IV ТЕХНИЧКО-ТЕХНОЛОШКО РЕШЕЊЕ КОМПОЗИТНОГ ФАСАДНОГ ПАНЕЛА СА ЛИЦЕМ ОД КАМЕНА

На основу анализа материјала, фасадних облога и система представљених у претходним поглављима, могу се предложити модели техничко-технолошких решења композитних фасадних панела са лицем од камена који се могу применити у оквиру ветреног фасадног склопа. У овом поглављу ће бити представљен поступак пројектовања фасадних елемената, реализације пилот елемената уз лабораторијско испитивање својстава материјала и склопа панела, као и технологија облагања предложеним фасадним елементима. Приказаће се и потенцијалне обликовне могућности решења фасадне облоге и изнети коментар поводом аспекта одрживости и економичности примене остварених панела.

IV.1 ПРОЈЕКТОВАЊЕ КОМПОЗИТНОГ ФАСАДНОГ ПАНЕЛА

Први корак ка успешном остварењу одређеног производа представља поступак детаљног пројектовања. У оквиру овог истраживања, пројектовање композитног фасадног панела подразумева избор компонентних материјала и дефинисање пројектног задатка.

IV.1.1 Избор компонентних материјала

У сврху успостављања модела фасадног елемента, неопходно је извршити избор одговарајућих материјала његове облоге и подлоге. На основу претходних анализа потенцијалних компонентних материјала, усвојено је следеће:

– за одабир материјала облоге:

- камен доступан на територији Србије са одговарајућим техничким својствима, који је добијен организованом експлоатацијом лежишта;

- у случају овог истраживања одабран је један представник кречњака и један представник гранита;
- за одабир материјала подлоге:
- портланд цемент, као комерцијално најраспрострањеније (хидраулично) везиво на коме се заснивају савремени цементни композити типа бетона и малтера;
 - цементни композит у виду малтера – са највећим пожељним номиналним зрном агрегата $D = 4 \text{ mm}$, пошто се ради о танком елементу (у оквиру овог истраживања дебљина подлоге је 25 mm):
 - класичан агрегат од речног песка *Моравца* као доступан агрегат;
 - агрегат на бази глине: рециклирана дробљена опека ради подстицаја очувања животне средине и експандирана глина ради смањења оптерећења на конструкцију;
 - адитиви (суперпластификатор и полимерни латекс) и синтетичка влакна ради унапређења физичко-механичких и реолошких својстава композита и својстава у погледу трајности.

Битно је нагласити да су сви усвојени компонентни материјали међусобно компатибилни.

IV.1.2 Дефинисање пројектног задатка

Након усвојених компонентних материјала може се приступити дефинисању пројектног задатка у циљу формирања модела фасадне облоге. Пројектни задатак обухвата следеће захтеве:

- у сврху извођења пилот елемента усвајају се модуларне димензије панела, висина и дужина, 60 x 60 cm (0,36 m²)⁵³;
- усвојен је систем ношења фасадних панела Табаљ;
- дебљина подлоге панела од цементног композита која се прилагођава систему ношења: континуални жљеб 3 mm ширине (и 11 mm дубине) и зуб са сваке стране оптималне ширине од 11 mm, даје подлогу дебљине од 25 mm;
- лице од камена у виду мозаика, односно камен у виду камених плочица димензија 10 x 10 x 1 cm, ради ефикаснијег искоришћења комерцијалног блока, испитивања могућности употребе шкарта насталог током обраде камена и употребе камена који се у улози фасадне облоге не може у већим димензијама носити преко потконструкције;
- површинска обрада камена према препоруци за одређену врсту камена (у случају овог истраживања – гранит је полиран, а кречњак брушен);
- предлаже се спајање камене облоге и композитне подлоге без додатних адхезива – приањањем свежег цементног малтера директно на полеђину камених плочица, с обзиром да су примери спајања разним адхезивима (најчешће епокси смолама) већ широко распрострањени на тржишту.

Након постављања захтева пројектних услова, може се приступити поступном остварењу фасадних пилот елемената путем серија систематски осмишљених лабораторијских испитивања.

⁵³ Димензионална координација служи да координише процесе и оне који су укључени у процесе градње, као предуслов савремене индустријализације у грађевинарству. Циљеви модуларне координације су: геометријска и димензионална координација објекта, могућност замене производа, редукација разноврсности производа, префабрикација са контролисаним изградњом на градилишту. Значај модуларне координације долази до изражаја при усаглашавању различитих произвођача, учесника у пројектовању и изградњи објеката.

Основни модул (M) димензионалне координације који је усвојен у Европи износи 100 mm. Како би се ограничила разноликост могућих димензија компонената и обезбедиле оптималне модуларне димензије, дефинисани су *мултимодули* који се добијају умножавањем основног модула M целим бројем ($M = n \times M$). DIN 18000 *Modular coordination in building* (1984) предлаже мултимодуле 3M, 6M, 12M који су настали из основног модула (citirano u Herzog et al., 2004). Даље мултиплицирање мултимодула - пројектантског модула, резултује *модулом објекта* који одређује композицију и координацију конструкције (Herzog et al., 2004; Krstić, 1995; Staib et al., 2008).

IV.2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО ИСТРАЖИВАЊА

Наредна експериментална истраживања су вођена првенствено стандардизованим процедурама које се примењују при лабораторијским испитивањима материјала типа цементних композита и разноврсних комерцијалних фасадних облога типа камених плоча за облагање спољних вертикалних површина и танких фиберцементних плоча. Примењене процедуре су детаљно описане у домаћим (SRPS), европским (EN) и америчким (ASTM) стандардима. У недостатку одговарајућих стандардизованих поступака, процедуре се могу прилагодити истраживању (модификовати) или се може поступити по нестандартним лабораторијским методама. Методолошки поступак остварења модела фасадних панела се огледа у дефинисаном програму експерименталних истраживања.

IV.2.1 Програм експерименталних истраживања

Програм експерименталних истраживања је формиран на основу захтева фасадних облога у погледу физичко-механичких, технолошких и реолошких карактеристика, као и трајности. Планирано је испитивање микроармираног цементног малтера као засебног материјала у улози подлоге фасадног панела, као и склопа панела у саставу подлоге од малтера и облоге од камена. Испитивања примењеног камена, као засебног материјала, није предвиђено у оквиру овог истраживања, већ су усвојена постојећа актуелна испитивања стенског материјала.

У сврху избора подлоге фасадног панела предложено је седам малтерских смеша:

- еталон Е – стандардна малтерска мешавина са агрегатом од речног песка;
- микроармирани малтер Е₁ – са агрегатом од речног песка и препорученом количином кратких полипропиленских влакана (~0,1% укупне запремине), суперпластификатора и полимерног латекса;

- микроармирани малтер E_2 – са агрегатом од речног песка и препорученом количином кратких поливинил-алкохолних влакана ($\sim 0,1\%$ укупне запремине), суперпластификатора и полимерног латекса;
- лакоагрегатни микроармирани малтер M_1 – са агрегатом од речног песка и дробљене опеке, као и препорученом количином кратких полипропиленских влакана ($\sim 0,1\%$ укупне запремине), суперпластификатора и полимерног латекса;
- лакоагрегатни микроармирани малтер M_2 – са агрегатом од речног песка и дробљене опеке, као и препорученом количином кратких поливинил-алкохолних влакана ($\sim 0,1\%$ укупне запремине), суперпластификатора и полимерног латекса;
- лакоагрегатни микроармирани малтер M_3 – са агрегатом од експандиране глине и препорученом количином кратких полипропиленских влакана ($\sim 0,1\%$ укупне запремине), суперпластификатора и полимерног латекса;
- лакоагрегатни микроармирани малтер M_4 – са агрегатом од експандиране глине и препорученом количином кратких поливинил-алкохолних влакана ($\sim 0,1\%$ укупне запремине), суперпластификатора и полимерног латекса.

Описане смеше E , E_1 и E_2 су предложене за еталонске мешавине, док су код меша M_1 - M_4 , својства измењена учешћем лаких агрегата. Еталонска мешавина E је пројектована као класична малтерска мешавина у масеној размери цемента, агрегата у виду речног песка фракције $0/4$ mm и воде $m_c : m_a : m_v = 1 : 3 : 0,5$ (SRPS EN 196-1, 2008). Еталонске мешавине E_1 и E_2 су унапређене препорученом количином синтетичких влакана, суперпластификатора и полимерног латекса. У односу на претходну рецептуру, при справљању мешавина M_1 и M_2 , уместо речног песка фракције $2/4$ mm, употребљен је лаки агрегат у виду дробљене опеке. Мешавине M_3 и M_4 су справљене од лаког агрегата у две фракције - експандиране глине фракције $1/4$ mm и лаког песка фракције $0/2$ mm. У њихов састав је осим синтетичких влакана додата и препоручена количина поменутих адитива. Како је напоменуто, количина употребљених синтетичких влакана ($\sim 0,1\%$ укупне запремине) је усвојена по препоруци произвођача. У овом проценту примењена синтетичка влакна имају улогу при смањењу штетних

утицаја скупљања (пластичног и хидрауличног) и контроли пропагација прелина цементних композита (Zakić, 2010).

Предложеним програмом експерименталних истраживања претпоставља се да је могуће уочити промене својстава малтера у свежем и очврслом стању увођењем препоручене количине микроарматуре, суперпластификатора и полимерног латекса, упоредном анализом серија E_1 и E_2 са еталонском серијом E . Такође, претпоставља се да је могуће пратити промене карактеристика модификованих композита делимичном или потпуном заменом природног са предложеним лаким агрегатом, упоредном анализом серија M_1 и M_3 са еталонском серијом E_1 (серије са полипропиленским влакнима) и серија M_2 и M_4 са еталонском серијом E_2 (серије са поливинил-алкохолним влакнима). Претпоставља се и могуће уочавање промене својстава увођењем различитих синтетичких влакана, упоредном анализом поменутих парова серија са различитим влакнима, а истим агрегатом (парови E_1 и E_2 , M_1 и M_2 , M_3 и M_4).

У оквиру експерименталних истраживања планирана су основна лабораторијска испитивања свежег малтера:

- испитивање конзистенције свежег малтера помоћу потресног стола (SRPS EN 1015-3, 2008);
- испитивање запреминске масе у свежем уграђеном стању (SRPS EN 1015-6, 2008).

Такође је предвиђено визелно-микроскопским прегледом контролисати карактеристике малтера у свежем стању, које се односе на његову технологичност - уградљивост, обрадљивост и хомогеност мешавине.

У оквиру експерименталних истраживања планирана су следећа лабораторијска испитивања очврслог малтера:

- запреминска маса;
- чврстоћа при савијању након 7 и 28 дана (SRPS EN 1015-11, 2008);
- чврстоћа при притиску након 7 и 28 дана (SRPS EN 1015-11, 2008);
- упијање воде (SRPS B.B8.010, 1980);

- отпорност на дејство мраза (SRPS U.M8.002, 1997);
- брзина ултразвука (SRPS.U.M1.042, 1998);
- динамички модул еластичности (SRPS.U.M1.026, 1992);
- скупљање услед сушења након 4, 7,14, 21, 28, 90, 180, 270 и 360 дана (SRPS B.C8.029, 1979).

Након наведених испитивања свих 7 малтерских смеша, планирано је сужавање истраживања на 4 лакоагрегатне малтерске мешавине, предложене за подлогу фасадног панела (без даљег упоређења са еталонским серијама E-E₂). У оквиру ове фазе планирано је испитивање адхезије пројектованих малтера за природни камен. Предложено је испитивање са две врсте камена: гранитом *Шутица* из Аренђеловца и кречњаком *Скржут* из Ужица, на њиховим резаним површинама или површинама са канелурама:

- испитивање приањања очврслог малтера за облогу од камена (SRPS EN 1015-12, 2008);
- испитивање термичке компатибилности – приањање малтера за камену облогу након дејства мраза (SRPS EN 13687-3, 2010).

На основу резултата наведених испитивања, даље истраживање се фокусира на испитивање два изабрана фасадна панела. Конкретно су вршена испитивања панела са различитом лакоагрегатном подлогом која је микроармирана полипропиленским влаканима:

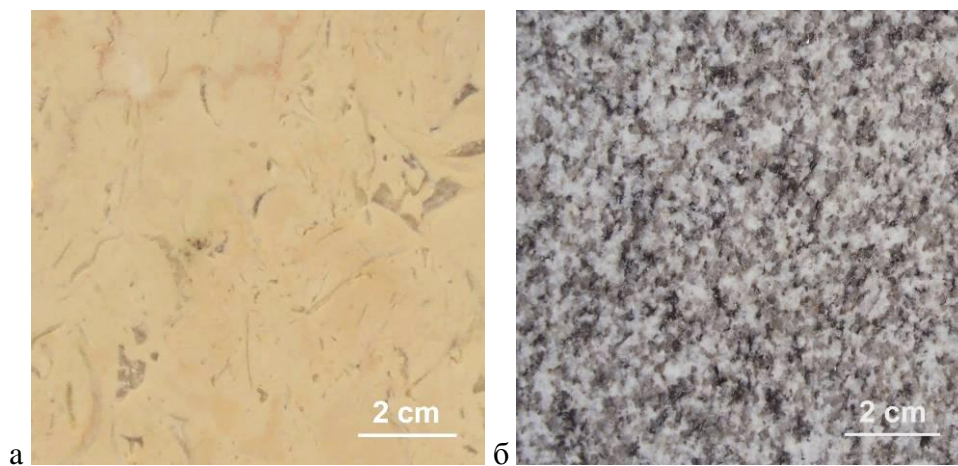
- испитивање чврстоће при савијању композитног фасадног панела (метода Института за материјале и конструкције [ИМК]);
- испитивање граничне силе лома на месту жљеба (метода ИМК);
- испитивање масе панела;
- испитивање појаве ефлоресценције (ASTM C67-14, 2014).

IV.2.2 Компонентни материјали

У овом поглављу биће приказана својства коришћених компонентних материјала, пошто она у највећој мери утичу на својства добијеног композита.

IV.2.2.1 Камен

Стенски материјал, коришћен у оквиру експерименталних истраживања, није засебно испитиван. Од предузећа која се баве експлоатацијом одабране стенске масе су преузета постојећа актуелна испитивања. Изабрани су гранит *Шутица* из Аранђеловца и кречњак *Скржут* из Ужица (Слика 38, Прилог 3).



Слика 38 Камен употребљен у експерименталном истраживању: а) брушена површина кречњака *Скржут*, б) полирана површина гранита *Шутица*

IV.2.2.2 Цемент

За потребе предметних испитивања коришћен је портланд-композитни цемент на бази цементног клинкера са додатком гранулисане згуре и кречњака, ознаке *PC 20M (S-L) 42.5R (CEM II/A-M(S-L)42.5R)* произвођача Lafarge из Беочина. Према опису произвођача, овај цемент се одликује високим раним и крајњим чврстоћама. Препоручује се за израду цементних композита код којих се захтева трајност (изложени бетони и објекти инфраструктуре). У састав овог цемента улазе: потланд-цементни клинкер 80-94%, гранулисана згура и кречњак 6-20%, гипс и минерална пунила 0-5%. Од најзначајнијих својстава издвајају се: мали губитак конзистенције, одлична компатибилност са адитивима за бетон, брз прираштај и високе коначне чврстоће (Lafarge). За потребе овог истраживања преузети су резултати лабораторијских испитивања института ИМС из Београда (Прилог 4).

IV.2.2.3 Вода

За справљање свих серија малтера у оквиру овог експерименталног истраживања, коришћена је вода из градског водовода, за која се може употребити и без доказа о подобности за справљање цементног композита (Правилник о техничким нормативима за бетон и армирани бетон, 1987, члан 12)

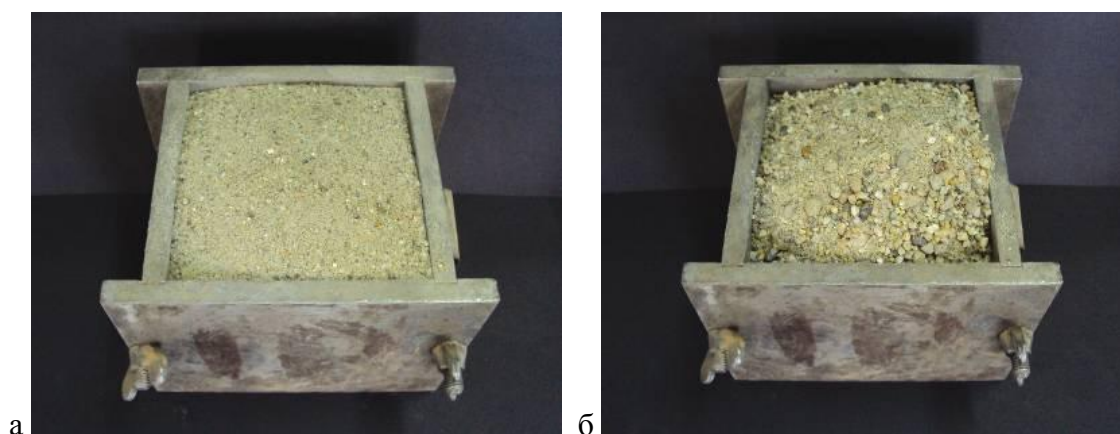
IV.2.2.4 Агрегат

Приликом експерименталних истраживања коришћене су три различите врсте агрегата. Осим речног песка, употребљена су и два типа лаког агрегата: дробљена опека и експандирана глина. Одређивање гранулометријског састава честица је вршено сувим просејавањем материјала претходно просушеног у сушници на 105 ± 5 °C до константне масе према стандарду SRPS EN 1015-1 (2008). Запреминска маса у растреситом стању је одређена према стандарду SRPS ISO

6782 (1999), док је упијање воде одређено испитивањем разлике између масе засићеног – површински сувог и прошущеног агрегата.

IV.2.2.4.1 Речни песок

Као агрегат за справљање малтерских мешавина, првенствено је употребљен природни агрегат у виду речног песка (*Моравац*). Овај агрегат је коришћен као природно гранулисани агрегат фракције 0/4 mm (са надмерним зрнима од 8 mm) и као сепарисани агрегат у просејаној фракцији 0/2 mm (Слика 39). У Табели 12 су приказане испитане запреминске масе коришћених фракција у растреситом стању.



Слика 39 Природни агрегат употребљен у експерименталном истраживању:

а) речни песок 0/2 mm, б) речни песок 0/4 mm

Табела 12 Својства агрегата у виду речног песка

Својство	Речни песок 0/2	Речни песок 0/4
Запреминска маса у растреситом стању (kg/m ³)	1549	1603

Специфична маса овог агрегата креће се у границама 2600-2700 kg/m³ (према подацима ИМК).

IV.2.2.4.2 Дробљена опека

У сврху лабораторијских испитивања је коришћена дробљена опека којом је у време извођења експерименталних истраживања располагала Лабораторија за материјале Института за материјале и конструкције Грађевинског факултета Универзитета у Београду (Слика 40). За потребе истраживања опека је просејана у фракцију 2/4 mm. Испитивана својства агрегата су приказана у Табели 13.



Слика 40 Дробљена опека употребљена у експерименталном истраживању:
фракција 2/4 mm

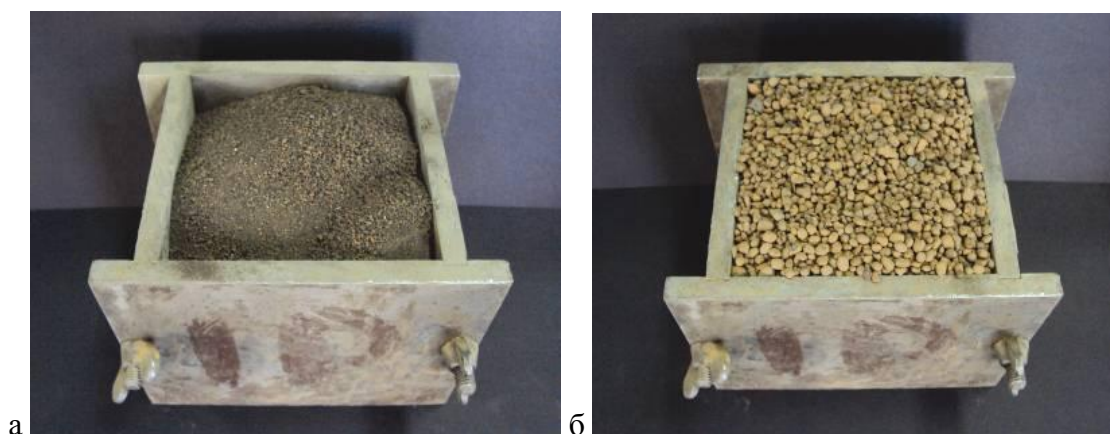
Табела 13 Својства агрегата од дробљене опеке

Својства	Дробљена опека 2/4	
Запреминска маса у растреситом стању (kg/m ³)	820	
Упијање воде (% масе)	30 min	18,4
	60 min	19,0
	24 h	21,3

Специфична маса агрегата од дробљене опеке износи око 2540 kg/m³ (Pakvor i dr., 1999), док запреминска маса зрна рециклираног агрегата примењене фракције износи 1610-1760 kg/m³, односно око 1620 kg/m³ код фракције 0/4 mm (Janković, 2001).

IV.2.2.4.3 Експандирана глина

У сврху експерименталних истраживања је коришћена експандирана глина са округлим обликом зрна *HD 1-4 RK* (фракције 1/4 mm) и лаки песак ломљеног зрна *NW 0-2 KK* (фракције 0/2 mm) из аустријског постројења у Ферингу (Fehring) произвођача Liapor (Слика 41). Испитивана својства агрегата су приказана у Табели 14.



Слика 41 Агрегат употребљен у експерименталном истраживању:

а) експандирана глина 0/2 mm, б) експандирана глина 1/4 mm

Табела 14 Својства агрегата у виду експандиране глине

Својство	<i>NW 0-2 KK</i>	<i>HD 1-4 RK</i>
Облик зрна	ломљено	округло
Запреминска маса у растреситом стању (kg/m ³)	746	726
Упијање воде (% масе)	30 min	9,0
	60 min	10,5
	24 h	15,0

*Вредност преузета од произвођача (Liapor)

За потребе истраживања (види поглавље IV.2.3) такође је испитана запреминска маса мешавине агрегата од 60% *NW 0-2 KK* и 40% *HD 1-4 RK* која износи 793 kg/m³. Специфична маса агрегата *NW 0-2 KK* се креће у границама 1350-1550 kg/m³, а *HD 1-4 RK* у границама 1250-1350 kg/m³ (Liapor).

IV.2.2.5 Влакна у својству микроарматуре

За потребе микроармирања коришћена су два типа синтетичких монофиламентних влакана (Слика 42) истоветне дужине од 6 mm: полипропиленска влакна *Sika Fibers* произвођача Sika и поливинил-алкохолна влакна *Kuralon RMS702* јапанског произвођача Kuraray, чији су технички подаци представљени у Табели 15. Из табеле се може видети разлика у модулима еластичности полипропиленских влакана – која се могу окарактерисати као влакна са ниским модулом еластичности (*low-modulus fibres*), и поливинил-алкохолних влакана – која се могу окарактерисати као влакна са високим модулом еластичности (*high-modulus fibres*), где границу представља модул еластичности саме цементне матрице (10–30 GPa).



Слика 42 Влакна употребљена у експерименталном истраживању:

- а) полипропиленска влакна (аутор), б) поливинил-алкохолна влакна (аутор),
- в) бубрежаста пресека поливинил-алкохолних влакана (Kuraray)

По речима произвођача, предложена влакна *Sika Fibers* унапређују приањање за подлогу, смањују појаву прелина услед сушења и унапређују водонепропусност и отпорност на удар. Употребљавају се нарочито за справљање танких елемената од бетона и малтера. Број влакана дужине 6 mm износи 240 милиона/kg (Sika).

Као алтернатива широко примењиваним полипропиленским влакнима предлаже се употреба поливинил-алкохолних влакана. Одабрана *Kuralon RMS702* влакна одликује висока жилавост, висок модул еластичности, мало издужење при лому,

мала тежина, добра отпорност на хемикалије (алкална средина) и добра адхезија за цементну матрицу (Kuraray).

Табела 15 Технички подаци коришћених полипропиленских и поливинил-алкохолних влакана (Sika; Kuraray)

Својство влакна	Sika <i>Sika Fibers</i>	Kuraray <i>Kuralon RMS702</i>
Материјал	полипропилен	поливинил-алкохол
Тип влакана	монофиламентна	монофиламентна (груписана смолом)
Облик попречног пресека	кружни	бубрежаст
Пречник d (mm)	0,040	0,026
Дужина l (mm)	6	6
Фактор облика l/d	150	230
Специфична маса γ_s (g/cm ³)	0,91	1,30
Чврстоћа при затезању f_z (MPa)	360	1600
Модул еластичности E (GPa)	2,5	37,0
Изужење при лому δ (%)	22	6
Препоручено дозирање (kg/m ³)	> 0,6	1,3-19,5 (оптимално < 2%)
Отпорност у алкалној средини	отпорна	отпорна
Тачка размекшавања (°C)	160	>200
Површинска својства - квашљивост	хидрофобна	хидрофилна

У сврху унапређења дуктилности и контроле пропација прелина, оптимално дозирање ових влакана износи до 2% од укупне запремине. Захваљујући влакнима која се тешко извлаче из цементне матрице, која могу премостити прелине и контролисати њихово даље ширење долази до унапређења дуктилности. Већ 0,6 kg/m³ влакана може редуковати ширину прелина узрокованих скупљањем за 50%. Ова влакна утичу на даље ширење већих пукотина које тако прелазе у мање, чиме се такође унапређује водонепропустљивост и чврстоћа при савијању.

Препоручује се усвајање дужине влакана *Kuralon RMS702* 1,5 пута веће од највећег зрна агрегата смеше. Влакна су груписана смолом која контролише њихову дисперзију, како би се избегло нагомилавање током процеса мешања. Препоручује се додавање влакана у већ умешану основну бетонску смешу (Kuraray).

IV.2.2.6 Латекс

Предметне малтерске мешавине су модификоване течним полимерним латексом. Овај додаток утиче на конзистенцију (пластичност) и уградљивост малтерских смеша, као и на водопропустљивост, односно отпорност на мраз, и редукацију напона скупљања танких елемената. Чврстоћа при затезању и савијању, дуктилност и адхезија (одлична адхезија за мокру подлогу) су својства која се такође битно унапређују применом полимера.

Табела 16 Технички подаци за полимерни латекс *Sika Latex* произвођача Sika (Sika)

Својство	<i>Sika Latex</i>
Изглед	течност
Боја	бела
Густина (kg/l)	1,05

Приликом истраживања је употребљен течни полимерни латекс *Sika Latex* произвођача Sika, водоотпорни додаток бетону и малтеру (Табела 16). Према техничкој документацији повољност овог додатка се огледа у следећем (Sika):

- унапређује адхезију између старог и новог бетона;
- омогућава уградњу преко глатких бетонских површина, чиме се изостављају радови храпављења бетонске подлоге;
- унапређује чврстоће, нарочито чврстоћу при затезању савијањем;
- умањује напоне скупљања код танких облога, естриха.

IV.2.2.7 Суперпластификатор

Пластификатори и суперпластификатори омогућавају да се при нижим вредностима водоцементног фактора добију конзистенције са задовољавајућим својством технологичности свежег бетона. Представљају додатке (адитиве) бетону на бази органских једињења који унапређују флуидност цементне пасте, односно уградљивост и обрадљивост бетонских смеша.

У присуству пластификатора, посебно суперпластификатора, између честица цемента у цементној пасти настају одбојне електростатичке силе, које могу произвести два ефекта: дефлокулацију (индивидуализацију) груписаних честица, што доприноси стабилизацији и хомогенизацији диспезије цемент-вода, и ефекат *подмазивања* површина зрна цемента тако да она клизе једна у односу на другу. Један од ефеката дефлокулације је и боље *квашење* зрна цемента, чиме се већа површина цемента излаже хидратацији. Оба механизма умањују трење унутар свеже масе, омогућавају смањење учешћа воде и тиме унапређење физичко-механичких својстава очврслог композита.

Пластификатори се дозирају у количини од 0,2-5% у односу на масу цемента, при чему узрокују смањење додате количине воде у свежем бетону за 10-15%. Суперпластификатори и хиперпластификатори омогућавају још значајније смањење количине воде, и до 30%, као и добијање високих чврстоћа бетона. Цементни камен добијен као продукт хидратације пасте у чијем је саставу и одређена количина суперпластификатора има знатно гушћу структуру (Јевтић, 1996; Muravljev, 2010).

У циљу боље уградљивости свежег малтера и виших коначних чврстоћа, у оквиру истраживања је примењен суперпластификатор на бази поликарбоксилних полимера *Sika Viscocrete Techno 20* произвођача Sika. Према техничкој документацији повољност овог додатка омогућава (Sika):

- изразито високе ране чврстоће, економично и кратко време уградње бетона како за префабриковане елементе тако и за бетонирање на лицу места;

- изузетну редукцију воде, унапређење компактности бетона, високе крајње чврстоће и отпорност на механичке утицаје;
- редукцију скупљања и пузања (течења);
- умањену водопропустљивост и унапређену отпорност на хемијске утицаје;
- изузетан ефекат пластичности, побољшану уградљивост;
- унапређење обрадљивости, повољне естетске резултате.

Табела 17 Технички подаци за суперпластификатор *Sika Viscocrete Techno 20* произвођача Sika (Sika)

Својство	<i>Sika Viscocrete Techno 20</i>
Изглед	течни раствор
Боја	светло браон
Хемијска база	водени раствор модификованог поликарбоксилата
Садржај хлорида	без садржаја хлорида
Густина (kg/l)	1,05 (на +20° C)
рН вредност	3,2-5,2 (на +20° C)
Дозирање	0,3-2,0 % масе цемента

Овај адитив се додаје води за справљање мешавине или свежеј мешавини на крају процеса мешања, а не сувом цементу (Sika). Својства суперпластификатора су приказана у Табели 17.

IV.2.3 Пројектовање састава малтерских мешавина

Састав малтера се одређује експерименталним путем. Поступак састављања рецептуре, односно одређивање потребних количина компонентних материјала (kg/m³), одвија се у више корака: пројектовање мешавине, експериментална провера својстава уз могућу корекцију састава и коначно утврђивање састава.

Полазни пројектни параметри:

- крута конзистенција малтера, односно распрострањање мање од 140 mm (SRPS EN 1015-6, 2008) методом распрострањања уз помоћ потресног стола (SRPS EN 1015-3, 2008);
- еталонска мешавина у масеној размери цемента, агрегата и воде $m_c : m_a : m_v = 1 : 3 : 0,5$ (SRPS EN 196-1, 2008);
- агрегат погодан за справљање малтера са пожељним највећим номиналним зрном $D = 4$ mm;
- код пројектовања модификованих мешавина усваја се количина синтетичких влакана, суперпластификатора и полимерног латекса препоручена од стране произвођача.

Еталонска мешавина Е

Еталонска мешавина Е представља класичну малтерску мешавину у масеној размери цемента, агрегата и воде $m_c : m_a : m_v = 1 : 3 : 0,5$. За справљање једне серије узорака, при количини цемента $m_c = 450$ g, неопходна количина агрегата у виду речног песка фракције 0/4 mm износи $m_p = 1350$ g, а воде $m_v = 225$ g (SRPS EN 196-1, 2008). Пројектовани састав еталонске смеше Е је прегледно приказан у Табели 18.

Табела 18 Пројектовани састав еталонске мешавине Е
за справљање једне серије узорака

Малтерска мешавина	Цемент (g)	Речни песок 0/4 mm (g)	Вода (g)
Е	450	1350	225

Малтерске мешавине E₁ и E₂

При пројектовању малтерских смеша E₁ и E₂, задржава се количина цемента $m_c = 450 \text{ g}$ и агрегата у виду речног песка фракције 0/4 mm $m_p = 1350 \text{ g}$, као код еталонске мешавине E. Унапређујући малтерске мешавине E₁ и E₂ додатком суперпласификатора и полимерног латекса, може се очекивати редуција потребне количине воде у односу на еталонску мешавину E за 20%. У том случају потребна количина воде износи:

$$m_v = 0,8 \cdot 225 \text{ g} = 180 \text{ g}$$

Масени удео суперпласификатора се дозира по препоруци произвођача - 0,8% од масе цемента (за средњу обрадљивост). Пројектована маса суперпласификатора износи:

$$m_{sp} = 0,008 \cdot m_c = 0,008 \cdot 450 \text{ g} = 3,6 \text{ g}$$

Водени раствор полимерног латекса је припремљен са запреминским уделом овог додатка од 5%. Потом, водени раствор се дозира 5% од масе пројектоване воде. Пројектована маса воденог раствора полимерног латекса износи:

$$m_l = 0,05 \cdot m_v = 0,05 \cdot 180 \text{ g} = 9,0 \text{ g}$$

Маса влакана је дозирана према препоруци произвођача (~1% од укупне запремине). Код смеше E₁ полипропиленска влакна се дозирају у количини $m_{v1} = 0,9 \text{ g}$, док се код смеше E₂ поливирил-алкохолна влакна дозирају у количини $m_{v1} = 1,5 \text{ g}$.

Експерименталним испитивањем конзистенција мешавина E₁ и E₂ показало се да је претпостављена количина воде, уз употребу пројектованих количина суперпласификатора и полимерног латекса, одговарајућа за постизање круте конзистенције свежег малтера. Пројектовани састав малтерских смеша E₁ и E₂ је прегледно приказан у Табели 19.

Табела 19 Пројектовани састав малтерских мешавина E_1 и E_2
за справљање једне серије узорака

Малтерска смеша	Цемент (g)	Р. песак 0/4 mm (g)	Влакна (g)	Суперплас тификатор (g)	Латекс (g)	Вода (g)
E_1	450	1350	0,9	3,6	9	180
E_2	450	1350	1,5	3,6	9	180

Малтерске мешавине M_1 и M_2

При пројектовању малтерских мешавина M_1 и M_2 , задржава се маса цемента $m_c = 450$ g, а самим тим и суперпластификатора (0,8% од пројектоване масе цемента) $m_{sp} = 3,6$ g. При замени фракције 2/4 mm речног песка мешавина E_1 и E_2 агрегатом од дробљене опеке, експерименталним путем су усвојене следеће количине: маса песка фракције 0/2 mm $m_p(0/2) = 810$ g, а маса дробљене опеке фракције 2/4 mm $m_{o(2/4)} = 270$ g. Потребна корекција количине воде за пројектовану круту конзистенцију је такође утврђена експерименталним путем постепеним додавањем у односу на првобитно усвојену количину модификованих мешавина E_1 и E_2 од 180g и износи 193 g за мешавину M_1 и 203 g за мешавину M_2 . Пошто се претпоставља да ову разлику у маси воде упије агрегат, потребна количина полимерног латекса се одређује као 5% од првобитно пројектоване масе воде (180 g) и износи $m_l = 9,0$ g. Маса влакана је дозирана према препоруци произвођача (~1% од укупне запремине). При справљању смеше M_1 полипропиленска влакна се додају у количини $m_{v1} = 0,9$ g, док се при справљању смеше M_2 поливинил-алкохолна влакна додају у количини од $m_{v1} = 1,5$ g. Пројектовани састав малтерских мешава M_1 и M_2 је прегледно приказан у Табели 20.

Табела 20 Пројектовани састав малтерских мешавина M_1 и M_2
за справљање једне серије узорака

Малтер. смеша	Цемент (g)	Речни песак 0/2 mm (g)	Дроб. опека 2/4 mm (g)	Влакна (g)	Супер пластиф икатор (g)	Латекс (g)	Вода (g)
M_1	450	810	270	0,9	3,6	9	193
M_2	450	810	270	1,5	3,6	9	203

Малтерске мешавине М₃ и М₄

При пројектовању малтерских мешавина М₃ и М₄, задржава се маса цемента $m_c = 450$ g и суперпластификатора (0,8% од пројектоване масе цемента) $m_{sp} = 3,6$ g. При потпуној замени агрегата од речног песка малтерских мешавина Е₁ и Е₂ агрегатом од експандиране глине, експерименталним путем су усвојене следеће количине агрегата у масеном односу 60 : 40 (%) - маса песка од експандиране глине фракције 0/2 mm $m_{eg(0/2)} = 405$ g, а маса експандиране глине фракције 2/4 mm $m_{eg(2/4)} = 270$ g. Потребна корекција количине воде за пројектовану круту конзистенцију је такође утврђена експерименталним путем постепеним додавањем у односу на првобитно усвојену количину модификованих мешавина Е₁ и Е₂ од 180 kg/m³ и износи 235 g за мешавину М₃ и 245 g за мешавину М₄. Пошто се претпоставља да ову разлику у маси воде упије агрегат, потребна количина полимерног латекса се одређује као 5% од првобитно пројектоване масе воде (180 kg/m³) и износи $m_l = 9,0$ g. Маса влакана је дозирана према препоруци произвођача (~1% од укупне запремине). При справљању смеше М₃ полипропиленска влакна се додају у количини $m_{vl} = 0,9$ g, док се при справљању смеше М₄ поливинил-алкохолна влакна додају у количини од $m_{vl} = 1,5$ g. Пројектовани састав малтерских смеша М₃ и М₄ је прегледно приказан у Табели 21.

Табела 21 Пројектовани састав малтерске мешавине М₃ и М₄
за справљање једне серије узорка

Малтер. смеша	Цемент (g)	Експан. глина 0/2 mm (g)	Експан. глина 2/4 mm (g)	Влакна (g)	Супер пластифи катор (g)	Латекс (g)	Вода (g)
М ₃	450	405	270	0,9	3,6	9	235
М ₄	450	405	270	1,5	3,6	9	245

На основу претходних разматрања може се и збирно приказати учешће појединих компонената у оквиру пројектованих смеша (Табела 22).

Са применом суперпластификатора и полимерног латекса може се уочити тренд умањења водоцементног фактора m_v/m_c . Изузетак представљају рецептуре са

агрегатом од експандиране глине, јер је услед високог процента упијања воде овог агрегата, нарочито дробљеног песка, маса воде за справљање одређене конзистенције виша од уобичајених вредности (Табела 23).

Табела 22 Састав пројектованих малтерских смеша за справљање једне серије од три призматична узорка

Компонента (g)	Е	Е ₁	Е ₂	М ₁	М ₂	М ₃	М ₄
Цемент	450	450	450	450	450	450	450
Речни песок 0/4 mm	1350	1350	1350	/	/	/	/
Речни песок 0/2 mm	/	/	/	810	810	/	/
Дробљена опека 2/4 mm	/	/	/	270	270	/	/
Експандирана глина 0/2 mm	/	/	/	/	/	405	405
Експандирана глина 1/4 mm	/	/	/	/	/	270	270
Полипропиленска влакна	/	0,9	/	0,9	/	0,9	/
Поливинил-алкохолна влакна	/	/	1,5	/	1,5	/	1,5
Суперпластификатор	/	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Латекс	/	9	9	9	9	9	9
Вода	225	180	180	193	203	235	245

Табела 23 Приказ водоцементног, флуидноцементног и агрегатноцементног фактора пројектованих малтерских смеша

Компонента	Е	Е ₁	Е ₂	М ₁	М ₂	М ₃	М ₄
Водоцементни фактор m_v/m_c	0,5	0,4	0,4	0,43	0,45	0,52	0,54
Флуидноцементни фактор m_f/m_c	0,5	0,43	0,43	0,46	0,48	0,55	0,57
Агрегатноцементни фактор m_a/m_c	3	3	3	2,4	2,4	1,5	1,5

На дијаграмима (Слике 43, 44 и 45) су приказане гранулометријске криве усвојених мешавина. Приказане су и препоручене криве масеног учешћа по Фулеру и ЕМПА, како важи став да се као најповољнији у гранулометријском погледу може сматрати агрегат чија гранулометријска крива пада у подручје између датих кривих.

