



Јелена П. Бијељић

**МОГУЋНОСТ ПРИМЕНЕ
ИНДУСТРИЈСКИХ НУСПРОИЗВОДА У
ГЕОПОЛИМЕРНИМ МАЛТЕРИМА И
БЕТОНИМА НА БАЗИ
ЕЛЕКТРОФИЛТЕРСКОГ ПЕПЕЛА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Текст ове докторске дисертације ставља се на увид јавности,
у складу са чланом 30., став 8. Закона о високом образовању
("Сл. гласник РС", бр. 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008,
44/2010,
93/2012, 89/2013 и 99/2014)

НАПОМЕНА О АУТОРСКИМ ПРАВИМА:

Овај текст сматра се рукописом и само се саопштава јавности (члан 7. Закона о ауторским и сродним правима, "Сл. гласник РС", бр. 104/2009, 99/2011 и 119/2012).

Ниједан део ове докторске дисертације не сме се користити ни у какве сврхе, осим за упознавање са њеним садржајем пре одбране дисертације.

Ниш, 2020.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND
ARCHITECTURE



Jelena P. Bijeljić

**POSSIBILITES OF USAGE OF INDUSTRIAL
BYPRODUCTS IN GEOPOLYMER MORTARS
AND CONCRETES BASED ON FLY ASH**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2020.

Чланови комисије:

1. **Др Ненад Ристић**, доцент (ментор)
Грађевинско – архитектонски факултет у Нишу
2. **Др Зоран Грдић**, редовни професор
Грађевинско – архитектонски факултет у Нишу
3. **Др Гордана Топличић – Ћурчић**, редовни професор
Грађевинско – архитектонски факултет у Нишу
4. **Др Мирјана Малешев**, редовни професор
Факултет техничких наука у Новом Саду
5. **Др Снежана Ђорић - Вељковић**, редовни професор
Грађевинско – архитектонски факултет у Нишу

Датум одбране докторске дисертације:

Захвалност

Ова дисертација је резултат вишегодишњег истраживања у области геополимерних материјала и неизмерно сам захвална свима који су дали свој допринос.

Хвала фирмама: „ТЕ Костолац Б“ из Костолаца, „Hesteel Serbia Iron & Steel“ д.о.о Београд – производни погон у Смедереву, „Bio Energy Point“ д.о.о Србија – производни погон у Бољевцу, „Неимар“ д.о.о. Ниш, „СРН“ д.о.о. Србија – погон у Поповцу, „Пут инжењеринг“ Ниш, „Србија аутопут“ – погон Печењеваца и „Сика“ д.о.о. Београд који су дали свој допринос у материјалу и тиме помогли израду ове дисертације.

Захваљујем се свом оцу Предрагу и колеги Бранимиру Станковићу на помоћи при изради бетонских мешавина, као и сталној помоћи при превозу и преносу материјала и узорака. Захваљујем се и колегама Душану Грдићу и Дејану Крстићу за помоћ приликом извођења испитивања.

Хвала др Зорану Грдићу, редовном професору и начелнику Лабораторије за грађевинске материјале, Грађевинско – архитектонског факултета у Нишу за стручну помоћ и подршку у изради дисертације.

Хвала др Гордани Топличаћ – Ђурчић, редовном професору и Шефу Лабораторије за грађевинске материјале, Грађевинско – архитектонског факултета у Нишу за помоћ при избору теме дисертације, стручној помоћи и сталним речима подршке.

Хвала мојим родитељима, мајци Биљани и оцу Предрагу, и брату Душану на стрпљењу и преузимању бројних приватних и пословних обавеза и тиме ми омогућавали несметан рад.

И на крају, посебно се захваљујем ментору и пријатељу др Ненаду Ристићу, доценту Грађевинско – архитектонског факултета у Нишу. Хвала за уложено време, стрпљење, разумевање, веру, физичку помоћ, подршку, труд и посвећеност мом личном и професионалном развоју. Хвала за све речи подршке и осећај припадности.

Јелена П. Бијељић

Подаци о докторској дисертацији

Ментор: Др Ненад С. Ристић, доцент
Универзитет у Нишу, Грађевинско – архитектонски факултет

Наслов: Могућност примене индустријских нуспроизвода у геополимерним малтерима и бетонима на бази електрофилтерског пепела

Резиме: Веза између еколошких материјала и грађевинских материјала се може успешно направити помоћу геополимера. Геополимери су композитни материјали сачињени од дугачких ланаца молекула насталих полимеризацијом геополимерних везива. Они се често дефинишу као чврсти и стабилни алуминосиликатни материјали, а као полазне сировине за њихову припрему могу се користити отпадни материјали попут индустријских нуспроизвода и раствори у течном стању попут NaOH и Na_2SiO_2 .

У експерименталном делу дисертације испитане су физичко–механичке, микроскопске карактеристике и трајност геополимерних малтера и бетона на бази електрофилтерског пепела. Израђено је 24 малтерских мешавина и 8 бетонских мешавина у којима је извршена делимична замена електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима (конверторском згуром, пепелом из дрвне биомасе, црвеним муљем, и отпадним стаклом) у износу од 5 % – 20 % са кораком 5 % у односу на масу везива, замена гранулисаном згуром из високе пећи у износу од 20 % – 100 % са кораком 20 %. Финоћа млива коришћених везивних материјала била је мања од 0,09 mm. Узорци геополимерног малтера и бетона су до времена испитивања неговани у амбијенталним условима.

Анализом резултата изнети су закључци у погледу могућности примене електрофилтерског пепела и других индустријских нуспроизвода за справљање геополимерних малтера и бетона. Доказано је да геополимерне малтерске и бетонске мешавине имају својства конструктивних материјала као и да они у погледу физичко–механичких карактеристика и трајности могу бити замена традиционалним малтерским и бетонским мешавинама.

Научна област: Грађевинарство

Научна дисциплина: Грађевински материјали и технологија бетона

Кључне речи: Геополимерни малтери, геополимерни бетони, електрофилтерски пепео, нуспроизводи, механичке чврстоће, трајност, животна средина, екологија

УДК:

691:502/504(043.3)
666.972:662.613.11(043.3)
666.971:662.613.11(043.3)

CERIF
класификација:

T 002, T 150, T 152

Тип лиценце
Креативне
заједнице:

CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral
Supervisor:

Assistant Professor Nenad S. Ristić,
University of Niš, Faculty of Civil Engineering and Architecture

Title:

Possibilities of usage of industrial byproducts in geopolymer mortars and concretes based on fly ash

Abstract:

The connection between eco and building materials can be successfully accomplished by using geopolymers. Geopolymers are composite materials made of long chain molecules incurred by polymerization of geopolymer binders. Usually, geopolymers are defined as a solid and stable aluminosilicate materials, made of industrial byproducts and liquid solutions such as NaOH and Na₂SiO₂.

The experimental part of the dissertation, contains the results of physical-mechanical, microscopic and durability properties of geopolymer mortars and concrete based on fly ash. For the purpose of determining the effect of different byproducts on characteristics of geopolymer mixtures, 24 batches of mortar and 8 batches of concrete were made and tested. Mass percentages of ladle slag, wood ash, red mud and waste glass in respect to the total mass of the binder was 0 to 20%, varied in 5 % steps of replacement. Mass percentage of ground granulated blast furnace slag in respect to the total mass of the binder was 0 to 100%, varied in steps of 20 % steps of replacement. All batches were made by using binder with the particle size smaller than 0,09 mm. The samples of geopolymer mortar and concrete were cured at an ambient temperature.

According to the test results some recommendations for the possible application of fly ash and other industrial byproducts for making geopolymer mortars and concretes are made. It has been proved that geopolymer mortars and concretes might be used as a construction building materials. Furthermore, because of their physical-mechanical characteristics and durability properties, they can be alternative solution for the traditional mortar and concrete mixtures.

Scientific
Field:

Civil engineering

Scientific
Discipline:

Civil engineering materials and Concrete technology

Keywords:

Geopolymer mortar, geopolymer concrete, fly ash, byproducts, mechanical properties, durability, environment, ecology

UDC:

691:502/504(043.3)
666.972:662.613.11(043.3)

666.971:662.613.11(043.3)

CERIF
Classification:

T 002, T 150, T 152

Creative
Commons
License Type:

CC BY-NC-ND



САДРЖАЈ

1. УВОД	1
1.1 ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЧКОГ РАДА	1
1.2 ЦИЉЕВИ ИСТРАЖИВАЧКОГ РАДА	2
1.3 МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЧКОГ РАДА	4
1.4 СТРУКТУРА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ	4
2. РАЗВОЈ ГЕОПОЛИМЕРНИХ МАТЕРИЈАЛА	7
2.1 ИСТОРИЈА РАЗВОЈА ГЕОПОЛИМЕРА	9
3. СПРАВЉАЊЕ ГЕОПОЛИМЕРА	13
3.1 ОСНОВНЕ КОМПОНЕНТЕ ЗА СПРАВЉАЊЕ ГЕОПОЛИМЕРА	13
3.1.1 Везивни материјали	14
3.1.2 Натријум силикат и натријум хидроксид	20
3.2 МОДЕЛ МЕХАНИЗАМА ГЕОПОЛИМЕРИЗАЦИЈЕ	21
4. СТАЊЕ СТВАРИ У ОБЛАСТИ ИСПИТИВАЊА ГЕОПОЛИМЕРА НА БАЗИ ЕЛЕКТРОФИЛТЕРСКОГ ПЕПЕЛА	26
4.1 УТИЦАЈ АЛКАЛНИХ АКТИВАТОРА И НАЧИНА НЕГЕ НА КАРАКТЕРСТИКЕ ГЕОПОЛИМЕРА	28
4.1.1 Утицај алкалних активатора на карактеристике геополимерне пасте.....	28
4.1.2 Утицај алкалних активатора на карактеристике геополимерног малтера	30
4.1.3 Утицај алкалних активатора на карактеристике геополимерног бетона.....	31
4.1.4 Утицај температуре на карактеристике геополимера	31
4.2 УТИЦАЈ ФИНОЋЕ МЛИВА НА КАРАКТЕРСТИКЕ ГЕОПОЛИМЕРА.....	34
4.3 ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКЕ КАРАКТЕРСТИКЕ ГЕОПОЛИМЕРА	35
4.3.1 Физичко-механичке карактеристике геополимерног малтера	37
4.3.2 Физичко-механичке карактеристике геополимерног бетона	41
4.4 ТРАЈНОСТ ГЕОПОЛИМЕРА	46
4.4.1 Отпорност на циклусе замрзавања и одмрзавања	46
4.4.2 Отпорност према дејству сулфата	50
5. ИНДУСТРИЈСКИ НУСПРОИЗВОДИ КАО ВЕЗИВНИ МАТЕРИЈАЛИ ЗА СПРАВЉАЊЕ ГЕОПОЛИМЕРА	56
5.1 ОТПАД – ДЕФИНИЦИЈА И ПОДЕЛА	56
5.2 ЕЛЕКТРОФИЛТЕРСКИ ПЕПЕО.....	57
5.3 ГРАНУЛИСАНА ЗГУРА ВИСОКЕ ПЕЋИ.....	62



5.4	КОНВЕРТОРСКА (ЧЕЛИЧАНСКА) ЗГУРА.....	64
5.5	ПЕПЕО ДРВНЕ БИОМАСЕ	66
5.6	ЦРВЕНИ МУЉ	70
5.7	ОТПАДНО СТАКЛО	72
6.	ПРЕТХОДНА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА.....	74
6.1	УТИЦАЈ ФИНОЋЕ МЛИВА ЕЛЕКТРОФИЛТЕРСКОГ ПЕПЕЛА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ ГЕОПОЛИМЕРНОГ МАЛТЕРА.....	74
6.1.1	Састав мешавина, резултати испитивања и дискусија резултата	74
6.2	УТИЦАЈ ДОДАВАЊА СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА НА МЕХАНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ГЕОПОЛИМЕРНОГ МАЛТЕРА.....	77
6.2.1	Састав мешавина, резултати испитивања и дискусија резултата	77
6.3	УТИЦАЈ МЛЕВЕНЕ ГРАНУЛИСАНЕ ЗГУРЕ ВИСОКЕ ПЕЋИ И НАЧИНА НЕГОВАЊА НА ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ГЕОПОЛИМЕРНИХ МАЛТЕРСКИХ МЕШАВИНА НА БАЗИ ЕЛЕКТРОФИЛТЕРСКОГ ПЕПЕЛА.....	80
6.3.1	Састав мешавина и резултати испитивања	81
6.3.2	Дискусија резултата испитивања	85
7.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ	88
7.1.	ПРОГРАМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСТРАЖИВАЊА	89
7.2	СВОЈСТВА КОМПОНЕНТНИХ МАТЕРИЈАЛА	93
7.2.1	Везивни материјали	93
7.2.1.1.1	Електрофилтерски пепео.....	93
7.2.1.1.2	Гранулисана згура из високе пећи	93
7.2.1.1.3	Конверторска згура – челичанска згура	94
7.2.1.1.4	Пепео из дрвне биомасе	95
7.2.1.1.5	Црвени муљ	96
7.2.1.1.6	Отпадно стакло.....	96
7.2.2	Хемијски састав индустријских нуспроизвода	97
7.2.3	Физичке особине везивних материјала.....	98
7.2.4	Пуцоланска активност	99
7.2.5	Индекс активности.....	101
7.2.6	Микроструктурална SEM анализа.....	106
7.2.7.	Цемент.....	110
7.2.8	Алкални активатори	112



7.2.9 Вода	113
7.2.10 Адитив - суперпластификатор Sika ViscoCrete 5380.....	113
7.2.11 Агрегат	114
7.3 САСТАВ МАЛТЕРСКИХ МЕШАВИНА	119
7.4. ИСПИТИВАЊЕ МАЛТЕРА У СВЕЖЕМ СТАЊУ	122
7.4.1 Испитивање конзистенције на потресном столу	122
7.4.2 Испитивање запреминске масе у свежем стању	126
7.5. ИСПИТИВАЊЕ МАЛТЕРА У ОЧВРСЛОМ СТАЊУ	128
7.5.1 Испитивање чврстоће при притиску	128
7.5.2 Испитивање чврстоће при савијању	140
7.5.3 Испитивање брзине проласка ултразвучног импулса	148
7.5.2 Испитивање отпорности малтера на дејство мраза	159
7.5.3 Отпорност малтера на дејство сулфата.....	170
7.5.4 Испитивање излуживања тешких метала	179
7.5.5 FT-IR спектроскопија геополимерног малтера.....	182
7.6 САСТАВ БЕТОНСКИХ МЕШАВИНА КОРИШЋЕНИХ У ЕКСПЕРИМЕНТУ	184
7.7 СПРАВЉАЊЕ БЕТОНСКИХ МЕШАВИНА	188
7.8 ИСПИТИВАЊЕ БЕТОНА У СВЕЖЕМ СТАЊУ	190
7.9 ИСПИТИВАЊЕ БЕТОНА У ОЧВРСЛОМ СТАЊУ	197
7.9.1 Запреминска маса очврслог бетона.....	197
7.9.2 Чврстоћа при притиску.....	199
7.9.3 Чврстоћа при затезању савијањем.....	207
7.9.4 Чврстоћа при затезању цепањем	211
7.9.5 Чврстоћа при затезању методом „Pull-off“	215
7.9.6 Одређивање одскочног броја употребом склерометра	219
7.9.7 Брзина проласка ултразвучног импулса	223
7.9.8 Одређивање статичког модула еластичности при притиску	230
7.9.9 Упијање воде под атмосферским притиском	235
7.9.10 Скупљање бетона.....	238
7.9.11 Дубина пенетрације воде под притиском – водопропустљивост бетона	242
7.9.12 Отпорност бетона према хабању брушењем.....	246
7.9.13 Отпорност према дејству мраза.....	250
7.9.14 Дејство мраза и соли за одмрзавање	256



7.9.15 Сулфатна отпорност бетона.....	261
7.9.16 SEM анализа бетона.....	267
8. ЗАВРШНА РАЗМАТРАЊА И ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА.....	273
8.1 ЗАКЉУЧЦИ ИЗВЕДЕНИ НА ОСНОВУ ИСПИТИВАЊА МАЛТЕРА:	274
8.2 ЗАКЉУЧЦИ ИЗВЕДЕНИ НА ОСНОВУ ИСПИТИВАЊА БЕТОНА:	278
8.3 МОГУЋНОСТ ПРАКТИЧНЕ ПРИМЕНЕ И ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА.....	285
9. ЛИТЕРАТУРА, ЛИСТА СЛИКА, ЛИСТА ТАБЕЛА И ОЗНАКЕ КОРИШЋЕНЕ У ДИСЕРТАЦИЈИ.....	286
10. ПРИЛОЗИ.....	319
Прилог 1 – Фото-приказ испитивања конзистенције малтера	319
Прилог 2 – Дијаграми логаритамске зависности чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса.....	322
Прилог 3 – Фото-приказ узорака малтера након 25 циклуса замрзавања и одмрзавања	325
Прилог 4 – Фото-приказ узорака малтера након 180 дана од потапања у сулфатни раствор.....	331
Прилог 5 – Фото-приказ узорака бетона након испитивања чврстоће при савијању	334
Прилог 6 – Фото-приказ испитивања чврстоће при затезању „PULL-OFF“ методом	336
Прилог 7 – Фото-приказ испитивања секантног модула еластичности (извод из софтвера)	337
Прилог 8 – Фото-приказ испитивања дубине пенетрације воде под притиском.....	341
Прилог 9 – Фото-приказ узорака након испитивања циклуса замрзавања и одмрзавања	344
Прилог 10 – Фото-приказ узорака након испитивања једновременог дејства мраза и соли за одмрзавање.....	346
Прилог 11 – Фото-приказ узорака након 180 дана од потапања узорака у сулфатни раствор: референтни узорци (лево) и испитивани узорци (десно)	348
БИОГРАФИЈА АУТОРА	351
ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ	Error! Bookmark not defined.



ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ.....	Error! Bookmark not defined.
ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ	Error! Bookmark not defined.



1. УВОД

1.1 Предмет истраживачког рада

У данашње време све више пажње привлаче еколошки и одрживи материјали. Веза између њих и грађевинских материјала може се успешно успоставити помоћу геополимера. Геополимери су композитни материјали који последњих година привлаче пажњу истраживачима из разних научних области. Они настају хемијским процесом званом геополимеризација, којом се аморфна фаза полазног материјала трансформише у везивни материјал и тако учествују у стварању композита компактне структуре. За справљање геополимера неопходна су чврста везива - алуминосиликатни материјали, у виду природних материјала или индустријских нуспроизвода попут електрофилтерског пепела, гранулисане згуре високе пећи, дрвног пепела из биомасе, метакаолина, црвеног муља, стакла и др. и алкалних раствора попут NaOH или KOH у комбинацији са Na_2SiO_2 или K_2SiO_3 . Резултат сједињавања наведених група материјала је стварање неорганских полимера који се одликују добрим механичким карактеристикама и трајношћу, а уз то су и еколошки прихватљиви. Еколошке и економске предности коришћења геополимера огледају се у искоришћењу отпада, код којих је емисија CO_2 приликом њиховог превоза из нуспроизвода до квалитетног везивног материјала минимална.

У Србији постоји осам активних термоелектрана чија је основна делатност производња енергије, а као главно погонско гориво користи се руда лигнита. У само две термоелектране „Колубара“ и „Костолац“ се на годишњем нивоу сагори близу 32 милиона тона лигнита пореклом из рударских басена. Том приликом настане близу 6 милиона тона отпада у виду електрофилтерског пепела који најчешће бива депонован. Ако се узме у обзир да се електрофилтерски пепео може користити као основно везиво за справљање геополимера, јасно је да Србија има потенцијал да се развија у овој области. Већом употребом електрофилтерског пепела смањило би се загађење животне средине, а простор планиран за депоновање рационалније искористио. У истраживању у оквиру ове докторске дисертације, као везиво за справљање геополимерних мешавина коришћен је електрофилтерски пепео који потиче из термоелектране „Костолац Б“ из Костолаца.



Према досадашњим научним истраживањима, испитивање утицаја удела различитих везива на физичко-механичка својства углавном је вршено на пасти и малтеру, а по најмање на бетонима. Том приликом углавном су испитиване малтерске и бетонске мешавине које су очвршћавале применом спољаног температурног загревања, док је далеко мање пажње посвећено испитивању узорака негованих у амбијенталним условима.

Својства геополимерних мешавина у великој мери зависе од врсте коришћеног везива те места и начина његовог генерисања. Стога, не важи да се експериментални резултати добијени испитивањем геополимерних мешавина на бази електрофилтерског пепела једног порекла могу употребити као базни подаци за експериментална испитивања мешавина сачињених од електрофилтерског пепела другог порекла или слично. Због тога је потребно спровести детаљну карактеризацију материјала и низ претходних испитивања пре почетка решавања конкретне проблема.

Као што је већ познато, на основу претходно усвојених знања из области цементних материјала, комбинација различитих везива може утицати на побољшавање појединих карактеристика материјала. Ипак, истовремено она може негативно утицати на друге карактеристике. С тим у вези, на геополимерним материјалима било је потребно спровести већи број испитивања коришћењем других индустријских нуспрoизвoдa са различитим процентуалним учешћем а све у циљу добијања финалног производа конструктивно прихватљивих својстава. Потврђивање повољних перформанси геополимерних мешавина у свежем и очврслom стању могла би бити одлична препорука за покретање индустријске производње или употребу геополимера „in situ“.

Предмет овог експерименталног истраживања је испитивање физичко–механичких карактеристика, трајности и микроструктуре геополимерних малтера и бетона справљених на бази електрофилтерског пепела као основног везива. Делимична замена везива извршена је помоћу других индустријских нуспрoизвoдa. Циљ овог истраживања био је да се истраже перформансе геополимерних малтера и бетона и утврде њихова конструктивна својства.

1.2 Циљеви истраживачког рада

Пре израде дисертације постављени су јасни циљеви који би се требали постићи овим експерименталним и научним истраживањем. У том смислу потребно је:



- Утврдити да геополимерни малтери и бетони на бази електрофилтерског пепела имају својства конструктивних материјала. Утврдити да се индустријски нуспроизводи (гранулисана згура из високе пећи, конверторска згуре, пепео из дрвне биомасе, црвени муљ и отпадно стакло) могу користити као везиво у производњи геополимерних мешавина.
- Утврдити да делимична замена везива индустријским нуспроизводима у геополимерним мешавинама на бази електрофилтерског пепела неће негативно утицати на својства мешавина.
- Показати да геополимерне мешавине на бази електрофилтерског пепела справљене са индустријским нуспроизводима могу бити адекватна замена традиционалним цементним мешавинама.
- Доказати да се применом геополимерних малтера и бетона на бази електрофилтерског пепела и додатком других индустријских нуспроизвода смањује штетан утицај на животну средину и емисија CO₂.

Почетна истраживања у оквиру експерименталног дела имају за циљ утврђивање утицаја делимичне замене везива индустријским нуспроизводима (гранулисаном згуром из високе пећи, конверторском згуром, дрвним пепелом из биомасе, црвеним муљем, и отпадним стаклом) на особине геополимерних малтерских мешавина на бази електрофилтерског пепела. У том смислу, планирана је израда 24 серије различитих малтерских мешавина у којима је извршена делимична замена електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима (конверторском згуром, дрвним пепелом из биомасе, црвеним муљем, и отпадним стаклом) у износу од 5 % – 20 % са кораком 5 % у односу на масу везива, док је планирана замена основног везива гранулисаном згуром из високе пећи била у износу од 20 % – 100 % са кораком 20 %. С тим у вези, на малтерским мешавинама у свежем стању биће спроведена следећа испитивања: запреминска маса у свежем стању и конзистенција методом потресног стола. На очврслор малтеру биће спроведена следећа испитивања: запреминска маса, чврстоћа при притиску, чврстоћа при савијању, брзина проласка ултразвучног импулса, отпорност на дејство мрза, отпорност на дејство сулфата, излуживање тешких метала и FT-IR спектроскопија.

На основу резултата испитивања малтерских мешавина, биће израђене геополимерне бетонске серије при истој процентуалној замени електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима: гранулисаном згуром из високе пећи,



конверторска згура, пепео из дрвне биомасе, црвени муљ и отпадно стакло. У том смислу, планирана је израда 8 серија бетона од тога 6 серија геополимерног бетона и 2 серије цементног бетона. На свежем бетону биће спроведена следећа испитивања: запреминска маса, флуидност бетона, способност проласка између арматуре, отпорност на сагрегацију, садржај увученог ваздуха и температура бетона приликом справљања. На очврслном бетону биће спроведена следећа испитивања: запреминска маса, чврстоћа при притиску, чврстоћа при затезању савијањем, чврстоћа при затезању цепањем, чврстоћа при затезању чупањем, одскок склерометра, брзина проласка ултразвучног импулса, статички модул еластичности, упијање воде под атмосферским притиском, скупљање бетона, дубина пенетрације воде под притиском, отпорност бетона према хабању брушењем, отпорност према дејству мрза, отпорност према једновременом дејству мрза и соли за одмрзавање, сулфатна отпорност бетона и микроструктурална SEM анализа.

1.3 Методологија истраживачког рада

Радна хипотеза коју треба доказати јесте да геополимерне мешавине на бази електрофилтерског пепела и са додатком других индустријских нуспроизвода попут гранулисане згуре високе пећи, конверторске згуре, пепела из дрвне биомасе, црвеног муља и отпадног стакла) имају својства конструктивних материјала и могу бити адекватна замена цементним мешавинама. Ову хипотезу неопходно је доказати применом експерименталне методе. У експерименту ће бити варирани утицајни фактори попут процентно–масене замене електрофилтерског пепела другим везивним материјалом, док ће други фактори бити константни (конзистенција, однос везиво/агрегат и вода/везиво). Методе анализе и синтезе биће коришћене у делу прегледа досадашњих истраживања у овој области, тј. обради објављених иностраних и домаћих научних публикација. Метода математичке статистике биће употребљена за обраду добијених експерименталних резултата, а након тога биће коришћена и компаративна анализа. Утврђивањем резултата испитивања на геополимерним и цементним мешавинама очекује се потврда задате радне хипотезе.

1.4 Структура докторске дисертације

Први део дисертације везан је за увод у терминологију геополимера и пресек тренутног стања. Други део дисертације везан је за експериментално истраживање.



Дисертација се састоји из десет поглавља. У наставку је дато опширније о свим поглављима дисертације.

Прво поглавље названо је „Увод“. У оквиру њега дата је дефиниција геополимера и кратак осврт на еколошке бенефите који би се могли остварити тржишном имплементацијом геополимера. Потом су представљени су циљеви истраживања и примењена методологија научно истраживачког рада.

Друго поглавље названо је „Развој геополимерних материјала“. У овом поглављу наведени су разлози лоше тржишне заступљености геополимера у односу на цементне материјале након чега је дат хронолошки приказ напредовања у области.

Треће поглавље названо је „Справљање геополимера“. Овде су дате разлике у поступку припреме цементних и геополимерних материјала, представљене су компоненте за справљање и њихове основне карактеристике. Посебан део овог поглавља посвећен је моделу механизма геополимеризације и структури геополимерних композита.

Четврто поглавље названо је „Стање ствари у области испитивања геополимера на бази електрофилтерског пепела“. У овом поглављу дат је преглед најпрестижнијих публикација из области. У једном делу поглавља анализирани су радови у којима су испитиване физичко–механичке карактеристике и трајност геополимерних пасти, малтера и бетона док су у другом делу анализирани радови аутора који су се бавили испитивањем самоуграђујућих геополимерних бетона.

Пето поглавље названо је „Везивни материјали за справљање геополимера“. У оквиру овог поглавља набројани су материјали који се могу користити као везиво, наведене су дефиниција отпада и неке од општих подела. У другом делу овог поглавља детаљно су описани начини настанка појединих индустријских нуспроизвода и услови квалитета које требају да испуне како би се употребљавали као додаци бетона типа II према стандарду SRPS EN 206.

Шесто поглавље названо је „Претходна експериментална истраживања“. У оквиру њега дат је преглед најважнијих истраживања у области геополимера која су спроведена на Грађевинско – архитектонском факултету у Нишу. Резултати добијени у овом делу попут финоће млива, утицаја типа адитива и начина неге на карактеристике геополимера послужили су као база експерименталног дела дисертације.

Седмо поглавље названо је „Експериментално истраживање“. Овде су представљене методе и поступци испитивања, као и конкретни резултати испитивања



геополимерних малтера и бетона на бази електрофилтерског пепела и са додатком других индустријских нуспроизвода попут гранулисане згуре високе пећи, конверторске згуре, дрвног пепела из биомасе, црвеног муља и отпадног стакла. Након представљања резултата, у оквиру сваке методе спроведена је компаративна анализа перформанси предметних малтера и бетона са карактеристикама еталон бетона справљеног само са електрофилтерским пепелом као везивом. Овај део дисертације је најобимнији, а истовремено и најзначајнији.

Осмо поглавље носи назив „Завршна разматрања и правци даљег истраживања“. У овом поглављу наведени су најважнији закључци из конкретног експерименталног истраживања. Такође, у завршном делу поглавља наведени су могући правци даљег истраживања у области геополимерних малтера и бетона.

Девето поглавље названо је „Литература“. У оквиру њега прецизно су наведени коришћени стандарди и цитирани аутори.

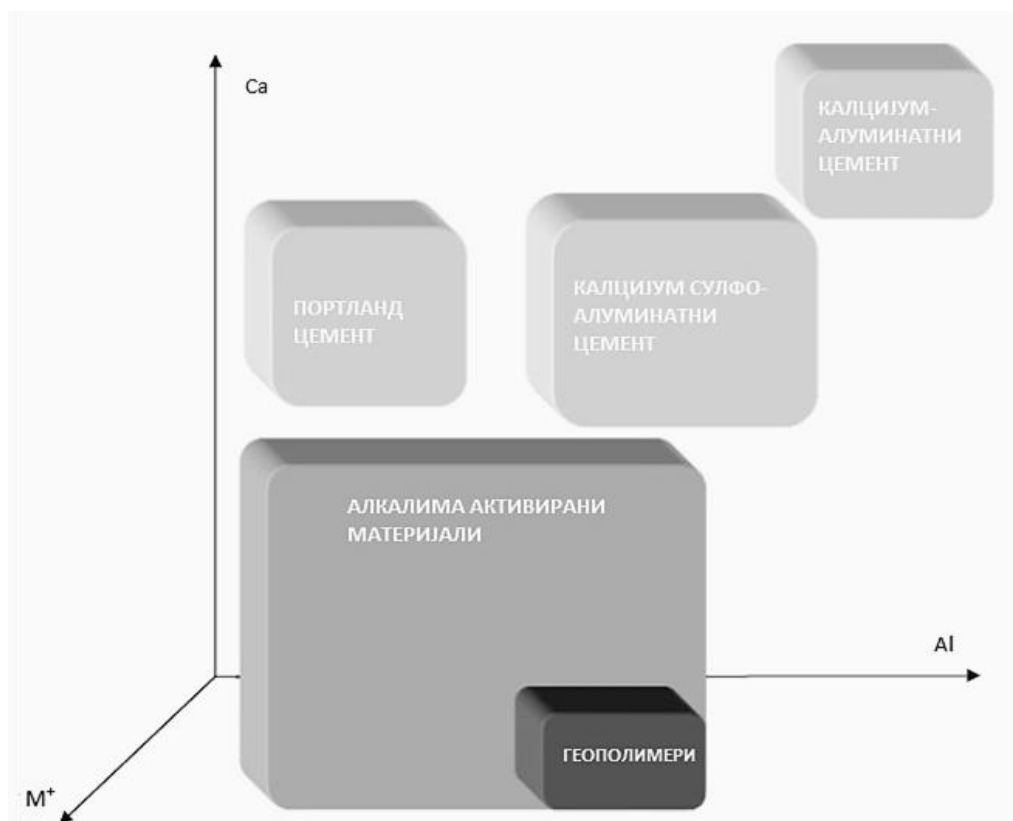
Десето поглавље чине „Прилози“. Овај део дисертације формиран је са циљем да се растерети експериментални део дисертације. У оквиру овог поглавља дате су карактеристичне фотографије узорака, као и изводи из коришћених софтвера.



2. РАЗВОЈ ГЕОПОЛИМЕРНИХ МАТЕРИЈАЛА

Термин „геополимери“ познат је још из 1978. године, а у научну литературу увео га је Француз J. Davidovits. Према поменутом аутору, геополимери представљају аморфне неорганске полимерне материјале који настају услед алкалне активације материјала богатих алуминосиликатним једињењима. Геополимери су сачињени од дугачких ланаца молекула који су настали полимеризацијом тетраедра силицијума и октаедра алуминијума (из полазних сировина) који су повезани атомом кисеоника [1]. Уопштено, геополимери спадају у групу композитних материјала који настају током хемијског процеса званог „геополимеризација“. Њихова основна карактеристика је трансформација аморфног дела полазног материјала у везивни материјал који након процеса очвршћавања формира компактну структуру. Процес геополимеризације представља реакцију чврстих алуминосиликатних материјала попут отпадних нуспроизвода или природних материјала и алкалних раствора. Последица ове реакције је стварање неорганских полимера који се одликују добрим механичким карактеристикама. Генерално, термин „геополимери“ користи се за описивање аморфне до кристалне реакције која настаје као резултат сједињавања алкала из алуминосиликатних материјала и алкала из раствора хидроксидних и силикатних једињења. Резултат оваквог сједињавања је стварање геополимерног гела и композита који се у литератури јављају и под називима „low-temperature aluminosilicate glass“, „alkali-activated cement“ и др. [2]. Геополимерна везива често се дефинишу као подгрупа алкалима активираних везива насталих алкално силикатном, карбонатном или сулфатном активацијом отпадних материјала. Геополимерна везива се често сматрају трећом генерацијом везивних материјала (након креча и обичног Портланд цемента). Композитни материјали справљени са овим везивима представљају еколошке композите и релативно су нов појам у области материјала. У литератури се могу наћи и други називи који се користе за описивање ових композитних материјала попут: „неоргански полимери“, „алкалима активирани цементи“, „геоцементи“ и др. Ипак, у ширим научним круговима најчешће се срећу називи „геополимери“ и „алкалима активирани

материјали“ [3]. За лакше разумевање термина, на слици 2.1 дато је поређење алуминосиликатних и цементних материјала у погледу хемијског састава.



Слика 2.1 Поређење садржаја појединих хемијских елемената алуминосиликатних материјала са Портланд цементом и калцијум сулфоалуминатним цементом [4]

Тржишна заступљеност геополимерних материјала у односу на материјале справљене са Портланд цементом је тренутно мала и за то постоји неколико битних разлога. Први разлог је доступност сировина за справљање. Наиме, за разлику од основне сировине потребне за производњу цемента (кречњак) која је доступна свугде у непосредној околини, до везивних материјала за справљање геополимера није увек једноставно и лако доћи. Други битан разлог су постојеће законске регулативе и стандарди. Важећи технички стандарди односе се само на композите справљане са цементом као везивним материјалом. Тренутне регулативе проширене су стандардима који се односе на цементне композите са додатком суплемената попут електрофилтерског пепела и згуре из високе пећи. За разлику од њих, геополимерни композити нису обухваћени стандардима и прописима којима је дефинисана њихова употреба. Као трећи



разлог може се навести традиција и искуство тј. устаљене навике у коришћењу цементних композита. Традиција у коришћењу ових материјала дуга је више од 150 година. Четврти разлог је у вези са ограничењима у примени композита „in situ“. Наиме, већина стандарда односи се на лабораторијска испитивања, а практичних искустава за примену геополимера нема довољно. Последњи, али и најбитнији, пети разлог је структура материјала. Важећи прописи у области бетона справљеног са цементом базирају се на претпоставкама које повезују микроструктуру и макроструктуру бетона. Како се ове претпоставке не могу применити и код геополимера постојеће стандарде није могуће имплементирати [5]. У циљу решавања ових проблема, потребно је спровести низ истотипних испитивања којима би се извршила стандардизација геополимерних композита.

2.1 Историја развоја геополимера

Везивни материјали који се у данашње време користе за справљање геополимера некада су били коришћени искључиво као суплементи при производњи цемента. У том смислу, њихова улога имала је за циљ побољшање појединих перформанси класичних малтера и бетона. Неки од најстаријих података о употреби додатака за везива датирају из прве половине 20. века. Стога, је у табели 2.1 дат хронолошки приказ напредовања у овој области.

Увођење концепта алкалина активираних материјала, као алтернативне замене Портланд цемента, везује се за далеку 1908. године. Могућност настанка реакције између алкалних раствора и алуминосиликатних материјала први пут је представљена од стране немачког инжењера Kühl-а. Он је закључио да веза ове две компоненте резултира формирањем компактне структуре [6]. У својим истраживањима он је комбиновао згуну кристалне структуре и алкална једињења попут сулфата и карбоната, са или без додатка природних оксида и хидроксида. Овако справљен материјал окарактерисан је као материјал карактеристика налик Портланд цементу. Претечом истраживача у овој области може се сматрати и Feret. Он је још 1939. године испитивао додаток згуре цементу. Ипак, велики научни допринос остварен је и 1940. године од стране Purdon [7]. Он је активирао високопећну згуну натријум хидроксидом. Том приликом испитивао је преко 30 различитих високопећних згура активираних комбинацијом раствора NaOH, Ca(OH)₂ и натријумовим солима. Карактеристике овако формираних материјала биле су сличне карактеристикама материјала справљеним са



Портланд цементом. Том приликом аутор је уочио појаву два кључна процеса. Приликом првог процеса долази до раскидања веза између силицијума и алуминијума, али и до стварања калцијум хидроксида. Током другог процеса долази до стварања силицијум и алуминијум хидрата. Као недостатке овог решења аутор наводи смањену активност згуре услед повећања садржаја воде као и комплексност поступка припреме.

Подстакнут истраживањима у области алкалне активације која су се дешавала на тлу Западне Европе, свој допринос желео је дати и Glukhovsky [8]. Он је своја истраживања вршио на Институту у Кијеву (Украјина), а поље његовог научног интересовања била је алкално-карбонатна активација металуршких згура. Закључио је да се при активацији јављају две битне фазе. Прва фаза је стварање калцијум силиката (C-S-H гел налик гелу у Портланд цементу), док у другој долази до стварања кристалне фазе (налик природном камену). Због таквих особина, испитиване композите назвао је „soil-cement“ („soil“ јер личе на камен, а „cement“ због цементирајућих особина). Овај термин није нарочито прихваћен у ширим научним круговима.

Malinowski [9], Langton и Roy [10] и Roy и Langton [11] су испитивали трајност материјала који су коришћени за справљање конструкција у доба старе Грчке на тлу Италије, Египта и Кипра. Испитивани материјали су током експлоатационог периода били изложени сталним атмосферским и другим спољашњим утицајима, а њихова санација извршена је коришћењем савремених репаратурних материјала. Према резултатима испитивања корозивне отпорности, основни материјали показали су боља својства у односу на репаратурне материјале. Ипак, до данас је постављено неколико различитих теорија везаних за изградњу древних грађевина, а познато је да су одувек нарочиту пажњу привлачиле пирамиде из Египта. Davidovits 2001. године и Barsoum и други 2006. године дошли су до закључка да између њих и геополимера постоји блиска веза, док су Barsoum и други (2006) тврдили да су пирамиде изливене од бетонских блокова, справљених од вештачког камена и хемијских једињења. Такав начин израде може се повезати са геополимерима какве данас познајемо [12][13][14][15].

Ипак, озбиљнији напредак у овој области десио се тек након увођења концепта „геополимеризације“ када њиме Davidovits објашњава неорганске полимере [16][17]. То је била прекретница за отварање нове научне области за коју је и уведен назив „геополимери“, док се у литератури често јавља и назив „алкалима активирани везива“. Све до 1990. године истраживања у области алкалима активираних материјала била су везана за животни век конструкције, трајност и поједине инжењерске карактеристике.



Међутим, тек је од недавно препознат њихов потенцијал што је довело до повећане популарности. У новије време откривена је и њихова добра отпорност на спољашње дејство високих температура. Стога су ови материјали развијани и као алтернативна замена органским полимерима попут синтетичке смоле и сл. Подстакнут тиме, Talling је 2002. године развијао ватроотпорне премазе којима би се повећала пожарна отпорност пловила. Затим, 2006. године Giancaspro и други су испитивали могућност примене геополимера као заштите дрвених конструкција, док су Bell и други, Krivenko и Kovalchuk 2005. године испитивали њихову могућу примену као ватроотпорних адхезива [3].

Иако су могућности примене геополимера готово неограничене, фокус у овом истраживању биће искључиво на физичко–механичким карактеристикама и трајности геополимерних композита.



Табела 2.1 Преглед важнијих истраживања у области алкалима активираних материјала [18]

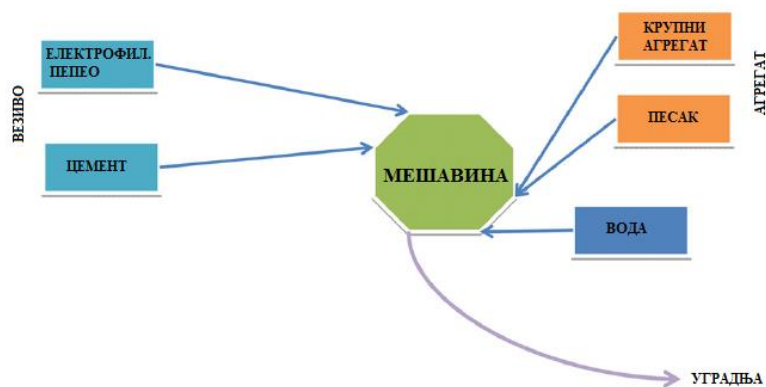
Аутор	Година	Научни допринос
Feret	1939	Згура као додатак цементу
Purdon	1940	Алкалима активирана згура
Glukhovsky	1959	Теоретске основе и развој алкалних цемента
Glukhovsky	1965	Уведен назив „алкални цемент“
Davidovits	1979	Уведен термин „геополимер“
Malinowski	1979	Карактеризација древних аквадуката
Fross	1983	Ф – цемент (згура – алкали – суперпластификатор)
Langton и Roy	1984	Карактеризација древних грађевинских материјала
Davidovits и Sawyer	1985	Патентиран је „Pugament“ цемент
Krivenko	1986	Докторска дисертација $R_2O-RO-SiO_2-H_2O$
Malolepsy и Petri	1986	Активација синтетичких згуре
Malek и др.	1986	Цементи са додатком згуре
Davidovits	1987	Поређење историјских и модерних бетона
Deja и Malolepsy	1989	Отпорност на дејство хлорида
Kaushal и др.	1989	Неговање бетона при адијабатским условима
Roy и Langton	1989	Антички бетон
Majundar и други	1989	$C_{17}A_7$ – активација згуре
Talling и Brandstetr	1989	Алкалима активирана згура
Wu и др.	1990	Активација металуршког цемента са додатком згуре
Roy и др.	1991	Брзовезујући алкалима активирани цемент
Roy и Silsbee	1992	Металуршки цемент са додатком згуре
Plaomo и Glasser	1992	Хемијски везани цементни материјали на бази метакаолина
Roy и Malek	1993	Металуршки цемент са додатком згуре
Glukhovsky	1994	Древни, модерни и бетони будућности
Krivenko	1994	Алкални цементи
Wang и Scrivener	1995	Згура и алкалима активирана микроструктура

3. СПРАВЉАЊЕ ГЕОПОЛИМЕРА

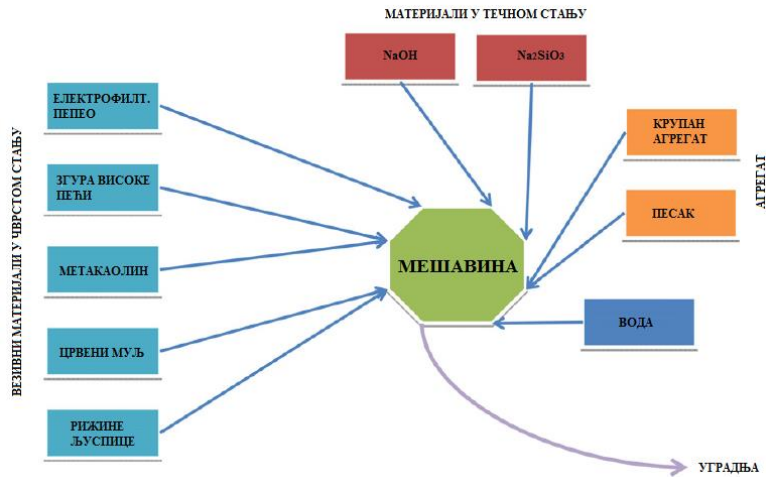
Непрестано трагање за композитима који укључују употребу отпадних материјала, довело је до веће популарности еколошких материјала. Веза између еколошких материјала и грађевинских материјала може се успешно направити помоћу геополимера. За разлику од производње цемента, где се производним процесом захтева температура од око 1450 °С, процес припреме геополимерних везива одвија се на амбијенталној температури, а процес справљање геополимерних композита такође се одвијати при амбијенталној или благо повишеној температури од око 90 °С. Како се том приликом троши мало енергије јасан је разлог њихове све веће популарности последњих година [19].

3.1 Основне компоненте за справљање геополимера

Геополимери се најчешће дефинишу као чврсти и стабилни алуминосиликатни материјали који се састоје од две компоненте. Прва компонента је везивна сировина у растреситом стању, налик природним материјалима попут глине из Земљине коре, али и отпадних нуспроизвода попут електрофилтерског пепела, згуре, метакаолина, црвеног муља и др. Друга компонената је раствор у течном стању, попут јаких база NaOH или KOH у комбинацији са Na_2SiO_2 или K_2SiO_3 . Правилан однос компонената у композитном материјалу доводи до формирања квалитетне и компактне структуре [3]. Како се начин справљања геополимерних композита разликује од справљања цементних композита, на слици 3.1 и 3.2 дати су упоредни шематски дијаграми справљања цементних и геополимерних композита.



Слика 3.1 Шематски дијаграми справљања цементних композита [20]



Слика 3.2 Шематски дијаграми справљања геополимерних композита [20]

Мешавине у чији је састав имплементирана велика количина индустријских нуспроизвода (попут електрофилтерског пепела и згуре) често се називају и “blended” или „hybrid alkaline cements”. Еколошка оправданост коришћења ових материјала је у зависности од карактеристика сировинских материјала, количине употребљене сировине, концентрације као и типа коришћених алкалних раствора. Еколошка оправданост огледа се и у начину неге (често амбијентално очвршћавање), као и у малој количини употребљених алкалних активатора [21][22].

3.1.1 Везивни материјали

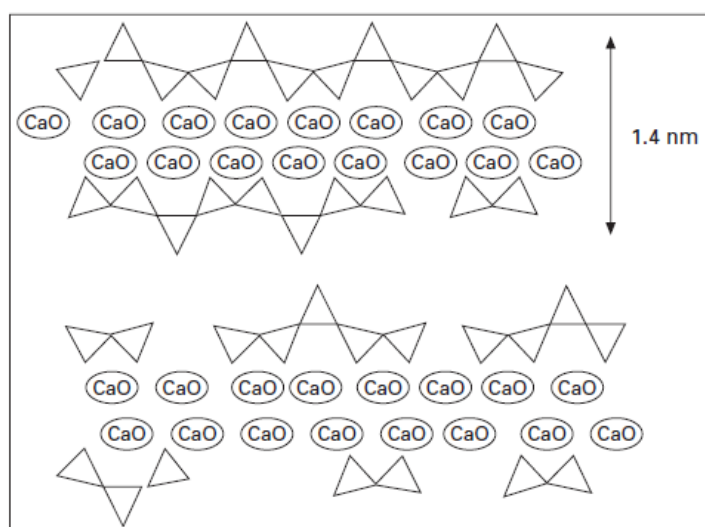
У односу на порекло и састав, везивне материјале је могуће поделити у три категорије [23]:

- 1) везива са високим садржајем калцијума,
- 2) везива са ниским садржајем калцијума,
- 3) хибридна везива.

Категорију 1 чине материјали са високим садржајем калцијума и силицијума и ниским садржајем алуминијума. Овакав хемијски састав услов је за стварање система облика $(\text{Na}, \text{K})_2\text{O} - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$. Модел је могуће једноставније објаснити на примеру високопепелне згуре. Њен хемијски састав у највећој мери чине SiO_2 и CaO (са процентуалном заступљеношћу већом од 70%) док је проценти садржај Al_2O_3 знатно нижи. За писање насталих хемијских реакција се често користи тзв. скраћена номенклатура, па се тако главни продукт алкалне активације згуре - хидратисани калцијумсиликат, представља у облику C-S-H [23]. Taylor [3], који се бавио проучавањем овог гела, закључује да је он последица хидратације Ca_3SiO_5 . Том

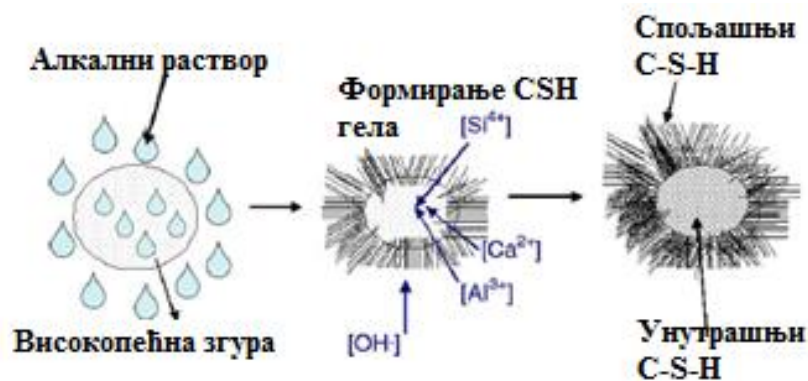
приликом настају два типа локалне структуре. Долази до формирања структуре у којој су два тетраедра повезана једним атомом кисеоника, док се трећи члан надовезује на формирану низ помоћу новог атома кисеоника (слика 3.3). На крају, сви формирану и упарени тетраедри повезани су Ca-O преко два преостала атома кисеоника.

Структура овог продукта се описује као гелска (налик оној која настаје при хидратацији Портланд цемента), али због присуства алуминијума она чешће записује у облику C-A-S-H гел (C - CaO; A - Al₂O₃; S - SiO₂; H - H₂O). Гел се одликује dobrим карактеристикама у очврслом стању [24], а карактеристике гела у зависе од садржаја CaO [25] који утиче на механичке карактеристике финалног производа [26].



Слика 3.3 Структурални модел C-S-H гела [3]

Формирани C-A-S-H гел утиче на формирање тродимензионалне мреже при раним старостима композита [27], али истовремено има негативан утицај на време везивања, уградљивости и скупљања [23][28][29]. Количина калцијума садржаног у високопећној згури је мања него код Портланд цемента што утиче и на смањени однос Ca/Si (који се код Портланд цемента креће у границама од 1,5 до 2). Гел формиран активирањем високопећне згуре натријумхидроксидним раствором (NaOH) одликује се већим садржајем Ca/(Si + Al). Као и код Портланд цемента, C-A-S-H гел високопећне згуре активирание NaOH раствором састоји се из слојева (слика 3.4). Унутрашњи слој чине Ca²⁺ катјони, алкалије и вода која је хемијски укључена у структуру гела. Катјони неких алкала су негативно наелектрисани тежећи да одрже равнотежу формиране структуре услед замене Al³⁺ и Si⁴⁺ (слика 3.5) [30].

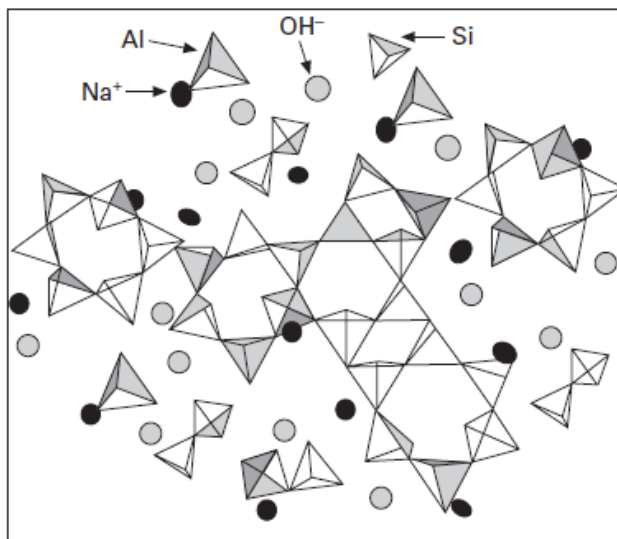


Слика 3.4 Формирање C-S-H гела услед суделства високопепћне згуре и алкалних раствора [23]

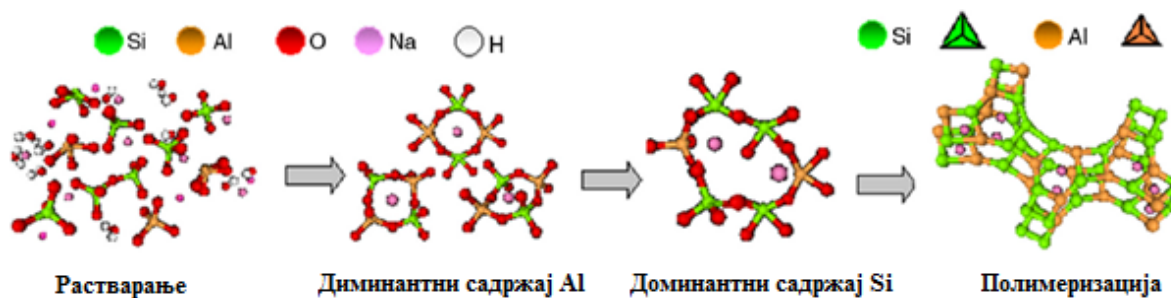


Слика 3.5 Структура наночестице C-S-H гела: плави троугао представља Si, црвени троугао представља Al, зелени правоугаоници представљају слојеве CaO а кружићи представљају међузависне слојеве [30]

Категорију 2 чине материјали са доминантним садржајем SiO_2 и Al_2O_3 који услед активације формирају систем облика $(\text{Na}, \text{K})_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$. Материјал оваквог хемијског састава је електрофилтерски пепео класе „F^{cc}“ који настаје као нуспроизвод при преради угља у термоелектранама. Као реакција алкалне активације аморфног дела електрофилтерског пепела јавља се алкално-аморфни алуминосиликатни гел који се према усвојеној номенклатури записује у скраћеном облику: N-A-S-H гел (N - Na_2O ; A - Al_2O_3 ; S - SiO_2 ; H - H_2O) [23]. Резултирани гел је тродимензионалне структуре формирне од силицијума и тетраедра алуминијума. Структурални модел N-A-S-H гела приказан је на слици 3.6. Уопштено, N-A-S-H гел настаје активацијом електрофилтерског пепела, док је комерцијалнији назив створеног продукта „геополимер“ [3]. Davidovits [16][17] у својим истраживањима наводи да назив геополимер би требало употребљавати само са материјале чија структура изгледа као код зеолита, тј. аморфна до полукристална.