Гранулометријска крива – Фулер: $Y = 100 \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}$

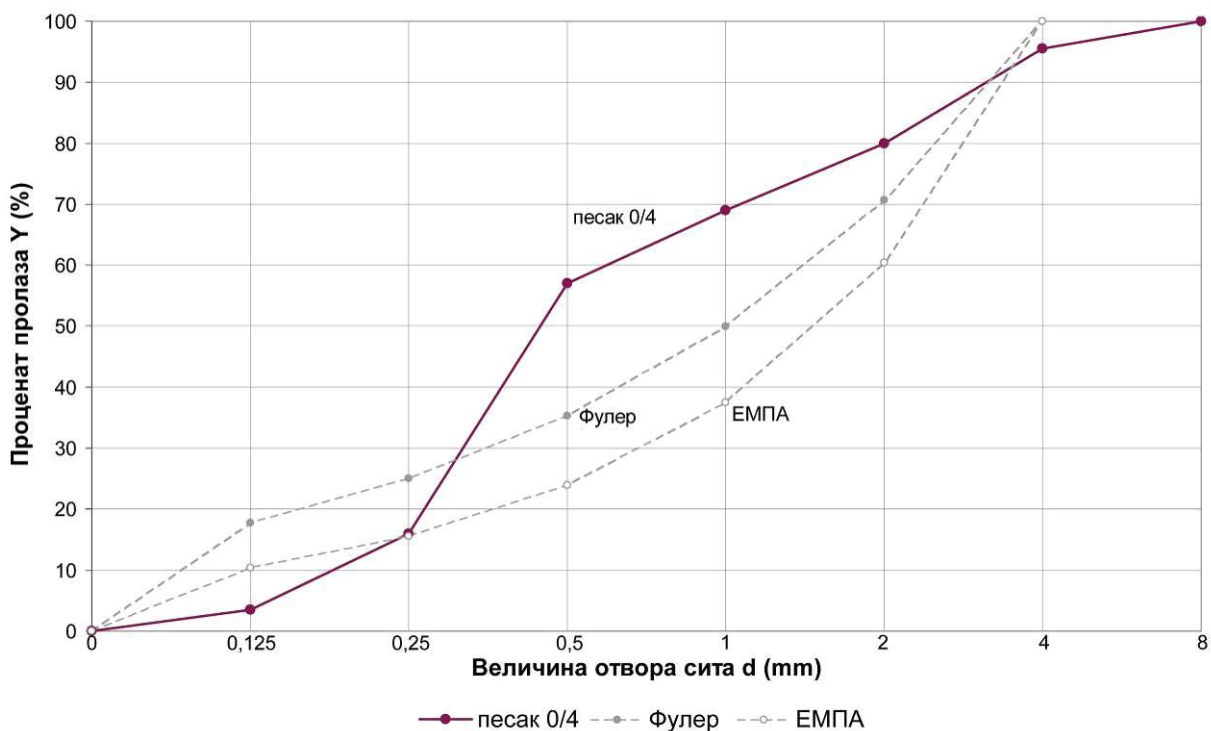
Гранулометријска крива – ЕМПА: $Y = 50 \cdot \left(\frac{d}{D}\right) \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}$

где је:

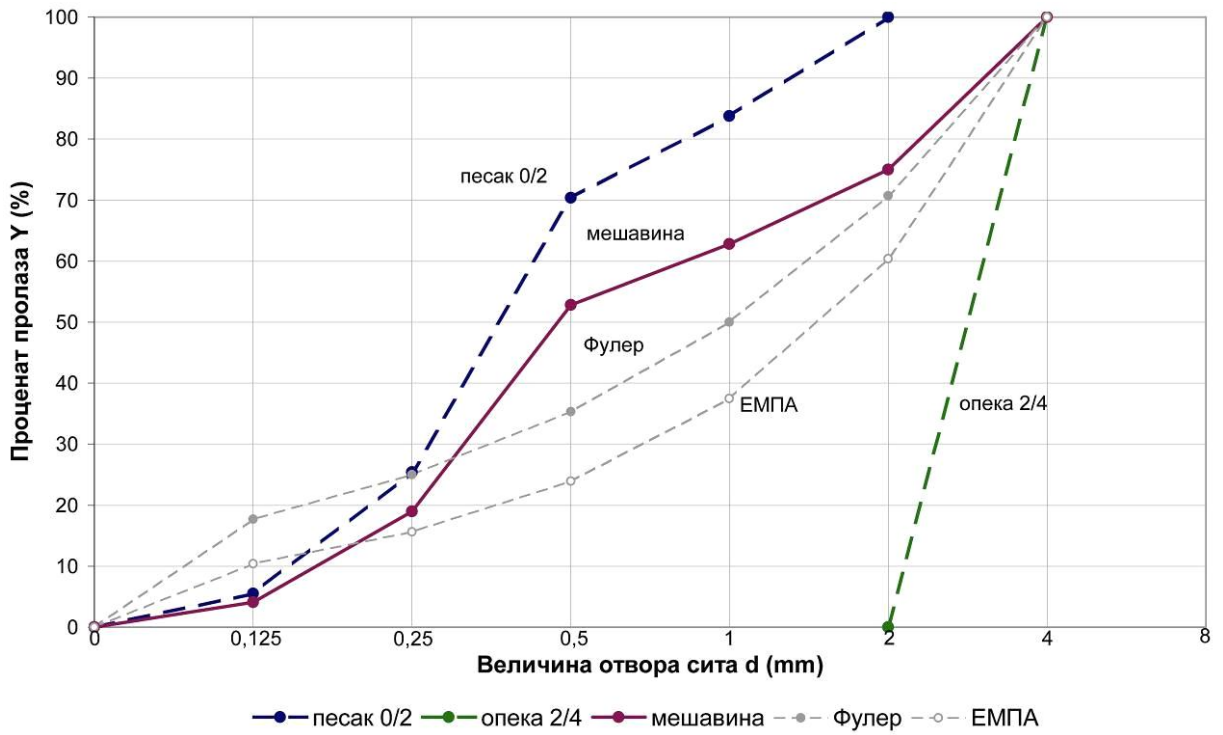
d – крупноћа зрна агрегата – отвор сита (mm),

D – номинално најкрупније зрно агрегата (mm).

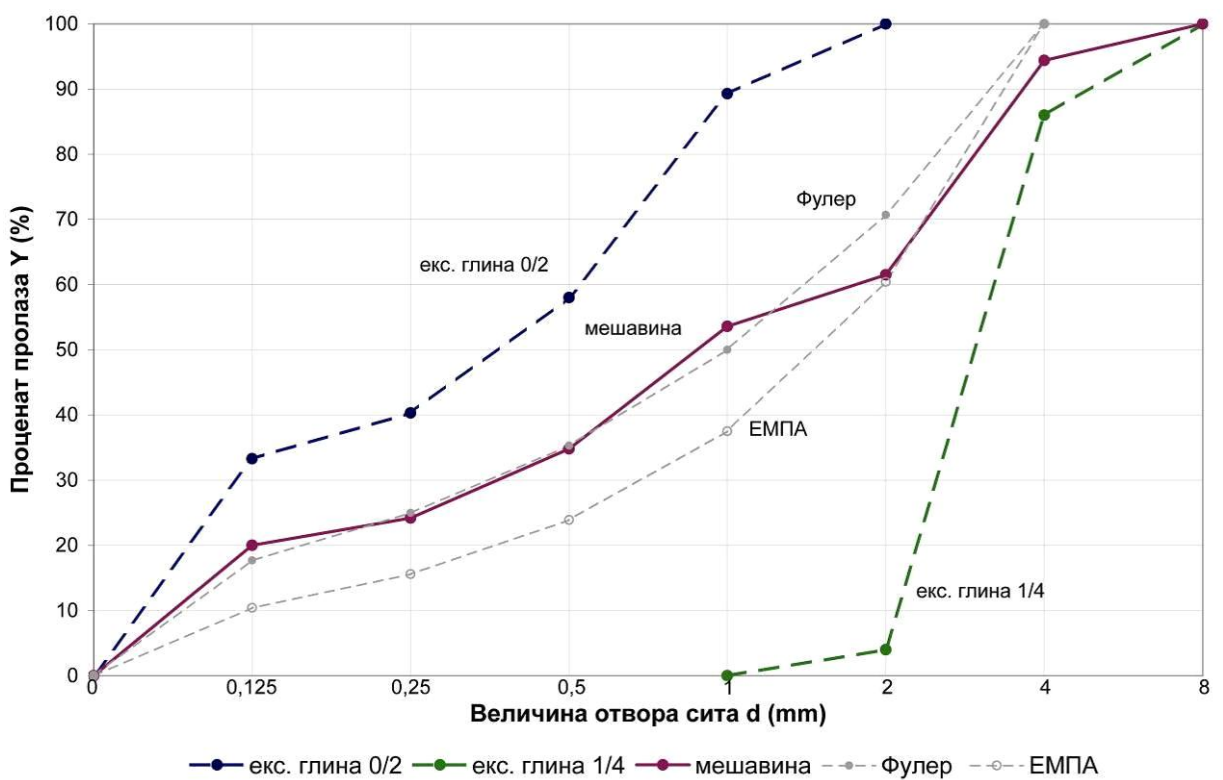
Треба, напоменути да се са гранулометријском кривом мешавине агрегата, која се не може уклопити у подручје између Фулерове и ЕМПА криве, такође могу добити композити високих чврстоћа (нпр. *Моравиц*) (Osnovi teorije i tehnologije betona, prezentacija sa predavanja, Građevinski fakultet u Beogradu, 2013).



Слика 43 Гранулометријска крива серија Е, Е₁ и Е₂



Слика 44 Гранулометријска крива серија M₁ и M₂



Слика 45 Гранулометријска крива серија M₃ и M₄

Након справљања малтерских смеша и упоређења њихових пројектованих састава и испитаних запреминских маса у свежем стању (види поглавље IV.2.4.1.3), а на основу масене једначине код које се учешће влакана може занемарити, добијају се стварне количине материјала у 1 m³ малтерске мешавине (Табела 24):

$$\gamma_{m,sv} = m_c + m_p + m_v + m_{sp} + m_l$$

где је:

m_c – маса цемента (kg),

m_p – маса песка (kg),

m_v – маса воде (kg),

m_{sp} – маса суперпластификатора (kg),

m_l – маса полимерног латекса (kg).

Табела 24 Стварне количине материјала у 1 m³ малтерске мешавине

Компонента (kg / m ³)	Е	Е ₁	Е ₂	М ₁	М ₂	М ₃	М ₄
Цемент	489	481	502	555	544	534	545
Речни песак 0/4 mm	1467	1444	1507	/	/	/	/
Речни песак 0/2 mm	/	/	/	996	979	/	/
Дробљена опека 2/4 mm	/	/	/	332	326	/	/
Експандирана глина 0/2 mm	/	/	/	/	/	480	490
Експандирана глина 1/4 mm	/	/	/	/	/	320	327
Полипропиленска влакна	/	1,0	/	1,1	/	1,1	/
Поливинил-алкохолна влакна	/	/	1,7	/	1,8	/	1,8
Суперпластификатор	/	3,8	4,0	4,4	4,3	4,3	4,4
Латекс	/	9,6	10,0	11,1	10,9	10,7	10,9
Вода	245	192	201	237	245	279	297

IV.2.4 Прва фаза експерименталних истраживања

Прва фаза експерименталних истраживања се бави утврђивањем физичко-механичких, технолошких карактеристика и трајности малтера предложених за материјал подлоге пројектованог фасадног елемента. Разматран је утицај различитог састава малтерске мешавине на физичко-механичка својства ради потенцијалног избора (или елиминације) предложеног типа подлоге. Целокупна лабораторијска испитивања прве фазе су обављена у Лабораторији за материјале Института за материјале и конструкције Грађевинског факултета Универзитета у Београду, према одговарајућим стандардним процедурама.

Приказани резултати испитивања представљају аритметичку средину од три спроведена (забележена) мерења једне серије. Где је то прикладно забележен је прираштај вредности одређеног својства композита у односу на еталон Е и серије Е₁ и Е₂, који се приказује процентуално. Разматрајући, на пример, чврстоће при савијању при истој старости овај однос се може приказати изразом:

$$\Delta f_{zs}(t) = \frac{f_{zs}(t) - f_{zs,e}(t)}{f_{zs,e}(t)} \cdot 100$$

где је:

Δf_{zs} – процентуална разлика чврстоћа (%),

$f_{zs,e}$ – чврстоћа при савијању еталона (МПа),

f_{zs} – чврстоћа при савијању посматраног узорка (МПа).

IV.2.4.1 Испитивање својстава малтера у свежем стању

Током експерименталних истраживања испитана су основна својства свежег малтера која обухватају:

- испитивање конзистенције методом распростирања,
- испитивање запреминске масе у свежем уграђеном стању.

Осим испитивања конзистенције, визуелно-макроскопским прегледом мешавина такође су контролисана својства свежег малтера, која се односе на његову технологичност: уградљивост, обрадљивост и хомогеност мешавине.

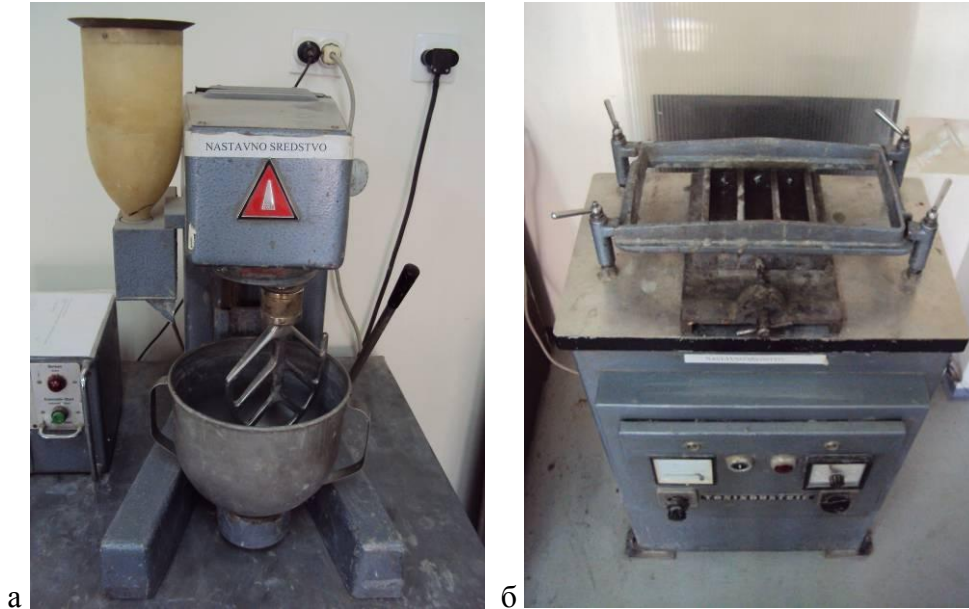
IV.2.4.1.1 Справљање малтерских мешавина

У оквиру експерименталних испитивања справљено је седам серија малтера, чији се састав разликује по врсти и количини изабраних агрегата и влакана. Малтерске мешавине су справљене машинским путем помоћу стандардне лабораторијске мешалице *RILEM-CEM* (Слика 46а). Еталонска мешавина Е је справљена по стандардном поступку (SRPS EN 196-1, 2008), док је поступак мешања модификованих мешавина прилагођен захтевима припреме малтера са микро влаканима и лаким агрегатом са високим процентом упијања воде.

Модификоване мешавине E_1 и E_2 са агрегатом од речног песка су справљане на следећи начин:

- у дозирану количину воде се додаје одмерена количина цемента и меша првом брзином у трајању од 30 s;
- без престанка мешања, додаје се агрегат наредних 30 s;
- потом се у наредних 30 s додају влакна;
- коначно се током 30 s додају суперпластификатор и полимени латекс;

- потом се мешање обуставља током 30 s ради скупљања малтера са зидова посуде мешалице;
- мешање се врши додатних 90 s ради равномерног дисперговања влакана унутар цементне пасте.



Слика 46 Апаратура за справљање узорака: а) стандардна лабораторијска мешалица, б) уграђивање узорака на вибро-столу

Модификоване мешавине M_1 - M_4 са делимичном или потпуном заменом природног агрегата лаким су справљане на следећи начин:

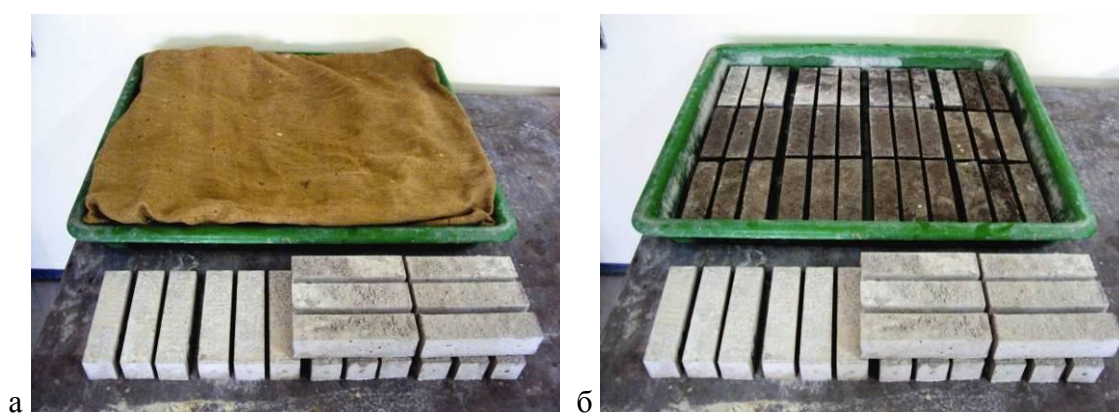
- у 2/3 дозиране количине воде се дода одмерена количина цемента и меша првом брзином у трајању од 30 s;
- без престанка мешања, додаје се агрегат наредних 30 s;
- следећих 30 s се додаје преостала 1/3 дозиране количине воде;
- потом се у наредних 30 s додају влакна;
- коначно се током 30 s додају суперпластификатор и полимени латекс;
- потом се мешање обуставља током 30 s ради скупљања малтера са зидова посуде мешалице;
- мешање се врши додатних 90 s ради равномерног дисперговања влакана унутар цементне пасте.

Лаки агрегат је коришћен без претходног квашења. Након хомогенизације лаког агрегата са цементом и $2/3$ одмерене воде, смеси се додаје последња трећина воде (са адитивом, по потреби). Овај оптимални поступак се предлаже као најповољнији због тога што лака порозна испуна повлачи воду већ у току справљања малтера (Janковић, 2001; Правилник о техничким нормативима за бетон и армирани бетон справљен са природном и вештачком лакоагрегатном испуном, 1990, члан 26). Влакна, затим суперпластификатор и полимерни латекс се додају на крају процеса мешања према препорукама произвођача. У пракси се са аспекта смањења садржаја увученог ваздуха (због склоности неких полимера ка пенушању у фази мешања) и унапређења физичко-механичких својстава усваја поступак којим се већ хомогенизованој мешавини цемента, агрегата и воде додаје полимерна дисперзија (Radonjanin i dr., 1999). Може се приметити да је дужина трајања поступка мешања продужена до 4 min и 30 s, односно 5 min, ради равномерног дисперговања влакана унутар цементне пасте.

Свежа малтерска мешавина се уграђује у троделне калупе од челичног лима дебљине 5-10 mm. Пре уграђивања, очишћени калупи су са унутрашње стране премазани танким слојем минералног (машинског) уља, како не би дошло до адхезије малтера и калупа (SRPS EN 1015-11, 2008). Све мешавине су компактиране машинским путем помоћу вибро-стола у трајању од 60 s, са амплитудом од 0,75 mm, до престанка слегања и издвајања ваздуха (Слика 46б). Овим динамичким дејствима се постиже изузетно добро уграђивање, односно компактирање, како се из масе свежег малтера истискују глобуле ваздуха, а малтер испуњава све просторе ограничене калупом (Muravljov, 2010). Уграђивањем малтера поступцима механичког збијања, могу се успешно уградити и смеше већег вискозитета. (Muravljov, 2007), што погодује пројектованој крутој конзистенцији малтера.

Непосредно након справљања, малтер се мора заштитити од пребрзог исушивања, да би се обезбедила оптимална хидратација и избегла оштећења услед раног и брзог скупљања (Правилник о техничким нормативима за бетон и армирани бетон справљен са природном и вештачком лакоагрегатном испуном, 1990). Нега малтера модификованих полимерима се у одређеној мери разликује од неге класичног малтера, како је за формирање полимерне матрице потребан сув

(ваздух), а за хидратацију цемента влажан режим неге (вода) (Слика 47). Ради постизања оптималних својстава модификованих малтера опитна тела су подвргнута комбинованом режиму неге који се састојао од 7 дана неге у влажној средини (температура $20\pm 2^\circ\text{C}$, релативна влажност ваздуха 95%) под влажном јутином тканином, и 28 дана неге на ваздуху у лабораторијским условима (температура $20\pm 2^\circ\text{C}$, релативна влажност ваздуха 65%) (Radonjanin i dr., 1999). Над свим серијама малтера је примењен исти режим неге, а након 24 h од уграђивања приступило се пажљивом уклањању калупа.



Слика 47 Нега узорака:

а) под влажном јутином тканином, б) на ваздуху

У сврху лабораторијских испитивања својстава очврслог малтера, описаним поступком, за сваку од седам малтерских смеша је справљено четири серије од по три испитна узорка, укупно 84 епрувета димензија 4 x 4 x 16 cm.

IV.2.4.1.2 Конзистенција свежег малтера

Конзистенција (пластичност) свежег малтера или бетона се дефинише као степен крутости, односно покретљивости свеже мешавине и у великој мери зависи од водоцементног фактора, односно од количине употребљене воде. Овај појам се односи на степен повезаности компонената малтерске смеше који утиче на величину унутрашњег трења у маси (Muravljov, 2010).

Конзистенција зависи од крупноће зрна агрегата и од односа ситног према крупном агрегату. Вода која улази у састав смеше кваси зрна цемента и учествује у формирању цементне пасте, затим кваси зрна агрегата и агрегат је евентуално упија. Количина воде коју задржава агрегат зависи од врсте агрегата, његове крупноће и од садржаја финих – прашкастих честица. Пошто се апсорпциона способност агрегата повећава са укупном површином зрна, важи да ситнији агрегат захтева веће количине воде, док се са повећањем крупноће зрна смањује утицај зрна на цементну пасту и повећава покретљивост свеже мешавине (Muravljov, 2010). Конзистенција лакоагрегатних композита је такође условљена природом лаке порозне испуне која може да буде више или мање отворене, односно затворене структуре (Правилник о техничким нормативима за бетон и армирани бетон справљен са природном и вештачком лакоагрегатном испуном, 1990).

Конзистенција свежег малтера је испитивана методом распростирања уз помоћ потресног стола према стандарду SRPS EN 1015-3 (2008). Предвиђена је крута конзистенција свежих малтерских мешавина, односно распростирање мање од 140 mm (SRPS EN 1015-6, 2008) према којој се и врши корекција количине воде при дефинисању коначног састава малтерских мешавина.

Свеж малтер се непосредно по справљању уграђује према дефинисаној процедури у конусни калуп унутрашњег пречника од 100 mm, који се уклања након 15 s (Слика 48 и 49). Мера конзистенције, према методи распростирања, представља постигнуто кружно распростирање, односно средњи пречник распрострте малтерске мешавине, мерен у два управна правца након 15 циклуса потресања узорака свежег малтера на потресном столу брзином од једног циклуса у секунди. Како вредност средњег пречника измереног круга расте, то је конзистенција свежег малтера течнија (пластичнија). Током испитивања овом методом, забележено је распростирање предметних свежих мешавина у границама од 110-130 mm, односно остварена је пројектована крута конзистенција испод 140 mm. Резултати испитивања распростирања свежих малтерских смеша су приказани у Табели 25.

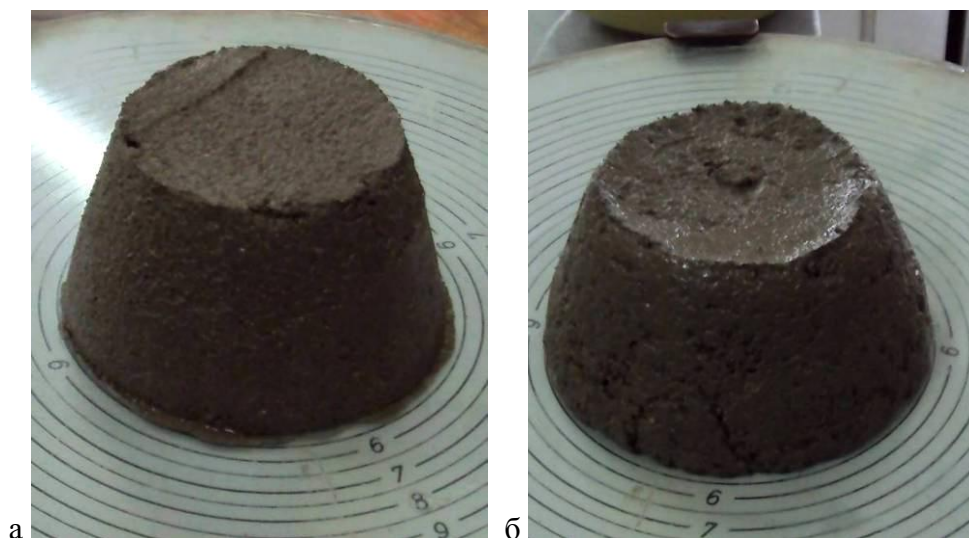
Из забележених резултата испитивања се може приметити:

- додатком суперпластификатора и полимерног латекса (серије E_1 и E_2) се може одржати константна конзистенција смеше и при смањењу употребљене количине воде за 20 % (у односу на еталон E);
- да је заменом фракције 2/4 mm речног агрегата дробљеном опеком, за одржање исте конзистенције, неопходно извршити корекцију, односно повећати количину воде (серије M_1 и M_2) у односу на серије E_1 и E_2 , ради већег упијања лаког агрегата;
- даље увећање количине потребне воде при потпуној замени природног агрегата експандираном глином, посебно ради учешћа ситног агрегата 0/2 mm отворене порозности са око 18% финих зрна испод 0,063 mm (серије M_3 и M_4);
- додатком влакана се у извесној мери повећава крутост (смањује пластичност) свеже малтерске мешавине; ово повећање крутости је израженије код смеша са додатком поливинил-алкохолних влакана, односно потребна је већа количина воде за одржање константне конзистенције смеша (серије M_2 и M_4).



Слика 48 Испитивање конзистенције методом распростирања:

а) апаратура, б) пуњење конусног калупа



Слика 49 Редукција издвајања воде применом влакана:
 а) еталонска серија Е, б) серија са влакнима и адитивима Е₂

Табела 25 Резултати испитивања распростирања свежег малтера
 (Јевтић и Војновић Ћалић, 2014)

Својство	Е	Е ₁	Е ₂	М ₁	М ₂	М ₃	М ₄
Конзистенција (mm)	120	130	110	110	110	120	120

Осим конзистенције, технолошка својства малтера од значаја за истраживање, која се могу уочити визуелним путем - макроскопски, а дефинисати описно, обухватају: уградљивост, обрадљивост и хомогеност малтерске смеше.

Уградљивост (компактибилност) се у пракси најчешће повезује са конзистенцијом смеше и њеном кохезивношћу. Ово својство одређује могућност збијања (компактирања) свежег бетона, што се даље одражава на остварене запреминске масе свежег бетона, односно на скоро све техничке карактеристике очврслог бетона. Уколико се приликом уграђивања малтера примењују поступци механичког збијања могу се успешно уградити и смеше већег вискозитета (Muravlјov, 2007, 2010).

Обрадљивост представља способност малтерске смеше да се у танком, хомогеном слоју распростре преко одређене подлоге (која није идеално равна), тако да се оствари што је могуће равномернија веза малтера са подлогом, односно обезбеди

попуњавање свих неправилности, што даље утиче на чврстоћу и постојаност везе подлога-малтер (Muravljov, 2007). Ово својство првенствено зависи од водоцементног фактора и присуства адитива. Завршна обрадљивост површине свежег бетона је функција гранулометријског састава агрегата, облика и површине зрна агрегата, као и количине кохезивне малтерске пасте у оквиру мешавине, у чији састав улазе цемент, fine честице агрегата, евентулни минерални додаци и вода (Muravljov, 2010).

Хомогеност представља равномерност конзистенције и боје унутар малтерске мешавине. (Muravljov, 2007). Остварује се довољно дугим и интензивним мешањем компонентних материјала и предузимањем мера да се она очува током различитих технолошких операција. Има значајан утицај на физичко-механичка својства композита., а може се остварити само уколико је у оквиру масе свежег бетона остварен адекватан ниво повезаности (кохезивности) компонената. Нехомогеност очврслог бетона се одражава на знатан пад његових физичко-механичких својстава (Muravljov, 2010).

Повезаност (кохезивност) подразумева својство која се огледа у одржању хомогеног распореда компонената унутар масе свежег бетона, и поред дејства спољашњих механичких утицаја. Може се уочити и при испитивању конзистенције свежег бетона, где се недовољна кохезивност испољава издвајањем воде и цементне пасте, а такође сегрегацијом (раздвајањем) крупнијих од ситнијих зрна. Издвајање воде се такође примећује на површини бетона након уградње, али се може десити и у маси у виду водених *цепова* испод крупних зрна агрегата. У пракси се појава сегрегације јавља приликом транспорта, уграђивања, завршне обраде и у периоду након завршне обраде свеже мешавине. Раслојавање смеше се може предупредити учешћем адекватне количине ситног агрегата, посебно честица испод 0.25 mm (Muravljov, 2010).

У погледу уградљивости и обрадљивости, предметне малтерске смеше су током уграђивања и при обради површина узорака показале задовољавајуће својства.

Визуелним прегледом – макроскопски, током испитивања конзистенције и на површини узорака након уградње, примећено је смањено издвајање воде (*bleeding*) код мешавина са влакнима. Ово се може приписати чињеници да

микроарматура у структури свежег малтера има улогу у пресецању пута слободне воде и затварању капиларних пора, односно спречавању слободне миграције воде из унутрашњости малтерске мешавине (Zakić, 2010).

Остварена хомогеност се може пратити у фазама справљања и уграђивања малтерских мешавина, код којих није уочена појава груписања влакана (*balling* ефекат). Такође се након испитивања чврстоћа при савијању епрувета очврслог малтера може у равнима лома приметити задовољавајући степен униформности распореда влакана.

IV.2.4.1.3 Запреминска маса свежег малтера

Испитивању запреминске масе свежег малтера се приступило непосредно по завршетку уграђивања малтерских мешавина у троделне калупе уз помоћ вибростолоа. Испитивање овог својства је вршено према процедурама описаним у стандарду SRPS EN 1015-6 (2008) за малтере са крутом конзистенцијом. Маса свежег малтера је добијена као разлика измерених маса пуног и празног троделног калупа, а запреминска маса свежег уграђеног малтера је срачуната на основу обрасца:

$$\gamma_{m,sv} = \frac{m_{m,sv}}{V_{m,sv}}$$

где је:

$\gamma_{m,sv}$ – запреминска маса свежег уграђеног малтера (kg/m³),

$m_{m,sv}$ – маса свежег малтера у калупу (kg),

$V_{m,sv}$ – запремина калупа (m³), у овом случају $768 \cdot 10^{-6}$ m³.

За испитивање узорака је употребљена стандардна лабораторијска вага (Слика 50). Резултати испитивања запреминске масе свежег малтера свих 7 серија су представљени у Табели 26. Процентуална разлика вредности у односу на еталон Е је приказана у оквиру дијаграма (Слика 51).



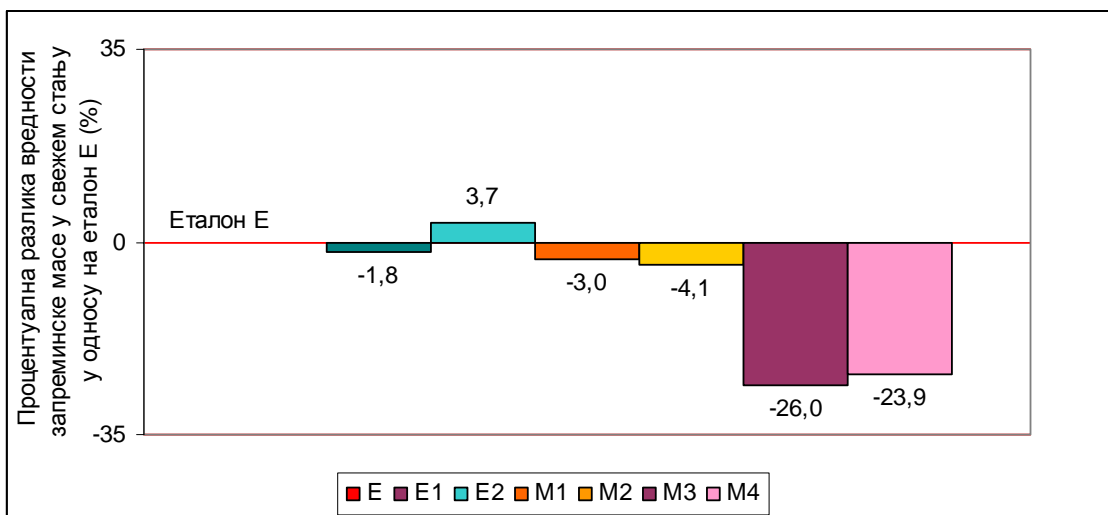
Слика 50 Стандардна лабораторијска вага

Табела 26 Резултати испитивања запреминске масе свежег малтера

Својство	Е	Е ₁	Е ₂	М ₁	М ₂	М ₃	М ₄
Запреминска маса $\gamma_{m,sv}$ (kg/m ³)	2201	2161	2275	2135	2110	1628	1675

Резултати испитивања запреминских маса малтера у свежем стању показују:

- једино се код серија са потпуном заменом природног агрегата лаким агрегатом од експандиране глине – М₃ и М₄, може приметити знатни пад вредности од 23,9% - 26,0 % у односу на еталон Е, док су вредности осталих смеша уједначене са еталоном (у оквиру 5%).



Слика 51 Процентуална разлика вредности запреминске масе у свежем стању у односу на еталон Е

Вредности запреминских маса малтера у свежем стању су веродостојан показатељ карактеристика очврслог композита, како се са повећањем запреминске масе добијају компактнији малтери са бољим физичко-механичким својствима (Muravlјov, 2010).

IV.2.4.2 Испитивање својстава очврслог малтера

Током експерименталних истраживања испитана су следећа својства малтера у очврслном стању на стандардним малтерским епруветама димензија 4 x 4 x 16 cm:

- запреминска маса,
- чврстоћа при савијању након 7 и 28 дана ,
- чврстоћа при притиску након 7 и 28 дана,
- упијање воде,
- отпорност на дејство мраза,
- брзина ултразвука,
- динамички модул еластичности,
- скупљање услед сушења након 4, 7,14, 21, 28, 90, 180, 270 и 360 дана.

IV.2.4.2.1 Запреминска маса очврслог малтера

Вредности запреминске масе очврслог малтера су ниже од вредности у свежем стању за количину воде која преостане након физичко-хемијског процеса хидратације цемента. Ова невезана вода у капиларним порама цементног камена временом испарава.

У оквиру истраживања, запреминска маса очврслог малтера се утврђује испитивањем маса очврслих призматичних узорака у природно влажном стању. Као и код свежег малтера запреминска маса се може срачунати на основу израза:

$$\gamma_m = \frac{m_m}{V_m}$$

где је:

γ_m – запреминска маса свежег уграђеног малтера (kg/m^3),

m_m – маса свежег малтера у калупу (kg),

V_m – запремина калупа (m^3), у овом случају $768 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$.

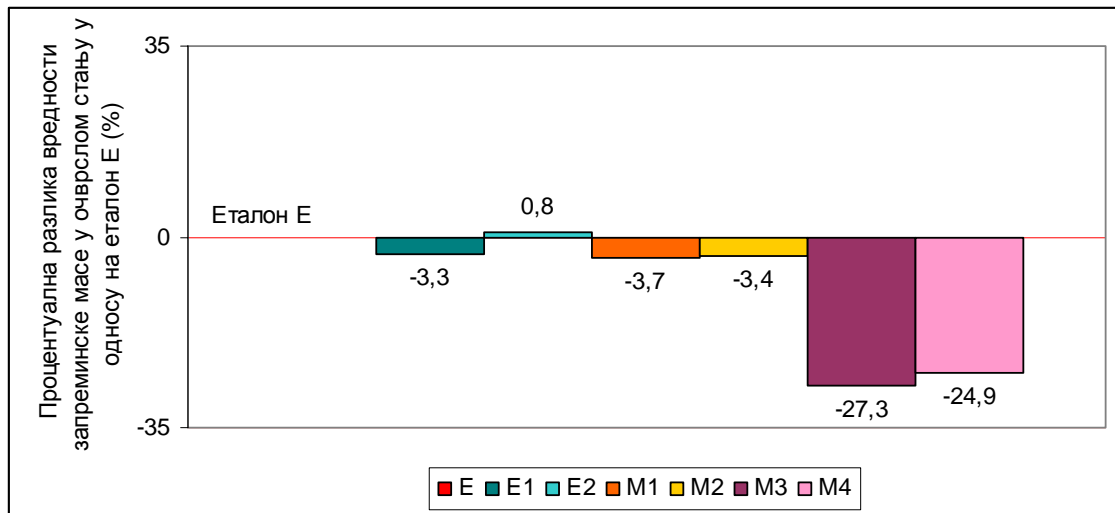
Резултати испитивања запреминске масе малтера у очврслном стању свих 7 серија малтера су представљене у Табели 27.

Табела 27 Резултати испитивања запреминске масе очврслог малтера
(Jevtić i Vojnović Ćalić, 2014)

Својство	E	E ₁	E ₂	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
Запреминска маса након 7 дана, γ_m (kg/m^3)	2171	2139	2249	2101	2083	1611	1650
Запреминска маса након 28 дана, γ_m (kg/m^3)	2138	2067	2156	2059	2065	1555	1606

На основу резултата испитивања након 28 дана, поређењем забележених вредности у односу на еталон E, може се приметити:

- примена суперпластификатора, полимерног латекса и синтетичких влакана утиче на промену вредности запреминске масе серија E₁ и E₂ – серија E₁ бележи пад од 3,3% , док серија E₂ бележи раст од 0,8%;
- серије M₁ и M₂, са агрегатом од дробљене опеке, бележе пад запреминских маса од 3,7 % и 3,4%, респективно;
- запреминске масе серија M₃ и M₄, са агрегатом у виду експандиране глине, бележе значајан пад од 27,3 и 24,9 % , респективно (Слика 52).

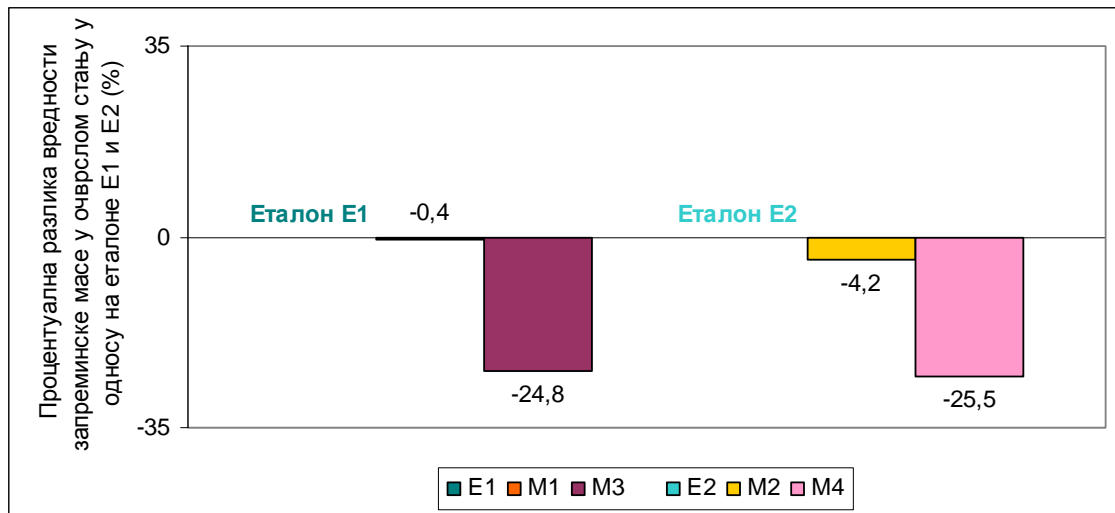


Слика 52 Процентуална разлика вредности запреминске масе након 28 дана у односу на еталон Е

Поређењем вредности испитивања запреминских маса након 28 дана, у односу на еталоне са речним песком E_1 и E_2 може се уочити:

- серије са дробљеном опеком бележе пад вредности од 0,4% - серија са полипропиленским влакнима M_1 , и од 4,2% - серија са поливинил-алкохолним влакнима M_2 ;
- серије са експандираном глином бележе пад вредности од 24,8% - серија са полипропиленским влакнима M_3 , и од 25,5% - серија са поливинил-алкохолним влакнима M_4 (Слика 53).

Такође се може приметити да су серије са поливинил-алкохолним влакнима нешто виших вредности запреминске масе од серија са полипропиленским влакнима за 4,3%, 0,3% и 3,3% код серија са речним песком, дробљеном опеком и експандираном глином, респективно.

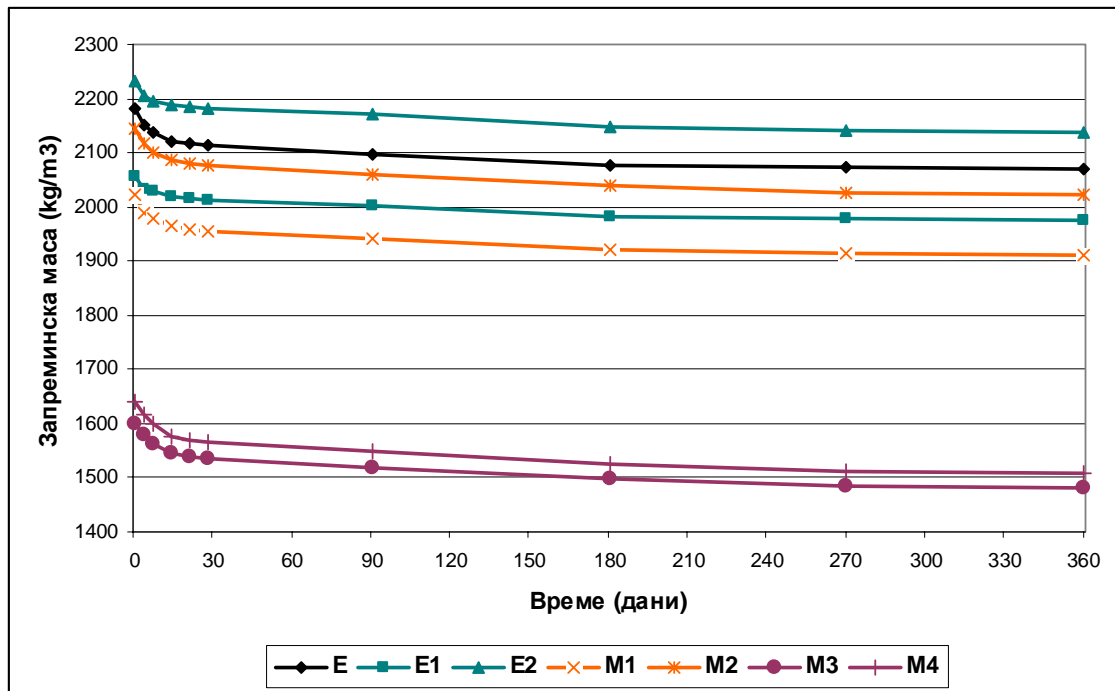


Слика 53 Процентуална разлика вредности запреминске масе након 28 дана у односу на еталон E₁ и E₂

Пад вредности запреминске масе се може пратити током 360 дана поређењем забележених вредности опитних тела која су намењена испитивању скупљања (без масе репера) (Табела 28, Слика 54).

Табела 28 Резултати испитивања запреминске масе очврслог малтера на узорцима који су намењени испитивању скупљања

Својство	Старост	E	E ₁	E ₂	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
Запреминска маса, $\gamma_m(\text{kg/m}^3)$	0 дана	2182	2055	2231	2021	2143	1598	1641
	4 дана	2152	2034	2206	1989	2116	1581	1617
	7 дана	2139	2028	2196	1978	2102	1564	1600
	14 дана	2122	2018	2187	1964	2086	1545	1577
	21 дана	2116	2015	2185	1959	2081	1540	1570
	28 дана	2113	2013	2182	1956	2077	1535	1566
	90 дана	2098	2002	2170	1943	2061	1519	1549
	180 дана	2078	1982	2149	1921	2038	1498	1526
	270 дана	2072	1979	2140	1915	2026	1483	1511
	360 дана	2069	1975	2138	1912	2024	1481	1508



Слика 54 Пад вредности запреминске масе током времена

IV.2.4.2.2 Чврстоћа при савијању

С обзиром на тему докторске дисертације која се бави фасадним елементима, од великог значаја је испитивање чврстоћа при савијању, јер најкритичнија оптерећења представљају она од ветра. У оквиру овог истраживања, испитивање се врши према стандарду SRPS EN 1015-11 (2008) на призматичним узорцима димензија 4 x 4 x 16 cm при старости од 7 и 28 дана, уз помоћ стандардне лабораторијске пресе (Слика 55).

Вредност чврстоће при савијању рачуна се према изразу:

$$\Delta f_{zs} = \frac{3 \cdot l \cdot P_{gr}}{2 \cdot a^3}$$

где је:

f_{zs} – чврстоћа при савијању (MPa),

l – размак између ослонаца (mm), у овом случају $l=106,7$ mm,

P_{gr} – сила лома (гранична сила притиска) (N),

a – страница попречног пресека (mm), у овом случају $a = 40$ mm.



Слика 55 Испитивање чврстоће при савијању призматичних узорака: а) пре наношења оптерећења, б) након лома

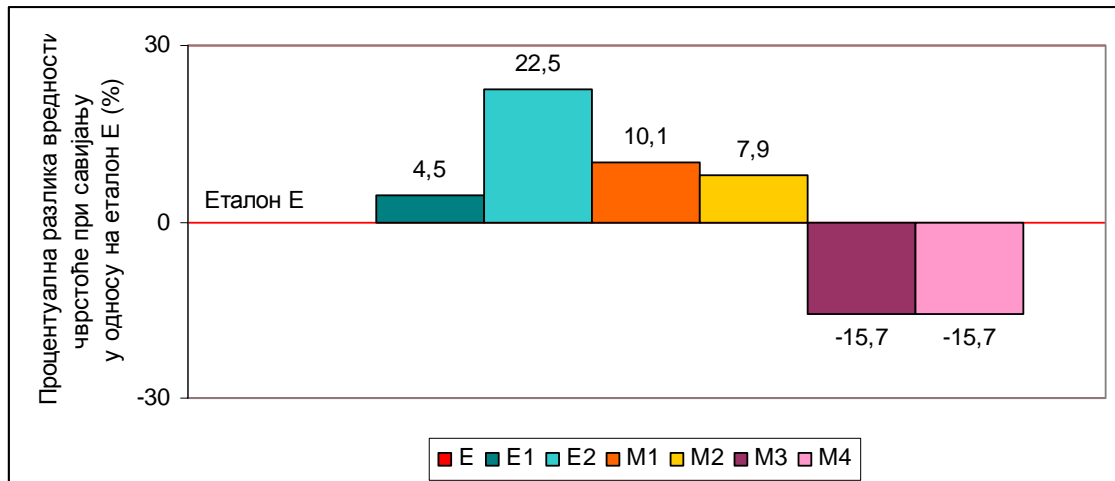
У оквиру Табеле 29 су представљени резултати испитивања чврстоће при савијању свих седам серија малтера у старости од 7 и 28 дана.

Табела 29 Резултати испитивања чврстоће при савијању током времена

Својство	Е	Е ₁	Е ₂	М ₁	М ₂	М ₃	М ₄
Чврстоћа при савијању након 7 дана, f_{zs} (МПа)	6,8	7,2	8,0	7,2	6,8	5,9	6,0
Чврстоћа при савијању након 28 дана, f_{zs} (МПа)	8,9	9,3	10,9	9,8	9,6	7,5	7,5

На основу резултата испитивања коначних чврстоћа при савијању, поређењем забележених вредности у односу на еталон Е, може се приметити:

- примена влакана, суперпластификатора и полимерног латекса узрокује пораст вредности од 4,5% и 22,5% код серија Е₁ – са полипропиленским, и Е₂ – са поливинил-алкохолним влакнима, респективно;
- серије са дробљеном опеком М₁ и М₂ бележе раст вредности од 10,1% и 7,9%, респективно;
- серије са експандираном глином М₃ и М₄ бележе уједначен пад вредности од 15,7 % (Слика 56).

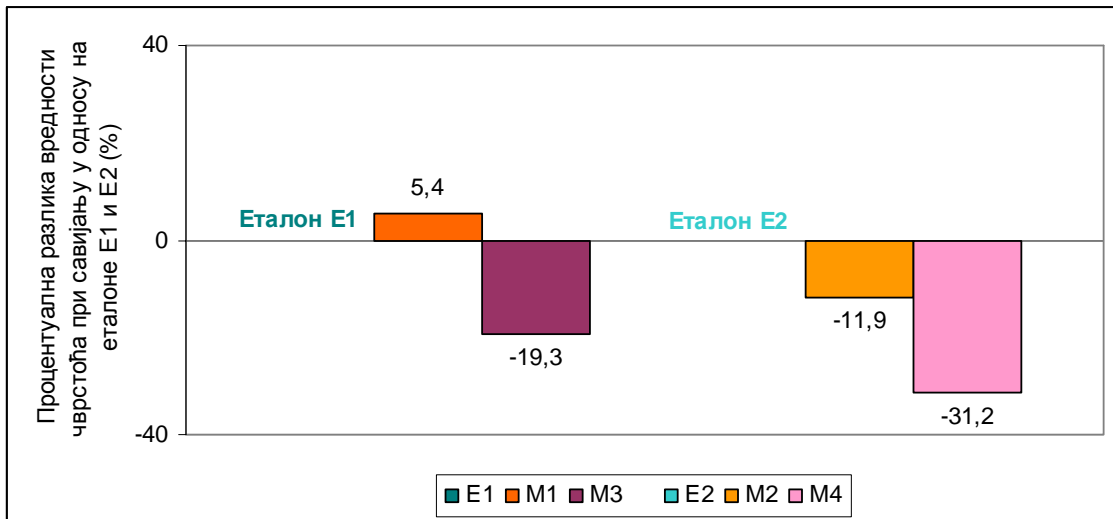


Слика 56 Процентуална разлика вредности чврстоће при савијању након 28 дана у односу на еталон E

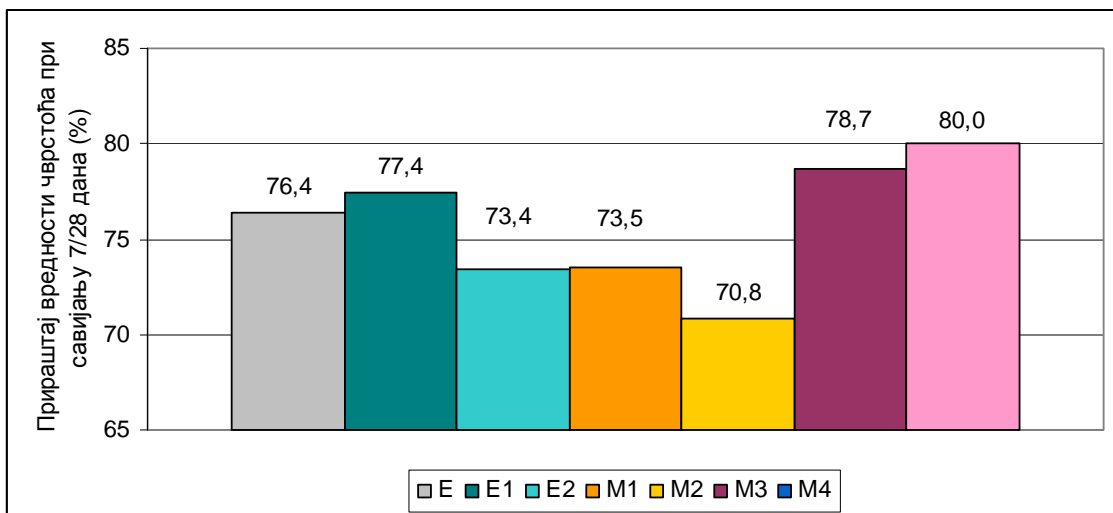
Поређењем коначних вредности испитивања чврстоћа при савијању у односу на еталоне са речним песком E_1 и E_2 може се уочити:

- серије са дробљеном опеком бележе раст од 5,4% – серија са полипропиленским влакнима M_1 , али и пад од 11,9% – серија са поливинил-алкохолним влакнима M_2 ;
- серије са експандираном глином бележе пад вредности од 19,3% – серија са полипропиленским влакнима M_3 , и од 31,2% – серија са поливинил-алкохолним влакнима M_4 (Слика 57).

Такође се може приметити неуједначен утицај различитих влакана код кополита са истим агрегатом. Код серија са речним песком употреба поливинил-алкохолних влакана доприноси порасту вредности од 17,2%, код серија са дробљеном опеком употреба полипропиленских влакана бележи раст од 2,0%, док су код серија са експандираном глином вредности уједначене.



Слика 57 Процентуална разлика вредности чврстоће при савијању након 28 дана у односу на еталон E₁ и E₂



Слика 58 Прираштај вредности чврстоћа при савијању након 7 дана у односу коначне вредности

На приказаном дијаграму (Слика 58) може се пратити прираштај вредности раних чврстоћа при савијању – након 7 дана. Генерално гледано, композити са дробљеном опеком бележе најнижи прираштај – 70,8% и 73,5%, затим еталони са речним песком – 73,4%, 76,4% и 77,4%, док највиши прираштај остварују композити са експандираном глином – 78,7 и 80%.

У оквиру Сlike 59 приказане су површине лома узорака са различитом врстом употребљеног агрегата, на којима се може уочити и остварена хомогеност малтерских смеша.



Слика 59 Површина лома: а) узорак са речним песком E_1 , б) узорак са речним песком и дробљеном опеком M_1 , в) узорак са експандираном глином M_3

IV.2.4.2.3 Чврстоћа при притиску

Чврстоћа при притиску се сматра најзначајнијим механичким својством малтера. Ова карактеристика зависи од више утицајних фактора: врсте и количине примењеног везива, количине воде, од врсте, количине и гранулометријског састава агрегата, начина справљања и уграђивања, услова средине и слично (Muravljov, 1983). У оквиру експерименталног истраживања, испитивање се вршило према стандарду SRPS EN 1015-11 (2008) на деловима призми – полуткама, преосталим након испитивања чврстоћа при савијању. Узорци су испитивани при старостима од 7 и 28 дана на стандардној лабораторијској преси (Слика 60).

Вредност чврстоће при притиску срачунава се према изразу:

$$f_p = \frac{P_{gr}}{A_0}$$

где је:

f_p – чврстоћа при притиску (МПа),

P_{gr} – сила лома (гранична сила притиска) (N),

A_0 – површина попречног пресека (mm^2), у овом случају $A_0 = 4 \times 4 = 1600 \text{ mm}^2$.



Слика 60 Испитивање чврстоће при притиску на полуткама призматичних узорака

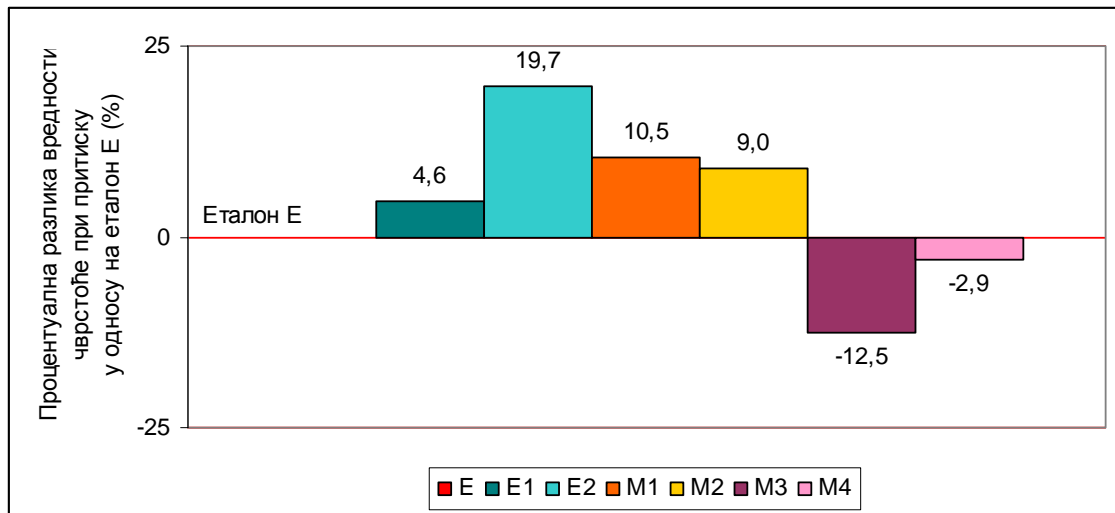
У оквиру Табеле 30 приказани су резултати испитивања чврстоће при притиску на узорцима свих седам серија малтера при старости од 7 и 28 дана.

Табела 30 Резултати испитивања чврстоће при притиску током времена

Својство	Е	Е ₁	Е ₂	М ₁	М ₂	М ₃	М ₄
Чврстоћа при притиску након 7 дана, f_p (МПа)	44,8	48,4	59,1	49,4	49,5	45,5	49,7
Чврстоћа при притиску након 28 дана, f_p (МПа)	61,0	63,8	73,0	67,4	66,5	53,4	59,2

На основу резултата испитивања коначних чврстоћа при притиску, поређењем забележених вредности у односу на еталон Е, може се приметити:

- примена влакана, суперпластификатора и полимерног латекса узрокује пораст вредности од 4,6% и 19,7% код серија Е₁ – са полипропиленским, и Е₂ – са поливинил-алкохолним влакнима, респективно ;
- серије са дробљеном опеком М₁ и М₂ бележе раст вредности од 10,5% и 9,0%, респективно;
- серије са експандираном глином М₃ и М₄ бележе пад вредности од 12,5 % и 2,9% , респективно (Слика б1).



Слика 61 Процентуална разлика вредности чврстоће при притиску након 28 дана у односу на еталон Е

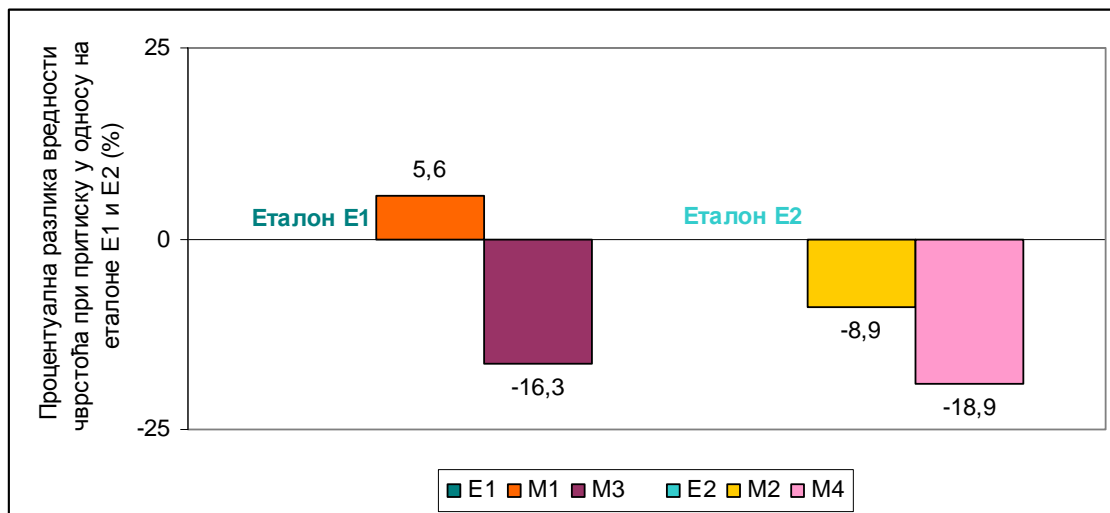
Поређењем коначних вредности испитивања чврстоћа при притиску, у односу на еталоне са речним песком E_1 и E_2 може се уочити:

- серије са дробљеном опеком бележе раст од 5,6% – серија са полипропиленским влакнима M_1 , али и пад од 16,3% – серија са поливинил-алкохолним влакнима M_2 ;
- серије са експандираном глином бележе пад вредности од 8,9% – серија са полипропиленским влакнима M_3 , и од 18,9% – серија са поливинил-алкохолним влакнима M_4 (Слика 62).

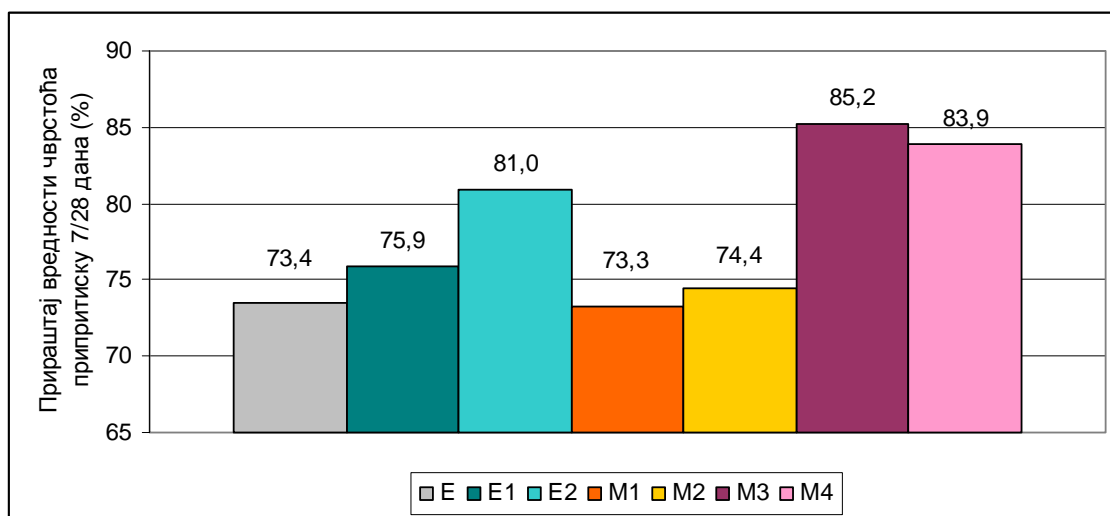
Такође се може приметити неуједначен утицај различитих влакана код копозита са истим агрегатом. Поредићи ове серије, код серија са дробљеном опеком употреба полипропиленских влакана доприноси порасту вредности од 1,3%, док код осталих серија серија употреба поливинил-алкохолних влакана бележи раст од 12,6% и 10,9% код серија са речним песком и експандираном глином, респективно.

На приказаном дијаграму (Слика 63) може се пратити прираштај вредности раних чврстоћа при притиску – након 7 дана. Генерално гледано, композити са дробљеном опеком бележе најнижи прираштај – 73,3% и 74,4%. Сличан

прираштај има и еталон E – 73,4%. Следе вредности еталона E₁ и E₂ од 75,9% и 81 %, док највиши прираштај остварују композити са експандираном глином – 83,9% и 85,2%.



Слика 62 Процентуална разлика вредности чврстоће при притиску након 28 дана у односу на еталон E₁ и E₂



Слика 63 Прираштај вредности чврстоћа при притиску након 7 дана у односу коначне вредности

IV.2.4.2.4 Упијање воде

Упијање (апсорпција) воде је својство које је важно испитати код малтера који су изложени спољашњим утицајима. Испитивање упијања воде под атмосферским притиском је вршено у води из градског водовода у свему према SRPS B.B8.010 (1980). Опит је спроведен након неге од 28 дана на епруветама димензија 4 x 4 x 16 cm намењеним испитивању отпорности при дејству мраза.

Пробна тела су првобитно сушена у сушници на температури од 105 ± 5 °C до константне масе, а затим охлађена у ексикатору. Након одређивања масе у сувом стању, узорци су потапани у суд са водом до 1/4 своје висине. После 1 h суд је допуњен водом до половине висине епрувета, након 2 h до 3/4 висине, и после 22 h тела су потпуно потопљена у воду. По истеку 24 h од почетка потапања, пробна тела су први пут мерена. Мерење се даље вршило свака 24 h, до потпуног засићења, односно до константне масе m_v (Слика 64).



Слика 64 Испитивње упијања воде:

а) сушница, б) ексикатор, в) потапање узорака у воду

Упијање воде рачуна се према обрасцима:

$$U = m_v - m_s$$

$$U_v = \frac{U}{m_s} \cdot 100$$

где је:

U_v - упијање воде у процентима масе (g),

U - повећање масе после потапања (%),

m_s - маса сувог пробног тела (g),

m_v - маса водом засићеног пробног тела (g).

У оквиру Табеле 31 приказани су резултати испитивања упијања воде на узорцима свих седам серија малтера.

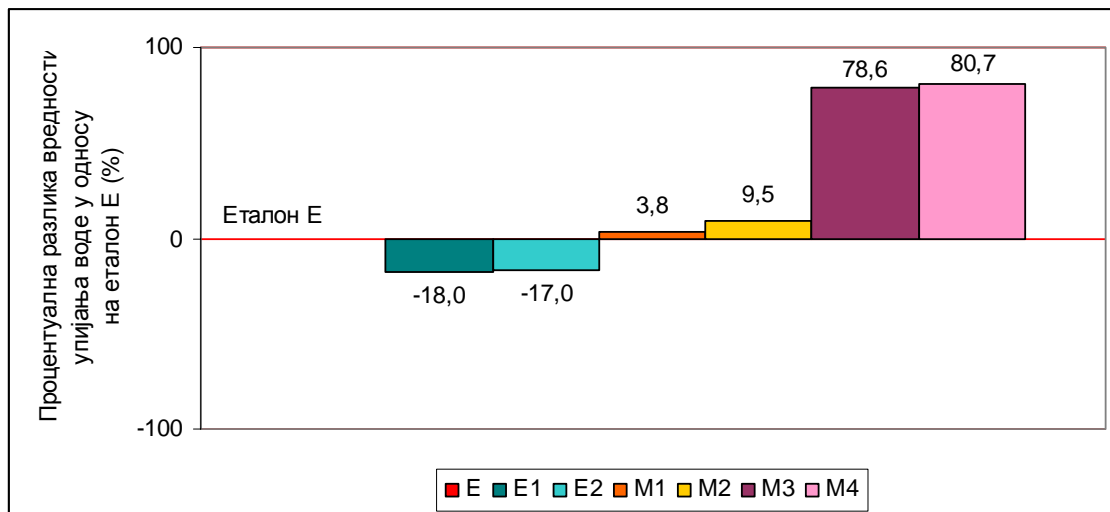
Табела 31 Резултати испитивања упијања воде малтерских смеша након 28 дана (Vojnović Čalić, Jevtić i Krstić-Furundžić, 2015)

Својство	Е	Е ₁	Е ₂	М ₁	М ₂	М ₃	М ₄
Запреминска маса сувих узорака, $\gamma_{m,s}$ (kg/m ³)	2066	1985	2064	1956	1920	1422	1439
Запреминска маса водом засићених узорака, $\gamma_{m,v}$ (kg/m ³)	2236	2119	2205	2123	2093	1631	1653
Упијање воде у процентима масе, U_v (%)	8,23	6,75	6,83	8,54	9,01	14,70	14,87

На основу резултата испитивања упијања воде, поређењем забележених вредности у односу на еталон Е, може се приметити:

- примена влакана, суперпластификатора и полимерног латекса узрокује пад вредности за 18,0% и 17,0% код серија Е₁ – са полипропиленским, и Е₂ – са поливинил-алкохолним влакнима, респективно ;
- серије са дробљеном опеком М₁ и М₂ бележе пораст вредности од 3,8% и 9,5%, респективно;

- серије са експандираном глином M_3 и M_4 бележе пораст вредности од 78,6 % и 80,7% , респективно (Слика 65).



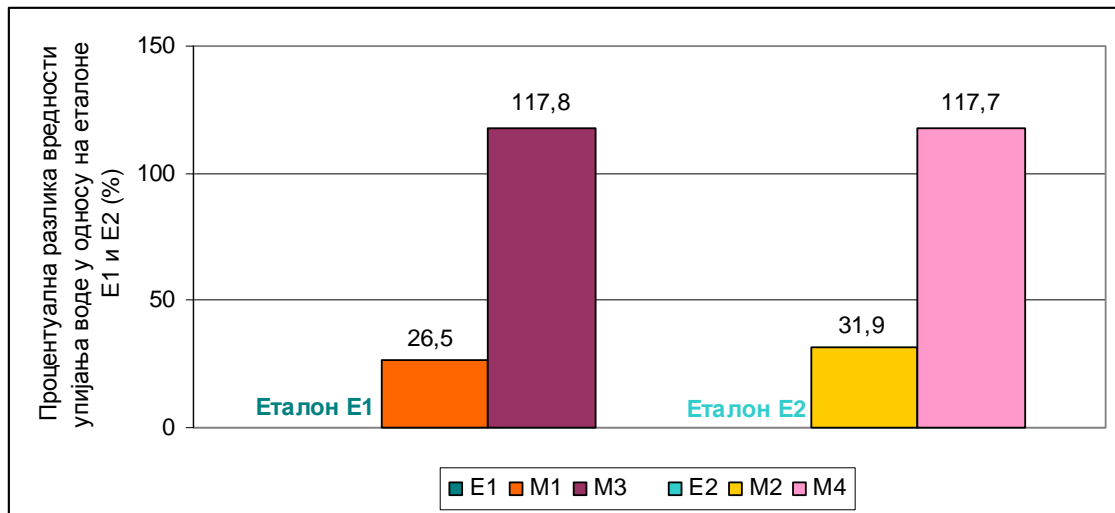
Слика 65 Процентуална разлика вредности упијања воде у односу на еталон E

Поређењем вредности упијања воде, у односу на еталоне са речним песком E_1 и E_2 може се уочити:

- серије са дробљеном опеком бележе пораст од 26,5% - серија са полипропиленским влакнима M_1 , али и пад од 31,9% - серија са поливинил-алкохолним влакнима M_2 ;
- серије са експандираном глином бележе пораст вредности од 117,8% - серија са полипропиленским влакнима M_3 , и од 117,7% - серија са поливинил-алкохолним влакнима M_4 , захваљујући високом упијању самог агрегата (Слика 66).

Примена поливинил-алкохолних у односу на полипропиленска влакана доприноси порасту вредности упијања воде од 1,0% .

Разматрајући запреминску масу узорака у сувом стању може се закључити да се малтери M_1 - M_4 могу класификовати у лаке композите, са запреминском масом $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$ (SRPS EN 206-1, 2011).



Слика 66 Процентуална разлика вредности упијања воде у односу на еталоне E₁ и E₂

IV.2.4.2.5 Отпорност при дејству мрза

Код малтера који се примењују у спољној средини, важно је размотрити њихову отпорност при дејству мрза. Ово својство у великој мери зависи од компактности очврслог малтера, односно од његове структуре, односа везива и агрегата, порозности и слично. Од утицаја су такође уградљивост и обрадљивост малтерске смеше, јер се штетно деловање мрза најпре испољава на местима на којима није остварена оптимална хомогеност очврслог малтера (шупљине, поре, пукотине) (Muravlјov, 1983).

Отпорност при дејству мрза је испитана у сагласности са стандардом SRPS U.M8.002 (1997). Опитна тела димензија 4 x 4 x 16 cm су након неге од 28 дана засићена водом до константне масе и подвргнута циклусима наизменичног смрзавања на ваздуху на -20 ± 2 °C (4h) (Слика 67) и одмрзавања у води на $+20 \pm 3$ °C (4h). Након 25 описаних циклуса спроведено је испитивање чврстоћа при савијању и притиску узорка према стандарду SRPS EN 1015-11 (2008).



Слика 67 Расхладна комора за замрзавање узорака

У оквиру овог истраживања, отпорност малтера при дејству мраза се одређује из односа вредности чврстоћа при притиску при еквивалентној старости и лабораторијског испитивања опитних тела након 25 циклуса смрзавања-одмрзавања. Еквивалентна старост узорака се одређује ради успореног прираштаја чврстоћа при притиску за време смрзавања. За три циклуса смрзавања и одмрзавања дневно, старост узорака се увећава према изразу (SRPS U.M1.016, 1992):

$$T_e = a + 0,2 \cdot n \text{ (циклус } 4 \text{ h} + 4 \text{ h)}$$

где је:

T_e – еквивалентна старост (дани),

a – старост узорака на почетку смрзавања (дани),

n – број циклуса наизменичног смрзавања и одмрзавања.

Имајући у виду увећање старости према претходном изразу, чврстоћа при притиску при еквивалентној старости – у тренутку испитивања, је утврђена према образцу СЕВ-FIP Model Code 1990 (Comité Euro-International du Béton, 1993):

$$f_p(t) = f_p \cdot e^{s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0.5} \right]}$$

где је:

$f_p(t)$ – средња вредност чврстоће при притиску (МПа) при старости бетона t (дани),

f_p – средња вредност чврстоће при притиску (МПа) након 28 дана,

t – старост бетона (дани),

s – коефицијент који зависи од класе цемента, $s = 0,20-0,38$ (за 42,5R, $s = 0,2$).

Установљено је да је овај образац даје одговарајуће вредности и за композите са агрегатом од дробљене опеке (Јанковић и др., 2011).

Отпорност малтера при дејству мраза се одређује из односа чврстоће при притиску опитних тела изложених смрзавању и одмрзавању и опитних тела за упоређење. Овај однос се изражава у процентима преко израза (SRPS U.M8.002, 1997):

$$\Delta m = \frac{f_{p,m}}{f_{p,e}} \cdot 100$$

где је:

Δm – отпорност малтера према дејству мраза (%),

$f_{p,m}$ – чврстоћа при притиску након дејства мраза (МПа),

$f_{p,e}$ – чврстоћа при притиску тела за упоређење (МПа).

У Табели 32 су приказани резултати испитивања отпорности малтера при дејству мраза разматрањем чврстоћа при притиску.

Отпорност при дејству мраза предметних малтера испитивањем чврстоћа при савијању се одређује из односа рачунских вредности чврстоћа узорака при еквивалентној старости и лабораторијског испитивања призматичних тела након 25 циклуса мраза.

Чврстоће при савијању при еквивалентној старости су одређене на основу чврстоћа при притиску, односно апроксимације њиховог односа. Однос чврстоћа

f_{zs}/f_p је разматран од стране великог броја аутора. Истраживања су, између осталог, утврдила да се коефицијент f_{zs}/f_p креће у границама од 0,1-0,3, односно чврстоћа при савијању представља 10-30% вредности чврстоће при притиску (Popovics, 1998).

Табела 32 Утврђивање отпорности при дејству мрза
испитивањем чврстоћа при притиску

Својство	Е	Е ₁	Е ₂	М ₁	М ₂	М ₃	М ₄
Чврстоћа при притиску при еквивалентној старости, $f_{p,e}$ (МПа)	64,2	67,0	76,6	70,6	69,7	55,5	62,4
Чврстоћа при притиску након дејства мрза, $f_{p,m}$ (МПа)	52,7	53,5	64,8	57,7	56,1	47,1	53,5
Отпорност при дејству мрза, (%)	82,1	79,8	84,6	81,7	80,5	84,9	85,7

Такође је разматран однос који повезује два својства изразом $f_{zs} = b \cdot f_p^n$, где су b (0,33-0,94) и n (1/2 или 2/3) коефицијенти који зависе од фактора попут чврстоћа, својстава агрегата, примењених адитива, влажности узорака, уградње, неге, геометрије узорака и слично (Ahmed, Mallick & Hasan, 2014). Тако на пример, *American Concrete Institute [ACI] Committee 318-02* (2002) предлаже израз $f_{zs} = 0,62 \cdot f_p^{1/2}$ (МПа), док *ACI Committee 330* (1992) предлаже $f_{zs} = 0,445 \cdot f_p^{2/3}$ (МПа) за бетоне стандардне запреминске масе.

Уколико предложени коефицијент b није у одговарајућој корелацији са резултатима истраживања, могуће га је ближе одредити у односу на забележене вредности (Salem, Burdette & Jackson, 2003). У односу на резултате испитивања, од израза овог типа најприближнију коорелацију показују $f_{zs} = 0,566 \cdot f_p^{2/3}$ ($R^2 = 0,85$) за серије са агрегатом у виду речног песка или речног песка и дробљене опеке (Е-М₂), односно $f_{zs} = 0,485 \cdot f_p^{2/3}$ ($R^2 = 0,67$) за серије са експандираном глином (М₃-М₄) (Табела 33)⁵⁴.

⁵⁴ Коефицијент детерминације R^2 (или r^2) одређује коефицијент корелације r који се по Пирсону (Pearson) тумачи на следећи начин: незнатна корелација (до 0,2), ниска корелација (0,2-0,4), умерена корелација (0,4-0,7), висока корелација (0,7-0,9) и веома висока корелација (0,9-1).

Табела 33 Утврђивање отпорности при дејству мраза
испитивањем чврстоћа при савијању

Својство	Е	Е ₁	Е ₂	М ₁	М ₂	М ₃	М ₄
Чврстоћа при савијању при еквивалентној старости, $f_{zs} = b \cdot f_p^{2/3}$, $f_{zs,e}$ (МПа)	9,1	9,3	10,2	9,7	9,6	8,2	8,9
Чврстоћа при савијању након дејства мраза, $f_{zs,m}$ (МПа)	9,0	8,4	8,9	8,0	7,9	6,6	6,8
Отпорност при дејству мраза, Δm (%)	99,1	89,9	87,1	82,5	82,3	80,5	76,4

Такође је на основу резултата испитивања, утврђен емпиријски однос између чврстоће при савијању и притиску са нешто већом корелацијом. Апроксимирани су изрази $f_z = 0,1469 \cdot f_p - 0,1113$ ($R^2 = 0,96$) за серије Е-М₂ и $f_z = 0,1352 \cdot f_p - 0,2962$ ($R^2 = 0,77$) за серије М₃-М₄ (Табела 34).

Табела 34 Утврђивање отпорности при дејству мраза
испитивањем чврстоћа при савијању

Својство	Е	Е ₁	Е ₂	М ₁	М ₂	М ₃	М ₄
Чврстоћа при савијању при еквивалентној старости, $f_{zs} = b \cdot f_p + a$, $f_{zs,e}$ (МПа)	9,3	9,7	11,1	10,3	10,1	7,2	8,1
Чврстоћа при савијању након дејства мраза, $f_{zs,m}$ (МПа)	9,0	8,4	8,9	8,0	7,9	6,6	6,8
Отпорност при дејству мраза, Δm (%)	96,6	86,3	79,9	77,7	78,2	91,7	83,9

Ради провере резултата, разматра се остварени однос f_{zs}/f_p на основу резултата сопствених истраживања (види одељак V.1.1). Уз претпоставку да са порастом чврстоће при притиску опада однос f_{zs}/f_p (Price, 1951, citirano u Ghosh, 2008) са довољном сигурношћу се може усвојити однос од 0,150 за серије Е, Е₁ и Е₂, 0,145 за серије М₁ и М₂, и 0,140 за серије М₃ и М₄ (Табела 35).

Табела 35 Утврђивање отпорности при дејству мраза
испитивањем чврстоћа при савијању

Својство	Е	Е ₁	Е ₂	М ₁	М ₂	М ₃	М ₄
Чврстоћа при савијању при еквивалентној старости, $f_{zs} = a \cdot f_p, f_{zs,e}$ (МПа)	9,6	10,0	11,5	10,2	10,2	7,8	8,7
Чврстоћа при савијању након дејства мраза, $f_{zs,m}$ (МПа)	9,0	8,4	8,9	8,0	7,9	6,6	6,8
Отпорност при дејству мраза, Δm (%)	93,5	83,6	77,5	78,4	77,4	84,6	78,2

Као услов отпорности цементних композита на дејство мраза углавном се усваја одржање чврстоће при притиску од 75% (SRPS U.M1.016, 1992), Након 25 циклуса смрзавања и одмрзавања, код опитних тела није уочен губитак масе. Приликом визуелног прегледа није примећено љуштење нити прслине на површини узорака. На основу резултата испитивања може се уочити :

- након испитивања отпорности при дејству мраза све серије малтера су задржале чврстоћу при притиску и савијању у проценту вишем од 75%.

IV.2.4.2.6 Брзина простирања ултразвука

Одређивање брзине простирања ултразвука се приликом предметног истраживања испитивало опционо, ради оквирног утврђивања квалитета цементног композита. Ово својство предметних малтера се испитивало у сагласности са стандардом SRPS.U.M1.042 (1998) на призматичним узоцима малтера димензија 4 x 4 x 16 cm.

Ултразвучни уређај се састоји од генератора импулса, сонде одашиљача, сонде пријемника, појачивача електричних импулса и мерача времена (Слика 68). Генератор импулса предаје узорку импулсе лонгитудиналних осцилација преко сонде одашиљача, који се после проласка броз испитно тело дужине l , у наспрамној сонди претварају у електрични импулс. Одговарајућим електронски уређајем се мери време t од тренутка када импулс напушта одашиљач, па до тренутка када доспе до пријемника.



Слика 68 Апаратура за испитивање брзине ултразвука

Испитно место чине две равне, чисте и суве површине без видних каверни на супротним странама испитиваног елемента. Ради постизања акустичног контакта сонда – узорак, неопходно је површину испитног места у танком слоју пермазати средством за подмазивање – уз помоћ техничке (товатне) масти.

Брзина ултразвука V дата је изразом:

$$V=l/t$$

где је:

V – брзина простирања ултразвука (km/s),

l – дужина испитног тела (mm), у овом случају $l = 160$ mm,

t – време проласка ултразвука (μ s).

Резултати испитивања брзине простирања ултразвука су представљене у Табели 36.

Табела 36 Резултати испитивања брзине простирања ултразвука након 28 дана

Својство	E	E ₁	E ₂	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
Брзина простирања ултразвука након 7 дана, V (km/s)	4,11	4,12	4,36	3,98	4,08	3,69	3,64
Брзина простирања ултразвука након 28 дана, V (km/s)	4,20	4,21	4,37	4,12	4,15	3,71	3,70

На основу резултата испитивања може се уочити да:

- серије са агрегатом од експандиране глине M_3 и M_4 бележе значајан пад вредности у односу на еталон Е и остале серије, након 28 дана од 10-15,3%. Брзина проласка ултразвука од 3,5-4,5 km/s карактерише квалитет бетона који се означава као *добар* (Вјеговић, Serdar i Коžoman, 2012).

IV.2.4.2.7 Динамички модул еластичности

Одређивање динамичког модула еластичности се приликом истраживања предметне теме испитивало ради даљег одређивања статичког модула еластичности и његовог упоређења са другим материјалима. Испитивање се вршило у сагласности са стандардом SRPS.U.M1.026 (1992) на призматичним узоцима малтера димензија 4 x 4 x 16 cm.

Уређај за одређивање резонантне фреквенције се састоји од генератора фреквенције, појачивача излазних сигнала, узбуђивача титраја (сонде одашиљача), пријемника титраја (сонда пријемник), појачивач пријемних сигнала, индикатора амплитуда сигнала и подметача. Преко емисионе сонде се у епрувете уводе титраји чије фреквенције континуирано расту од најмање ка највећој вредности. Истовремено се на индикатору прати појачан излазни сигнал и утврђује резонантна фреквенција (Слика 69).



Слика 69 Апаратура за испитивање резонантне фреквенције

Израчунавање динамичког модула еластичности за лонгитудиналне титраје призматичних епрувета се врши на следећи начин:

$$E_D = 4 \cdot f^2 \cdot l^2 \cdot \gamma \cdot 10^{-6}$$

где је:

E_D – динамички модул еластичности (МПа),

f – резонантна фреквенција лонгитудиналног титраја епрувете (Hz),

l – дужина епрувете (m), у овом случају $l = 0,16$ m,

γ – запреминска маса епрувете (kg/m³).

У Табели 37 су представљени резултати испитивања динамичког модула еластичности.

Табела 37 Резултати испитивања динамичког модула еластичности

Својство	Е	Е ₁	Е ₂	М ₁	М ₂	М ₃	М ₄
Резонантна фреквенција, f (Hz)	12433	12437	12805	11968	11563	10585	10655
Динамички модул еластичности, E_D (GPa)	33,8	32,7	36,2	30,2	28,3	17,8	18,7

Веза између статичког модула еластичности E_C , одређеног методом резонанције, и динамичког модула еластичности E_D , класичних цементних композита се са довољном тачношћу може изразити у облику (Muravljov, 2010):

$$E_C = 1,25 E_D - 19 \text{ (MPa)}$$

Према овом изразу се одређује статички модул еластичности серија Е, Е₁ и Е₂ (Табела 37) .

Зависност статичког и динамичког модула еластичности, E_C и E_D , може се код лакоагрегатних композита са довољном тачношћу изразити преко односа добијеног емпиријским путем (Lukić, Radonjanin i Malešev, 2015):

$$E_C / E_D = 0,6 - 0,7$$

при чему се за потребе истраживања усваја средња вредност од 0,65. Према овом изразу се одређује статички модул еластичности серија M_1 , M_2 , M_3 и M_4 (Табела 38).

Табела 38 Статички модул еластичности

Својство	E	E ₁	E ₂	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
Статички модул еластичности, E _C (GPa)	23,2	21,9	26,2	19,6	18,4	11,6	12,1

На основу резултата испитивања може се уочити:

- серије са агрегатом од дробљене опеке (M_1 и M_2) и експандиране глине (M_3 и M_4) бележе пад вредности статичког модула еластичности у односу на серије са природним речним агрегатом (E- E₂) за 10,5-29,8% и 44,7-55,7% респективно.

Експериментална истраживања су варирањем различитих параметара попут врсте и количине цемента, водовезивног фактора и количине минералних додатака, утврдила да највећи утицај на модул еластичности има врста агрегата. На модул еластичности композита утичу модули еластичности његових компоненти и њихов запремински удео. Захваљујући нижим вредностима модула еластичности агрегата, лакоагрегатни композити имају и значајно мањи модул еластичности у односу на композит са природним агрегатом (Lukić i dr., 2015).