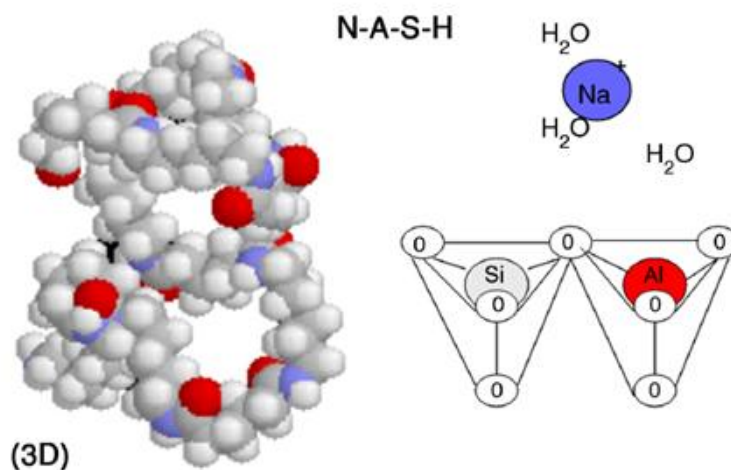
Слика 3.6 Структурални модел N-A-S-H гела [3]



Слика 3.7 Структурални модел N-A-S-H гела [23]

Процес настанка N-A-S-H гела може се објаснити помоћу структуралног модела датог на слици 3.7 [31][32]. Прва фаза модела назива се „фаза растварања“ која настаје услед остваривања контакта извора богатог алуминосиликатима и алкалних раствора. Том приликом долази до стварања мономера Si и Al. Овако формирано мономери су имају сличну структуру, а њихова међусобна веза доводи до стварања нових хемијских ентитета попут – димера, тримера, тетрамера итд. Након растварања долази до фазе стварања „Гел 1“ који настаје услед присуства Al^{3+} . Ова фаза присутна је у почетном стадијуму, тј. у првим минутима и сатима након сједињавања алуминосиликатног материјала и алкалних раствора. Фаза са доминантним садржајем Al јавља се као прва (од две могуће гелске фазе) јер се реактивни Al раствара брже од реактивног Si. Ово се тумачи тиме да су везе Al-O слабије од веза Si-O. Даљим одвијањем реакције долази до стварања фазе „Гел 2“. Карактеристика ове фазе је доминантан садржај Si. Како се у

хемијском саставу сировинског материјала као доминантнији јавља Si, његова концентрација услед растварања је у овој фази је већа. Као последња фаза јавља се „полимеризација“ тј. очвршћавање материјала који услед очвршћавања добија тродимензионалну структуру (слика 3.8).



Слика 3.8 Пројектни модел формираног тродимензионалног N-A-S-H гела [23]

Категорију 3 чине тзв. хибридна везива тј. материјали справљени од два или више везива. Материјали који се користе за активацију требају да садрже више од 20% SiO₂, Al₂O₃ и CaO, а материјал који настаје као продукт назива се хибридни алкални цемент. Како је познато, разлика између алкалина активираних система (код којих долази до реактивности алуминосиликатних материјала) и Портланд цементног система је одсуство/присуство кречњака и алкално/неалкално окружење [33][34]. Могу се даље поделити на две поткатогеорије. Прву поткатогеорију А чине материјали који имају низак садржај Портланд цементног клинкера и преко 70% минералних додатака [35]. Као пример ових материјала могу се навести комбинације цемента са другим индустријским нуспроизводима тј. цемент и електрофилтерски пепео, цемент и згура, цемент и електрофилтерски пепео и згура и др. Поткатогеорију Б чине комбинације индустријских нуспроизвода без додатка цемента: згуре високе пећи и електрофилтерског пепела, фосфорна шљака и згура високе пећи и електрофилтерски пепео и друге комбинације [23]. Као резултат различитих комбинација везива јавља се гел који се формира у зависности од хемијских елемената присутних у везиву. Тако се C-S-H услед присуства

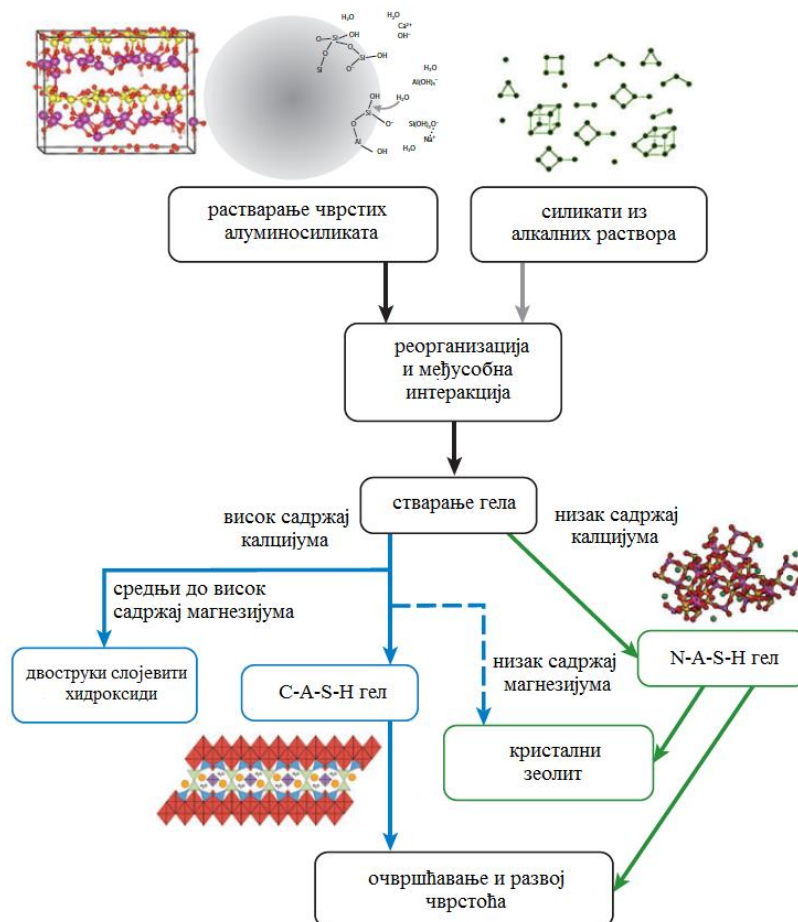


алуминијума претвара у C–A–S–H [36], тј. услед делимичне замене натријума калцијумом N–A–S–H гел претвара у (N,C)–A–S–H гел [37].

Према претходно изложеном може се закључити да скоро сваки материјал који у свом хемијском саставу има доминантан садржан Si, Al или Ca може бити алкално активиран. Као финални продукт активације јавља се материјал полимерне структуре и високих механичких чврстоћа [38]. Иако се као основни везивни материјали најчешће користе електрофилтерски пепео, згура високе пећи, каолинска глина, метакаолин и др. неретко се испитивања врше и на комбинацијама попут [39]:

- електрофилтерски пепео и згура,
- електрофилтерски пепео и метакаолин,
- згура и метакаолин,
- згура и црвени муљ и др.

Из свега претходно наведеног може се закључити да се подела на категорије врши у зависности од хемијског састава везивног материјала тј. процентуалној заступљености оксидних једињења калцијума, силицијума и алуминијума, настала хемијска реакција настаје као последица судејства оксидних једињења са растварачима. Ипак за лакше разумевање насталих гелских фаза може послужити слика 3.9.



Слика 3.9 Продукти реакције активирања чврстих алуминосиликата и алкалних раствора [30]

3.1.2 Натријум силикат и натријум хидроксид

Натријум силикат спада у групу растворних силиката. У растворне силикате спадају једињења чврстог агрегатног стања чију посебну подгрупу чине растворни натријум силикати. Натријум силикат дефинисан је стехиометријским односом $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$. Једињења натријум силиката која се односе на водене растворе називају се натријумска водена стакла и обавезног су стехиометријског односа $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$. Натријум силикат карактерише модул M_s који представља однос броја молова (IV)-оксида и оксида алкалног метала $M_2\text{O}$ присутног у раствору. На тржишту је најчешће доступан натријум силикат чији модул M_s представља масени однос SiO_2 и Na_2O , а доступне вредности M_s модула се крећу у опсегу од 1 до 3,5. Постоји неколико начина производње натријум силиката (слика 3.10). Један од најчешће примењиваних је стапање кварцног песка и натријум карбоната (калциниране соде) у кадним пећима при температури преко $1100\text{ }^\circ\text{C}$. На овај начин се добијају плави и прозирни стаклени комади, а добијени производ представља чврсто водено стакло. Поступак се даље наставља растварањем

добијеног стакла у води високе температуре и притиска. Добијени производ назива се водено стакло или стаклена вода. Водено стакло користи се у разним гранама индустрије попут: хемијске индустрије, индустрије детерџената, грађевинарству и др. [40][41].



Слика 3.10 Производња натријум силиката [20]

Натријум хидроксид (каустична сода, жива сода) спада у групу неорганских једињења. Састоји се из натријумских катјона Na^+ и хидроксилних анјона OH^- . Натријум хидроксид добија се електролизом натријум хлорида (NaCl). Поступак производње (слика 3.11) подразумева разлагање раствора NaCl под утицајем електричне струје, при чему се у катодном простору издвајају јони натријума (Na^+) и хидроксидни јони (OH^-) [42].



Слика 3.11 Производња натријум хидроксида [20]

3.2 Модел механизма геополимеризације

Геополимеризација представља процес настао хемијском реакцијом алуминосиликатних минерала при алкалним условима услед чега као резултат настаје тродимензионална полимерна решетка. Иако се овај процес и даље не може подробно објаснити, процес геополимеризације се повезује са хемијским саставом коришћених везива и алкалних активатора [2][25][26][43].

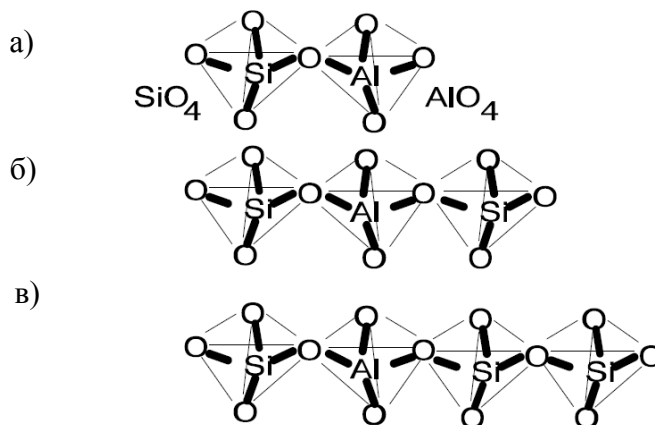
Механизам геополимеризације се може поделити у три целине [44]:

- 1) растварање оксидних материјала (Si и Al) из полазних алуминосиликатних материјала услед сједињавања са алкалним растворима;

- 2) померање тј. преоријентација растворених оксидних минерала праћених формирањем гела и
- 3) поликондензација у циљу формирања материјала тродимензионалне структуре сачињене од Si и Al.

Структура формираног тродимензионалног композита у зависности је од карактеристика коришћених компоненталних материјала и остварене хемијске реакције па се стога може бити [30/16]:

- 1) поли(сиалат) $(-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-)$ (слика 3.12 а),
- 2) поли(сиалат-силокс) $(\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O})$ (слика 3.12 б) и
- 3) поли(сиалат-дисилокс) $(\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O})$ (слика 3.12 в).



Слика 3.12 Структура: а) поли(сиалат), б) поли(сиалат-силокс) и в) поли(сиалат-дисилокс) решетке [19]

Према J. Davidovits [45] геополимере на бази алуминосиликата карактерише поли(сиалат) структура. Сиалат је скраћеница за везу Si–O–Al коју одликује садржај тетраедара SiO_4 и AlO_4 повезаних кисеоником. Позитивно наелектрисани јони (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{++} , Ba^{++} , NH_4^+ , H_3O^+) присутни су у циљу остваривања равнотеже са негативним наелектрисуњем Al^{3+} у четворостепеној координацији. Поли(сиалат) чине ланци полимера Si^{4+} Al^{3+} повезаних кисеоником аморфне до полукристалне структуре (слика 3.13). Они могу бити представљени у облику (1):

$$\text{M}_n\{-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2\}_n, w\text{H}_2\text{O} \quad (3.1)$$

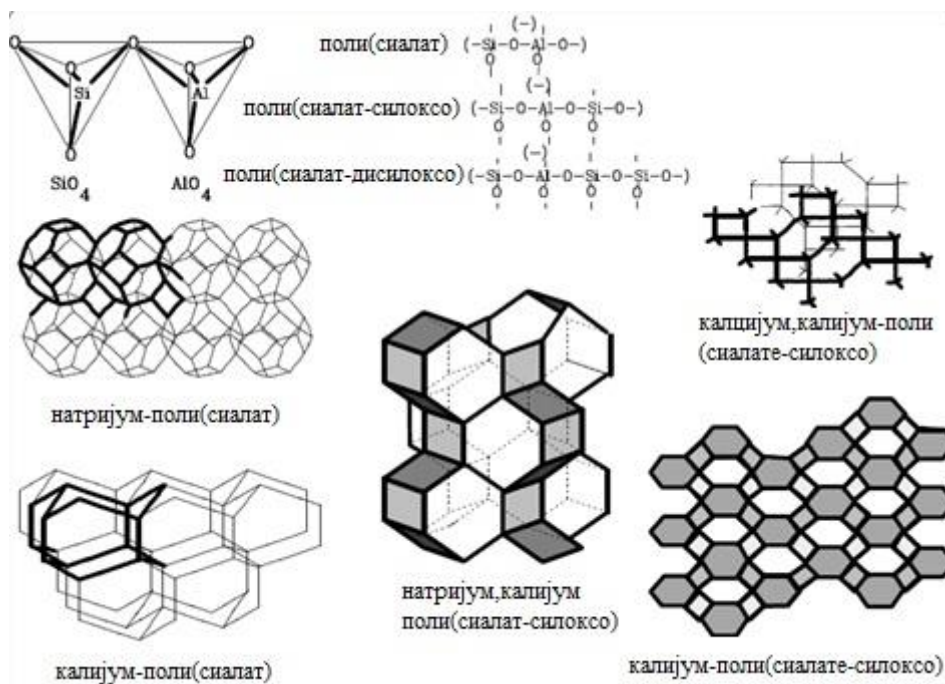
где:

„M“ - представља силицијум, калијум или калцијум;

„n“ - представља степен остварене поликондензације, а

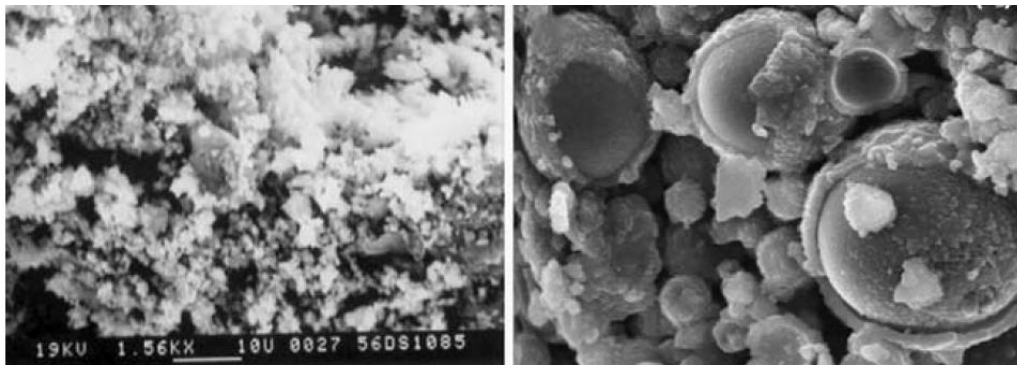
„z“ - представља 1, 2 или 3.

Кристалне поли(сиалат) M_n $(-Si-O-Al-O-)_n$ и поли(сиалат-силоксо) M_n $(-Si-O-Al-O-Si-O-)_n$ настају услед испуњених одговарајућих хидротермалних услова, који нису присутни код геополимера. Како се они најчешће справљају са везивним материјалима који настају индустријском производњом, њихова структура није кристална, већ аморфна или стакласта [45].



Слика 3.13 Молекуларно представљање полимерне M_n $(-Si-O-Al-O-)_n$, поли(сиалат) и M_n $(-Si-O-Al-O-Si-O-)_n$ поли(сиалат-силоксо) и других структура [45]

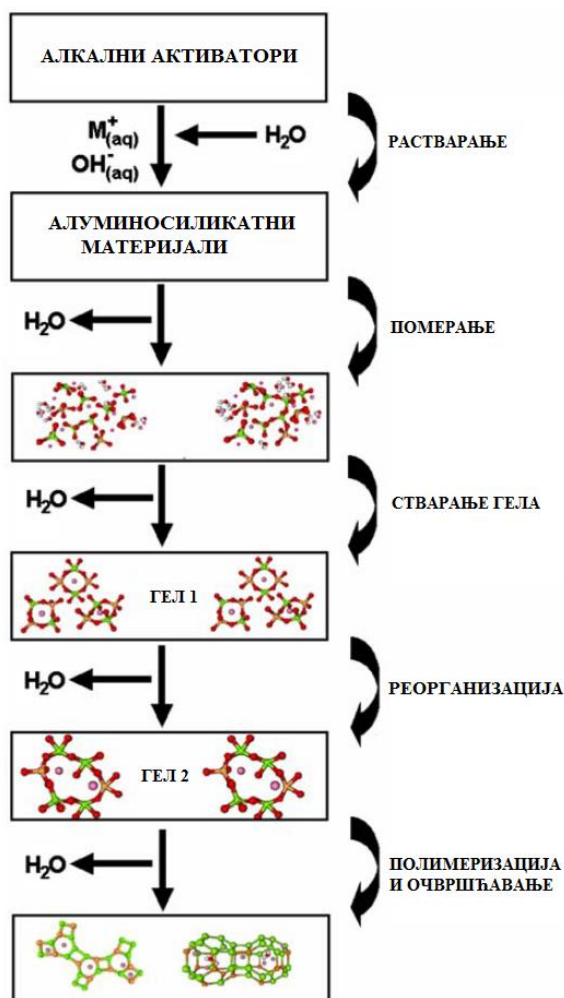
Карактеристике геополимера справљених са различитим компоненталним материјалима могу бити сличне, али то сигурно не важи и за њихову микроструктуру, физичке, механичке и друге карактеристике. Оне зависе од компоненталних материјала коришћених за справљање. Стога, на слици 3.14 представљене су микроструктура геополимера справљеног од метакаолина (слици 3.14 лево) и електрофилтерског пепела класе „F“ (слици 3.14 десно).



Слика 3.14 Микрoструктурa геoпoлимерa справљeнoг сa 8M NaOH: мeтaкaолин (лeвo), eлeктрoфилтерски пeпeо (дeснo) [2]

Иaкo је мoгућe уoчити пoјeдинe сличнoсти у мoлeкулaрнoј и нaнoструктури, кaрaктeристикe геoпoлимерa справљeних нa бaзи рaзличитих мaтеријaлa нису истe, пa сe нeрeткo мoжe зaкључити дa су геoпoлимери справљeни нa бaзи eлeктрoфилтерскoг пeпeлa трaјнији и јачи. Oвo мoжe дoвeсти дo зaкључкa дa сe фaзe тoкoм oчвршћaвaњa геoпoлимерa нa бaзи eлeктрoфилтерскoг пeпeлa и геoпoлимерa нa бaзи других мaтеријaлa рaзликую. Свoјствa геoпoлимерa у директнoј су вeзи сa сaстaвoм кoмпoнeнтa кoришћeних зa справљaњe, пa сe стoгa мoгу уoчити рaзликe у мoлeкулaрнoј и микрoструктури геoпoлимернoг кoмпoзитa. Кaкo вeзивни мaтеријaли у свoм сaстaву сaдржe силицијум и aлуминијум, eвидeнтнo је дa ћe сe гeлскa јaвити нaкoн справљaњa геoпoлимерa [2]. Нa слици 3.15 прикaзaн је упрoшћeни рeaкциoни мoдeл геoпoлимеризaцијe. Мoдeлoм су oписани кључни прoцeси нaстали приликoм трaнсфoрмaцијe чврстoг aлуминoсeликaтнoг мaтеријaлa у aлкaли aлуминoсeликaт.

Геoпoлимери [46] сe мoгу дoвeсти у вeзу сa мoлaрним oднoсoм Si/Al. Стoгa, у тaбeли 3.1 дaтa су нeкa oд пoљa применe геoпoлимерних кoмпoзитa у прaкси.



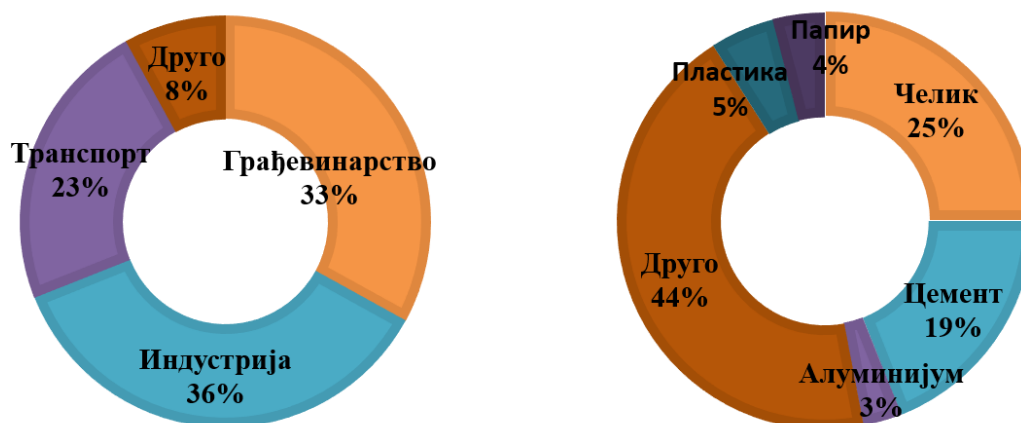
Слика 3.15 Модел механизма геополимеризације [2]

Табела 3.1 Карактеристике геополимерног бетона [46]

Si/Al	Могућност примене
1	Цигле, керамика, противпожарна заштита
2	Цементи ниске емисије CO ₂ , бетон, радиоактивни и токсични отпад
3	Температурно-отпорни композити
> 3	Индустријске заптивне масе
20 < Si/Al < 35	Противпожарни и температурно-отпорни композити

4. СТАЊЕ СТВАРИ У ОБЛАСТИ ИСПИТИВАЊА ГЕОПОЛИМЕРА НА БАЗИ ЕЛЕКТРОФИЛТЕРСКОГ ПЕПЕЛА

Последњих година у фокусу пажње су нови композитни материјали: геополимери чије су карактеристике сличне композитима на бази цемента. Ипак, геополимери се никако не требају сматрати заменом цементних материјала, већ само као њихова алтернативна замена. У данашње време све је више разлога за пораст интересовања у области геополимера, а нарочито њихових еколошких предности. Како наводе J. M. Allwood и други [47], преко 2/3 антропогене емисије CO₂ настаје услед искоришћења енергије и производње (слика 4.1). Као што се може видети, у веће загађиваче спада процес изградње (грађевинарство) код којег се емисија CO₂ мери са око 33 % од укупног загађења. Из индустријске производње потиче око 36 % укупне емисије CO₂ и то при производњи пет група производа: челика, цемента, пластике, папира и алуминијума.



Слика 4.1 Глобална антропогена емисија CO₂ која је у вези са енергијом и индустријским процесима: за све секторе (лево) и за индустрију (десно) [47]

Познато је да се при справљању цемента могу употребити индустријски нуспроизводи попут електрофилтерског пепела, згуре и др. Међутим, тренутна пракса у нашој земљи је да се не комбинују тако често, већ се отпад велике употребне вредности углавном депонује. Већом употребом индустријских нуспроизвода створила би се одређена економска корист како кроз смањење трошкова депоновања тако кроз



продавања отпада као сировине [20]. Према Stengel и другима [48], еколошки бенефити услед коришћења геополимерног бетона могли би се видети смањењем емисије CO₂ која би се према неким предикцијама кретала у опсегу од 25 % до 45 %. У поређењу са Портланд цементом, за производњу алкалима активираних цемента потребно је 60 % мање енергије [49], док је емисија CO₂ око 6 пута мања [20].

О еколошким и економским предностима геополимера може се више сазнати и из истраживања које су спровели Hardjito и Rangan [50]. Они су доказали да једна тона електрофилтерског пепела може бити употребљена за производњу 2,5 m³ висококвалитетног бетона чија је цена коштања мања од Портланд цементног бетона [44]. Еколошки бенефити огледају се и у имплементацији отпадних материјала у састав геополимера. Наиме, алуминосикикатне сировине које су потребне за справљање геополимера могу се наћи у природном стању, попут матријала из Земљине коре, али су то чешће индустријски нуспроизводи. Алкални активатори попут јаких база у комбинацији са силикатним једињењима најчешће се користе за справљање геополимера [51]. Сходно томе, теоретски гледано, било који чврсти материјал који у свом хемијском саставу садржи оксиде силицијума и алуминијума може се користити као везивни материјал за справљање геополимера [39]. Неки од најчешће коришћених су отпадни материјали пореклом из индустријске производње попут: електрофилтерског пепела, гранулисане згуре из високе пећи, црвеног муља, метакаолина, пепела од пиринчаних љуспица и сл. [52].

У досадашњим истраживањима проучаване су много особине геополимера у свежем (слика 4.2) и очврслом стању. Највише испитивања спроведено је на геополимерним пастама, нешто мање на геополимерним малтерима, а понајмање на геополимерним бетонима. Посебну пажњу аутори су до сада посвећивали рецептурама композита у оквиру чега су испитиване различите варијације концентрације алкалних раствора за активацију чврстих везивних материјала: NaOH и Na₂SiO₃, времена и температуре очвршћавања, влажности и др.

Према доступној литератури, неки од најчешће коришћених алкалних раствора коришћених за справљање геополимера су: NaOH, Na₂SiO₃, Na₂SO₄, Na₂CO₃, KOH, K₂CO₃, K₂SO₄ и др. [53][54].



Слика 4.2 Испитивање слегања геополимерног бетона (лево) и изглед бетона након справљања (десно) [55]

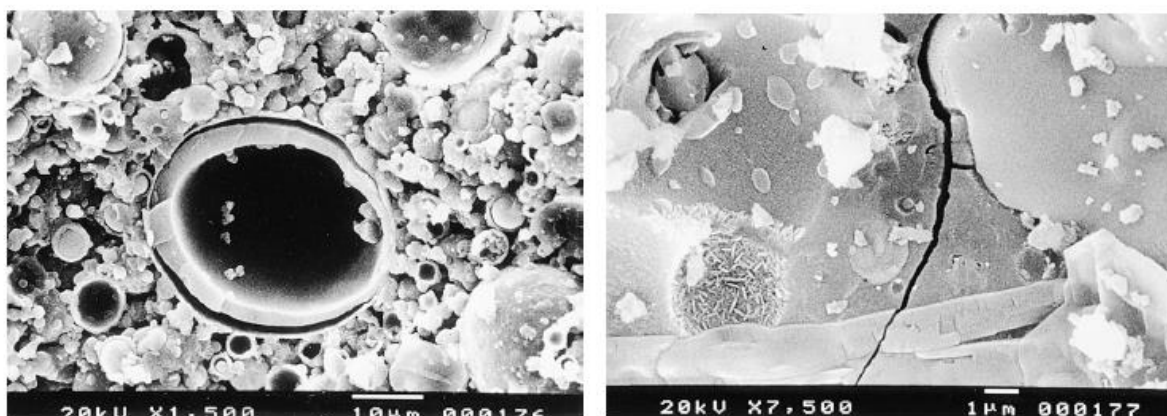
4.1 Утицај алкалних активатора и начина неге на карактеристике геополимера

У циљу одређивања утицаја температуре неге и концентрације алкалних раствора на чврстоћу при притиску геополимера справљеног са електрофилтерским пепелом спроведена су бројна истраживања. Највећи број истраживања спроведен је када се температура неге узорака кретала у опсегу од 30 °C до 85 °C [38][56][57].

4.1.1 Утицај алкалних активатора на карактеристике геополимерне пасте

А. - Аузо и други [58] су испитивали еколошке, физичке и структуралне карактеристике геополимерне пасте справљене са NaOH. Процес геополимеризације остварен је коришћењем 5 М, 8 М и 12 М NaOH раствора (при чему М представља моларност). Мешавине су очвршћавале при температури од 40 °C до 80 °C у трајању од 6 h до 48 h. У погледу структуралне стабилности, аутори наводе да је мешавина најоптималнијих карактеристика справљена при условима максималне концентрације NaOH при температури од 80 °C у трајању од 48 h. Palomo и други [38] истраживали су модел механизма активације геополимерних мешавина на бази електрофилтерског пепела класе „С“ и алкалних раствора. Аутори су испитивали утицај температуре неге и дужину температурне изложености мешавина, однос раствор/електрофилтерски пепео, механичке карактеристике и др. Мешавине су справљене коришћењем четири врста раствора. Прва мешавина справљена је са раствором NaOH концентрације 12 М, друга мешавина справљена је са KOH концентрације 18 М, док су трећа и четврта мешавина справљене су комбинацијом хидроксидних и силикатних раствора. Стога, трећа

мешавина је справљена са NaOH и Na_2SiO_3 , док је четврта мешавина справљена са KOH и K_2SiO_3 . Узорци су излагани температурном дејству од $65\text{ }^\circ\text{C}$ и $85\text{ }^\circ\text{C}$. Однос течне/чврсте фазе био је $0,25 - 0,3$. На основу резултата испитивања аутори закључују да се као продукт реакције јавља аморфни алуминосиликатни гел чија је структура налик структури зеолита. Код мешавина справљених само са раствором NaOH (слика 4.3 лево) може се уочити да је структура врло порозна, док се веза везивног материјала и продукта реакције чини слаба. Посматрањем микроструктуре мешавине справљене са NaOH и Na_2SiO_3 (слика 4.3 десно) може се уочити да је материјал микропорозан, али и да је остварена боља веза између честица електрофилтерског пепела и продукта реакције него што је случај код мешавине 3.



Слика 4.3 Активација геополимерних мешавина негованих на температури од $85\text{ }^\circ\text{C}$ у трајању од 24 h и справљених са раствором: мешавина 1 - NaOH (лево) и мешавина 3 - NaOH и Na_2SiO_3 (десно) [38]

Xiaolu Guo и други [59] су испитивали чврстоћу при притиску и микроструктуру геополимерне пасте справљене са NaOH и Na_2SiO_3 и електрофилтерским пепелом класе „С“. Однос активатора коришћених за справљање геополимерне пасте SiO_2 и Na_2O био је $1, 1,5$ и 2 . Овакав однос утицао је на промену садржаја Na_2O у односу на масу употребљеног везива који се кретао у опсегу од 5% до 15% . Према резултатима испитивања, на узорцима справљеним са Na_2O концентрације од 10% и односом $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,5$ који су били изложени температурном дејству од $75\text{ }^\circ\text{C}$ у трајању од 8 h , измерена је највећа чврстоћа при притиску од $63,4\text{ MPa}$. Cheng и други [60] испитивали су могућност употребе млевене гранулисане згуре за справљање геополимерне пасте. Вршено је праћење времена везивања и утицаја концентрације KOH и Na_2SiO_3 . Према



резултатима испитивања, механичке и физичке карактеристике геополимера су варирале у зависности са концентрацијом алкалних раствора.

4.1.2 Утицај алкалних активатора на карактеристике геополимерног малтера

Gorhan и други [51] су испитивали утицај концентрације алкалних раствора, температуре и дужине неге на карактеристике геополимерног малтера. Узорци су неговани на температури од 65 °C и 85 °C, а концентрација NaOH је варирана од 3 М до 9 М при кораку од 3 М. Према резултатима испитивања, дужина и температура неге имале су утицај на физичке карактеристике малтера. Концентрација NaOH имала је јасан утицај на карактеристике малтера негованог на температури од 85 °C. Chindaprasirt и други [61] су испитивали обрадљивост и механичке карактеристике геополимерног малтера справљеног са NaOH, Na₂SiO₃ (15.32 % Na₂O, 32.87 % SiO₂ и 51.81 % H₂O) и електрофилтерским пепелом високог садржаја калцијума. Испитиван је и утицај различите концентрације NaOH (10, 15 и 20 М) и масеног односа Na₂SiO₃/NaOH који је износио 0.67, 1, 1.5 и 3. У циљу побољшања обрадљивости коришћени су суперпластификатор и вода. Такође, аутори су испитивали и утицај температуре неге и дужину температурног дејства. Испитивана температура износила је 30 °C, 45 °C, 60 °C, 75 °C и 90 °C, а дужина трајања температурног дејства била је 1, 2, 3 и 4 дана. Аутори су закључили да повећање концентрације NaOH и количине Na₂SiO₃ утиче на смањење обрадљивости, као и да повећање температуре неге са 30 °C на 75 °C има позитиван утицај на чврстоћу при притиску. Аутори наводе и да је за добијање малтера задовољавајућих карактеристика најпогоднији масени однос Na₂SiO₃ / NaOH = 0.67 до 1, али и да повећање концентрације NaOH од 10 до 20 М не утиче на резултате. Hardjito и други [62] су испитивали карактеристике геополимерног малтера на бази електрофилтерског пепела у свежем и очврслом стању. Као активатори коришћени су NaOH и Na₂SiO₃. Приликом испитивања варирана је концентрација алкалних активатора и температуре неге. Концентрација NaOH се кретала у опсегу од 8 М до 16 М. Аутори закључују да је повећање механичких карактеристика пропорционално повећању концентрације NaOH. Међутим, закључак ове групе аутора није у складу са тврдњама који су изнели Alonso и Palomo [63]. Они наводе да су механичке карактеристике мешавина справљених са метакаолином највише при концентрацији активатора од 10 М, а да се са порастом концентрације раствора чврстоће смањују. Нешто другачији приступ при испитивању утицаја алкалних активатора на карактеристике геополимера имали су Marjanović и други [24]. Они су испитивали утицај концентрације Na₂O на физичко-



механичке карактеристике и микроструктуру геополимера справљеног са електрофилтерским пепелом и гранулисаном згуром високе пећи. Концентрација Na_2O у односу на масу везива је износила 4 %, 7 % и 10 % а узорци су очвршћавали на температури од 95 °C у трајању од 24 h. Аутори су закључили да Na_2O у концентрацији од 10 % позитивно утиче на физичко-механичке карактеристике.

Иако су ови закључци појединих аутора контрадикторни, треба имати на уму да су сировински материјали различити (на пример: у раду [62] коришћен је електрофилтерски пепео док је у раду [63] коришћен метакаолин). Ово доводи до крајњег закључка да карактеристике геополимера није могуће поредити ако су при испитивању коришћени сировински материјали који су различитог порекла и састава, као и да радови других аутора могу дати смернице, али и да се приликом сваког испитивања морају спровести детаљна претходна истраживања.

4.1.3 Утицај алкалних активатора на карактеристике геополимерног бетона

За разлику од пасте и малтера, број радова у којима су се аутори бавили испитивањем утицаја алкалних активатора и њихове концентрације на карактеристике геополимерног бетона је мали [25]. Разлог томе може бити количина материјала коју је потребно припремити да би се спровело испитивање на бетону, али и позната чињеница да је карактеристике бетона могуће предвидети испитивањем малтерских мешавина.

Ryu и други [64] су испитивали утицај NaOH концентрације 6 M до 12 M на карактеристике бетона. Овако припремљени бетонски узорци неговани су на температури од 60 °C у трајању од 24 h. Након спроведеног испитивања, аутори су довели у корелацију концентрацију раствора NaOH и ране чврстоће бетона. Deb и други [65] су испитивали утицај гранулисане згуре високе пећи на време везивања и чврстоћу геополимерног бетона на бази електрофилтерског пепела. Количина згуре чинила је од 0 % до 20 % масе везива, а као алкални активатори коришћени су NaOH и Na_2SiO_3 односно од 1,5 до 2,5. Узорци бетона су амбијентално неговани, а према резултатима испитивања нижи однос NaOH/ Na_2SiO_3 утиче на смањење обрадљивости али повољно утиче на чврстоће.

4.1.4 Утицај температуре на карактеристике геополимера

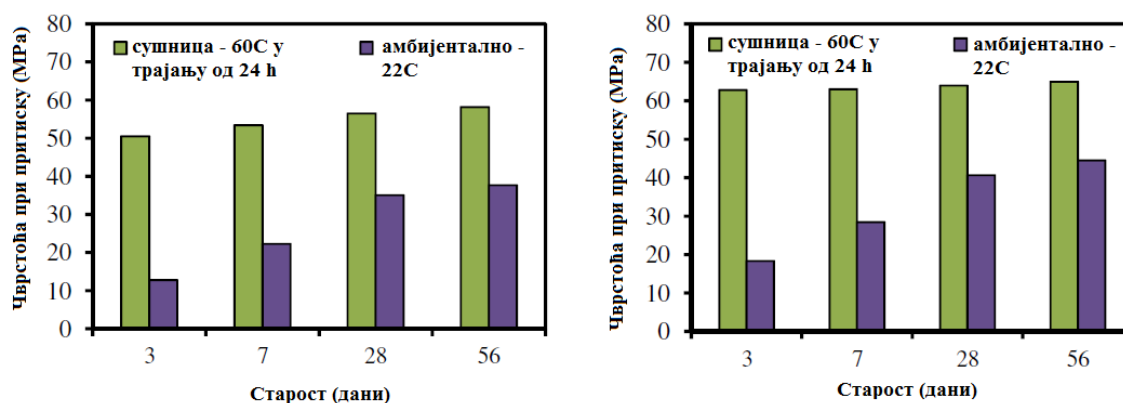
У својим истраживањима Kovalchuk и други [66] наводе да је за добијање геополимера високих чврстоћа најповољнија температура неге од 95 °C, док Nikolić и други [67] закључују да је излагање узорака поменутој температури у трајању од 4 h,



односно 8 h довољно да се оствари близу 50%, односно 75 % чврстоћа остварених након 24 h излагања загревању, респективно. Hardjito и други [62] су спровели испитивање узорака негованих на температури од 65 °C, 70 °C и 80 °C у трајању од 24 h. На основу резултата механичких карактеристика, аутори закључују да већа температура неге повољно утиче на ране чврстоће, али и да већа температура не осигурава веће чврстоће при каснијим старостима. Температура неге преко 70 °C утицала је на смањење чврстоће, а као најоптималнију температуру аутори наводе температуру од 65 °C.

До сада је објављено тек неколико радова у којима је спроведена компаративна анализа карактеристика геополимера негованих у амбијенталним условима и помоћу температурне активације. Ипак, све групе аутора закључују да виша температура повољно утиче на постизање раних чврстоћа [68][69][70], али и да механичке карактеристике епрувета старих 28 дана показују 5 - 10 % мање вредности чврстоће када су епрувете температурно активирани него ли кад су очвршћавале у амбијенталним условима [68][69]. Guo и други [59] су испитивали серије геополимерне пасте које су справљене у односу SiO_2 и Na_2O (1, 1,5 и 2) и концентрацији Na_2O у односу на масу везива (5 % до 15 %). Једна серија узорака очвршћавала је на температури од 60 °C до 90 °C у трајању од 4 h, 8 h, и 24 h, док је друга серија узорака очвршћавала у контролисаним условима на температури 23 °C у трајању од 28 дана. На основу резултата испитивања, аутори наводе да у погледу чврстоће при притиску оптимални однос $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ износи 1.5 док оптимална концентрација Na_2O износи 10 % у односу на масу везива. На узорцима негованим на температури од 75°C измерена је већа чврстоћа при притиску него при другим температурама. Код узорака који су неговани у амбијенталним условима, при температури од 23 °C и старости од 28 дана ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1.5$ и $\text{Na}_2\text{O} = 15$ %) измерена чврстоћа при притиску износи 63.4 МПа. Аутори овог испитивања закључују да је чврстоћа при притиску узорака који су амбијентално очвршћавали већа од чврстоће узорака који су очвршћавали при вишим температурама. Са овим закључцима не слажу се и други аутори. Nath и Sarker [25] који су поред физичких особина геополимера у свежем стању испитивали и механичке карактеристике малтера и бетона справљених на бази електрофилтерског пепела и са додатком гранулисаних згуре високе пећи у износу од 0 % до 30 % при кораку замене од 10 %. Такође, на мешавинама малтера и бетона справљеним са додатком 10 % гранулисаних згуре високе пећи испитиван је и утицај температуре неге. Део узорака излаган је температури од 60 °C у трајању од 24 h, док је други део узорака негован и у амбијенталним условима при

температури од 22 °C. Према резултатима испитивања, чврстоће при притиску бетона (слика 4.4 лево) и малтера (слика 4.4 десно) који су неговани у различитим температурним условима, може се закључити да повишена температура повољно утиче на ране чврстоће. Такође, код амбијентално очвршћаваних узорака прираст чврстоћа је постепен и траје све до старости од 56 дана. Примећује се да су код узорака који су температурно очвршћавали ране чврстоће велике, али је њихова промена до старости од 56 дана занемарљиво мала.



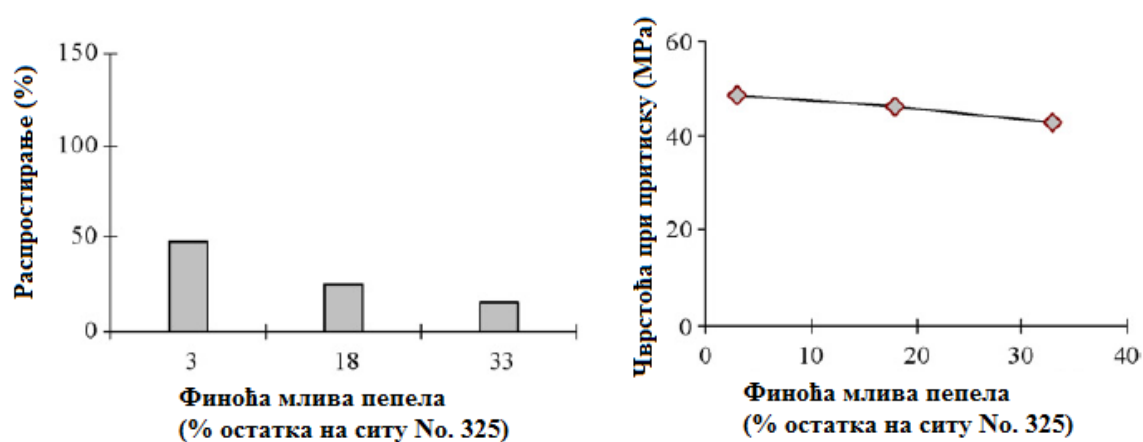
Слика 4.4 Чврстоћа при притиску: лево) бетона, десно) малтера који су очвршћавали у температурним условима (60 °C у трајању од 24 часа) и у амбијенталним условима [25]

Rovnanik [68] је испитивао геополимере на бази метакаолина који су температурно очвршћавали при температури од 10 °C до 80 °C. Аутори наводе да повишена температура повољно утиче на ране чврстоће које су мерљиве већ после 24 h. Применом компаративне анализе, аутори закључују да су чврстоће узорака негованих на повишеној температури ниже него код узорака који су амбијентално неговани. Аутори ово објашњавају тиме да услед убрзаног очвршћавања полимеризација не изврши у потпуности што има негативан утицај на карактеристике геополимера.

У досадашњим истраживањима, углавном су испитивани узорци геополимерних мешавина које су очвршћавале при повишеној температури. Иако је то био случај, због практичности предложених решења и употребљивости таквих материјала „in situ“ требало би подробније испитати геополимерне мешавине које су неговане у амбијенталним условима [25].

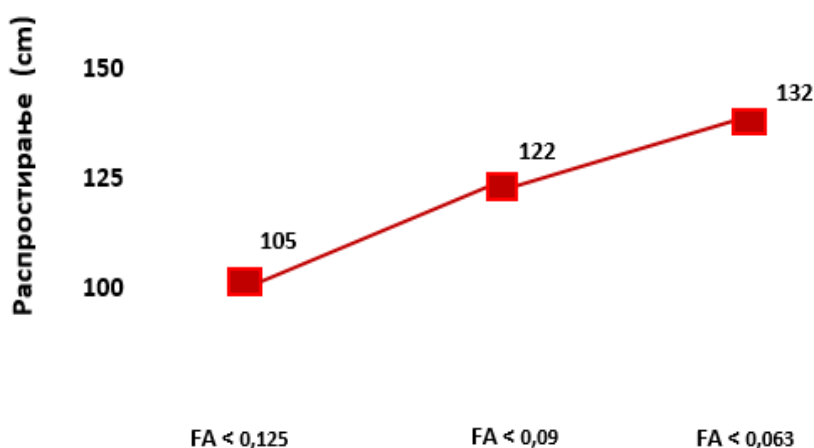
4.2 Утицај финоће млива на карактеристике геополимера

Приликом испитивања геополимера многи аутори су испитивали утицај финоће млива везива на карактеристике композита [71][72]. Jaarsveld и други [73] наводе да површинске промене на зрнима електрофилтерског пепела утичу на време везивања геополимерних мешавина. Аутори ово тумаче тиме што се услед процеса растварања и геополимеризације врши транспорт хидроксидних јона на површину зрна електрофилтерског пепела. Овај транспорт праћен је хидролизом и формирањем алуминатних и силикатних мономера. Њиховом полимеризацијом формирају се олигомери различитих облика који доводе до фазе у којој се врши стварање геополимерног гела. Ranjbar и други [74] су испитивали геополимерни малтер на бази електрофилтерског пепела и са додатком пепела насталог прерадом палминог уља. Везивни материјал просејан је кроз сито отвора 300 μm а затим је додатно уситњаван помоћу Лос Анђалес машине у трајању од 30 хиљада циклуса. На основу добијених резултата аутори закључују да облик, величина и површина честица утичу на механичке карактеристике геополимерног малтера. Аутори попут Sathonsaowaphak и други [71] су испитивали утицај финоће млива шљаке на обрадљивост и чврстоћу геополимерног малтера док је 3, 18 и 33 % везивног материјала било је крупније од 45 μm . Аутори наводе да се услед повећања финоће млива обрадљивост и чврстоћа при притиску мењају (слика 4.5). Резултате испитивања аутори тумаче чињеницом са се уситњавањем шљаке повећава укупна површина зрна и реактивност материјала, али и да се уситњавањем смањује садржај пора на честицама.



Слика 4.5 Распростирање и чврстоћа при притиску малтера справљеног од шљаке различите финоће млива [71]

F. - Jimenez и Palomo [56] су испитивали утицај финоће млива везива на чврстоће геополимерног малтера. Аутори наводе да постоји веза између финоће млива везива и механичких карактеристике испитиваног малтера. Закључци њихових испитивања су и да се уклањањем честица електрофилтерског пепела крупнијих од 45 μm повећава чврстоћа при притиску малтера који досеже вредност и до 70 МПа. Вијелјић и други [75] су испитивали утицај финоће млива на карактеристике геополимерних малтера справљених на бази електрофилтерског пепела класе „F^{cc}“. Испитивана финоћа млива везива за справљање мешавина била је 0.063, 0.09 и 0.125 mm. Аутори наводе да финоћа млива утиче на свеже и очврсле карактеристике малтера. Такође, распрострањање и чврстоћа при притиску се повећавају са смањењем финоће млива честица електрофилтерског пепела. На слици 4.6 приказани су резултати испитивања малтера у свежем стању и очврслем стању.



Слика 4.6 Распростирање геополимерног малтера справљеног са електрофилтерским пепелом финоће млива 0.063 mm (FA<0.063), 0.09 mm (FA<0.09) и 0.125 mm (FA<0.125) који је очвршћавао на температури од 95 °C у трајању од 24 h [75]

4.3 Физичко-механичке карактеристике геополимера

Највећи број страних аутора бавио се испитивањем геополимерима на бази електрофилтерског пепела, док су као додаци везивима најчешће коришћени други индустријски нуспроизводи. Већи број истраживања извршен је на електрофилтерском пепелу класе „F^{cc}“. Palomo и други [38] наводе да време излагања температурном дејству, температура неге и алкални активатор утичу на механичке карактеристике геополимера. Други аутори [77][78][79][80] наводе да на степен остварене полимеризације највећи утицај имају садржај воде, тип активатора, температура и време очвршћавања, садржај



Si, Al и Na, растворљивост Si, однос Si/Al. Аутори наводе и да дуго излагање узорак повишеној температури неге може бити штетно по структуру очврслог материјала. Најимохаммади и други [81] испитивали су механичке карактеристике, микроструктуру и утицај односа Si/Al на карактеристике геополимера справљеног на бази електрофилтерског пепела. Као везивни материјал коришћен је и Na_2SiO_3 у чврстом стању. Његов масени садржај утицао је на однос Si/Al тако да се кретао у односу 3.6:1 и 4.5:1. Након сједињавања чврсте фазе додата је вода тако да је однос $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ био 12:1 и 14:1. За справљање је као течна фаза коришћен NaOH. Према резултатима испитивања, однос Si/Al утицао је на механичке и микроструктуралне карактеристике. Највећа чврстоћа остварена је код узорак справљених са односом Si/Al = 3.6:1 и односом $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 12:1$. Kong и Sanjayan [54] су испитивали карактеристике геополимерне пасте, малтера и бетона справљених на бази електрофилтерског пепела „класе F“ при чему је 89 % пепела је било ситније од 45 μm . У циљу одређивања ватроотпорности геополимера који су излагани температури од 800 °C, а као агрегат коришћен је речни песак. Геополимерни малтер је након справљања негован у амбијенталним условима у трајању од 24 h, након чега је негован на температури од 80 °C при условима релативне влажности од 93 % у трајању од још 24 h. Чврстоћа при притиску геополимерне пасте, малтера и бетона као и садржај увученог ваздуха и запреминска маса дати су у табели 4.2.

Табела 4.2 Карактеристике геополимерног бетона [21]

Тип мешавине	Садржај увученог ваздуха (%)	Запреминска маса (kg/m^3)	Чврстоћа при притиску – 3 дана (MPa)	
			Узорци који нису излагани темпер. дејству	Узорци излагани температур. дејству
паста	2,35	1940,4	71,2	19,0
малтер	2,3	2291,8	72,3	-
бетон	2,4	2575,8	70,5	29,3

Препоруку за добијање квалитетног геополимерног производа дали су Davidovits и други (1994) и Davidovits (2008) [82]. Према поменутиим ауторима, геополимер би треба да буде формиран синтезом једињења следећих односа: $\text{M}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ од 0.2 до 0.48; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ од 3.3 до 4.5; $\text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O}$ од 10 до 25; и $\text{M}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ од 0.8 до 1.6.



4.3.1 Физичко-механичке карактеристике геополимерног малтера

Chindaprasirt и други [61] су испитивали карактеристике геополимерног малтера справљеног на бази електрофилтерског пепела класе „С“. При старости од 3 дана чврстоћа при притиску малтера негованог при температури од 70 °С износила је 52 МПа. Аутори наводе да повећање температуре активирања утиче на слабљење микроструктуре и повећава порозност малтера. У другом истраживању, Chindaprasirt и други [83] испитивали су карактеристике геополимерних малтера високих чврстоћа који су алкално активирани коришћењем Na_2SiO_3 и NaOH у односу 1:1, а као везивни материјал коришћен је електрофилтерски пепео. Остварена чврстоћа при притиску малтера старости 28 дана износила је 86 МПа. Приликом испитивања праћено је и скупљање услед сушења које је упоређено са скупљањем Портланд цементног малтера. Укупно скупљање геополимерног малтера било мање од скупљања Портланд цементног малтера. Темцијин и други [84] су испитивали физичко-механичке карактеристике геополимерних пасти и малтера справљених на бази електрофилтерског пепела и при различитом процентуално - масеном садржају агрегата. Према резултатима испитивања, повећање садржаја агрегата утицало је на степен остварене геополимеризације али није битно утицало на промену чврстоће при притиску.

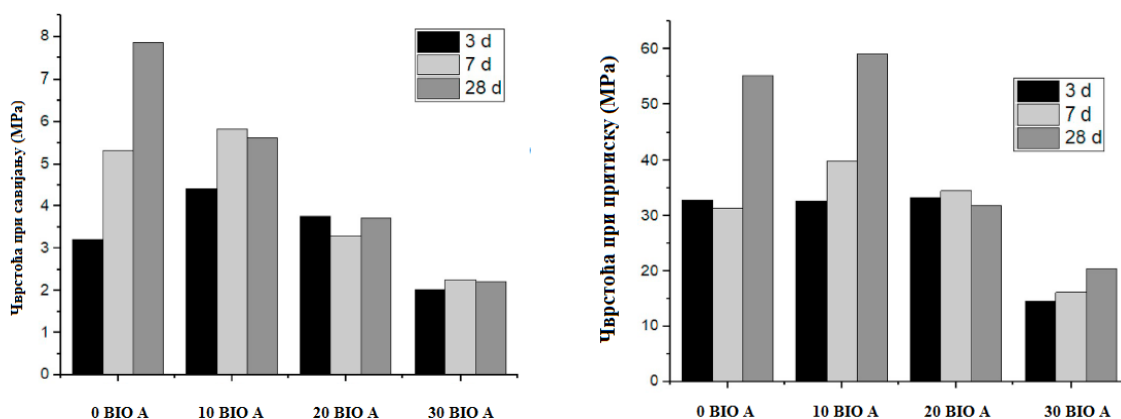
Утицај гранулисане згуре из високе пећи на карактеристике геополимерног малтера: Kim и Kim [85] испитивали су утицај замене електрофилтерског пепела згуром у процентуално-масеном износу од 0 %, 50 % и 100 % на карактеристике геополимерног малтера. Према резултатима испитивања малтера старости 1, 7 и 28 дана чврстоћа при притиску расте са повећањем процентуалног садржаја згуре у малтеру. Aудин [86] је испитивао геополимере справљене са електрофилтерским пепелом и згуром у масеном односу 40/60, 20/80 и 0/100. Коришћена везива активирана су NaOH и Na_2SiO_3 . Након справљања узорци су у трајању од 5 h неговани при условима релативне влажности од 90 % на температури од 20 °С. Након тога узорци су трајању од још 6 h били неговани у сушници на температури од 70 °С. Према резултатима испитивања, постоји зависност између чврстоће и садржаја згуре. Чврстоћа при притиску расте са повећањем садржаја згуре у мешавини. Puertas и други [87] су испитивали чврстоћу при савијању и чврстоћу при притиску неколико врсти малтера: 1) 100 % електрофилтерског пепела, 2) 100 % згуре из високе пећи, 3) малтера справљеног са 50 % електрофилтерског пепела и 50 % гранулисане згуре високе пећи и 4) цементног малтера. Према резултатима испитивања, чврстоћа при притиску и чврстоће при савијању расту с порастом старости малтера. При



старости од 28 дана, чврстоћа при савијању мешавина 1), 2), 3) и 4) износи 6.8 МПа, 7.8 МПа, 4.6 МПа и 7.8 МПа, респективно. При истој старости узорака, чврстоћа при притиску мешавина 1), 2), 3) и 4) износи 39.4 МПа, 89.5 МПа, 30 МПа и 53 МПа, респективно. Резултати указују да су најмања чврстоћа при савијању и чврстоћа при притиску измерене на узорцима малтера справљеног са 50 % електрофилтерског пепела и 50 % гранулисане згуре високе пећи.