IV.2.4.2.8 Скупљање цементног малтера услед сушења

Под одређеним условима температуре и релативне влажности средине, долази до скупљања цементног малтера услед сушења. Одређивање овог скупљања је током експерименталног истраживања вршено према стандарду SRPS B.C8.029 (1979) на призматичним узорцима димензија 4 x 4 x 16cm. Троделни калупи су припремљени тако што су унутрашње површине првенствено премазане минералним уљем. Затим су репери са полираном главом од нерђајућег челика

утиснути у предвиђени отвор у калупу, претходно испуњен пластелином, тако да онај део који улази у малтер остане чист. Малтер је уграђуиван на вибростолу и негован по већ описаној процедури. Епрувете су први пут мерене након $72 \pm 1/2$ h што представља нулта читање, а затим после 4, 7, 14, 21 и 28 дана од завршетка израде. У случају предметног истраживања, мерење је настављено до 360 дана.



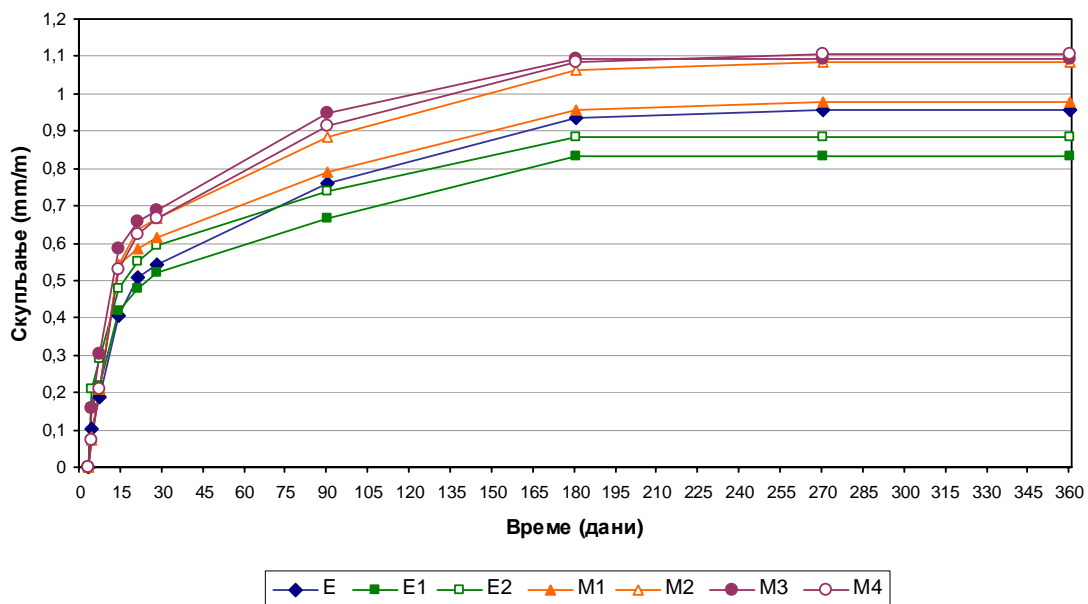
Слика 70 Припрема узорака и испитивање скупљања: а) припрема калупа, б) припремљени калупи са уграђеним реперима, в) испитивање скупљања уз помоћ компаратора, г) серија испитних узорака

Вредности скупљања се добијају одређивањем релативне промене дужине у односу на прво читање у односу на дужину призме од 0,16 m. За мерење деформација користи се компаратор за мерење промене дужине епрувета. Епрувете се постаљају у исти положај при сваком мерењу (Слика 70).

У оквиру Табеле 39 и дијаграма на Слици 71 приказани су резултати испитивања скупљања малтера у периоду од 360 дана.

Табела 39 Резултати скупљања цементног малтера услед сушења

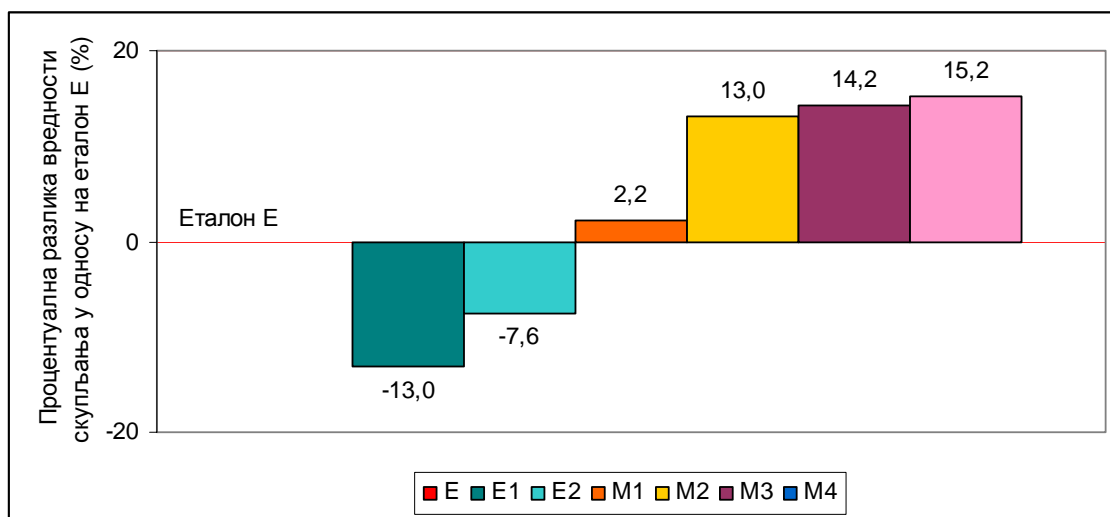
Својство	Старост	E	E ₁	E ₂	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
Скупљање (mm/m)	4 дана	0,104	0,156	0,208	0,083	0,073	0,156	0,073
	7 дана	0,188	0,219	0,291	0,208	0,208	0,302	0,208
	14 дана	0,406	0,417	0,479	0,542	0,541	0,583	0,531
	21 дана	0,510	0,479	0,552	0,583	0,635	0,656	0,625
	28 дана	0,541	0,520	0,593	0,614	0,666	0,687	0,666
	90 дана	0,760	0,667	0,740	0,791	0,885	0,948	0,916
	180 дана	0,937	0,833	0,885	0,958	1,062	1,094	1,083
	270 дана	0,958	0,833	0,885	0,979	1,083	1,094	1,104
	360 дана	0,958	0,833	0,885	0,979	1,083	1,094	1,104



Слика 71 Скупљање цементног малтера услед сушења

На основу резултата испитивања скупљања, поређењем коначних вредности (након 360 дана) у односу на еталон Е, може се приметити:

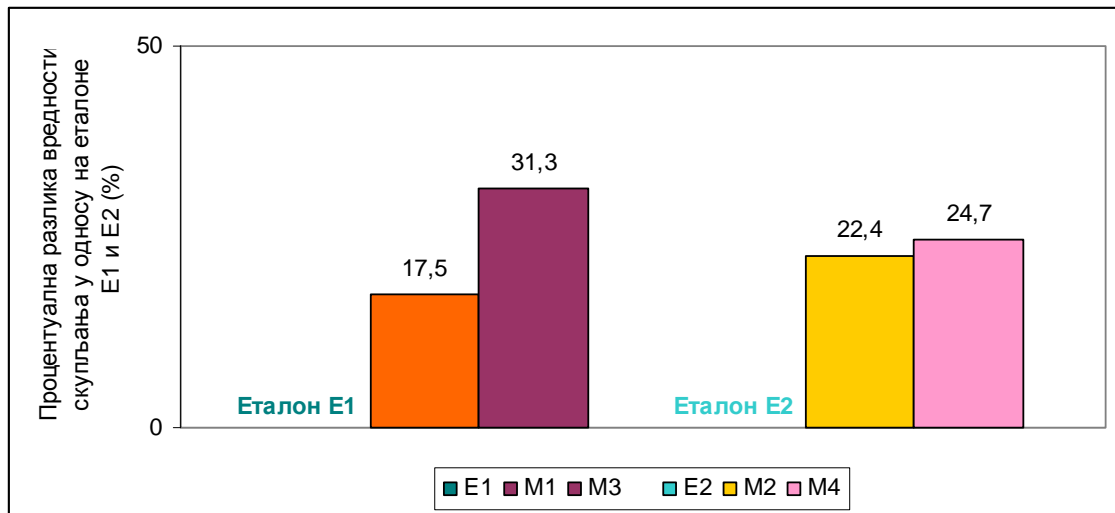
- примена влакана, суперпластификатора и полимерног латекса узрокује пад вредности за 13,0% и 7,6% код серија Е₁ – са полипропиленским, и Е₂ – са поливинил-алкохолним влакнима, респективно;
- серије са дробљеном опеком М₁ и М₂ бележе пораст вредности од 2,2% и 13,8%, респективно;
- серије са експандираном глином М₃ и М₄ бележе пораст вредности од 14,2% и 15,2% , респективно (Слика 72).



Слика 72 Процентуална разлика вредности скупљања након 360 дана у односу на еталон Е

Поређењем коначних вредности скупљања, у односу на еталоне са речним песком Е₁ и Е₂ може се уочити:

- серије са дробљеном опеком бележе пораст од 17,5% и 31,3% – серија са полипропиленским влакнима М₁ и са поливинил-алкохолним влакнима М₂, респективно;
- серије са експандираном глином бележе пораст вредности од 22,4% – серија са полипропиленским влакнима М₃, и 24,7% – серија са поливинил-алкохолним влакнима М₄ (Слика 73).



Слика 73 Процентуална разлика вредности скупљања након 360 дана у односу на еталоне E₁ и E₂

Примена поливинил-алкохолних у односу на полипропиленска влакана доприноси порасту вредности скупљања од 1,0% код серија E₂ и M₂ и 1,1% код серије M₄. Такође се може закључити да се скупљање стабилизовало након 270 дана.

IV.2.5 Друга фаза експерименталних истраживања

Током наредне серије експерименталних истраживања врше се испитивања са четири врсте лакоагрегатних малтера M₁-M₄, које су претпостављене за каснију комерцијалну употребу. Врше се испитивања:

- приањања малтера за облогу од камена;
- термичке компатибилности – приањања малтера за облогу од камена након дејства мрза.

Испитивања су вршена у Лабораторији за материјале Института за материјале и конструкције Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Припрема малтера за поменута лабораторијска испитивања је вршена истом апаратуром и по истом поступку справљања опитних призми, како је то приказано у поглављу IV.2.4.1. Једино је изостало уграђивање вибрирањем, пошто природа узорака то

није то дозвољавала. Узорци су неговани 28 дана по претходно утврђеном поступку – 7 дана под влажном саргијом и 21 дан на ваздуху у лабораторијским условима.

На основу добијених резултата, даље истраживање се фокусира на испитивање два изабрана модела фасадних панела. За наставак истраживања у спрези са каменом облогом су изабране серије M_1 и M_3 . При испитивању физичко-механичких својстава, резултати су се у највећој мери груписали према примењеном агрегату, а не према примењеним влакнима. Из тог разлога, изабране су серије са влакнима која су приступачија на домаћем тржишту, односно са полипропиленским влакнима. Вршена су испитивања:

- испитивање чврстоће при савијању композитног фасадног панела;
- испитивање граничне силе лома на месту жљеба;
- испитивање масе панела;
- испитивање појаве ефлоресценције.

Испитивање чврстоће при савијању је вршено у Лабораторији за механичка испитивања материјала Катедре за металуршко инжињерство Технолошког факултета Универзитета у Београду. Испитивање граничне силе лома на месту жљеба је остварено у у лабораторији Института за путеве Грађевинског факултета Универзитета у Београду, а остала наведена испитивања у Лабораторији за материјале Института за материјале и конструкције истог факултета.

Справљање малтерских смеша и нега су вршене по истом поступку као и справљање опитних призми (видети IV.2.4.1.1). Пошто је било неопходно справити веће количине свеже мешавине коришћена је мешалица већег капацитета - тип са непокретним лопатицама које браздају мешавину при обртању бубња (Слика 74а), и вибро-сто веће површине. Калупи су справљани од блажујке, да не би дошло до приањања малтера за калуп. Жљеб је формиран уметањем челичног флаха у калуп који у узорку прави зазор попречног пресека 3 x 11 mm, довољан за смештање планиране потконструкције. Примењен камен је квашен – потапан у воду из градског водовода непосредно пре доношења малтера и уграђиван површински сув (Слика 74б), пошто губитак воде услед капиларног упијања камена може довести до пада физичко-механичких својстава очврслог

малтера (Muravlјov, 1983). Нега узорака од 28 дана је следила претходно утврђен поступак – 7 дана под влажном саргијом и 21 дан на ваздуху у лабораторијским условима.

Резултати испитивања представљају аритметичку средину испитивања на три узорка, осим код испитивања граничне силе лома на месту жљеба на пет узорака.



Слика 74 Припрема компонентних материјала узорака:

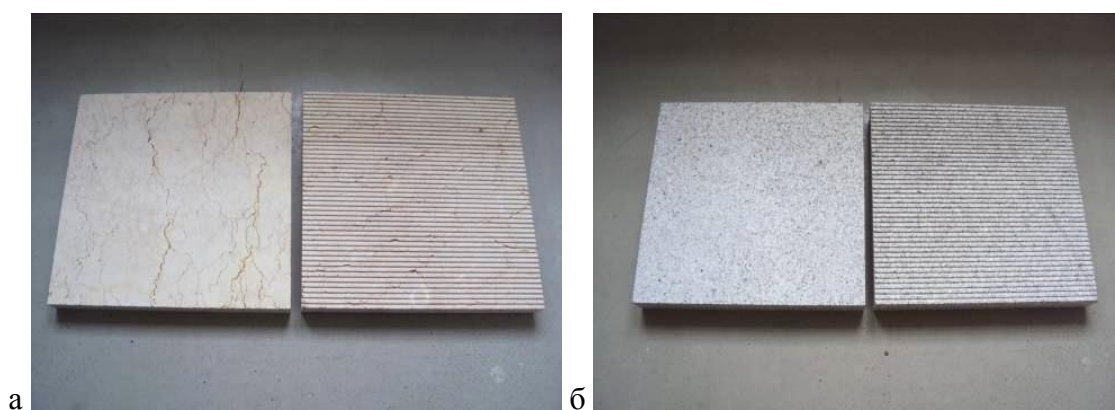
- а) справљање малтера у мешалици са непокретним лопатицама,
- б) квашење плочица од камена пре уградње

IV.2.5.1 Приањање малтера за камену облогу методом *Pull-off*

Приањање (адхезија) представља способност контактне зоне између два материјала да се одупре механичком раздвајању. Зависи од низа фактора: конзистенције малтера, врсте подлоге на коју се малтер наноси (у овом случају врсте камена), обраде површине поменуте подлоге, уградње (наношења малтера), итд. (Muravlјov, 2007).

Испитивање приањања малтера за камену подлогу је вршено у складу са стандардом SRPS EN 1015-12 (2008). Као подлога за испитивање приањања су коришћене камене плоче димензија 30 x 30 x 4 cm (Слика 75). Испитивања су

вршена са све четири врсте лакоагрегатних малтера – серије М₁-М₄. Свака мешавина малтера је нанета на по две плоче кречњака *Скржут* и две плоче гранита *Шутица*, од којих је једна плоча припремљена са контактном површином која је добијена стандардним резањем, док је друга површина припремљена са канелурама. Канелуре су ширине 3,5 mm, дубине 2 mm, на растојању од 3,5 mm и примењене уз претпоставку да ће већа контактна површина унапредити вредност напона приањања. Камене плоче су непосредно пре наношења малтера потапне у воду, а затим је сувишна вода уклоњена како би се малтерска мешавина нанела на површински суву подлогу у слоју од 10±1 mm. Након 28 дана мешовите неге, на свакој плочи је урезано 5 цилиндричних зареза који залазе и у масу камена (Слика 76). За оцену прионљивости, по стандарду SRPS EN 1015-12 (2008) су довољна 3 успешна испитивања узорака.

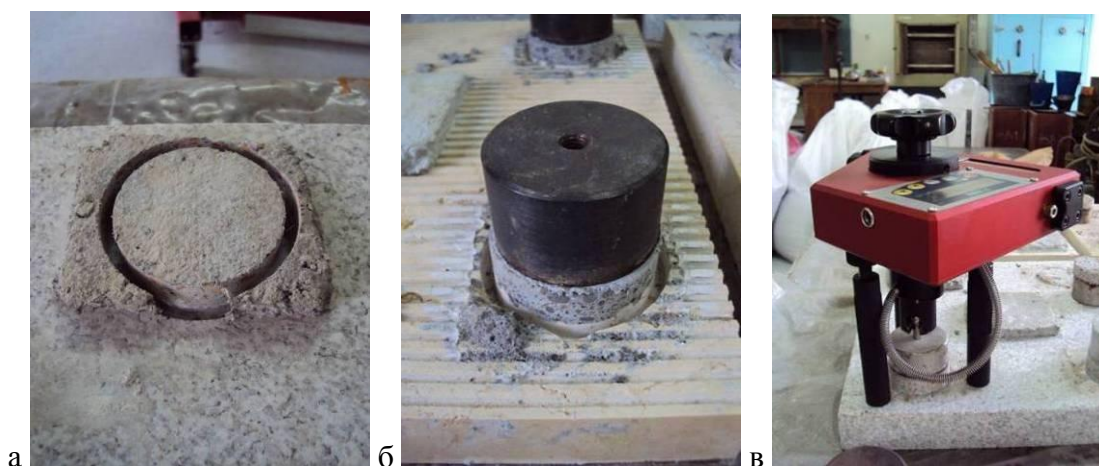


Слика 75 Подлоге од камена са резаном површином и површином са канелурама: а) кречњак *Скржут*, б) гранит *Шутица*

На површину малтера је уз помоћ епокси смоле причвршћен метални диск. Након монтирања испитне апаратуре на диск, наноси се нормална сила затезања која тежи да раздвоји два материјала. Забележене су силе лоба узорака (Слика 77).



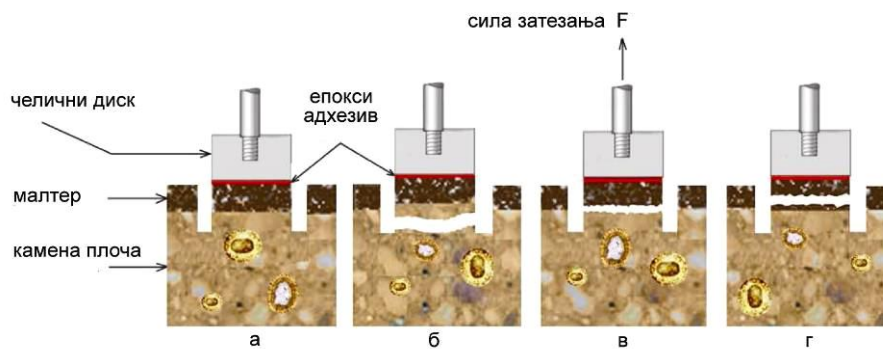
Слика 76 Све серије узорка припремљене за испитивање приањања малтера за подлогу од камена



Слика 77 Припрема и испитивање узорка: а) исецање цилиндричних зареза, б) лепљење металног диска, в) тестирање узорка методом *Pull-off*

Осим нумерички, испитивање приањања се оцењује и по типу лома (Слика 78):

- адхезиони лом – на додирној површини (по контакту) између малтера и подлоге, што значи да је приањање између малтера и камена мање од чврстоће при затезању камена и самог малтера;
- кохезиони лом преко малтера – лом у самом малтеру, пошто је чврстоћа камена при затезању већа, а адхезиона веза јача од добијене вредности испитивања;
- кохезиони лом преко подлоге (камена) – лом у самом камену како је чврстоћа малтера при затезању већа, а адхезиона веза јача од добијене вредности испитивања.



Слика 78 Тип лома: а) испитна композиција, б) кохезиони лом преко подлоге, в) адхезиони лом, г) кохезиони лом преко малтера (Szemerey-Kiss, 2012)

Стандард SRPS EN 1542 (2010) додатно предлаже опис процентуалне расподеле ових основних типова лома код мешовитог лома. Напон приањања малтера за подлогу се може изразити преко следеће једначине:

$$f_{at} = \frac{P_{gr}}{A_{at}}$$

где је:

f_{at} – напон приањања (МПа),

P_{gr} – сила лома (гранична вредност силе) (N),

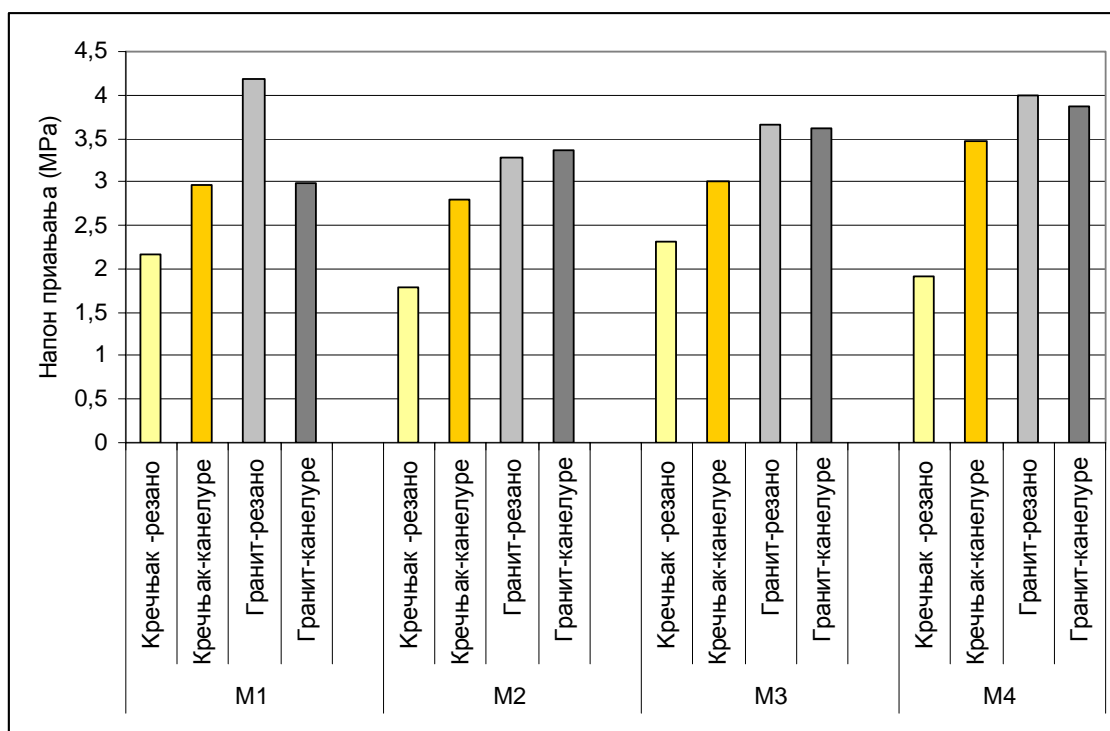
A_{at} – површина контакта малтер-камен (mm²).

Резултати испитивања приањања су приказани у оквиру Табеле 40 и Сlike 79.

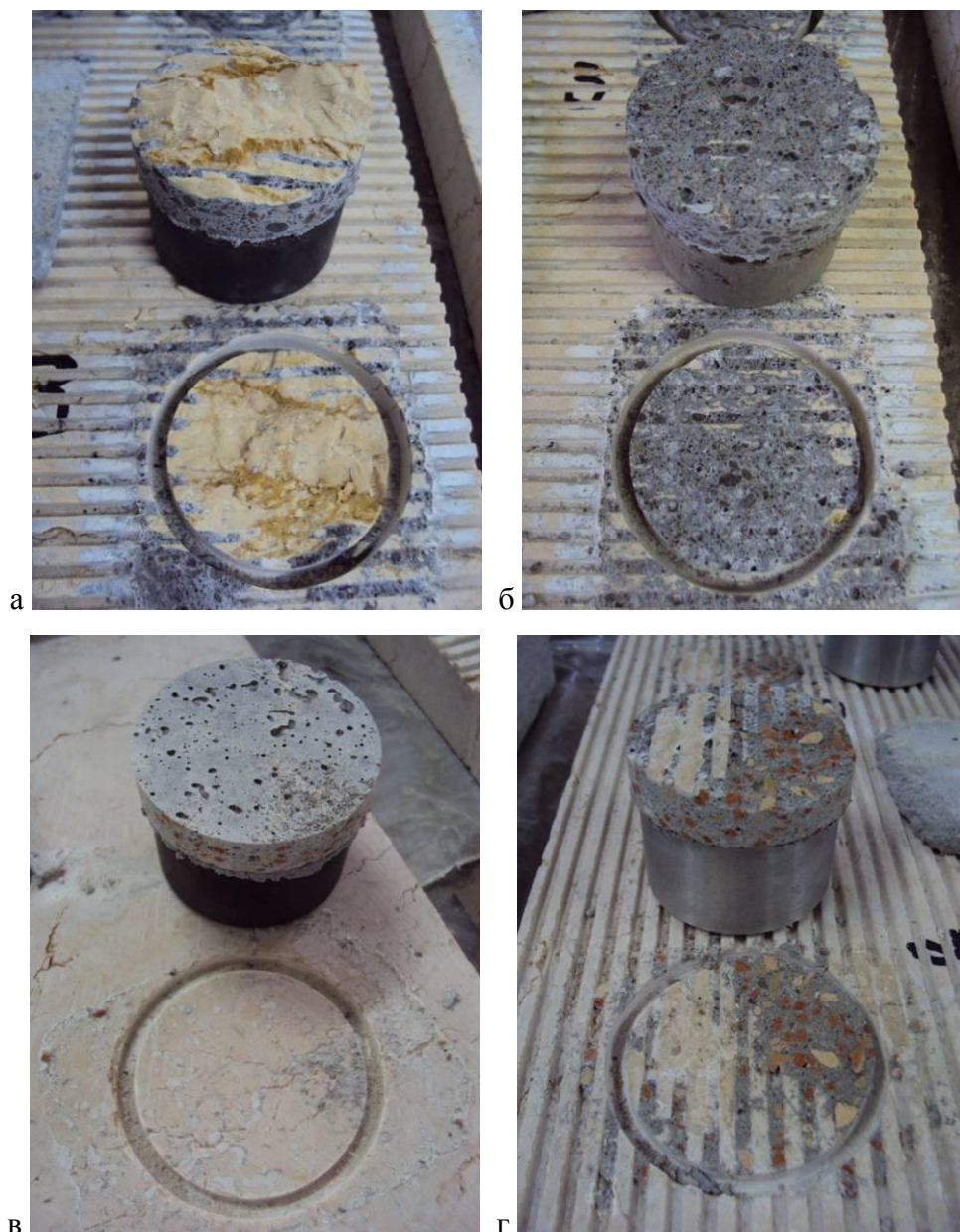
Као минимални напон приањања препоручује се вредност од 0,5 МПа, односно, препоручује се да напон приањања при адхезионом лому буде већи од чврстоће при затезању самог малтера (German Institute for Construction Engineering, 2008). У овом случају погодно је да чврстоће при затезању компонентних материјала буду веће од износа адхезије и остварење мешовитог лома.

Табела 40 Резултати испитивања адхезије методом *Pull-off*

Серија	Подлога	Тип лома (%)	Напон приањања f_{at} (МПа)	
Серија М ₁	Кречњак-резано	55а+45м	2,17	3,08
	Кречњак-канелуре	20а+80м	2,97	
	Гранит-резано	90а+10м	4,19	
	Гранит-канелуре	50а+50к	2,98	
Серија М ₂	Кречњак-резано	95а+5м	1,79	2,80
	Кречњак-канелуре	30а+50м +20к	2,79	
	Гранит-резано	95а+5м	3,27	
	Гранит-канелуре	50а+50к	3,37	
Серија М ₃	Кречњак-резано	30а+60м	2,32	3,15
	Кречњак-канелуре	5а+95м	3,00	
	Гранит-резано	70а+30м	3,66	
	Гранит-канелуре	20а+30м +50к	3,61	
Серија М ₄	Кречњак-резано	70а+30м	1,91	3,31
	Кречњак-канелуре	5а+65м +30к	3,48	
	Гранит-резано	100к	3,99	
	Гранит-канелуре	5а+5м +90к	3,86	



Слика 79 Резултати испитивања напона приањања методом *Pull-off*



Слика 80 Остварени лом узорака:

- а) кохезиони лом преко камена, б) кохезиони лом преко малтера,
 в) адхезиони лом , г) мешовити лом

Приказани резултати испитивања указују да:

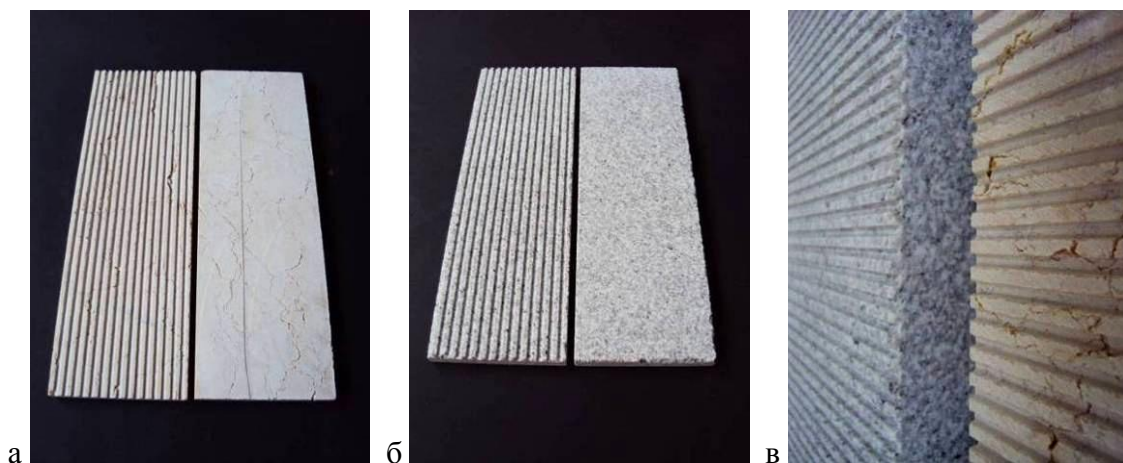
- напон прирањања код свих узорака прелази границу од препоручених минималних 0,5 МРа;
- генерално гледано, код испитиваних серија малтера преовлађујући је повољан - мешовити тип лома (Слика 80);

- неповољнији адхезиони лом се остварује само код серије M₂, код малтера нанетих на резану подлогу гранита;
- серије малтера са дробљеном опеком M₁ и M₂ постижу више вредности напона приањања за 2,3-18,2 % ,;
- подлога од гранита остварује више вредности напона приањања за 0,3-108,9 %;
- унапређење вредности напона приањања површинском обрадом камена канелурама код подлоге од кречњака износи 29,3-82,2 %, док код подлоге од гранита резултати не показују доследан тренд.

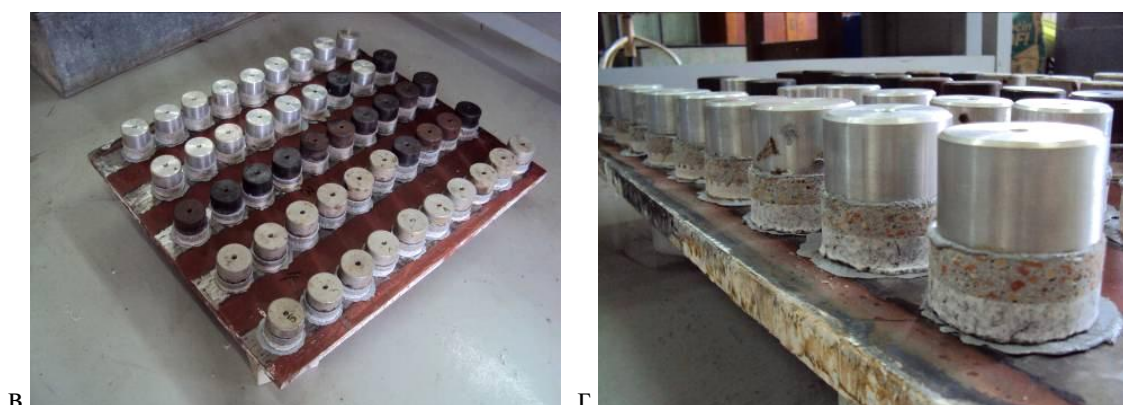
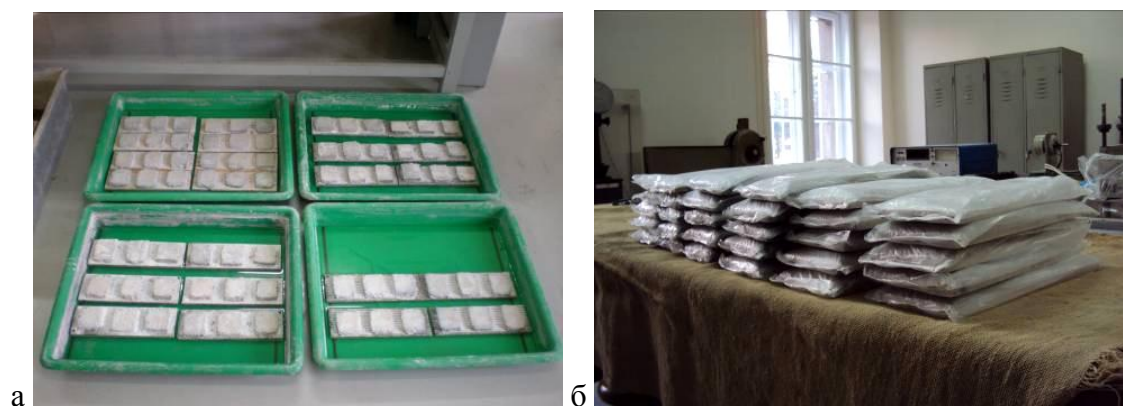
IV.2.5.2 Термичка компатибилност – испитивање приањања малтера за камену облогу након дејства мраза методом *Pull-off*

Фасадни панели су током експлоатације архитектонских објеката изложени атмосферским утицајима. Отпорност при дејству мраза, односно термичка компатибилност, склопа малтер-камен предложених панела се испитује према интерној методи ИМК, која представља модификацију стандарда SRPS EN 13687-3 (2010).

Како је у питању фасадна облога са лицем од камена и подлогом од малтера, претпостављено је да ће фасадни склоп у највећој мери упијати воду капиларно, преко обрађење површине камена. У сврху експерименталних испитивања одабрана је полирана обрада површине гранита и брушена обрада површине кречњака, јер се такве обраде препоручују у пракси. На наличја камених плочица димензија 10 x 30 x 1cm, које су као и у претходном испитивању обрађене стандардним резањем или су са канелурама (Слика 81), нанет је слој малтера у дебљини од 10±1mm. Малтер је нанет на површински суве плочице, претходно потопљене у води из градског водовода.



Слика 81 Припремљени узорци камена са резаном површином и површином са канелурама: а) кречњак *Скржут*, б) гранит *Шутица*, в) изглед површина са канелурама



Слика 82 Припрема узорака за тестирање пријањања методом *Pull-off*: а) капиларно упијање воде преко површине камена, б) полагање узорака у пластичне вреће, в) и г) узорци припремљени за испитивање

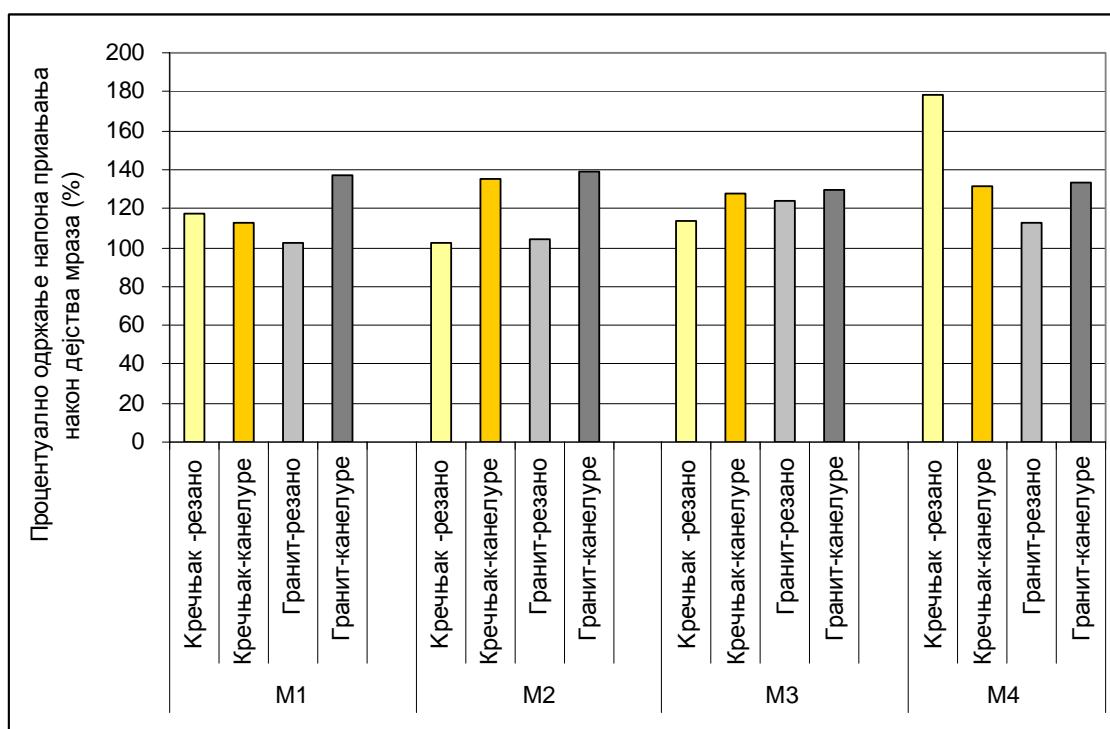
Након 28 дана мешовите неге у лабораторијским условима, узорци су потапани у посуде са водом у висини од 5 mm узорака (до половине камене плочице), да би се подстакло капиларно упијање воде преко обрађене површине камена. Након засићења, узорци су смештени у пластичне вреће да не би губили влагу и подвргнути 25 циклуса смрзавања и одмрзавања. Као и код теста изршеног на призматичним узорцима малтера, један циклус се састојао од 4 h смрзавања на ваздуху на -20 ± 2 °C и 4 h одмрзавања у води на $+20\pm 3$ °C. Након сваких 10 циклуса, узорци су визуелно испитивани како би се уочиле пукотине или љуштење узорака. Након 25 циклуса мрза, из узорака су исечена цилиндрична испитна тела (по 3) пречника 51 ± 1 mm и залепљена епокси смолом на челичну плочу преко лица од камена (Слика 82). Даље испитивање је настављено и оцењено према стандарду SRPS EN 1015-12 (2008). Уз помоћ епокси смоле метални диск је залепљен на површину малтера. Испитна апаратура је причвршћена на диск и нанета је нормална сила затезања. Забележена је сила лома.

У оквиру Табеле 41 и Сlike 83 приказани су резултати испитивања адхезије након дејства мрза..Приказани резултати испитивања указују:

- напон приањања код свих узорака и даље прелази препоручених минималних 0,5 МПа;
- генерално гледано, код испитиваних серија малтера преовлађујући је повољан – мешовити тип лома (Слика 84);
- неповољнији адхезиони лом се остварује само код серије М₂, код малтера нанетог на резану површину гранита;
- сви узорци су својим високим вредностима напона приањања показали отпорност на дејство мрза.

Табела 41 Резултати испитивања отпорности према дејству мрза
методом *Pull-off*

Серија	Подлога	Тип лома (%)	Напон приањања $f_{at,m}$ (МПа)	Задржана чврстоћа (%)
Серија М ₁	Кречњак-резано	50а+50м	2,55	117
	Кречњак-канелуре	30а+70м	3,35	113
	Гранит-резано	100к	4,30	103
	Гранит-канелуре	45а+50м+5к	4,08	137
Серија М ₂	Кречњак-резано	85а+15м	1,84	103
	Кречњак-канелуре	30а+70м	3,78	135
	Гранит-резано	95а+5м	3,40	104
	Гранит-канелуре	55а+30м+15к	4,68	139
Серија М ₃	Кречњак-резано	5а+95м	2,63	113
	Кречњак-канелуре	5а+95м	3,82	127
	Гранит-резано	100к	4,52	124
	Гранит-канелуре	25а+75м	4,67	129
Серија М ₄	Кречњак-резано	20а+80м	3,41	178
	Кречњак-канелуре	5а+90м+5к	4,58	132
	Гранит-резано	100к	4,50	113
	Гранит-канелуре	15а+50м+35к	5,15	133



Слика 83 Резултати испитивања отпорности према дејству мрза
методом *Pull-off*



а

б

в

г

Слика 84 Остварени лом узорака: а) кохезиони лом преко камена, б) кохезиони лом преко малтера, в) адхезиони лом, г) мешовити лом

IV.2.5.3 Чврстоћа при савијању композитног фасадног панела

Даља лабораторијска истраживања се фокусирају на два изабрана фасадна склопа. У састав узорака улазе гранитне плочице димензија 10 x 10 x 1 cm и две малтерске смеше са полипропиленским влакнима M_1 и M_3 . Узорци су справљени у калупима од блажујке унутрашњих димензија 10 x 60 x 3,5 cm. Камене плочице су припремљене потапањем у воду из градског водовода. Након укљањања вишка воде са плочица, оне се површински суве полажу у калуп са лицем на доле. Малтер се наноси преко плочица и уграђује у калупе на вибро-столу. Мешовита нега од 28 дана се врши по претходно утврђеном режиму (Слика 85 и 86).