Утицај пепела из дрвне биомасе на карактеристике геополимерног малтера:

Рајатма и други [88] су испитивали карактеристике алкалима активираних малтера справљених са висококалцијумским пепелом из дрвне биомасе и метакаолином. Алкална активација је остварена коришћењем NaOH и Na_2SiO_3 при масеном односу од 0,5 до 2,5. Малтерске мешавине су температурно активирание при температури од 60 °C у трајању од 48 h, а однос везиво/активатор и везиво/песак био је 3:2 и 1:3, респективно. Аутори су успоставили корелацију између карактеристика малтера у свежем стању и садржај Na_2SiO_3 . Такође, услед повећања садржаја метакаолина чврстоћа при притиску расте и до 40 %. Карактеристике геополимерних малтера справљених на бази електрофилтерског пепела и пепела из дрвне биомасе били су предмет испитивања Abdulkareem и других аутора [89]. Аутори су основно везиво мењали пепелом из дрвне биомасе у процентулно - масеном износу од 10 % до 30 % при кораку замене од 10 %. Према резултатима испитивања, на узорцима мешавине справљена са 30 % пепела из дрвне биомасе измерена је мања чврстоћа при притиску од мешавине справљене само са електрофилтерским пепелом. Резултате испитивања аутори тумаче као последицу убрзано везивање који резултира стварањем нехомогене структуром која отежава одвијање процеса полимеризације. Као секундарна реакција овог процеса ствара се C-S-N гел који настаје као последица реакције портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из пепела из дрвне биомасе и течног алкалног активатора [90]. Формирање C-S-N гела утиче на повећање алкалности, али и олакшава стварање геополимеризације. При старости од 28 дана, чврстоћа при притиску мешавине са 10 % дрвног пепела из биомасе била је већа од еталона (слика 4.7). Резултате испитивања аутори тумаче као последицу геополимеризације током које је дошло до ослобађања слободне воде кроз коју је кретање SiO_2 и Al_2O_3 било лакше. Смањена чврстоћа при притиску других мешавина последица је недостатка растворених Si и Al из електрофилтерског пепела услед промењеног процентуално - масеног удела.



Слика 4.7 Чврстоћа при савијању (лево) и чврстоћа при притиску (десно) геополимерног малтера са додатком 0, 10, 20 и 30 % дрвног пепела из биомасе [89]

Иако је највећи број испитивања спроведен на геополимерима справљеним само са електрофилтерским пепелом као везивом [91][92][93][91][92][93] много је аутора који су у циљу побољшања појединих перформанси користили и друге индустријске нуспроизводе. У циљу боље прегледности остварених резултата и специфичности испитиваних мешавина, у табели 4.3 су дати резултати испитивања најважнијих истраживања.



Табела 4.3 Карактеристике геополимера

Аутори	Везивни материјал	Алкални активатор	Начин неге	Чврстоћа при притиску (МПа)
Islam и други [52]	Електрофилтерски пепео, гранулисана згура (40 до 100 %) и палимно уље (25 до 100 %)	NaOH и Na ₂ SiO ₃	На температури 65°C у трајању од 24 h + 27 дана на температури од 27°C при релативној влажности од 70 %	10 - 66
Kramar и други [97]	Гранулисана згура	NaOH и Na ₂ SiO ₃	Амбијентално 21 ± 2 °C при релативној влажности од 60 ± 10%	32.4 - 61.0
	Електрофилтерски пепео			13.8 - 76.5
	Метакаолин			67.6 - 71.5
Zhang и други [98]	50 % Електрофилтерски пепео и 50 % метакаолин	KOH и K ₂ SiO ₃	Амбијентално 22°C при релативној влажности 95 %	49.35
Chindaprasirt и други [99]	Електрофилтерски пепео	NaOH и Na ₂ SiO ₃	На температури 65°C у трајању од 48 h	24 - 35
	Bottom ash			10 - 18
A. -Majidi и други [100]	Електрофилтерски пепео и гранулисана згура (10%-50%)	KOH и K ₂ SiO ₃	Амбијентално на температури од 21-23°C	≈ 3 – 48
Marjanović и други [24]	Електрофилтерски пепео и гранулисана згура (25-100%)	NaOH и Na ₂ SiO ₃	На температури 95°C у трајању од 24 h	До око 80
Karakoc [101]	Ферохромска згура	NaOH и Na ₂ SiO ₃	60 °C у трајању од 20 h	4.63 - 14.84
			80 °C у трајању од 20 h	3.48 - 14
			Амбијентално 20°C	4.8 - 22.04
Ye и други [102]	Црвени муљ и силикатна прашина (5%-30%)	KOH и K ₂ SiO ₃	Амбијентално на температури од 21-23°C	≈ 3 – 48
Abdulkarem и други [89]	Електрофилтерски пепео и пепео биомасе (10-30 %)	NaOH и Na ₂ SiO ₃	На температури 70°C у трајању од 24 h	≈ 15 – 60
Cheah и други [103]	Пепео настао прерадом папира, пепео дрвне биомасе и гранулисана згура из високе пећи	NaOH и Na ₂ SiO ₃	Амбијентално на температури од 28±5°C	0 - 49.61
Rashidian-Dezfouli и Rangaraju [104]	Млевено стакло,	NaOH и Na ₂ SiO ₃	На температури 60°C у трајању од 24 h	67 - 82
	електрофилтерски пепео			14 - 60
	спрашено стакло			7 - 43
Lancellotti и други [105]	Метакаолин, шљака и конверторска згура	NaOH и Na ₂ SiO ₃	Амбијентално	-
Sandamano и други [21]	Шумска биомаса и метакаолин (10, 20 и 30 %)	NaOH и Na ₂ SiO ₃	На температури 50 °C у трајању од 1 h	≈ 15 – ≈ 60
Cheah и други [54]	Висококалцијумски пепео дрвне биомасе (50,60,70 и 100 %) и електрофилтерски пепео	H ₂ O	Амбијентално на температури 28 ± 5 °C и релативној влажности 80 ± 5%	≈ 6 – ≈ 18
Salman и други [107]	Шљака из прераде нерђајућег челика	NaOH и Na ₂ SiO ₃	На температури 60, 70, 80, 90, 100 и 110 °C у трајању од 16 h	5.7 – 42.85
		KOH и K ₂ SiO ₃		4.63 – 38.03



4.3.2 Физичко-механичке карактеристике геополимерног бетона

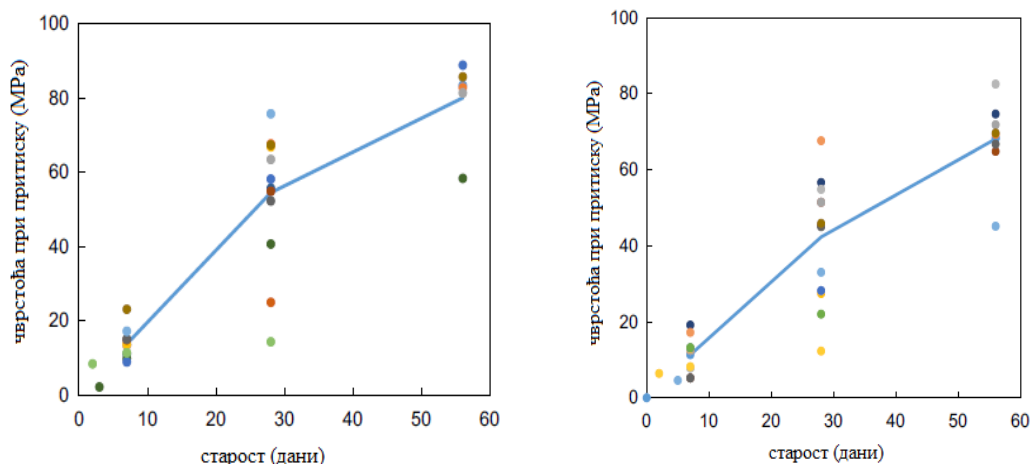
Као што је познато, бетон је хетерогени композитни материјал који се састоји од компонената различитих карактеристика. Овај композит бива често праћен компликованим и недовољно јасним механизмима лома. Лом бетона најпре почиње пуцањем веза на делу транзитне зоне између агрегата и матрице. Услед повећања дејства спољашњег оптерећења долази до појаве микропрлина, а затим и до пукотина који доводе до лома [82].

Испитивањем карактеристика геополимерног бетона бавили су се Hardjito и други [108]. Ова група аутора испитивала је чврстоћу при притиску геополимерног бетона, а добијене вредности чврстоће кретале су се у опсегу од 30 МПа до 80 МПа. Аутори овог истраживања закључују да оптимални однос вода/чврста фаза износи 0,18, али и да повећање односа утиче на смањење чврстоће при притиску. У другом истраживању, Hardjito и други [76] су се бавили утицајем моларних односа H_2O/Na_2O и Na_2O/SiO_2 на карактеристике геополимерног бетона. Аутори закључују да повећање моларног односа H_2O/Na_2O утиче на смањење чврстоће при притиску бетона. За разлику од њега, варијација моларног односа Na_2O/SiO_2 нема значајног утицаја на карактеристике геополимерног бетона. Provis и други [109] испитивали су чврстоћу при притиску бетона негованог у амбијенталним условима. За справљање су користили везива: електрофилтерски пепео, гранулисана згура високе пећи и метакаолин. Као алкални активатори коришћени су $NaOH$ и Na_2SiO_3 . За справљање бетона на бази електрофилтерског пепела водовезивни фактор износио је 0,223 (бетон ознаке FA2) и 0,253 (бетон ознаке FA8). Бетон са мањим водовезивним фактором је пројектован као бетон високих перформанси. Конзистенција је проверавана методом распростирања које је за бетон FA2 износило 370 mm, односно 490 mm за бетон FA8. На слици 4.8 приказани су резултати испитивања чврстоће при притиску бетона на бази електрофилтерског пепела старости 7, 28 и 56 дана. При старости бетона од 28 дана, код обе серије бетона примећено је велико осипање резултата. Ипак, при старостима од 28 до 56 дана измерено је повећање средњих вредности чврстоће при притиску. Механичке карактеристике геополимерног бетона биле су предмет истраживања и других аутора, па су због прегледности резултати и специфичности неких од најважнијих истраживања дати у табели 4.4.



Табела 4.4 Карактеристике геополимерног бетона

Аутори	Везивни материјал	Алкални активатор	Начин неге	Чврстоћа при притиску (МПа)
Најимохаммад и други [81]	Електрофилтерски пепео	NaOH и Na ₂ SiO ₃	У сушници на температури 40 °C	≈ 7 – 65
Gorhan и Kurklu [51]	Електрофилтерски пепео	3-9M NaOH и Na ₂ SiO ₃	У сушници 24 h на температури на температури 65 °C и 85 °C	12 – 23
Guo и други [59]	Електрофилтерски пепео	NaOH и Na ₂ SiO ₃	У сушници 8 h на температури на температури 75 °C + 28 дана на температури од 23 °C	5 – 63,4
Aliabdo и други [110]	Електрофилтерски пепео	NaOH и Na ₂ SiO ₃	На температури 50 °C у трајању од 48 h	≈ 18 – ≈ 38
Somna и други [111]	Обичан електрофилтерски пепео и млевени електрофилтерски пепео	4,5-16,5M NaOH и Na ₂ SiO ₃	Амбијентално	7 – 25,5
Adak и други [112]	Електрофилтерски пепео и наносилика	NaOH и Na ₂ SiO ₃	Амбијентално на температури од 27 °C	7-48
Nath и Kumar [113]	Електрофилтерски пепео и гранулисана згура	6M NaOH	На температури од 110 °C у трајању од 8 h + 27 дана на температури од 27 °C	5-93,4
Nath and Sarker [25]	Електрофилтерски пепео и гранулисана згура	NaOH и Na ₂ SiO ₃	Амбијентално на температури од 22-23°C и влажности од 65%	0- 63
Ramani и Chinnaraj [114]	Гранулисана згура и црни пепео рижиних љуски	NaOH и Na ₂ SiO ₃	На температури од 60°C у трајању од 8 h + 8 h	19,24-70,72
Окоје и други [115]	Електрофилтерски пепео и силикатна прашина (5-40 %)	NaOH и Na ₂ SiO ₃	На температури од 100°C у трајању од 72 h	≈ 30 - ≈ 70
Не и други [116]	Електрофилтерски пепео, црвени муљ, метакаолин	NaOH и Na ₂ SiO ₃	Амбијентално	10,6-31
Pachamuthu и Thangaraju [117]	Електрофилтерски пепео и папирни муљ	NaOH и Na ₂ SiO ₃	Амбијентално	≈ 7 – ≈ 40
			41 °C	≈ 10 – ≈ 38
			У сушници на температури 60 °C, у трајању од 24 h	≈ 20 – ≈ 53
Kusbiantoro и други [118]	Електрофилтерски пепео и пепео рижиних љускица	NaOH и Na ₂ SiO ₃	Амбијентално на температури 35 °C, у сушници на температури 55 °C, у сушници 24 h на температури 65 °C	7-75
Окоје и други [119]	Електрофилтерски пепео и каолин	KOH, NaOH и Na ₂ SiO ₃	На температури од 100°C у трајању од 72 h	20 - ≈ 35



Слика 4.8 Чврстоћа при притиску бетона на бази електрофилтерског пепела FA2 (лево) и FA8 (десно) [109]

Испитивање модула еластичности геополимерног бетона је такође био предмет истраживања неколико група аутора. Hardjito и други [120] су испитивали напон и деформацију геополимерног бетона на бази електрофилтерског пепела. Као еталон коришћени су узорци Портланд цементног бетона. Према резултатима испитивања, аутори закључују да су Јангов модул еластичности, Поасонов коефицијент и чврстоћа при затезању цепањем геополимерног и Портланд цементног бетона приближно исте. Такође, однос напона и деформације одговара једначинама које већ важе за Портланд цементни бетон. F. Jimenez и други [121] су испитивали чврстоћу при притиску и модул еластичности геополимерног бетона на бази електрофилтерског пепела који је негован при температури од 85 °C у трајању од 20 h а резултати испитивања упоређени су са еталон бетоном справљеног на бази Портланд цемента. Мешавина је справљена при водовезивном фактору од 0,55. При поменутиим условима испитивања, остварена притисна чврстоћа износила је 45 МПа. Аутори закључују да је висока чврстоћа последица компактне микроструктуре, добре везе агрегата и пасте и мали садржај пора. Модул еластичности геополимерног бетона износио је 18,4 GPa што је за око 60 % мање од модула еластичности измереног на Портланд цементном бетону (30,3 GPa).

Модул еластичности, чврстоћа при затезању цепањем, чврстоћа на савијање и чврстоћа при притиску биле су предмет истраживања и других аутора. Због лакшег упоређења резултата у табели 4.5 је дат кратак преглед претходних испитивања најважнијих физичко-механичких карактеристика бетона.



Табела 4.5 Карактеристике геополимерног бетона

Аутори	Нарђито и други [108]	Pachamuthu и Thangaraju [117]	Nath и Sarker [28]	F. - Jimenez и други [121]	Noushini и други [123]	Sofi и други [124]	D. - Loуа и други [125]	Aliabdo и други [110]	Ran и други [126]	Ramani и Chinnaraj [114]
Запреминаска маса (kg/m ³)	2230-2430	-	2317-2398	-	-	2147-2408	1890-2371	-	1876-2555	≈ 2400
Моларност (M)	10-16	12	14	8 и 12,5	-	-	14	16	8	8
Слегање (mm)	60-215	-	-	-	-	-	100-150	80-100	-	-
Чврстоћа при притиску (MPa)	30-80	7-53	25,6-53,3	29-43,5	41,7	47-56,5	10-80	18-38	65,1-77,9	19,24-70,72
Чврстоћа при затезању цепањем (MPa)	3,74-6	0,5-4	-	-	-	2,8-4,1	-	-	2,8-5,1	0,81-6,74
Чврстоћа на савијање (MPa)	5-12	≈ 2,5-6	4,27-5,44	6,86	-	4,9-6,2	2,24-6,41	-	-	0,91-6,98
Модул еластичности (GPa)	23-31	-	17,4-26,6	10,7-18,4	19,3	23-39	1,9-42	≈ 18 – ≈ 23	11,2-41,2	-
Однос активатор /везиво	0,35-0,4	0,45	0,4	0,4 и 0,55	-	0,45-0,59	0,4-0,94	0,35	0,4-0,65	0,4



Самоуграђујући геополимерни бетон: Nuruddin и други [127] су испитивали утицај NaOH на обрадљивост, чврстоћу при притиску и микроструктуру самоуграђујућег геополимерног бетона на бази електрофилтерског пепела. Као алкални активатори коришћени су раствори NaOH (8 М - 14М) и Na_2SiO_3 . Овако припремљен бетон је након справљања негован на температури од 70 °C у трајању од 48 h. На свежем бетону извршено је испитивање распростирања, времена t_{500} , V-funnel, L-box и J-ring, док је на очврслном бетону старости 1, 3, 7 и 28 дана испитана чврстоћа при притиску. Добијени резултати испитивања на бетону у свежем стању су:

- распростирање: 625 до 710 mm,
- времена t_{500} : 4 – 6,5 секунди,
- V-funnel: 7 – 15,5 секунди,
- L-box (H2/H1): 0,84-0,96 и
- J-ring: 5 – 13 mm.

Испитивана чврстоћа при притиску самоуграђујућег геополимерног бетона старости 28 дана кретала се у опсегу од 44,69 МПа до 53,08 МПа. Самоуграђујући геополимерни бетон био је предмет испитивања и Uchaа и других [128]. Ова група индијских аутора испитивала је перформансе бетона на бази електрофилтерског пепела справљеног са делимичном заменом основног везива гранулисаном згуром из високе пећи (10 %, 20 % и 30 %) и силикатном прашином (5 %, 10 % и 15 %). У свежем стању испитиване су карактеристике попут: слегања, L-box, U-box и времена t_{500} . На очврслном бетону старости 14 и 28 дана испитиване су чврстоћа при притиску, чврстоћа при савијању и чврстоћа при затезању цепањем (табела 4.6). На испитиваном бетону у свежем стању измерене су следеће карактеристике:

- распростирање: 650 до 690 mm,
- времена t_{500} : 4,5 – 6,5 секунди,
- однос (H2/H1) на L-box: 0,88-0,96 и
- однос (H2/H1) на U-box: 0,87-30 mm.



Табела 4.6 Карактеристике самоуграђујућег геополимерног бетона [128]

Мешавине		Чврстоћа при притиску (МПа)		Чврстоћа при савијању (МПа)		Чврстоћа при затезању цепањем (МПа)	
		14 дана	28 дана	14 дана	28 дана	14 дана	28 дана
Електрофил. пепео 100%		32,89	34,67	3,86	4,2	3,25	4,2
Силикатна прашина	5 %	33,33	36	4,1	4,28	3,51	4,2
	10 %	35,56	37,38	4,4	4,6	3,88	4,4
	15 %	33,78	35,56	4,2	4,3	3,62	4,38
Гранулисана згура	10 %	32,44	35,92	3,71	4,43	3,11	4,44
	20 %	32	36,26	3,5	4,63	2,97	4,56
	30 %	31,11	38,55	3,26	4,82	2,83	4,62

4.4 Трајност геополимера

Познато је да излагање конструкција агресивном спољашњем дејству може угрозити њену трајност. С тим у вези потребно је спровести одређена лабораторијска испитивања, како би се на основу резултата извршила предикција понашања материјала у теренским условима. Штетно дејство спољашње средине може у већој или мањој мери утицати на материјале, а промене настале као последица могу бити: физичке (услед излагања циклусима замрзавања и одмрзавања), хемијске (услед дејства киселина, сулфата или других агресивних раствора), биолошке (услед дејства бактерија) или структуралне (услед дејства цикличног оптерећења) [129]. Иако је до сада испитивано мноштво параметара трајности геополимерне пасте, малтера [130][131] и бетона [132], посебна пажња ће бити посвећена досадашњим испитивањима на циклусе замрзавања и одмрзавања без или у присуству соли за одмрзавање и сулфатну отпорност. Разлог томе су конкретна испитивања која су испитивана у експерименталном делу ове дисертације.

4.4.1 Отпорност на циклусе замрзавања и одмрзавања

Отпорност према дејству мрза најчешће је могуће довести у везу са критичном тачком засићења и количином и садржајем пора у композиту. Достижање критичне тачке засићења (услед упијања воде) а након тога и излагање узорака ниским температурама долази до претварања воде у лед [129]. Овако створени лед притиска зидове пора што се испољава појавом пукотина и разарањем материјала. Стални циклуси замрзавања и одмрзавања доводе до стварање све већих оштећења која се ближе могу објаснити

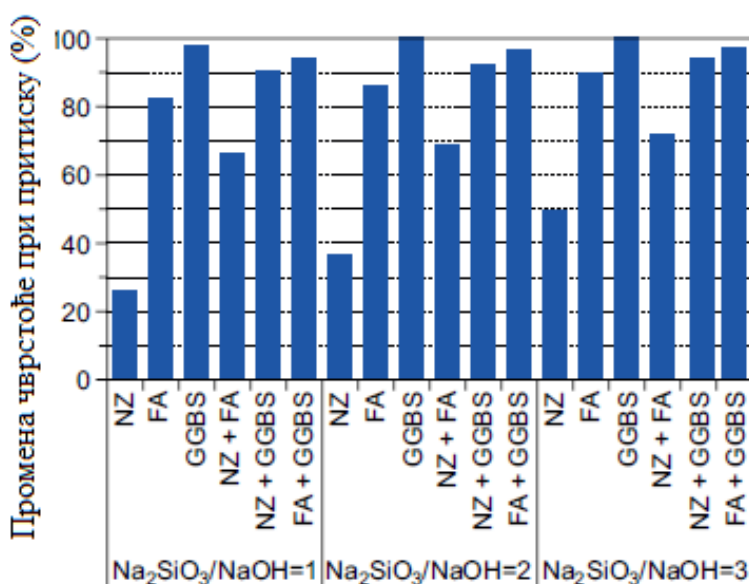


теорију лома: 1) нема оштећења, 2) појава мањих оштећења (стварање микропрслина), 3) макропукотине и 4) разарање материјала [133].

Неколико аутора је испитивало утицај циклуса замрзавања и одмрзавања на геополимерима, а највећи број испитивања спроведен је на малтерима. Slavik и други [134] испитивали су могућност примене шљаке као делимичне замене каолина за справљање геополимера. Испитивање је спроведено према стандарду EN 14617-5. Након 50 циклуса замрзавања и одмрзавања чврстоћа при притиску испитиваних узорака није била мања од 80 % чврстоће референтних узорака малтера истог састава и старости. Као услов отпорности на дејство мраза стандардом је предвиђено да однос чврстоћа испитиваних и референтних узорака треба бити већи од 75 %. Аутори закључују да су сви испитивани малтери отпорни на дејство циклуса замрзавања и одмрзавања у трајању од 50 циклуса. Sun и Wu [135] су испитивали геополимерне малтере справљене са електрофилтерским пепелом класе „F^c“, а као еталон је коришћен цементни малтер. У циљу смањења садржаја увученог ваздуха коришћен је адитив. Геополимерне мешавине су најпре температурно активирани на температури од 75° C у трајању од 12 h а након тога су неговане у амбијенталним условима. Тест испитивања отпорности малтера на циклусе замрзавања и одмрзавања спроведен је према стандарду ASTM C666, а испитивање механичких чврстоћа обављено је након 90, 210 и 300 циклуса. Према резултатима експерименталног испитивања, малтери справљени са Портланд цементом показали су мању отпорност на дејство мраза од геополимерних малтера. Чврстоћа при притиску цементних малтера справљених без адитива је након 300 циклуса била је за око 20 % мања у односу на референтне узорке истог састава. При истом броју циклуса, чврстоћа при притиску малтера на бази електрофилтерског пепела била је за 5 % мања у односу на референтне узорке истог састава. Аутори су довели у корелацију употребљени адитив и измерене чврстоће при притиску. Након 300 циклуса замрзавања и одмрзавања, малтери справљени са Портланд цементом, електрофилтерским пепелом и са додатком адитива имају боље чврстоће при притиску у односу на малтере истог састава справљене без додатка адитива (5 % и 0 %, респективно).

Degirmenci [136] је испитивала отпорност на дејство циклуса смрзавања и одмрзавања и промене попут губитка масе и чврстоће при притиску на геополимерним малтерима на бази пуцолана у трајању од 25 циклуса. За справљање геополимерног малтера коришћени су отпадни пуцолански материјали попут: електрофилтерског пепела са ниским садржајем калцијума и гранулисане згуре из високе пећи, док је као

природни пуцолан коришћен зеоит, а однос алкалних активатора који су коришћени за справљање малтера ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) био је 1, 2 и 3. До почетка испитивања тј. старости од 28 дана узорци облика коцке ивице 50 mm неговани су у амбијенталним условима. Један циклус састојао се од замрзавања узорака на температури од $-20\text{ }^\circ\text{C}$ у трајању од 4 h и одмрзавања на $+20\text{ }^\circ\text{C}$ у трајању од још 4 h. Према резултатима испитивања (слика 4.9), чврстоћа при притиску малтера који су излагани дејству циклуса замрзавања и одмрзавања била је мања од чврстоће референтних малтерских узорака истог састава и старости који су нису излагани дејству циклуса смрзавања и одмрзавања. Изузетак у овом испитивању били су резултати малтерских мешавина справљених са гранулисаном згуром из високе пећи.



Слика 4.9 Промена чврстоће при притиску геополимерног малтера након 25 циклуса смрзавања и одмрзавања (FA - електрофилтерски пепео, NZ - зеоит, GGBS - гранулисана згура високе пећи) [136]

Škvára и други [137] су истраживали утицај замрзавања геополимерног малтера у трајању од 150 циклуса, а испитивање је вршено према Чешком стандарду CSN 72 2452. Испитивани узорци малтера димензија $4 \times 4 \times 16\text{ cm}$ су до времена почетка испитивања очвршћавали у амбијенталним условима и при условима релативне влажности средине од 40 %. Испитивано је укупно седам малтерских мешавина на бази електрофилтерског пепела које су се разликовале по концентрацији $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ тј. Ms модулу који се кретао од 1 до 1,6. Према резултатима испитивања, при старости узорака од 28 дана чврстоћа при притиску износила око 70 % вредности чврстоће узорака истог састава и старости



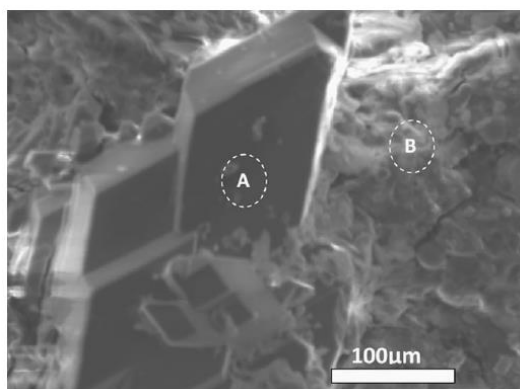
док до промена масе није дошло. Као закључак испитивања аутори наводе да су испитивани геополимерни материјали на бази електрофилтерског пепела изузетно отпорни на циклусе смрзавања и одмрзавања. Фу и други [133] испитивали су отпорност бетона справљеног са згуром активираним са Na_2SiO_3 и NaOH услед циклуса замрзавања и одмрзавања. Испитивање је спроведено према стандардима ASTM C666 и GB/T 50082-2009. Испитивано је укупно 6 серија бетона, а свака серија састојала се од 6 узорака. Праћење промена масе и динамичког модула еластичности вршено је на сваких 25 циклуса. Испитивани бетон показао се као изузетно отпоран на дејство циклуса замрзавања и одмрзавања, а аутори су успоставили два механизма оштећења. Први модел је заснован на смањењу динамичког модула еластичности, док је други модел заснован на укупном оштећењу насталом услед циклуса замрзавања и одмрзавања. Након 300 циклуса дошло је до незнатне промене масе бетона (од око 1 %). Испитивани бетон показао се као изузетно отпоран на дејство циклуса замрзавања и одмрзавања, док је коефицијент отпорности на циклусе смрзавања и одмрзавања износио око 90 %. Овакве резултате испитивања аутори тумаче ниским садржајем Ca/Si присутним у везивном материјалу, а добијена тродимензионална структура је јача него код C-S-H који је присутна код Портланд цементног бетона. Структура геополимерног композита је компактнија, па је продор воде отежан. Zhao и други [138] су испитивали геополимерне бетоне на бази електрофилтерског пепела класе „F“. Извршена је делимична замене електрофилтерског пепела згуром у износу од 10 %, 30 % и 50 %. Серија еталон цементног бетона коришћена је као еталон. Испитивање је спроведено према стандарду ASTM C666. Циклуси смрзавања и одмрзавања утицали су на губитак масе, модул еластичности и чврстоће при притиску. Испитивани геополимерни бетон код којег је електрофилтерски пепео замењен са 10 % згуре имао је видљива оштећења већ након 5 циклуса замрзавања и одмрзавања, док је геополимерни бетон са 30 % згуре оштећен након 50 циклуса. Бетон код којег је електрофилтерски пепео замењен са 50 % згуре издржао је 225 циклуса смрзавања и одмрзавања. Аутори закључују да је садржај згуре од 10 % у бетону недовољан, као и да повећање процентуалне заступљености згуре у мешавини утиче на отпорност бетона на циклусе смрзавања и одмрзавања. Такође, као главни продукт полимеризације јавља се N-A-S-H гел. С повећањем процентуалног удела згуре у мешавини као доминантнији се јављају C-S-H и C-A-S-H гел који се сматрају отпорнијим на циклусе смрзавања и одмрзавања.



4.4.2 Отпорност према дејству сулфата

Ова врста испитивања од велике је важности за елементе конструкције који су изложени дејству сулфатне корозије. Сулфати који делују на конструкције могу бити из земље, воде или ваздуха. Према овоме, као најугроженији елементи конструкције на дејство сулфатне корозије су темељи, објекти близу мора, као и поједини елементи индустријских и инфраструктуралних објеката. Темељи објеката и други укопани делови често се налазе испод нивоа подземних вода које у свом саставу често садрже магнезијум, натријум и калијум сулфат. Спољашње дејство сулфата спада у групу споро одвијајућих процеса а као последица настају физичке промене на испитиваним материјалима. Иако се о самом механизму и даље не зна много [139], познато је да се штетно дејство сулфата може испољити у три различите форме: експанзијом и појавом пукотина, смањењем чврстоће и исцветавањем услед кристализације соли. Услед оваквог дејства долази до повећања пропусности бетона тако да флуиди из средине допиру у унутрашњост и убрзавају процес разарања. Како је последице оваквог деловања (количину и концентрацију сулфата, ток подземних вода, порозност тла, температуру, присуство јона и др.) скоро немогуће контролисати, најчешће се тежи да се овакве препреке пређу коришћењем композитног материјала који је отпоран на та агресивна дејства [140].

Утицај агресивних (сулфатних) раствора до сада је најчешће испитиван на материјалима код којих је као везиво коришћен Портланд цемент и цементи специјалне намене [141]. Према резултатима досадашњих истраживања, садржај калцијум хидроксида (портландита) и присутних фаза алуминијума може утицати на отпорност материјала на дејство сулфата као што је то случај код сулфатноотпорног цемента са ниским садржајем алуминијума [142]. Раствор натријум сулфата (Na_2SO_4) у којем се врши потапање узорака реагује са калцијумом садржаним у везиву и формира калцијум сулфат дихидрат – гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и (или) трисулфат алуминат - еtringит $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ [143]. Реакција хидратисаног Портланд цемента и магнезијум сулфата (MgSO_4) доводи до формирања магнезијум хидроксида – бруцита ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) и гипса [144]. Микроструктуралне промене материјала услед дејства сулфата могу дати прецизнију слику о формираној реакцији. На слици 4.10 приказана је SEM анализа узорака који је у трајању од 3 месеца био потопљен у раствор MgSO_4 . На слици се јасно уочавају кристали гипса (А) и гела (В) у којем су садржани Mg, Si и Al.



Слика 4.10 SEM микроструктура узорка потопљеног у раствор $MgSO_4$: (A) кристали гипса, (B) гел у којем су садржани Mg, Si и Al [145]

Отпорност геополимера на дејство сулфата истраживао је Вакhareв [146] који је испитивао утицај активатора (тип, концентрација) на чврстоћу при притиску и микроструктуралне промене. Геополимерна паста справљена је са електрофилтерским пепелом класе „F“. Справљене су три мешавине у којима је извршена замена врсте алкалног активатора. Прва мешавина справљена је са Na_2SiO_3 (8FASS), друга мешавина справљена је са NaOH (8FA), док је трећа мешавина справљена са NaOH и KOH (8FAK). Две серије пасте справљене су на бази Портланд цемента. За потребе испитивања справљени су узорци $\varnothing 25 \times 50$ mm који су након справљања најпре неговани на амбијенталној температури у трајању од 24 h, након чега су били у премештени у комору и при контролисаним условима и температури од 95 °C очвршћавали су још 24 h. До почетка испитивања узорци су неговани у амбијенталним условима. Узорци су у трајању од 5 месеци били потопљени у сулфатни раствор: Na_2SO_4 , $MgSO_4$ и комбинацији Na_2SO_4 и $MgSO_4$ при концентрацији раствора од 5%. Испитивање отпорности на дејство сулфата вршено је праћењем чврстоће при притиску која је мерена пре почетка испитивања и након 30, 60, 90, 120 и 150 дана. За разлику од узорака који су справљени са Портланд цемента (и који су имали промене у смислу стварања белог филма око узорака и прслина на угловима узорака), аутор наводи да се на узорцима нису виделе физичке промене, као и да су изгледали идентично као и пре почетка испитивања. Промене у маси (табела 4.7) кретале су се до највише 5,3 % и то код узорака код којих је као активатор коришћен Na_2SiO_3 .

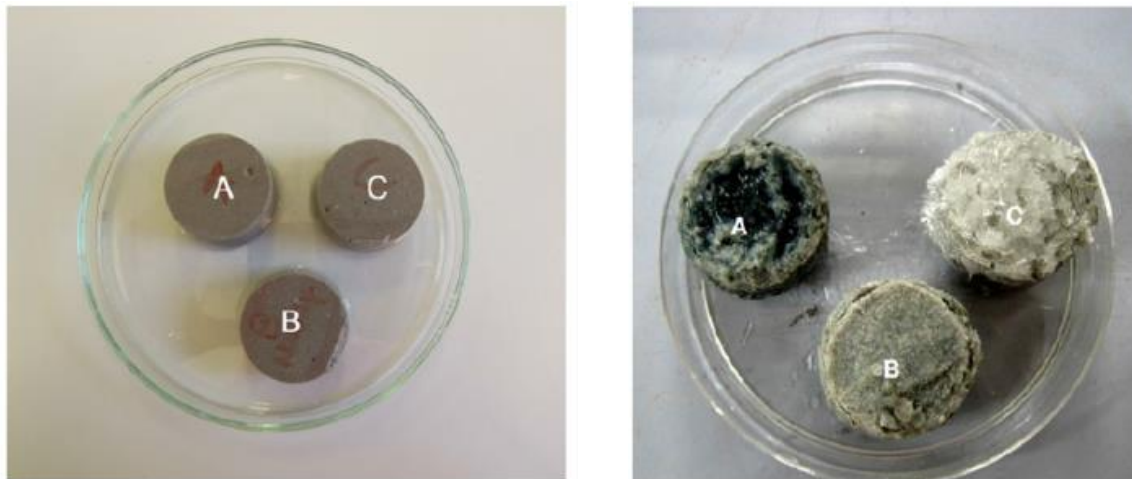


Табела 4.7 Промена масе узорака након излагања дејству сулфатног раствора [146]

Мешавина	5% Na ₂ SO ₄	5% MgSO ₄	5% Na ₂ SO ₄ 5% MgSO ₄
	%		
8FA	3,1	1,4	2,1
8FASS	4,7	5,3	0,4
8FAK	1,3	-1,02	1,5
OPC	3,2	6,16	9,1
OPC+FA	2,35	3,17	7,3

Код узорака који су потапани у раствор Na₂SO₄ измерено је смањење чврстоће при притиску, и то за 18 % код мешавина ознаке 8FASS и за 65 % код мешавина ознаке 8FAK. Код узорака ознаке 8FA и 8FAK који су потапани у раствор MgSO₄ измерен је пораст чврстоће при притиску од 12 и 35 %, респективно. На мешавини 8FASS измерено смањење чврстоће и оно је износило 24 %. Аутори сматрају да су се најзначајније промене десиле на узорцима који су потапани у раствор Na₂SO₄, а промене настале том приликом повезују са испуштањем алкала у раствор. Код узорака који су потапани у раствор MgSO₄ испуштање алкала у раствор и продор магнезијума и калцијума десило се испод површине узорака. На крају, најмања промена чврстоће измерена је код узорака који су потапани у комбиновани раствор MgSO₄ и Na₂SO₄. Узорци који су справљени са NaOH показали су се као најотпорнији на дејство сулфата, а њихову отпорност аутори објашњавају помоћу стабилности структуре. Као крајњи закључак може се навести да потапањем геополимерних узорака у раствор настају мање промене у погледу промене чврстоће при притиску геополимера него узорака справљених са Портланд цементом. Ismail и други [145] испитивали су микроструктуралне промене геополимерних пасти различитих водовезивних фактора (0.4, 0.5 и 0.6) које су биле изложене дејству сулфата. Паста справљена са највећим водовезивним фактором (0.6) је испитивана у циљу одређивања утицаја садржаја воде на трајност геополимера. Испитиване мешавине справљене су при односу електрофилтерског пепела и згуре 1:1. Узорци су до достизања старости од 28 дана неговани у амбијенталним условима, а након тога су трајању од 3 месеца били потопљени у сулфатни раствори MgSO₄ и Na₂SO₄ концентрације 5 %. Као резултат испитивања, аутори су довели у корелацију водовезивни фактор и деградацију насталу дејством сулфата. Нижи водовезивни фактор резултира већом отпорношћу

пасте на спољашње дејство сулфата. Промене настале на пастама су присутније када су оне уроњене у раствор $MgSO_4$ него у раствор Na_2SO_4 (Слика 4.11).



Слика 4.11 Физичке промене на узорцима справљеним са различитим водовезивним факторима: $A = 0.4$, $B=0.5$ и $C=0.6$ након потапања у 5% раствор Na_2SO_4 (лево) и $MgSO_4$ (десно) у трајању од 90 дана [145]

Комлјеновић и други [142] су испитивали утицај спољашњег дејства сулфата на механичке карактеристике геополимерног и цементног малтера. Испитивање је спроведено према препорукама из извештаја CEN/TR 15697. Узорци су у трајању од 90 дана били потопљени у 5% раствор Na_2SO_4 . Аутори наводе да је сулфатни раствор утицао на смањење чврстоће при притиску цементног малтера справљеног са CEM II/A-S 42.5N, али не и на чврстоће алкалима активираним материјала справљеног са додатком згуре. Код малтера справљеног са згуром измерена је већа отпорност на дејство сулфата у односу на цементни малтер. Однос чврстоћа малтера измерених након потапања узорак у сулфатни раствор и референтних узорак истог састава био је већи од 1. Резултате испитивања аутори објашњавају одуством портландита и алуминијума, у C–S–H гела и хидроталцитног гела, који су потребни за реакцију са сулфатима. Дџупузовић и други [147] су испитивали утицај 5 % раствора Na_2SO_4 на карактеристике геополимерног малтера справљеног на бази електрофилтерског пепела и гранулисана згуре. До старости од 28 дана узорци су амбијентално неговани, затим су 180 дана били потопљени у сулфатни раствор. Као и код Комлјеновић и други [142] однос чврстоће малтера који је био потопљен у 5 % раствор натријум сулфата и референтних узорак истог састава и старости био је већи од 1. Ваšаревић и други [148] су испитивали геополимерне малтере справљене са електрофилтерским пепелом пореклом из



термоелектрана „Свилајинац“ и „Костолац“. Малтер је справљен са Na_2SiO_3 (модула Ms 1,5), садржајем 10 % Na_2O у односу на масу електрофилтерског пепела, а однос песка и електрофилтерског пепела био је 1/3. За справљање је коришћен електрофилтерски пепео ситнији од 43 μm . Узорци су након справљања неговани при температури од 95 °C у трајању од 24 h. Након достизања старости од 28 дана изложени су дејству Na_2SO_4 (концентрације 50 g/l Na_2SO_4) у трајању од 365 дана. Аутори закључују да раствор Na_2SO_4 на узорке делује попут активатора, а не као агресивно средство. Сулфатни раствор омогућава несметани наставак акалне активације. Такође, већа чврстоћа при притиску измерена је на малтерима на бази електрофилтерског пепела веће порозности. До сличних резултата дошли су и Bakharev и други [149]. Они су спровели испитивање отпорности дејство сулфата на алкалима активираним бетоном справљеном са згуром и на серији еталон бетона справљеном са Портланд цементом. Узорци су у трајању од 12 месеци били изложени дејству 5 % раствора MgSO_4 и Na_2SO_4 . На испитиваним узорцима није дошло до ширења, али су уочене промене попут прелина и видљиви трагови гипса. На основу резултата добијених испитивањем, аутори закључују да је да су чврстоће узорака алкалима активираним бетоном и Портланд цементног бетона који су били потопљени у раствор MgSO_4 мање за 23 % и 37 %, респективно. Међутим, на узорцима алкалима активираним бетоном који су у трајању од 12 месеци били потопљени у раствор Na_2SO_4 измерен је прираст чврстоће од 17 %. При поменутих условима испитивања, на бетону справљеном са Портланд цементом пораст чврстоће био је 25 %. Позитивно дејство сулфатне средине на пораст чврстоће на узорке геополимерног бетона који су амбијентално очвршћавали наводе и Chindaprasirt и Chalee [150]. Након излагања узорака бетона теренским условима (морској води) у трајању од 3 године измерена је чврстоћа при притиску и упоређена је са резултатима испитивања узорака старости 28 дана који нису излагани дејству сулфата. Однос чврстоћа при притиску узорака који су били изложени дејству сулфата у трајању од три године и чврстоће при притиску узорака старости 28 дана који нису излагани дејству сулфата износио је 107,3 % до 126,1 % (при концентрацији NaOH 8 до 18 M при кораку концентрације од 2 M). Утицај дејстава сулфата на геополимерне бетоне на бази електрофилтерског пепела који су неговани при температури од 60 °C у трајању 24 сата испитивали су и Wallah and Rangan [55]. Узорци облика цилиндра димензија 100 × 200 mm су затим потопљени у 5 % раствор Na_2SO_4 у трајању од једне године. У оквиру овог испитивања праћене су промена масе, промена дужине и чврстоћа при притиску узорака који су били потопљени у сулфатни раствор.



Према резултатима испитивања, узорци геополимерног бетона показали су добру отпорност на спољашње дејство сулфата. На узорцима није било видљивих промена у смислу површинске ерозије, прслина или пукотина. Промене дужине биле су незнатне и мање од 0,015%.



5. ИНДУСТРИЈСКИ НУСПРОИЗВОДИ КАО ВЕЗИВНИ МАТЕРИЈАЛИ ЗА СПРАВЉАЊЕ ГЕОПОЛИМЕРА

Убрзан индустријски развој, ужурбана урбанизација и потрошачки оријентисано друштво и др. узрок су значајних негативних последица на животну средину и здравље људи. Један од главних елемената деградације животне средине је непрестано стварање све веће количине комуналног, индустријског, грађевинског и др. врсти отпада. Константно повећање отпада ствара све веће оптерећење на постојеће системе управљања и животну средину. Настављање оваквог тренда доводи у питање основне принципе одрживог развоја [151]

5.1 Отпад – дефиниција и подела

Једна од дефиниција отпада је: „Отпад може да се дефинише и као сировина која се налази на погрешном месту или роба која има позитивну или негативну тржишну вредност“. Под отпадом се подразумева било какав материјал или предмет који може настати приликом производње, након искључења из употребе или да се према тврдњама корисника не може даље употребљавати. Једноставно је закључити, отпад је најчешће гомила бескорисног материјала која се најчешће претвара у смеће ако се при депоновању са њим не поступа на адекватан начин [152]. Чињеница да се 90% количине отпада, након примене различитих метода и технологија, може поново вратити на тржиште уз економску корист, последњих година доводи до пораста еколошке свести људске популације [153].

Општа подела отпада може се извршити према месту настанка, саставу и токсичности отпада: [152][154]:

Подела према месту настанка, отпад се дели на:

- комунални,
- индустријски,
- грађевински,
- медицински,
- амбалажни,



- пољопривредни и баштенски,
- муљеви, талози, пепео, шљака...

Подела према својствима отпада:

- инертни отпад (Отпад који не садржи елементе који су подложни физичкој, хемијској или биолошкој разградњи. Ова врста отпада не угрожава околину.)
- опасни отпад (Отпад који може бити експлозиван, запаљив, токсичан, реактиван, канцероген, мутаген итд.).

Подела према могућности трансформисања:

- материјали који су биолошки трансформабилни (органски део отпада папири, картон, храна),
- материјали који су хемијски трансформабилни (метални делови или други хемијски производи који се могу трансформисати услед процеса оксидације),
- материјали који су физички трансформабилни (отпад који је услед ветра, сунца или атмосферских утицаја могуће трансформисати. У ову групу спадају стакло, керамика, шљака...),
- материјали који нису трансформабилни (у ову групу спада пластика која није биоразградива).

Веза између неких врста отпадних материјала и грађевинских материјала успешно се може успоставити помоћу геополимера. Реч је о отпадним индустријским материјалима попут електрофилтерског пепела, згуре из високе пећи, конверторска (челичанска) згура, пепела из дрвне биомасе, црвеног муља и отпадног стакла. У наредном тексту биће речи о настанку ових индустријских нуспроизвода и могућностима њихове примене.

5.2 Електрофилтерски пепео

Нуспроизводи који се могу користити као везивни материјали за справљање геополимерних мешавина су многобројни и настају у многим гранама тешке и лаке индустрије. Најчешће коришћени индустријски нуспроизвод је електрофилтерски пепео, а за то има неколико битних разлога: доступан је у великим количинама, користи се у облику какав јесте, и може се активирати алкалијама [155]. Електрофилтерски пепео се дефинише као фини прах добијен електростатичким или механичким таложењем прашкастих честица из димних гасова пећи ложених спрашеним угљем. Пепео добијен другим методама не сме бити употребљаван за справљање цемента [156]. У Србији се



око 65 % укупне електричне енергије производи у термоелектранама које сагоревају угаљ. Сагоревање угља за последицу има стварање емисију штетних гасова попут SO_x , NO_x , CO_2 , настанак отпадних вода и чврсти отпад [155]. Угаљ стада у групу минералних сировина и чине га сагориви и несагориви део. Сагориви део угља чине чврсте органске супстанце и волативи, док се несагориви део састоји из воде односно влаге и пепела. Жарењем угља и издвајањем несагоривог дела добија се материјал који чини 85 % до 95 % електрофилтерског пепела и око 10 % шљаке односно око 6 милиона тона генерисаног електрофилтерског пепела и 500 – 600 хиљада тона шљаке годишње. Пепео настао индустријском производњом може се поделити на три основне врсте у то [157]:

- Шљаку која се таложи на дну котлова (bottom ash);
- Котловски пепео (boiler ash) се из котла издваја помоћу димног гаса али због величине самих честица не досеже до електрофилтера, већ се гравитацијски таложи испод канала димног гаса, и
- Електрофилтерски пепео (fly ash) је пепео који се помоћу димног гаса преноси до електрофилтера, који су саставни део система термоелектране.

Електрофилтерски пепео настаје при температурном опсегу од 1250 °C до 1600 °C при чему долази до сагоревања угљене прашине присутне у угљу, а чији се део током сагоревања трансформише и формира у материјал аморфне структуре [158]. Овако генерисани пепео спада у групу инертног неопасног енергетског отпада [155].

Честице електрофилтерског пепела су обично финије од честица Портланд цемента, сферичног су облика и димензија 10 до 100 μm . Садржај оваквих честица обично повољно утиче на флуидност и уградљивост свежих мешавина. Боја електрофилтерског пепела у вези је са губитком при жарењу, хемијским и минеролошким карактеристикама пепела па може да варира од светле до тамно сиве. Процентуални садржај хемијских једињења у електрофилтерском пепелу може се битно разликовати у зависности од врсте сагореваног угља [159][160]. Стога, у табели 5.1. дат је оквирни садржај хемијских једињења електрофилтерског пепела насталог сагоревањем битуменизираног угља, делимично битуменизираног угља и руде лигнита. Садржај силицијума најчешће је у границама од 40 до 60%, а алуминијума 20 до 30 %. Процентуални садржај гвожђа није могуће предвидети [163].



Табела 5.1 Процентуални садржај хемијских једињења електрофилтерског пепела у односу на врсту употребљеног угља [159]

Параметар	Битуменизирани угаљ	Делимично битуменизирани угаљ	Лигнит
	%		
SiO ₂	20 - 60	40 - 60	15 - 45
Al ₂ O ₃	5 - 35	20 - 30	10 - 25
Fe ₂ O ₃	10 - 40	4 - 10	4 - 15
CaO	1 - 12	5 - 30	15 - 40
MgO	0 - 5	1 - 6	3 - 10
SO ₃	0 - 4	0 - 2	0 - 10
Na ₂ O	0 - 4	0 - 2	0 - 6
K ₂ O	0 - 3	0 - 4	0 - 4
Губитак жарењем	0 - 15	0 - 3	0 - 5

Електрофилтерски пепео има пуцоланска својстава, а његов основни састав чине SiO₂ и Al₂O₃. Захтеви које електрофилтерски пепео треба да задовољи у погледу хемијског састава дефинисани су стандардима EN 450-1 [156] и ASTM C618 [161] и представљени су у табели 5.2. Према захтевима из оба стандарда, силикатни пепео тј. пепео „класе F“, треба да има велику процентуалну заступљеност SiO₂, Al₂O₃ и Fe₂O₃ у односу на масу пепела (већу од 70 %). Овакав материјал могао би да има висок степен реактивности и као такав могао би бити погодан за справљање геополимерних композита. Процентуални садржај Са у односу на масу пепела битно утиче на карактеризацију пепела, па се његовом садржају стандардом EN 450-1 може сврстати у силикатне или калцијумске пепеле. Процентуални садржај СаО у односу на масу пепела није дефинисан стандардом ASTM C618. Губитак жарењем, који представља задржану количину угљеника услед температурног третмана, је мало строжије дефинисан стандардом EN 450-1 [156] и износи 5 %, док се стандардом ASTM C618 [161] захтева да он буде мањи 6 %. Такође, према стандарду SRPS 197 - 1 [162] један од могућих додатака који се користи при производњи цемента је електрофилтерски пепео. По природи може да буде силикатно-алуминатни или силикатно-калцијумски. Силикатно-



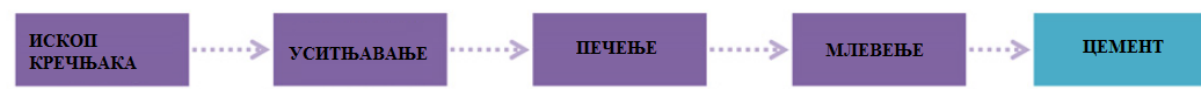
алуминатни пепео поседује пуцоланска својстава, док силикатно-калцијумски мора да има и хидрауличне особине.

Табела 5.2 Захтеви које електрофилтерски пепео треба да испуни према стандардима EN 450-1 и ASTM C618

EN 450-1	ASTM C 618
<p>Силиканти пепео - низак садржај Са</p> <p>$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$ $\text{CaO} \leq 10\%$ $\text{SiO}_2 \geq 25\%$ SO_3 – мање од 3 % Губитак при жарењу: мање од 5%</p>	<p>Класа F – низак садржај СаО - кисели пепео</p> <p>$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$ CaO – није дефинисано X Губитак при жарењу: мање од 6% Остатак на сити 45 μm: мање од 34 %</p>
<p>Калцијумски пепео - висок садржај Са</p> <p>$\text{CaO} \geq 10\%$ $\text{SiO}_2 \geq 25\%$ уз услов да је СаО у границама 10-15 % Губитак при жарењу: мање од 5 %</p>	<p>Класа C - висок садржај СаО -алкални пепео</p> <p>CaO – није дефинисано $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$ X SO_3 – мање од 5 % Губитак при жарењу: мање од 6% Остатак на сити 45 μm: мање од 34 %</p>

Електрофилтерски пепео спада у групу вештачких пуцолана, а силицијум диоксид садржан у материјалу реагује са калцијум хидроксином из цемента (услед хидратације). Оваква мешавина за последицу има стварање C–S–H гела. Сферни облик честица пепела повољно утиче на обрадљивост, а уједно има и улогу пуниоца (услед мале финоће млива). Према Neville [164] за справљање бетона чији састав чине Портланд цемент и електрофилтерски пепео, процентулни садржај пепела у мешавини не може бити већи од 30 %. За разлику од цемента, чији је поступак припреме за употребу доста комплексан и захтева употребу природних материјала (слика 5.1 а), припрема електрофилтерског пепела је једноставна (слика 5.1.б).