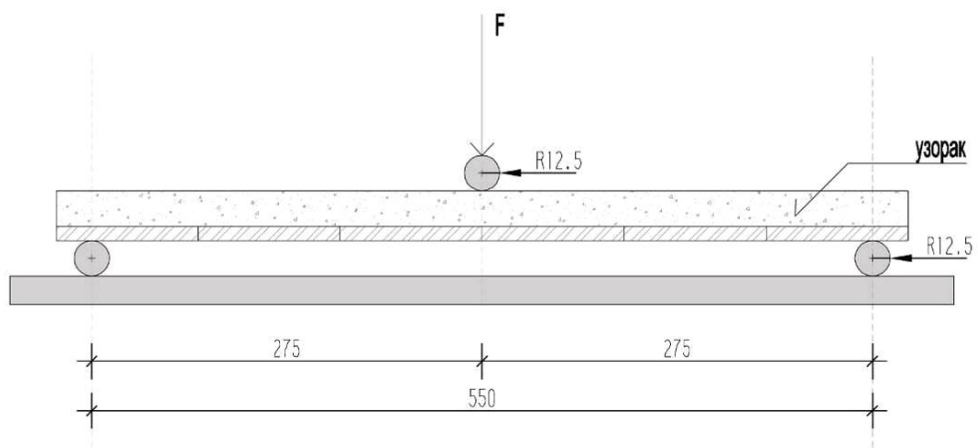


Слика 85 Припрема узорака: а) калупи са каменим плочицама на вибро-столу, б) уграђени узорци



Слика 86 Припремљени узорци

Чврстоћа при савијању композитног фасадног панела је испитивана према интерној методи ИМК, попут панела са лицем од камена и подлогом од лакоагрегатног цементног композита *Airtec Stone* произвођача Alsecco (German Institute for Construction Engineering, 2008). Узорак се преко лица од камена полаже на ослонце, јер је у том положају склоп узорка у мањој мери отпоран на оптерећење (Слика 87). Оптерећење се наноси са константним угибом од 2 mm/min (Слика 88а и б).



Слика 87 Испитна диспозиција



а



б



в

Слика 88 Испитивање чврстоће при савијању композитног фасадног панела:
а) испитна композиција, б) испитна опрема, в) лом – појава пукотине на половини
распона панела

Приликом испитивања примећује се да до лома долази тачно на средини узорака, на месту спојница између камених плочица (Слика 88в). Након очитане силе, чврстоћа при савијању се налази преко израза за силу на половони пресека (*three point bending, central point bending*):

$$f_{zs} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot d^2}$$

где је:

f_{zs} – чврстоћа при савијању (*modulus of rupture [MOR]*) (МПа),

l – размак између ослонаца (cm), у овом случају $l=550$ cm,

F – сила лома (гранична сила притиска) (kN),

b – ширина узорка (cm), у овом случају $b = 4$ cm,

d – дебљина узорка (cm), у овом случају $d = 4$ cm.

У оквиру Табеле 42 представљени су резултати испитивања чврстоћа при савијању узорака фасадних панела. На Слици 89 се може видети површина лома узорка са агрегатом од дробљене опеке (серија M_1). Дијаграми који приказују зависност угиба од силе нанете током испитивања се налазе у Прилогу 5.

Табела 42 Чврстоћа при савијању f_{zs} фасадних панела M_1 и M_3

Својство	M_1	M_3
Сила лома F (N)	718,3	553,3
Чврстоћа при савијању f_{zs} (МПа)	9,0	6,9



Слика 89 Површина лома узорка

Резултати испитивања указују:

- да су прорачунате вредности чврстоће при савијању приближне испитаним малтерским призмама мешавина M_1 (9,8 МПа) и M_3 (7,5 МПа) - што потврђује претпоставку да камена облога у виду плочице у зони затезања нема утицаја на остварене граничне напоне;
- вредност чврстоће при савијању модела M_1 је за 30,4% виша од модела M_3 .

Резултати испитивања се могу упоредити са вредностима сила притиска и сишућих сила које могу утицати на фасадни панел услед дејства ветра (Прилог 6).

IV.2.5.4 Гранична сила лома на месту жљеба

Могућност ношења фасадног панела преко жљеба и тракасте потконструкције је испитивана према интерној методи ИМК, модификацијом америчког стандарда ASTM C1354/C1354M-09 (2009). Осмишљена су опитна тела цементног композита димензија 10,0 x 20,0 x 2,5 cm са континуалним жљебом по ужој страници. Жљеб је оформљен током процеса справљања узорака уз помоћ челичног флаха дебљине 3 mm уметнутог унутар калуца од блажујке. Димензије жљеба позиционираног по средини дебљине узорка од 2,5 cm у пресеку износе 3 x 11 mm. Узорци су уграђени на вибро столу и неговани установљеним поступком -

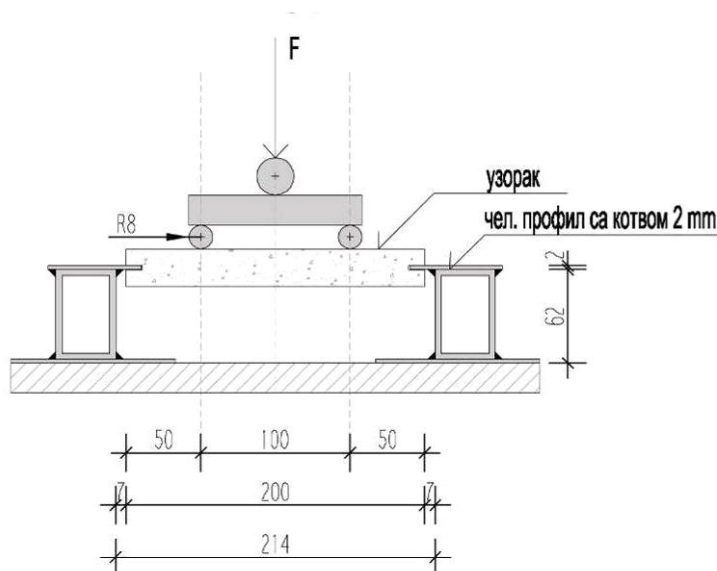
7 дана под влажном саргијом и 21 дан на ваздуху у лабораторијским условима (Слика 90).



Слика 90 Припрема узорка: а) формирање калупа, б) припрема за уградњу малтера на вибро-столу, в) уграђени узорци, г) готови узорци

Експеримент је осмишљен на узорцима од цементног малтера. Целокупна композиција подвргнута испитивању се састојала од поменутог узорка који је монтиран на две наспрамно постављене тракасте котве које су причвршћене су на јединствену подлогу. Оптерећење је наносено преко две челичне шипке од 16 mm постављене што ближе котвама, али на дистанци која није мања од збирне димензије дебљине плоче и дубине жљеба, како би се дистанцирала од очекиване косе површине лома жљеба ($>3,6$ cm), а усвојено је 5 cm (Слика 91). Сила лома сваког узорка је забележена.

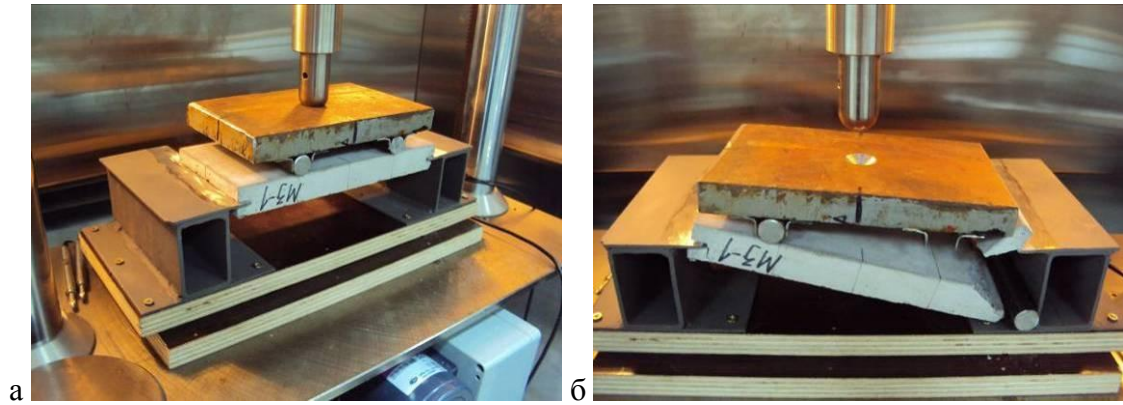
Првобитно испитивање је вршено уз помоћ предложених профила потконструкције Табаш, који се користе у пракси за ношење облога од камених плоча у оквиру ветреног фасадног склопа. Ови профили су испитани на оптерећење од ветра такође у Лабораторији за материјале Института за материјале и конструкције Грађевинског факултета у Београду. Приликом испитивања лому узорка је претходила деформација самог профила потконструкције (Слика 92). Описана појава указује да би зуб композитног панела био отпоран на оптерећења ветра која стандардно трпи фасадна облога ветреног фасадног склопа. Наставак испитивања је вршен уз помоћ челичних профила на месту тракастих котви, да би се испитала отпорност самог зуба (Слика 93).



Слика 91 Испитна диспозиција



Слика 92 Деформација континуалне потконструкције

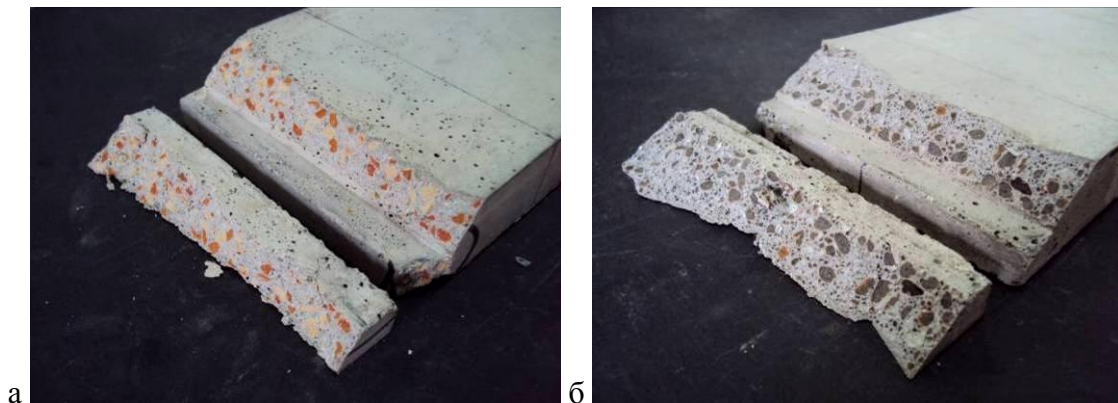


Слика 93 Испитивање узорка: а) испитна диспозиција, б) лом узорка

Резултати експерименталних испитивања граничне силе лома на месту жљеба су приказани у Табели 43.

Табела 43 Резултати испитивања граничне силе лома

Својство	M_1	M_3
Сила лома F (kN)	2,85	1,64
Сила лома F (kN/m)	14,2	8,2



Слика 94 Површина лома узорка: а) серија M_1 са дробљеном опеком, б) серија M_3 са експандираном глином

Резултати испитивања указују:

- да се јавља лом по косој равни, што се могло претпоставити на основу испитивања камених плоча приказаних у литератури (Lammert & Hoigard, 2007; Yu & Chan, 2001) (Слика 94);
- да је сила лома узорка са агрегатом од дробљене опеке приметно већа од узорка са експандираном глином – за 42,5 %.

Резултати испитивања се могу упоредити са вредностима сила притиска и сишућих сила које могу утицати на фасадни панел услед дејства ветра (Прилог 6).

IV.2.5.5 Маса панела

Маса панела је испитивана на узорцима димензија 10 x 60 cm, са подлогом од цементног малтера и облогом од камена, који су припремљени за испитивање чврстоћа при савијању. Резултати испитивања су приказани у Табели 44.

Табела 44 Маса панела

Својство	M ₁	M ₃
Маса узорка, m_u (g)	4607,4	3874,8
Маса панела 60x60 cm, m_p (kg/m ²)	76,8	64,6

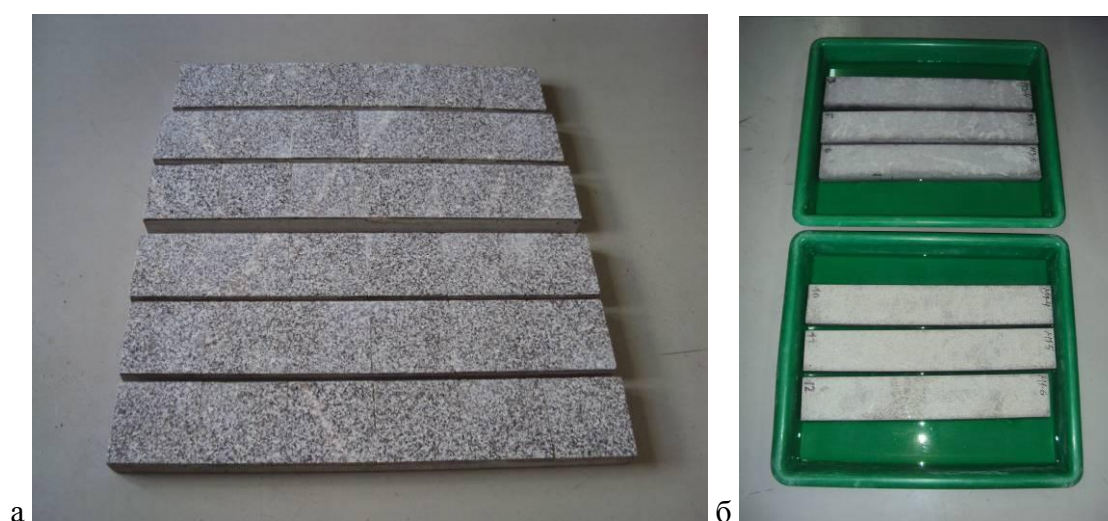
Резултати испитивања масе узорака указују:

- композитни панел M₃ има мању масу за 15,9% од композитног панела M₁.

IV.2.5.6 Испитивање појаве ефлоресценције

Могућност појаве ефлоресценције је испитивано на узорцима димензија 10 x 60 cm, који су справљени на исти начин као и узорци за испитивање чврстоће при савијању. Једина разлика је то што је лице од камена полирано, да би преко тако обрађене површине узорци капиларно упијали воду.

Испитивање ефлоресценције је вршено према америчком стандарду ASTM C67-14 (2014) који је намењен производима од опеке. По три узорка од сваког модела панела (M_1 и M_3) је постављено на дестанцере и потопљено са лицем од камена на доле у дестиловану воду, тако да је сваки био 15 mm под водом. У воду је уроњена цела камена плочица и цементни малтер у висини од 5 mm. Узорци различитог типа (M_1 и M_3) су потопљени у засебан суд. Након 7 дана у води, узорци су сушени у сушници на температури од 110-115 °C до константне масе (Слика 95).



Слика 95 Испитивање потенцијалне појаве ефлоресценције:

- а) испитни узорци, б) капилярно упијање воде преко финално обрађеног – полираног лица од камена (гранита)

Након испитивања узорка визуелним прегледом може се установити да:

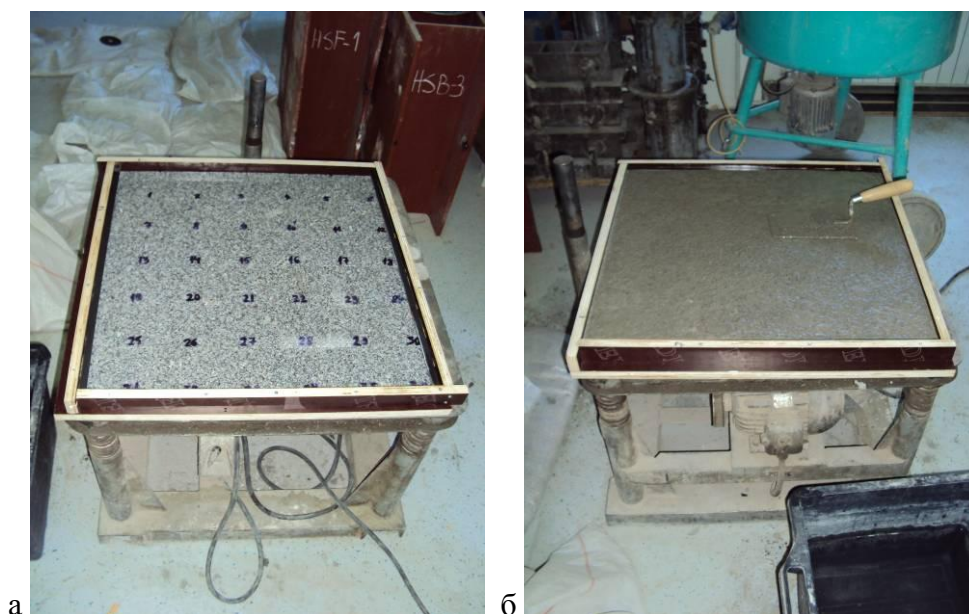
- нису показали знаке ефлоресценције.

IV.2.6 Реализација модела фасадног композитног панела са лицем од камена

Након спроведених лабораторијских испитивања, приступило се изради два различита модела фасадне облоге димензија 60 x 60 x 3,5 cm. Компонентни материјали предложених модела су камене плочице од гранита *Шутица* димензија

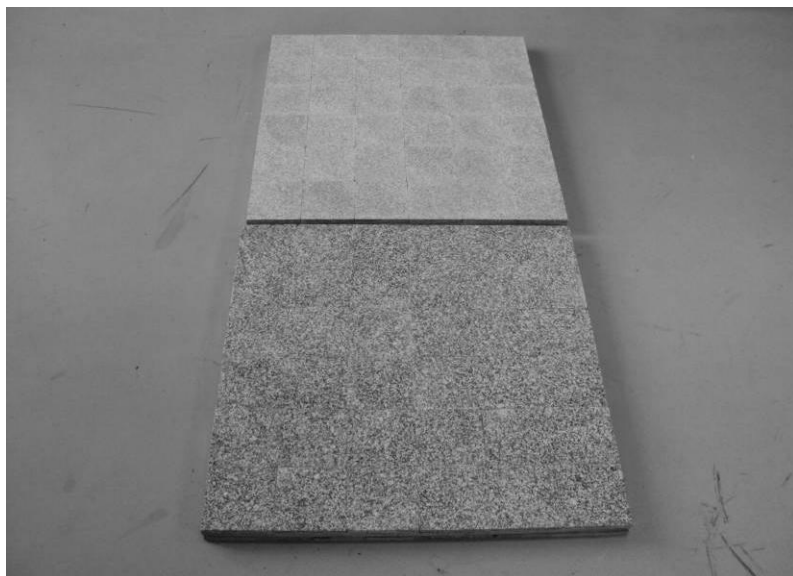
10 x 10 x 1 cm и цементни малтер типа M_1 – са агрегатом од дробљене опеке, или M_3 – са агрегатом од експандиране глине.

Поступак израде је у свему био исти као за узорке намењене испитивању чврстоће при савијању (Слика 96). Током израде цементни малтер оба типа је показао задовољавајућа својства технологичности – уградљивост, обрадљивост и хомогеност.

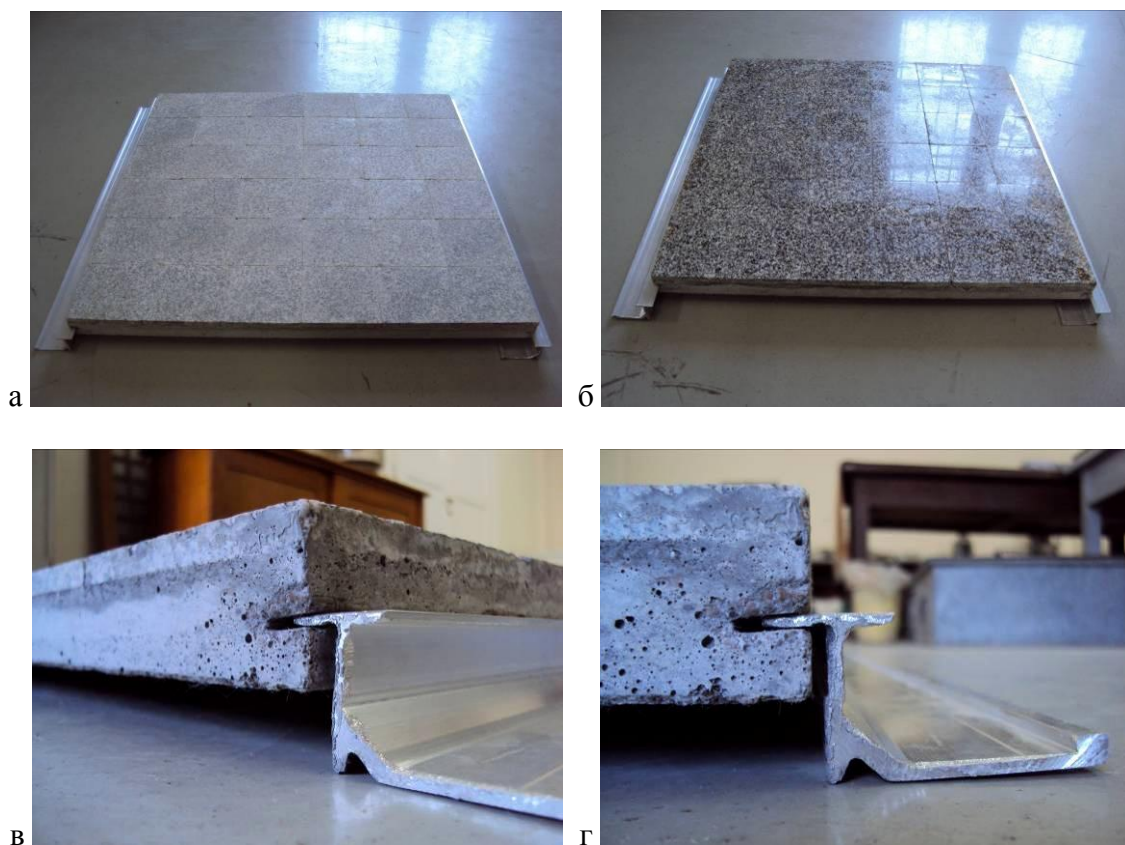


Слика 96 Припрема узорака фасадне облоге: а) калуп са постављеним каменим плочицама припремљен за уградњу малтера на вибро-столу, б) узорак у процесу израде

На Сликама 97 и 98 су приказани остварени модели фасадних панела са детаљима. Ради разноврсности обраде, модел са агрегатом у виду дробљене опеке M_1 је израђен са резаном завршном површином плочица, а модел са агрегатом од експандиране глине M_3 је израђен са полираном финалном обрадом плочица.



Слика 97 Модели фасадних композитних облога



Слика 98 Модели фасадних панела
на тракастој потконструкцији ТАВАЏ: а) панел М₁, б) панел М₃,
в) и г) детаљ налегања жљеба на потконструкцију

IV.3 ТЕХНОЛОГИЈА ОБЛАГАЊА КОМПОЗИТНИМ ПАНЕЛИМА СА ЛИЦЕМ ОД КАМЕНА

И поред тога што је предложене композитне панеле могуће изадити на градилишном полигону уз примену савремене механизације, захваљујући првенствено њиховој транспортабилности, предлаже се фабричка производња ових префабриката, уз употребу мањег или већег степена механизације и аутоматизације које су такође основна карактеристика индустријске производње. Префабрикација подразумева производњу елемената објекта савременим техникама ради остварења квалитетнијег, бржег и економичнијег грађења, уз рационалну примену људских, материјалних и финансијских ресурса и уз заштиту животне средине.

Опажене предности индустријализације⁵⁵ су (McEvoy, 2014):

- Смањење обима рада на градилишту
- Бржа градња
- Унапређење квалитета.

У специјализованом погону, грађевински елементи се производе независно од временских околности и под оптималним условима. Префабрикацијом, на градилишту преостаје релативно једноставан поступак склапања елемената уз пожељну редукуцију мокрих поступака, што води бржој градњи. Смањењеведеног времена на градилишту смањује и укупне трошкове⁵⁶.

⁵⁵ Под термином *индустријализација* се подразумева примена у технологији и организацији модерних метода рада карактеристичних за савремену крупну машинску производњу и економско грађевинарство. Индустријализација такође подразумева пренос припреме грађевинских радова у специјализоване погоне (Božilović, 1998).

⁵⁶ У погледу радне средине, присутне су многобројне погодности премештања што већег броја активности у фабричко окружење. На градилишту често владају услови који нису адекватни за квалитетну и комфорну градњу, који такође могу довести до одлагања и кашњења грађења. Индустријски производи, код конвенционално изграђених објеката, обухватају најчешће око 50-60%, остало се своди на мануелни рад на градилишту, који се може значајно редуковати даљом префабрикацијом.

Основна предност облагања префабрикованим елементима у односу на традиционалне технике грађења је константан ниво квалитета. Унапређење квалитета је у великој мери резултат пажљивог избора материјала, боље контроле и специјализоване опреме (McEvoy, 2014; Staib et al., 2008).

Додатно, пажљива контрола процеса производње и сама природа префабрикованих елемената омогућава смањење отпада у односу на изградњу у условима градилишта (Berge, 2009; Philipson, 2003).

Обично се говори о индустријској производњи целокупног конструктивног система објекта и елемената испуне, али се основни принципи префабрикације могу препознати код мање сложеног елемента (система) попут фасадне облоге. Аналогно систему префабрикације објекта, за основна својства градње појединим префабрикованим елементом могу се усвојити (Zgonik, 1979):

- Пројектовање типским елементима -типизација
- Индустријска производња
- Висок степен финализације у фабрикама
- Манипулација и транспорт у могућим границама – транспортабилност
- Једноставна монтажа – монтажност
- Друштвено-економски оправдано решење.

Пројектовање типским елементима подразумева да пројектант не одређује величину и облик панела према засебном пројекту, већ врши избор из понуђеног броја индустријски произведених елемената. Тачније, типизација или серијност елемената подразумева обим понављања појединог типа елемената посматраног технолошког низа током производног процеса. Економски прихватљива серија, треба да пружи погодности у вези са рационализацијом производње и смањењем цене производа.

Прилагођавање наведеном принципу се у одређеној мери може постићи применом флексибилних калупа, и највећим могућим бројем понављања истоврсних елемената у оквиру једног објекта. Такође, могуће је прилагодити димензије облоге неком од већ постојећих префабрикованих система градње.

Индустријска производња елемената подразумева производњу стандардних елемената који имају тачно одређен облик и прописани квалитет. Стандардизација би омогућила високи степен индустријализације, аутоматизације, квалитет и економичност производње. Обимна производња стандардизованог производа омогућава специјализацију радника, већу продуктивност, и економске ефекте.

Пожељан је висок степен финализације у оквиру фабричког постројења ради смањења времена утрошеног на градилишту. Технолошки процес производње предложеног фасадног панела је конципиран тако да се једино финална заштита камена може опционо вршити на објекту.

Манипулација и транспорт у могућим границама подразумева оптималне димензије и тежину префабрикованог елемента. Режим транспорта предложених елемената облоге није различит од уобичајеног транспорта танких фасадних плоча од камена.

Једноставна монтажа подразумева, између осталог, што мање мокрих спојева. Предложени систем облагања фасада, преко префабриковане алуминијумске потконструкције, указује на потпуну монтажност система финалног облагања, односно висок степен монтажности (Krastavčević, 1996).

Друштвено-економска оправданост потврђује се системом облагања који је економичан, одговара физичко-грађевинском захтевима, трајан је, обезбеђује здравствено -хигијенске услове и испуњава друштвене норме.

Проблематика технологије у случају префабриковне градње, односно у овом случају облагања префабрикованим елементима, се по специфичним карактеристикама може поделити две основне целине (Vučinić, 1984):

- Производњу префабрикованих елемената
- Организацију градилишта са транспортом и монтажом елемената.

Предложене технологије производње, транспорта и монтаже предметног фасадног панела ће детаљније бити обрађене у наредним поглављима.

IV.3.1 Технолошки процес производње панела

Предложени фасадни панел је префабрикован производ. За технолошко решење предложеног панела је специфичан непосредан контакт облоге од камена са свежеом цементном мешавином, с обзиром да су већ широко заступљени системи код којих је облога лепљена одређеним адхезивом (често епокси смолом) за подлогу фасадног елемента која је претходно формиран производ.

У технологији производње предложених фасадних панела поштује се редослед израде појединих слојева система, која је условљена израдом елемента у хоризонталном положају. Процес израде панела са каменим плочицама *без спојница* би се, на пример, састојао у следећим поступцима, како је описано у експерименталном делу рада:

- припрема калупа са уметцима за формирање жљеба (чишћење, склапање, премазивање уљем),
- постављање камених плочица у калуп са лицем на доле (претходно припремљених - са финалном обрадом лица, поквашених),
- наливање претходно припремљеним цементним малтером,
- збијање,
- изравњавање и глачање полеђине панела,
- уклањање цементног млека са лица облоге док није потпуно очврсло,
- прописана нега у калупу (у условима влаге 1 дан),
- уклањање калупа (након 24 h),
- прописана нега ван калупа (још 6 дана у влажној средини и 21 дан на ваздуху).

Описани процес производње је могуће модификовати према технолошким могућностима постројења и обликовним захтевима панела. На основу примера разноврсних фасадних елемената са лицем од камена могу се размотрити и следећи технолошки поступци:

- уколико је површина облоге рељефна (цепана обрада камена), постоји могућност полагања елемената облоге панела – камених плочица, са лицем

на доле у слој влажног песка или је могуће утиснути елементе облоге панела са лицем на горе у већ припремљену свежу цементну подлогу (технологија кулијеа) (Otović, 1995),

- могуће је финалну обраду лица готовог панела извести након његовог очвршћавања, чиме би се уклониле и потенцијалне наслаге цементног млека,
- могуће је нанети слој воска преко лица плочица, како се не би упрљале цементним млеком, који се касније уклања уз помоћ паре (Svec & Jeffers, 1972),
- могуће је у префабрикацији уградити посебне елементе за монтажу панела (попут керамичких чаура - *AirtecStone* (Alsecco),
- могуће је ван префабрикације, механичким путем, обезбедити рупе за анкере или жљоб за континуално ослањање плоча након очвршћавања панела (попут технологије обраде танких плоча од камена),
- могуће је у зависности од састава цементног композита прописати измењен начин неге или убрзати процес очвршћавања композита (запаривање).
- могуће је претходно сложити одређено ликовно решење облоге лепљењем на папир на страни лица или на мрежицу на полеђини каменог мозаика. Папир се накнадно уклања, док мрежица остаје унутар цементног композита, итд.

Такође је према смерницама за монтажне опекарске панеле (Magajne, 1979), могуће размотрити технолошки процес производње панела са видним спојницама:

- У припремљене калупе, на елементе облоге постављене са лицем на доле насипа се песак тако да пада у фуге и испуњава их до одређене висине. Песак се насипа са наменом да утврди елементе облоге током даљег процеса производње, да штити видну површину од заливања цементним млеком и да се добију естетски пријатне видне фуге. Вишак песка се затим одстрањује

- Тако припремљена облога се прска водом ради боље адхезије са цементним композитом, а песак да се слеже и сабија да постане непропусан за цементно млеко
- Спојнице – фуге, између елемената облоге се заливају ретким житким малтером
- Налива се цементни композит пројектованог састава
- Полеђина панела се изравњава и глача
- Након постигнутих задовољавајућих чврстоћа, уклања се калуп и ситни песак (испирање воденим млазом).

У оквиру описаног производног процеса се препознаје могућност постизања равномерног распореда елемената облоге постављањем у калуп са, на пример, специјалним гуменим шаблонима (Krstić, 2003). Обрада фуга је накнадна.

Наведеним предлозима се не заокружује тема технолошких производних поступака, како су могућности веома широке. У представљење кораке производње је могуће увести мању или већу меру механизације и аутоматизације.

Према наведеним предлозима, могу се формирати основне уочене поделе технолошког процеса производње панела:

Према начину постављања облоге:

- Полагање облоге са лицем према доле
- Полагање облоге са лицем према горе.

Према условима и времену добијања декоративне обраде облоге:

- Обрада лица облоге пре уградње у елемент облоге
- Обрада лица панела након уградње, после формирања и очвршћавања елемента.

Према степену префабрикације везе:

- Панел је у префабрикацији припремљен за монтажу
- Накнадна обрада панела за примање држача.

Према обради спојница:

- Панел „без спојница“ између елемената облоге
- Панел са видним спојницама између елемената облоге.

Успостављањем ових технолошких поступака, могуће је предложити обликовно различите варијације у односу на основне моделе панела.

IV.3.2 Технологија транспорта

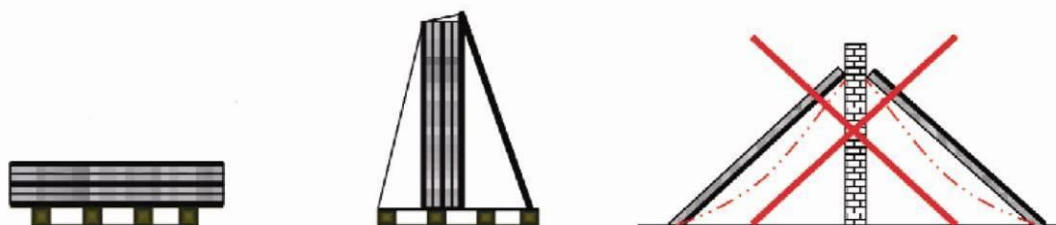
Након формирања фасадне облоге, потребно је обезбедити превоз префабрикованих елемената од места израде до места монтаже. Предметни панел се може транспортовати, складиштити и монтирати попут танких фасадних плоча од камена. Код руковања предметним панелом посебну пажњу треба посветити заштити зуба преко кога се композитни панел ослања, а који настаје формирањем жљеба.

Подизање и манипулација тешким облогама фасаде, као што је предметни панел или облоге од камена, се најчешће врши уз помоћ дизалица и пратеће опреме. Елементи се могу захватити, на пример, каишеваима (ланцима), А рамом и слично (Слика 99).

Осигурање елемента при депоновању и транспорту треба да буде спроведено помоћу одговарајућих конструкција за укрућење и обезбеђење од оштећења (огреботина), пада или претурања (угрожавања стабилности возила). Предметни панели могу стајати положено, вертикално или ослоњени на А рам (Слике 100 и 101).



Слика 99 Захват фасадног панела а) каишевима (Abaco), б) појединачно А рамом (Svec & Jeffers, 1972), в) у групи, учвршћених вертикално (Tabaš)



Слика 100 Складиштење и транспорт фасадних елемената *AirtecStone*– композитних панела са лицем од камена се врши са елементима постављеним хоризонтално или вертикално (Alsecco)



Слика 101 А рам за транспорт фасадних елемената (Абасо)

Утицаје током манипулације панелима, посебно треба испитати. Панеле такође треба заштитити од влаге и екстремних временских услова.

IV.3.3 Технологија монтаже

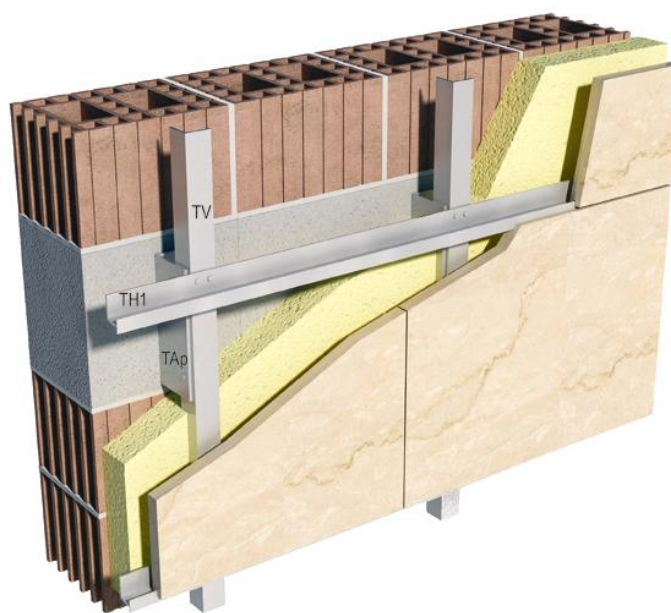
Предметни фасадни панели се монтирају у систему ветрених фасада Табаш који се примењују на танким облогама од камена. У предложеном систему спојнице могу остати неиспуњене или се испунити одговарајућим трајно-еластичним материјалима.

IV.3.3.1 Систем ношења фасаде

Секундарна конструкција и елементи за причвршћивање фасадног елемента треба да испуне одређене услове (Ђорђевић, 1990):

- Да могу да приме и пренесу оптерећења од сопствене тежине, силе ветра и термичких дилатација,
- Да не представљају термички мост и да по могућности не стварају услове за конзензат,
- Да не кородирају (метални делови),
- Да не стварају препреке за струјање ваздуха у ветреном међупростору.

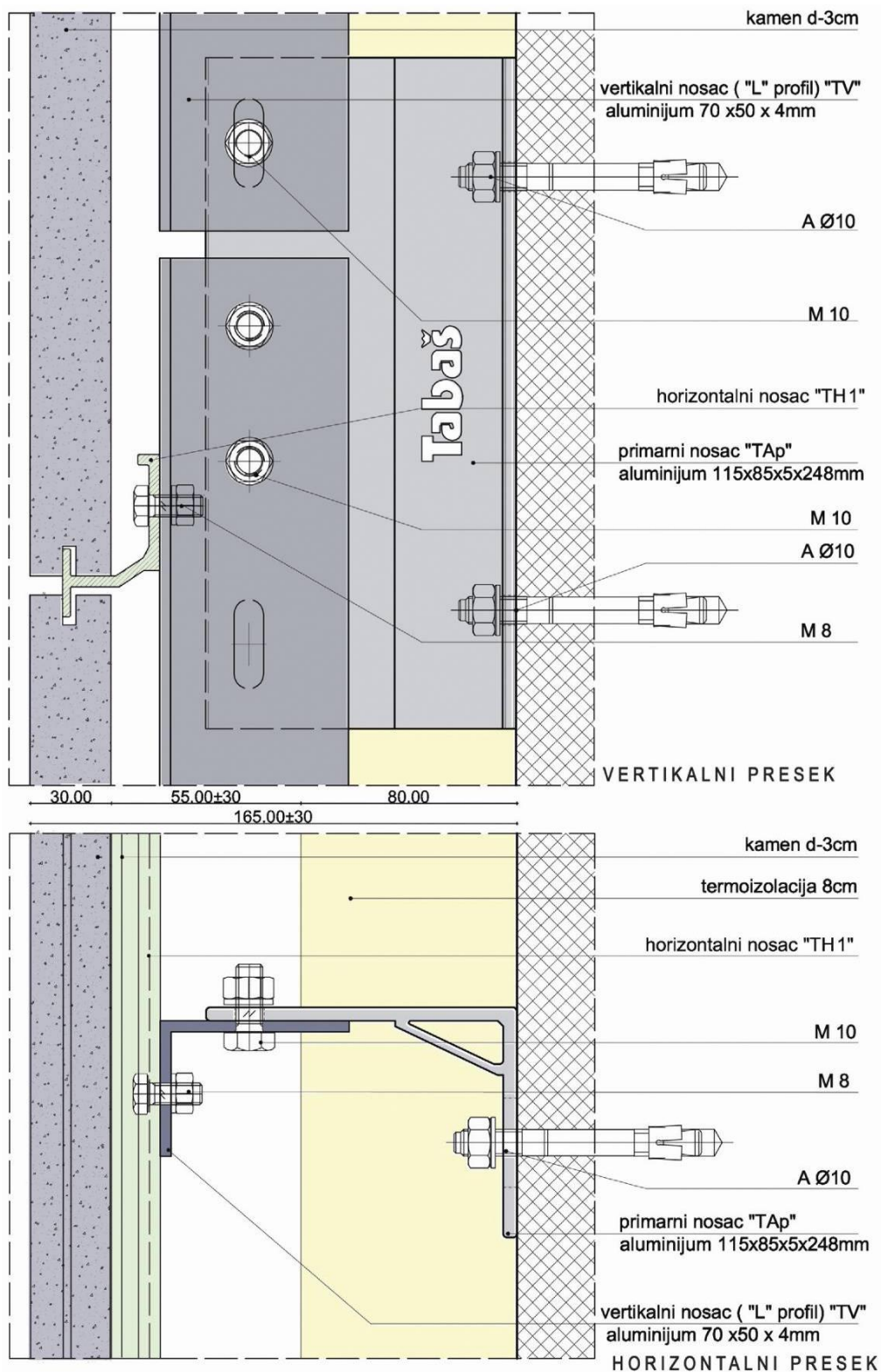
За ношење предметног фасадног панела је предложена потконструкција са тракастим носачима који непосредно прихватају плоче облоге. Усвојен је ТАВАЅ систем потконструкције од алуминијумских профила дебљине 3mm, који се у пракси користи за причвршћивање облога од камена минималне дебљине 2 cm (оптимално 3 cm) (Слика 102).



Слика 102 Ношење плоча од камена тракастим носачима који плоче прихватају непосредно (Тобаљ)

Тобаљ потконструкција се првенствено састоји од примарних и секундарних L носача са косником (ради унапређења носивости и крутости). Примарни носачи се уз помоћ анкера од инокса причвршћују за бетонску конструкцију, и њихов положај зависи од положаја АБ серклажа или греда. Секундарни носачи истог пресека, нешто мање дужине, се причвршћују анкерима од инокса на зид испуне (гитер-блок). Растојање секундарних носача је до 1,5 m. Вертикални L носачи, стандардне дужине 6 m, се фиксирају завртњима за примарне и секундарне носаче. Они се, за дебљину камених плоча од $d=3$ cm, постављају најчешће на међусобном растојању од 100 cm. Хоризонтални носачи, сложеног попречног

пресека, се постављају на сваку хоризонталну спојницу. Причвршћују се завртњима за вертикалне носаче (Слика 103).



Слика 103 Детаљи склопа потконструкције (Tabaš)

У делу II.2 су разматране предности употребе ветреног фасадног система. Ове предности се углавном односе на елиминацију појаве кондензата у зимском и унапређене угодности у унутрашњости објекта у летњем периоду. У поглављу II.2.6 су разматране предности примене тракастих носача у односу на ношење појединачних плоча анкерима. Предности се огледају у широј примени (како се примарна потконструкција може качити само за носећу конструкцију), смањењу броја топлотних мостова и угрожености буком, већој брзини и прецизности радова (Žegarac i dr., 1995). Даља предност непосредног прихватања плоча тракастим носачима представља континуално ослањање, што је за облогу повољније у односу на тачкасто прихватање. Овај систем додатно омогућава прецизнији рад и бржу инсталацију. Такође, оштећене плоче је једноставно заменити (податак добијен у разговору са Табашевић – фирма Табаш, 2015).