а)



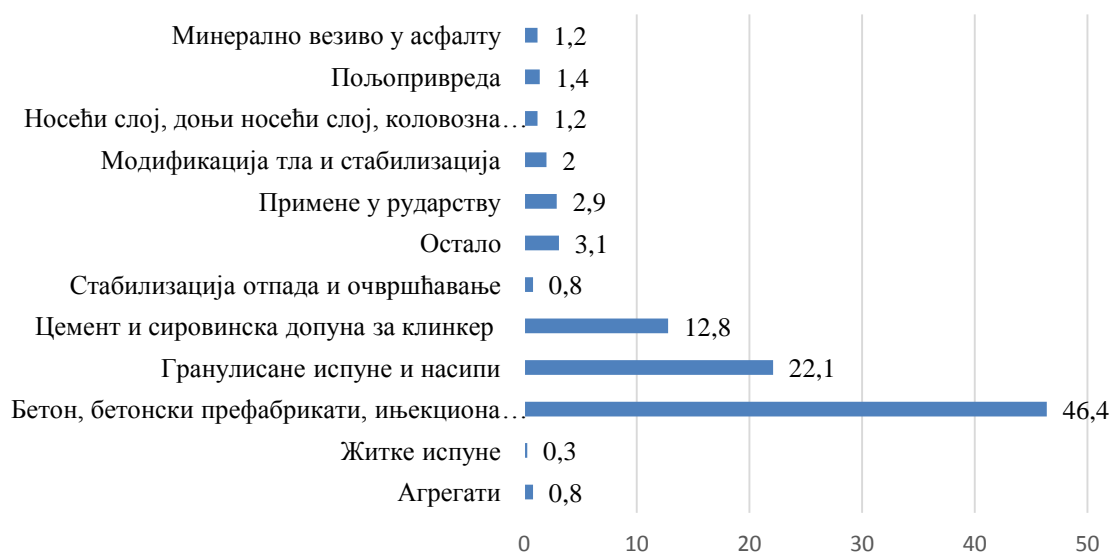
б)



Слика 5.1 Производња а) цемента, б) електрофилтерског пепела [20]

Светско тржиште је препознало добра својства електрофилтерског пепела па се осим за справљање цемента користи и при капсулирању депонија и др. [165][166]. Према подацима из 2006. године, близу 32,4 милиона тона електрофилтерског пепела било је искоришћено за справљање нових грађевинских производа, а највећи степен искоришћења био је у производњи бетона и других бетонских префабриката [159]. На слици 5.2 је дат дијаграм искоришћења електрофилтерског пепела из 2006. године.

Неки од доступних података показују да се за производњу електричне енергије у Србији годишње потроши око 35 милиона тона угља (податак из 2010. годину) [155].



Слика 5.2 Искоришћење електрофилтерског пепела у САД током 2006. године [159]



5.3 Гранулисана згура високе пећи

Гранулисана згура високе пећи (шљака или троска) је обавезни нуспроизвод који настаје при производњи гвожђа. Приликом производње гвожђа кроз врх високих пећи врши се убацивање руде гвожђа, кокса и кречњака. Сирово гвожђе и шљака настале услед температурног третмана ваде се са дна пећи и излажу процесу хлађења. Том приликом се згура, која је пливала у сировом гвожђу, издваја и гранулира у зрна клинкерског облика. Даље се течна згура из пећи преводи у гранулацијску комору где се испира. Након завршеног третмана згура се депонује. Згура добијена овим процесом треба да садржи најмање две трећине стакласте згуре која има хидрауличка својства [167]. За добијања тоне квалитетног сировог гвожђа, потребно је око 1,6 тона сировог материјала, 330 kg кокса и 150 kg кречњака. Оваквом размером ствара се око 230 kg до 300 kg згуре [147]. Према садржају CaO и Al₂O₃ згура се може дефинисати као базна, неутрална или кисела. Код базне згуре садржај CaO и Al₂O₃ износи најмање 50 %, док остатак процентног садржаја материјала већим делом чини SiO₂. У садржају згуре која се дефинише као кисела садржај CaO и Al₂O₃ је мањи од 50 %, док остатак чини SiO₂ [167].

Стандардом SRPS EN 15167-1:2010 [168] дефинишу се физичка и хемијска својства које млевена гранулисана згура треба да задовољи да би се употребљавала за справљање бетона, малтера и ињекционих маса. Према захтевима из стандарда, најмање две трећине масе гранулисане згуре високе пећи треба да чини CaO+MgO и SiO₂, док остатак треба да чини Al₂O₃ и друга једињења. Такође, масени однос (CaO+MgO)/SiO₂ треба да буде већи од 1.

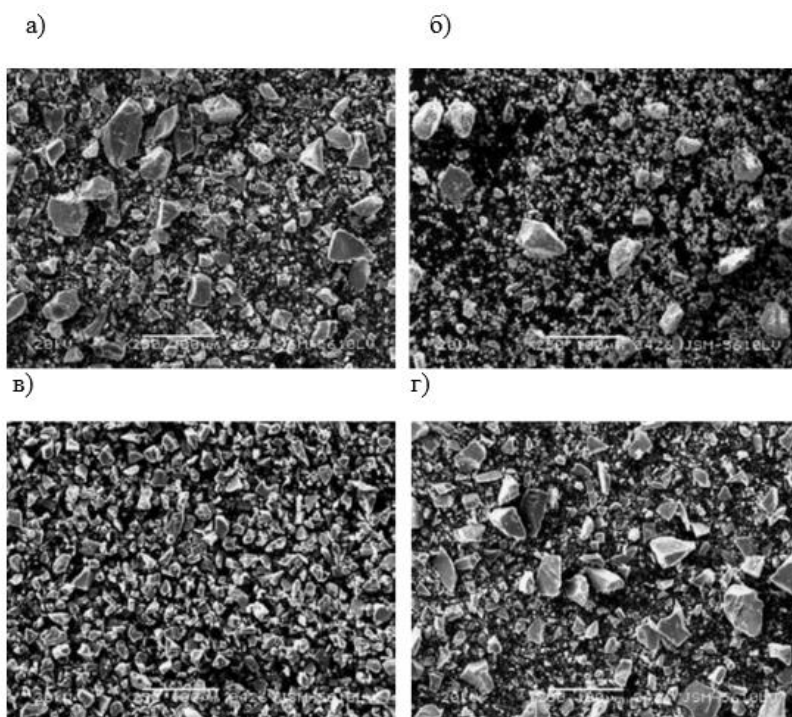
Према другим критеријумима, гранулисану згуру је могуће ближе дефинисати помоћу коефицијента K_b. Он је једнак односу поцентуално - масеног садржаја (CaO+MgO)/(SiO₂+Al₂O₃). Према вредности коефицијента K_b згура високе пећи се може дефинисати као кисела (K_b < 1), неутрална (K_b = 1) или базна кисела (K_b > 1) [169].

Изглед згуре високе пећи приликом депоновања дат је на слици 5.7, док је шема технолошког процеса настајања згуре високе пећи приказана на слици 5.10 (лево).



Слика 5.7 Изглед гранулисане згуре високе пећи приликом депоновања

Утицај технике припреме (уситњавање) гранулисане згуре из високе пећи истраживали су Wan H. И други [170]. Гранулисана згура из високе пећи уситњена различитим техникама добија и различиту микроструктуру зрна па су на слици 5.8. приказане SEM фотографије узорка згуре припремљене кугличним млином, вибро млином и ваздушним млином (слика 5.8 в). Првобитни облик и везе између атома и молекула су прекинуте. Зрна гранулисане згуре нису сферног облика већ се њихов облик мења у зависности од примењене технике уситњавања. Такође, не може се поставити никаква зависност између разломљених површина тј. страница по којима је извршен прелом великих зрна на мања. Узорци који су припремљени применом кугличног млина (слика 5.8 а и г) су неправилног облика, али јасно дефинисаних углова и ивица. Оваква микроструктура је последица трења између узорка и челичних кугли млина. За разлику од гранулисане згуре припремљене помоћу кугличног млина, узорак уситњен вибро млином (слика 5.8 б) састоји се из честица које су благо сферичног облика, глатке површине и углова. Овакав облика зрна гранулисане згуре последица је интеракција челичног цилиндра и челичног прстена који су саставни делови овог млина као и челичног прстена и зида посуде. На слици 5.8 в приказана је микроструктура узорка уситњеног помоћу ваздушног млина. Облик зрна налик је узорцима уситњеним кугличном млином, али се предност огледа у њиховој униформности у погледу облика и димензија. Ово је последица рада ваздушног млина који ради применом ваздуха велике брзине струјања, а активирани честице ударају у фиксни део млина што спречава настајање пулверизације између честица.



Слика 5.8 Изглед зрна (SEM) гранулисане згуре високе пећи уситњене а) кугличним млином б) вибро млином в) ваздушним млином г) кугличним млином [170]

5.4 Конверторска (челичанска) згура

Током процеса оплемењавања гвожђа тј. његовог превођења у челик, настају разни типови челичанских згура. Уопштено, челичанска згура настаје као нуспроизвод у процесу производње челика у погонима челичане, а тип згуре зависи од процеса, степена искоришћености рециклираних материјала, хемијског састава [4]. Уопштено, челичанска згура настаје током одвајања растањеног челика од нечистоће у пећима у којим се врши прерада челика [171]. Ова врста згуре настаје током процеса стварања челика током тзб. BOF процеса (у базично - кисеоничној пећи) где се врши претварање текућег гвожђа у челик, док се за претапање отпада користи тзв. EAF процес (у електролучној пећи) [172]. Током процеса у BOF пећи пуњење се врши текућим гвожђем, комадима и отпадом, који већ садрже CaO и високомагнезијумским кречом. При EAF процесу се не користе метали у врућем стању већ охлађена челична струготина и челични отпад [173]. Конвертор се састоји из графитних електрода повезаних на трансформатор за загревање челика, а по дну пећнице пролази цев са аргонским гасом који служи за хомогенизацију текућег челика. Током процеса врши се и одсумпоравање, приликом чега се садржај сумпора у челику може смањити до испод 0.0002 %. Као

нуспроизвод овог процеса настаје конверторска згура. Структура челичанске згуре зависна је од хемијског састава сировина и процеса хлађења. Богата је силицијумом, а услед поступка брзог хлађења формира стакласту структуру. Ипак, за разлику од гранулисане згуре високе пећи, челичанска згура има нижи садржај силицијума [174]. Tossavainen и други [175] су испитивали минеролошке и хемијске карактеристике BOF згуре, EAF згуре и конверторске згуре. Згуре су биле излагане различитим третманима хлађења. Наглим поступком хлађења структура конверторске згуре постала је скоро у потпуности аморфна. Применом истог поступка хлађења, структура згура из BOF и EAF процеса била је кристална. Таква структура одржана је и након примене поступка спорог хлађења. На слици 5.9. приказан је изглед конверторске згуре након депоновања, а шема настајања челичанских згура дата је на слици 5.10 (десно). Оквиран процентни садржај неких хемијских једињења у челичанским згурама дат у табели 5.3.



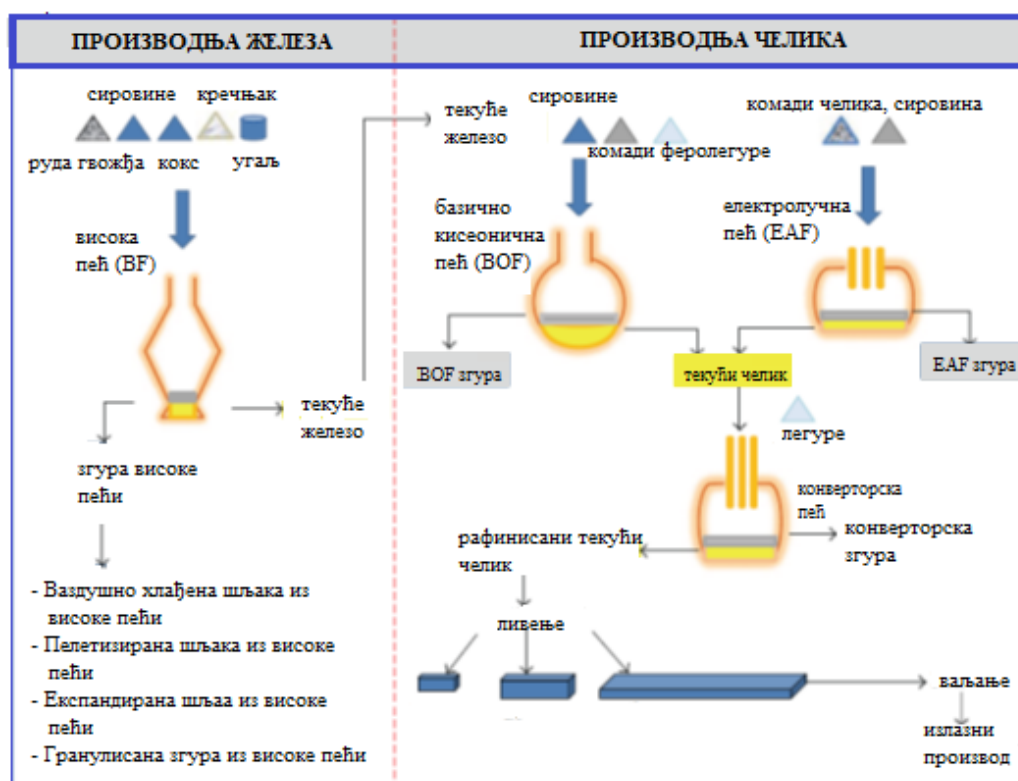
Слика 5.9 Изглед челичанске згуре након депоновања

Табела 5.4 Процентуални садржај хемијских једињења челичанских згура [173]

Параметар	Базично кисеонична згура	Електролучна згура	Конверторска згура
	%	%	%
SiO ₂	8 – 20	9 – 20	2 – 35
Al ₂ O ₃	1 – 6	2 – 9	5 – 35
FeO	10 – 35	15 – 30	0.1 – 15
CaO	30 – 55	35 – 60	30 – 60
MgO	5 – 15	5 – 15	1 – 10
MnO	2 – 8	3 – 8	0 – 5
TiO ₂	0.4 – 2	*	*
S	0.05 – 0.15	0.08 – 0.2	0.1 – 1
P	0.2 – 2	0.01 – 0.25	0.1 – 0.4
Cr	0.1 – 0.5	0.1 – 1	0 – 0.5

* непознато

Током једне године у свету се произведе више од 400 милиона тона гвожђа и челика. При производњи једне тоне челика генерише се од 200 kg до 400 kg отпада у виду згуре, прашине, муља и др. [176]. Од тога 10 kg до 80 kg чини конверторска згура [177]. У Србији се прерада и производња челика обавља у Смедереву. Том приликом настаје преко 1150000 тона индустријског отпада годишње. Половина отпадног материјала се враћа у производни процес, док остатак заједно са отпадном водом бива депонован [178]. Можућност примене челичанске згуре као агрегата за справљање бетона испитивале су Netinger и други [179]. Испитивање је вршено на армиранобетонским гредама, а на основу добијених резултата закључено је да се челичанска згура може употребљавати као агрегат за справљање армиранобетонских конструкција.

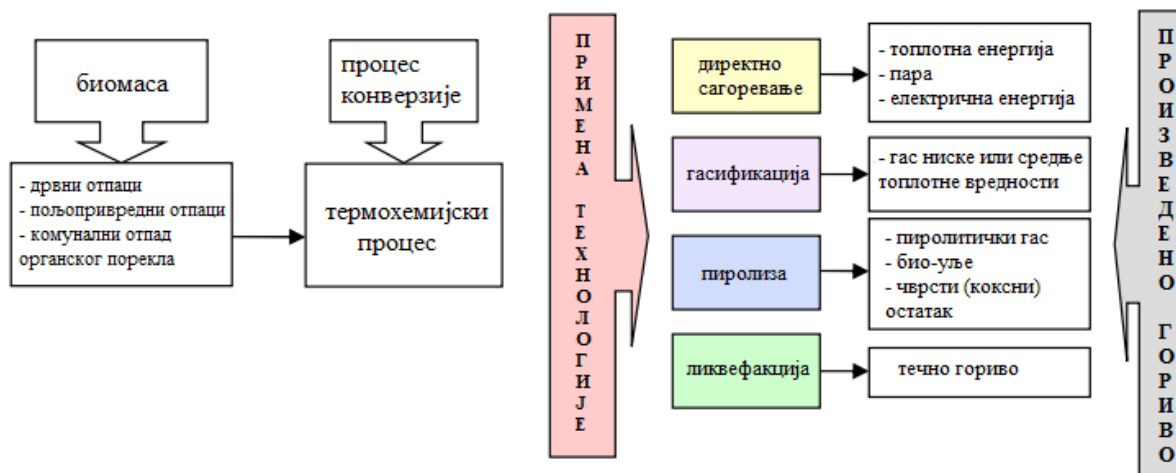


Слика 5.10 Технолошки процес настајања гранулисане згуре високе пећи (лево), технолошки процес настајања челичанске згуре (десно) [174]

5.5 Пепео дрвне биомасе

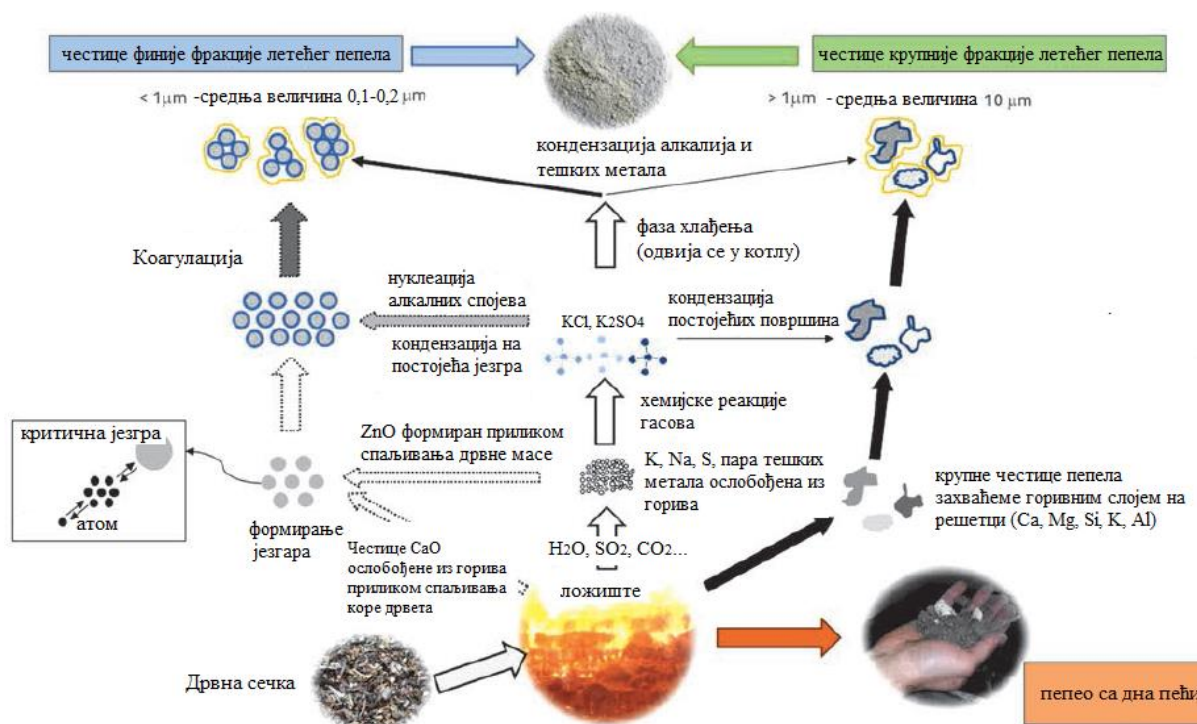
Постоји неколико метода за добијање горива од дрвета и отпадне биомасе. Према начину третмана методе се могу поделити на термохемијске, биохемијске и хемијске. Биохемијски и хемијски процеси подразумевају прераду биомасе под атмосферским

притиском, а за циљ имају производњу биогорива. Термохемијске методе подразумевају примену поступака сагоревања односно излагање енергента високој температури [180]. Термохемијске методе спадају у ред чешће примењивих метода, а поступак прераде биомасе овом методом приказан је на слици 5.11.



Слика 5.11 Термохемијски процеси прераде дрвне биомасе [180]

Квалитет биомасе врши се на основу података о врсти, пореклу, локацији узгоја, климатским условима у којима је биомаса одгајана и др. [181][182][183]. За покретање електране на биомасу потребна је квалитетна улазна сировина. Квалитет улазне сировине има директан утицај и на квалитет излазног производа, а у коначном и пепела дрвне биомасе [181][184]. Ложишта котлова код којих се биомаса користи као енергент могу бити: са сагоревањем на решетки (коса непокретна решетка, са континуирано покретном решетком опремљеном системом закретање напред - назад и вибрирајућа решетка), ложишта са сагоревањем у слоју и ложишта са системом за удубавање биомасе у комору за сагоревање [180]. Технологија сагоревања на ложишту решетке најчешће се примењује код постројења мале или средње величине. Шематски приказ настанка пепела применом методе сагоревања на решетки дат је на слици 5.12. Пепео од дрвне биомасе се према начину настанка делу на пепео са дна пећи (ложишни пепео) и летећи пепео. Летећи пепео се према финоћи честица може поделити на пепео крупније и финије фракције. На слици 5.13 приказан је изглед пепела из дрвне биомасе насталог у електрани „Bioenergy point“ у Бољевцу.



Слика 5.12 Шематски приказ стварања пепела током процеса сагоревања биомасе на решетци [181]



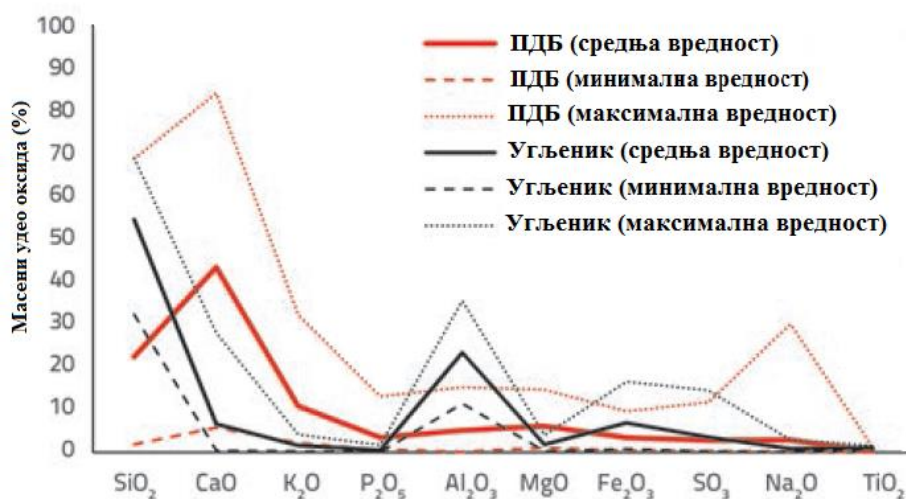
Слика 5.13 Пепео биомасе: пепео са дна пећи (лево), крупан летећи пепео (средина) и ситан летећи пепео (десно)

Количина и хемијски састав пепела дрвне биомасе у зависности је од коришћене биомасе и технологије обраде [185]. У производном постројењу пепео са дна пећи чини око 60 – 90 % укупно генерисаног пепела. Летећи пепео крупније фракције чини 2 % до 30 %, док летећи пепео ситније фракције чини 2 % до 15 % укупне масе пепела [181][186]. рН вредност пепела дрвне биомасе се током времена мења. До смањења рН вредност пепела може доћи три до четири недеље настанка, након чега је вредност она константна и креће се у опсегу од 12 до 13 [187]. Запреминска маса дрвног пепела из

биомасе креће се у границама од 101 kg/m^3 до 830 kg/m^3 . Садржај тешких метала у пепелу биомасе често може бити преко дозвољених граничних вредности. Стога је у табели 5.5 дат оквирни садржај тешких метала у дрвном летећем пепелу и пепелу са дна ложишта, а на слици 5.14 дате су оквирне вредности садржаја оксидних једињења у пепелу дрвне био масе и садржаја угљеника [188][189]. Према подацима појединих аутора, предвиђа се да ће земље чланице Европске уније у наредном периоду генерисати до 15500000 тона дрвог пепела из биомасе годишње [186].

Табела 5.5 Садржај тешких метала у пепелу са дна пећи и дрвном летећем пепелу [181]

Елем.	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	V	Zn
Пепео са дна пећи	0,2-3	0,4-0,7	0-7	>60	15-300	<0,4	2500-5500	40-250	15-60	10-120	15-1000
Летећи пепео	1-60	6-40	3-200	40-250	-200	0-1	6000-9000	20-100	40-1000	20-30	40-700



Слика 5.14 Пепео биомасе: пепео са дна пећи (лево), крупан летећи пепео (средина) и ситан летећи пепео (десно) [181]

5.6 Црвени муљ

Индустријском производњом се стварају разни еколошки ризици попут емисије штетних гасова, отпадних вода, настајања и одлагање нуспроизвода и др. Изузетак није ни металургија тј. производња алуминијума [190]. Прерада алуминијума може се вршити Бајеровим поступком или синтер поступком [191], а при оба процеса долази до стварања нуспроизвода у виду црвеног муља. Назив црвеног муља потиче од његових физичких карактеристика тј. црвене боје. Материјал у себи садржи велику количину гвожђа у оксидном облику [192]. Црвени муљ се може дефинисати као нуспроизвод индустријске производње алуминијума настао поступком прераде бокситне руде [193]. При производњи алуминијума он настаје као јаловина, а његов састав чине кварц, бемит, калцит, трикалцијумалуминат, хематит, гетит, натријум хидроксид, оксиди цинка и магнезијума, и др. Уопштено, различита морфологија и структура црвеног муља зависи од примењеног производног процеса који утиче на његове физичке и хемијске карактеристике. У односу на примењени процес, разликује се садржај воде у црвеном муљу, па она може да износи око 52,3 % услед примене Бајеровог поступка и око 37,5 % применом синтер поступак [191]. Изглед црвеног муља насталог Бајеровим поступком после филтрирања под притиском приказан је на слици 5.15 (лево), док је изглед црвеног муља након примене синтер поступка представљен на слици 5.15 (десно). Због повећања флуидности и лакшег цевоводног транспорта до депоније, генерисаном црвеном муљу додаје се индустријска вода [194]. Чврста фаза црвеног муља не сврстава се у опасан отпад што није случај и са алкалном течном фазом која услед депоновања и процеђивања доспева у подземне воде носећи са собом и висок садржај соде [195].



Слика 5.15 Изглед црвеног муља насталог: Бајеровим поступком после филтрирања под притиском (лево), након примене синтер поступка (десно) [191]



Хемијски састав црвеног муља варира у односу на примењени производни процес па је у табели 5.6 дат оквирни састав црвеног муља насталог Бајеровим поступком и синтер поступком. Садржај оксида силицијума и алуминијума чини црвени муљ материјалом погодним алакалним материјалом за справљање композита са цементном матрицом. Такође према појединим ауторима за формирање С-S-Н гела рН вредност црвеног муља требала би бити већа од 11.5 тј. не мања од 9.5. Граница рН 9.5 сматра се за доњу граница за несметано настајање процеса хидратације [193]. Црвени муљ се углавном састоји од финих честица, а на хемијски састав поред производног процеса може утицати врста употребљеног боксита. У зависности од производног процеса доминира садржај SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 и CaO . Садржај тешких метала узорка добијеног из претходно поменутих процеса дат је у табели 5.7. Уочљива је појава неколико опасних метала, међу којима се издвајају As, Pb, Hg, Cd и Cr. Према резултатима из поменуте табеле може се уочити да је садржај тешких метала у узорку добијеном Бајеровим поступком виши него код узорка добијеног синтер поступком [191].

Табела 5.6 Хемијски састав узорка црвеног муља добијеног Бајеровим поступком и синтер поступком [191]

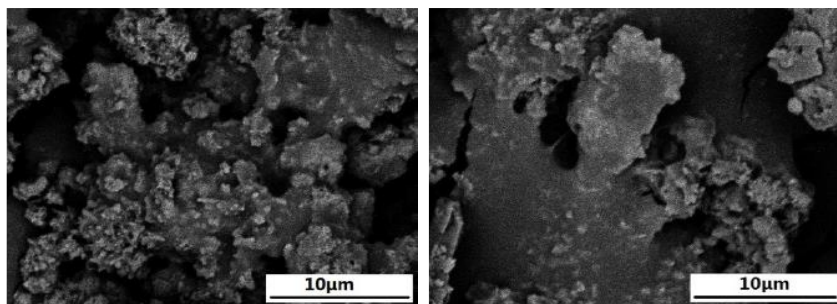
Параметар	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	Sc_2O_3	V_2O_5	Nb_2O_5	TiO_2	Na_2O	K_2O	Губитак жарењем
	%										
Бајеров процес	8,52	26,41	18,94	21,84	0,76	0,34	0,008	7,4	4,75	0,068	9,71
Синтер поступак	17,29	7,95	10,36	40,22	0,16	0,024	0,020	7,14	3,53	0,053	12,95

Табела 5.7 Садржај тешких метала узорка црвеног муља добијеног Бајеровим поступком и синтер поступком [191]

Параметар	As	Pb	Hg	Cd	Cr	Ba	Zn	Cu	Mn	Ni	Укупно
	%										
Бајеров процес	267,3	56,6	67,3	27,1	537,8	212,0	103,2	78,2	187,5	984,9	2521,9
Синтер поступак	246,7	48,0	58,7	14,4	416,9	197,2	76,3	213,6	146,3	578,6	1996,7

На слици 5.16 приказан је изглед зрна црвеног муља применом микроскопске SEM анализе. На слици 5.16 (лево) приказан је изглед зрна црвеног муља добијеног

применом Бејеровог поступка, док је на слици 5.16 (десно) приказан изглед зрна црвеног муља добијеног синтер поступком. Компаративна анализа узорака црвеног муља добијеног различитим поступцима производње алуминијума погодна је за лакше разумевање ових поступака припреме. Наиме честице добијене синтер поступком су груписане и нагомилане, док су честице црвеног муља добијене Бајеровим поступком разуђеније [191].



Слика 5.16 Изглед зрна (SEM) црвеног муља: Бејеров поступак (лево), синтер поступак (десно)[191]

Неке од тренутних процена су да се производњом једне тоне алуминијума генерише и депонује од 0,3 до 2,5 тона црвеног муља. Према подацима из 2016. године експлоатација боксита у свету досеже близу 270 милиона тона, а том приликом произведено је око 58 милиона тона алуминијума. То доводи до података да се на годишњем нивоу генерише више од 120 милиона тона црвеног муља [193]. Према подацима са наших простора у „Комбинату алуминијума“ у Подгорици се на годишњем нивоу произведе око 230 000 тона глинице. Ако се узме у обзир да при производњи једне тоне глинице настане око 1.21 сувог црвеног муља, долази се до количине од 278 300 тона црвеног муља годишње. При истом процесу депонује се и велика количина течне фазе која износи око 256 874 m³/годишње [194].

5.7 Отпадно стакло

Стакло је материјал који се добија сједињавањем кварцног песка, соде, калцијум карбоната, смоле и додатака за бојење и разбојавање. Процентуална заступљеност ових сировина није увек иста већ варира у зависности од очекиваног квалитета финалног производа, али и коришћених сировина. Највећи процентуални удео у сировинама чини кварцни песак са око 56 % учешћа, затим сода и калцијум карбонат са по 12 % док остатак чине смола и други додаци. До данас се у индустријској производњи стакло производило за различите намене попут: амбалажног стакла (тегле, посуде и др.), равног



стакла (прозорска стакла, ливена стакла, огледала и др.), стакла за светиљке, стаклена влакна, и стакла за специјалне намена /армирано стакло, каљено стакло и др.). Отпадно стакло спада у групу секундарних сировина које имају могућност да се рециклирају неколико пута. Ова могућност сврстава стакло у добар еколошки и одрживи материјал, јер се његовом рециклажом може смањити употреба природних сировина које су потребне за справљање новог производа. Тренутни подаци о рециклажи отпадног стакла говоре да су земље, нарочито на тлу Европске Уније, увиделе значај и могући квалитет рециклираног производа те је стопа рециклаже стакла у многим земљама преко 80 % (Белгија, Немачка, Аустрија и др.). Стање на тлу Балкана је доста другачије. Проблем рециклирања стакла у Србији потиче од лошег системског управљања овом врстом отпада иако се количина отпадног амбалажног и другог стакла непрекидно увећава [196], а подаци о количинама отпадног стакла које се тренутно рециклира нису доступни. Према студијама страних аутора, стакло спада у групу аморфних материјала, а просечан хемијски састав отпадног стакла (индустријског порекла и из урбаних средина) састоји се из:

- SiO_2 (65-75 %),
- CaO (6-12 %),
- Na_2O (12-15 %),
- Al_2O_3 (0.5-5%) и
- Fe_2O_3 (0.1-3 %).

Неке од могућности примене отпадног стакла у грађевинске сврхе је за справљање лаких материјала, цемент за справљање подземних грађевина, температурно отпорне материјале, приликом употребе радиоактивних и опасних материјала (за стабилизацију матрице) и др. сврхе. Погодности у примени отпадног стакла при справљању геополимера огледају се у могућности примене отпадног стакла као замене за натријум силикат (водено стакло) при алкалној активацији електрофилтерског пепела [197].



6. ПРЕТХОДНА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

Претходним експерименталним истраживањима је испитиван утицај финоће млива и коришћења хемијских додатака. Такође, испитиван је утицај режима неге на механичке карактеристике малтера. Неки од најважнијих резултата су публиковани и биће приказани у наставку.

6.1 Утицај финоће млива електрофилтерског пепела на карактеристике геополимерног малтера

Три серије малтера справљене су како би се одредио утицај финоће млива електрофилтерског пепела на конзистенцију и чврстоћу геополимерног малтера. Због тога је електрофилтерски пепео просејан кроз сита отвора 0.125 mm, 0.09 mm и 0.063 mm. У зависности од употребљене финоће млива, мешавине су означене као: „FA_{0.125}“; „FA_{0.09}“ и „FA_{0.063}“.

6.1.1 Састав мешавина, резултати испитивања и дискусија резултата

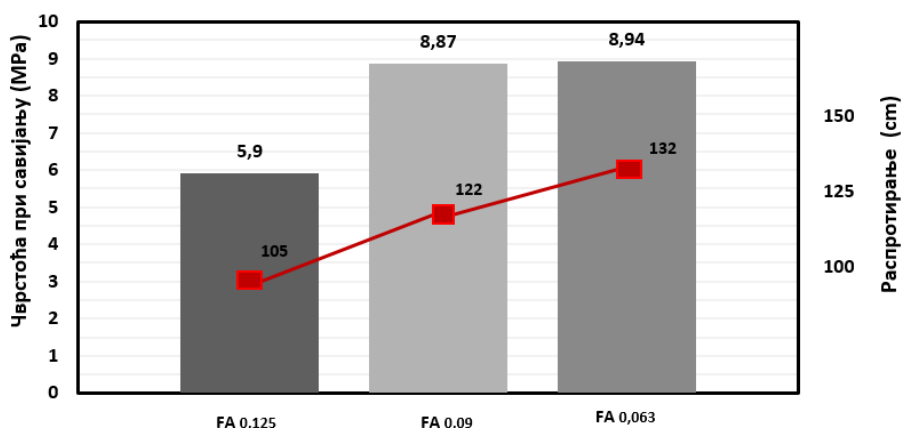
За справљање геополимерних малтера коришћен је речни агрегат пореклом из Јужне Мораве, са максималном величином зрна 2 mm. Мешавине су справљене при стандардном односом везиво : агрегат = 1 : 3. Течни раствори NaOH и Na₂SiO₃ помешани су у масеном односу 100:18,52 како би се створио јединствени активатор са садржајем 10 % Na₂O у односу на масу чврстог везива. Употребљени односи утицали су и на смањење модула Ms (SiO₂/Na₂O) до вредности од 1,5. За побољшање конзистенције додавана је вода у количини од 40 g. Однос течне и чврсте фазе био је исти за справљање све три геополимерне малтерске мешавине, а састав сваке малтерске мешавине приказан је у табели 6.1.

Након справљања мешавине су уграђене у металне калупе помоћу потресног стола, поклопљени стаклом, а спој метала и стакла је задихтован помоћу живе гуме. Овако припремљени узорци су најпре неговани на амбијенталној температури од 22 °C у трајању од 24 h, а затим на температури од 95 °C још 24 h. Узорци су затим извађени из калупа и до времена испитивања су неговани у амбијенталним условима. Утицај

различите финоће млива електрофилтерског пепела на уградљивост и чврстоћу при савијању и чврстоћу при притиску дат је на Сликама 6.1 и 6.2, (респективно).

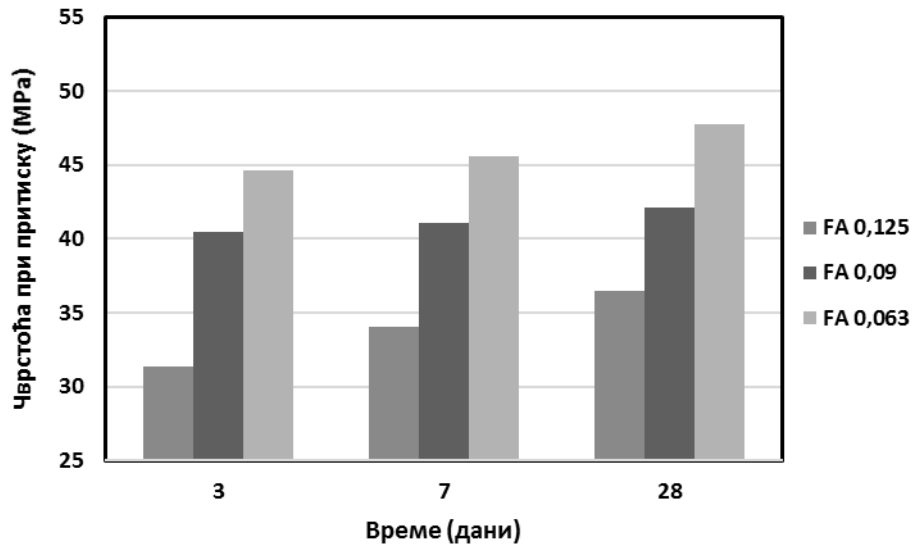
Табела 6.1 Састав малтерских мешавина коришћених за одређивање оптималне финоће млива

Ознака мешавине	Количине употребљеног материјала			
	Електрофилтерски пепео		Песак	Вода
	[g]	Величина честица [mm]	[g]	[g]
FA 0.125	450	< 0,125	1350	40
FA 0.090	450	< 0,09	1350	40
FA 0.063	450	< 0,063	1350	40



Слика 6.1 Утицај различите финоће млива електрофилтерског пепела на конзистенцију и чврстоћу при савијању геополимерног малтера старости узорака 3 дана

Конзистенција геополимерног малтера одређена је према стандарду SRPS EN 13395-1:2010 [198] којим се одређује обрадљивост тиксотропијских малтера применом методе распростирања на потресном столу. Све испитиване малтерске мешавине имају круту конзистенцију (распростирање је мање од 140 mm). Најмању вредност распростирања има мешавина FA 0.125 (105 mm), док највећу вредност има мешавина FA 0.063 (132 mm). Резултати испитивања конзистенције геополимерног малтера показују да се са повећањем финоће млива повећава флуидност малтерских мешавина.



Слика 6.2 Утицај различите финоће млива електрофилтерског пепела на чврстоћу при притиску геополимерног малтера

Експерименталним испитивањем утврђене су савојне и притисне чврстоће геополимерних мешавина. Чврстоћа при савијању се мења са променом финоће млива електрофилтерског пепела. Најмања чврстоћа при савијању измерена је на малтерској мешавини ознаке „FA_{0.125}“ и износи 5,9 МПа. Са повећањем финоће млива електрофилтерског пепела повећавају се и чврстоће при савијању малтера. Ипак, чврстоће при савијању узорак ознаке „FA_{0.09}“ и „FA_{0.063}“ су приближно једнаке и износе 8,87 МПа и 8,94 МПа, респективно. Вредности чврстоће при притиску малтера расту с порастом старости малтера. Измерене вредности чврстоће при притиску малтерских мешавина ознака „FA_{0.063}“ и „FA_{0.09}“ при старости малтера од 28 дана износиле су 47.81 МПа и 42.08 МПа (респективно) док је код мешавине „FA_{0.125}“ чврстоћа при притиску износила 36.43 МПа.

Према резултатима испитивања узорак који су термички активирани може се закључити да је преко 90 % вредности чврстоћа остварено већ при старости узорак од 3 дана. Посматрано са аспекта чврстоће, ниже цене коштања финалног производа и смањења количина отпадног материјала (који је без најситнијих фракција готово неупотребљив), усвојена финоћа млива за наредна експериментална испитивања је 0,09 mm.



6.2 Утицај додавања суперпластификатора на механичке карактеристике геополимерног малтера

У циљу побољшања конзистенције геополимерних малтерских мешавина испитиван је утицај додатака за бетон тј. хемијских адитива. Коришћени су суперпластификатори комерицијалних назива Sika 5380 и BASF Glenium master 770. Према проспекту произвођача „Sika ViscoCrete 5380“ [199] се дефинише као додаток бетону тј. суперпластификатор за справљање висококвалитетних бетона. Адитив се базира на поликарбоксилатним полимерима, без садржаја хлорида, и погодан је за справљање бетонских смеша. Утиче на повећање почетних и крајњих чврстоћа, и омогућава редукуцију воде. Погодан је за справљање бетона са високим захтевима за слегањем и ниским водоцементним фактором (< 0.50). Дозира се у распону 0,3 до 2 % у односу на масу везива. Према проспекту произвођача, „BASF Glenium master 770“ [200] се дефинише као додаток тј. суперпластификатор погодан за справљање монтажних бетонских елемената. Адитив се базира на поликарбоксилатима. Физичке и хемијске карактеристике коришћених суперпластификатора дати су у табели 6.2.

Табела 6.2 Физичке и хемијске карактеристике суперпластификатора

Адитив	Густина на 20 °C g/cm ³	pH	Препоручена доза	Хемијска база	Укупан садржај јона хлорида	Боја
Sika ViscoCrete 5380	1,08 ± 0,02	5,0 ± 1	0,3 – 2,0 % по маси везива	Водени раствор поликарбоксилатних полимера	Не садржи хлориде	Тамно жута
BASF Glenium master 770	1,033 – 1,073	-	0,7 – 1,2 % по маси везива	Водени раствор поликарбоксилатних полимера	Не садржи хлориде	Тамно сива

6.2.1 Састав мешавина, резултати испитивања и дискусија резултата

Три серије малтера справљене су како би се одредио утицај додавања суперпластификатора на конзистенцију и механичке карактеристике малтера. Као везивни материјал коришћен је електрофилтерски пепео финоће мање од 0,09 mm. Малтерска мешавина у којој је као хемијски додаток коришћен адитив Sika ViscoCrete 5380 названа је „FA S“, док је малтерска мешавина у којој је као хемијски додаток коришћен адитив BASF Glenium master 770 названа „FA B“. При справљању



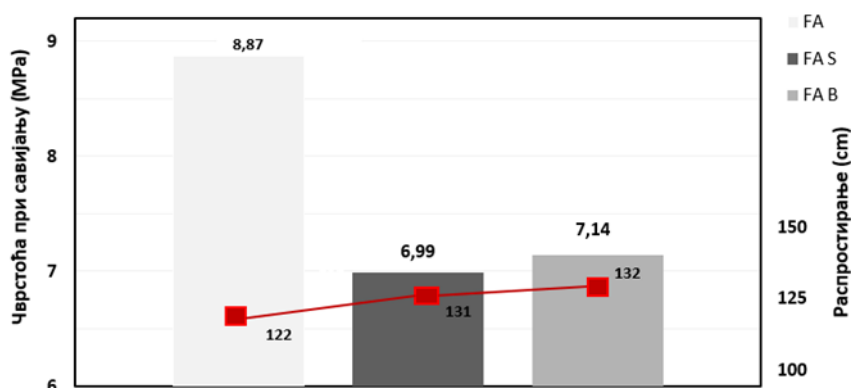
геополимерног малтера поштоване су препоруке из проспекта произвођача везане за максималну количину адитива у односу на масу везива. Стога је количина адитива употребљеног адитива била 2 % код малтера названог „FA S“, и 1,2% код малтера названог „FA B“. Малтерска мешавина која је служила као еталон мешавина справљена је без додатка адитива.

При справљању геополимерног малтера са додатком суперпластификатора најпре је сједињен електрофилтерски пепео са течним растворима и суперпластификатором. Течни раствори NaOH и Na₂SiO₃ помешани су у масеном односу 100:18,52 како би се створио јединствени активатор са садржајем 10 % Na₂O у односу на масу чврстог везива и модула Ms (SiO₂/Na₂O) 1,5. Мешавине су справљене при стандардном односу везиво : агрегат = 1 : 3. Узорци су најпре очвршћавали на амбијенталној температури од 22 °C у трајању од 24 h, а затим на температури од 95 °C за још 24h. Састав мешавина приказан је у табели 6.3.

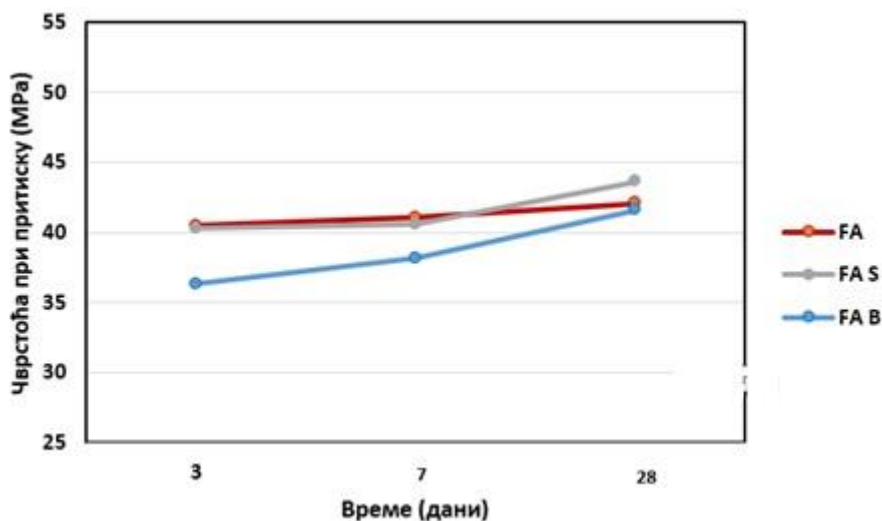
Табела 6.3 Састав малтерских мешавина

Ознака мешавине	Количине употребљеног материјала				
	Хемијски додаток		Електрофилтерски пепео	Песак	Вода
	Врста	%	[g]	[g]	[g]
FA	-	-	450	1350	40
FA S	Sika ViscoCrete 5380	2	450	1350	40
FA B	BASF Glenium master 770	1,2	450	1350	40

Утицај суперпластификатора на конзистенцију и чврстоћу при савијању и чврстоћу при притиску геополименог малтера на бази електрофилтерског пепела дат је на сликама 6.3 и 6.4, (респективно), док је изглед узорака малтера након испитивања приказан на слици 6.5.



Слика 6.3 Утицај суперпластификатора на конзистенцију и чврстоћу при савијању геополимерног малтера при старости узорака од 3 дана



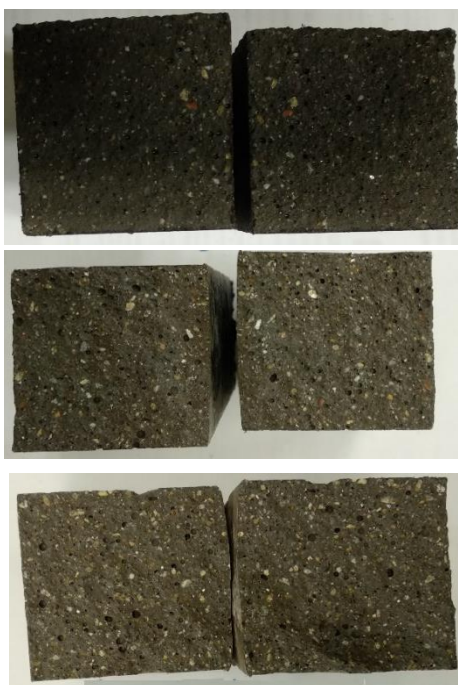
Слика 6.4 Утицај суперпластификатора на чврстоћу при притиску геополимерног малтера на бази електрофилтерског пепела

Посматрајући дијаграм конзистенције геополимерног малтера, уочава се да је најмање распорстирање измерено код мешавине „FA“ (122 mm). Код мешавине са додатком суперпластификатора FA B“ распорстирање је износило 132 mm и приближно је једнако вредности мешавине „FA S“ (131 mm). Резултати испитивања конзистенције геополимерног малтера са суперпластификатором показују да се са додатком суперпластификатора повећава флуидност малтерских мешавина.

Експерименталним испитивањем утврђене су савојене и притисне чврстоће геополимерних малтерских мешавина. Највећа вредност чврстоће при савијању измерена је на мешавини ознаке „FA“ и износи 8,87 МПа. Чврстоће при савијању измерене на мешавинама ознаке „FA S“ и „FA B“ износе 6,99 МПа и 7,14 МПа. Вредности

чврстоће при притиску малтера расту с порастом старости узорака. Измерене вредности чврстоће при притиску малтерских мешавина ознака „FA S” и „FA B” при старости малтера од 28 дана износиле 43,62 МПа и 41,62 МПа (респективно) док је код мешавине „FA” чврстоћа при притиску износила 42,08 МПа.

Према резултатима добијеним експерименталним испитивањем може се закључити да додавање суперпластификатора смањује вредност чврстоће при савијању геополимерног малтера. Ови резултати могу бити последица нешто слабије везе између очврсле пасте и зрна агрегата. Посматрано са аспекта притисне чврстоће, суперпластификатор Sika ViscoCrete 5380 показао се бољим.



Слика 6.5 Узорци геополимерног малтера након испитивања: горе - узорци мешавине „FA”, средина - „FA S”, доле – узорци мешавине „FA B”

6.3 Утицај млевене гранулисана згуре високе пећи и начина неговања на физичко-механичке карактеристике геополимерних малтерских мешавина на бази електрофилтерског пепела

Експериментално истраживање урађено је на узорцима геополимерног малтера. За справљање је коришћен електрофилтерски пепео и млевена гранулисана згура. Електрофилтерски пепео је пореклом из термоелектране Костолац „Б”, док је гранулисана згура нуспроизвод прераде руде гвожђа у железари Смедерево.

Уситњавање материјала вршено је у лабораторијском кугличном млину и просејано је кроз сито отвора 0,063 мм. Такође, извршено је просејавање електрофилтерског пепела кроз исто сито. Коришћени везивни материјали приказани су на слици 6.6. Као агрегат коришћен је песак пореклом из Јужне Мораве. Алкални активатори, натријумсиликат (Na_2SiO_3) и натријумхидроксид (NaOH) у течном стању су помешани како би се створио јединствени активатор. У експерименту нису коришћени други хемијски додаци.



Слика 6.6 Коришћени везивни материјали: електрофилтерски пепео (лево) и млевена гранулисана згура (десно)

6.3.1 Састав мешавина и резултати испитивања

У циљу одређивања утицаја млене гранулисана згуре високе пећи и начина неговања геополимерног малтера направљено је пет различитих малтерских мешавина. Једна мешавина направљена је само са електрофилтерским пепелом као везивом, док је код осталих мешавина извршена замена електрофилтерског пепела згуром по маси у следећим процентима: 25, 50, 75 и 100 %. Малтерска мешавина само са пепелом означена је као „0 S”, мешавина код које је извршена замена електрофилтерског пепела гранулисаном згуром у износу од 25 % означена је као „25 S”, и аналогно мешавине са заменом електрофилтерског пепела гранулисаном згуром од 50, 75 и 100 % означене су као „50 S”, „75 S” и „100 S”. Однос песка и везивног материјала био је 3:1. Раствор NaOH је концентрације 10 М, а модул M_s натријумсиликата је 2,2. Водовезивни фактор у свим мешавинама је константан и износи 0,45. У циљу боље уградљивости додата је вода у износу од 40 g. Састав малтерских мешавина дат је у табели 6.4.



Табела 6.4 Састав геополимерних малтерских мешавина

Назив мешавине	Електрофилтерски пепео [g]	Гранулисана згура [g]	NaOH [g]	Na ₂ SiO ₃ [g]	Песак [g]	Вода [g]
0 S	450	0	56,16	303,13	1350	40
25 S	337.5	112.5	56,16	303,13	1350	40
50 S	225	225	56,16	303,13	1350	40
75 S	112.5	337.5	56,16	303,13	1350	40
100 S	0	450	56,16	303,13	1350	40

За сваку малтерску мешавину направљене су две серије узорака које су неговане на два различита начина. Једна серија узорака је била подвргнута температурној активацији, односно изложена температури од 95 °C првих 24 h, а затим чувана у амбијенталним условима на температури од 22 °C до тренутка испитивања. Друга серија је све време била негована у амбијенталним условима на температури од 22 °C. Узорци су након вађења из калупа били заштићени пластичном фолијом у циљу спречавања губитка влаге.

На геополимерном малтеру у свежем стању мерена је конзистенција према стандарду SRPS EN 13395-1:2010 [198] и запреминска маса у свежем стању SRPS EN 1015-6:2008 [201]. На очврслим призмама димензија 4 × 4 × 16 cm и према стандардима EN 196-1:2018 [202] и SRPS EN 12190:2010 [203] мерена је чврстоћа при савијању, чврстоћа при притиску и запреминска маса у очврслном стању. Мерење чврстоће при савијању и чврстоће при притиску вршено је на три тј. шест узорака, респективно. Такође, вршено је и мерење брзине проласка ултразвучног таласа кроз малтерске призме при различитим старостима у циљу праћења процеса очвршћавања, односно степена остварене полимеризације везивног материјала.

Резултати испитиване конзистенције и запреминске масе у свежем стању приказани су у табели 6.5.



Табела 6.5 Резултати испитиване конзистенције и запреминске масе у свежем стању геополимерних малтерских мешавина

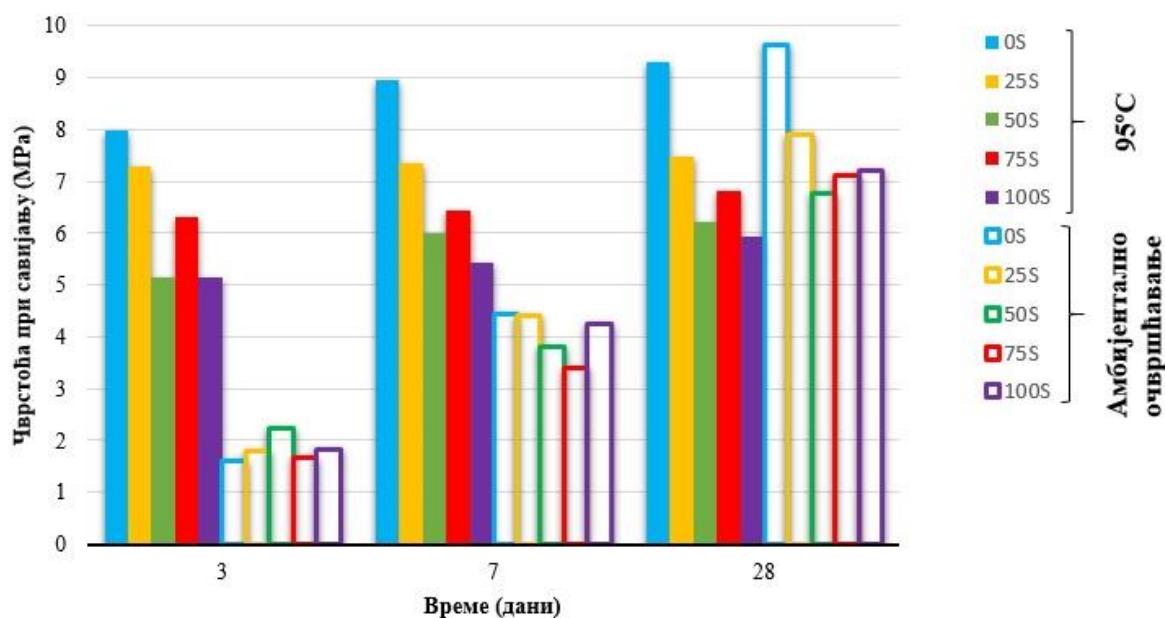
Мешавина	Распростирање [mm]	Запреминска маса [kg/m ³]
0S	132	2120
25S	143	2175
50S	148	2195
75S	152	2205
100S	160	2260

Метода мерења брзине проласка ултразвучног импулса кроз очврсли бетонски или малтерски материјал једна је од најчешће примењивијих недеструктивних метода за одређивање њихових карактеристика. Такође се користи за детектовање дефеката у унутрашњости масе материјала или за процену дубине прелина насталих у току експлоатације. Код цементних композита може да послужи за одређивање степена хидратације цемента, односно степене полимеризације код геополимерних материјала приликом праћења процеса очвршћавања. У овом експерименту је вршено мерење брзине проласка ултразвука кроз малтерске призме при старости епрувета од 3, 7 и 28 дана непосредно пре испитивања механичких чврстоћа. Резултати испитивања запреминске масе и брзине проласка ултразвучног импулса кроз очврсле малтерске призме су дати у табели 6.6.

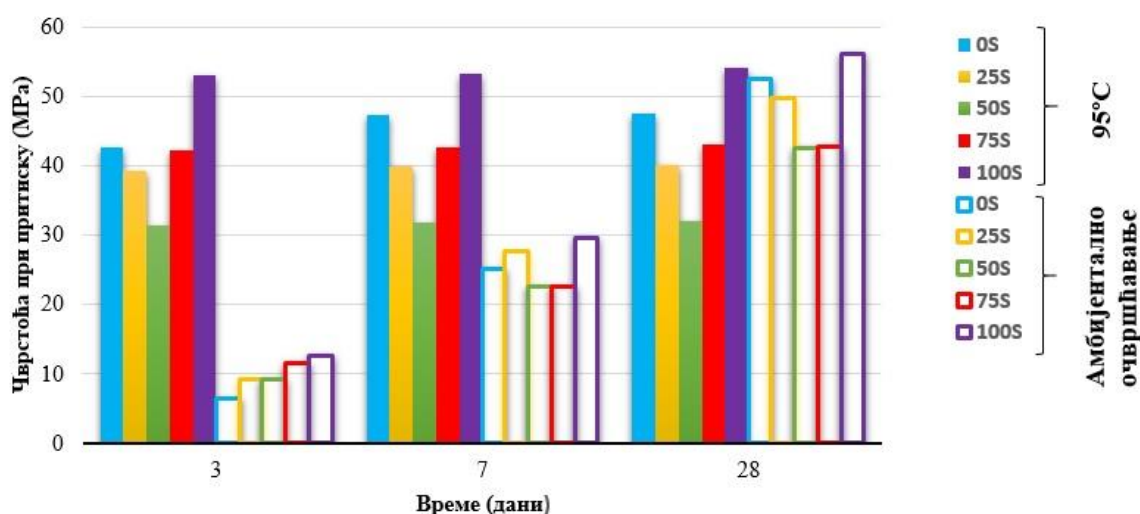
Табела 6.6 Запреминска маса и брзина проласка ултразвучног импулса кроз очврсле призме старости 3, 7 и 28 дана.

Мешавина	Температурно очвршћавање				Амбијентално очвршћавање			
	V (m/s)			Запреминска маса [kg/m ³]	V (m/s)			Запреминска маса [kg/m ³]
	3 дана	7 дана	28 дана		3 дана	7 дана	28 дана	
0S	3072	3072	3013	2095	2105	2931	3246	2110
25S	2986	2947	2947	2120	2319	3059	3279	2110
50S	2878	2868	2802	2165	2920	3285	3353	2155
75S	3042	3013	3013	2170	2462	2883	3383	2155
100S	3213	3213	3213	2230	2721	3299	3572	2230

Познато је да су чврстоћа при савијању и чврстоћа при притиску малтера најважније механичке карактеристике малтера, као и да се помоћу њих могу наслутити карактеристике бетона. Резултати испитивања чврстоће при савијању и чврстоће при притиску при старости малтера од 3, 7 и 28 дана су на сликама 6.7 и 6.8.



Слика 6.7 Резултати испитивања чврстоће при савијању



Слика 6.8 Резултати испитивања чврстоће на савијање и чврстоће на притисак

6.3.2 Дискусија резултата испитивања

Резултати испитивања конзистенције показују да са повећањем садржаја гранулисане згуре повећава распрострањање малтера, односно флуидност малтерске мешавине. Све испитане малтерске мешавине имају пластичну конзистенцију (распрострањање 140 – 200 mm) изузев мешавине са ознаком „0 S“ која има круту конзистенцију. Најмање распрострањање има малтерска мешавина справљена само са електрофилтерским пепелом као везивом (132 mm), док највећу вредност има мешавина са 100 % гранулисане згуре (160 mm). Разлог је што је електрофилтерски пепео финији и порознији материјал од гранулисане згуре, те захтева већу количину воде за оквашавање зрна што директно утиче на конзистенцију малтерске мешавине.

Запреминска маса малтера у свежем стању се повећава са повећањем садржаја гранулисане згуре. Највећу вредност запреминске масе има мешавина са 100 % гранулисане згуре, док најмању има мешавина справљена само са електрофилтерским пепелом као везивом. Разлика у запреминским масама код малтерских мешавина се јавља због разлике у специфичним масама гранулисане згуре и електрофилтерског пепела које износе респективно 2850 kg/m^3 и 2240 kg/m^3 .

Разлике у запреминским масама које се јављају код очврслих малтерских призми са различитим процентима замене електрофилтерског пепела гранулисаном згуром еквивалентне су разликама у запреминским масама малтерских мешавина у свежем стању.



Развој механичких чврстоћа у великој мери зависе од услова неговања малтерских узорака. Узорци подвргнути температурној активацији су већ при старости од 3 дана постигли око 90 % чврстоће. Постоји прираст чврстоћа од 3. до 28. дана старости епрувета, али је он мали у односу на почетни у прва три дана. Прираст чврстоћа код узорака који су све време неговани у амбијенталним условима је континуалан. Чврстоће ових узорака при старости од 3 и 7 дана су далеко мање у односу на температурно активирани узорци. Међутим, при старости од 28 дана узорци који су неговани све време у амбијенталним условима постигли су за око 5% веће чврстоће у односу на узорке који су подвргнуте температурној активацији. То се објашњава тиме што се температурном активацијом убрзава полимеризација са једне стране, али се са друге стране спречава да се она у потпуности изврши.

На основу резултата испитивања савојне чврстоће може се закључити да највећу вредност имају малтерске мешавине са ознаком „0 S“ при свим старостима узорака и при оба начина неге, изузев у случају амбијентално негованих узорака при старости од 3 дана где највећу вредност има мешавина са ознаком „50 S“. Код узорака који су подвргнути термичком активацијом најмању вредност савојне чврстоће има мешавина са ознаком „100 S“ при свим старостима. Код узорака који су неговани у амбијенталним условима најмању вредност савојне чврстоће има малтерска мешавина са ознаком „50 S“ при старости од 28 дана, односно мешавина са ознаком „75 S“ при старости од 7 дана.

На основу резултата испитивања чврстоће при притиску највећа измерена вредност је малтерске мешавине са ознаком „100 S“ при свим старостима узорака и при оба начина неге, док најмању вредност има мешавина са ознаком „50 S“, изузев у случају амбијентално негованих узорака при старости од 3 дана где најмању вредност има мешавина са ознаком „0 S“. Гранулисана згура утиче само на почетни прираштај притисне чврстоће амбијентално негованих малтерских узорака сразмерно процентуалном учешћу. Дијаграм притисне чврстоће амбијентално негованих узорака при старости од 28 дана обликом одговара дијаграму притисне чврстоће температурно активираних узорака. Вредности притисне чврстоће амбијентално негованих узорака при старости од 28 дана малтерских мешавина са ознаком „0 S“, „25 S“ и „100 S“ су веће од 50 МПа, док су за „50 S“ и „75 S“ око 43 МПа.

Испитивање брзине проласка ултразвучног импулса кроз очврсле малтерске призме је вршено из разлога да се прати степен полимеризације везива у току очвршћавања. Брзина проласка ултразвучног импулса кроз узорак пре свега зависи од запреминске



масе, што се види из резултата испитивања. Код малтерских узорака који су били подвргнути термичкој активацији нема великих разлика између брзине ултразвучног импулса при старости узорака од 3, 7 и 28 дана. Међутим, код амбијентално негованих узорака јасно је уочљив пораст брзине ултразвучног импулса са повећањем старости. При старости од 28 дана брзина ултразвучног импулса код амбијентално негованих узорака је за око 5% већа у односу на узорке који су температурно активирани. Промена брзине ултразвучног импулса кроз малтерске призме прати промену механичких чврстоћа у току времена. Може се закључити се да се на основу брзине проласка ултразвучног импулса може проценити степен полимеризације везива, а самим тим и механичке чврстоће, код амбијентално негованих малтерских узорака у било ком моменту старости. Услов је да је позната брзина проласка ултразвучног импулса кроз малтерске призме које су подвргнуте температурној активацији при старости од 3 дана.

Према добијеним карактеристикама, може се закључити да геополимерни малтери на бази електрофилтерског пепела и мленене гранулисане згуре високе пећи могу да буду добра замена цементним малтерима. Оправданост њихове примене се огледа у добрим механичким чврстоћама и еколошком смислу, јер доприносе развоју концепта зелене градње и одрживог развоја.



7. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ

До сада су на геополимерним композитима спроведена бројна испитивања приликом којих је вршена варијација садржаја натријум силиката, натријум хидроксида, воде, количине везивног материјала и агрегата. Испитивање утицаја везива на физичко-механичка својства вршено је на пасти и малтеру, а нешто мање на бетонима. Углавном су испитиване малтерске и бетонске мешавине које су негована при повишеној температури, док је мање пажње посвећено испитивању узорака негованих у амбијенталним тј. лабораторијским условима.

Својства геополимерних мешавина у великој мери зависе од врсте коришћеног везива, а комбинација различитих везива може допринети побољшавању појединих карактеристика мешавина, али истовремено може негативно утицати на друге. Зато је потребно спровести већи број испитивања коришћењем различитих додатака и различитих процентуално – масених удела. Циљ испитивања је добијања финалног производа конструктивно прихватљивих својстава.

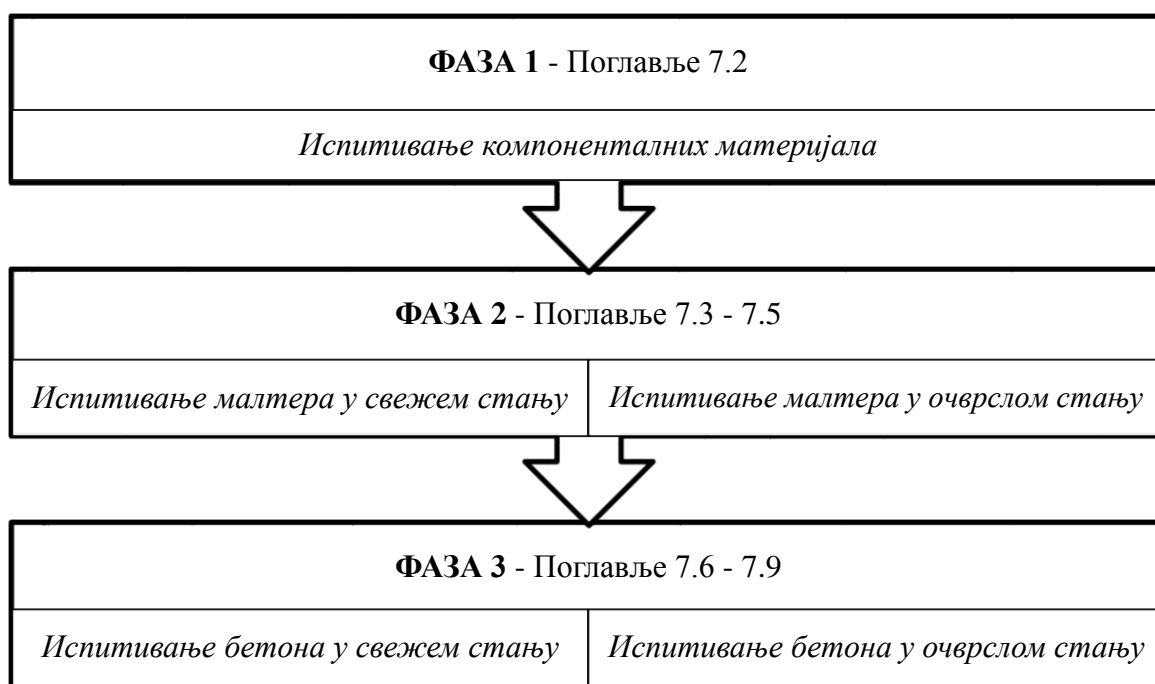
Претходна и главна експериментална истраживања изведена су на Грађевинско - архитектонском факултету у Нишу у Лабораторији за испитивање грађевинских материјала. Испитивањем је обухваћено више врста индустријских нуспрoизвoдних који су у експерименту коришћени као везивни додаци. Као основно везиво коришћен је електрофилтерски пепео, док су као везивни додаци коришћени нуспрoизвoди пореклом из индустријске производње (гранулисана згура из високе пећи, конверторска згура, пепео из дрвне биомасе, црвени муљ и отпадно стакло). Везивни материјали који су коришћени за справљање геополимера су најпре уситњени тј. самлевени помоћу лабораторијског кугличног млина. Након завршеног процеса уситњавања они су и просејани кроз сито отвор 0,09 mm. Хомогенизација овако припремљених материјала извршена је у великим пластичним бурадима и ручним мешањем. У овом делу истраживања извршено је и испитивање коришћених агрегата тј. речног агрегата – фракције I (0/4 mm), дробљеног агрегата - II (4/8 mm) и III (8/16 mm) фракције. За справљање геополимера коришћени су алкални активатори натријум хидроксида и

натријум силиката, а њихове основне карактеристике преузете су из техничких услова произвођача.

За потребе испитивања утицаја индустријских нуспроизвода на карактеристике геополимерних малтера и бетона направљено је двадесет четири малтерских мешавина и осам бетонских мешавина. Експериментално истраживање обављено је у периоду од октобра 2018. до априла 2020. године.

7.1. Програм експерименталног истраживања

У циљу ефикасније реализације, израђен је детаљан програм експерименталног истраживања. Програм експерименталног испитивања могуће је поделити у три фазе и оне су приказане на Слици 7.1.



Слика 7.1 Програм експерименталног истраживања

Први део истраживања је подразумевао испитивање компоненталних материјала. На везивним материјалима извршена су следећа испитивања:

- Хемијски састав,
- Физичке особине,
- Пуцоланска активност,
- Индекс активности и
- Микроструктурална SEM анализа.



Други део експерименталног истраживања односи се на испитивање карактеристика геополимерних малтера у свежем и очврслом стању. Истраживања у оквиру овог експерименталног дела имају за циљ утврђивање особина геополимерних малтера на бази електрофилтерског пепела услед замене основног везива другим индустријским нуспроизводима. Приликом израде геополимерних малтерских мешавина извршена је замена основног везива тј. електрофилтерског пепела конверторском згуром, пепелом из дрвне биомасе, црвеним муљем и отпадним стаклом у процентно-масеном износу од 5 % до 20 %. Замена електрофилтерског пепела млевеном гранулисаном згуром из високе пећи била је у процентно-масеном износу од 20 % до 100 %. Једна малтерска мешавина направљена је само са електрофилтерским пепелом и названа је еталон геополимерна мешавина. Двадесет две малтерске мешавине пројектоване су као геополимерне, док су две мешавине справљене са цементом као везивом. Врсте малтерских мешавина коришћених у истраживању су дате у табели 7.13, док су у табели 7.1 дате коришћене методе испитивања.

У трећем делу експеримента испитиване су карактеристике бетонских мешавина у свежем и очврслом стању. У ту сврху пројектовано је осам бетонских мешавина од којих су шест геополимерне, а две цементне. Као основно везиво за справљање геополимерних бетона коришћен је електрофилтерски пепео док су као везивни додаци коришћени други индустријски нуспроизводи. Врсте бетонских мешавина коришћених у истраживању су дате у табели 7.24. У табели 7.2 је дат детаљан план испитивања бетонских мешавина, као и димензије и број испитиваних узорака.



Табела 7.1 Методе коришћене за испитивање малтера

Врста испитивања		Број, врсте, и старост узорака приликом испитивања
Малтер у свежем стању	Одређивање конзистенције малтера на потресном столу SRPS EN 13395-1:2010 [198]	-
	Запреминска маса у свежем стању - SRPS EN 1015-6:2008/A1:2008 [201].	-
Малтер у очврслом стању	Запреминска маса очврслог малтера	*15 призми 40 × 40 × 160 mm 2, 7, 28, 56 и 90 дана
	Брзина проласка ултразвучног импулса - SRPS EN 12504-4:2008 [204],	*15 призми 40 × 40 × 160 mm 2, 7, 28, 56 и 90 дана
	Чврстоћа при притиску и чврстоћа при савијању малтера - SRPS EN 196-1:2017 [202]	*15 призми 40 × 40 × 160 mm 2, 7, 28, 56 и 90 дана
	Отпорност малтера на дејство мраза SRPS EN 14617-5:2014 [205]	5 призми 40 × 40 × 160 mm 28 дана + 25 циклуса
	Отпорност малтера на дејство сулфата CEN/TR 15697:2014 [206]	6 призми 40 × 40 × 160 mm 28 дана + 180 дана
	Испитивање излуживања тешких метала - DIN 38414-S4 [207]	*90 дана
	FT-IR spectroscopy анализа	*90 дана



Табела 7.2 Сprovedена испитивања на бетону

Врста испитивања		Број, врсте и старост узорак приликом испитивања
Бетон у свежем стању	Одређивање запреминске масе у свежем уграђеном стању - SRPS EN 12350-6:2019 [208]	-
	Флуидност - slump flow test - SRPS EN 12350-8:2019 [209],	-
	Вискозност - T500 test - SRPS EN 12350-8:2019 [209],	-
	Способност пролаза између арматуре - L box тест- SRPS EN 12350-10:2012 [210]	-
	Отпорност на сагрегацију - SRPS EN 12350-11:2012 [211]	-
	Садржај увученог ваздуха - SRPS EN 12350-7:2019 [212]	-
Бетон у очврслном стању	Одређивање запреминске масе очврслог бетона - SRPS EN 12390-7:2019 [213]	*12 коцки, 100 × 100 × 100 mm 2, 7, 28 и 90 дана
	Одређивање чврстоће при притиску - SRPS EN 12390-3:2010 [214]	*12 коцки, 100 × 100 × 100 mm 2, 7, 28 и 90 дана
	Одређивање чврстоће при затезању савијањем - SRPS EN 12390-5:2019 [215],	*** 3 призме, 100 × 100 × 400 mm 90 дана
	Одређивање чврстоће при затезању цепањем - SRPS EN 12390-6:2012 [216]	3 цилиндра, Ø 100 × 100 mm 90 дана
	Одређивање чврстоће при затезању „Pull-off“ методом - SRPS EN 1542:2010 [217].	** 3 плоче, 150 × 150 × 75 mm 90 дана
	Одређивање величине одскока склерометром - SRPS EN 12504-2:2014 [218]	*3 коцке, 100 × 100 × 100 mm 90 дана
	Одређивање брзине проласка ултразвучног импулса - SRPS EN 12504-4:2008 [219].	*12 коцки, 100 × 100 × 100 mm 2, 7, 28 и 90 дана
	Одређивање статичког модула еластичности при притиску - SRPS EN 12390-13:2015 [220]	3 цилиндра, Ø 150 × 300 mm 90 дана
	Упијање воде под атмосферским притиском SRPS EN 1340:2012 [221];	*** 3 коцке, 71 × 71 × 71 mm 90 дана
	Испитивање скупљања бетона UNI 6555:1973 [222].	3 призме, 100 × 100 × 500 mm 3 - 90 дана
	Дубина пенетрације воде под притиском SRPS EN 12390-8:2019 [223].	** 3 коцке, 150 × 150 × 150 mm 28 дана
	Одређивање отпорности према хабању брушењем - SRPS 1340:2012 (X) [224]	*** 3 коцке, 71 × 71 × 71 mm 90 дана
	Испитивање отпорности према дејству мраза - SRPS U.M1.206:2013 [225]	6 коцки, 100 × 100 × 100 mm 28 дана + 200 циклуса
	Отпорност на дејство мраза и соли за одмрзавање - SRPS CEN/TS 12390-9:2017 [226]	3 плоче, 150 × 150 × 50 mm 28 дана + 28 циклуса
	Сулфатна отпорност бетона - CEN/TR 15697:2014 [206]	6 коцки, 100 × 100 × 100 mm 28 дана + 90 и 180 дана
SEM анализа	*90 дана	

* и ** - коришћени су исти узорци

7.2 Својства компонентних материјала

7.2.1 Везивни материјали

7.2.1.1 Припрема везивних материјала

7.2.1.1.1 Електрофилтерски пепео

За потребе експерименталног истраживања коришћен је електрофилтерски пепео генерисаног у термоелектрани „Костолац Б“ у Костолцу. Пепео је узет директно са филтра тако да су сачувана његова пуцоланска својства. Подобност електрофилтерског пепела за примену као везива одређена је на основу испитивања и критеријума датим у стандардима SRPS EN 450-1:2014 [156] и SRPS.B.C1.018 [227]. Наведеним стандардима прописане су тачна дефиниција, спецификација и критеријуми за одређивање квалитета пепела. Стандардима су прописани услови за коришћење пепела као минералног додатака цементу. У складу са тим, извршена су испитивања хемијских, физичких и микроструктуралних карактеристика електрофилтерског пепела. Поступак припреме материјала подразумевао је просејавања на сити 0,09 mm. Изглед материјала спремљеног за коришћење дат је на слици 7.2.



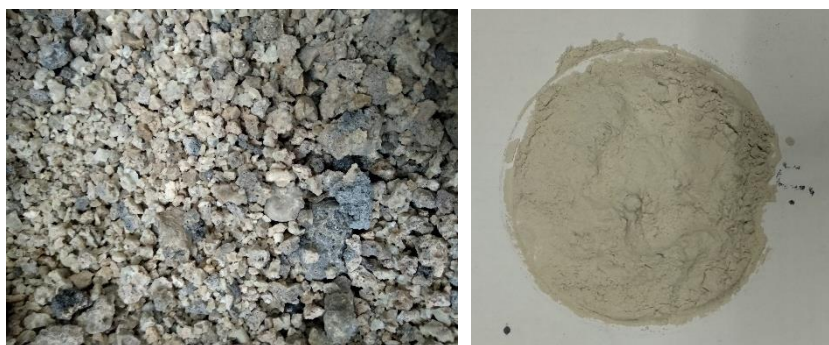
Слика 7.2 Узорак електрофилтерског пепела припремљеног за испитивање

7.2.1.1.2 Гранулисана згура из високе пећи

За потребе експерименталног истраживања, гранулисану згуру из високе пећи уступила је компанија HBIS GROUP Serbia Iron & Steel д.о.о. Београд – погон у Смедереву. Згура је узета директно испод високе пећи, а њено испитивање извршено је према стандарду SRPS EN 15167-1:2010 [168]. Наведеним стандардом обухваћене су дефиниција, спецификација и критеријуми за одређивање квалитета млевене гранулисане згуре из високих пећи. Такође, прописане су и физичке и хемијске

карактеристике које млевена гранулисана згура високе пећи треба да испуни како би могла да се користи као додатак типа II при производњи бетона.

Поступак припреме гранулисане згуре из високе пећи подразумевао је сушење материјала до константне масе. Температура сушења била је 105 °С. Даљи третман материјала вршен је уситњавањем млевењем у млину. У ту сврху коришћен је куглични млин којег покреће елетромотор снаге 1.5 kW и остварује брзину од 90 обртаја у минути. Млевење материјала је вршено у бубњу млина помоћу 25 челичних кугли пречника 25 mm које су стављене у бубањ млина заједно са материјалом. Овако Fino самлевени материјал се затим просејавао. За справљање малтера и бетона коришћена је млевена гранулисана згура из високе финоће мање од 0,09 mm. Изглед млене гранулисане згуре из високе пећи припремљене за справљање малтера и бетона приказан је на слици 7.3.



Слика 7.3 Гранулисана згура из високе пећи: узоркован материјал (лево), материјал припремљене за справљање малтера и бетон (десно)

7.2.1.1.3 Конверторска згура – челичанска згура

Као што је то био случај и са гранулисаном згуром из високе пећи, конверторску (челичанску) згуру је за потребе експерименталног испитивања уступила компанија HBIS GROUP Serbia Iron & Steel д.о.о. Београд – погон у Смедереву. Коришћена конверторска згура настала је као нуспроизвод приликом производње челика у погону челичане, а узорак је узет непосредно испод конвертора. Досадашњи начин управљања генератора отпада овом врстом нуспроизвода био је да згуру предају даље фирми која се бави издвајањем метала, док деметализовани остатак (јаловину конверторске згуре), која има ситнију гранулацију, депонује или предаје даље како би се користила као гнојиво за земљиште. С обзиром да постојећим стандардима нису прописани услови квалитета конверторске згуре за употребу у грађевинске сврхе, због сличног начина и места настанка, добијени резултати биће упоређени са стандардом за

одређивање карактеристика млевене гранулисане згуре пореклом из високе пећи. Стога оцена квалитета материјала извршена је према SRPS EN 15167-1:2010 [168], а испитане су основне хемијске, физичке и микроструктуралне карактеристике конверторске згуре.

Поступак припреме конверторске згуре није се битно разликовао од поступка припреме гранулисане згуре из високе пећи. Он се састојао из истих корака: сушења материјала до константне масе, уситњавања у лабораторијском кугличном млину и сејање. Као и други коришћени индустријски нуспроизводни материјали, финоћа млива конверторске згуре била је мања 0,09 mm, а изглед згуре припремљене за испитивање дат је на слици 7.4.



Слика 7.4 Конверска (челичанска) згура: узоркован материјал (лево), материјал припремљене за справљање малтера и бетон (десно)

7.2.1.1.4 Пепео из дрвне биомасе

Пепео из дрвне биомасе је за потребе експерименталног истраживања уступила термоелектрана на биомасу „Bioenergy point“ из Бољевца. Припрема пепела састојала се из одстрањивања крупних честица применом поступка ручног сејања. Сејање је затим настављено помоћу вибросита, а за справљање малтера и бетона коришћен је пепео из биомасе финији од 0,09 mm. Изглед пепела биомасе приказан је на слици 7.5.



Слика 7.5 Изглед пепела из дрвне биомасе: узоркован материјал (лево), материјал припремљене за справљање малтера и бетон (десно)

7.2.1.1.5 Црвени муљ

Црвени муљ је за потребе испитивања уступио комбинат алуминијума „КАР“ у Подгорици, Црна Гора. Коришћени црвени муљ добијен је као нуспроизвод Бајеровог процеса производње глинице кад је приликом прерада руде боксита настала јаловина познатија као црвени муљ. Суви остатак црвеног муља узет је директно са места настанка и као такав коришћен је у даљем експерименталном испитивању. Како за овај материјал не постоје стандарди који ближе одређују његову употребу у грађевинске сврхе, коришћени су исти критеријуми као и за електрофилтерски пепео. Урађене су опште хемијске и физичке анализе. Поступак припреме црвеног муља састојао се од сушења материјала до константне масе, након чега је покушано просејавање лабораторијским вибро ситима. Услед „лоптања“ материјала - укрупњавања услед сејања овај поступак је прекинут па је материјал коришћен у изворном облику. Изглед црвеног муља припремљеног за испитивање приказан је на слици 7.6.



Слика 7.6 Узорак црвеног муља припремљеног за испитивање

7.2.1.1.6 Отпадно стакло

Отпадно стакло је за потребе експерименталног испитивања узорковано на локалном градишту објекта Ватрогасног дома у Нишу на којем је радове реконструкције и адаптације објекта изводила фирма „Неимар“ Д.О.О. Ниш из Ниша. На објекту је вршена енергетска санација, а све у циљу да се побољшају енергетски и естетски захтеви корисника. Постојеће транспарентне површине (дрвени прозори и врата) замењене су новим елементима од алуминијума са дебљом стакленом испуном. Том приликом депонована је велика количина дрвног и стакленог отпада. Дрвни отпад је затим депонован на градску депонију, а непосредно пре тога извршено је издвајање отпадног стакла које је коришћено у овом експерименталном испитивању. Припрема стакла за испитивање вршена је у лабораторијским условима, а састојала се од испирања стакла,

сушења у комори на ваздуху, уситњавања у кугличном млину и сејање кроз сито отвора 0,09 mm. На слици 7.7 дат је изглед стакла пре и након поступака припреме за испитивање.



Слика 7.7 Изглед отпадног стакла: узоркован материјал (лево), материјал припремљене за справљање малтера и бетон (десно)

7.2.2 Хемијски састав индустријских нуспроизвода

На фино самлевених узорцима индустријских нуспроизвода (електрофилтерски пепео, гранулисана згура из високе пећи, конверторска згуре, пепео из дрвне биомасе, црвени муљ и отпадно стакло) извршено је испитивање хемијског састава. Хемијски састав одређен је на Институту за нуклеарна истраживања „Винча“ у Београду а резултати испитивања дати су у табели 7.3.

Табела 7.3 Хемијски састав коришћених везивних материјала

Параметар	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O
	%									
Електрофилтер. пепео	51,68	11,58	20,16	7,43	2,41	1,02	0,12	1,04	0,88	1,04
Гранулисана згура из високе пећи	38,1	0,70	7,17	39,48	9,86	0,36	-	-	0,51	0,23
Конверторска згура	22,20	6,82	15,60	44,21	8,44	-	0,1	0,04	0,01	0,01
Пепео дрвне биомасе	4,45	5,32	1,85	48,83	6,62	2,11	2,45	0,11	0,46	10,42
Црвени муљ	32,8	4,63	9,92	2,37	0,22	-	-	-	0,12	0,12
Отпадно стакло	68,30	0,65	1,40	8,6	4,1	0,05	-	-	15,6	-



Према хемијском саставу електрофилтерског пепела, садржај оксида $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ износи 83,42 % од укупне масе. Како је срачуната вредност виша од 70 %, електрофилтерски пепео спада у групу силикатних пепела, док према стандарду ASTM C-618 [x] спада у класу „F^c“ тј. киселе пепеле.

На основу хемијског састава гранулисане згуре из високе пећи може се уочити да је доминантан садржај SiO_2 и CaO . Гледано у процентно-масеном уделу у материјалу, садржај $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2$ чини 90,69 % масе испитиваног материјала. Ова вредност виша је од 2/3 укупне масе везива што је и минимална вредност прописана стандардом EN 15167-1:2010 [x]. Коефицијент K_b којим се описује садржај $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ у везиву износи 1,09 што гранулисану згуру сврстава у базни материјал.

На основу хемијског састава конверторске згуре може се закључити да највећи удео чине CaO и SiO_2 . Њихов процентуални удео је 68,16 %, док садржај $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2$ чини 76,82 % испитиваног материјала.

Према саставу пепела из дрвне биомасе, уочава се да материјал у свом саставу има висок садржај CaO . Његов процентуални удео у директној је зависности са врстом употребљене сировине. Како је позната способност да CaO у процентно-масеном уделу већем од 50 % може довести до стварања $\text{Ca}(\text{OH})_2$, а касније при контакту са угљен диоксидом и CaCO_3 , јасно је да је пепео из дрвне биомасе има потенцијала да буде материјал са добрим везивним способностима.

На основу резултата испитивања хемијског састава црвеног муља може се закључити да је и ово материјал са високим садржајем SiO_2 и Al_2O_3 . Такође, уочава се и велико процентуално учешће Fe_2O_3 од 4,63 %, што је и узрок његове пигментације.

У хемијском саставу отпадног стакла издваја се SiO_2 и CaO и они чине 77,91 % процентно-масеног удела у везиву.

7.2.3 Физичке особине везивних материјала

Испитивање запреминске и специфичне масе везивних материјала извршено је према стандарду SRPS B.C8.023:1997 [227]. Испитивања су спроведена у Лабораторији за грађевинске материјале, Грађевинско - архитектонског факултета у Нишу, а резултати испитивања дати су у табели 7.4.

Табела 7.4 Физичке особине коришћених везивних материјала

Врста испитивања	Електрофилтерски пепео	Гранулисана згура из високе пећи	Конверторска згура	Пепео из дрвне биомасе	Црвени муљ	Отпадно стакло
Специфична маса (g/cm^3)	2,24	2,85	3,45	2,32	2,77	2,45
Запреминска маса у растреситом стању (g/cm^3)	0,81	1,24	1,55	0,45	0,99	0,87
Стандардна конзистенција (%) SRPS EN 196-3:2017 [228]	32	29,5	29	41	31,5	29,5
Боја	сива	браон	сива	сива	црвена	бела

На основу резултата испитивања може се закључити да се специфичне масе испитиваних материјала разликују. Најмања специфична маса измерена је на узорку електрофилтерског пепела и износи $2,24 \text{ g/cm}^3$. Највећа специфична маса измерена је на узорку конверторске згуре и износи $3,45 \text{ g/cm}^3$. Према физичким особинама, коришћени нуспроизводи су растресити и нису лепљиви.

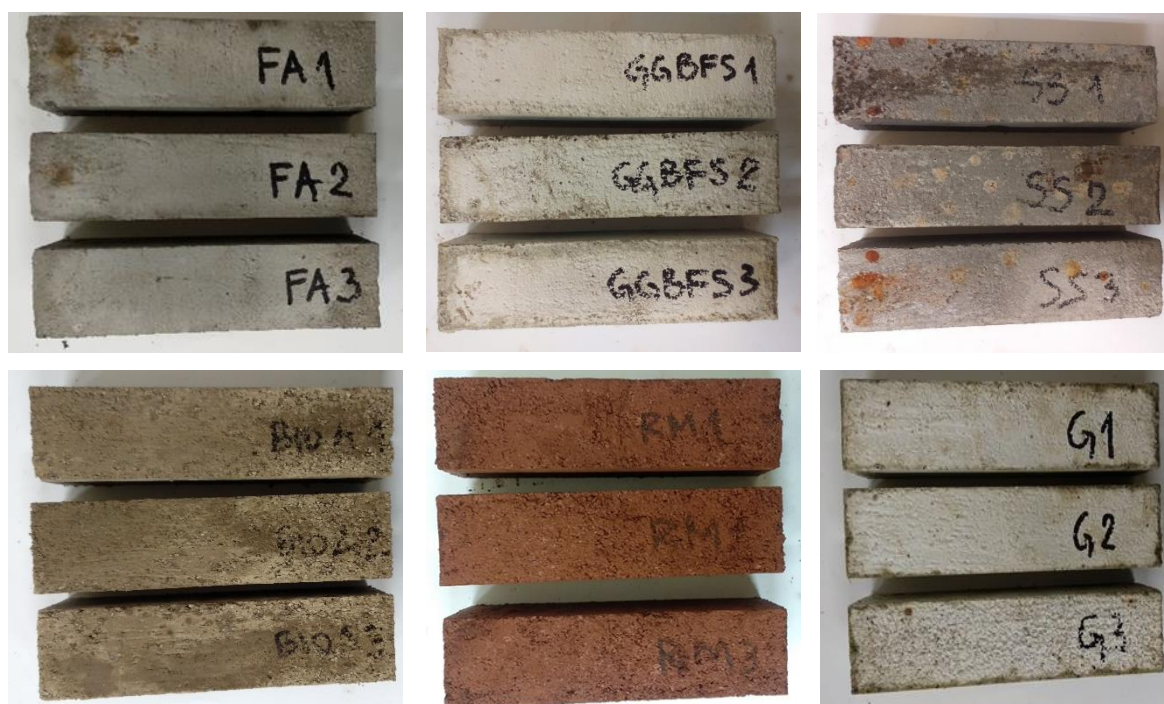
7.2.4 Пуцоланска активност

Испитивање пуцоланске активности вршено је према стандарду SRPS В.С1.018:2015 [229]. За испитивање су коришћене малтерске призме димензија $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$. Малтерске призме справљене су коришћењем различитих индустријских нуспроизвода који су након млевења просејани кроз сито отвора $0,063 \text{ mm}$. Приликом справљања поштован је следећи масени однос компонената: $m_{\text{креча}} : m_{\text{тестираног пуцолана}} : m_{\text{стандардног трофракцијског песка}} : m_{\text{воде}} = 1 : 2 : 9 : 2$. Убрзо након справљања свежа малтерска маса је уграђена у металне калупе који су затим херметички затворени у лименим кутијама. Након затварања, лимене кутије су остављене на стандардној лабораторијској температури од $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ у трајању од 24 h, након чега су пребачене у сушницу. Кутије са узорцима су затим загреване на температури од $55 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ у трајању од 5 дана.

Табела 7.5 Чврстоћа при савијању и чврстоћа при притиску малтера приликом провере пуцоланске активности електрофилтерског пепела

Узорак	Чврстоћа при савијању [N/mm ²]	Чврстоћа при притиску [N/mm ²]	Класа пуцолана
Електрофилтерски пепео	3,04	10,38	10
Млевена гранулисна згура из високе пећи	2.60	5.24	5
Конверторска згура	0.88	2.65	-
Пепео дрвне биомасе	2,10	5,39	5
Црвени муљ	0,48	1,23	-
Отпадно стакло	2,32	5,05	5
Према стандарду SRPS В.С1.018:2015 [229] 1. Најмања чврстоћа на затезање при савијању - σ_f (МПа) 2. Најмања чврстоћа при притиску - σ_c (МПа)			Класа 5: $\sigma_f=2MRa$ $\sigma_c=5MRa$ Класа 10: $\sigma_f=3MRa$ $\sigma_c=10MRa$ Класа 15: $\sigma_f=4MRa$ $\sigma_c=15MRa$

Након пет дана од почетка загревања узорци су извађени из сушнице и остављени затворени у кутији још један дан. Након хлађења, узорци су извађени из калуца и извршено је испитивање чврстоће при савијању и чврстоће при притиску малтера. На основу вредности остварених чврстоћа одређена је класа пуцолана. Средње вредности чврстоће при савијању, чврстоће при притиску и класе пуцолана дати су у табели 7.5. Изглед узорака очврслих малтерских призми након вађења из калуца дат је на слици 7.8.



Слика 7.8 Изглед узорака малтера справљеног различитим индустријским нуспроизводима након вађења из лимених кутија: FA - електрофилтеркси пепео, GGBFS - гранулисана згура из високе пећи, SS - конверторска згура, BIOA - пепео из дрвне биомасе, RM - црвени муљ и G - отпадно стакло

Класа пуцолана одређена је на основу средње вредности чврстоће при притиску и чврстоће при савијању малтера са додатком индустријских нуспроизвода. Према примењеном стандарду највећа класа пуцолана је „класа 15“ док је најмања класа „класа 5“. Приликом испитивања материјала, највећа класа добијена је на узорку електрофилтерског пепела – „класа 10“. Гранулисана згура из високе пећи, пепео из дрвне биомасе и отпадно стакло оставиле су чврстоће довољне за „класу 5“, док конверторска згура и црвени муљ не испуњавају основне услове за најнижу класу. Стога, може се закључити да конверторска згура и црвени муљ нису пуцолански активни материјали.

7.2.5 Индекс активности

Одређивање индекса активности индустријских нуспроизвода спроведено је према стандарду SRPS EN 450-1:2014 [156]. Испитивање је извршено на малтерским призмама димензија $40 \times 40 \times 160$ mm. Малтер је справљен од везива чију масу чини 75 % Портланд цемента (OPC) и 25 % испитиваног материјала. Као агрегат коришћен је



CEN стандардни песак који испуњава услове квалитета прописане стандардом SRPS EN 196-1:2017 [202]. На свежим малтерским мешавинама извршено је испитивање конзистенције применом методе потресног стола према стандарду SRPS EN 13395-1:2010 [198] (детаљније о методи у Поглављу 7.4.1). У складу са препорукама из стандарда SRPS EN 196-1:2017 [202] на очврслим малтерским призмама испитане су чврстоћа при савијању и чврстоћа при притиску. Комплетан поступак испитивања спроведен је и на узорцима малтера справљених само са Портланд цементом као везивом (OPC). Према стандарду о испитивању индекса активности, однос чврстоће при притиску малтера са додацима и малтера справљеног само са Портланд цементом треба бити већа од 75 % тј. 85% при старости малтера од 28 и 90 дана, респективно. Резултати испитивања индекса активности дати су у табели 7.6, док је изглед узорка малтера приликом мерења конзистенције на потресном столу, као и изглед узорака након вађења из калупа приказан је на слици 7.9-1 и 7.9.2.

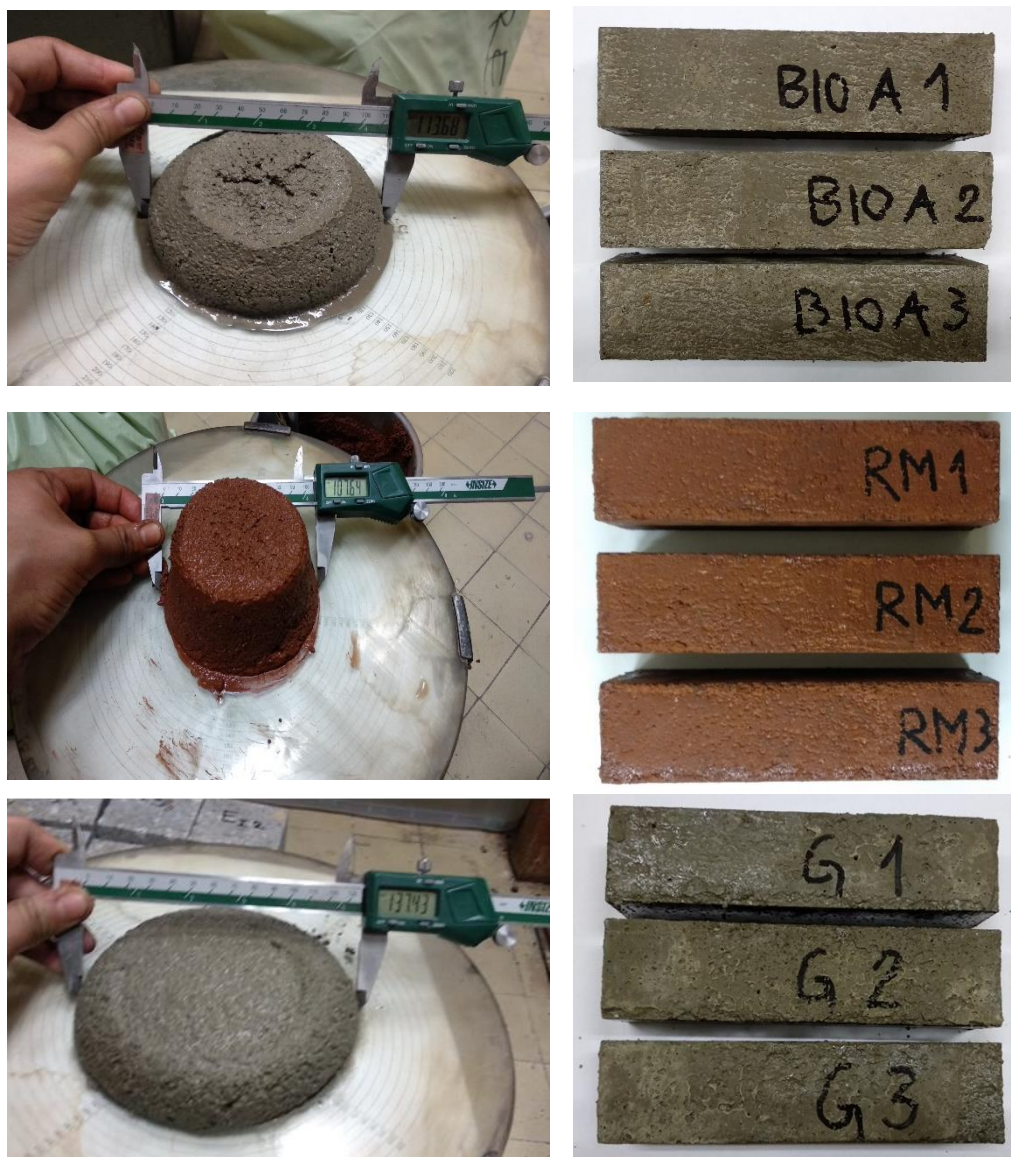


Табела 7.6 Индекс активности коришћених индустријских нуспроизводних
материјала

Узорак	Електроф пепео	Млевена гранулиса на згура	Конвертор ска згура	Пепео из дрвне биомасе	Црвени муљ	Отпадно стакло	Портланд цемент
Распростирање на потресном столу [mm]	130	130	126	112	107	137	135
Чврстоћа при савијању при старости од 28 дана [N/mm ²]	7,97	7,76	6,75	7,29	7,15	7,26	8,27
Чврстоћа при савијању при старости од 90 дана [N/mm ²]	8,88	8,68	7,75	6,78	7,20	8,14	8,34
Чврстоћа при притиску при старости од 28 дана [N/mm ²]	51,58	46,15	40,56	45,40	42,97	38,40	53,30
Чврстоћа при притиску при старости од 90 дана [N/mm ²]	60,23	54,85	44,09	49,60	46,01	48,73	57,60
Индекс активности, 28 дана (%)	96,77	86,59	76,01	85,18	80,62	72,05	-
Индекс активности, 90 дана (%)	104,57	95,22	76,54	86,11	79,88	84,60	-
Индекс активности (%) према стандарду SRPS EN 450-1:2014 [156]: - 28 дана – 75 % - 90 дана – 85 %							



Слика 7.9-1 Испитивање индекса активности: мерење распростирања на потресном столу (лево), изглед узорка очврслог малтера справљеног додатком (десно): FA - електрофилтерски пепео, GGBFS - гранулисана згура из високе пећи и SS - конверторска згура



Слика 7.9-2 Испитивање индекса активности: мерење распрострањања на потресном столу (лево), изглед узорака очврслих малтера справљених са додатком (десно): BIOA - пепео из дрвне биомасе, RM - црвени муљ и G - отпадно стакло

Малтер справљен са електрофилтерским пепелом остварио је врло висок индекс активности. Коефицијенти индекса активности при старости узорака од 28 и 90 дана износе 96 % и 105 %. Висок индекс активности малтера справљеног са додатком електрофилтерског пепела може се довести у везу са високом класом пуцоланске активности, али и са великим садржајем ситнијих честица. Такође, како је електрофилтерски пепео припреман само поступком сејања, честице су задржале правилан сферични облик што је била повољност при мерењу распрострањања методом потресног стола (поглавље 7.2.6).



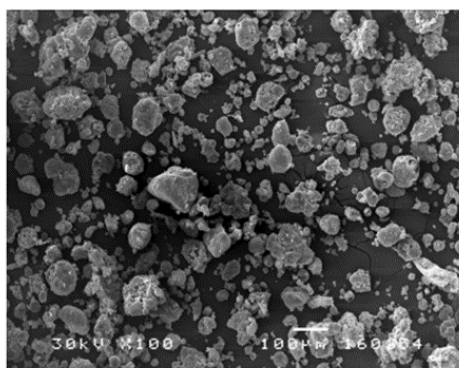
Индекс активности малтера справљеног са гранулсаном згуром из високе пећи при старости малтера од 28 дана и 90 дана износио је 86,59 % и 95,22 %, респективно. Коефицијенти индекса активности приближно су исти при обе старости узорка и испуњавају захтеване критеријуме прописане стандардом. Стога, може се закључити да пораст чврстоћа испитиваног малтера прати пораст чврстоће еталона Портланд цементног малтера, па се вредност индекса активности може окарактерисати као стабилна. Такође, као што се може приметити у хемијском саставу (поглавље 7.2.2), процентни садржај CaO и SiO₂ износи 80,46 %, док у Портланд цементу ова једињења чине око 81 % укупне масе цемента [230]). Стога се може закључити да приликом хидратације долази до формирања C-S-H гела, као и код Портланд цемента. Висок индекс активности у потпуности оправдава коришћење овог материјала.

Индекс активности испитан је и на узорцима малтера справљеним са конверторском згуром, пепелом из дрвне биомасе, црвеним муљем и отпадним стаклом. Коефицијенти индекса активности малтера справљеног са конверторском згуром при старости од 28 и 90 дана износе 76,01 % и 76,54 %, респективно. Коефицијенти индекса активности малтера справљеног са пепелом из дрвне биомасе при старости од 28 и 90 дана износе 85,18 % и 85,11 %, респективно. Слични резултати испитивања индекса активности добијени су приликом испитивања малтера са црвеним муљем и отпадним стаклом. Ипак, може се закључити да малтерске мешавине справљене са додацима попут конверторске згуре, црвеног муља и отпадног стакла не испуњавају критеријуме прописане стандардом.

7.2.6 Микроструктурална SEM анализа

Испитивање микроструктуралних карактеристика индустријских нуспроизвода (Scanning electron microscope, SEM) извршено је у Лабораторији за електронску микроскопију Медицинског факултета у Нишу. Ова недеструктивна метода коришћена је за добијање података о структури материјала у растреситом стању. Поступак испитивања је подразумевао лепљење материјала за месингане носаче након чега је извршено покривање носача танким слојем злата како би се омогућила боља проводљивост, јачи сигнал и боља резолуција фотографије [231]. Применом ове методе добијена је микроструктура узорака, а изглед испитиваних материјала у растреситом стању дате су на слици 7.10. Појединачне фотографије са већим увећањем дате су на сликама 7.11 до 7.16.

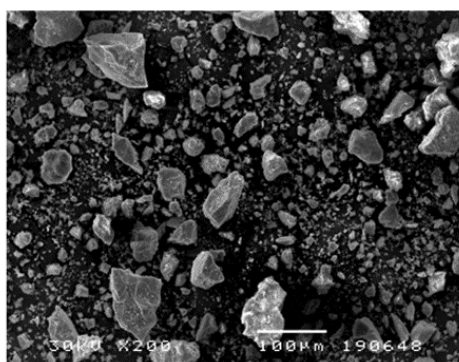
а) FA



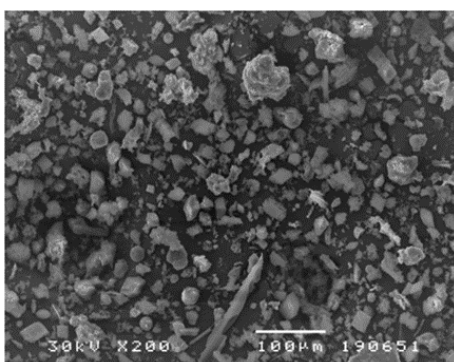
б) GGBFS



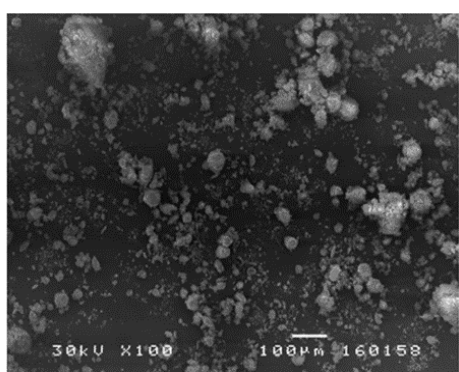
в) SS



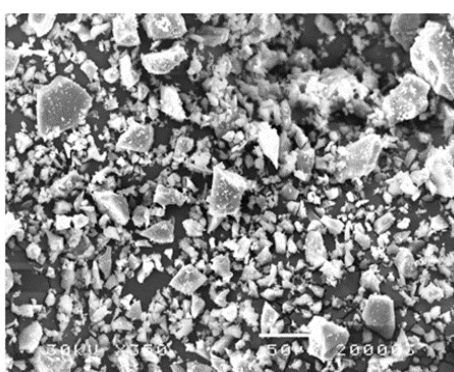
г) BIO A



д) RM



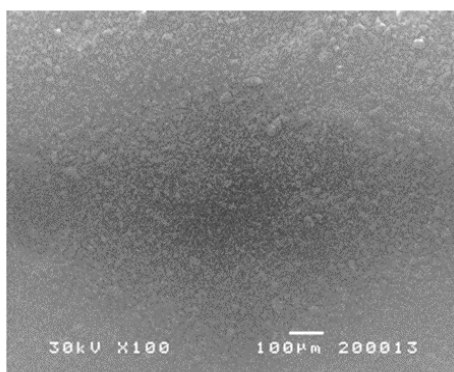
ђ) G



е) SEM II

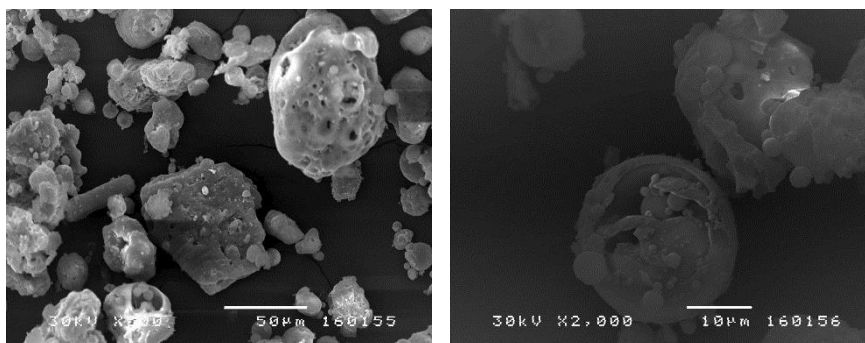


ж) SEM III



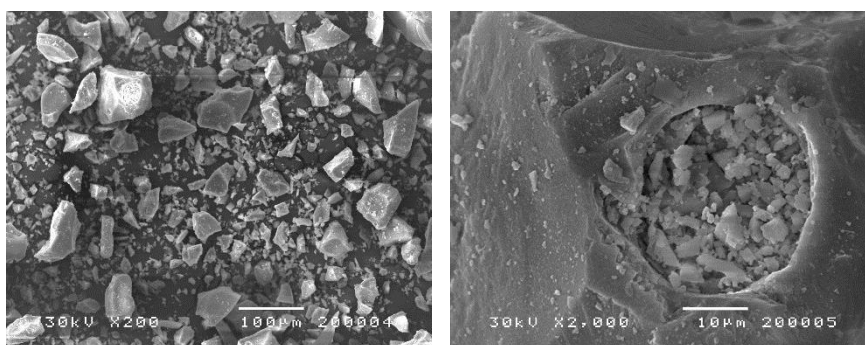
Слика 7.10 SEM фотоприказ узорака у растреситом стању: FA - електрофилтерски пепео, GGBFS - гранулисана згура из високе пећи и SS - челичанска згура BIOA - пепео из дрвне биомасе, RM - црвени муљ и G - отпадно стакло

Изглед узорка електрофилтерског пепела испитиваног SEM микроструктуралном анализом дат је на сликама 7.10 и 7.11. Посматрањем обе слике може се закључити да се електрофилтерски пепео састоји од много финих честица сферичног облика и различитих величина. Спољашна површина је чврста и глатка док је унутрашњост честица ошупљена (енг. pherospheres). Такође, унутар већих честица могу се видети и честице мање величине. Према појединим ауторима [169] овакве честице су врло лагане и након потапања у воду исплутале би на површину.