IV.3.3.2 Спојнице

У систему изабране потконструкције са тракастим носачима који непосредно прихватају елементе облоге (Табаш), могуће је остварити неиспуњене (отворене) спојнице или их испунити (затворене) најчешће трајно еластичним материјалима. Искуства у примени овог типа потконструкције су показала да се затварањем или смањењем димензија спојница поспешује циркулација ваздуха у ветреном међупростору, што доприноси елиминисању влаге и појаве кондензата на спољном делу фасаде (Табаш). Такође, заптивање затворених фуга се врши најчешће са два типа херметика, како се то у пракси показало као сигурније решење (Pankratov, 1971).

IV.3.4 Заштита површине од камена

Превентивна заштита површине од камена, код композитних панела, се може вршити у производном погону или на градилишту (StonePly). Поступак заштите има за циљ одлагање или успоравање процеса пропадања материјала (Vušović, Purić i Delić-Nikolić, 2009).

Временска трајност представља отпорност коју камен пружа физичким и хемијским дејствима средине која га окружује, а која теже да га током времена разоре. Временски ток разарања зависи од петрографских својстава камена и природе утицаја којима је изложен. Основни узрочник временског пропадања камена је вода. Кад би се камен одржавао сувим многи фактори пропадања би били елиминисани. Присуство воде узрокује хемијску и физичку деградацију, како се сви основни састојци камена растварају у води. Осим воде негативе утицаје представљају и ветар, мраз, сунце и хемијски агенси урбане средине и човекове околине. У зависности од садржаја растворених гасова, атмосферске падавине могу бити мање или више киселе чиме њихова растварачка способност расте. Носилац свих главних агенаса хемијског распадања су падавине. Механичко деловање воде везано је углавном за њено физичко понашање при променама температуре (Maksimović, 2006; Bilbija i Matović, 2009).

Пошто је вода основни узрочник временске деградације камена, примењује се хидрофобна - водоодбојна заштита овог материјала. Неопходно је спречити продор влаге (воде) и атмосферских загађивача, уз пожељно задржавање паропропустљивости. Средства за водоодбојну заштиту морају испуњавати одређене захтеве:

- Да се лако примењују
- Да не буду агресивни према другим материјалима конструкције објекта
- Да не буду штетни по људе
- Да не мењају изглед материјала (боја или тон)
- Да имају дуготрајно дејство.

Као средства за заштиту могу се поменути метализирани сапуни, алкалне смоле, воскови, епокси смоле, полиестри, силикони, метилметакрилати и слично. Силикони се, на пример, налазе у широкој примени ради следећих повољних својстава: светли су и безбојни, лако се наносе, имају способност „пузања“, имају добру отпорност на топлоту и хладноћу, према хемикалијама и временским утицајима и велику способност водоодбојности. Силиконском импрегнацијом се,

за разлику од смола, воскова и средстава на бази парафина, постиже хидрофобност површине уз очување паропропустљивости (Bilbija i Matović, 2009). Мана примене силиконских премаза је у томе што ову врсту заштите треба обнављати на отприлике сваких 5 година. Трајнија површинска заштита се постиже премазима са силоксанима, који су и скупљи (Crnković i Šarić, 2012).

Осим стандардних хидрофобних средстава, за заштиту површина од камена се употребљавају и олеофобна средства која онемогућавају продор уља и масти. Такође се користе заштитна средства против графита и других боја, која онемогућавају продор боје у структуру камена. Боја се тако задржава на површини и једноставно уклања. Употребљавају се и средства која камен штите од дејства микрофлоре (алге, лишаји, маховине). Понекад се и намерно примењују заштитна средства која мањају изглед површине камена, дајући му „мокар“ или „полиран“ изглед који истичу боју и шару (Vušović i dr., 2009).

Потпуни третман камених површина, осим заштите, представљају нега и одржавање камена. Нега и одржавање укључују чишћење, обнављање премаза биоцидима и хидрофобним средствима, као и другим премазима за заштиту од штетног деловања атмосфералија и загађења ваздуха у урбаним зонама (Crnković i Šarić, 2012).

Камен се првенствено чисти из естетских разлога. Појам „запрљан“ се односи на сва онечишћења која мењају некада добар изглед површине камена (Crnković i Šarić, 2012). Може се дискутовати и о томе да ли визуелне промене камена у ствари могу представљати и пријатан ликовни доживљај. Више о техникама чишћења, неге и заштите се може наћи у литератури (Ashurst, 2006; Bilbija i Matović, 2009; Honeyborne, Ashurst Price & Ross, 2006).




IV.4 ОБЛИКОВНИ АСПЕКТ

Обликовање фасадног омотача даје допринос свом окружењу у естетском смислу и у виду амбијенталне идентификације. Фасада треба да буде одраз тренутка и места у ком је објекат изграђен, при чему велику улогу има примена локалног стенског материјала у виду облоге. Елемент фасаде такође треба да следи захтеве корисника у смислу разноврсности и архитектонске изражајности. Имајући у виду могућности технолошког процеса производње композитног панела са лицем од камена, могуће је предложити основне класификације такве фасадне облоге.

Класификација облоге према облику елемената камене облоге (Табела 45):

- Монолитна камена облога
- Геометријски мозаик
- Неправилан мозаик

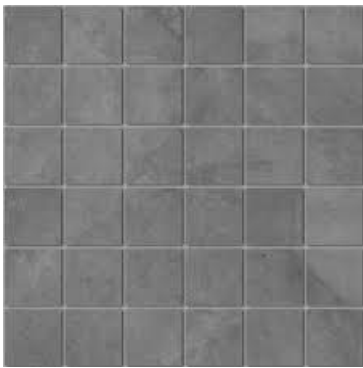

Табела 45 Класификација облоге према облику елемената камене облоге

Тип облоге		
Монолитна облога	Геометријски мозаик	Неправилан мозаик
 (Alsecco)	 (Hominter)	 (Crafty Corner)

Класификација облоге према завршној обради камена (Табела 46):

- Препоручена машинска обрада камена
- Природно целан камен

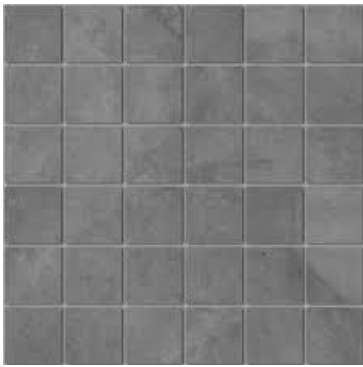

Табела 46 Класификација облоге према завршној обради камена

Тип облоге	
Препоручена машинска обрада камена	Природно цепан камен
 <p>(Walls Floors)</p>	 <p>(DIYTrade)</p>

Класификација облоге према разноврсности употребљеног камена (Табела 47):

- Користи се један тип камена
- Користи се више типова камена

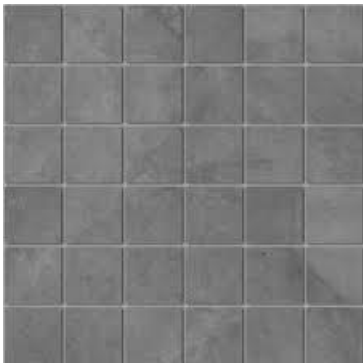

Табела 47 Класификација облоге према разноврсности употребљеног камена

Тип облоге	
Један тип камена	Више типова камена
 <p>(Walls Floors)</p>	 <p>(Global b2b Network)</p>

Класификација облоге према разноврсности обраде камена (Табела 48):

- Цела површина панела је једнообразно обрађена
- Камена површина има више различитих обрада камена

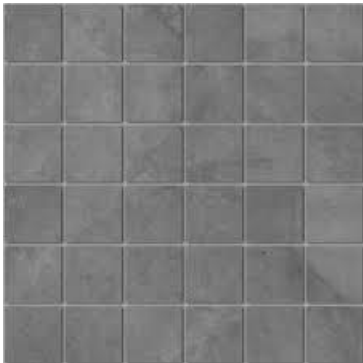

Табела 48 Класификација облоге према разноврсности обраде камена

Тип облоге	
Једнообразно обрађена облога	Више различитих обрада камена
 <p>(Walls Floors)</p>	 <p>(аутор)</p>

Класификација облоге према скулпторалности (Табела 49):

- Дводимензионалан
- Релјефни (тродимензионалан)



Табела 49 Класификација облоге према скулпторалности

Тип облоге	
Дводимензионалан	Релјефни
 <p>(Walls Floors)</p>	 <p>(Alibaba)</p>

Класификација облоге према обради спојница (Табела 50):

- *Без спојница*
- Са видним спојницама

Табела 50 Класификација облоге према обради спојница

Тип облоге	
<i>Без спојница</i>	Са видним спојницама
 <p>(autor)</p>	 <p>(Walls Floors)</p>

Разматрајући обликовни аспект предложеног композитног панела, треба поменути и могућност различите површинске, завршне обраде камена. Различитим поступцима обраде, природни изглед површине камена се може изменити у смислу већег или мањег истицања његове боје и склопа. Поступци обраде утичу и на физичко стање површине, тако да могу унапредити или негативно утицати на својства попут упијања воде и отпорности на дејство атмосферија (Bilbija i Matović, 2009).

Примењене камене плочице облоге панела су релативно танки елементи, тако да се не препоручују ударни поступци обраде који нарушавају и унутрашњу структуру камена. Могу се употребити плочице са равном природном површином камена – која представља примарну површ механичког дисконтинуитета по којој се врши издвајање из стенске масе (танкоплочасти кречњак *Струганик*), и равном површином добијеном цепањем (цепана површина) – механичким деловањем дуж површина цепљивости које могу бити равне или неравне. Може се остварити равна површина добијена резањем приликом процеса примарног резања блокова

на плоче или пескирана површина која има фино храпав изглед. Такође се може применити поступак брушења (у мањој или већој мери) или полирања површина. Приликом брушења површина камена поприма површину без сјаја (мат) или благог сјаја, док се при полирању (глачању) постиже огледалски (висок) сјај. Поступком брушења и глачања, боја и структура долазе до пуног изражаја (Слика 104). При примени у екстеријеру, површине карбонатних стена се не полирају, пошто већ након годину дана губе политуру услед агресивног деловања атмосфералија. Поступак глачања такође утиче на временску трајност, како површина хидрофилног камена поприма својство хидрофобности. Код стена силикатног састава површину камена је могуће термички третирати (пламеном третирана површина, *паљена површина*). Нагло загревање површине узрокује настанак термофрактуре и одвајања финих отцепака. На површини се образују неравнине, а степен рељефности зависи од минералног састава и структуре камена. Овим поступком се често унапређује отпорност према хемијској агесији и површинској ерозији. Опширније о површинској обради камена се може наћи у литератури (Bilbija i Matović, 2009; Crnković i Šarić, 2012).



Слика 104 Резана и полирана површина гранита *Шутица*

Камене плочице које су се користиле при истраживању су обрађене оптималним поступком обраде. Кречњак *Скржут* је брушен, а гранит *Шутица* полиран за потребе капиларног упијања воде преко лица камена при испитивању термалне компатибилности примењених камена и малтера, односно испитивања приањања након дејства мрза.

IV.5 АСПЕКТ ОДРЖИВОСТИ

Аспект одрживости предложеног решења фасадне облоге у оквиру ветреног фасадног система ће се разматрати са аспекта одрживог дизајна и материјала који су детаљно разматрани у делу II.3.

Са аспекта одрживог дизајна и превенције загађења у архитектури (поглавље II.3.1), а у складу са дефинисаним принципом економије и ресурса, предлаже се ветрени фасадни склоп који помоћу циркулације ваздуха унутар ветреног међупростора омогућава процесе пасивног хлађења фасадног зида (лети). Према истом принципу, пожељно је бирати материјале са нижом уграђеном енергијом. Опекарски производи имају релативно високу уграђену енергију - агрегат од експандиране глине 3,0 MJ/kg, док речни песак и шљунак само 0,5 MJ/kg (Berge, 2009). Рециклиране сировине по правилу имају мању уграђену енергију. У том контексту, оправдање (мотив) за употребу агрегата од рециклиране опеке се налази у редуцији отпада и депонијског простора, а оправдање за употребу експандиране глине у мањем оптерећењу на конструкцију објекта, односно мањој потрошњи материјала при изградњи. Такође, екстракција и обрада камена захтева релативно мали утрошак енергије, доста нижи од оне потребне за справљање бетона (Berge, 2009). С друге стране, цементни композити попут малтера и бетона, справљани по пројектованој рецептури и под контролисаним условима (префабрикацијом) имају константна својства и загарантован квалитет. Употреба локалних ресурса попут домаћег архитектонског камена и каменог агрегата умањује вредност уграђене енергије производа редуцијом транспорта. Стратегију очувања природног материјала подржава употреба рециклиране сировине (опеке) и могућност даље рециклаже целокупног предложеног фасадног панела. Панел са облогом од камена и подлогом од цементног малтера се може даље рециклирати у, на пример, агрегат.

У складу са принципом праћења животног циклуса материјала, предлаже се употреба ресурса из обновљивих извора. На пример, употребљени камени материјал - декоративни камен и агрегат, као и глинени материјал за производњу агрегата нису матријали из обновљивих извора. Екстракција ових сировина такође

може довести до трајне еколошке штете, али методама рекултивације оне могу бити знатно умањене. Затим, камен се убраја у трајне материјале и самим тим има мању потребу за одржавањем и заменом. Уз квалитетну израду, пажљиво одабране компонентне материјале и рецептуру, а у складу са наменом и окружењем у коме ће бити примењен, и бетон (цементни композити) се такође могу сврстати у трајан материјал. Такође, препоручује се употреба нетоксичних (мање токсичних) материјала и одржавање нетоксичним средствима. Природни материјали, попут камена, уопштено гледајући имају нижу токсичност од фабрикованих материјала. Током процеса печења опекарских производа на високим температурама могу настати материје у виду прашине штетне по здравље при удисању. С друге стране, готови опекарски производи су хемијски инертни и као отпад немају штетног утицаја на животну средину.

У оквиру принципа хуманистичког дизајна издваја се постизање комфора (топлотног, визуелног, акустичног, итд.). У овом смислу предложени ветрени склоп даје допринос у унапређењу топлотног и акустичног комфора, али и хигијенско-здравственог и естетског комфора елиминишући појаву кондензата, односно буђи, унутар или на површинама фасадног зида. Трајни материјали (употребљени камен и цементни композит) обезбеђују очување првобитног – доброг изгледа објекта.

Са аспекта одрживог грађевинског материјала (поглавље II.3.2) успостављени су критеријуми за његово вредновање посматрајући животни циклус објекта. На предметно истраживање се односе: мере редукције отпада током производње, редукција уграђене енергије, употреба природних материјала, употреба локалних материјала, употреба нетоксичних материјала или мање токсичних материјала, трајност (дуготрајност), могућност поновне употребе, могућност рециклаже. Присуство једне или више ових карактеристика чине материјал одрживим (Kim & Rigdon, 1998b). Током претходног разматрања нису поменуте једино мере редукције отпада током производње и редукције уграђене енергије ревизијом производних процеса. Предложено технолошко решење префабрикације се односи на ове критеријуме. Префабрикација грађевинског елемента омогућава смањење количине отпада током производње и оптимално пројектовање производног процеса.

IV.6 АСПЕКТ ЕКОНОМИЧНОСТИ

Аспект економичности предложеног решења фасадне облоге се може разматрати са аспекта употребљених материјала и композиције панела, предложене индустријске технологије производње и предности примене ветреног фасадног склопа.

У контексту употребљеног материјала, може се приметити да су фабриковани материјали (експандирана глина) скупљи од природног речног агрегата. Такође, на примеру агрегата од рециклираног бетона, може се закључити да је у домаћим условима природни речни агрегат исплатљивији од рециклираног. У циљу смањења отпада, предлаже се да се ова разлика поништи спровођењем одређених економских мера на територији Србије (Ignjatović, Tošić, Marinković i Dragaš, 2015).

Трајност употребљених материјала захтева мање трошкове одржавања и замене. Она такође условљава естетске квалитете фасадног елемента и целог објекта (ненарушен изглед). Са аспекта естетских вредности употреба камена као видне облоге има препознатљиве предности. Трајност и естетски квалитет доприносе тржишној вредности објекта.

Елементи који се добијају екстракцијом и обрадом природних материјала су исплатљивији од композитних материјала. Фактор који је на страни употребе, на пример, локалног природног камена је да код производње класичног бетона, количина утрошене енергије носи 25-70% трошкова (Berge, 2009). С друге стране, оправдање за примену композита се може наћи у пројектованом квалитету и потенцијалној уштеди природних материјала.

За префабрикацију по правилу важи да је исплатљивија од метода градње на градилишту. Ово мишљење се фокусира на три ресурса за које префабрикација има концептуално решење: материјал, рад и време. У теорији, редукацијом једне од ових компонената редукују се и трошкови. Међутим, префабрикација не мора да подразумева обавезну редукацију укупног буџета. Иако може додатно допринети уштеди захваљујући временски усклађеној испоруци и изостављању простора за

депоновање материјала, елементи произведени у фабрици могу иницијално бити скупљи. У бројним примерима савремене градње, префабрикацији се приступа не ради ниже цене, већ прецизности и унапређења квалитета производа у циљу поузданости. (Smith, 2010).

Да би индустријски процес био економичнији треба размотрити и следеће аспекте (McEvoy, 2014):

- Фабрички погон треба да буде оптимизован и лоциран у близини сировина, тако да се у највећој мери искористе капацитети уграђене опреме
- Пораст производње узрокује пад цене производа
- Стандардизација производа омогућава специјализацију радника и пораст продуктивности
- Неопходна је комплексна организација у циљу планирања дизајна, производње и маркетинга производа, која мора бити координисана јединственим менаџментом.

Такође, пошто су нова улагања финансијски захтевна, прихватљиво решење је прилагођавање постојећих постројења (Smith, 2010).

Применом проветраваног фасадног склопа, когу се појавити потребе за већим улагањима (Ђорђевић, 1990):

- За дебљи слој термоизолације (до 10%) због хлађења у проветраваном међупростору (зимски услови)
- За потконструкцију
- За додатну обраду отвора (фазонске комаде) где је то потребно.

Наведени повећани трошкови су незнатни у поређењу са предностима проветраваниог склопа (Ђорђевић, 1990). Оне се огледају првенствено у доприносу енергетској рационализацији зграда, унутрашњем комфору (температурни, хигијенско-здравствени, естетски) и употребној вредности објекта, трајности материјала и брзини извођења облоге, која се своди на суву монтажу. Такође, у наведеном систему са тракастом потконструкцијом која носи облогу непосредно, замена елемената облоге је веома једноставна. Сви поменути параметри су финансијски мерљиви.

V ZAVRŠNA RAZMATRAЊA

У оквиру овог поглавља ће се вршити дискусија остварених резултата сопствених истраживања, сумирати резултати рада, проверити хипотезе и предложити правци даљих истраживања.

V.1 ДИСКУСИЈА

У оквиру дискусије ће се првенствено разматрати резултати спроведених лабораторијских испитивања и упоредити са својствима која су забележена у оквиру литературе (поглавље III.5). Затим ће се извршити компаративна анализа остварених модела фасадних панела и референтних фасадних облога које су присутне на тржишту, односно регулативе.

V.1.1 Дискусија резултата експерименталних истраживања

Током претходних лабораторијских истраживања, испитивана су физичко-механичка, технолошка, реолошка својства и трајност цементних композита типа малтера, као и склопа предложених модела фасадних панела. Технолошка својства свих седам испитиваних малтерских смеша су показала задовољавајући ниво технолошкости са добром уградљивошћу, обрадљивошћу и постигнутом хомогеношћу. Утврђено је да физичко-механичка својства у највећој мери зависе од употребљеног агрегата (речног песка, дробљене опеке или експандиране глине). Примена различитих влакана (полипропиленских или поливинил-алкохолних) није показала доследан тренд у односу на резултате испитивања.

Прва фаза лабораторијских испитивања је обухватила седам серија малтера од којих су три са агрегатом од речног песка еталони. На тај начин, анализа резултата се може спровести упоређењем серија код којих се мењају исти параметри. Упоређењем еталонске серије (Е) са модификованим еталонским серијама (Е₁ и Е₂) може се уочити збирни утицај суперпластификатора, латекса и синтетичких влакана на својства малтера. Упоређењем модификованих серија са

различитом врстом агрегата или влакана се може уочити утицај појединачних поменутих компонената.

Код свих испитиваних смеша је постигнута планирана крута конзистенција малтера. Посматрајући еталоне Е, Е₁ и Е₂, може се уочити утицај додатка суперпластификатора и полимерног латекса на смањење количине неопходне воде, односно смањење водоцементног фактора са 0,5 код еталона Е на 0,4 код еталона Е₁ и Е₂. Подразумева се да додаток влакана у малом проценту (0,1%) не утиче значајно на постигнуту конзистенцију (Jevtić i Zakić, 2006). Код модификованих еталона Е₁ и Е₂ је примећено смањено издвајање воде (*bleeding*) током испитивања конзистенције и након уградње на површини узорака. Ово се може објаснити чињеницом да микроарматура у структури свежег малтера има улогу у пресецању пута слободне воде и затварању капиларних пора, односно спречавању слободне миграције воде из унутрашњости малтерске мешавине (Zakić, 2010).

На основу резултата испитивања након контролних 28 дана, може се уочити да модификација класичног малтера додатком суперпластификатора, полимерног латекса и синтетичких влакана не утиче доследно на промену вредности запреминске масе у очврслом стању која се креће у распону 2067-2156 kg/m³ (разлика у односу на еталон Е од 0,8-3,3%). Међутим, може се приметити да утиче на пораст вредности чврстоћа при притиску (4,6-19,7%) и при савијању (4,5-22,5%) које за модификоване серије Е₁ и Е₂ износе 63,8 МПа и 73,0 МПа, односно 9,3 МПа и 10,9 МПа, респективно. Према испитивањима, поменута модификација малтера утиче на смањење упијања воде (за 17,0-18,0%) са 8,2% на око 6,8%. Овај тренд, односно умањење капиларне порозности се може објаснити деловањем суперпластификатора и полимерног латекса на редукуцију водоцементног фактора. Полимерни латекс такође може утицати на водонепропустљивост попуњавањем капиларних пора полимерним честицама или прекривањем површинским полимерним мембранама. Влакна могу делотворно пресецати систем отворених капиларних пора. Њихов додаток такође може утицати на водонепропустљивост редукуцијом запреминских деформација скупљања, односно редукуцијом пропагација прслина (Vojnović Ćalić i dr., 2015). Презентована истраживања су потврдила смањење скупљања испитиваних серија малтера (након 360 дана за 7,6-

13,0%) са 0,985 mm/m еталона Е на 0,833 и 0,885 серија Е₁ и Е₂, респективно. Тренд кретања вредности услед комплексног деловања суперпластификатора, полимерног латекса и синтетичких влакана у оквиру истраживања је у складу са запажањима из литературе која су наведена у поглављу III.5.1 и III.5.4.

Модул еластичности модификованих серија Е₁ и Е₂ не показује јасан тренд у односу на вредности еталона Е и поред додавања полимера који може унапредити ово својство. Динамички модул се креће у границама 32,7-36,2 GPa, а на основу њега сачунати статички модул 21,9-26,2 GPa.

Све претходно наведене серије су показале задовољавајућу отпорност при дејству мраза испитивањем чврстоћа при притиску и савијању. Према литератури, присуство микроарматуре и полимерног латекса унапређује ово испитивано својство и самим тим што према претходном објашњењу утиче на смањење упијања воде (Jevtić i Zakić, 2006; Radonjanin i dr., 1999).

Посматрајући микроармиране лакоагрегатне мешавине са додатком суперпластификатора и полимерног латекса, може се закључити да се применом лаког агрегата увећава водоцементни фактор мешавина. За смеше са делимичним учешћем агрегата од дробљене опеке М₁ и М₂ он износи 0,43-0,45, док за смеше са учешћем једино агрегата од експандиране глине М₃ и М₄ износи 0,52-0,54. Повећање водоцементног фактора се може приписати високој вредности упијања поменутих лакких агрегата.

Према резултатима испитивања серија са агрегатом од речног песка (0/2 mm) и дробљене опеке (2/4 mm) М₁ и М₂ након контролних 28 дана може се уочити пад вредности запреминских маса у очврслом стању (0,4-4,2%), које износе 2059 kg/m³ и 2065 kg/m³ респективно, у односу на еталоне са природним агрегатом Е₁ и Е₂. Вредности чврстоћа при савијању серија М₁ и М₂ не указују на доследан тренд у односу на еталоне (разлика од 5,4-11,9%) и износе 9,8 МПа и 9,6 МПа респективно, као ни вредности чврстоћа при притиску (разлика од 5,6-8,9%) које износе 67,4 МПа и 66,6 МПа респективно. Резултати даље указују на пораст вредности упијања воде (26,5-31,9%) које износи око 8,5-9,0 % и скупљања услед сушења након 360 дана (17,5-22,4%) које износи 0,979-1,083 mm/m. Вредности динамичког модула еластичности ових серија су очекивано у паду и износе 30,2-

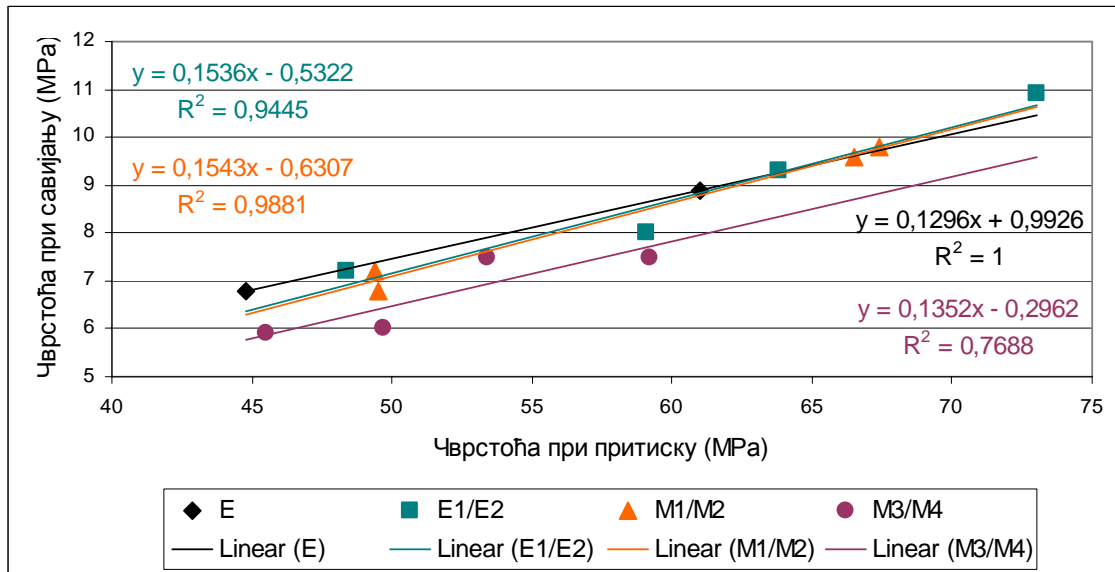
28,3 GPa, као и на основу њега израчунатих статичких модула који износе 19,6-18,4 GPa. Забележени резултати су сагласни са запажањима из литературе која су представљена у поглављу III.5.2.2.

Испитивања малтера са агрегатом од експандиране глине M_3 и M_4 након 28 дана указују на значајан пад вредности запреминских маса у очврслом стању (за 24,8-25,5%) које износе 1555 kg/m^3 и 1606 kg/m^3 респективно, чврстоћа при притиску (за 16,3-18,9%) које износе 53,4 МПа и 59,2 МПа респективно, и савијању (за 19,3-31,2%) које износе 7,5 МПа. Забележен је пораст упијања воде (117,7-117,8%) са вредностима од 14,7-14,9 % и скупљања услед сушења након 360 дана (24,7-31,3%) са вредностима од 1,094-1,104 mm/m. Вредности динамичког модула еластичности ових серија су очекивано у паду и износе 17,8-18,7 GPa, као и на основу њега израчунатих статичких модула који износе 11,6-12,1 GPa. Забележени резултати су сагласни са запажањима из литературе која су представљена у поглављу III.5.2.1.

Врста синтетичких влакана показује доследан тренд кретања коначних резултата испитивања само код појединих својстава малтера. Код примене поливинил-алкохолних влакана уместо полипропиленских може се уочити мали пораст вредности запреминских маса (0-3-4,3%), упијања воде (1,0%) и скупљања услед сушења (1,0-1,1%).

Прираштај чврстоћа при притиску - γ у односу на 28 дана, је највиши код серија са експандираном глином M_3 и M_4 (82,5-83,9 %), затим код еталона E_1 и E_2 (75,9-81,0 %), па код серија са дробљеном опеком M_1 и M_2 (73,3-74,4 %) и еталона E (73,4 %). Прираштај чврстоћа при савијању прати сличан тренд. Највећи прираштај бележе серије са експандираном глином M_3 и M_4 (78,7-80,0 %), затим еталони E , E_1 и E_2 (73,4-77,4 %), па серије са дробљеном опеком M_1 и M_2 (70,8-73,5 %).

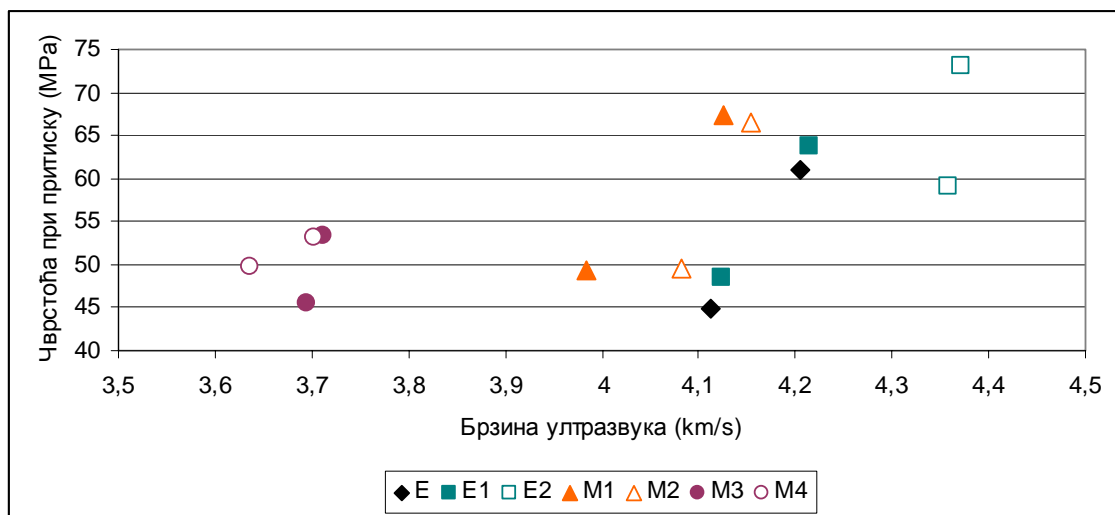
Са дијаграма (Слика 105) може се приметити да пораст чврстоћа при савијању прати пораст чврстоћа при притиску испитиваних серија малтера. У Табели 51 је приказан однос чврстоћа f_{zs}/f_p . Може се уочити да је овај однос нешто нижи код серија са експандираном глином (0,127-0,140), него код осталих серија (0,144-0,149).



Слика 105 Зависност чврстоћа при притиску и савијању након 7 и 28 дана

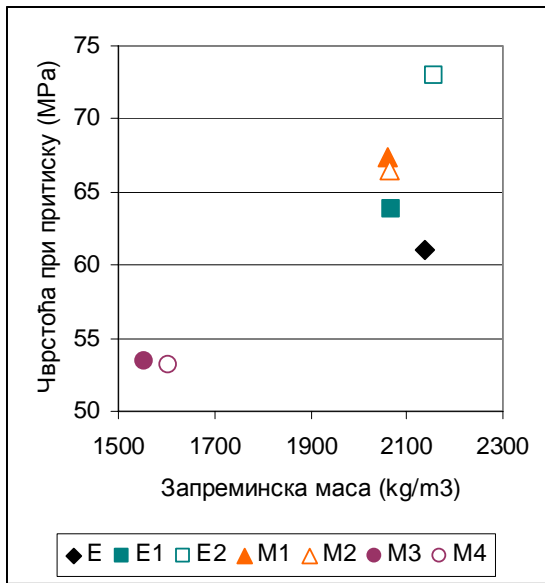
Табела 51 Однос чврстоћа при савијању и притиску

Својство	E	E ₁	E ₂	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
$f_z s / f_p$ након 7 дана	0,152	0,149	0,135	0,146	0,137	0,130	0,121
$f_z s / f_p$ након 28 дана	0,146	0,146	0,149	0,145	0,144	0,140	0,127

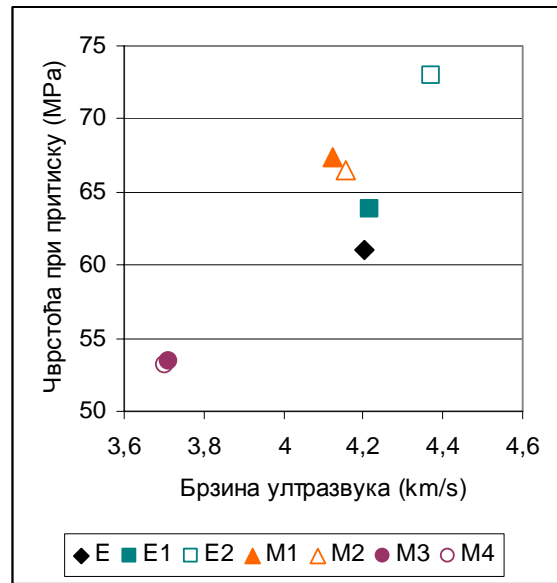


Слика 106 Однос брзине ултразвука и чврстоће при притиску након 7 и 28 дана

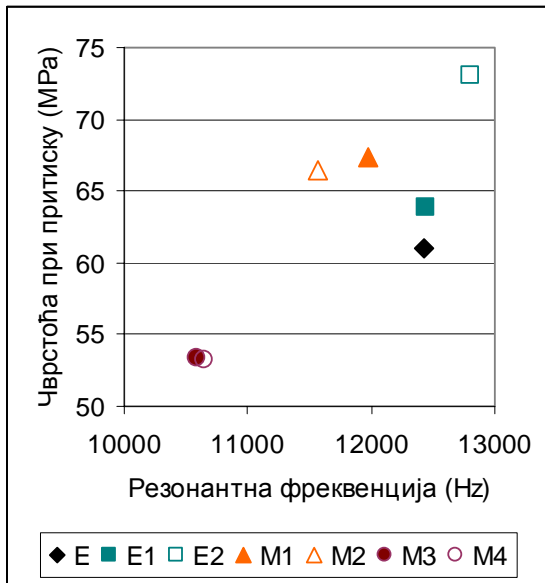
На дијаграму (Слика 106) је приказан однос брзине ултразвука и чврстоће при притиску након 7 и 28 дана, где се не може уочити јасна корелација која би била важна за све серије.



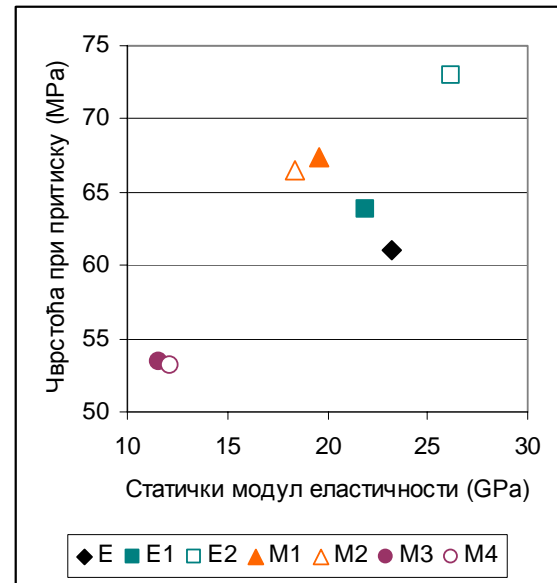
а



б



в



г

Слика 107 Дијаграми: а) однос запреминске масе и чврстоће при притиску након 28 дана, б) однос брзине ултразвука и чврстоће при притиску након 28 дана, в) однос вредности резонантне фреквенције и чврстоће при притиску након 28 дана и г) однос статичког модула еластичности и чврстоће при притиску након 28 дана

Из дијаграма (Слика 107) се може уочити да ниже вредности чврстоћа при притиску (и савијању) серија M_3 и M_4 , прати и пад вредности запреминске масе, брзине ултразвука и забележене резонантне фреквенције, односно модула еластичности. Осим што се серија E_1 такође издваја – по највишим постигнутим вредностима, остале серије не показују јасан тренд поменутих својстава у корелацији са забележеним чврстоћама.

У погледу адхезије камене облоге и подлоге од малтера, испитивање се врши са четири смеше микроармираних лакоагрегатних малтера предложених за даљу примену M_1 - M_4 . Постигнуте вредности напона приањања су у границама од 1,79-4,19 МПа, чиме задовољавају препоручених минималних 0,5 МПа (German Institute for Construction Engineering, 2013), уз преовлађујући повољни мешовити тип лома. Уочено је да серије малтера са дробљеном опеком M_1 и M_2 постижу више вредности напона приањања за 2,3-18,2 %. Може се такође приметити да подлога од гранита остварује више вредности напона приањања за 0,3-108,9 %. Не примећује се доследан учинак унапређењем обраде камена у виду канелура на раст вредности напона приањања код узорак са подлогом од гранита. Код узорак са подлогом од кречњака уочен је пораст вредности од 29,3-82,2 % у случају присуства канелура. Релативно високе вредности напона приањања се могу објаснити заједничким дејством влакана и полимерног латекса на ово својство, као што је примећено у литератури (поглавје III.5.1 и III.5.4). У погледу трајности споја након 25 циклуса мрза, односно термичке компатибилности два материјала- малтера и камена, сви узорци бележе отпорност.

Наредна испитивања склопа фасадне облоге се фокусирају на два одабрана модела облоге. Одабране су две подлоге са полипропиленским влакнима – M_1 са агрегатом од речног песка (0/2mm) и дробљене опеке (2/4mm) и M_3 са агрегатом од експандиране глине (0/4mm). Полипропиленска влакна су изабрана јер су приступачна на домаћем тржишту, за разлику од поливинил-алкохолних влакана. Такође, додаток поливинил-алкохолних влакана код модификованих серија M_1 - M_4 током испитивања није показао значајна и доследна унапређења композита. Усвојена је облога од гранита *Шутица*.

Лабораторијским испитивањем модела M_1 забележена је вредност чврстоће при савијању од 9,0 МПа, што је за 30,4 % више од вредности модела M_3 која је

износила 6,9 МПа. Модел M_1 је такође остварио вишу вредност граничне силе лома зуба везе од 28,5 МПа, која је за 42,5 % виша од вредности модела M_3 која је износила 16,4 МПа. С друге стране, модел M_3 има предност у мањј тежини која износи 64,6 МПа и за 15,9 % је нижа од вредности 76,8 МПа коју бележи модел M_3 . Ни један фасадни склоп није показао склоност ка ефлоресценцији.

V.1.2 Компаративна анализа

У Табели 52 су прегледно приказана техничка својства испитиваних модела панела M_1 и M_3 , и референтних материјала и елемената, као и стандарда за поједине производе, на основу доступних информација, који могу послужити за упоређење. Најбитнија својства фасадних панела су чврстоћа при савијању, лом на месту котве и прањање два материјала, како се ради о вишеслојном систему облоге. Предложени панели би се најближе могли упоредити са панелом *AirtecStone* произвођача Alsecco, пошто су сличних компонентних материјала – састоје се од облоге од камена и подлоге од лакоагрегатног цементног композита.

Према запреминској маси, подлоге предложених композитних панела (1555 kg/m^3 и 2059 kg/m^3) се могу поредити и са фиберцементним ($1580\text{-}2420 \text{ kg/m}^3$) и каменим плочама ($1760\text{-}2710 \text{ kg/m}^3$). Укупна дебљина предложених панела (35 mm) је упоредива са плочама од камена, тако да су и коначне масе упоредиве. Тежина панела износи $64,58\text{-}76,79 \text{ kg/m}^2$, а камених плоча примењеног камена око $50\text{-}110 \text{ kg/m}^2$. Фиберцементне плоче су знатно мањих дебљина (6-25 mm), што условљава и ниже вредности масе по квадрату површине од око $15\text{-}30 \text{ kg/m}^2$.

Упијање воде је код примењених подлога значајно веће (8,5-14,7%) у односу на примењен камен (око 0,5%). С друге стране *Eternit Standards* прописи (Eternit) дозвољавају упијање фиберцементних плоча до 14%, што је упоредиво са предложеним подлогама панела. Лакоагрегатна подлога панела *AirtecStone*, који је такође обложен каменом, ограничава упијање на 30%. У овом случају, треба напоменути да је облога од камена директно изложена атмосферским утицајима, док је подлога у неком смислу заштићена, као и код предложених панела M_1 и M_3 , поготово у варијанти запуњених спојница између елемената облоге.

Чврстоћа при савијању панела износи 9,0 и 6,9 МПа. Панел *AirtecStone*, са подлогом мање запреминске масе, мора задовољити услов чврстоћа $> 4,5$ МПа. Такође, према европском SRPS EN 12467 (2014) и америчком стандарду ASTM C1186-08 (2012) услов за фиберцементне плоче свих категорија су чврстоће ≥ 4 МПа⁵⁷.

Након 25 циклуса смрзавања и одмрзавања, подлоге од цементног композита су апроксимацијом вредности показале отпорност, испитивањем чврстоћа при савијању. Може се сматрати да би захваљујући облози од камена, материјал подлоге у одређеној мери био заштићен од атмосфералија, а тако и најштетнијих утицаја мраза. Фиберцементне плоче категорије В и D⁵⁸ према стандарду SRPS EN 12467 (2014) морају испунити исти услов - 75% одржања чврстоће након 25 циклуса мраза.