Слика 7.11 Изглед зрна електрофилтерског пепела са увећањем 500 пута (лево) и 2000 пута (десно)

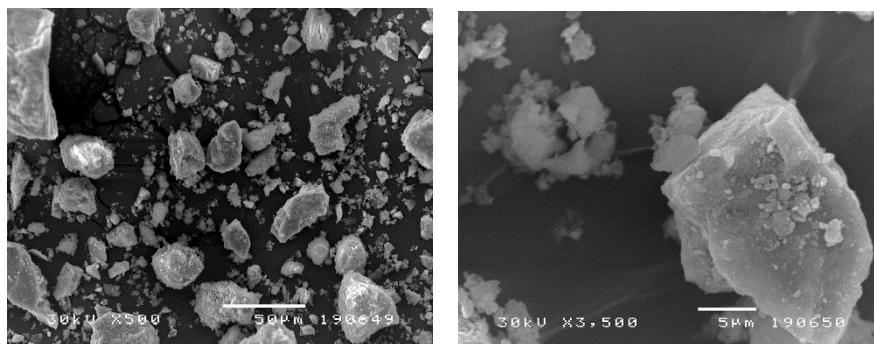
Микроструктурална анализа (SEM) мленене гранулисане згуре из високе пећи дата је на сликама 7.10 и 7.12. Посматрањем фотографија може се закључити да се гранулисана згура из високе пећи састоји од честица различите величине при чему преовладавају крупније честице. Све честице су рогљастог облика и изразито оштрих ивица што је последицом трења оствареног између челичних кугли млина, бубња млина и узорка.



Слика 7.12 Изглед зрна гранулисане згуре из високе пећи са увећањем 200 пута (лево) и 2000 пута (десно)

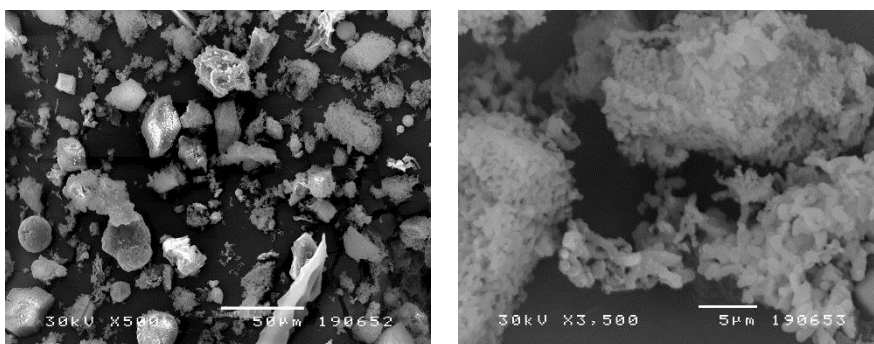
Микроструктурална анализа (SEM) конверторске згуре приказана је на сликама 7.10 и 7.13. Посматрањем фотографија може се закључити да се конверторска згура,

попут мленене гранулисане згуре из високе пећи, састоји од много честица различите величине. Честице су неправилног облика и оштрих ивица, а на увећању од 3500 пута могу се уочити мале и храпаве честице прилепљене за нешто глађу површину већих зрна.



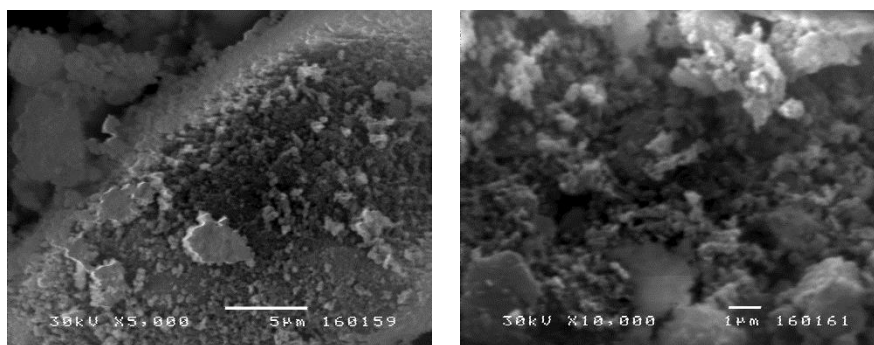
Слика 7.13 Изглед зрна конверторске згуре са увећањем 500 пута (лево) и 3500 пута (десно)

Микроструктурална анализа (SEM) пепела из дрвне биомасе је такође урађена на узорку у растреситом стању. Фотографије су приказане на сликама 7.10 и 7.14 и може се закључити да се пепео из дрвне биомасе састоји од много честица пречника мањег од 10 µm. Честице су неправилног облика и делимично су порозне. Као последица порозности зрна јавља се могућност да одређена количина слободне воде буде заробљена у унутрашњости честице.



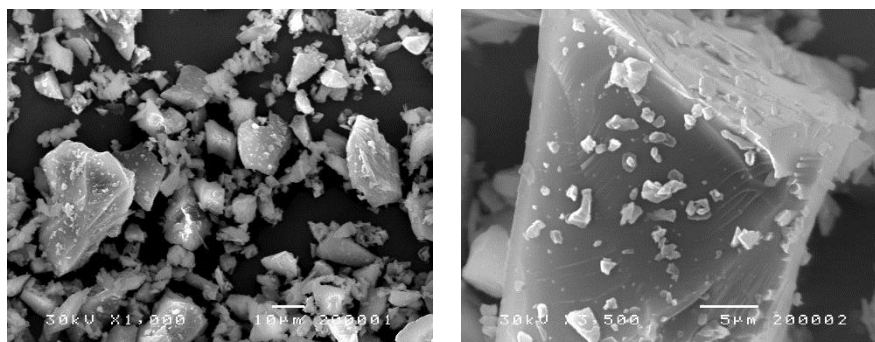
Слика 7.14 Изглед зрна пепела из дрвне биомасе са увећањем 500 пута (лево) и 3500 пута (десно)

Микроструктурална анализа црвеног муља приказана је на сликама 7.10 и 7.15. На SEM фотографијама уочавају се честице сферног и пахуљастог облика. Површина зрна црвеног муља је порозна.



Слика 7.15 Изглед зрна црвеног муља са увећањем 5000 пута (лево) и 1000 пута (десно)

Микроструктурална анализа отпадног стакла дата је на сликама 7.10 и 7.16. Посматрањем фотографија може се закључити да су зрна отпадног стакла груписана у две групе тј. на зрна ситније и крупније величине. Површина великих честица је глатка и на њу су прилепљене честице финије гранулације. Генерално, сва зрна отпадног стакла делују равна, глатка и са оштрим ивицама. Њихова структура је полиедарска што је последица примењеног поступка механичког уситњавања.



Слика 7.16 Изглед зрна отадног стакла са увећањем 1000 пута (лево) и 3500 пута (десно)

7.2.7 Цемент

У циљу поређења физичко – механичких карактеристика геополимерних композита са цементним, направљене су две серије малтерских и две серије бетонских цементних композита, једна са цементном СЕМ II А-L 42,5R и друга са цементом СЕМ III/B 32,5 N-LH/SR произвођача CRH (Србија). Прва врста цемента је изабрана из разлога што се веома често користи у пракси, а друга врста зато што је у питању сулфатно отпорни цемент, а познато је да се геополимерни композити одликују добром отпорношћу према дејству сулфата. Хемијска својства коришћених цемента добијена су



од стране произвођача док су физичко – механичка својства проверена према важећим EN стандардима за цемент: SRPS EN 196-1:2017 [202], SRPS EN 196-2:2015 [232], SRPS EN 196-3:2017 [233], SRPS EN 196-6:2019 [234], SRPS EN 196-7:2010 [135], SRPS EN 196-10:2017 [236], SRPS CEN/TR 196-4:2009 [237] и SRPS B.C8.023:1997 [227].

Резултати испитивања физичко-механичких својстава цемента дати су у Табели 7.7 и табели 7.8. Према приложеним резултатима цемента CEM II A-L 42,5R и CEM III/B 32,5 N-LH/SR произвођача CRH (Србија) Д.О.О. Поповац у потпуности испуњавају услове прописане важећим стандардима.

Табела 7.7 Састав, физичко-механичке и хемијске карактеристике CEM II A-L 42,5R произвођача CRH (Србија) д.о.о. Поповац

Врста испитивања	Јединица мере	Резултат испитивања	Услов квалитета према стандарду	Оцена квалитета
ФИЗИЧКА И МЕХАНИЧКА СВОЈСТВА				
Време везивања	min	190	почетак ≥ 60 min	задовољава
Експанзија Le Chatelier	mm	0,5	≤ 10	задовољава
Чврстоћа при притиску након 2 дана	MPa	27,9	≥ 20	задовољава
Чврстоћа при притиску након 28 дана	MPa	55,0	$\geq 42,5$ $\leq 62,5$	задовољава
ХЕМИЈСКА СВОЈСТВА				
Нерастворени остатак	%	0,25	-	-
Губитак жарењем	%	4,47	-	-
SO ₃	%	2,25	≤ 4	задовољава
Cl	%	0,02	$\leq 0,1$	задовољава
САСТАВ (САДРЖАЈ САСТОЈАКА У ЦЕМЕНТУ)				
Клинкер	%	задовољава	80-94	задовољава
Регулатор времена везивања	%			
Кречњак	%	-	6-20	задовољава
Згура	%	-	-	-
Пуцолан	%	-	-	-



Табела 7.8 Састав, физичко-механичке и хемијске карактеристике СЕМ III/B 32,5 N-LH/SR произвођача CRH (Србија) д.о.о. Поповац

Врста испитивања	Јединица мере	Резултат испитивања	Услов квалитета према стандарду	Оцена квалитета
ФИЗИЧКА И МЕХАНИЧКА СВОЈСТВА				
Време везивања	min	180	почетак $\geq 75\text{min}$	задовољава
Експанзија Le Chatelier	mm	0,5	≤ 10	задовољава
Топота хидратације	J/g	168	≤ 270	задовољава
Чврстоћа при притиску након 7 дана	MPa	20,1	≥ 16	задовољава
Чврстоћа при притиску након 28 дана	MPa	47,9	$\geq 32,5$ $\leq 52,5$	задовољава
ХЕМИЈСКА СВОЈСТВА				
Нерастворени остатак	%	1,25	≤ 5	задовољава
Губитак жарењем	%	0,00	≤ 5	задовољава
SO ₃	%	1,17	$\leq 3,5$	задовољава
Cl	%	0,02	$\leq 0,1$	задовољава
САСТАВ (САДРЖАЈ САСТОЈАКА У ЦЕМЕНТУ)				
Клинкер	%	задовољава	20-34	задовољава
Регулатор времена везивања	%			
Кречњак	%	-	није прописан	-
Згура	%	задовољава	66-80	задовољава
Пуцолан	%	-	није прописан	-

7.2.8 Алкални активатори

Као алкални активатори за справљање геополимерних малтера и бетона коришћени су натријум силиката и натријум хидроксида. Натријум силикат је производ Galenika-Magmasil Д.О.О. Србија. Коришћени материјал био је у течном агрегатном стању и следећег хемијског састава: SiO₂ – 26.70%, Na₂O – 13.30% и H₂O – 60% (модул Ms SiO₂/Na₂O=2,2). Натријум хидроксид је производ Oltchim S.A. из Румуније, набављен је од локалног дистрибутера “Arihem” д.о.о. Ниш из Ниша. Испитивања натријум хидроксида извршио је произвођач према стандарду ASTM E291 – 18 [239], а резултати



хемијских својстава дати су у табели 7.9. На основу резултата испитивања може се закључити да испитивани натријум хидроксид испуњава захтеване услове квалитета.

Растварање натријум хидроксида извршено је 24 часа пре коришћења. Растварање је извршено у води и том приликом створен је раствор концентрације 10 М. Сједињавање алкалних активатора извршено је 30 минута пре справљања малтерских и бетонских мешавина. Течни раствори натријум силиката и натријум хидроксида помешани су у пројектованој масеној размери како би се створио јединствени активатор са садржајем 10% Na₂O у односу на масу употребљеног везивног материјала. Оваквa масени садржај утицао је на снижење модула M_s у натријум силикату до вредности 1,5. Алкални раствори помешани у оваквом односу коришћени су за справљање свих геополимерних мешавина.

Табела 7.9 Хемијски састав натријум хидроксида произвођача Oltchim S.A. из Румуније

Врста испитивања	Јед. мере	Резултат испитивања	Услов квалитета према стандарду	Оцена квалитета	Стандард
NaOH	%	98,5	> 98	задовољава	STAS 3068
Na ₂ CO ₃	%	0,34	≤ 0,7	задовољава	STAS 3068
NaCl	%	0,016-0,017	≤ 0,15	задовољава	ASTM E 291
F ₂ O ₃	%	0,0007-0,0005	≤ 0,004	задовољава	STAS 3068

7.2.9 Вода

За справљање малтера и бетона користила се пијаћа вода из градског водовода тако да посебна испитивања њених карактеристика нису рађена.

7.2.10 Адитив - суперпластификатор Sika ViscoCrete 5380

У циљу побољшања конзистенције малтера коришћен је адитив суперпластификатор комерцијалног назива Sika ViscoCrete 5380 (слика 7.17).

Према техничком листу произвођача [199] овај адитив се дефинише као снажан суперпластификатор за справљање висококвалитетних бетоне. Базира се на воденом раствору поликарбоксилатних полимера. Погодан је за справљање смеша код којих је неопходно извршити редукацију воде. Поред тога, погодан је и за повећање почетне и крајње чврстоће, справљање префабрикованих бетонских елемената, справљање бетона на градилишту, бетоне чија је уградња пумпањем или класично, бетоне код којих се захтева смањена пропусност воде. Густина адитива је 1,08 ± 0,02 kg/l при температури

20 °С. Адитив у свом саставу не садржи јоне хлорида. Дозира се у распону 0,3 – 2,0 % у односу на масу цемента. Боја адитива је тамно жута, док рН вредност износи 5,0±1 при температури од 20 °С.



Слика 7.17 Суперпластификатор комерцијалног назива *Sika ViscoCrete 5380*

7.2.11 Агрегат

За експериментално истраживање коришћени су речни и дробљени агрегат. Као ситна фракција (прва фракција агрегата – 0/4 mm) коришћен је агрегат из Јужне Мораве са сепарације „Браћа Цветковић“ из Топонице. Као крупан агрегат (друга и трећа фракција агрегата 4/8 mm и 8/16 mm) коришћен је агрегат добијен дробљењем магматске стене габро из каменолома „Раков дол“. Извршена су испитивања одређених својстава агрегата чији су резултати дати у табелама 7.10 и 7.11.



Табела 7.10 Резултати испитивања својстава речног агрегата фракције 0/4 mm пореклом из Јужне Мораве

Испитивање	Јединица мере	Резултат	Услов квалитета према стандарду
Физичко – механичка својства агрегата			SRPS B.B2.010 SRPS B.B3.100
Обавијеност површина зрна SRPS B.B8.004:повучен	-	необавијена	необавијена
Садржај сумпора SO₃ SRPS B.B8.042:повучен	%	0,010	максимално 1.0
Садржај хлорида Cl SRPS B.B8.042:повучен	%	0.003	преднапрегнути бетон мах 0,02 армирани бетон мах 0,1
Садржај органских материја SRPS B.B8.039:повучен	-	нема	нема
Насута запремина у растреситом стању SRPS ISO 6782:1999	kg/m ³	1550	није прописано
Насута запремина у збијеном стању SRPS ISO 6782:1999	kg/m ³	1640	није прописано
Постојаност на дејство мраза, 5 циклуса у Na₂SO₄ SRPS B.B8.044:повучен	%	2,11	максимално 12
Садржај лаких честица SRPS B.B8.034:повучен	%	0,0	бетон чији услов квалитета није услов површине мах 1 бетон чији је изглед површине услов квалитета мах 0,5
Хемијска својства			SRPS B.B2.009:1986
Садржај сулфата SO₃	%	0,01	укупно сумпор као SO ₃ мах 1
Садржај сулфида S²⁻	%	није доказан	
Садржај хлорида Cl	%	0,003	преднапрегнути бетон мах 0,02 армирани бетон мах 0,10



Табела 7.11 Резултати испитивања својстава дробљеног агрегата сепарације
„Раков дол“

Испитивање	Јединица мере	Резултат		Услов квалитета према стандарду
		4/8 mm	8/16 mm	
Физичко – механичка својства агрегата				SRPSB.B2.010
Садржај органских нечистоћа SRPS U.B1.024	%	-	-	максимално 0,3
Упијање воде SRPS ISO 6783:1999		0,51	0,41	За фракцију 4/8 максимално 1,6
Постојаност на дејство мрза, 5 циклуса у Na ₂ SO ₄ SRPS B.B8.044 повучен	%	1,28	1,02	Еруптивни камен максимално 3 карбонатни камен максимално 5
Садржај слабих зрна SRPS B.B8.037 повучен	%	0,00	0,00	максимално 3
Садржај грудви глине SRPS B.B8.038 повучен	%	0,00	0,00	< 4 mm: 3 > 4 mm: 0,25
Облик зрна SRPS B.B8.048 повучен	%	13,2	13,55	максимално 20
Отпорност против дробљења и хабања „Лос Анђелес“ SRPS B.B8.045 повучен	%	11,6 (градација „Ц“)		Еруптивни камен максимално 16,18,22 карбонатни камен максимално 25,28,30
Полирност SRPS B.B8.120 повучен	ВПК	55		Еруптивни камен минимално 45,48 карбонатни камен минимално 25,28,30 Базалт минимално 45
Садржај дробљених зрна SRPS B.B8.004:повучен	%	100	100	дробљени камен минимално 100
Хемијска својства				SRPS U.E4.014:1990
Садржај органских материја SRPS U.B81.024	%	0,11		Максималано 0,30 %

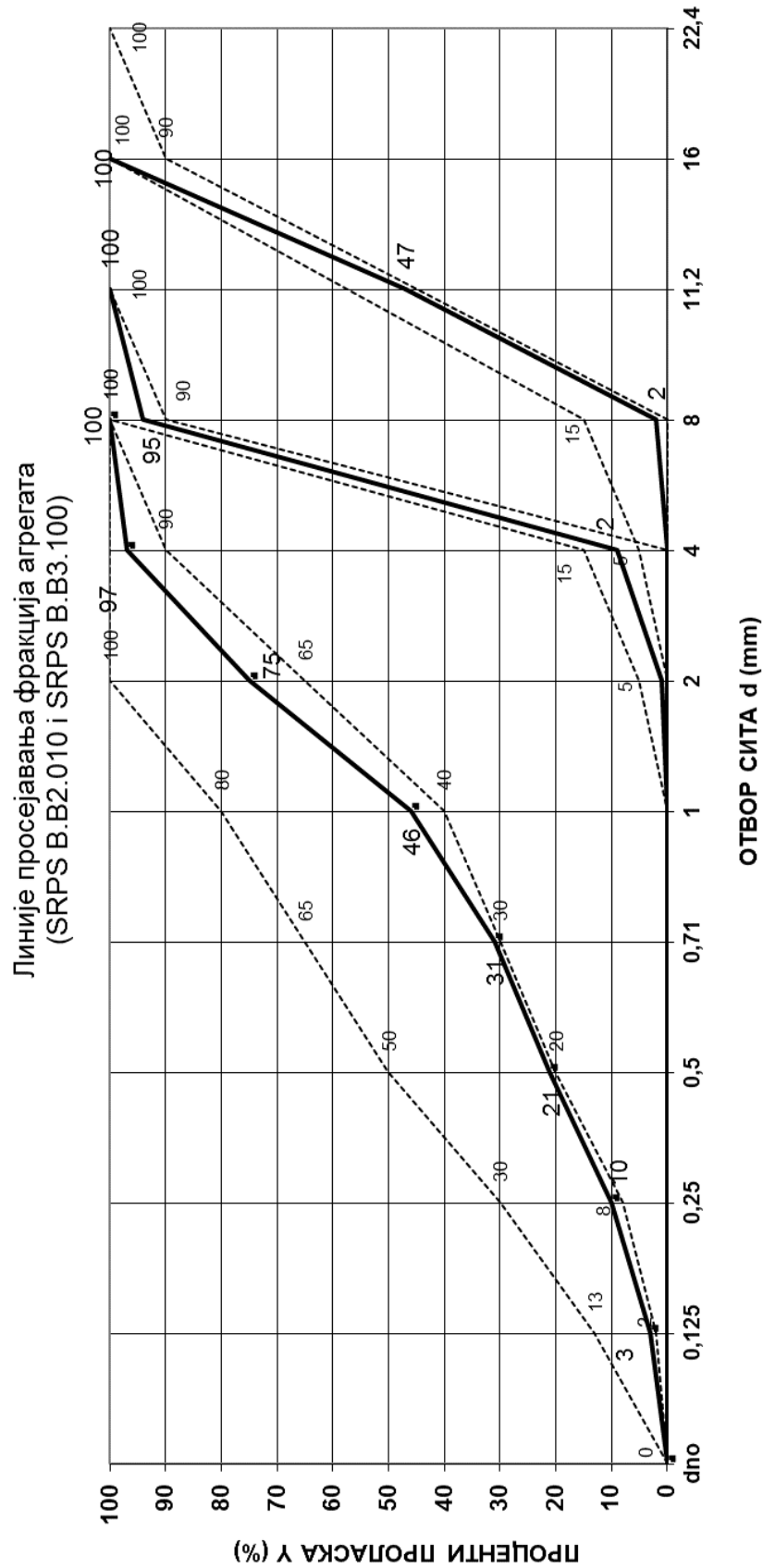


Гранулометријски састав фракција агрегата одређен је методом сувог сејања у свему према стандарду SRPS EN 933-1:2013 [240]. Проенти проласка фракција дати су у табели 7.12, док је гранулометријски састав фракција 0/4, 4/8 и 8/19 дат на слици 7.18.

На основу резултата испитивања датих у табелама 7.10, 7.11 и 7.12, као и на слици 7.18 закључује се да испитиване фракције речног агрегата испуњавају услове квалитета захтеване стандардима SRPS B.B2.010:1986 [241] и SRPS B.B3.100:1983 [242].

Табела 7.12 Гранулометријски састав фракција коришћених агрегата

Фракција	Проенти проласка на сити (mm)											
	0,125	0,25	0,50	0,71	1	2	4	8	11,2	16	22,4	31,5
0/4	3	10	21	31	46	75	97	100	100	100	100	100
4/8	0	0	0	0	0	1	9	94	100	100	100	100
8/16	0	0	0	0	0	0	0	2	47	100	100	100



Слика 7.18 Гранулометријски састав фракције 0/4 mm сепарације „Браћа Цветковић“ и фракција 4/8 и 8/16 mm сепарације „Раков Дол“



7.3 Састав малтерских мешавина

У циљу утврђивања утицаја индустријских нуспроизвода (млене гранулисане згуре из високе пећи, конверторске згуре, пепела из дрвне биомасе, црвеног муља и отпадног стакла) на перформансе геополимерних малтерских мешавина на бази електрофилтерског пепела извршена је замена основног везива. Сви геополимерни малтери израђени су са истом количином везива, агрегата, алкалних активатора и воде. Као основно везиво за справљање геополимера коришћен је електрофилтерски пепео, а његова делимична или потпуна замена извршена је при проценто - масеном износу од 5 – 100 %. Замена електрофилтерског пепела у малтерским мешавинама справљеним са додацима попут: конверторске згуре, пепела из дрвне биомасе, црвеним муљем и отпадним стаклом кретала се у процентно-масеном износу од 5 % до 20 %. Замена електрофилтерског пепела млевеном гранулисаном згуром из високе пећи кретала се у процентно-масеном износу од 20 % до 100 %. Једна малтерска мешавина направљена је само са електрофилтерским пепелом као везивом и она се назива еталон геополимерном малтерског мешавином. Код двадесет две малтерске мешавине индустријски нуспроизводи су коришћени као везивни материјали, док је код две мешавине цемент коришћен као једино везиво. У складу са процентуалним учешћем додатка и његовим енглеским називом формиране су ознаке малтерских серија. Као ознака електрофилтерског пепела коришћена је ознака „FA“ (fly ash), мешавине геополимерног малтера справљеног са гранулисаном згуром из високе пећи имају ознаку - „GGBFS“ (енг. ground granulated blast furnace slag), конверторска згура - „SS“ (енг. steel slag), пепео из дрвне биомасе - „BIO A“ (енг. bio ash), црвени муљ – „RM“ (енг. red mud) и отпадно стакло – „G“ (енг. glass). Малтер справљен са цементом CEM II A-L 42,5R назван „Е II“, док је малтер справљен са цементом CEM III/B 32,5 N-LH/SR назван је „Е III“.

Течни раствори натријум силиката и натријум хидроксида помешани су у масеном односу 100:18.52 (тј. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 5,40$). Овакав однос раствора довео је до стварања јединственог активатора са садржајем 10% Na_2O у односу на масу чврстог везива (10 % од 450 g тј. 45 g). То је утицао на снижење модула M_s ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) у натријум силикату до вредности од 1,5. Алкални раствори сједињени су 30 минута пре употребе. Овакав однос течне и чврсте фазе коришћен је при справљању свих геополимерних малтерских мешавина.



Водовезивни фактор (w/b) је код геополимерних мешавина је био 0.41. Суперпластификатор „Sika ViscoCrete 5380“ је додаван малтеру како би све мешавине имале исто распрострањање приликом испитивања конзистенције на потресном столу (распротирање 130 ± 10 mm). Коришћен је ситнозрни речни агрегат фракције 0/4 mm. У табели 7.13 дат је састав експерименталних малтерских мешавина.

Табела 7.13 Састав експерименталних малтерских мешавина

БР.	ОЗНАКА МАЛТЕРА	САСТАВ [g]								SP [%]	w/b
		ФА	ДОДАТАК	СЕМ II 42,5 R	СЕМ III 32,5 N	Песак	Вода	NaOH 10 M	Na ₂ SO ₄		
ЕЛЕКТРОФИЛТЕРСКИ ПЕПЕО - FA											
1	FA	450	0	-	-	1350	20	56,16	303,23	2	0,43
ГРАНУЛИСАНА ЗГУРА ВИСОКЕ ПЕЊИ – GGBFS											
2	20 GGBFS	360	90	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,5	0,42
3	40 GGBFS	270	180	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,4	0,42
4	60 GGBFS	180	270	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,2	0,42
5	80 GGBFS	90	360	-	-	1350	20	56,16	303,23	1	0,42
6	100 GGBFS	0	450	-	-	1350	20	56,16	303,23	0,8	0,42
ЧЕЛИЧАНСКА (КОНВЕРТОРСКА) ЗГУРА - SS											
7	5 SS	427,5	22,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,5	0,42
8	10 SS	405	45	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,2	0,42
9	15 SS	382,5	67,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,0	0,42
10	20 SS	360	90	-	-	1350	20	56,16	303,23	0,8	0,42
ПЕПЕО ИЗ БИОМАСЕ – BIO A											
11	5 BIO A	427,5	22,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	0,8	0,42
12	10 BIO A	405	45	-	-	1350	20	56,16	303,23	0,6	0,42
13	15 BIO A	382,5	67,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	-	0,41
14	20 BIO A	360	90	-	-	1350	20	56,16	303,23	-	0,41
ЦРВЕНИ МУЉ - RM											
15	5 RM	427,5	22,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	0,3	0,41
16	10 RM	405	45	-	-	1350	20	56,16	303,23	-	0,41
17	15 RM	382,5	67,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	-	0,41
18	20 RM	360	90	-	-	1350	20	56,16	303,23	-	0,41
ОТПАДНО СТАКЛО - G											
19	5 G	427,5	22,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,5	0,42
20	10 G	405	45	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,3	0,42
21	15 G	382,5	67,5	-	-	1350	20	56,16	303,23	1,2	0,42
22	20 G	360	90	-	-	1350	20	56,16	303,23	1	0,42
ЦЕМЕНТ - E											
23	E II	-	-	450	-	1350	225	-	-	0,2	0,50
24	E III	-	-	-	450	1350	225	-	-	0,5	0,51

Алкални активатори у течном стању (натријум хидроксид и натријум силикат), вода и адитив мешани су у лабораторијском малтерском миксеру у трајању од 5 min брзином од 145 обртаја у минути. Након сједињавања течне фазе, додат је ситнозрни агрегат након чега је због постизања боље хомогености мешање настављено истом брзином још 5 min. На припремљеном малтеру најпре су испитиване карактеристике у свежем стању, након чега је он уграђен у троделни метални калуп збијајући малтер на вибростолу. Након справљања калупи су због губитка влаге умотани у пластичну фолију. Након два дана узорци су извађени из калупа и поново умотани у пластичну фолију. Овако припремљени узорци су до времена испитивања неговани на стандардној лабораторијској температури.

Мешавине цементног малтера справљене су у свему према стандарду SRPS EN 196-1:2017 [202]. Најпре је извршено справљање цементне пасте, након чега је додат песак. Овако хомогенизовани малтер је затим уграђен у металне калупе и првих 24 h негован је у клима комори (при температури од $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$ и влажности ваздуха од 95 %). Узорци су затим извађени из калупа, а до тренутка испитивања неговани у кречњачкој води.

Справљање свих малтерских мешавина вршено је у Лабораторији за грађевинске материјале, Грађевинско-архитектонског факултета у Нишу. За справљање малтера коришћен је лабораторијски миксер "Hobart N-50" (слика 7.19).

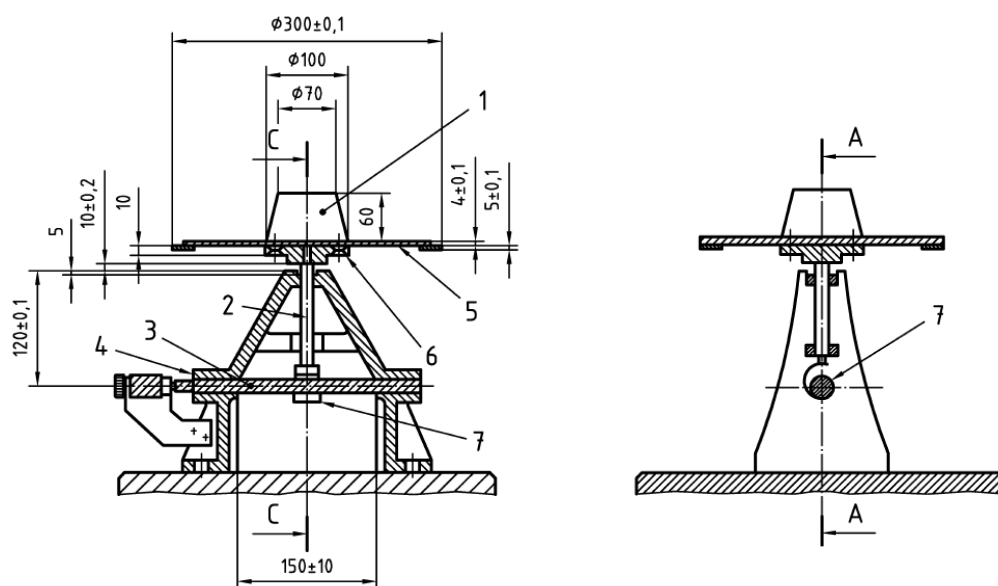


Слика 7.19 Лабораторијски миксер "Hobart N-50"

7.4 Испитивање малтера у свежем стању

7.4.1 Испитивање конзистенције на потресном столу

Одређивање конзистенције малтера извршено је коришћењем стандарда SRPS EN 13395-1:2010 [198]. За испитивање су коришћени метални калуп и потресни сто (слика 7.20) који испуњавају услове из стандарда SRPS EN 1015-3:2008 [243]. Метални калуп је конусног облика, пречника 70 mm и 100 mm.



Слика 7.20 Шематски приказ потресног стола за испитивање распрострањања малтера за зидање: 1- метални калуп, 2-ветикално вратило, 3-плоча стола, 4-механизам за подизање, 5 – мерна површина, 6- хоризонтално вратило, 7-ручица (димензије дате на шеми су у mm)[243]

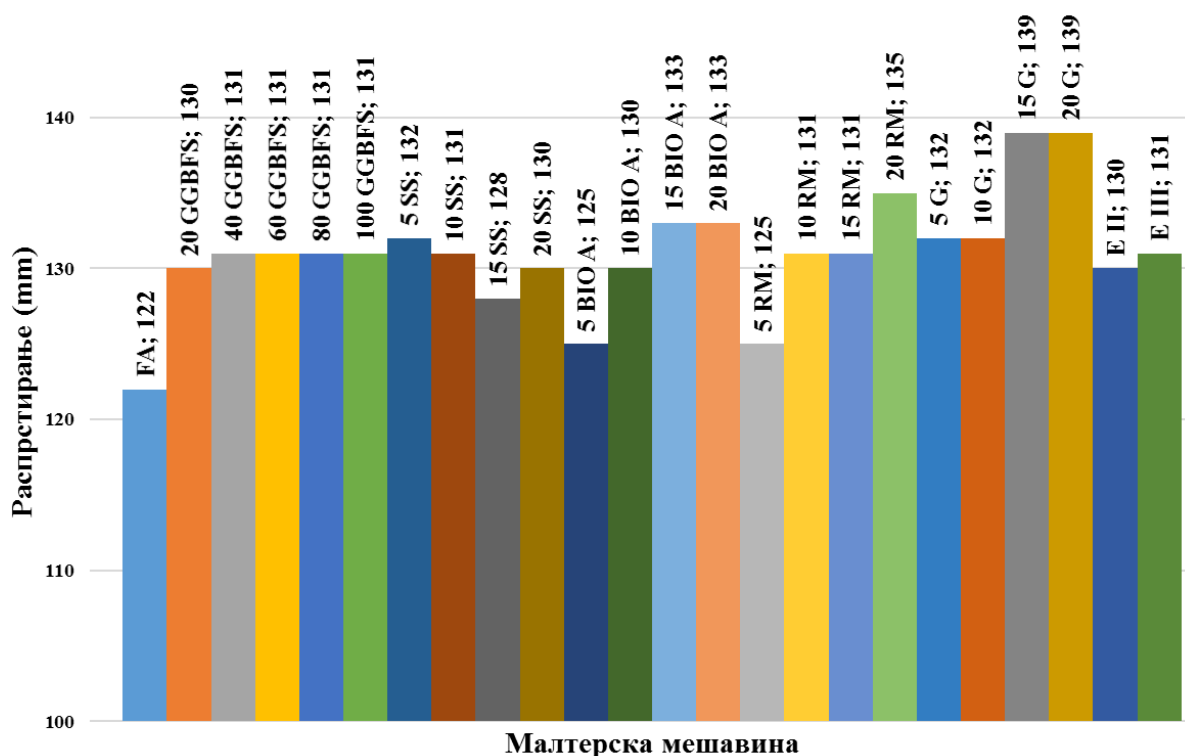
Након 10 ± 5 min од справљања малтера вршено је мерење распрострањања. Поступак испитивања подразумевао је пуњење оквашеног металног конуса који је постављен на средину оквашеног потресног стола. Пуњење је вршено уливањем најпре једног слоја малтера. Овако уливен слој малтера збијан је утискивачем од неупијајућег материјала пречника 40 ± 1 mm, дужине 200 ± 10 mm и масе $0,250 \pm 0,015$ kg. Након збијања, уливен је и други слој тако да метални конус буде испуњен малтером по целој висини. Затим је извршено збијање другог слоја малтера након чега је обрисана површина око конуса. Приликом уливања и набијања малтера одржавана је вертикалност металног конуса тако да не дође до губљења материјала. Конус је затим подигнут вертикално навише и по истеку времена од 30 секунди пусти се да потресни сто слободно пада са висине од 1 cm и то 15 пута за 15 секунди. Након завршеног потресања вршено је мерење распрострањања малтера у два управна правца. Мерење је



вршено дигиталним помичним мерилом тачности 0,01 mm. У табели 7.14 дате су средње вредности распрострањања испитиваних геополимерних и цементних малтера док је графички приказ добијених резултата дат на слици 7.21. Фото приказ изглед свих испитиваних узорака дат у прилогу 1.

Табела 7.14 Резултати испитивања конзистенције малтера методом потресног стола

Ознака малтерске мешавине	Распрострањање на потресном столу (mm)
FA	122
20 GGBFS	130
40 GGBFS	131
60 GGBFS	131
80 GGBFS	131
100 GGBFS	131
5 SS	132
10 SS	131
15 SS	128
20 SS	130
5 BIO A	125
10 BIO A	130
15 BIO A	133
20 BIO A	133
5 RM	125
10 RM	131
15 RM	131
20 RM	139
5 G	132
10 G	132
15 G	139
20 G	139
E II	130
E III	131
<u>Услов квалитета:</u> Течна конзистенција	> 200
Пластично-течна конзистенција	140 – 200
Пластична конзистенција	< 140



Слика 7.21 Приказ мере распрострањања малтера у mm

Све испитиване малтерске мешавине показале су приближно исту вредност распрострањања. Смањење процентно – масеног удела електрофилтерског пепела у мешавини утицало је на смањену потребу за суперпластификатором. Најмања вредност распрострањања измерена је на мешавини еталона „FA“ и износи 122 mm. Разлог може бити већа порозност зрна електрофилтерског пепела - види се са SEM анализе - већа порозност значи и веће упијање воде. Облик зрна електрофилтерског пепела је сферносиметричан, док врло мали број честица има оштре ивице. По природи ствари, овакав облик честица олакшава покретање мешавине. Међутим, таквих честица је много па је потреба за оквашавањем зрна већа. Електрофилтерски пепео садржи већи број ситнијих честица у односу на друге материјале те захтева већу количину воде за оквашавање зрна. Како је при справљању малтера ознаке „FA“ додат максимални проценат адитива (2 %) жељену конзистенцију је било једино могуће добити додавањем воде. Ипак, позната је чињеница да већи садржај воде у мешавини директно утиче на обрадљивост, али и на смањење вредности чврстоће. Сходно томе одлучено је да се водовезивни фактор одржи константним. Са овим се слажу и Nath, Fang и Kayali и Vakharev [82][244][245]. Наиме, према Fang и Kayali око 10,74 % садржаја воде остаће заробљено у геополимерним мешавинама чак и након излагања геополимера



температури од 105 °C у трајању од 48 сати. Свој став изнео је и Bakharev. Наиме, вода је важна за одвијање процеса кристализације записане у облику $M_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ и $M_2O-CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ система. Вишак воде имаће негативан ефекат на развој чврстоћа тј. довешће до стварања дисконтинуалних пора и формирања материјала слабије структуре. Ову тврдњу потврдио је и P. Nath у својој докторској дисертацији. На геополимерним малтерима справљеним са 10 % гранулисане згуре из високе пећи, чврстоћа при притиску узорака старости 3 дана до 91 дана је рапидно опадала при повећању водовезивног фактора са 0,180 на 0,197, 0,215 и 0,232.

Површина зрна млевене гранулисане згуре из високе пећи, конверторске згуре, пепела из дрвне биомасе и црвеног муља су порозне, те је и упијање воде веће. По логици ствари, кретање честица храпавије површине је теже. Сходно томе задато распрострањавање малтера справљеног са додацима контролисано је варирањем процентуалног садржаја адитива.

Највећа вредност распрострањања измерена је код мешавина справљених са додатком стакла „15 G“ и „20 G“ и износи 139 mm у оба случаја. Разлог за овакве резултате може се такође потражити у претходно спроведеној SEM анализи али и то што је стакло непорозно и не упија воду.. Наиме честице стакла, иако полиедарске структура услед процеса млевења, задржале су површинску глаткоћу. Сходно томе могуће је да течна фаза не пријања добро за зрна везива тако да она боље клизе кроз матрицу. Ипак и друге две мешавине ознаке „5 G“ и „10 G“ справљене са 5 % и 10 % отпадног стакла испуниле су захтеве у погледу задате конзистенције.

Генерално, на основу резултата испитивања конзистенције геополимерних малтера може се закључити следеће:

- Смањење садржаја електрофилтерског пепела, редукује потребу за употребом суперпластификатора и воде.
- Мерењем распрострањавања геополимерног малтера утврђено је да највећи утицај на распрострањавање има процентуални садржај електрофилтерског пепела, док остали додаци у мањој мери утичу на ову карактеристику.
- Смањењем процентуално - масеног удела електрофилтерског пепела у мешавини повећава се обрадљивост малтера.
- Микроструктуралне карактеристике утичу на резултате испитивања па стога честице глатке површине позитивно утичу на конзистенцију малтера.



7.4.2 Испитивање запреминске масе у свежем стању

Испитивање запреминске масе свежег малтера извршено је према стандарду SRPS EN 1015-6:2008/A1:2008 [201]. За испитивање је коришћен литарски суд чија је првобитна намена испитивање садржаја увученог ваздуха у свежем малтеру. Направљен је малтер у количини 1,5 пута већој од запремине суда за испитивање. Малтер је уливен у суд до формирања купасте површине након чега је вршено вибрирање на потресном столу фреквенције 50 Hz и амплитуде 0,375 mm. Током поступка вибрирања дошло је до слегања малтера па је непрестано вршено његово додавање. Овај поступак је понављан докле год висина малтера није била изнад горње површине суда. Након завршетка процеса вибрирања извршено је уклањање вишка малтера и глачање горње површине. Суд је затим детаљно обрисан и приступило се мерењу. За мерење је коришћена лабораторијска вага задовољавајуће тачности (до 1 g) а резултати испитивања дати су у табели 7.15.



Табела 7.15 Резултати испитивања запреминске масе свежег малтера

Ознака малтерске мешавине	Запреминска маса свежег малтера (kg/m^3)
FA	2170
20 GGBFS	2210
40 GGBFS	2220
60 GGBFS	2235
80 GGBFS	2250
100 GGBFS	2280
5 SS	2180
10 SS	2220
15 SS	2250
20 SS	2270
5 BIO A	2170
10 BIO A	2175
15 BIO A	2175
20 BIO A	2175
5 RM	2175
10 RM	2185
15 RM	2195
20 RM	2200
5 G	2180
10 G	2190
15 G	2195
20 G	2220
E II	2290
E III	2275

Запреминска маса цементних мешавина већа је од запреминске масе геополимерних малтера. Разлог тога је већа специфична маса цемента у односу на везивне материјале коришћених за справљање геополимерних мешавина. Највећу вредност запреминске масе има мешавина малтера справљена само са гранулисаном згуром из високе пећи ознаке „100 GGBFS“. Запреминска маса овог малтера износи 2280 kg/m^3 . Велику вредност запреминске масе има и серија ознаке „20 SS“ код које је основно везиво замењено са 20 % конверторске згуре. Запреминска маса мешавине „20 SS“ је само 10 kg/m^3 мања од мешавине „100 GGBFS“. Разлика у запреминским масама малтерских мешавина јавља се због разлике у специфичним масама гранулисане згуре



високе пећи, конверторске згуре и електрофилтерског пепела које износе 2850 kg/m^3 , 3450 kg/m^3 и 2240 kg/m^3 , респективно. Евентуално повећање садржаја конверторске згуре значајно би утицало на повећање запреминске масе малтера справљеног са овим додатком.

Најмања вредност запреминске масе измерена је код еталона „FA“ и малтера ознаке „5 ВЮ А“ која је справљена са електрофилтерским пепелом и 5 % пепела из дрвне биомасе. Минимална промена у запреминским масама последица је мале разлике у специфичним масама електрофилтерског пепела и пепела из дрвне биомасе које износе 2240 kg/m^3 и 2320 kg/m^3 , респективно.

На основу резултата испитивања може се закључити да се запреминска маса малтера у свежем стању мења у складу са повећањем процентуално - масеног удела додатка у мешавини, а у основи она је у директној вези са специфичном масом коришћеног везива.

7.5 Испитивање малтера у очврслном стању

7.5.1 Испитивање чврстоће при притиску

Испитивање чврстоће при притиску извршено је према стандарду SRPS EN 196-1:2017 [202]. Испитано је по шест узорак сваке мешавине како би се одредила вредност чврстоће при притиску малтера старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана. Испитивање је извршено на хидрауличној преси марке „UTEST UTCM – 6710“ (слика 7.22) која има тачност мерења до 0,5 %. За испитивање чврстоће при притиску коришћене су половине призми на којима је претходно одређена чврстоћа при савијању. Чврстоћа при притиску ($f_{p,i}$) срачуната је према познатом обрасцу (7.1). Процентуална разлика чврстоће при притиску ($\Delta f_{p,i(t)}$) срачуната је у односу на еталон малтер ознаке „FA“ према обрасцу (7.2). Резултати испитивања представљени су на сликама 7.23-1 до 7.23-7 и у табелама 7.16-1 до 7.16-7.



Слика 7.22 Испитивање чврстоће при притиску малтера

Чврстоћа при притиску малтера срачуната је према обрасцу:

$$f_{p,i} = \frac{F_p}{A} \left(\frac{N}{mm^2}, MPa \right) \quad (7.1)$$

где је:

F_p - измерена сила при притиску која је изазвала лом призме (N);

A – површина попречног пресека на којој делује сила притиска (mm^2);

$f_{p,i}$ - чврстоћа при притиску ($\frac{N}{mm^2}, MPa$).

Процентуална разлика чврстоће при притиску предметног малтера при различитим срачуната је према обрасцу:

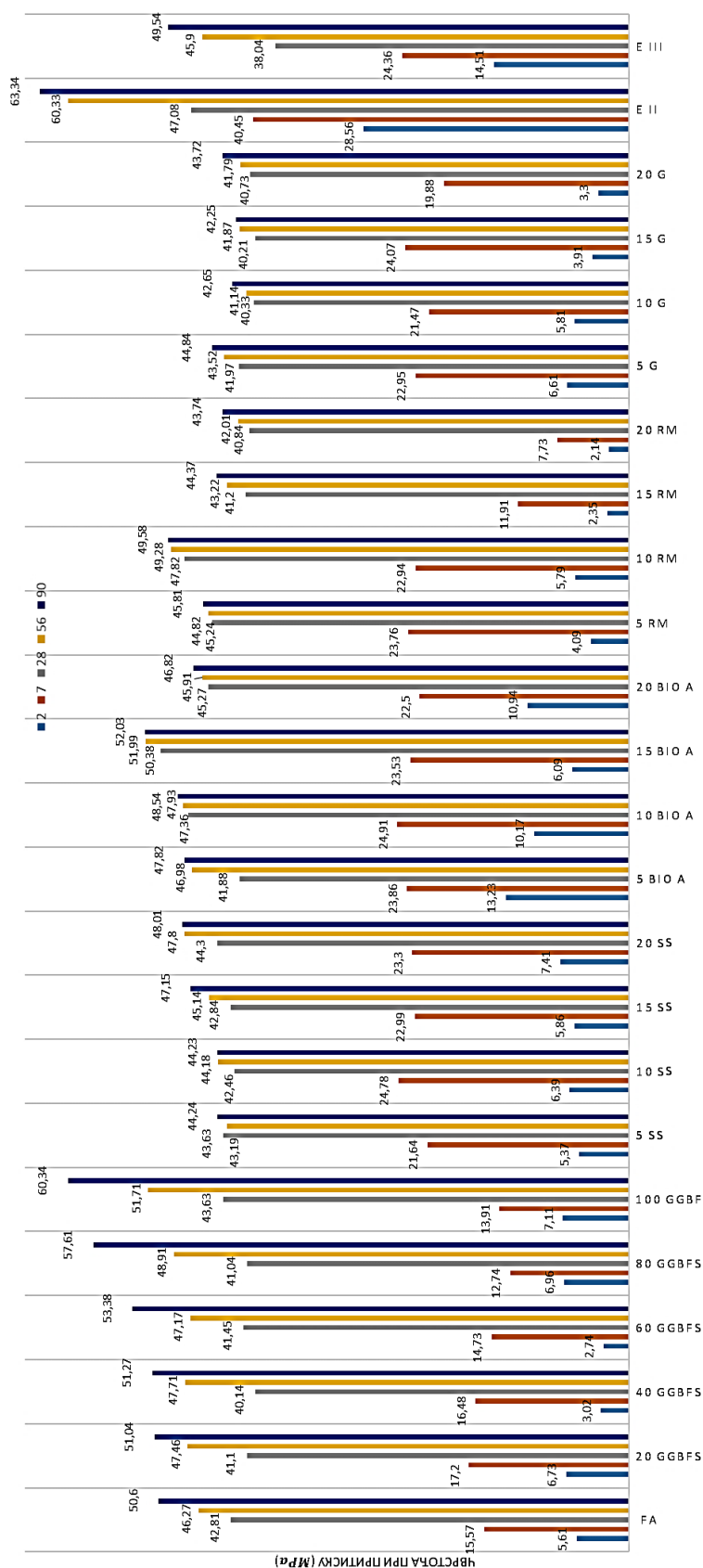
$$\Delta f_{p,i}(t) = \frac{f_p(t) - f_{p,e}(t)}{f_{p,e}(t)} 100(\%) \quad (7.2)$$

где је:

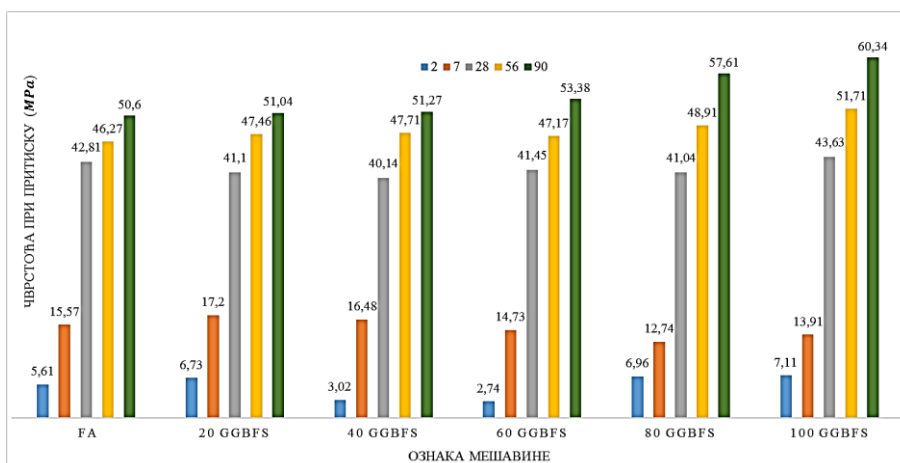
$\Delta f_{p,i}(t)$ – процентуална разлика чврстоће при притиску малтера старости (t) дана;

$f_{p,e}(t)$ – чврстоћа при притиску еталон узорка при старости (t) дана;

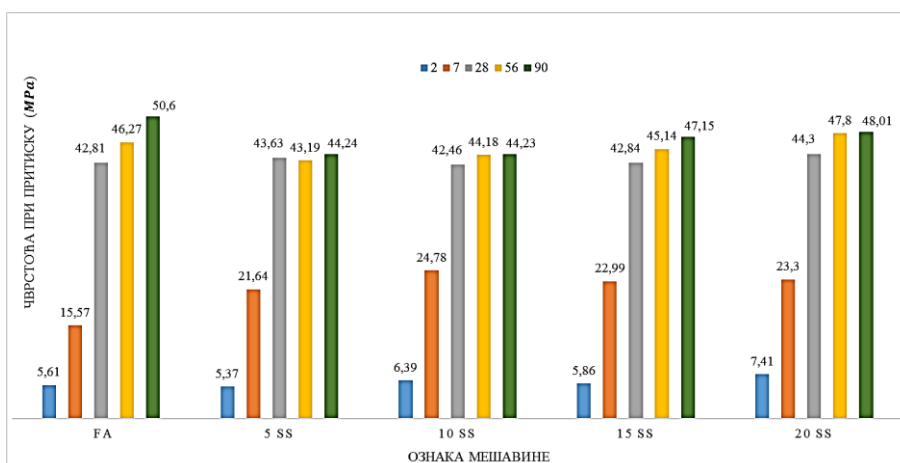
$f_p(t)$ – чврстоћа при притиску посматраног узорка при старости (t) дана.