При испитивању напона приањања узорци су углавном постизали мешовити лом, са вредностима од 1,79 – 4,19 МПа. Услов за *AirtecStone* панеле је минимални напон приањања од 0,5 МПа, а просечно 0,7 МПа. Постигнута адхезија панела са алуминијумским саћем *Stone Ply* износи 2,3 МПа испитивањем адхезије путем смицања. Ова метода представља повољнији случај, пошто се при смицању активира значајно већа развијена површина, па се остварују резултати виши чак и за 100%. Испитивање адхезије аксијалним затезањем је на страни сигурности (Zakić, 2001a).

Утврђивањем термичке компатибилности испитивањем напона приањања предложени узорци панела су након 25 циклуса мраза, са вредностима од 2,55 – 4,30 МПа, потврдили отпорност. Једини пример сличних испитивања код фасадних облога је панел произвођача *Stone Ply* који је након 130 циклуса загревања и хлађења (20-60 °C) забележио вредност од 1,87 МПа.

Може се поменути да се својство приањања у пракси испитује код репаратурних малтера за санирање бетонских конструкција. Код конструкцијских малтера класе

⁵⁷ Узорци засићени водом имају ниже чврстоће за око 5%.

⁵⁸ Категорија В – плоче које се примењују у условима у којима могу бити изложене топлоти, влази и повременом мразу, односно које су заштићене или нису изложене оштрим временским условима; категорија D – плоче које се употребљавају за круте подлоге (SRPS EN 12467, 2014).

R3 и R4⁵⁹ (класификација према SRPS EN 1504, 2010) услов је напон приањања пре (SRPS EN 1542, 2010) и након испитивања трајности термичком компатибилношћу смрзавањем и одмрзавањем (SRPS EN 12617-4, 2010) вредност $\geq 1,5$ МПа и $\geq 2,0$ МПа, респективно. Пре испитивања отпорности једино се комбинације кречњак резано и серије малтера M₂ и M₄ налазе у опсегу између 1,5-2,0 МПа, док сви остали случајеви превазилазе вредност од 2,0 МПа. У условима након испитивања термичке компатибилности једино се кречњак резано у комбинацији са серијом M₂ налази у опсегу између 1,5-2,0 МПа, сви остали случајеви превазилазе вредност од 2,0 МПа.

Чврстоћа при притиску је својство које се код комерцијалних фасадних панела не испитује, а усвајањем нових европских стандарда код облога од камена је повучено из услова. Током сопственог истраживања испитивана су својства подлоге од цементног малтера у том смислу, а резултати износе 67,4 МПа (M₁) и 53,4 МПа (M₃). Повучени стандард SRPS В.В3.200 (1994), који се односи на плоче за облагање од камена, за категорију SV-1 – вертикално облагање до 10 m, износи < 140 МПа. Стандард ASTM C568/C568M-10 (2010) за кречњаке умерене, односно високе запреминске масе прописује чврстоће до 28 МПа и 55 МПа, респективно. Може се приметити и да чврстоћа при притиску репаратурних малтера (SRPS EN 12190, 2010) класе R4 треба да испуни услов од ≥ 45 МПа. Утврђивање отпорности на мраз испитивањем чврстоће при притиску није услов за прихватање фасадних облога.

Статички модул еластичности (SRPS EN 13412, 2010) код конструктивних малтера R3 и R4 треба да испуњава услов ≥ 20 GPa и ≥ 15 GPa респективно, док за неконструкцијске (R1 и R2) нису постављени услови. На основу динамичког модула еластичности, рачунски се утврдило да серије са агрегатом од дробљене опеке остварују вредности између 15-20 GPa, а са агрегатом од експандиране

⁵⁹Класификација репаратурних малтера (SRPS EN 1504, 2010):

- Класа R4-када се санира конструкција од бетона високе чврстоће, која је изложена великом оптерећењу и/или када постоје посебни захтеви у погледу трајности;
- класа R3 – када се санира конструкција од бетона нормалне чврстоће, која је изложена стандардном оптерећењу и/или када постоје посебни захтеви у погледу трајности;
- класа R2 – када се санира бетонска конструкција, при чему санирана зона не учествује у преносу оптерећења, али када постоје одређени захтеви у погледу трајности;
- класа R1 – када се санира бетонска конструкција, при чему санирана зона не учествује у преносу оптерећења и када не постоје никакви захтеви у погледу трајности.

глине < 15 GPa. Статички модули еластичности фиберцементних плоча се крећу у распону од 7-16 GPa.

Испитивања приказана у литератури су показала да котве у оквиру ширег каменог узорка – који подразумева и расподелу силе по већој површини са учешћем и бочних страна котве, узрокују лом при следећим граничним силама: котва дужине 100 mm – 2,86 kN (Yu & Chan, 2001), а котва 102 mm – 2,39 kN (Lammert & Hoigard, 2007), испитивано према америчком стандарду ASTM C1354/C1354M-09 (2009). Треба напоменути да се представљени резултати односе на тачкасто – местимично, ослањање плоче преко котви. Забележени резултати сопственог истраживања износе 1,65 kN (M_3) и 2,85 kN (M_1). У случају предложеног тракастог ослањања, сила се преноси преко значајно веће површине зуба, што би резултовало и вишим граничним силама лома, посматрајући цео панел.

Из представљених анализа може се закључити да се испитивани панели могу појединим својствима поредити са облогама коришћеним у пракси. Према димензијама и тежини се најпре могу упоредити са танким каменим облогама. Према најбитнијим својствима – упијању воде, чврстоћи при савијању и напону приањања, се најближе могу упоредити са панелом *AirtecStone*. Напон приањања одговара и конструктивним репаратурним малтерима. Постигнута сила лома на месту жљеба за прихватање котве се може упоредити са резултатима представљеним у литератури који се односе на камене плоче.

Табела 52 Техничка својства испитиваних панела и материјала и елемената за упоређење

Својство	Испитивани панели		Камен за облагање			Вишеслојни панели		Фиберцементни панели		
	Панел М1	Панел М3	Скржут: просек [третирани]	Шутица просек [третирани]	SRPS.B.B3.200 - SV 1/2/3* [ASTM C568 - ниске/умерене/ високе з.маса и ASTM C615]	Подлога од цем. комп. са екс.глином	Подлога од алуминијум. саћа	Панели са стакленим vlakнима	Панели са ПБА vlakнима	SRPS EN 12467 [ASTM C1186-08]
						Alsecco <i>Airtec Stone</i>	Stone Ply	Rieder <i>FibreC</i>	Eternit standards [Eternit, FibreCem, Cembrit , Swisspearl]	
Запреминска маса панела или подлоге γ (kg/m ³)	Подлога: 2059 (амбијент) 1956 (сува)	Подлога: 1555 (амбијент) 1422 (сува)	2710 [2672]	2630 [2610]	није услов [кречњак 1760-2160/ 2160-2560/ >2160; гранит 2560]*	Подлога: 640-800	/	2000-2420	1700-1900 [(1580-1900)]	/
Дебљина елемента d (mm)	35	35	20-40	20-40	10-60	25 – 29 Подлога: 15	< 38	8-13	[6-20]	[3,5-25]
Маса m (kg/m ²)	76,79	64,58	54,20 (20mm) 94,85 (35mm) 108,40 (40mm)	52,60 (20mm) 92,05 (35mm) 105,20 (40mm)	/	37 - 42	17,09	26 - 31,5 (13mm)	~16 (8mm)	/
Упијање воде U_v (%) (max)	Подлога: 8,5	Подлога: 14,7	0,22 [0,41]	0,43 [0,53]	0 /1/2 [кречњак 12/7,5/3; гранит 0,40]	Подлога: <=30%	/	/	< 14	/
Чврстоћа при савијању (сила на средини распона) f_{cs} (MPa) (min)	Подлога- призме 9,8 (амбијент) Панел 9,0 (амбијент)	Подлога- призме 7,5 (амбијент) Панел 6,9 (амбијент)	13,61 (суви) [13,28 (суви)]	15,71 (суви) [8,40 (суви)]	8/12/18 (суви) [кречњак 2,9/3,4/6,9; гранит 10,34 (суви и засићени)]	> 4,5	21,19 (засићени)	>18,5 (EN 12467)	Попречно-сув: 24 Подужно-сув: 17 Просек: 21 [Попречно-сув: 24-32 Подужно-сув: 17-22]	Категорија А и В засићени ≥ 4 , Категорија С и D суви ≥ 4 ** [Тип А засићени и амбијент ≥ 4 , Тип В амбијент ≥ 4] ***
Отпорност при дејству мраза испитивањем чврстоће при савијању $f_{cs,m}$ (MPa), Δm_{cs} (%)	Подлога: 8,0 (очување >75,0%) 25 циклуса	Подлога: 6,6 (очување >75,0%) 25 циклуса	[13,11 (пад 1,3 %) 12 циклуса; 12,84 (пад 3,3 %) 56 циклуса]	/	/	/	13,76 100 циклуса.	EN 12467	пад < 3% 200 циклуса [20,3]	А – 100 циклуса, В и D – 25 циклуса, очување 75%) [А и В – 50 циклуса, очување 80%]
Чврстоћа при притиску f_p (MPa) (min)	Подлога: 67,4 (амбијент)	Подлога: 53,4 (амбијент)	135 (суви)	170 (суви) [126 (суви)]	0/140/160 (суви) [кречњак 12/28/55; гранит 131 (суви и засићени)]	/	/	/	[50]	/
Отпорност при дејству мраза испитивањем чврстоће при притиску $f_{p,m}$ (MPa), Δm_p (%)	Подлога: 57,7 (очување >75,0%) 25 циклуса	Подлога: 47,1 (очување >75,0%) 25 циклуса	108 (-20,0%) 25 циклуса	141 (-17,1%) 25 циклуса [111 (-11,9%) 25 циклуса]	25 циклуса – није услов	/	/	/	/	/

Наставак Табеле 52

Напон приањања f_{at} (МПа)	1,79 - 3,48 мешовити лом	2,98 – 4,19 мешовити лом	/	/	/	$\geq 0,5$ минимум, $\geq 0,7$ просек, ****	2,30 (смицањем) *****	/	/	/
Термичка компатибилност испитивањем напона приањања $f_{at,m}$ (МПа)	1,84 – 4,58 (103 - 137%), мешовити лом, 25 циклуса мраза	3,40 – 5,15 (113 – 129 %), мешовити лом, 25 циклуса мраза	/	/	/	/	1,87 кохезиони лом преко камена, 130 циклуса загревања и хлађења 20-60°C	/	/	/
Статички модул еластичности E_C (ГПа)	Подлога: E=19,6	Подлога: E=11,6	/	/	/	/	/	10,0	~15,0 [~7,0-16,0]	/

* SV-1 – објекти преко 30 m висине изнад терена;

SV-2 – објекти висине 10-30 m изнад терена;

SV-3 – објекти висине до 10 m изнад терена (SRPS EN B.B8.200, 1994).

** Категорија А – плоче које се примењују у условима у којима могу бити изложене топлоти, високој концентрацији влаге и оштром мразу;

категирија В – плоче које се примењују у условима у којима могу бити изложене топлоти, влази и повременом мразу, односно које су заштићене или нису изложене оштрим временским условима;

категирија С – плоче које се примењују у унутрашњим условима у којима могу бити изложене топлоти и влази, али не мразу;

категирија D – плоче које се употребљавају за круте подлоге (SRPS EN 12467, 2014).

*** Тип А – плоче за спољашњу примену, изложене директним утицајима сунчевог зрачења, кише или снега;

тип В - плоче за спољашњу примену, које нису изложене директним утицајима сунчевог зрачења, кише или снега (ASTM C1186-08, 2012).

**** Додатни услов захтева да је напон приањања виши од вредности чврстоће при затезању подлоге (Alsecco).

***** Испитивање атхезије путем смицања представља повољнији случај, пошто се при смицању активира значајно већа развијена површина, па се остварују резултати виши чак и за 100%. Испитивањем атхезије аксијалним затезањем је на страни сигурности (Zakić, 2001a).

V.2 ZAKЉUČAK

На територији Србије је опажен интензиван увоз и, с друге стране, веома мала употреба и извоз домаћег камена. Уочено је да Србија обилује овим ресурсом и да се одређени стенски материјал може применити у виду архитектонског камена. Из тих разлога јавило се интересовање за успостављење оптималног решења примене домаћег камена у оквиру фасаде у контексту савремених технологија облагања, на основу кога је постављен циљ овог истраживања. Циљ истраживања, дефинисан у уводном делу дисертације, огледа се у унапређењу технологије облагања фасада архитектонских објеката домаћим каменом, односно успостављању оптималног техничко-технолошког решења фасадног композитног панела са лицем од камена и подлогом од цементног композита, који се може применити у склопу ветрене фасаде. Циљ такође обухвата научно образложење прихваћеног решења, односно прилог теоријско-емпиријским разматрањима у оквиру области технологије облагања композитним фасадним елементима са лицем од камена. Из постављених циљева је произашао низ различитих задатака истраживања.

У првом делу истраживања су сумиране одреднице за пројектовање фасадног склопа и елемента фасадне облоге. Првенствено је разматрана улога фасадног зида у односу на спољашње и унутрашње услове који на њега делују. Као основни захтеви који се постављају пред спољашњу облогу препознати су остварење одговарајућих физичко-механичких својстава и трајности, обликовања и једноставног одржавања.

Утврђено је да ветрени фасадни склоп успешно регулише одређене штетне појаве узроковане микроклиматским и макроклиматским факторима који делују на фасадни зид. Ветрене фасаде првенствено дају допринос у елиминисању штетних утицаја дифузије водене паре и појаве кондензата. Такође, захваљујући пасивном хлађењу преко ваздушног међупростора, успешно ублажавају утицај летњих високих температура, унапређују угодност боравка у унутрашњем простору и доприносе енергетској рационализацији објеката. У оквиру ветреног фасадног склопа, предложен је непосредан начина ношења фасадног панела тракастим

носачима, првенствено ради боље носивости облоге по ослабљеном пресеку на месту ослањања.

Утврђени су принципи доношења оптималних пројектантских одлука и избора грађевинских материјала у складу са одржањем животне средине. На основу њих, доноси се коначна одлука о примени танких плочица ради смањења отпада и рационалнијег искоришћења стенске масе. Ову одлуку додатно подржава и примећена испуцалост стенске масе и могућност формирања уједначеније фасадне површине по боји и текстури. Предлаже се композитни панел који се у целисти може рециклирати, агрегат од дробљене опеке у прилог рециклажи материјала и агрегат од експандиране глине у прилог смањењу тежине фасадне облоге, што даље доприноси одрживости мањим утрошком материјала за потконструкцију облоге и конструкцију објекта. Одлука о примени композита који је заснован на употреби цемента је донета ради савремености овог материјала, доступности на домаћем тржишту и задовољавајућих физичко-механичких својстава, трајности и нетоксичности које елементи од овог материјала остварују.

На основу прегледане регулативе, а у складу са идентификованим улогама и захтевима постављеним пред фасадни зид, ближе су установљена својства облоге која се могу испитати у лабораторијским условима. Као најбитније методе испитивања модела фасадних облога се издвајају чврстоћа при савијању, гранична сила лома на месту везе са потконструкцијом, приањање између облоге од камена и подлоге од цементног композита и термичка компатибилност два материјала.

У другом делу истраживања су разматрани ресурси домаћег архитектонског камена, фасадне плоче од камена и композитни панели са лицем од камена са погодностима и манама њихове употребе. На основу постојећих истраживања стенске масе Србије издвојене су оне које могу наћи примену у виду архитектонског камена за спољно вертикално облагање површина према SRPS В.В3.200 (1994). У актиној организованој експлоатацији се налазе гранити *Шутица*, *Плоче* и *Буковик*. и кречњачке стене *Клисура*, *Тисница*, *Скржут* и *Струганик*. Овим је и потврђено присуство ресурса одговарајућег архитектонског камена на територији Србије.

У наставку рада су у општем случају приказане предности и мане примене танких камених плоча на фасади. Предности се састоје у њиховој декоративности и употреби одрживог грађевинског материјала. У мане се сврставају потенцијална појава термалне хистерезе, ефлоресценције и лома при удару.

Преглед фасадних композитних панела са лицем од камена који су присутни на светском тржишту сведоче о њиховој разноврсности. Ови панели комбинују танку облогу од камена са подлогом од алуминијумског саћа, лакоагрегатног цементног композита, керамике и стакла. Одређени број приказаних композитних панела се примењује и у ветреном фасадном склопу. Предности примене композитних панела, посебно оних са подлогом од алуминијумског саћа, су мања тежина, унапређена чврстоћа при савијању, редукована водопропустљивост, остварена декоративност и допринос одрживости животне средине. При експлоатацији ови панели показују отпорност на термалну хистерезу, ударе ветра и атмосферских непогода, ударе објеката ношених ветром, експлозију, сеизмичке утицаје, дејство пожара и ефлоресценцију.

У раду су такође представљене облоге и панели који својом цементном подлогом обухватају више камених плоча или плочица. То су плоче са лицем од камених плочица мањих димензија које се уграђују мокрим или механичким поступком и панели спратне висине са облогом од камених плоча. Овима се допуњује приказ композитних панела са лицем од камена и уводи идеја мозаика.

У наставку рада су разматране карактеристике разноврсних цементних композита који су засновани на усвојеним материјалима – микроармирани, лакоагрегатни и полимерима модификовани цементни композити. На основу ових истраживања су касније предложени састави подлога панела у експерименталном делу рада.

Допринос претходно представљених истраживања лежи у систематизацији информација неопходних за пројектовање и анализу једног фасадног елемента у оквиру савремене технологије облагања.

У трећем делу истраживања, након пројектовања елемента фасадне облоге са дефинисаним компонентним материјалима, приступљено је експерименталном испитивању цементних композита типа малтера и склопа фасадне облоге. У експерименталном делу истраживања је предложено 7 малтерских мешавина – 3 еталона и 4 серије лакоагрегатних микроармираних композита, са агрегатом од дробљене опеке или експандиране глине и са полипропиленским или поливинил-алкохолним влакнима. На узорцима малтера су испитана основна технолошка и физичко-механичка својства, трајност и скупљање композита. Након испитивања приањања пројектованих композита (без еталона) за камену облогу и термалне компатибилности два метријала, донета је одлука о даљем испитивању малтера армираних полипропиленским влакнима. Ова одлука је вођена чињеницом да су поливинил-алкохолна влакна само при испитивању појединих својстава показала доследан тренд унапређења који је и тада износио занемарљивих 1%. Такође, полипропиленска влакна су, за разлику од поливинил-алкохолних, доступна на домаћем тржишту. У наставку истраживања су вршена лабораторијска испитивања чврстоће при савијању, граничне силе лома код жљеба за прихватање потконструкције и потенцијалне појаве ефлоресценције модела фасадних панела.

Након извршених експерименталних истраживања и остварења модела, предложена је технологија облагања композитним панелима са лицем од камена. Такође је указано на обликовне могућности ове облоге и дат коментар са аспекта одрживости и економичности примене ових панела.

Допринос трећег, претежно експерименталног дела дисертације, огледа се првенствено у постигнутим резултатима истраживања и предложеним нестандартним методама испитивања која се могу уврстити у широко поље научне области материјала, прецизније лакоагрегатних микроармираних композита и елемената типа фасадне облоге. Допринос се такође састоји у систематизацији поступка технологије производње предложених модела облоге.

У оквиру дискусије, резултати лабораторијских испитивања су упоређени са карактеристикама и трендовима кретања резултата сличних материјала описаних у литератури. У највећем броју случајева се показало да су својства предложених композита у сагласности са закључцима представљеним у литератури. Такође је

извршено упоређење предложених модела композитних фасадних панела са облогама од камених плоча, сличним композитним панелима са лицем од камена и фиберцементним плочама које се користе у пракси. Може се уочити да се испитивани панели у погледу појединих својстава могу поредити са облогама у употреби. Према димензијама и тежини могу се упоредити са облогама од камених плоча. Према битним својствима – упијању воде, чврстоћи при савијању и напону приањања, најближе се могу упоредити са панелом *AirtecStone* произвођача *Alsecco*. Забележен напон приањања одговара и конструктивним репаратурним малтерима. Гранична сила лома на месту жљеба за прихватање котве се може упоредити са резултатима представљеним у литератури који се односе на камене панеле у употреби.

Из претходно описаних корака се може видети са су сви циљеви и задаци истраживања, формулисани у уводу докторске дисертације, остварени. У уводном делу дисертације, такође су формулисане одређене полазне претпоставке. Остварени су модели панела, а њиховим лабораторијским испитивањем и упоређењем са референтним фасадним облогама у употреби, доказане су следеће хипотезе:

X1: *Домаћи камен се може користити за формирање композитних панела чиме се остварују перформансе погодне за формирање склопа ветрене фасадне облоге.* Као што је у раду претходно приказано, на територији Србије су уочена лежишта архитектонског камена, стенског материјала који је погодан за формирање композитних фасадних панела са лицем од камена. Од одговарајућих материјала који се налазе у активној организованој експлоатацији се овом приликом издвајају гранити *Шутица*, *Плоча* и *Буковик*. и кречњачке стене *Клисура*, *Тисница*, *Скржут* и *Струганик*.

У контексту домаће индустрије за подлогу композитног фасадног панела је предложен цементни композит. Лабораторијским испитивањима модела композитног панела: чврстоће при савијању, граничне силе на месту жљеба за прихватање потконструкције у систему ветреног фасадног склопа, приањања два материјала и термалне компатибилности су утврђена најзначајнија својства модела. Поређењем са комерцијалним облогама у Дискусији ове дисертације је

установљено да предложени композитни панели остварују перформансе погодне за формирање фасадне облоге и склопа ветреног фасадног система, чиме је и потврђена прва хипотеза.

***X2:** Домаћим каменом се може формирати камени мозаик у виду композитног панела.*

Честа појава природних тектонских оштећења и накнадне испуцалости стенске масе на територији Србије узроковане вишегодишњом неадекватном експлоатацијом (нпр. експлозивом) погодују примени камена у виду танких плочица за облагање. Овај приступ се такође огледа у смањењу отпада, рационалнијем искоришћењу стенске масе и могућности формирања уједначеније фасадне површине по боји и текстури. Представљеним лабораторијским испитивањима материјала и склопа панела, као и остварењем пилот елемента у природној величини – композитног панела са лицем од каменог мозаика, је потврђена и друга хипотеза.

Доприноси предложеног истраживања се огледају у проширењу и унапређењу области технологије облагања архитектонских објеката каменом, проширењу области примене локалног стенског материјала у функцији облагања архитектонских објеката, и прилогу разматрања технолошког процеса производње композитне облоге од камена изградом пилот елемента. Практичну примену резултати истраживања налазе у домаћој индустрији камена и грађевинској индустрији уопште. Усвојени модели композитних фасадних панела са лицем од камена се могу производити и директно применити у својству спољне облоге архитектонског објекта.

V.3 ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА

Правци даљих истраживања се првенствено односе на унапређење перформанси предложених модела фасадних панела:

- Истраживање могућности остварења тањих и лакших фасадних облога оптималних карактеристика, првенствено у погледу физичко-механичких захтева. Ово обухвата истраживање могућности примене тањих облога од камена (у дебљинама мањим од 1 cm) и остварења лакше и тање подлоге цементног композита (која би и условила другачији начин ношења фасаде);
- Истраживање могућности остварења елемената већих димензија. Претпоставља се да би се на основу представљених истраживања и предложеног система ношења могао остварити елемент исте висине, а у одређеној мери веће дужине. Истраживања би се у овом случају првенствено односила на могућност остварења панела веће висине (већег распона између ослонаца);
- Истраживање могућности унапређења испитиваних својстава панела: од којих су најбитније чврстоће при савијању, гранична сила лома на месту осањања панела на потконструкцију и приањања цементног композита за камену облогу;
- Истраживање додатних својстава која нису испитивана у оквиру дисертације, а обухватају: отпорност на дејство ветра, пожара, сеизмичких утицаја, удара, термалну хистерезу и слично;
- Истраживање могућности остварења другачијих решења ослањања фасаде на потконструкцију, на пример, механичко причвршћивање уз помоћ чаура за прихватање котви које се уграђују у процесу префабрикације и слично;
- Даље истраживање у погледу унапређења технолошког процеса израде фасадног панела;
- Истраживање могућности примене другачијих обликовних решења, односно камених облога у облику монолитне облоге, цепаних плоча и слично, или примене других врста облога попут опекарских елемената, вештачког камена и слично;

- Истраживања могућности даљег прилагођавања техничко-технолошког решења панела у погледу економичности и одрживости;
- Даље истраживање могућност примене предложеног фасадног панела у сврху енергетске рационализације архитектонских објеката.

Наведени правци истраживања су условљени и даљим истраживањима предложене подлоге у области материјала, односно лакоагрегатних микроармираних цементних композита:

- У смислу унапређења технолошких и физичко-механичких својстава, трајности и скупљања;
- У смислу примене друге врсте лакних агрегата са различитим прицентом учешћа;
- У смислу примене друге врсте влакна (стаклених, целулозних и слично), такође влакана другачијих димензија, геометријских карактеристика и процента учешћа;
- У смислу унапређења својстава самог цементног композита адитивима за редукацију скупљања, аерантима и слично.

ЛИТЕРАТУРА

Референтна литература

- Ahmed, M., Mallick, J., & Hasan, A. (2014). A study of factors affecting the flexural tensile strength of concrete. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2014.04.001>
- Ashurst, J. (2006). Cleaning masonry buildings. In J. Ashurst & F. G. Dimes (Eds.), *Conservation of building & decorative stone* (pp. 125-154). Oxford: Butterworth Heinemann (Elsevier).
- Banthia, N., Bindiganavile, V., Jones, J., & Novak, J. (2012). Fiber-reinforced concrete in precast concrete applications: Research leads to innovative products. *PCI Journal, Summer 2012*.
- Bastos, A. M., Sousa, H., & Melo, A. F. (2005). Methodology for the design of lightweight concrete with expanded clay aggregates. *TMS Journal, December*, 73-84.
- Bauer, R., & Lynam, P. H. (1990). *U.S. Patent No. 4,973,506*. Washington DC: U.S. Patent and Trademark Office. <http://www.google.de/patents/US4973506>
- Begović, M., i Tanasijević, D. (1997). Komercijalna klasifikacija i tipovi završne obrade arhitektonskog kamena. U *I jugoslovenski simpozijum o ukrasnom kamenu* (str. 184-192). Beograd: Kamegran.
- Bektas, F., Wang, K., & Ceylan, H. (2009). Effects of crushed brick aggregate on mortar durability. *Construction and Building Materials*, 23, 1909-1914.
- Benac, Č. (2013). *Rječnik pojmova u primijenjenoj geologiji i geološkom inženjerstvu*. Rijeka: Udžbenici sveučilišta u Rijeci.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2007). *Fibre reinforced cementitious composites*. London: Taylor & Francis.
- Berge, B. (2009). *The ecology of building materials*. Oxford: Elsevier.
- Bilbija, N. (1982). *Studija stanja i mogućnosti proširenja proizvodnje u oblasti prirodnog kamena u SFRJ: Arhitektonski kamen*. Beograd: Kamegran.
- Bilbija, N., i Matović, V. (2009). *Primijenjena petrografija: Svojstva i primene kamena*. Beograd: Građevinska knjiga.
- Bjegović, D., Serdar, I. M., i Kožoman, E. (2012). Utjecaj oplata kontrolirane propusnosti na mehanička i trajnosna svojstva zaštitnog sloja betona. *e-GFOS*, 3(4), 62-73.
- Blumenau, I. (1974). *Fasade*. Ljubljana: Gradbeni centar Slovenije.

- Bogas, J. A., Nogueira, R., & Almeida, N. G. (2014). Influence of mineral additions and different compositional parameters on the shrinkage of structural expanded clay lightweight concrete. *Materials and Design*, 56, 1039–1048. doi:10.1016/j.matdes.2013.12.013
- Bourke, P. T. (1976). *U.S. Patent No. 3,963,846*. Washington DC: U.S. Patent and Trademark Office. <https://www.google.com/patents/US3963846>
- Božilović, S. (1998). *Savremena organizacija graditeljstva*. Beograd: Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Building and Construction Authority. (n.d.). *Lightweight Composite Stone Panels 4*. <http://www.bca.gov.sg/Publications/EnhancementSeries/others/design2Ch4.pdf>
- Cachim, P. B. (2009). Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 1292-1297.
- Chandra, S., & Berntsson, L. (2002). *Lightweight aggregate concrete: Science, technology, and applications*. New York: Noyes Publications.
- Chen, B., & Liu, J. (2005). Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. *Cement and Concrete Research*, 35, 913–917. doi:10.1016/j.cemconres.2004.07.035
- Clarke, J. L. (Ed.) (2005). *Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Glasgow: Blackie Academic&Professional.
- Comité Euro-International du Béton. (1993). *CEB-FIP model code: Design code*. London: Thomas Telford.
- Corinaldesi, V., Giugliolini, M., & Moriconi, G. (2002). Use of rubble from building demolition in mortars. *Waste Management*, 22, 893-899.
- Crnković, B. (1979). Umjetnički i tehnički kriteriji pri izboru kamena. U K. Čuturilo (Ed.), *Kamen*. Pula: Istarska naklada.
- Crnković, B., i Šarić, Lj. (2012). *Građenje prirodnim kamenom*. Zagreb: UPI.2M PLUS.
- Cvetkovska Ocololjić, V. (Ed.) (2011). *1th international conference: Harmony of nature and spirituality in stone*. Beograd: Stone Studio Association.
- Debieb, F., & Kenai, S. (2008). The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 22, 886–893.
- Dimitrijević, V. (Ed.) (2013). *3rd international conference: Harmony of nature and spirituality in stone*. Beograd: Stone Studio Association.
- Đorđević, D. (1990). *Značaj i uloga provetravanog omotača zgrade u korelaciji mikro i makro klimatskih faktora*. Doktorska disertacija, Arhitektonski fakultet Univerziteta u Beogradu.

- Dorđević, D. (1996). Provetravane fasade. U B. B. Budisavljević, V. Georgijević i M. Jovanović Popović (Ed.), *Difuzija i kondenzacija u Arhitektonskim objektima* (str. 35-54). Beograd: Arhitektonski fakultet Univerziteta u Beogradu, Građevinski fakultet.
- Dorđević, V., Đorđević, P., i Milovanović, D. (1991). *Osnovi petrologije*. Beograd: Nauka.
- Gajić, V., Matović, V., Vasić, N., i Srećković-Batočanin, D. (2011). Petrophysical and mechanical properties of the Struganik limestone (Vardar Zone, western Serbia). *Геолошки анали Балканскога полуострва*, 72, 87-100.
- Geo Consulting s.n.c. Laboratorio analisi materiali. (2012). *Number of report n° 4142*.
- German Institute for Construction Engineering. (2008). *General approval by the building inspectorate: Ventilated external wall cladding „Airtec Stone“*.
- Ghosh, S. K. (2008). Construction loading in high-rise buildings. In E. G. Nawy (Ed.), *Concrete construction Engineering Handbook*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Grelk, B., Christiansen, C., Schouenborg, B., & Malaga, K. (2007). Durability of marble cladding – A comprehensive literature review. In K. R. Hoigard & M. J. Scheffler (Eds.), *Dimension stone use in building construction* (pp. 105-123). West Conshohocken: ASTM.
- Hannant, D. J. (1987). *Fibre cements and fibre concretes*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Hansen T.C.(1992). *Recycling of demolished concrete and masonry*. RILEM Rep. 6, E&FN Spon, London.
- Harak, S. (2001). *Izbor građevinskog materijala za malter na bazi opekarskog loma na osnovu ispitivanja tržišta i uzoraka materijala*. Diplomski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Hassanpour, M., Shafiqh, P., & Mahmud, H. B. (2012). Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement – A review. *Construction and Building Materials*, 37, 452–461. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.071
- Herzog, T., Krippner, R., & Lang, W. (2004). *Facade construction manual*. Basel: Birkhäuser.
- Hodges, W. E. (1976). *U.S. Patent No. 3,950,202*. Washington DC: U.S. Patent and Trademark Office. <https://www.google.com/patents/US3950202>
- Honeyborne, D. B., Ashurst, J., Price, C., & Ross, K. (2006). Surface treatments. In J. Ashurst & F. G. Dimes (Eds.), *Conservation of building & decorative stone* (pp. 155-184). Oxford: Butterworth Heinemann (Elsevier).
- Hunt, B. (2005). Building stones explained 3: Granite. *Geology Today*, 21(3), 110-116.
- Ignjatović, I., Tošić, N., Marinković, S., i Dragaš, J. (2015). Tehnološki i ekonomski aspekt proizvodnje agregata od recikliranog betona u Srbiji. U D. Jevtić (Ed.), *Građevinski*

- materijali u savremenom graditeljstvu* (str. 31-38). Beograd: Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije.
- Plić, M. (1997). Problemi klasifikovanja građevinskog kamena. U *I jugoslovenski simpozijum o ukrasnom kamenu* (str. 1-3). Beograd: Kamergran.
- Institut IMS. (2014). *Извештај о испитивању портланд композитног цемента РС 20М (S-L) 42.5R (CEM II/A-M(S-L)42.5R)*
- Институт за путеве, Завод за грађевинске материјале, Лабораторија за камен и камене агрегате. (2012). *Извештај о техничким својствима камена, пореклом из каменолома Шутица на Букуљи код Аранђеловца, са оценом употребе као архитектонског грађевинског камена*. Београд.
- Ivović, B., Marčeta, L., i Delić-Nikolić, I. (2009). Kriterijumi za adekvatan izbor arhitektonsko-građevinskog kamena za podne i fasadne obloge građevinskih objekata u skladu sa evropskom regulativom. U R. Folić (Ed.), *Ocena stanja, održavanje i sanacija građevinskih objekata i naselja* (str. 567-572). Beograd: Savez građevinskih inženjera Srbije.
- Janković, K. (2000). Neka svojstva betona sa recikliranom opekom kao agregatom. *Materijali i konstrukcije*, 43(1/2), 32-34.
- Janković, K. (2001). *Drobljena opeka kao agregat za beton*. Beograd: Zadužbina Andrejević.
- Janković, K., Bojović, D., Nikolić, D., Lončar, Lj., i Romakov, Z. (2010). Frost resistance of concrete with crushed brick as aggregate. *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering*, 8(2), 155-162.
- Janković, K., Nikolić, D., Bojović, D., Lončar, Lj., i Romakov, Z., (2011). The estimation of compressive strength of normal and recycled aggregate concrete. *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering*, 9(3), 419-431.
- Jevtić, D. (1996). *Svojstva svežeg i očvrstlog betona u funkciji termohigrometrijskih parametara sredine*. Beograd: Građevinski fakultet.
- Jevtić, D. (2013). Uticaj vrste agregata i prisustva mikroarmature na fizičko-mehanička svojstva tradicionalnih maltera. U Z. Grdić (Ed.), *Fasade i krovovi u zgradarstvu: Savremeni i tradicionalni materijali i sistemi u funkciji energetske efikasnosti, trajnosti i estetike* (str. 69-82). Beograd: Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije.
- Jevtić, D., i Vojnović Čalić, T. (2014). Fizičko-mehanička svojstva mikroarmiranih maltera sa agregatom u vidu drobljene opeke i ekspanzirane gline. U Z. Grdić (Ed.), *Građevinski materijali u savremenom graditeljstvu* (str. 171-182). Beograd: Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije.

- Jevtić, D., i Zakić, D. (2002). Uticaj vrste i količine polipropilenskih vlakana na mehanička svojstva kompozita tipa maltera i betona, *Metalurgija*, 8(1), 39-50.
- Jevtić, D., i Zakić, D. (2006). Mikroarmirani malteri i betoni – mogućnost poboljšanja fizičko-mehaničkih svojstava. *Materijali i konstrukcije*, 49(3/4), 35-44.
- Jevtić, D., Zakić, D., i Harak, S. (2002). Ispitivanje različitih tipova maltera spravljanih na bazi opekarskog loma. *Materijali i konstrukcije*, 45, 60-63.
- Jevtić, D., Zakić, D., Markićević, J., Pavlović, Lj., i Terzić, A. (2006). Mogućnost spravljanja i primene betona na bazi recikliranog opekarskog loma. U *I simpozijum o reciklažnim tehnologijama i održivom razvoju* (str.135-141).
- Jevtić, D., Zakić, D., i Savić, A. (2011). Relevantne statičke i dinamičke metode za ocenu žilavosti mikroarmiranih betona. *Građevinski materijali i konstrukcije*, 54(1), 3-27.
- Kareem, K. R., & Pandey, R. K. (2013). Study of management and control of waste construction materials in civil construction project. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2(3), 345-350
- Ke, Y., Beaucour, A. L., Ortola, S., Dumontet, H., & Cabrillac, R. (2009). Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 2821–2828. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.038
- Kim, J. J., & Rigdon, B. (1998a). *Sustainable architecture module: Introduction to sustainable design*. Ann Arbor: National Pollution Prevention Center for Higher Education, University Ave.
<http://www.umich.edu/~nppcpub/resources/compendia/ARCHpdfs/ARCHdesIntro.pdf>
- Kim, J. J., & Rigdon, B. (1998b). *Sustainable architecture modul: Qualities, use, and examples of sustainable building materials*. Ann Arbor: National Pollution Prevention Center for Higher Education, University Ave.
<http://www.umich.edu/~nppcpub/resources/compendia/ARCHpdfs/ARCHsbmIntro.pdf>
- Kind-Barkauskas, F., Kauhsen, B., Polónyi, S., & Brandt, J. (2002). *Concrete construction manual*. Basel: Birkhäuser.
- Knaack, U., Klein, T., Bilow, M., & Auer, T. (2014). *Façades: Principles of construction*. Basel: Birkhäuser.
- Kourkoulis, S. K. (Ed.) (2006). *Fracture and failure of natural building stones: Application in the restoration of ancient monuments*. Dordrecht: Springer.
- Krastavčević, M. (1996). *Primena montažnog građenja*. Beograd: Časopis Izgradnja.
- Krstić, A. (1995). *Osnove materijalizacije savremenih industrijalizovanih objekata*. Beograd: Arhitektonski fakultet Univerziteta u Beogradu.

- Krstić, A. (2003). *Raznovrsnost materijalizacije arhitektonskih struktura*. Beograd: Arhitektonski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Kurešević, L. (2013). *Potencijalnost tercijarnih magmatskih kompleksa vardarske zone Srbije sa aspekta arhitektonskog građevinskog kamena*. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Lammert, B. T., & Hoigard, K. R. (2007). Material strength considerations in dimension stone anchorage design. *Journal of ASTM International*, 4(6), 40-57.
- Loughran, P. (2006). *Failed stone: Problems and solutions with concrete and masonry*. Basel: Birkhäuser.
- Lukić, I., Radonjanin, V., i Malešev, M. (2015). Osnovna svojstva konstrukcijskih lakoagregatnih betona na bazi otpadnih i recikliranih materijala. U D. Jevtić (Ed.), *Građevinski materijali u savremenom graditeljstvu* (str. 171-182). Beograd: Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije.
- Magajne, D. (1979). Tehnologija gradnje objekata po sistemu slobodnostojećih elemenata. U *Sistem samostojećih elemenata: Uvođenje sistema montažne gradnje od opeke – ciglarskih proizvoda u visokogradnji* (str. 32-37). Goričke ciglane i Projekt Nova Gorica.
- Maksimović, M. (2006). *Eksploatacija, ispitivanje, primena arhitektonskog kamena*. Beograd: Contractor.
- Marić, L. (1951). *Petrografija za studente arhitekture, građevinarstva, likovne i primjenjene umjetnosti*. Zagreb: Školska knjiga.
- Martinković, K. (1985). *Osnovi zgradarstva I*. Beograd, Novi Sad: Časopis Izgradnja i Fakultet tehničkih nauka, OOUR Naučno obrazovni institut za industrijsku gradnju.
- Matović, V. (2009). *Petrološka i tehnička svojstva mezozojskih karbonatnih stena Srbije*. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Matović, V., i Vojnović Čalić, T. (2015). Mesozoic carbonate rocks in Serbia used as dimension stone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. doi:10.1007/s10064-015-0722-0
- McEvoy, M. (2014). *External components*. New York: Routledge.
- Mindess, S. (2008). Fibrous concrete reinforcement. In S. Mindess (Ed.), *Developments in the formulation and reinforcement of concrete* (pp. 154-166). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Moravia, W. G., Gumieri, A. G., & Vasconcelos, W. L. (2010). Efficiency factor and modulus of elasticity of lightweight concrete with expanded clay aggregate. *IBRACON Structures and Materials Journal*, 3(2), 195-204.

- Muravljev, M. (1983). *Građevinski materijali: Posebni deo 2*. Beograd: Građevinski fakultet.
- Muravljev, M. (1999). Mikroarmirani beton. U M. Muravljev (Ed.), *Specijalni betoni i malteri: Svojstva, tehnologija, primena* (str. 97-116). Beograd: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Muravljev, M. (2007). *Građevinski materijali*. Beograd: Građevinska knjiga.
- Muravljev, M. (2010). *Osnovi teorije i tehnologije betona*. Beograd: Građevinska knjiga.
- Muravljev, M., i Jevtić, D. (2003). *Građevinski materijali 2*. Beograd: Akademska misao.
- Muravljev, M., Živković, S., Jevtić, D., i Zakić, D. (2002). Uticaj dodatka polipropilenskih vlakana na smanjenje skupljanja i fisuraciju kompozita tipa maltera i betona. *Materijali i konstrukcije*, 45(1/2), 11-18.
- Naggatz, S. G., & Gerns, E. A. (2007). Full-scale flexural strength testing for stone cladding design. In K. R. Hoigard & M. J. Scheffle (Eds.), *Dimension stone use in building construction* (pp. 3-10). West Conshohocken: ASTM.
- Neuendorf, K. K. E., Mehl, J. P., & Jackson, J. A. (2005). *Glosary of geology*. Alexandria: American Geological Institute. <http://books.google.rs/books?id=SfnSesBc-RgC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Newman, J. B. (1993). Properties of structural lightweight aggregate concrete. In J. L. Clarke (Ed.), *Structural lightweight aggregate concrete* (pp. 10-25). Glasgow: Blackie Academic & Professional.
- Osnovi teorije i tehnologije betona (2013). Prezentacija sa predavanja, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.grf.bg.ac.rs%2Fp%2Flearning%2F2__predavanje_1383048146459.ppt&ei=8WOVVYioL8fpUpjYgbAN&usg=AFQjCNHg-LRQEjdCot8eTPOKMWhlbTrRvw&sig2=csY1YrGrawpMEMjKTmwmPQ&bvm=bv.96952980,d.d24
- Otović, S. (1995). Tehnologija proizvodnje i izvođenja elemenata sa aspekta materijala. U R. Dimitrijević (Ed.), *Montažne betonske fasade* (str. 131-138). Beograd: Institut IMS.
- Pakvor, A., Kasaš, K., i Kekanović, M. (1999). Betoni na bazi keramičkog loma i reciklirane opeke. U M. Muravljev (Ed.), *Specijalni betoni i malteri: Svojstva, tehnologija, primena* (str. 65-78). Beograd: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Institut za materijale i konstrukcije.
- Pankratov, V. (1971). *Hermetizacija fuga montažnih zgrada: Priručnik za projektante*. Ljubljana: Gradbeni center Slovenije.