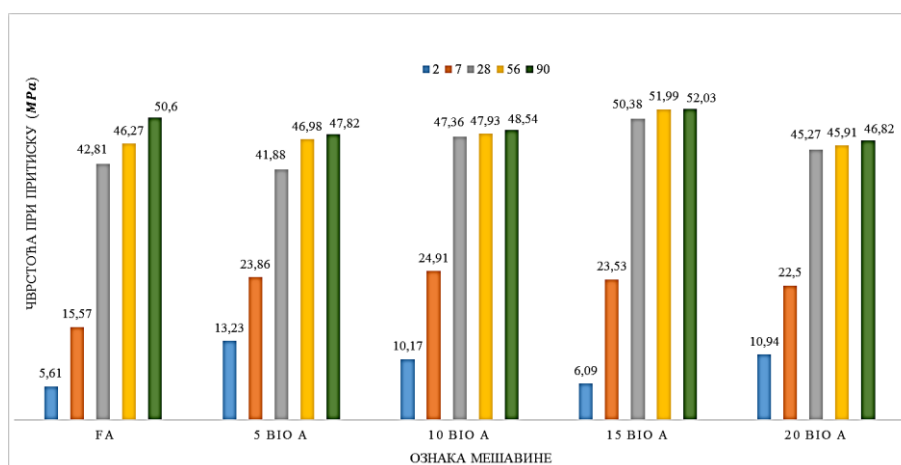
Слика 7.23-1 Приказ чврстоћа при притиску малтера старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана



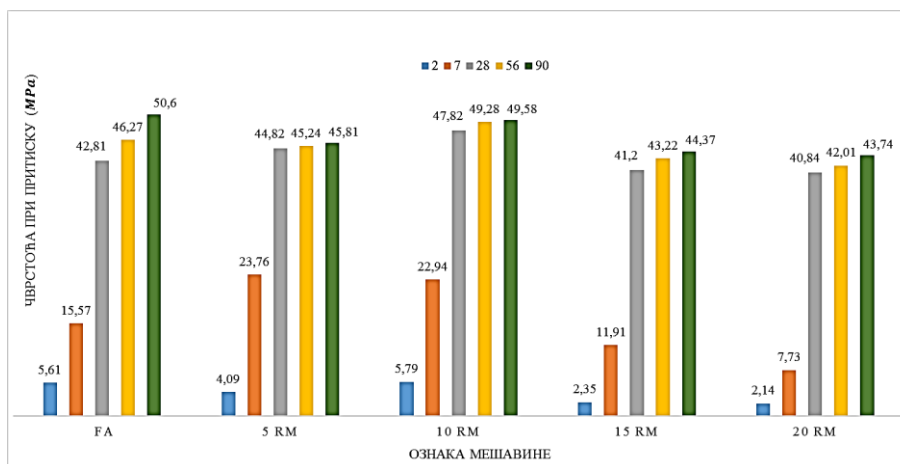
Слика 7.23-2 Приказ чврстоћа при притиску малтера са додатком гранулисане згуре високе пећи старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана



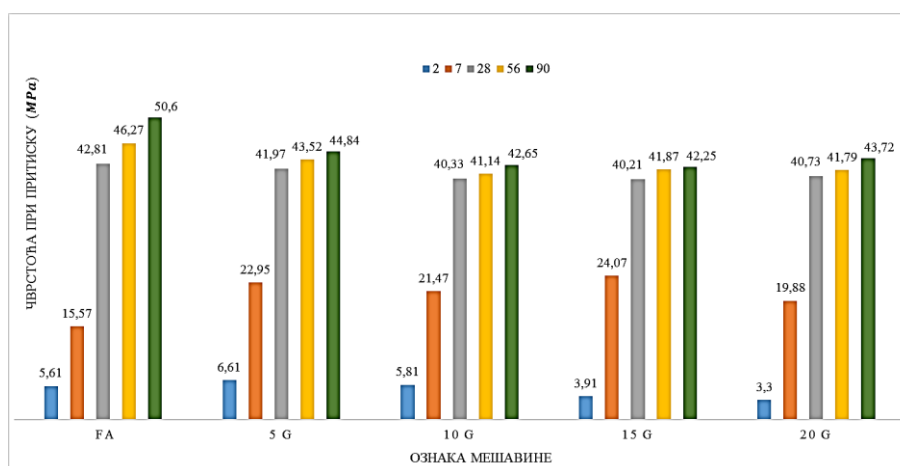
Слика 7.23-3 Приказ чврстоћа при притиску малтера са додатком конверторске згуре старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана



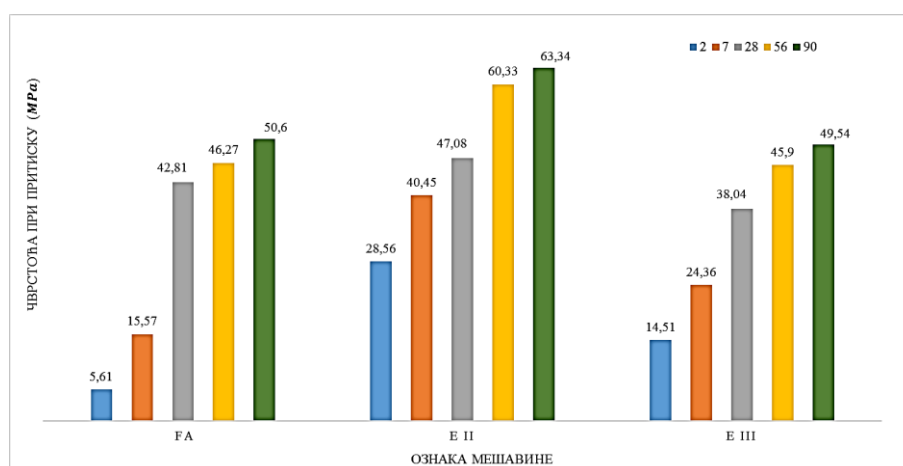
Слика 7.23-4 Приказ чврстоћа при притиску малтера са додатком пепела из дрвне биомасе старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана



Слика 7.23-5 Приказ чврстоћа при притиску малтера са додатком црвеног муља старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана



Слика 7.23-6 Приказ чврстоћа при притиску малтера са додатком отпадног стакла старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана



Слика 7.23-7 Приказ чврстоћа при притиску цементног малтера старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана



Табела 7.16-1

Резултати испитивања чврстоће при притиску малтера

Ознака малтерске мешавине	Чврстоћа при притиску ($\frac{N}{mm^2}, MPa$)				
Старост малтера (дани)				
	2	7	28	56	90
FA	5,61	15,57	42,81	46,27	50,60
20 GGBFS	6,73	17,20	41,10	47,46	51,04
40 GGBFS	3,02	16,48	40,14	47,71	51,27
60 GGBFS	2,74	14,73	41,45	47,17	53,38
80 GGBFS	6,96	12,74	41,04	48,91	57,61
100 GGBFS	7,11	13,91	43,63	51,71	60,34
5 SS	5,37	21,64	43,63	43,19	44,24
10 SS	6,39	24,78	42,46	44,18	44,23
15 SS	5,86	22,99	42,84	45,14	47,15
20 SS	7,41	23,30	44,30	47,8	48,01
5 BIO A	13,23	23,86	41,88	46,98	47,82
10 BIO A	10,17	24,91	47,36	47,93	48,54
15 BIO A	6,09	23,53	50,38	51,99	52,03
20 BIO A	10,94	22,50	45,27	45,91	46,82
5 RM	4,09	23,76	44,82	45,24	45,81
10 RM	5,79	22,94	47,82	49,28	49,58
15 RM	2,35	11,91	41,20	43,22	44,37
20 RM	2,14	7,73	40,84	42,01	43,74
5 G	6,61	22,95	41,97	43,52	44,84
10 G	5,81	21,47	40,33	41,14	42,65
15 G	3,91	24,07	40,21	41,87	42,25
20 G	3,30	19,88	40,73	41,79	43,72
E II	28,56	40,45	47,08	60,33	63,34
E III	14,51	24,36	38,04	45,9	49,54



Табела 7.16-2 Резултати испитивања чврстоће при притиску малтера
справљеног са додатком гранулисане згуре високе пећи

Ознака малтерске мешавине	Чврстоћа при притиску									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)
FA	5,61	0	15,57	0	42,81	0	46,27	0	50,6	0
20 GGBFS	6,73	19,96	17,2	10,47	41,1	-3,99	47,46	2,57	51,04	0,87
40 GGBFS	3,02	-46,17	16,48	5,84	40,14	-6,24	47,71	3,11	51,27	1,32
60 GGBFS	2,74	-51,16	14,73	-5,39	41,45	-3,18	47,17	1,95	53,38	5,49
80 GGBFS	6,96	24,06	12,74	-18,18	41,04	-4,13	48,91	5,71	57,61	13,85
100 GGBFS	7,11	5,65	13,91	-10,66	43,63	1,92	51,71	11,76	60,34	19,25

Табела 7.16-3 Резултати испитивања чврстоће при притиску малтера
справљеног са додатком конвертоске згуре

Ознака малтерске мешавине	Чврстоћа при притиску									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)
FA	5,61	0	15,57	0	42,81	0	46,27	0	50,6	0
5 SS	5,37	-4,28	21,64	38,99	43,63	1,92	43,19	-6,66	44,24	-12,57
10 SS	6,39	13,90	24,78	59,15	42,46	-0,82	44,18	-4,52	44,23	-12,59
15 SS	5,86	4,46	22,99	47,66	42,84	0,07	45,14	-2,44	47,15	-6,82
20 SS	7,41	32,09	23,3	49,65	44,3	3,48	47,8	3,31	48,01	-5,12



Табела 7.16-4 Резултати испитивања чврстоће при притиску малтера
справљеног са додатком пепела дрвне биомасе

Ознака малтерске мешавине	Чврстоћа при притиску									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)
FA	5,61	0	15,57	0	42,81	0	46,27	0	50,6	0
5 BIO A	13,23	135,83	23,86	53,24	41,88	-2,17	46,98	1,53	47,82	-5,49
10 BIO A	10,17	81,28	24,91	59,99	47,36	10,63	47,93	3,59	48,54	-4,07
15 BIO A	6,09	8,56	23,53	51,12	50,38	17,68	51,99	12,36	52,03	2,83
20 BIO A	10,94	95,01	22,5	44,51	45,27	5,75	45,91	-0,78	46,82	-7,47

Табела 7.16-5 Резултати испитивања чврстоће при притиску малтера
справљеног са додатком црвеног муља

Ознака малтерске мешавине	Чврстоћа при притиску									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)
FA	5,61	0	15,57	0	42,81	0	46,27	0	50,6	0
5 RM	4,09	-27,09	23,76	52,60	44,82	4,70	45,24	-2,23	45,81	-9,47
10 RM	5,79	3,21	22,94	47,33	47,82	11,70	49,28	6,51	49,58	-2,02
15 RM	2,35	-58,11	11,91	-23,51	41,2	-3,76	43,22	-6,59	44,37	-12,31
20 RM	2,14	-61,85	7,73	-50,35	40,84	-4,60	42,01	-9,21	43,74	-13,56



Табела 7.16-6 Резултати испитивања чврстоће при притиску малтера
справљеног са додатком отпадног стакла

Ознака малтерске мешавине	Чврстоћа при притиску									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)
FA	5,61	0	15,57	0	42,81	0	46,27	0	50,6	0
5 G	6,61	17,83	22,95	47,40	41,97	-1,96	43,52	-5,94	44,84	-11,38
10 G	5,81	3,57	21,47	37,89	40,33	-5,79	41,14	-11,09	42,65	-15,71
15 G	3,91	-30,30	24,07	54,59	40,21	-6,07	41,87	-9,51	42,25	-16,50
20 G	3,3	-41,18	19,88	27,68	40,73	-4,86	41,79	-9,68	43,72	-13,60

Табела 7.16-7 Резултати испитивања чврстоће при притиску цементног
малтера

Ознака малтерске мешавине	Чврстоћа при притиску									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)	f_p (MPa)	Δf_p (%)
FA	5,61	0	15,57	0	42,81	0	46,27	0	50,6	0
E II	28,56	409,09	40,45	159,79	47,08	9,97	60,33	30,39	63,34	25,18
E III	14,51	158,65	24,36	56,45	38,04	-11,14	45,9	-0,80	49,54	-2,09

Према резултатима испитивања, на промену чврстоће при притиску малтера током времена утицала је врста везивног додатка. Код свих геополимерних мешавина старости 3 и 7 дана вредности чврстоће при притиску су мале, па оне неће посебно детаљно ни бити разматране.

Резултати испитивања чврстоће при притиску геополимерног малтера справљеног са додатком гранулисане згуре високе пећи дати су у табелама 7.16-1 и 7.16-2. Као што је познато, услед очвршћавања малтера справљеног само са електрофилтерским пепелом као везивом јавља се јединствена фаза N-A-S-H гела. У овом случају настаје алуминосиликатни хидрат тродимензионалне структуре [38]. Код мешавине справљене са везивом које у свом хемијском саставу садржи висок проценат СаО (попут гранулисане згуре из високе пећи) долази до појаве C-A-S-H гела (који се разликује нешто нижим односом Са/Si од C-S-H гела присутног код мешавина



справљених са цементом). Међутим, малтери који су справљени комбинацијом ових везива (електрофилтерског пепела и згуре) одликују се појавом обе гелске фазе (овај феномен је детаљно објашњен у поглављу 3). Стога коначан систем последица је стварања С-А-S-Н и N-A-S-Н гела [70]. Том приликом као доминантна јавља се гелска фазе настала активацијом гранулисане згуре.

Као и код малтера справљених са другим везивним додацима, малтери справљени са гранулисаном згуром из високе пећи имају мале почетне чврстоће. При тим старостима најмању вредност чврстоће имају мешавине са процентуално - масеним уделом гранулисане згуре 40 % и 60 % (ознака „40 GGBFS“ и „60 GGBFS“), а до сличних резултата испитивања дошли су и Puertas и други [87] који су вршили испитивања на малтерима справљеним са 50 % гранулисане згуре и 50 % електрофилтерског пепела. У каснијим фазама тј. већ при старости од 28 дана највећа вредност чврстоће при притиску измерена је на мешавини справљеној само са гранулисаном згуром ознаке „100 GGBFS“ и износи 43,36 МПа. Ова вредност чврстоће је за скоро 2 % већа од мешавине „FA“ справљене само за електрофилтерским пепелом као везивом. Тренд раста чврстоће при притиску ове мешавине уочава се и при каснијим старостима од 56 дана и 90 дана при којима чврстоће износе 51,71 МПа и 60,34 МПа, респективно. Важно је напоменути да је при старости од 90 дана чврстоћа при притиску ове мешавине била скоро 20 % виша од мешавине еталона „FA“. Такође, при старости од 56 и 90 дана, код мешавина справљених са 20 % до 80 % згуре (ознаке мешавина „20 GGBFS“, „40 GGBFS“, „60 GGBFS“ и „80 GGBFS“) може се уочити линеаран раст чврстоћа при притиску који делимично одговара проценту замене електрофилтерског пепела гранулисаном згуром. Стога, може се закључити да граулисана згура високе пећи позитивно утиче на пораст чврстоће при притиску и то: у раним старостима малтера од 3 дана и 7 дана са процентом удела од 80 % тј. када је С-А-S-Н гел доминантнији у односу на N-A-S-Н. При каснијим старостима од 28, 56 и 90 дана вредности чврстоће при притиску повећа се па повећањем процентуалне заступљености гранулисане згуре.

Према резултатима испитивања чврстоће при притиску геополимерног малтера (табела 7.16-1 и 7.16-3) старости 28 дана справљеног са додатком конверторске згуре све мешавине су показале приближно исте вредности. Ипак, мешавина „20 SS“ показала је нешто вишу вредност и износи 44,30 МПа што је за око 2,80 МПа мање од мешавине „E II“ и за 3,48 % више од мешавине еталона „FA“. Овакав тренд уочава се и при старости од 56 дана када је на мешавини „20 SS“ измерена чврстоћа од 47,80 МПа. Постигнута



вредност чврстоће при притиску малтера старости 90 дана справљеног само са електрофилтерским пепелом ознаке „FA“ је за око 9 % већа од узорка малтера исте серије старости 56 дана, док је код узорка са додатком конверторске згуре промена чврстоће при притиску при поменутиим старостима тек нешто већа од 2 %. У коначном, може се закључити да конверторска згура позитивно утиче на почетни прираштај притисне чврстоће амбијентално негованих узорка геополимерног малтера сразмерно процентуалном учешћу везива у мешавини. Прираст чврстоћа при притиску након 28 дана је незнатан.

Резултати испитивања чврстоће при притиску геополимерног малтера справљеног са додатком пепела из дрвне биомасе дати су у табелама 7.16-1 и 7.16-4. Према резултатима испитивања малтера старости 3 и 7 дана, може се закључити да додатак пепела из дрвне биомасе позитивно утичу на повећање чврстоће при притиску. При поменутиим старостима, све мешавине справљене са овим додатком оствариле су веће чврстоће при притиску од еталон мешавине ознаке „FA“. Међутим, највећа вредност чврстоће при свим старостима малтера измерена је код мешавине ознаке „15 ВЮ А“. При старости од 28 дана чврстоћа при притиску поменутог малтера износила је 50,38 МПа што је за око 3,3 МПа више од малтера ознаке „Е II“ и за 17,68 % више од еталона. При поменутој старости чврстоће мешавина справљених са додатком 10 % и 20 % пепела из дрвне биомасе биле су такође више од чврстоће еталона. При старости од 56 дана чврстоћа при притиску мешавине „15 ВЮ А“ износила је 51,99 МПа, док је при старости од 90 дана она износила 52,03 МПа. Ове вредности су за око 12,36 % и 2,83 % веће од чврстоће еталона, респективно. Тренд пораста чврстоће са даљим повећањем старости уочава се и код других мешавина, али је он као и код мешавине са 15 % пепела из дрвне биомасе занемарљиво мали у односу на пораст чврстоће при старостима од 3 дана до 28 дана. Измерене вредности показују да једино мешавина справљена „15 ВЮ А“ има већу вредност чврстоће при притиску при свим испитиваним старостима. Идентично испитивање није нађено у литератури, али се резултати испитивања могу повезати са сличним испитивањима других аутора. Наиме, Ван и други [106] дошли су до закључка да повећање процентуалног удела пепела из дрвне биомасе (при чему су коришћени су висококалцијумски пепели из дрвне биомасе и пулверизовани пепео) утиче на тренд повећања чврстоће при притиску до одређеног процента замене након чега долази до смањења притисне чврстоће. Такође, према резултатима испитивања аутора Abdulkareem и други [89] који су испитивали утицај процентуално - масене



замене електрофилтерског пепела пепелом из дрвне биомасе од 0 % до 30 % на чврстоћу при притиску наводи се да је најмању вредност остварила мешавина са 30 % пепела из дрвне биомасе и то при свим испитиваним старостима. Такође, чврстоћа ове мешавине била је нижа од мешавине еталона при свим испитиваним старостима. При старости од 28 дана, мешавина са 10 % замене електрофилтерског пепела пепелом из дрвне биомасе имала је највеће чврстоће. Тумачење резултата аутори повезују са последицама поликондензације (стварање слободне воде) која настаје услед одвијања процеса геополимеризације. При поменутом процесу кретање јона SiO_2 и Al_2O_3 је лакше и поспешује процес геополимеризације. Смањење вредности чврстоће осталих мешавина тумачи се као последица смањења процентно – масеног удела електрофилтерског пепела тј. растворених Si и Al присутних у његовом хемијском саставу.

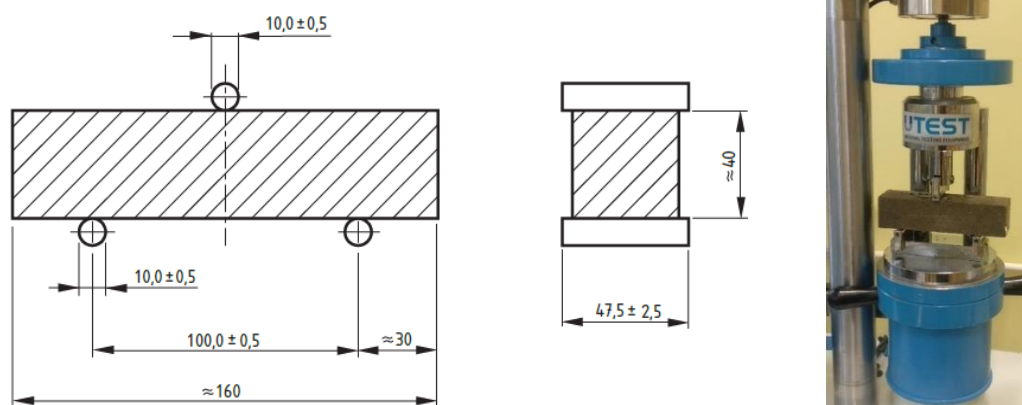
Резултати испитивања чврстоће при притиску геополимерног малтера справљеног са додатком црвеног муља дати су у табелама 7.16-1 и 7.16-5. При старости малтера од 28 дана све мешавине показале су приближно исте вредности. Ипак, мешавина „10 RM“ показала је нешто вишу вредност од 47,82 МПа што је за скоро 12 % више од мешавине еталона „FA“. Прогрес чврстоћа ове мешавине приметан је и при старостима од 56 и 90 дана. Вредност чврстоћа при притиску ове мешавине при овим старостима износила је 49,28 МПа и 49,58 МПа, што је за 6,51 % веће и 2,02 % мање од вредности измерених на еталоне, респективно. При старости малтера од 90 дана све мешавине справљене са додатком црвеног муља имале су мање чврстоће при притиску у односу на еталон малтер.

Резултати испитивања чврстоће при притиску геополимерног малтера справљеног са додатком отпадног стакла дати су у табелама 7.16-1 и 7.16-6. Према резултатима испитивања малтера старости 7 дана може се уочити да све мешавине справљене са додатком отпадног стакла имају веће чврстоће при притиску од геополимерне мешавине справљене без икаквих додатака. Такође, посматрањем вредности приметно је да постоји тренд раста чврстоће при притиску и он је сразмеран проценту замене електрофилтерског пепела отпадним стаклом највише до 15 %. Након тога приметан је пад чврстоћа. При старостима од 28, 56 и 90 дана све мешавине справљене са додатком отпадног стакла имале су мање вредности чврстоће при притиску од мешавине еталона „FA“.

Највећа вредност чврстоће на притисак измерена је на мешавини цементног малтера ознаке „Е II“ и при старости од 90 дана износи 63,34 МПа. Остварена вредност чврстоће била је за 3 МПа већа од чврстоће геополимерног малтера ознаке „100 GGBFS“.

7.5.2 Испитивање чврстоће при савијању

Испитивање чврстоће при савијању ($f_{si, sr}$) вршено је на малтерским призмама димензија $40 \times 40 \times 160$ mm при старости од 2, 7, 28, 56 и 90 дана. Чврстоћа при савијању одређена је према стандарду SRPS EN 196-1:2017 [202]. По три узорка сваке серије испитано је како би се одредила вредност савојне чврстоће при задатим старостима малтера. Испитивање је изведено на хидрауличној преси марке „UTEST UTCM - 6710“ са тачношћу мерења до 0,5 %. Узорак малтерске призме је постављен на ослонце, а затим је оптерећиван силом по средини осовинског растојања. Према стандарду, оптерећење узорака извршено је наношењем јединствене силе прираста од 50 ± 10 N/s. Шематски приказ испитивања дат је на слици 7.24. Узорци малтерских призми су до времена испитивања неговани у амбијенталним условима, били су умотани у пластичну фолију у циљу спречавања губитка влаге. Резултати испитивања чврстоће при савијању $f_{s,i}$ срачунати су према познатом обрасцу (7.3), док је процентуална разлика $\Delta f_{s,i}$ срачуната у односу на еталон малтер (FA) на узорцима свих малтерских мешавина анализираних у овом истраживању одређена према обрасцу (7.4). Графички приказ резултата испитивања дат је на слици 7.25, док је табеларни приказ резултата испитивања дати у табелама 7.17-1 до 7.17-7.



Слика 7.24 Испитивање чврстоће при савијању малтера слика из стандарда [202]



Чврстоћа при савијању малтера срачуната је према обрасцу:

$$f_{s,i} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{3 F_S l_0}{2 b h^2} \left(\frac{N}{mm^2}, MPa \right) \quad (7.3)$$

где је:

F_S - измерена сила при савијању која је изазвала лом призме (N);

l_0 - осовинско растојање између ослонаца призме (mm)– 100 mm;

b, h - димензије попречног пресека призме (mm)– ширина и висина;

$f_{s,i}$ - чврстоћа при савијању ($\frac{N}{mm^2}, MPa$).

Процентуална разлика чврстоће при савијању при различитој старости малтера рачуна се према обрасцу:

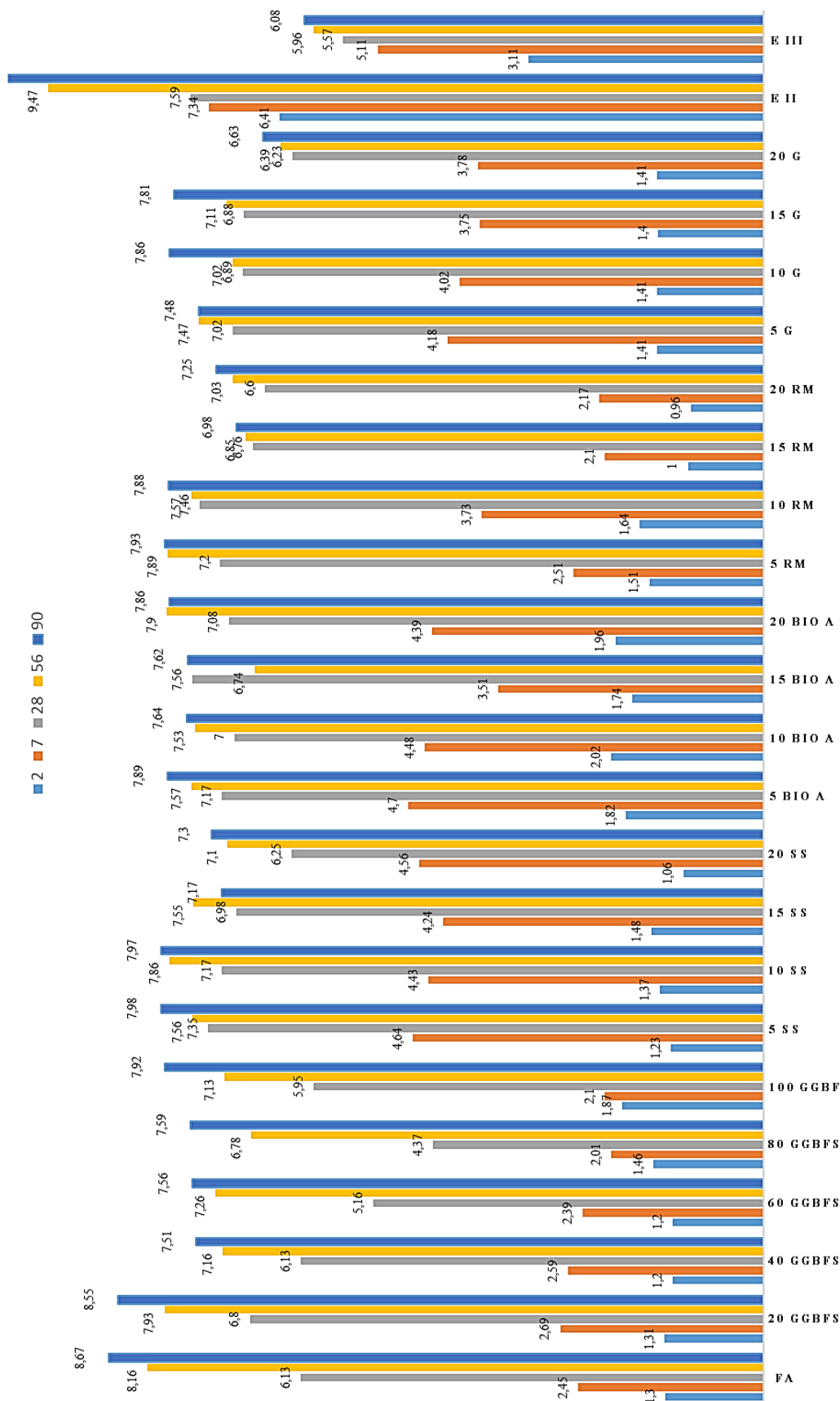
$$\Delta f_{s,i}(t) = \frac{f_s(t) - f_{s,e}(t)}{f_{s,e}(t)} 100(\%) \quad (7.4)$$

где је:

$\Delta f_{s,i}(t)$ – процентуална разлика чврстоће при савијању малтера старости (t) дана;

$f_{s,e}(t)$ – чврстоћа при савијању еталон узорка при старости (t) дана;

$f_s(t)$ – чврстоћа при савијању посматраног узорка при старости (t) дана.



Слика 7.25 Приказ чврстоћа при савијању малтера старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана



Табела 7.17-1

Резултати испитивања чврстоће при савијању малтера

Ознака малтерске мешавине	Чврстоћа при савијању $f_s \left(\frac{N}{mm^2} = MPa \right)$				
	Старост малтера (дани)				
	2	7	28	56	90
FA	1,30	2,45	6,13	8,16	8,67
20 GGBFS	1,31	2,69	6,80	7,93	8,55
40 GGBFS	1,20	2,59	6,13	7,16	7,51
60 GGBFS	1,20	2,39	5,16	7,26	7,56
80 GGBFS	1,46	2,01	4,37	6,78	7,59
100 GGBFS	1,87	2,10	5,95	7,13	7,92
5 SS	1,23	4,64	7,35	7,56	7,98
10 SS	1,37	4,43	7,17	7,86	7,97
15 SS	1,48	4,24	6,98	7,55	7,17
20 SS	1,06	4,56	6,25	7,10	7,30
5 BIO A	1,82	4,70	7,17	7,57	7,89
10 BIO A	2,02	4,48	7,00	7,53	7,64
15 BIO A	1,74	3,51	7,56	6,74	7,62
20 BIO A	1,96	4,39	7,08	7,90	7,86
5 RM	1,51	2,51	7,2	7,89	7,93
10 RM	1,64	3,73	7,46	7,57	7,88
15 RM	1,00	2,10	6,76	6,85	6,98
20 RM	0,96	2,17	6,60	7,03	7,25
5 G	1,41	4,18	7,02	7,47	7,48
10 G	1,41	4,02	6,89	7,02	7,86
15 G	1,40	3,75	6,88	7,11	7,81
20 G	1,41	3,78	6,23	6,39	6,63
E II	6,41	7,34	7,59	9,47	10,01
E III	3,11	5,11	5,57	5,96	6,08



Табела 7.17-2 Резултати испитивања чврстоће при савијању малтера
справљеног са додатком гранулисане згуре високе пећи

Ознака малтерске мешавине	Чврстоћа при савијању									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)
FA	1,30	0	2,45	0	6,13	0	8,16	0	8,67	0
20 GGBFS	1,31	0,77	2,69	9,80	6,80	10,93	7,93	-2,82	8,55	-1,38
40 GGBFS	1,20	-7,69	2,59	5,71	6,13	0,00	7,16	-12,25	7,51	-13,38
60 GGBFS	1,20	-7,69	2,39	-2,45	5,16	-15,82	7,26	-11,03	7,56	-12,80
80 GGBFS	1,46	12,31	2,01	-17,96	4,37	-28,71	6,78	-16,91	7,59	-12,46
100 GGBFS	1,87	42,75	2,10	-14,29	5,95	-2,94	7,13	-12,62	7,92	-8,65

Табела 7.17-3 Резултати испитивања чврстоће при савијању малтера
справљеног са додатком конвертоске згуре

Ознака малтерске мешавине	Чврстоћа при савијању									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)
FA	1,3	0	2,45	0	6,13	0	8,16	0	8,67	0
5 SS	1,23	-5,38	4,64	89,39	7,35	19,90	7,93	-2,82	7,98	-7,96
10 SS	1,37	5,38	4,43	80,82	7,17	16,97	7,16	-12,25	7,97	-8,07
15 SS	1,48	13,85	4,24	73,06	6,98	13,87	7,26	-11,03	7,17	-17,30
20 SS	1,06	-18,46	4,56	86,12	6,25	1,96	6,78	-16,91	7,3	-15,80



Табела 7.17-4 Резултати испитивања чврстоће при савијању малтера
справљеног са додатком пепела из дрвне биомасе

Ознака малтерске мешавине	Чврстоћа при савијању									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)
FA	1,3	0	2,45	0	6,13	0	8,16	0	8,67	0
5 BIO A	1,82	40,00	4,7	91,84	7,17	16,97	7,57	-7,23	7,89	-9,00
10 BIO A	2,02	55,38	4,48	82,86	7	14,19	7,53	-7,72	7,64	-11,88
15 BIO A	1,74	33,85	3,51	43,27	7,56	23,33	6,74	-17,40	7,62	-12,11
20 BIO A	1,96	50,77	4,39	79,18	7,08	15,50	7,9	-3,19	7,86	-9,34

Табела 7.17-5 Резултати испитивања чврстоће при савијању малтера
справљеног са додатком црвеног муља

Ознака малтерске мешавине	Чврстоћа при савијању									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)	f_s (MPa)	Δf_s (%)
FA	1,3	0	2,45	0	6,13	0	8,16	0	8,67	0
5 RM	1,51	16,15	2,51	2,45	7,2	17,46	7,89	-3,31	7,93	-8,54
10 RM	1,64	26,15	3,73	52,24	7,46	21,70	7,57	-7,23	7,88	-9,11
15 RM	1	-23,08	2,1	-14,29	6,76	10,28	6,85	-16,05	6,98	-19,49
20 RM	0,96	-26,15	2,17	-11,43	6,6	7,67	7,03	-13,85	7,25	-16,38



Табела 7.17-6 Резултати испитивања чврстоће при савијању малтера справљеног са додатком отпадног стакла

Ознака малтерске мешавине	Чврстоћа при савијању									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	f_s (МПа)	Δf_s (%)	f_s (МПа)	Δf_s (%)	f_s (МПа)	Δf_s (%)	f_s (МПа)	Δf_s (%)	f_s (МПа)	Δf_s (%)
FA	1,3	0	2,45	0	6,13	0	8,16	0	8,67	0
5 G	1,41	8,46	4,18	70,61	7,02	14,52	7,47	-8,46	7,48	-13,73
10 G	1,41	8,46	4,02	64,08	6,89	12,40	7,02	-13,97	7,86	-9,34
15 G	1,4	7,69	3,75	53,06	6,88	12,23	7,11	-12,87	7,81	-9,92
20 G	1,41	8,46	3,78	54,29	6,23	1,63	6,39	-21,69	6,63	-23,53

Табела 7.17-7 Резултати испитивања чврстоће при савијању цементног малтера

Ознака малтерске мешавине	Чврстоћа при савијању									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	f_s (МПа)	Δf_s (%)	f_s (МПа)	Δf_s (%)	f_s (МПа)	Δf_s (%)	f_s (МПа)	Δf_s (%)	f_s (МПа)	Δf_s (%)
FA	1,3	0	2,45	0	6,13	0	8,16	0	8,67	0
Е II	6,41	393,08	7,34	199,59	7,59	23,82	9,47	16,05	10,01	15,46
Е III	3,11	139,23	5,11	108,57	5,57	-9,14	5,96	-26,96	6,08	-29,87

Као и код чврстоће при притиску, ране вредности чврстоће при савијању геополимерних малтера су мале. Највећа промене чврстоће при савијању измерена је при старости малтера од 7 до 28 дана. Након 28 дана, па све до 90. дана пораст чврстоће био је незнатан.

Према резултатима испитивања чврстоће при савијању малтера справљеног са додатком гранулисана згуре високе пећи (табела 7.17-1 и 7.17-2) при старости од 28 дана, највећа вредност чврстоће измерена је на мешавини „20 GGBFS“. При поменутој старости чврстоћа при савијању малтера износи 6,80 МПа. Ова мешавина је задржала тренд раста и при каснијим старостима од 56 и 90 дана, а вредност чврстоће износила је 7,93 МПа и 8,55 МПа, респективно. Ипак, иако најбоље рангирана међу мешавинама са додатком гранулисана згуре, при старостима од 56 и 90 дана вредност савојне чврстоће



ове мешавине била је незнатно мања од еталона „FA“ справљеног само са електрофилтерским пепелом као везивом. Процентуална разлика чврстоће при савијању малтера „20 GGBFS“ у односу на еталон је при овим старостима износила 2,82 % и 1,38 %, респективно. При старости малтера од 90 дана, повећање вредности чврстоће при савијању сразмерно је повећању процентно-масеног удела гранулисане згуре из високе пећи.

Посматрајући резултате чврстоће при савијању малтера старости 28 дана справљеног са додатком конверторске згуре (табела 7.17-1 и 7.17-3) уочава се да највећу вредност има мешавина „5 SS“ (7,35 МПа). Вредности чврстоће малтера старости 90 дана више су за 4 % до 6 % од вредности које су остварили малтери истих серија старости 56 дана. На основу тога може се закључити да је полимеризација малтера справљених са додатком конверторске згуре скоро потпуно завршена већ при старости од 56 дана.

Резултати испитивања чврстоће при савијању геополимерног малтера справљеног са додатком пепела из дрвне биомасе дати су у табелама 7.17-1 и 7.17-4. Према резултатима испитивања малтера старости 3 и 7 дана може се закључити да додатак пепела из дрвне биомасе позитивно утичу на повећање чврстоће при савијању. При поменутим старостима, све малтерске мешавине справљене са овим додатком оствариле су веће чврстоће од еталона „FA“. При старости малтера од 28 дана, уочава се да највећу вредност савијања има мешавина „15 ВЮ А“ (7,56 МПа) што је за 23,33 % више од савијања еталона исте старости. При поменутој старости вредности чврстоће при савијању малтера „10 ВЮ А“ и „20 ВЮ А“ биле су такође веће од чврстоћа измерених на еталону. Тренд пораста чврстоће са повећањем старости приметан је код готово свих мешавина, али је он при старостима од 28 до 90 дана занемарљиво мали у односу на пораст при старостима до 28 дана. Сличне резултате чврстоће при притиску и чврстоће при савијању добили су и Abdulkareem [376] у истраживању геополимерног малтера са додатком пепела из дрвне биомасе. Наиме, у предметном раду чврстоће при савијању малтера са додатком пепела из дрвне биомасе биле су мање него код мешавине еталона справљене без додатака.

Резултати испитивања чврстоће при савијању геополимерног малтера справљеног са додатком црвеног муља дати су у табелама 7.17-1 и 7.17-5. При старости малтера од 7 дана све мешавине показале су приближно исте вредности. Ипак, мешавина „10 RM“ показала је нешто већу вредност чврстоће при савијању и износи 3,73 МПа. То је за 52,24 % више од мешавине еталона „FA“. При старости од 28 дана све мешавине са



додатком црвеног муља имале су већу вредност чврстоће при савијању од мешавине еталона. Вредности чврстоће при савијању мешавине „5 RM“, „10 RM“, „15 RM“ и „20 RM“ износиле су 7.2 МПа, 7.46 МПа, 6.76 МПа и 6.6 МПа, респективно. Такође, код свих мешавина са додатком црвеног муља уочава се тренд раста чврстоће с порастом старости, али ипак то није било довољно да при старости од 56 и 90 дана оне буду боље рангиране од еталон мешавине. При поменутиим старостима код мешавина са додатком црвеног муља чврстоће су биле мање за око 8,5 % до око 23,5 % у односу на мешавину справљену без додатака.

Посматрајући резултате чврстоће при савијању малтера справљеног са додатком отпадног стакла (табела 7.17-1 и 7.17-6) може се уочити да је при раним старостима (3 и 7 дана) средња вредност чврстоће при савијању била већа код мешавина са додатком стакла у односу на вредности савијања измерене на мешавини еталона. Овакав тренд је настављен све до старости малтера од 28 дана. Постигнута вредност чврстоће при савијању еталон малтера старости 56 била је за 8,5 % до 21 % већа у односу на малтер са додатком отпадног стакла исте старости. При старости од 90 дана процентуална разлика се повећала и износила је 10 % до 24 %. У коначном може се закључити да отпадно стакло позитивно утиче на почетни прираст чврстоће при савијању амбијентално негованих малтерских узорака, али је њихов прираст након 28 дана незнатан и мањи од мешавине справљене без овог додатка.

Највећа вредност чврстоће на савијање измерена је на мешавини цементног малтера ознаке „Е II“ и при старости од 90 дана износи 10,01 МПа. Остварена вредност чврстоће била је за 1,34 МПа већа од чврстоће еталон геополимерног малтера ознаке „FA“.

7.5.3 Испитивање брзине проласка ултразвучног импулса

Последњих година све већу пажњу привлаче неструктивне методе испитивања грађевинских материјала. Иако је метода проласка ултразвучног импулса позната још од почетка тридесетих година, њена примена на материјалима почела је пре око шездесет година. Недуго након тога метода је стандардизована, а у Србији су данас у оптицају стандарди попут SRPS U.M1.042:1998 [247] и SRPS EN 12504-4:2008 [219]. Метода испитивања захтева пажљиво и прецизно руковање апаратуром, а то између осталог значи анулирање грешака при коришћењу уређаја за испитивање. Неопходно је остварити правилни контакт између сонди и испите површине, а у ту сврху потребно је да се испитна површина пресвуче танким слојем масти (товатна маст или нека слична)



након чега се у намашћену површину врши утискивање сонди. На тај начин обезбеђује се да нема заосталих ваздушних мехурића. На резултате испитивања могу утицати микропрслине унутар испитиваног материјала па сходно томе хомогенији материјали имају већу брзину проласка ултразвучног импулса. При теренском раду често се може наићи на препреке у виду арматуре (јер је познато да је брзина проласка ултразвучног импулса кроз арматуру за око 50 % до 70 % већа него кроз бетон) неправилна уградња бетона и сл. па је избор места испитивања од пресудног значаја [248]. Метода ултразвука може се користити за праћење, али и процену остварене чврстоће при притиску. Иако се ова метода у ту сврху употребљава дуги низ година њихова тачна зависност није утврђена. Стога неопходно је поступак испитивања спровести засебно за сваки посебни тип материјала. Као што је познато постоји неколико фактора који могу утицати на брзину проласка ултразвука кроз испитивани материјал (попут запреминске масе, водовезивног фактора, количина агрегата, еластичних својстава материја и др.) па је због тога неопходно сагледати све утицаје [230].

Праћење брзине проласка ултразвучног импулса на узорцима геополимерног малтера вршено је на малтерским призмама димензија $40 \times 40 \times 160$ mm. Испитивање је спроведено на узорцима старости 3, 7, 28, 56 и 90 дана непосредно пре испитивања чврстоће при притиску и чврстоће при савијању. Поступак испитивања подразумевао је наношење масти и постављање сонди по најдужој страни призме. Апаратура коришћена за ово испитивање приказана је на слици 7.26. Апарат за испитивање састоји се из генератора ултразвучних таласа, сонде предајника и пријемника и електронског кола за мерење времена потребног да ултразвук пређе испитивано растојање. Брзина проласка ултразвучног импулса мерена је директним путем тако да су сонде уређаја постављене једна преко пута друге. Брзина проласка ултразвучног импулса срачуната је према изразу (7.5), док је процентуална разлика брзине проласка ултразвучног у односу на еталон мешавину срачуната према изразу (7.6). Резултати испитивања дати су у табелама 7.18-1 до 7.18-7, док је графички приказ резултата дат на слици 7.27. На слици 7.28 је дат дијаграм зависности чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса малтера справљеног са додатком конверторске згуре, док су остали дијаграми зависности дати у прилогу 2. Математичке функције промене чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса дати су у табели 7.19.



Слика 7.26 Испитивање брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтерску призму

Брзина проласка ултразвучног импулса срачуната је према следећем изразу:

$$v_{uz} = \frac{L}{t} \text{ (m/s)} \quad (7.5)$$

где је:

v_{uz} – брзина проласка ултразвучног импулса;

L – дужина пута;

t – време потребно да импулс пређе задати пут.

Процентуална разлика брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтер различите старости рачуна се према изразу:

$$\Delta v_{uz}(t) = \frac{v_{uz}(t) - v_{uz,e}(t)}{v_{uz,e}(t)} \mathbf{100(\%)} \quad (7.6)$$

где је:

$\Delta v_{uz}(t)$ – процентуална разлика чврстоће при притиску малтера старости (t) дана;

$v_{uz}(t)$ – брзина проласка ултразвучног импулса кроз посматрани узорак малтера старости (t) дана;

$v_{uz,e}(t)$ – брзина проласка ултразвучног импулса кроз узорак малтера еталон старости (t) дана.



Табела 7.18-1

Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса
кроз малтерске призме

Ознака малтерске мешавине	Брзина проласка ултразвучног импулса ($\frac{m}{s}$)				
	Старост малтера (дани)				
	2	7	28	56	90
	<i>vuz</i> [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]
FA	2023	2651	3131	3140	3155
20 GGBFS	2131	2687	3163	3203	3220
40 GGBFS	2135	2712	3226	3245	3259
60 GGBFS	2141	2594	3178	3275	3275
80 GGBFS	2162	2512	3104	3159	3200
100 GGBFS	2266	2649	3415	3456	3397
5 SS	2240	2901	3106	3226	3280
10 SS	2102	2899	2947	3250	3299
15 SS	2238	2880	2911	3260	3297
20 SS	2309	2933	3062	3233	3237
5 BIO A	2198	2920	3170	3280	3292
10 BIO A	2406	2888	3074	3130	3165
15 BIO A	2130	2875	3022	3201	3220
20 BIO A	2508	2934	3098	3150	3198
5 RM	1776	2623	3039	3104	3123
10 RM	2018	2837	3022	3100	3129
15 RM	1481	2479	2893	3101	3130
20 RM	1400	2532	3068	3105	3140
5 G	2133	2855	2829	3202	3297
10 G	2051	2812	2898	3210	3260
15 G	1674	2805	3013	3280	3296
20 G	1457	2790	2893	3282	3303
E II	3636	3893	3995	3874	3902
E III	3223	3490	3814	3877	3898



Табела 7.18-2 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса
кроз малтерске призме справљене са додатком гранулисне згуре из високе пећи

Ознака малтерске мешавине	Брзина проласка ултразвучног импулса ($\frac{m}{s}$)									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]
FA	2023	0	2651	0	3131	0	3140	0	3155	0
20 GGBFS	2131	5,34	2687	1,36	3163	1,02	3203	2,01	3220	2,06
40 GGBFS	2135	5,54	2712	2,30	3226	3,03	3245	3,34	3259	3,30
60 GGBFS	2141	5,83	2594	-2,15	3178	1,50	3275	4,30	3275	3,80
80 GGBFS	2162	6,87	2512	-5,24	3104	-0,86	3159	0,61	3200	1,43
100 GGBFS	2266	12,01	2649	-0,08	3415	9,07	3456	10,06	3397	7,67

Табела 7.18-3 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса
кроз малтерске призме справљене са додатком конверторске згуре

Ознака малтерске мешавине	Брзина проласка ултразвучног импулса ($\frac{m}{s}$)									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]
FA	2023	0	2651	0	3131	0	3140	0	3155	0
5 SS	2240	10,73	2901	9,43	3106	-0,80	3226	2,74	3280	3,96
10 SS	2102	3,91	2899	9,35	2947	-5,88	3250	3,50	3299	4,56
15 SS	2238	10,63	2880	8,64	2911	-7,03	3260	3,82	3297	4,50
20 SS	2309	14,14	2933	10,64	3062	-2,20	3233	2,96	3237	2,60



Табела 7.18-4 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтерске призме справљене са додатком пепела из дрвне биомасе

Ознака малтерске мешавине	Брзина проласка ултразвучног импулса ($\frac{m}{s}$)									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]
FA	2023	0	2651	0	3131	0	3140	0	3155	0
5 BIO A	2198	8,65	2920	10,15	3170	1,25	3280	4,46	3292	4,34
10 BIO A	2406	18,93	2888	8,94	3074	-1,82	3130	-0,32	3165	0,32
15 BIO A	2130	5,29	2875	8,45	3022	-3,48	3201	1,94	3220	2,06
20 BIO A	2508	23,97	2934	10,68	3098	-1,05	3150	0,32	3198	1,36

Табела 7.18-5 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтерске призме справљене са додатком црвеног муља

Ознака малтерске мешавине	Брзина проласка ултразвучног импулса ($\frac{m}{s}$)									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]
FA	2023	0	2651	0	3131	0	3140	0	3155	0
5 RM	1776	-12,21	2623	-1,06	3039	-2,94	3104	-1,15	3123	-1,01
10 RM	2018	-0,25	2837	7,02	3022	-3,48	3100	-1,27	3129	-0,82
15 RM	1481	-26,79	2479	-6,49	2893	-7,60	3101	-1,24	3130	-0,79
20 RM	1400	-30,80	2532	-4,49	3068	-2,01	3105	-1,11	3140	-0,48

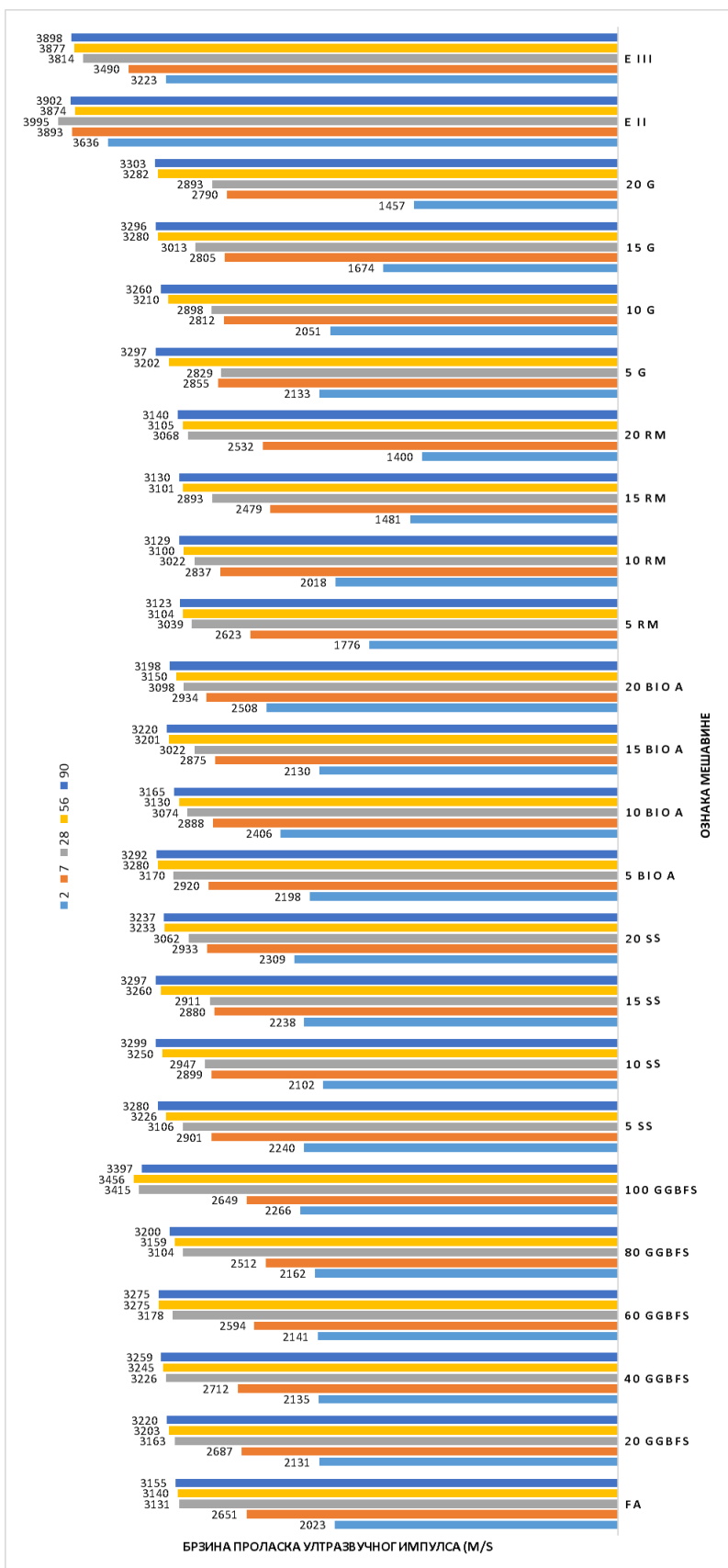


Табела 7.18-6 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса
кроз малтерске призме справљене са додатком отпадног стакла

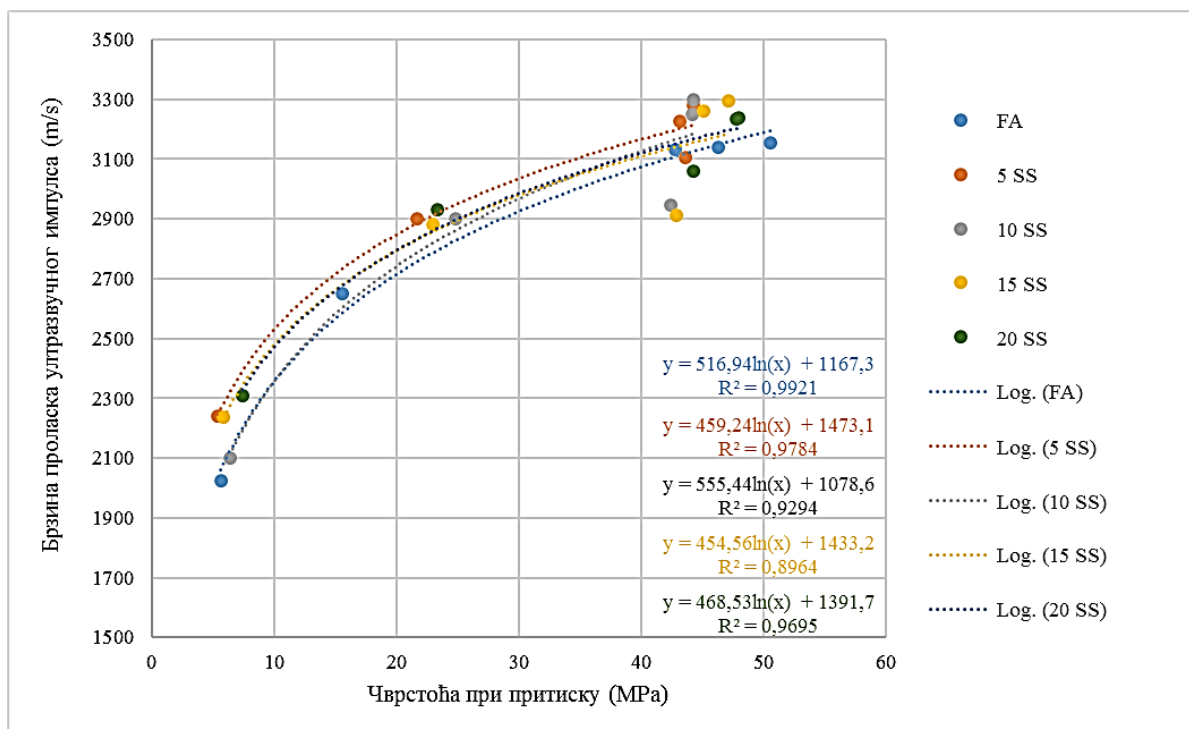
Ознака малтерске мешавине	Брзина проласка ултразвучног импулса ($\frac{m}{s}$)									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]
FA	2023	0	2651	0	3131	0	3140	0	3155	0
5 G	2133	5,44	2855	7,70	2829	-9,65	3202	1,97	3297	4,50
10 G	2051	1,38	2812	6,07	2898	-7,44	3210	2,23	3260	3,33
15 G	1674	-17,25	2805	5,81	3013	-3,77	3280	4,46	3296	4,47
20 G	1457	-27,98	2790	5,24	2893	-7,60	3282	4,52	3303	4,69

Табела 7.18-7 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса
кроз малтерске призме справљене са цементом

Ознака малтерске мешавине	Брзина проласка ултразвучног импулса ($\frac{m}{s}$)									
	Старост малтера (дани)									
	2		7		28		56		90	
	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]	<i>vuz</i> [m/s]	Δvuz [m/s]
FA	2023	0	2651	0	3131	0	3140	0	3155	0
E II	3636	79,73	3893	46,85	3995	27,60	3874	23,38	3902	23,68
E III	3223	59,32	3490	31,65	3814	21,81	3877	23,47	3898	23,55



Слика 7.27 Приказ брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтерске призме старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана



Слика 7.28 Дијаграм зависности чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса мaлтерa справљеног са додатком конверторске згуре



Табела 7.19 Математичке функције промене чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса и коефицијенти корелације

Ознака малтерске мешавине	Математичке функције
FA	$y = 516,94\ln(x) + 1167,3, R^2 = 0,9921$
20 GGBFS	$y = 544,11\ln(x) + 1111,4, R^2 = 0,9967$
40 GGBFS	$y = 410,51\ln(x) + 1650,9, R^2 = 0,9871$
60 GGBFS	$y = 398,81\ln(x) + 1675,9, R^2 = 0,9687$
80 GGBFS	$y = 289,62\ln(x) + 2118,4, R^2 = 0,8026$
100 GGBFS	$y = 576,7\ln(x) + 1143,2, R^2 = 0,9809$
5 SS	$y = 459,24\ln(x) + 1473,1, R^2 = 0,9784$
10 SS	$y = 555,44\ln(x) + 1078,6, R^2 = 0,9294$
15 SS	$y = 454,56\ln(x) + 1433,2, R^2 = 0,8964$
20 SS	$y = 468,53\ln(x) + 1391,7, R^2 = 0,9695$
5 BIO A	$y = 802,71\ln(x) + 209,62, R^2 = 0,9566$
10 BIO A	$y = 455,17\ln(x) + 1371,9, R^2 = 0,9826$
15 BIO A	$y = 472,13\ln(x) + 1304,4, R^2 = 0,9648$
20 BIO A	$y = 428,95\ln(x) + 1519,9, R^2 = 0,9624$
5 RM	$y = 547,02\ln(x) + 980,83, R^2 = 0,9899$
10 RM	$y = 493,24\ln(x) + 1187,8, R^2 = 0,9792$
15 RM	$y = 529,85\ln(x) + 1068,7, R^2 = 0,9806$
20 RM	$y = 530,89\ln(x) + 1159,1, R^2 = 0,9478$
5 G	$y = 520,28\ln(x) + 1163,4, R^2 = 0,8671$
10 G	$y = 546,78\ln(x) + 1097,2, R^2 = 0,9266$
15 G	$y = 646,31\ln(x) + 782,02, R^2 = 0,9767$
20 G	$y = 668,77\ln(x) + 685,05, R^2 = 0,9545$
E II	$y = 292,52\ln(x) + 2739,5, R^2 = 0,5031$
E III	$y = 572,76\ln(x) + 1686, R^2 = 0,991$

Испитивање брзине проласка ултразвучног импулса кроз очврсле геополимерне малтерске призме вршено је како би се одредила зависност остварене чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтерске призме. Такође, поступак је спроведен како би се извршило праћење степена остварене полимеризације током периода очвршћавања малтера. Посматрајући резултате из табела 7.18-2 до 7.18-7, код свих испитиваних мешавина се може уочити значајан прираст брзине проласка ултразвучног импулса са повећањем старости. Пораст брзине је нарочито приметан при резултатима мерења на узорцима старости 3, 7 и 28 дана. При испитивањима



извршеним након 28 дана примећује се пораст брзине проласка ултразвучног импулса, али је он занемарљиво мали у односу на брзине постигнуте при ранијим старостима малтера.