- Pavković Bugarski, Lj. (2006). Uloga standardizacije i procesu harmonizacije sa evropskom unijom. U Ž. Perišić i D. Čukić (Eds.), *Evrokodovi za konstrukcije: Usvajanje evropskih standarda u građevinarstvu kao nacionalnih standarda Srbije i Crne Gore* (str. 1-10). Beograd: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Petrović, P., i Nedić, Lj. (1995). Karakteristike fasada. U R. Dimitrijević (Ed.), *Montažne betonske fasade* (str. 7-19). Beograd: Institut IMS.
- Philipson, M. (2003). *DTI Construction industry directorate project report: Current practice and potential uses of prefabrication*. Building Research Establishment.
<http://projects.bre.co.uk/prefabrication/prefabrication.pdf>
- Pires, V., Amaral, P. M., Rosa, L. G., & Camposinhos, R. S. (2011). State flexural and anchorage considerations in cladding design. *Construction and Building Materials*, 25, 3966-3971.
- Poon, C.S., & Chan, D. (2006). Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Construction and Building Materials*, 20, 569-577.
- Popović, M., i Mirović, M. (Eds.). (1978). *Mala enciklopedija*. Beograd: Prosveta.
- Popovics, S. (1998). *Strength and related properties of concrete: A quantitative approach*. New York: John Wiley & Sons.
- Protić, M. (1984). *Петрологија седиментних стена*. Beograd: Рударско-геолошки факултет.
- Radoičić, V. (1997). *Beton na bazi reciklirane opeke armiran polipropilenskim vlaknima*. Magistarska teza, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Radonjanin, V., Malešev, M., i Folić, R. (1999). Polimerima modifikovani betoni. U M. Muravljev (Ed.), *Specijalni betoni i malteri: Svojstva, tehnologija, primena* (str. 117-136). Beograd: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Rixom, R., & Mailvaganam, N. (1999). *Chemical admixtures for concrete*. London: E & FN Spon.
- Robinson, R. C. (1980). *U.S. Patent No. 4,223,502*. Washington DC: U.S. Patent and Trademark Office. <https://www.google.com/patents/US4223502>
- Romila, C. (2013). General principles for the design and construction of ventilated façades. *Buletinul Institutului Politehnic Din Iași, LIX(LXIII)(3)*, 161-169.
- Roux, P., & Alexander, A. (n.d.). *Sustainable building materials*. <http://www.sustainabledevelopmentnetwork.com/manual1/Chapter%203.pdf>
- Salem, R. M., Burdette, E. G., & Jackson, N. M. (2003). *Interrelationship of physical properties of concrete made with recycled aggregates*. TRB 2003 Annual Meeting. http://www.ltrc.lsu.edu/TRB_82/TRB2003-001878.pdf

- Scheffler, J. M., & Kneezel, D. S. (2007). Testing of composite stone faced aluminum honeycomb panels. In K. R. Hoigard & M. J. Scheffler (Eds.), *Dimension stone use in building construction* (str. 11-24). West Conshohocken: ASTM.
- Scheffzük, Ch., & Nikolayev, D. I. (2008). The bowing potential of granitic rocks: Rock fabrics, thermal properties and residual strain. *Environmental Geology*, 55, 1437-1448.
- Schouenborg, B., Grelk, B., & Malaga, K. (2007). Testing and assessment of marble and limestone (TEAM) – Important results from a large European research project on cladding panels. In K. R. Hoigard and M. J. Scheffler (Eds.), *Dimension stone use in building construction* (pp. 124-37). West Conshohocken: ASTM.
- Siegesmund, S., & Török, A. (2011). Building stones. In S. Siegesmund & R. Snethlage (Eds.) *Stone in architecture: Properties, durability* (pp. 11–96). Berlin: Springer.
- Siegesmund, S., Mosch, S., & Scheffzük, C., & Nikolayev, D. I. (2008) The bowing potential of granitic rocks: Rock fabrics, thermal properties and residual strain. *Environmental Geology*, 55, 1437-1448.
- Siegesmund, S., & Snethlage, R. (2011). Preface. In S. Siegesmund & R. Snethlage (Eds.), *Stone in architecture: Properties, durability* (pp. v–vii). Berlin: Springer.
- Smith, R. E. (2010). *Prefab Architecture: A guide to modular design and construction*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Snethlage, R. (2011). Natural Stones in architecture: Introduction. In S. Siegesmund & R. Snethlage (Eds.), *Stone in architecture: Properties, durability* (pp. 1–10). Berlin: Springer.
- Staib, G., Dörrhäfer, A., & Rosenthal, M. (2008). *Components and systems: Modular construction – Design, structure, new technologies*. Munich: Institut für internationale Architektur, and Basel: Birkhäuser.
- Stojiljković, I., i Denisenko, I. (1999). Keramzit betoni. U M. Muravljov (Ed.), *Specijalni betoni i malteri: Svojstva, tehnologija, primena* (str. 47-64). Beograd: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Stojković, M. (1997). Operacionalizacija vrednovanja arhitektonsko-građevinskog kamena NSR metodom. U *I jugoslovenski simpozijum o ukrasnom kamenu* (str. 312-324). Beograd: Kamegran.
- Svec, J. J., & Jeffers, P.E. (1972). *Modern masonry panel construction systems*. Boston: Brick and Clay Record.
- Szemerey-Kiss, B. (2012). The application of adhesion strength test in the assesment of compatibility of repair mortars and porous limestones. Conference of junior researchers in civil engineering. Budapest, BME.

- <https://www.me.bme.hu/doktisk/konf2012/papers/233-239.pdf>
- Tabašević, J. (2014, mart). Ventilisane kamene fasade – Tabaš. *Build*, 29.
<http://www.buildmagazin.com/index2.aspx?fld=tekstovi&ime=bm2911.htm>
- Terezopoulos, N. (2004). The challenge for European ornamental stones. In Proceedings of the 1st OSNET Workshop.
http://www.osnet.ntua.gr/Sectors/01_Quarrying/Publications/The_challenge_for_European_Ornamental_Stones.pdf. Accessed 1 March 2014
- The Institution of Structural Engineers. (1999). *Interim guidance on the design of reinforced concrete structures using fibre composite reinforcement*. London: The Institution of Structural Engineers.
- Tišljar, J. (2001). *Sedimentologija karbonata i evaporita*. Zagreb: Institut za geološka istraživanja.
- Udruženje inženjera u rudarstvu. (n.d.). *Javna tribina o predlogu Strategije upravljanja mineralnim resursima R. Srbije*. <http://udruzenjeir.org/tag/mineralni.resursi.srbije/>
- United Nations. (n.d.). *UN documents: Gathering a body of global agreements*.
<http://www.un-documents.net/ocf-02.htm>
- University of Alaska. (2003). *Exterior ventilated cladding*. (Johanson, N. & Seifert, R. D., Trans.). <http://www.uaf.edu/files/ces/publications-db/catalog/eeh/HCM-01558.pdf>
- U.S. Department of Energy. (n.d.). Buildings energy data book – Notes on embodied energy.
<http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/TableView.aspx?table=Notes>
- Vasić, N. (Ed.) (2012). *2nd international conference: Harmony of nature and spirituality in stone*. Beograd: Stone Studio Association.
- Vasiljević, I. (n.d.) Osnovi geofizičkog karotaža: prvo predavanje.
http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&ved=0CFUQFjAE&url=http%3A%2F%2Fwww.rgf.bg.ac.rs%2Fpredmet%2FRO%2FVI%2520semestar%2FOsnovi%2520geofizickog%2520karotaza%2FPredavanja%2Fpredavanje01.pps&ei=B9MUUpiiNcOn4ATcnoH4DA&usg=AFQjCNF5D5u-G3k_oLd8pgxeJFCOdXmtGg&sig2=RB0vRi_USuElxLctoSF5dQ&bvm=bv.50952593,d.bGE
- Vojnović Čalić, T., Jevtić, D., i Krstić-Furundžić, A. (2015). Otpornost na mraz mikroarmiranih cementnih maltera sa agregatom od drobljene opeke. U D. Jevtić (Ed.), *Građevinski materijali u savremenom graditeljstvu* (str. 39-48). Beograd: Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije.
- Vučinić, R. (1984). Industrijsko građenje objekata u sistemu „Rad“. Kostić Đ. (Ed.). Beograd.: Građevinska radna organizacija RAD.

- Vušović, O., Purić, M., i Delić-Nikolić, I. (2009). Vremensko propadanje i održavanje kamena u građevinskim objektima. U R. Folić (Ed.), *Ocena stanja, održavanje i sanacija građevinskih objekata i naselja* (str. 367-372). Beograd: Savez građevinskih inženjera Srbije.
- Vytlačilová, V. (2011). The fibre reinforced concrete with using recycled aggregates, *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, 5(3), 359-366.
- Wartzeck, S., Herrmann, E. M., Krammer, M., & Sturm, J. (2015). *Enclose, build: Walls, façade, roofs*. Basel: Birkhäuser.
- Watts, A. (2013). *Modern construction handbook*. Vienna: AMBRA V.
- Winkler, E. M. (1996). Properties of marble as building veneer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 33(2), 215-218.
- Yu, J. Y. H., & Chan, S. L. (2001). Practice and testing of stone cladding in Hong Kong. http://88.198.249.35/preview/2slqmYRsQTcNraJRvnLlRt2Kw9jhsPE_PvM81GpeswQ,/Practice-and-testing-of-stone-cladding-in-Hong-Kong.html?query=Granite-Cladding
- Zakić, D. (2001a). Uticaj dodataka polipropilenskih vlakana na adheziju maltera za podlogu. *Materijali i konstrukcije*, 44(3/4), 39-46.
- Zakić, D. (2001b). *Fizičko-mehanička svojstva maltera sa dodatkom polipropilenskih vlakana*. Magistarska teza, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Zakić, D. (2010). *Istraživanje parametara duktilnosti i udarne otpornosti sitnozrnih betonan mikroarmiranih sintetičkim vlaknima*. Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Žegarac, B., Stanković, S., Jovanović Popović, M., i Dimić, S. (1995). *Savremane fasade obložene kamenom*. Beograd: Arhitektonski fakultet univerziteta u Beogradu.
- Zgonik, R. (1979). Prikaz sistema slobodnostojećih elemenata sa detaljima kao i upotrebe elemenata u arhitekturi. U *Sistem samostojećih elemenata: Uvođenje sistema montažne gradnje od opeke – ciglarskih proizvoda u visokogradnji* (str. 22-30). Priština: Goričke ciglane i Projekt Nova Gorica.
- Živković, C., i Paunović, A. (2000). *Elaborat o rezervama i kvalitetu krečnjaka ležišta Tisnica kod Žagubice*. Beograd: FSD Geozavod-nemetali.

Референтна регулатива

- 89/106/EEC – Производи за грађевинарство (1989). European Communities.
- ACI Committee 318-02: Building Requirements for Structural Concrete (2002). American Concrete Institute.
- ACI Committee 330: Guide for Design and Construction of Concrete Parking Lots 1992. ACI 330R-92. American Concrete Institute.
- ASTM C1186-08: Standard Specification for Flat Fiber-Cement Sheets (2012). ASTM International.
- ASTM C119-14: Standard Terminology Relating to Dimension Stone (2014). ASTM International.
- ASTM C1354 / C1354M-09: Standard Test Method for Strength of Individual Stone Anchorages in Dimension Stone (2009). ASTM International.
- ASTM C568/C568M-10: Standard Specification for Limestone Dimension Stone (2010). ASTM International.
- ASTM C615/C615M-11: Standard Specification for Granite Dimension Stone (2011). ASTM International.
- ASTM C67-14: Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile (2009). ASTM International.
- Правилник о измени паравилника о југословенском стандарду за природни камен (1996). Савезни завод за стандардизацију.
- Правилник о техничким нормативима за бетон и армирани бетон (1987). Савезни завод за стандардизацију.
- Правилник о техничким нормативима за бетон и армирани бетон справљен са природном и вештачком лакоагрегатном испуном (1990). Савезни завод за стандардизацију.
- Правилник о техничким нормативима за пројектовање и извођење завршних радова у грађевинарству (1990). Савезни завод за стандардизацију.
- SRPS B.B3.200: Prirodni kamen – Ploče za oblaganje – Tehnički uslovi (2002). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS B.B8.010: Ispitivanje prirodnog kamena – Određivanje upijanja vode (1980). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS B.C8.029: Cement – Skupljanje cementnog maltera usled sušenja (1979). Institut za standardizaciju Srbije.

- SRPS EN 1015-1: Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 1: Određivanje granulometrijskog sastava čestica (prosejavanjem) (2008). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 1015-11: Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 11: Određivanje čvrstoće pri savijanju i čvrstoće pri pritisku očvrslog maltera (2008). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 1015-12: Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 12: Određivanje čvrstoće prijanjanja očvrslih maltera za unutrašnja i spoljašnja oblaganja na podloge (2008). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 1015-3: Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 3: Određivanje konzistencije svežeg maltera (pomoću potresnog stola) (2008). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 1015-6: Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 6: Određivanje zapreminske mase svežeg maltera (2008). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 12057: Proizvodi od prirodnog kamena – Modularne ploče – Zahtevi (2008). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 12058: Prirodni kamen – Ploče za podove i stepeništa – Zahtevi (2009). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 12190: Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija – Metode ispitivanja – Određivanje čvrstoće pri pritisku maltera za sanaciju (2010). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 12467: Vlaknasto-cementne ravne ploče – Specifikacija proizvoda i metode ispitivanja (2014). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 12617-4: Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija – Metode ispitivanja – Deo 4: Određivanje skupljanja i bubrenja (2010). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 12670: Prirodni kamen – Terminologija (2007). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 1341: Ploče od prirodnog kamena za spoljašnje popločavanje – Zahtevi i metode ispitivanja (2009). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 13412: Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija – Metode ispitivanja - Određivanje statičkog modula elastičnosti pri pritisku (2010). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 13687-3: Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija – Metode ispitivanja – Određivanje toplotne kompatibilnosti - Deo 3: Toplotni ciklusi bez delovanja soli za odmrzavanje (2010). Institut za standardizaciju Srbije.

- SRPS EN 1469: Prirodni kamen - Ploče za oblaganje zidova – Zahtevi (2009). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 1542: Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija – Metode ispitivanja – Merenje prionljivosti "pull-off" metodom (2010). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 196-1: Metode ispitivanja cementa – Deo 1: Ispitivanje čvrstoće (2008). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 1991-1-4: Evrokod 1 – Dejstva na konstrukcije – Deo 1-4: Opšta dejstva – Dejstva vetra (2012). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS EN 206-1: Beton – Deo 1: Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost (2011). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS ISO 6782: Agregati za beton – Određivanje nasute zapreminske mase (1999). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS U.M1.016: Beton – Ispitivanje otpornosti betona prema dejstvu mraza (1992). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS U.M1.026: Beton. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti i Poasonovog koeficijenta (1993). Institut za standardizaciju Srbije.
- SRPS U.M1.042: Beton. Određivanje brzine ultrazvuka i izrada kalibracione krive (1998). Institut za standardizaciju Srbije
- SRPS U.M8.002: Malteri za zidanje i malterisanje – metode ispitivanja (1997). Institut za standardizaciju Srbije.

Референтне интернет странице

Abaco Machines USA. <http://www.abacomachines.com>
Alibaba. www.alibaba.com
Alsecco UK Ltd. <http://www.alsecco.co.uk>
Brzak. <http://www.kamenbrzak.rs>
BusinessDictionary. <http://www.businessdictionary.com>
Cembrit. <http://www.cembrit.com>
Crafty Corner. www.craftycorner.co.za
CupaStone. <http://www.cupastone.com>
DiyTrade. www.diytrade.com
E-Rising International Limited. <http://www.ehopestone.com>
Eternit (Schweiz) AG. <http://www.eternit.ch>
FibreCem. <http://www.fibrececm.de>
Geološki informacioni sistem Srbije – GeolISS. <http://geoliss.mre.gov.rs>
Global b2b Network. www.global-b2b-network.com
GPI Design/ GPI International. <http://www.gpidesign.com>
Granit Peščar. <http://www.granit.rs>
Hominter. www.hominter.com
InvestorWords. <http://www.investorwords.com>
Kuraray. <http://www.kuraray.eu/en/>
Liapor. <http://liapor.rs/>
Mermeri i graniti Vučić [MGV]. <http://www.mgv.co.rs/>
Mobicomm d.o.o. <http://www.mobicomm-trade.com>
NFT-SL Fassadentechnik GmbH. <http://www.nft-sl.de>
Piero Zanella srl. <http://www.zanellamarmi.it/>
Sika. <http://srb.sika.com/>
Spajić. <http://www.spajic.com/sr/>
Stone Contact. <http://www.stonecontact.com>
StonePanel. <http://www.stonepanel.hr>
StonePly. <http://www.stoneply.com>
Swisspearl. <http://www.swisspearl-architecture.com>
Tabaš. <http://www.tabas.rs>
Tehnomarket d.o.o. www.tehnomarket.com
Teorija evolucije. <http://www.teorijaevolucije.com>

TerraCore Panels. <http://www.stonecladdingpanels.com>

U.S. Geological Survey. <http://geology.er.usgs.gov/paleo/glossary.shtml>

Walls Floors. www.wallsandfloors.co.uk

Wellkang Tech Consulting. <http://www.ce-marking.org/what-is-ce-marking.html>

Wenzou Microthin Stone Co. Ltd. <http://www.wz-mt.com>

Прилог 1 Категоризација камена

Категоризација камена према вредностима запреминске масе
(Bilbija i Matović, 2009, str. 25)

Група	Категорија	ρ_0 (g/cm ³)
Веома ниске	изразито лаган	< 1,0
Ниске	лаган	1,0-1,5
Средње	средње тежак	1,5-2,5
Високе	тежак	2,5-3,0
Веома високе	веома тежак	> 3,0

Категоризација камена према запремини пора
(Bilbija i Matović, 2009, str. 33)

Категорија	ρ_u (%)
Компактан	< 1
Мало порозан	1-2,5
Умерено порозан	2,5-5
Знатно порозан	5-10
Веома порозан	10-20
Екстремно порозан	> 20

Категоризација камена према хабајућој тврдоћи (SRPS B.B8.015)
(Bilbija i Matović, 2009, str. 45)

Категорија	Ha (cm ³ /50cm ²)
Изузетно тврд	< 5
Врло тврд	5-10
Тврд	10-20
Умерено тврд	20-30
Мекан	30-40
Изразито мекан	> 40

Класификација камена према упијању воде
(Bilbija i Matović, 2009, str. 52)

Категорија	А _в (% масе)
Врло мало	< 0,5
Мало	0,5-1,0
Умерено	1,0-2,5
Осетно	2,5-5,0
Велико	5,0-15,0
Врло велико	15,0-30,0
Изузетно велико	> 30

Категоризација камена према чврстоћи при притиску
(Bilbija i Matović, 2009, str. 120)

Категорија	Чврстоћа при притиску R _c (MPa)
Врло висока	> 250
Висока	150-250
Средње висока	100-150
Умерена	50-100
Ниска	10-50
Врло ниска	< 10

Категоризација стена према величини зрна
(Marić, 1951, str. 86)

Категорија	Промер зрна (mm)
Крупнозрна	1,75-2,25
Средње величине зрна	0,75-1,75
Ситнозрна	0,25-0,75
Финозрна	0,1-0,25

Прилог 2 Извод из стандарда SRPS B.B3.200 (1994)

Техничка својства камена	SRPS стандард	Технички услови за за архитектонски грађевински камен									
		Унутрашње облагање				Спољашње облагање					
		Хоризонталне површине			Вер. по.	Хоризонталне површине			Вертикалне површине		
		ух-1	ух-2	ух-3	ув	сх-1	сх-2	сх-3	св-1	св-2	св-3
Чврстоћа при притиску (МПа):	В.В8.012										
- у сувом стању		100	#	#	#	140	120	#	160	140	#
- у водозасићеном стању		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
- после дејства мраза		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Чврстоћа при савијању (МПа)	В.В8.017	12	8	6	#	18	12	8	18	12	8
Отпорност на хабање брушењем (cm ³ /50cm ²)	В.В8.015	14	25	35	#	12	14	18	#	#	#
Запреминска маса (kg/ m ³):	В.В8.032										
- са порама и шупљинама		#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
- без пора и шупљина		#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
Порозност (%)	В.В8.032	#	#	#	#	5	7	#	5	#	#
Упијање воде (%)	В.В8.010	1	3	#	#	1	2	3	1	2	#
Постојаност на атмосфералије	В.В8.013	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
Постојаност на дејство мраза	В.В8.001	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
Постојаност на дејство Na ₂ SO ₄ (губитак масе %)	В.В8.002	-	-	-	-	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Топлотно ширење (mm/m)		-	-	-	-	+	+	+	+	+	+

- # Услови квалитета се не утврђују, али се прилажу резултати испитивања
 - Услови квалитета нису прописани
 + Задовољавајући резултати испитивања према важећим стандардима

- ух-1** Врло интензиван пешачки саобраћај – робне куће, хотели, болнице, јевни објекти, пословне зграде, индустријски објекти, биоскопи и слично.
ух-2 Интензиван пешачки саобраћај – продавнице, самопослуге, стамбене зграде, музеји, ресторани, школе и слично.
ух-3 Умерен пешачки саобраћај – библиотеке, архиве, књижаре, чекаонице и слично.
сх-1 Врло интензиван пешачки, а повремено и аутомобилски саобраћај – тргови, пешачке зоне, улице, трговачки центри и слично.
сх-2 Интензиван пешачки саобраћај – паркови, шеталишта, терасе, пешачке зоне у близини споменика и слично.
сх-3 Умерен пешачки саобраћај.
св-1 Објекти преко 30 m висине изнад терена.
св-2 Објекти висине од 10 до 30 m изнад терена.
св-3 Објекти висине до 10 m изнад терена.

Прилог 3 Техничка својства примењеног камена

Техничка својства камена *Шутица* (Институт за путеве, 2012)

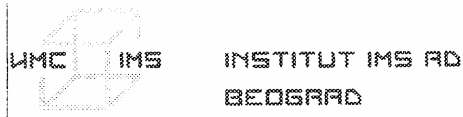
Техничка својства камена	SRPS стандард	Резултати испитивања
Чврстоћа при притиску (МРа):	В.В8.012	126
- у сувом стању		112
- у водозасићеном стању		111
- после дејства мраза		
Чврстоћа при савијању (МРа)	В.В8.017	8,4
Отпорност на хабање брушењем (cm ³ /50cm ²)	В.В8.015	8,9
Запреминска маса (kg/ m ³):	В.В8.032	2640
- са порам и шупљинама		2610
- без пора и шупљина		
Порозност (%)	В.В8.032	1,1
Упијање воде (%)	В.В8.010	0,53
Постојаност на дејсво мраза	В.В8.002	постојан
Постојаност на повишеним температурама	Лабораторијска метода	постојан
Садржај (%):	В.В8.042	0,007
-хлорида, Cl ⁻		није доказан
-сулфида, S ²⁻		0,01
-сулфата, обрач. као SO ³		

Техничка својства камена *Скржут* (Geo Consulting, 2012)

Техничка својства камена	SRPS стандард	Резултати испитивања
Чврстоћа при савијању (MPa)	EN 12372	13,28
Запреминска маса са порама и шупљинама (kg/ m ³)	EN 1936	2672
Порозност отворена (%)	EN 1936	1,27
Упијање воде (%)	EN 13755	0,414
Постојаност на дејство мраза (MPa) -чврстоћа при савијању након 12 циклуса	EN 12371 и EN 12372	13,11
-чврстоћа при савијању након 56 циклуса		12,84
Отпорност на топлотни шок Δm (%)	EN 14066	-0,02
Коефицијент капиларног упијања воде (g/m ² x s ^{0,5})	EN 1925	0,30
Отпорност према клизању (суво)	EN 14231	58
Сила при лому на месту рупе за анкере (N)	EN 13364	1350
Отпорност према хабању (mm)	EN 14157	20,1

Прилог 4 Резултати испитивања портланд-композитног цемента

Извештај о испитивању портланд композитног цемента
PC 20M (S-L) 42.5R (CEM II/A-M(S-L)42.5R) (INSTITUT IMS, 2014)



РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА

HEMIJSKI SASTAV			
SiO ₂ , %	21.15	CO ₂ , %	1.65
Al ₂ O ₃ , %	5.62	Cl ⁻ , %	0.010
Fe ₂ O ₃ , %	3.11	Slobodni CaO ¹⁾ , %	1.53
CaO, %	59.67	Zbir:	100.23
MgO, %	2.68	Sadržaj u vodi rastvorljivog Cr(VI), ppm	2.7
SO ₃ , %	3.28	Pucolanska aktivnost nakon 8 dana	/
S ²⁻ , %	0.10	Pucolanska aktivnost nakon 15 dana	/
Na ₂ O, %	0.26	Sadržaj sastojaka u cementu ¹⁾ , %	
K ₂ O, %	0.48	klinker	78.85
MnO, %	0.370	gips	5.25
Gubitak žarenjem, %	3.50	zgura	11.92
Nerastvorljivi ostatak u HCl/Na ₂ CO ₃ , %	1.75	pucolan	/
Nerastvorljivi ostatak u HCl/KOH, %	1.12	krečnjak	3.98

FIZIČKO - MEHANIČKA SVOJSTVA							
Finoća mliva	0.3	Svojna čvrstoća, MPa	1 dan	2 dana	3 dana	7 dana	28 dana
- ostatak na situ 0.09mm, %	4150		/	6.1 ± 0.4	/	/	9.3 ± 0.5
- specifična površina (Blaine), cm ² /g							
Zapreminska masa, g/cm ³	3.08						
Zapreminska masa, kg/m ³		iskazana je proširena merna nesigurnost sa faktorom obuhvata k=3,18 koja obezbeđuje nivo poverenja od 95%					
- rastresito stanje	910	Pritisna čvrstoća, MPa	1 dan	2 dana	3 dana	7 dana	28 dana
- zbijeno stanje	1460		/	26.3 ± 0.5	/	/	51.9 ± 2.6
Voda za standardnu konzistenciju, %	29.2						
Vreme vezivanja, min,		iskazana je proširena merna nesigurnost sa faktorom obuhvata k=2,57 koja obezbeđuje nivo poverenja od 95%					
- početak	250						
- svršetak	310						
Stalnost zapremine		Stepen beline ¹⁾ , %					/
- kolači	Post	Toplota hidratacije nakon 7 dana, J/g					/
- Le Chatelier, mm	1.0						

¹⁾ van obima akreditacije

Rukovodilac ispitivanja

Minja Savić

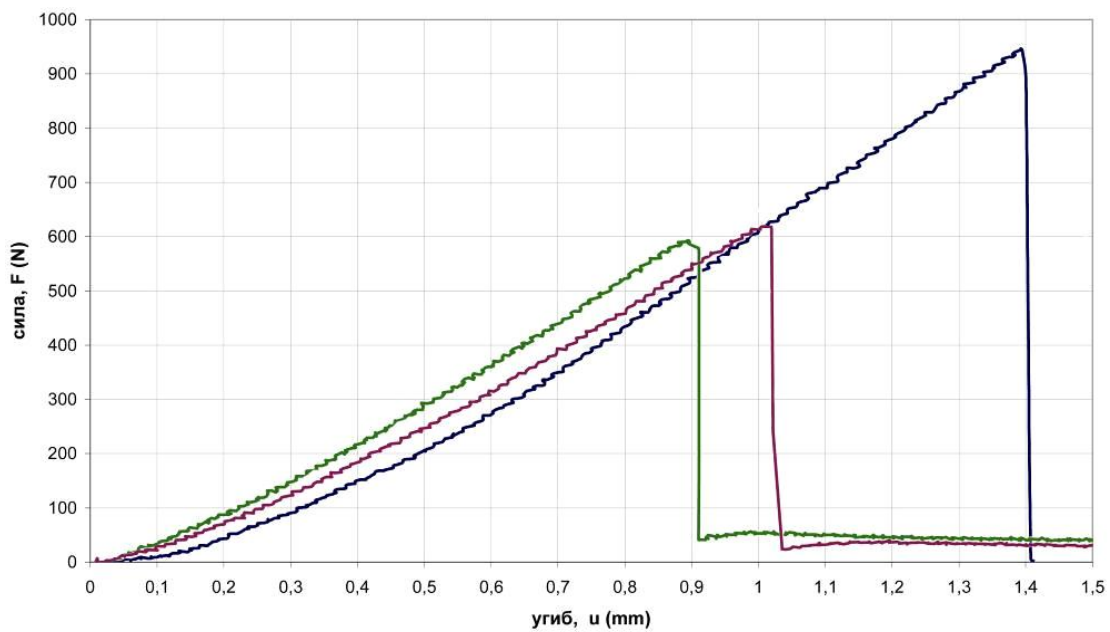
Minja Savić, dipl.hem.

IZVEŠTAJ O ISPITIVANJU

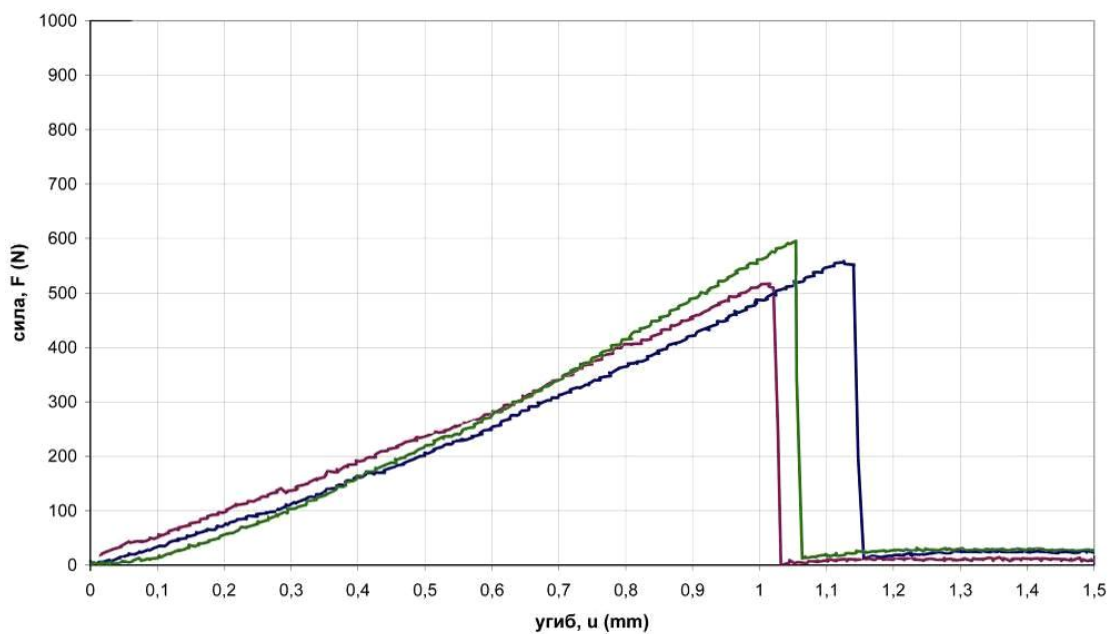
Rr VHM- 279/14

Strana 3 od 3

Прилог 5 Чврстоћа панела при савијању: дијаграм сила-угиб



Дијаграм сила-угиб, панел M₁



Дијаграм сила-угиб, панел M₃

Прилог 6 Дејство ветра

Прорачун дејства ветра на фасадну облогу (димензија 60 x 60 cm) која се налази у оквиру ветреног фасадног система (Табаш) према EN 1991-1-4 *Evrokod 1: Dejstva na konstrukcije, deo 1-4: Dejstva vetra*, за карактеристичан случај за Београд (објекат висине до 50 m, раван терен).

Основна брзина ветра V_b

Фундаментална вредност основне брзине ветра:

$$V_{b,0} = 20,7 \text{ m/s} \quad (\text{Вредност за Београд према Републичком метеоролошком заводу})$$

Коефицијент правца:

$$c_{dir} = 1,0 \quad \text{Одељак 4.2(2)P, Напомена 2}$$

Коефицијент сезонског деловања:

$$c_{season} = 1,0 \quad \text{Одељак 4.2(2)P, Напомена 3}$$

$$V_b = c_{dir} * c_{season} * V_{b,0} = 20,7 \text{ m/s} \quad \text{Одељак 4.2(1)P, Израз (4.1)}$$

Категорија терена

IV категорија Табела 4.1

Карактеристични ударни притисак ветра q_b

Густина ваздуха:

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Одељак 4.5(1), Напомена 2}$$

Основни притисак ветра:

$$q_b = \frac{1}{2} * \rho * V_b^2 = 267,8 \text{ N/m}^2 \quad \text{Одељак 4.5(1), Израз (4.10)}$$

Интензитет турбуленције I_v

Коефицијент турбуленције:

$$k_1 = 1,0 \quad \text{Одељак 4.4(1)}$$

Коефицијент топографије:

$$c_0 = 1,0 \quad \text{Одељак 4.3.3}$$

Коефицијент изложености:

$$c_e(z) = 2,35 \quad \text{Табела 4.2}$$

Висина објекта:

$$z = 50\text{m}$$

Дужина храпавости:

$$z_0 = 1,0 \text{ m}$$

Табела 4.1

Минимална висина:

$$z_{\min} = 10 \text{ m}$$

Табела 4.1

Максимална висина:

$$z_{\max} = 200 \text{ m}$$

Одељак 4.3.2(1)

$$I_v(z) = k_l / (c_0(z) * \ln(z/z_0)) \text{ за } z_{\min} < z < z_{\max}$$

Одељак 4.4(1)

$$I_v(z) = k_l / (c_0(z) * \ln(z/z_0)) = 0,2556$$

Средња брзина ветра V_m

Дужина храпавости за II категорију терена:

$$z_{0,II} = 0,05 \text{ m}$$

Табела 4.1

Коефицијент терена:

$$k_r = 0,19 * (z_0/z_{0,II})^{0,07} = 0,2343$$

Коефицијент храпавости:

$$c_r(z) = k_r * \ln(z/z_0) \text{ за } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

Одељак 4.3.2

$$c_r(z) = k_r * \ln(z/z_0) = 0,9166$$

$$V_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * V_b = 18,9733 \text{ m/s}$$

Одељак 4.3.1

Коефицијент спољашњег притиска c_{pe}

$$c_{pe,1} = -1,4 \text{ или } c_{pe,1} = +1,0$$

Табела 7.1

Коефицијент унутрашњег притиска c_{pi}

$$c_{pi} = +0,2 \text{ или } c_{pi} = -0,3$$

Одељак 7.2.9(6), Напомена 2

Коефицијент нето притиска $c_{p,net}$

$$c_{p,net} = c_{pe} - c_{pi} = -1,4 - 0,2 = -1,6 \text{ (сисање)}$$

$$c_{p,net} = c_{pe} - c_{pi} = 1,0 + 0,3 = 1,3 \text{ (притисак)}$$

Притисак ветра w

$$w = q_p * c_{p,net} = 0,629 \text{ kN/m}^2 * (-1,6) = -1,006 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{сисање})$$

$$w = q_p * c_{p,net} = 0,629 \text{ kN/m}^2 * 1,3 = 0,8177 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{притисак})$$

Сила ветра која делује на панел димензија 60 x 60 cm

$$F_p = w * A = -1,006 \text{ kN/m}^2 * 0,36 \text{ m}^2 = -0,3621 \text{ kN} \quad (\text{сисање})$$

$$F_p = w * A = 0,8177 \text{ kN/m}^2 * 0,36 \text{ m}^2 = 0,2944 \text{ kN} \quad (\text{притисак})$$

Сила ветра која делује на зуб панела дужине 60 cm

$$F_z = F_p / (2 * L) = (-0,3621 \text{ kN}) / (2 * 0,6 \text{ m}) = 0,3017 \text{ kN m} \quad (\text{сисање})$$

$$F_z = F_p / (2 * L) = (0,2944 \text{ kN}) / (2 * 0,6 \text{ m}) = 0,2453 \text{ kN m} \quad (\text{притисак})$$

Биографија аутора

Кандидаткиња Тијана Војновић рођена је 29.10.1979. године у Београду, где је завршила основну школу и III београдску гимназију. Дипломирала је марта 2007. године на Архитектонском факултету Универзитета у Београду са општим успехом 8,06 у току студија и оценом 10 на дипломском раду под насловом *Концертна дворана на Ушћу* (ментор проф. Василије Милуновић), чиме је стекла назив дипломираног инжењера архитектуре. Током студија похађала је смер *Конструктивни системи*.

Кандидаткиња је уписала Докторске студије Архитектонског факултета Универзитета у Београду школске 2007/2008 године. Похађала је смер *Технологије у архитектури и менаџмент и биоклиматска и еколошка архитектура*.

У погледу искуства у струци, у периоду од 2006. до 2007. године кандидаткиња је ангажована као стручни сарадник *Центра за дигиталну археологију* на пројекту: *Интерактивни Гамзиград*. Поменути пројекат је обухватао истраживачки рад и идеалну реконструкцију Гамзиграда (Ромулијане), римског утврђења из IV в.н.е., у сарадњи са Републичким заводом за заштиту споменика културе Србије за потребе Министарства културе, односно кандидатуре за пријем на UNESCO листу заштићених споменика.

У периоду јануар 2008.- јул 2011. године кандидаткиња је запослена као пројектант сарадник у бироу АДД (Атеље Душан Тешић), на пројектима ентеријера, архитектуре и просторног уређења. У оквиру бироа је учествовала на домаћим и иностраним конкурсима. Од 2011. године члан је Инжењерске коморе Србије, Секција пројектаната.

У погледу ангажмана на факултету, у летњем семестру школске 2013/2014. године, Тијана Војновић је као студент докторских студија ангажована за помоћ у настави на предмету „Студио пројекат М5.1“ са темом *Енергетски ефикасан пословно-комерцијални објекат*, а у летњем семестру школске 2014/2015 на предмету „Студио М02АТ“ са темом *Енергетски ефикасан градски хотел*, на првој години Мастер студија на Архитектонском факултету у Београду, којима је руководила проф. др Александра Крстић-Фурунџић.

У погледу стручног усавршавања, кандидаткиња је учесник *Школе за будуће лидере одрживог развоја* у организацији Амбасадора животне средине уз подршку Градског секретаријата за животну средину (Београд, 2010. године), као и школе за младе истраживаче са темом интеграције соларних термалних система у оквиру архитектонских објеката (*Building Integration of Solar Thermal Systems*) у организацији COST акције TU1205 (Фрајбург, Немачка, 2014. године). Такође помаже у организацији летње школе за младе истраживаче: *Интегрални приступ унапређењу постојећих станова*, у организацији COST акције TU1104 - *Smart Energy Regions* и Архитектонског факултета – организатори проф. др Александра Ђукић и проф. др Александра Крстић-Фурунџић, Београд, април 2015.

Библиографија радова:

Рад објављен у истакнутом међународном научном часопису (M23):

Matović, V., i Vojnović Čalić, T. (2015). Mesozoic carbonate rocks in Serbia used as dimension stone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. doi:10.1007/s10064-015-0722-0

Радови објављени у зборницима радова са међународних научних скупова (M33):

Jevtić, D., i Vojnović Čalić, T. (2014). Fizičko-mehanička svojstva mikroarmiranih maltera sa agregatom u vidu drobljene opeke i ekspanirane gline. U Z. Grdić (Ed.), *Građevinski materijali u savremenom graditeljstvu* (str. 171-182). Beograd: Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije.

Радови објављени у зборницима радова са националних научних скупова (M63):

Vojnović Čalić, T., Jevtić, D., i Krstić-Furundžić, A. (2015). Otpornost na mraz mikroarmiranih cementnih maltera sa agregatom od drobljene opeke. U D. Jevtić (Ed.) *Građevinski materijali u savremenom graditeljstvu* (str. 39-48). Beograd: Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije.

Превод изворног текста у облику студије, поглавља или чланка (M44):

Vojnović, T., i Jovanović, L. (2009). Priroda i arhitektura. U P. Bojanić i V. Đokić (Eds.), *Teorija arhitekture i urbanizma* (str. 129-134). Beograd: Arhitektonski fakultet.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Потписани-а _____ Тијана М. Војновић _____

број индекса _____ Д2007/31 _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЈЕ ОБЛАГАЊА ФАСАДА

КОМПОЗИТНИМ ПАНЕЛИМА СА ЛИЦЕМ ОД КАМЕНА

- 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, 25. 12. 2015.

Војновић Тијана

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ДОКТОРСКОГ РАДА**

Име и презиме аутора _____ Тијана М. Војновић _____

Број уписа _____ Д2007/31 _____

Студијски програм _____ Архитектура и урбанизам _____

Наслов рада _____ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЈЕ ОБЛАГАЊА ФАСАДА _____

_____ КОМПОЗИТНИМ ПАНЕЛИМА СА ЛИЦЕМ ОД КАМЕНА _____

Ментор _____ Проф. др Александра Крстић-Фурунџић _____

Потписани _____ Тијана М. Војновић _____

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, 25.12.2015.

Војновић Тијана

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

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

МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЈЕ ОБЛАГАЊА ФАСАДА

КОМПОЗИТНИМ ПАНЕЛИМА СА ЛИЦЕМ ОД КАМЕНА

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, 25.12.2015.

Војновић Тијана

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