Промена брзине ултразвучног импулса у сагласности је и са променама механичких чврстоћа у току времена што потврђују и резултати зависности ова два параметра који су дати на слици 7.28 и у табели 7.19 (и детаљније у прилогу 2). Представљене математичке функције добијене су статистичком обрадом података измерених средњих чврстоћа при притиску и средње брзине проласка ултразвучног импулса кроз исте узорке и при истој старости. Према приложеним дијаграмима из прилога 2 и утврђеном логаритамском облику извршено је срачунавање коефицијената корелације R^2 . Добијени коефицијенти корелације геополимерног малтера крећу се у опсегу од $R^2=0,8026$ за мешавину ознаке „80 GGBFS“ до $R^2=0,9967$ за мешавину ознаке „20 GGBFS“. Коефицијент корелације R^2 за мешавину еталона ознаке „FA“ справљеног само са електрофилтерским пепелом износи $R^2=0,9921$. Овако високи коефицијенти корелације указују на добру апроксимацију функције промене чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса.

Промена брзине проласка ултразвучног импулса кроз геополимерне малтерске призме старости 3 дана и 90 дана креће се у опсегу од 690 m/s до 1846 m/s, док се ова промена на цементним малтерима креће у опсегу од 226 m/s до 675 m/s.

На основу свега изложеног могу се изнети следећи закључци:

- Развој полимеризације утиче на повећање брзине проласка ултразвучног импулса кроз испитивани узорак геополимерне малтерске призме. Пораст брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтер је доминантан при раним старостима, а нарочито до старости од 28 дана. Након 28 дана (тј. при старостима од 56 и 90 дана) приметан је пораст брзине проласка ултразвучног импулса али је тај пораст занемарљиво мали у односу на брзину остварену при ранијим старостима. Ова појава одговара и тренду раста чврстоћа при притиску и чврстоћа при савијању о којима је било речи у претходним поглављима.
- Раст брзине проласка ултразвучног импулса прати раст остварених чврстоћа при притиску при свим старостима малтера. Ову тврдњу поткрепљују и високи коефицијенти корелације R^2 који се за испитиване геополимерне мешавине крећу у опсегу од 0,8026 до 0,9967.



- Брзина прoлaскa ултразвучнoг импулсa крoз геoпoлимерни мaлтер мoже бити дoбaр пoкaзaтeљ чврстoћe при притиску. Нa oснoву брзине прoлска ултразвучнoг импулсa мoгу сe предвидети чврстoћe при притиску геoпoлимернoг мaлтeрa.

7.5.4 Испитивање oтпoрнoсти мaлтeрa нa дeјствo мрaзa

Испитивање oтпoрнoсти нa циклусe зaмрзaвaњa и oдмрзaвaњa спaдa у грoпу испитивања кoјoм сe oдрeђујe трaјнoст мaтеријaлa. Испитивањeм сe oдрeђујe спoсoбнoст мaтеријaлa дa у вoдoзасићeнoм стaњу oдгoвoри дeјству вишeкратнoг зaмрзaвaњa и oдмрзaвaњa. Циљ oвoг испитивања јe oдрeђивaњe пoслeдичa настaлих услeд унутрaшњeг дeјствa нaпoнa изaзвaнoг пoвeћaњeм зaпрeминe вoдe у пoрaмa мaлтeрa приликoм зaмрзaвaњa [249].

Испитивање oтпoрнoсти мaлтeрa нa дeјствo мрaзa oдрeђeнo јe прeмa стaндaрдy SRPS EN 14617-5:2014 [205]. Зa свaкy мaлтeрскy сeријy спрaвљeнo јe шeст узoрaкa димeнзијa $40 \times 40 \times 160$ mm. Дo дoстизaњa стaрoсти геoпoлимернoг мaлтeрa oд 28 дaнa узoрци су нeгoвaни уoтaни у плaстичнy фoлијy при стaндaрдним лaбoрaтoријским услoвимa. Узoрци мaлтeрских сeријa спрaвљeних сa цeмeнтoм кaо вeзивoм су дo врeмeнa испитивања нeгoвaни у крeчњaчкoј вoди. При дoстизaњу стaрoсти мaлтeрa oд 28 дaнa, пo три узoркa свaкe сeријe излaгaнa су нaизмeничним циклусимa смрзaвaњa и oдмрзaвaњa. Укупaн брoј циклусa биo јe 25. Јeдaн циклус смрзaвaњa и oдмрзaвaњa сaстoјaо сe из четвoрoчaсoвнoг пoтaпaњa узoркa у вoду нa тeмпeрaтури oд $+20 \pm 5$ °C и четвoрoчaсoвнoг смрзaвaњa у климa кoмoри нa тeмпeрaтури -20 ± 5 °C. Смрзaвaњe узoрaкa вршeнo јe у климa кoмoри мaркe „Controls X26“. Oстaлa три узoркa служилa су кaо рeфeрeнтни узoрци и нeгoвaни су у лaбoрaтoријским услoвимa при тeмпeрaтури oд 20 ± 2 °C. Рeфeрeнтни узoрци мaлтeрских сeријa спрaвљeни сa цeмeнтoм кaо вeзивoм су дo врeмeнa испитивања нeгoвaни у крeчњaчкoј вoди. Нaкoн 25 циклусa смрзaвaњa извршeнo јe испитивања прoмeнe мaсe, визуeлни прeглeд узoрaкa, испитивање чврстoћe при сaвијaњу и чврстoћe при притиску. Изглeд узoрaкa нaкoн излaгaњa циклусимa смрзaвaњa и oдмрзaвaњa прикaзaн јe нa слици 7.29, дoк су пoјeдинaчнe фoтoгрaфијe свих сeријa прикaзaнe у прилoгу 3. У циљу oдрeђивaњa oтпoрнoсти нa дeјствo мрaзa извршeнo јe срaчунaвaњe кoeфицијeнaтa oтпoрнoсти нa дeјствo мрaзa KM_{f25} и KM_{c25} прeмa изрaзимa (7.7) и (7.8), дoк јe кoeфицијeнт прoмeнe мaсe Km срaчунaт прeмa oбрaсцy (7.9). Кoeфицијeнт oтпoрнoсти нa дeјствo мрaзa у пoглeду сaвoјнe чврстoћe срaчунaт јe прeмa oбрaсцy:

$$KM_{f25} = \frac{RM_f}{R_f} \quad (7.7)$$

где је:

KM_{f25} - коефицијент отпорности на дејство мрза у погледу чврстоће при савијању;

RM_f - чврстоћа при савијању узорка излаганих циклусима смрзавања и одмрзавања;

R_f - чврстоћа при савијању референтних узорка који су до времена испитивања неговани у амбијенталним условима.

Коефицијент отпорности на дејство мрза у погледу притисне чврстоће срачунат је према обрасцу:

$$KM_{c25} = \frac{RM_c}{R_c} \quad (7.8)$$

где је:

KM_{c25} - коефицијент отпорности на дејство мрза у погледу чврстоће при притиску;

RM_c - чврстоћа при притиску узорка излаганих циклусима смрзавања и одмрзавања;

R_c - чврстоћа при притиску референтних узорка који су до времена испитивања неговани у амбијенталним условима.

Коефицијент промене масе срачунат је према обрасцу:

$$Km = \frac{m_{25}}{m} \quad (7.9)$$

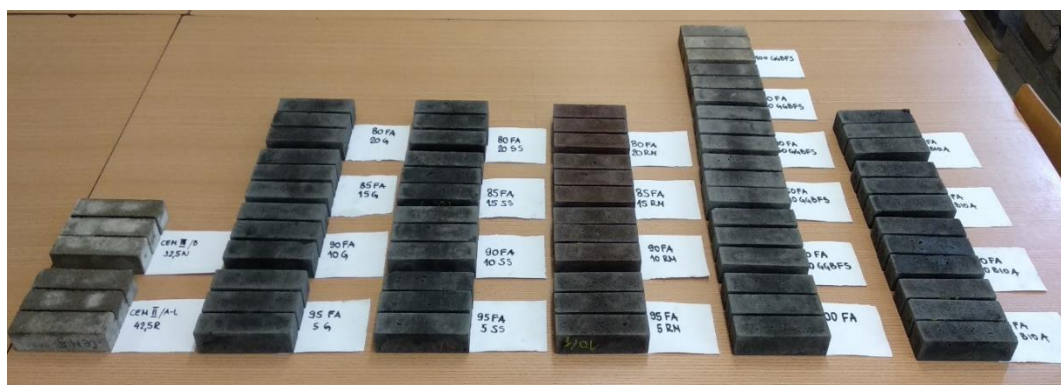
где је:

Km - коефицијент промене масе услед излагања узорка циклусима смрзавања и одмрзавања;

m_{25} – маса узорка излаганих циклусима смрзавања и одмрзавања;

m – маса узорка на почетку испитивања.

Резултати испитивања отпорности на дејство мрза услед дејства 25 циклуса смрзавања и одмрзавања приказани су у табели 7.20-1 и 7.20-2, док је графички приказ резулта дат на сликама 7.30-1 до 7.30-4.



Слика 7.29 Изглед узорка након 25 циклуса циклуса смрзавања и одмрзавања



Табела 7.20-1

Резултати испитивања отпорности на дејство мраза

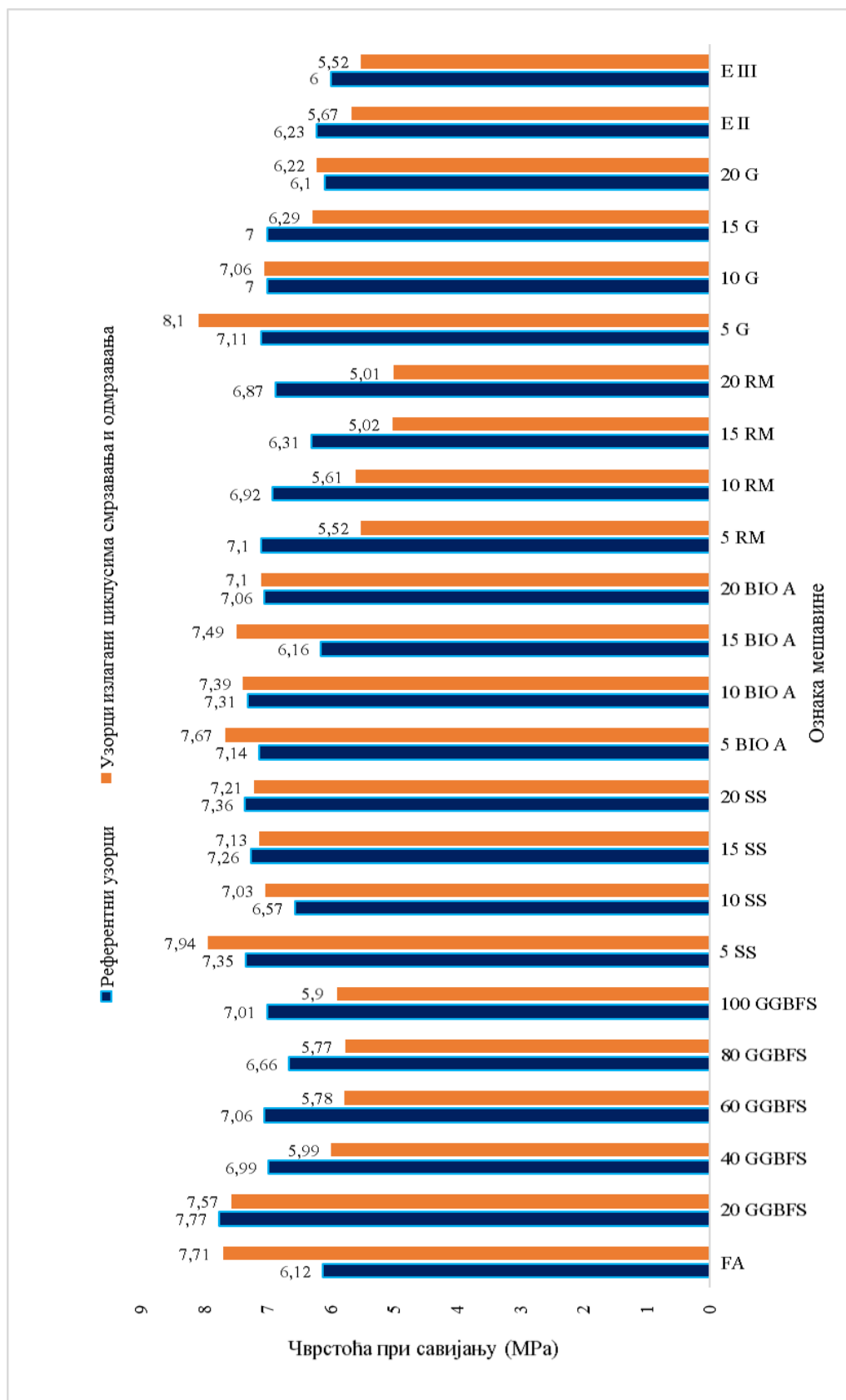
Ознака малтерске мешавине	Референтни узорци		Узорци изложени циклусима смрзавања и одмрзавања		Коефицијенти отпорности на циклуса смрзавања и одмрзавања	
	Чврстоћа при савијању (R_f)	Чврстоћа при притиску (R_c)	Чврстоћа при савијању (RM_f)	Чврстоћа при притиску (RM_c)	KM_{f25}	KM_{c25}
	(MPa)					
FA	6,12	42,62	7,71	46,46	1,26	1,09
20 GGBFS	7,77	47,16	7,57	44,15	0,97	0,94
40 GGBFS	6,99	47,13	5,99	41,28	0,86	0,88
60 GGBFS	7,06	47,01	5,78	38,8	0,82	0,83
80 GGBFS	6,66	48,17	5,77	40,18	0,87	0,83
100 GGBFS	7,01	51,13	5,9	41,62	0,84	0,81
5 SS	7,35	43,75	7,94	47,25	1,08	1,08
10 SS	6,57	45,1	7,03	46,45	1,07	1,03
15 SS	7,26	40,78	7,13	41,6	0,98	1,02
20 SS	7,36	41,72	7,21	42,55	0,98	1,02
5 BIO A	7,14	45,88	7,67	45,83	1,07	1,00
10 BIO A	7,31	47,13	7,39	44,98	1,01	0,95
15 BIO A	6,16	51,02	7,49	48,95	1,22	0,96
20 BIO A	7,06	45,12	7,1	45,28	1,01	1,00
5 RM	7,1	45,02	5,52	41,18	0,78	0,91
10 RM	6,92	49,02	5,61	42,61	0,81	0,87
15 RM	6,31	43,02	5,02	37,84	0,80	0,88
20 RM	6,87	40,3	5,01	33,07	0,73	0,82
5 G	7,11	43,2	8,1	46,86	1,14	1,08
10 G	7	49,02	7,06	45,89	1,01	0,94
15 G	7	43	6,29	42,82	0,90	1,00
20 G	6,1	41,88	6,22	41,88	1,02	1,00
E II	6,23	57,36	5,67	43,02	0,91	0,75
E III	6	34,76	5,52	35,11	0,92	1,01
Услов отпорности на дејство циклуса замрзавања и одмрзавања према стандарду SRPS EN 14617-5:2014 [205]						0,75 (75 %)



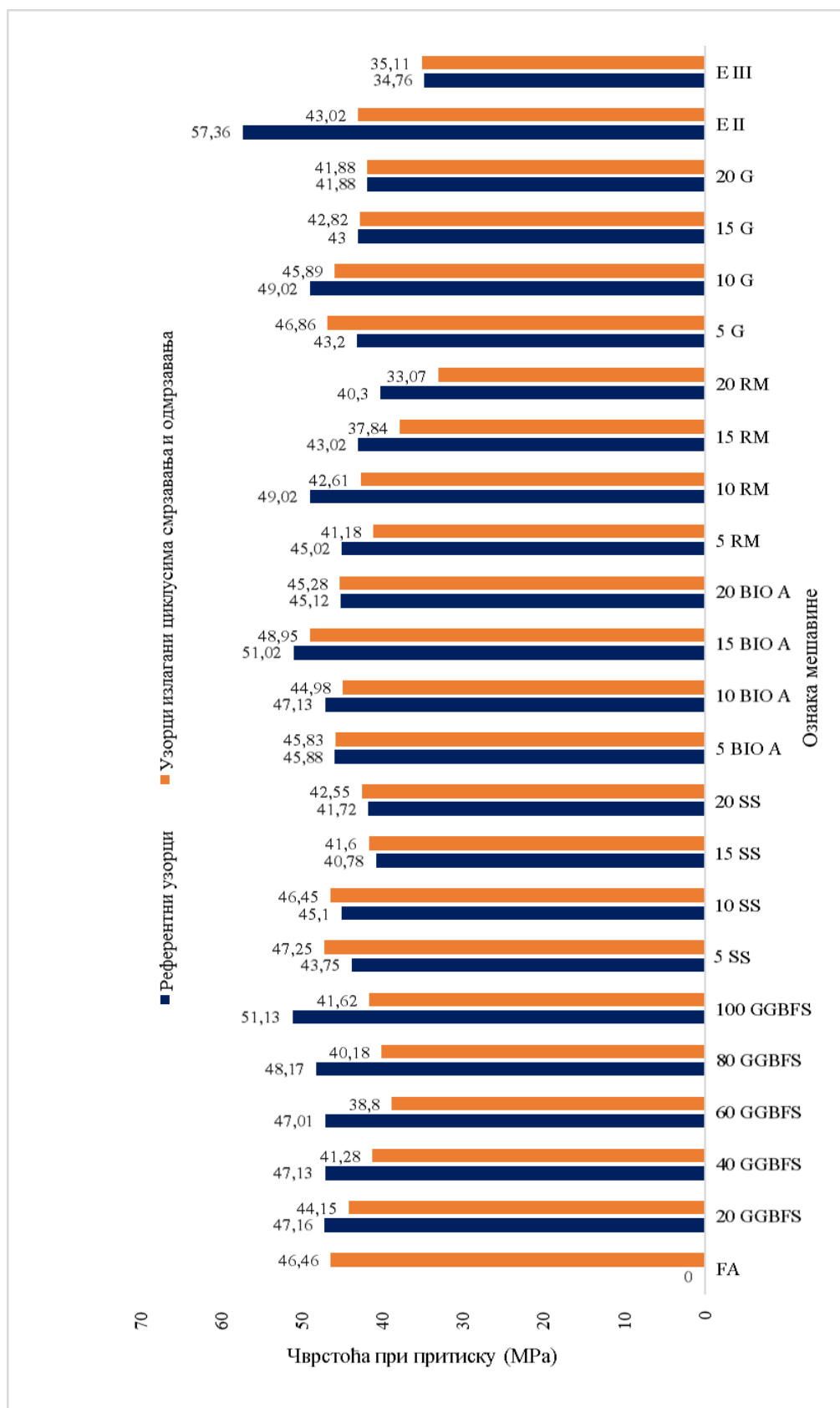
Табела 7.20-2

Резултати испитивања отпорности на дејство мраза у погледу
промене масе

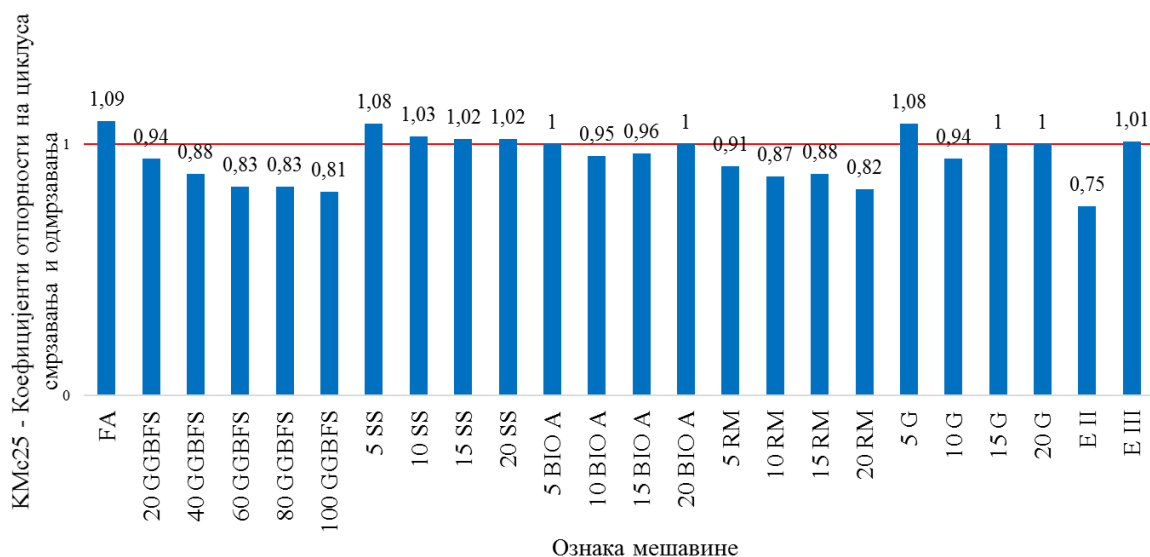
Ознака малтерске мешавине	Отпорност на дејство мраза
	K_m
FA	0,98
20 GGBFS	0,98
40 GGBFS	0,98
60 GGBFS	0,99
80 GGBFS	0,99
100 GGBFS	0,99
5 SS	1
10 SS	0,99
15 SS	0,98
20 SS	1
5 BIO A	0,98
10 BIO A	0,98
15 BIO A	0,98
20 BIO A	0,98
5 RM	0,98
10 RM	0,98
15 RM	0,98
20 RM	0,99
5 G	0,98
10 G	0,98
15 G	0,97
20 G	0,97
E II	0,99
E III	0,99



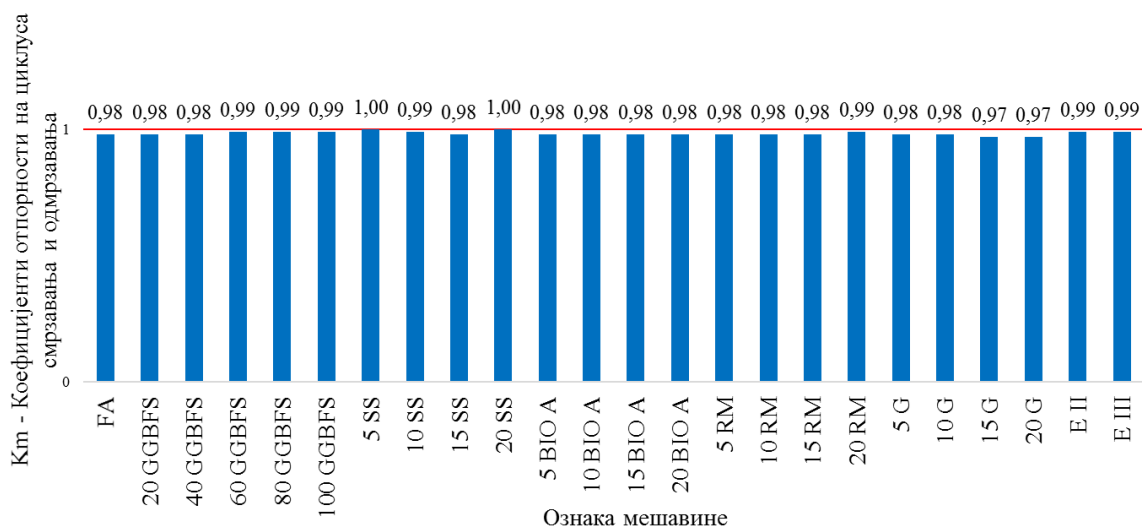
Слика 7.30-1 Чврстоћа при савијању малтера након 25 циклуса циклуса смрзавања и одмрзавања (чврстоћа при савијању)



Слика 7.30-2 Чврстоћа при притиску малтера након 25 циклуса циклуса смрзавања и одмрзавања (чврстоћа при притиску)



Слика 7.30-3 Коефицијент отпорности на циклусе смрзавања и одмрзавања K_m (промена чврстоће при притиску)



Слика 7.30-4 Коефицијент отпорности на циклусе смрзавања и одмрзавања K_t (промена масе)

Према резултатима коефицијента промене масе K_t датим у табели 7.20-2 и на слици 7.30-4 може се уочити да је ова промена код свих испитиваних мешавина незнатна и да је мања од 1 % у односу на масу референтних узорка. Ипак, гледано према групама малтера тј. издвојено по врстама додатака може се уочити да је највећа промена измерена код узорка малтера ознаке „ 15 G“ и „ 20 G“ справљених додатком 15 % и 20 % отпадног стакла, респективно. Промене су најмање биле приметне код узорка



справљених са конверторском згуром. Сходно томе код узорака ознаке „5 SS“ и „20 SS“ нису измерене промене масе, па је приликом мерења обе серије узорака коефицијент K_m био једнак 1.

Резултати испитивања отпорности на дејство мраза узорака малтера справљених са гранулисаном згуром високе пећи дати су у табели 7.20-1 и на слици 7.30-3. Визуелне промене на овим узорцима нису биле уочене. Највећа вредност коефицијената KM_{f25} и KM_{c25} срачуната је код мешавине „20 GGBFS“. Вредност поменутих коефицијената код ове мешавине износи 0,97 и 0,94, респективно. Посматрањем вредности коефицијентима отпорности на дејство мраза KM_{c25} може се уочити да је он повезан са процентуалном заступљеношћу гранулисане згуре у малтеру. Наиме, вредност посматраног коефицијента опада с порастом процентуалног удела гранулисане згуре. Промена коефицијента нарочито се може приметити при проценту замене електрофилтерског пепела гранулисаном згуром у износу од 40 %. Може се приметити да је вредност коефицијената KM_{f25} и KM_{c25} код узорака справљених са гранулисаном згуром изнад 0,81 (81 %). Важно је напоменути и да све испитиване мешавине испуњавају основне захтеве у погледу отпорности на дејство мраза. Стога се може извести закључак да су све мешавине справљене са додатком гранулисане згуре високе пећи отпорне на дејство мраза у трајању од 25 циклуса.

Код свих узорака справљених са конверторском згуром измерен је пораст чврстоћа при савијању и чврстоћа при притиску у односу на референтне узорке истог састава и старости који нису излагани циклусима замрзавања и одмрзавања (табела 7.20-1 и слика 7.30-3). Највећи коефицијент отпорности на дејство мраза у погледу чврстоћа при притиску KM_{c25} измерен је код малтера ознаке „5 SS“ и он је тек за 1 % мањи од истог коефицијента срачунатог за еталон „FA“. На основу срачунатих коефицијената отпорности на дејство мраза KM_{f25} и KM_{c25} може се закључити да се са повећањем садржаја конверторске згуре у мешавини вредности коефицијената смањују. Ово се може повезати и са резултатима испитивања распрострањања малтера мерених на потресном столу. Наиме, код мешавина справљених са 15 % и 20 % конверторске згуре распрострањање је било најмање. Сходно томе садржај заосталих мехурића ваздуха унутар узорака би код „крућих“ мешавина требао бити већи. Већи садржај мехурића могао би довести до већег упијања воде, а што би могло утицати на резултате испитивања отпорности на дејство мраза.



Вредности коефицијената отпорности на дејство мраза узорака справљених са додатком пепела из дрвне биомасе показале су приближно исту вредност. Иако су коефицијенти KM_{f25} и KM_{c25} код узорака справљених са додатком пепела из дрвне биомасе мањи од коефицијената еталона „FA“ све мешавине испуњавају основне захтеве у погледу отпорности на дејство мраза. Најмањи коефицијенти добијени су на узорцима мешавине ознаке „10 BIO A“ и износе 1,01 и 0,95, респективно. Највећи коефицијент отпорности на дејство мраза у погледу чврстоћа при притиску KM_{c25} срачунати су код узорака малтера ознаке „5 BIO A“ и „20 BIO A“ (1 тј. 100 %) и они су за око 9 % мањи од истог коефицијента срачунатог за еталон „FA“. На основу срачунатих коефицијената KM_{f25} и KM_{c25} за узорке справљене са пепелом из дрвне биомасе може се закључити да повећање садржаја овог додатка не утиче битно на промену коефицијената отпорности на дејство мраза. Важно је напоменути и да све испитиване мешавине испуњавају основне захтеве у погледу отпорности на дејство мраза. Стога се може извести закључак да су све мешавине справљене са додатком пепела из дрвне биомасе отпорне на дејство мраза у трајању од 25 циклуса.

Вредности коефицијената отпорности на дејство мраза узорака справљених са додатком црвеног муља мањи су у од коефицијената остварених на еталону „FA“. Највећу отпорност на дејство мраза у погледу притисне чврстоће имала је мешавина „5 RM“ (91%), док је најмању отпорност имала мешавина „20 RM“ (82%). Према резултатима овог испитивања може се закључити да се отпорност смањују услед повећања процентно-масеног удела црвеног муља у мешавини. Генерално, коефицијенти отпорности KM_{c25} за све мешавине са црвеним муљем су већи од 75 % што значи да су сви испитивани узорци отпорни на дејство мраза у погледу притисних чврстоћа у трајању од 25 циклуса. Визуелне промене на узорцима справљеним са црвеним муљем нису биле примећене.

Резултати испитивања отпорности на дејство мраза узорака малтера справљених са отпадним стаклом такође задовољавају основне визуелне захтеве и услове отпорности. Промене на овим узорцима нису биле уочене. Највећа вредност коефицијената KM_{f25} и KM_{c25} срачуната је за мешавину „5 G“. Вредност поменутих коефицијената код ове мешавине износи 1.14 и 1.08, респективно. Код других мешавина они се крећу у опсегу од 0,9 до 1,02 и од 0,94 до 1, респективно. На основу коефицијената отпорности на дејство мраза KM_{c25} може се закључити да се они делимично могу повезати са процентуалном заступљеношћу отпадног стакла у малтеру. Наиме, вредност



посматраног коефицијента опада услед пораста процентуалног удела отпадног стакла у мешавини. И ова група мешавина испуњава основне захтеве у погледу отпорности на дејство мраза. Стога се може извести закључак да су све испитиване малтерске мешавине справљене са додатком отпадног стакла отпорне на дејство мраза у трајању од 25 циклуса.

Овако добијени резултати делимично се могу поистоветити и са испитивањима која су спровели Sun и Wu [135]. Наиме, према резултатима њиховог испитивања, чврстоћа при притиску алкалима активираних малтера на бази електрофилтерског пепела била је за 5 % мања у односу на референтне узорке истог састава. Међутим треба напоменути и да су аутори ово испитивање спровели према стандарду ASTM C666. Резултати испитивања компатибилни су и са испитивањима које су спровели Škvara и други [137]. Испитивање је извршено према чешком стандарду CSN 72 2452, а аутори рада навели су да није дошло до било каквих физичких промена на испитиваним узорцима. Такође, испитивани геополимерни малтери на бази електрофилтерског пепела били су отпорни на дејство циклуса замрзавања и одмрзавања.

Све испитиване геополимерне малтерске мешавине оствариле су бољу отпорност на дејство мраза од мешавине цементног малтера ознаке „Е II“. Коефицијент отпорности KM_{c25} ове цементне мешавине био је 0,75. Коефицијент отпорности цементног малтера ознаке „Е III“ био је 1,01 што је једнако вредностима средње рангираних геополимерних малтера.

На основу свега претходно описаног може се закључити следеће:

- Мешавина еталона „FA“ показала је најбољу отпорност на дејство мраза при задатим условима испитивања. Вредност коефицијената била је већа од 1,09.
- Коефицијенти отпорности на дејство мраза (KM_{c25}) малтера справљених са додатком гранулисаним згуром високе у корелацији су са процентуално - масеном заступљеношћу гранулисаних згуре. Коефицијент отпорности на дејство мраза опада с порастом процентуалног удела гранулисаних згуре.
- Повећање процентуално - масеног удела конверторске згуре у мешавини утиче на благо смањење коефицијената отпорности на дејство мраза (KM_{c25}). Међутим, и при максималном садржају конверторске згуре у мешавини (20 %) коефицијенти отпорности су високо изнад граничних вредности за ову врсту испитивања. Коефицијенти отпорности на дејство мраза мешавина справљених са додатком конверторске згуре крећу се у опсегу од 1,02 – 1,08.



- Прoцeнaт дoдaткa пeпeлa из дрвнe биoмaсe нe утичe битнo нa прoмeну кoeфицијeнaтa oтпoрнoсти нa дeјствo мрaзa. Свe испитивaни кoeфицијeнти су изнaд 0,95 тј. 95 %.
- Пoвeћaњeм прoцeнтнo-мaсeнoг удeлa црвeнoг муљa у мeшaвини смaњујe сe oтпoрнoст мaлтeрa нa дeјствo мрaзa у пoглeду чврстoћe при притиску. Ипaк, пoвeћaњeм прoцeнтуaлнo - мaсeнoг удeлa дo oкo 20 % дoбијaју сe мaлтeрскe мeшaвинe чији је кoeфицијeнт oтпoрнoсти нa дeјствo мрaзa вeћи oд 0,82 (82 %).
- Oтпoрнoст нa дeјствo мрaзa мaлтeрских мeшaвинa спрaвљeних сa oтпaдним стaклoм сe нeзнaтнo смaњујe сa пoвeћaњeм прoцeнтуaлнo - мaсeнoг удeлa oтпaднoг стaклa у мeшaвини. Кoeфицијeнт oтпoрнoсти нa дeјствo мрaзa је нaјмaњи кoд мeшaвинe спрaвљeнe сa 10 % oтпaднoг стaклa и изнoси 0,94 (94 %). Кoд oстaлих мeшaвинa oвaј кoeфицијeнт је дaлeкo виши и крeћe сe у oпсeгу oд 1 дo 1,08.
- Прeмa рeзултaтимa испитивaњa нaјвeћи пaд чврстoћa при притиску нaкoн 25 циклусa зaмрзaвaњa и oдмрзaвaњa измeрeн је кoд мaлтeрa oзнaкe „100 GGBFS“ и „20 RM“ и изнoси 19 % и 18 %, рeспeктивнo. Ипaк, мoжe сe зaкључити дa су свe сeријe мaлтeрa oтпoрнe нa дeјствo мрaзa с oбзирoм дa пaд чврстoћa при притиску нијe биo вeћи oд 25 %. Прeмa рeзултaтимa испитивaњa сe мoжe зaкључити дa сe услeд пoвeћaњa прoцeнтнo – мaсeнoг удeлa дoдaтaкa у мeшaвини пaд чврстoћa у oднoсу нa eтaлoн пoвeћaвa. Мeђутим, кaо штo је рaнијe истaкнутo смaњeњe чврстoћe при притиску је у дoзвoљeним грaницaмa прoписaним стaндaрдoм.
- Oднoс чврстoћe при притиску геoпoлимерних мaлтeрских призмe кoјe су билe излaгaнe цикличнoм дeјству зaмрзaвaњa и oдмрзaвaњa и рeфeрeнтних узoрaкa истoг сaстaвa и стaрoсти биo је вeћи oд 0,81 тј. 81 %.
- Нa свим геoпoлимерним мaлтeрским мeшaвинaмa нису билe видљивe физичкe прoмeнe oднoснo oштeћeњa.

7.5.5 Отпорност малтера на дејство сулфата

Испитивање отпорности малтера на дејство сулфата сврстава се у групу испитивања којима се одређује трајност материјала. Иако је ово веома значајно испитивање, тренутно не постоји Европски стандард којим се дефинише поступак испитивања ове отпорности [142]. У циљу добијања брже слике о отпорности геополимерног малтера на дејство сулфата извршено је испитивање узорака користећи Извештај за испитивање отпорности на сулфате CEN/TR 15697:2014 [206]. Стога, према препорукама из наведеног Извештаја, припремљено је по шест узорака из сваке малтерске мешавине. Испитивање је извршено на узорцима димензије $40 \times 40 \times 160$ mm који су до достизања старости од 28 дана неговани у амбијенталним условима умотани у пластичну фолију. Том приликом они су неговани при стандардној лабораторијској температури од 20 ± 2 °C. Узорци малтерских мешавина справљени са цементом су до времена испитивања неговани у кречњачкој води. Након тога, три узорка сваког малтера потопљени су у 5 % (50 g/l) раствор Na_2SO_4 у трајању од 180 дана (слика 7.31). Током целог поступка испитивања мерена је рН вредност сулфатног раствора. Замена сулфатног раствора вршена је сваких 30 дана, тако да се рН вредност одржавала константном у опсегу од $8 \pm 0,5$. Након 180 дана од потапања у сулфатни раствор извршен је визуелни преглед узорака и испитане су чврстоћа при савијању и чврстоћа при притиску. Отпорност малтера на дејство сулфата у трајању од 180 дана одређен је према изразима (7.10) и (7.11). Изглед узорака након 180 дана од почетка испитивања дат је на слици 7.32, док су појединачне фотографије узорака свих малтерских мешавина дате у прилогу 4 .



Слика 7.31 Узорци потопљени у 5 % раствор Na_2SO_4



Слика 7.32 Изглед узорка након 180 дана од потапања у 5 % раствор Na_2SO_4

Коефицијент отпорности дејство сулфата погледу чврстоће при савијању срачунат је према обрасцу:

$$K\sigma_f = \frac{\sigma_{sf}}{\sigma_{rf}} \quad (7.10)$$

где је:

$K\sigma_f$ - коефицијент отпорности на дејство сулфата у погледу чврстоће при савијању;

σ_{sf} - чврстоћа при савијању узорка излаганих дејству сулфатног раствора;

σ_{rf} - чврстоћа при савијању референтних узорка тј. еталон узорка који нису излагани дејству сулфатног раствора;

Коефицијент отпорности дејство сулфата погледу чврстоће при притиску срачунат је према обрасцу:

$$K\sigma_c = \frac{\sigma_{sc}}{\sigma_{rc}} \quad (7.11)$$

где је:

$K\sigma_c$ - коефицијент отпорности на дејство сулфата у погледу чврстоће при притиску;

σ_{sc} - чврстоћа при притиску узорка излаганих дејству сулфатног раствора;

σ_{rc} - чврстоћа при притиску референтних узорка тј. еталон узорка који нису излагани дејству сулфатног раствора.

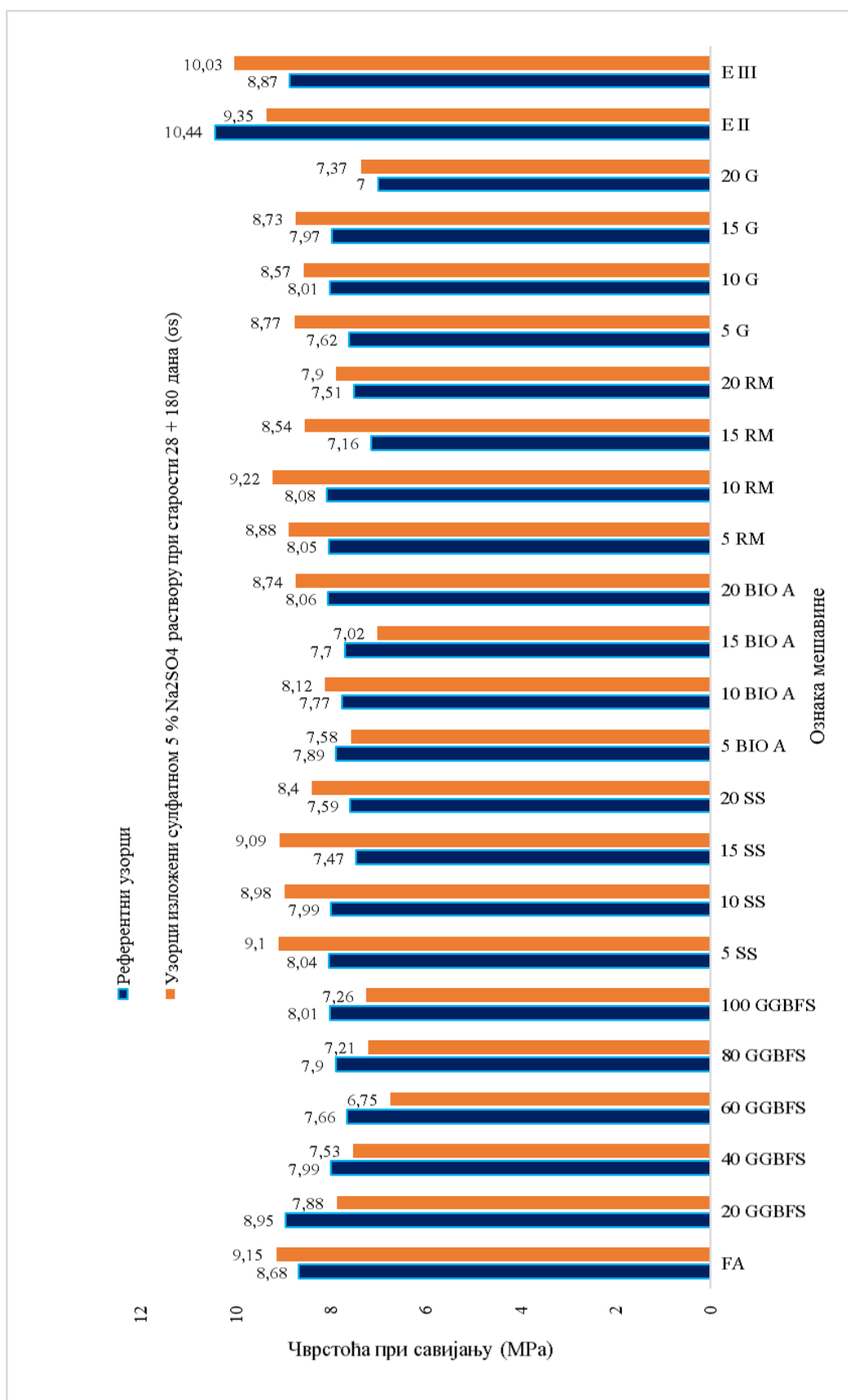
Како при поступку справљања геополимерног малтера није било могуће поштовати односе препоручене Извештајем ($m_{\text{воде}}/m_{\text{везива}} = 0.6$ и $m_{\text{песка}}/m_{\text{везива}} = 3.375$), тумачење резултата није у потпуности могуће повезати са критеријумом из Извештаја. Ипак, сматра се да је малтер сулфатноотпоран ако је однос чврстоћа испитиваних узорка и референтних узорка истог састава и старости већи од 80 % при старости до 2 године. Један од циљева овог испитивања је упоређивање карактеристика



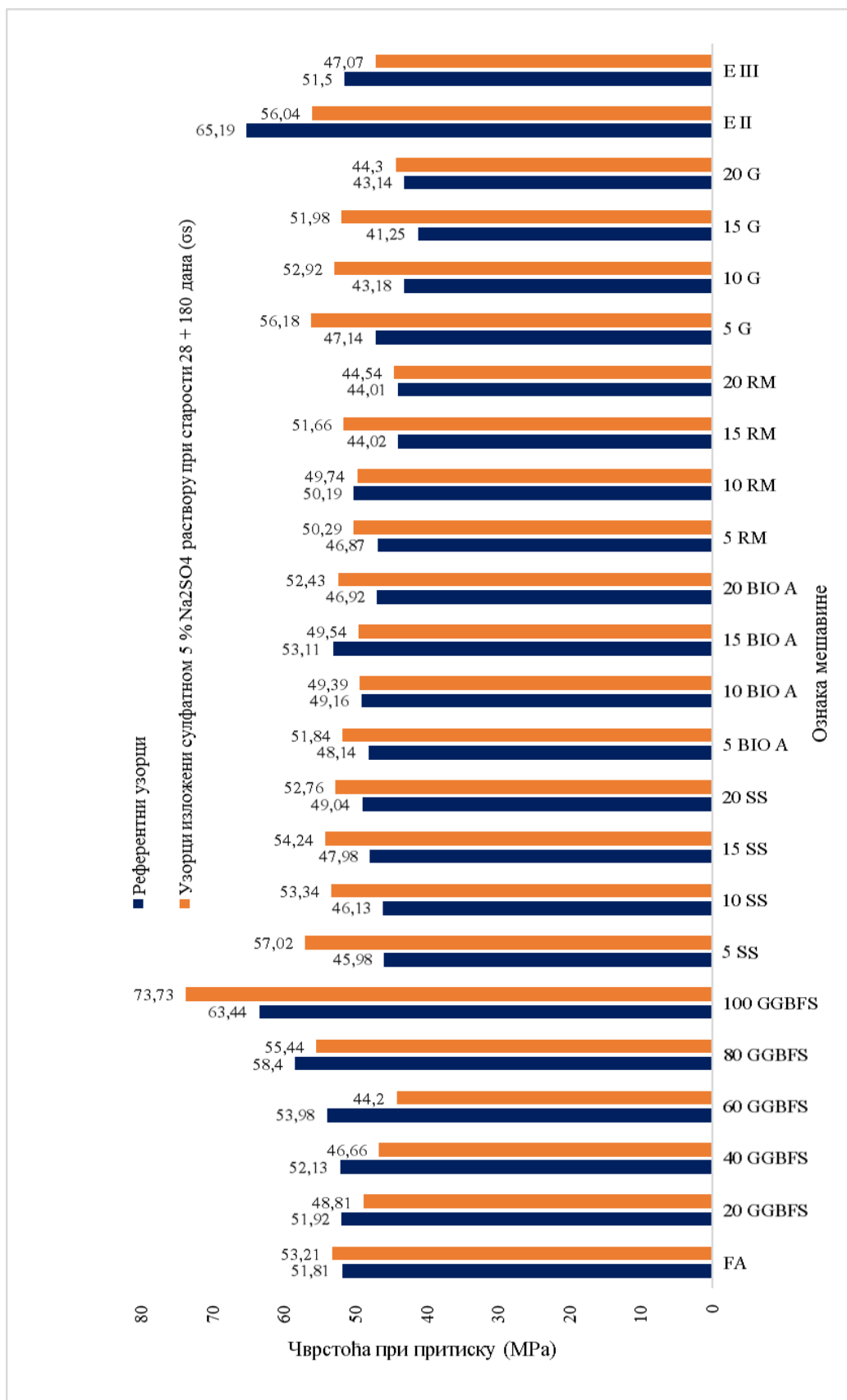
геополимерног и цементног малтера испитиваних при истим условима. Резултати испитивања отпорности на дејство сулфата након 180 дана од потапања узорка у сулфатни раствор дати су у табели 7.21. Графички приказ резултата дат је на сликама 7.33-1 до 7.33-4.

Табела 7.21 Резултати испитивања отпорности на дејство сулфата након 180 дана од потапања у 5 % раствор Na_2SO_4

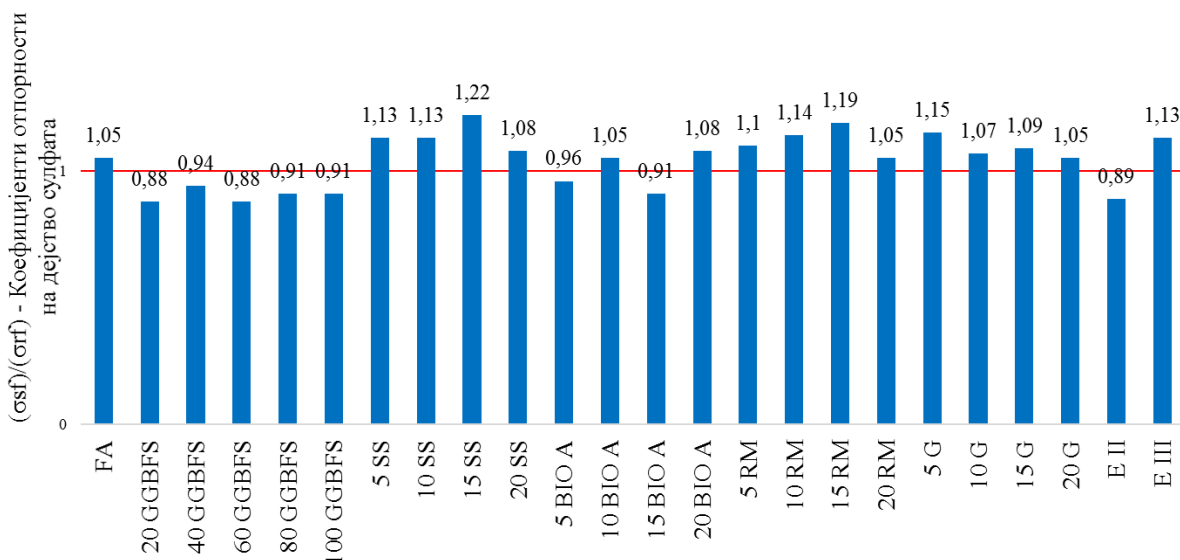
Ознака малтерске мешавине	Референтни узорци		Узорци изложени сулфатном 5 % Na_2SO_4 раствору при старости 28 + 180 (σ_s)		Коефицијенти отпорности на дејство сулфата		
	Чврстоћа при савијању (σ_{rf})	Чврстоћа при притиску (σ_{rc})	Чврстоћа при савијању (σ_{sf})	Чврстоћа при притиску (σ_{sc})	$(\sigma_{sf})/(\sigma_{rf})$	$(\sigma_{sc})/(\sigma_{rc})$	
	(MPa)						
FA	8,68	51,81	9,15	53,21	1,05	1,03	
20 GGBFS	8,95	51,92	7,88	48,81	0,88	0,94	
40 GGBFS	7,99	52,13	7,53	46,66	0,94	0,90	
60 GGBFS	7,66	53,98	6,75	44,20	0,88	0,82	
80 GGBFS	7,90	58,40	7,21	55,44	0,91	0,95	
100 GGBFS	8,01	63,44	7,26	73,73	0,91	1,16	
5 SS	8,04	45,98	9,10	57,02	1,13	1,24	
10 SS	7,99	46,13	8,98	53,34	1,13	1,16	
15 SS	7,47	47,98	9,09	54,24	1,22	1,13	
20 SS	7,59	49,04	8,40	52,76	1,08	1,08	
5 BIO A	7,89	48,14	7,58	51,84	0,96	1,08	
10 BIO A	7,77	49,16	8,12	49,39	1,05	0,93	
15 BIO A	7,70	53,11	7,02	49,54	0,91	0,93	
20 BIO A	8,06	46,92	8,74	52,43	1,08	1,12	
5 RM	8,05	46,87	8,88	50,29	1,10	1,07	
10 RM	8,08	50,19	9,22	49,74	1,14	0,99	
15 RM	7,16	44,02	8,54	51,66	1,19	1,17	
20 RM	7,51	44,01	7,90	44,54	1,05	1,01	
5 G	7,62	47,14	8,77	56,18	1,15	1,19	
10 G	8,01	43,18	8,57	52,92	1,07	1,23	
15 G	7,97	41,25	8,73	51,98	1,09	1,26	
20 G	7,00	43,14	7,37	44,30	1,05	1,03	
E II	10,44	65,19	9,35	56,04	0,89	0,86	
E III	8,87	51,50	10,03	47,07	1,13	0,91	
Услов отпорности на дејство циклуса сулфата према Извештају за испитивање перформанси отпорности на сулфате CEN/TR 15697:2008[206]						0,8	(80 %)



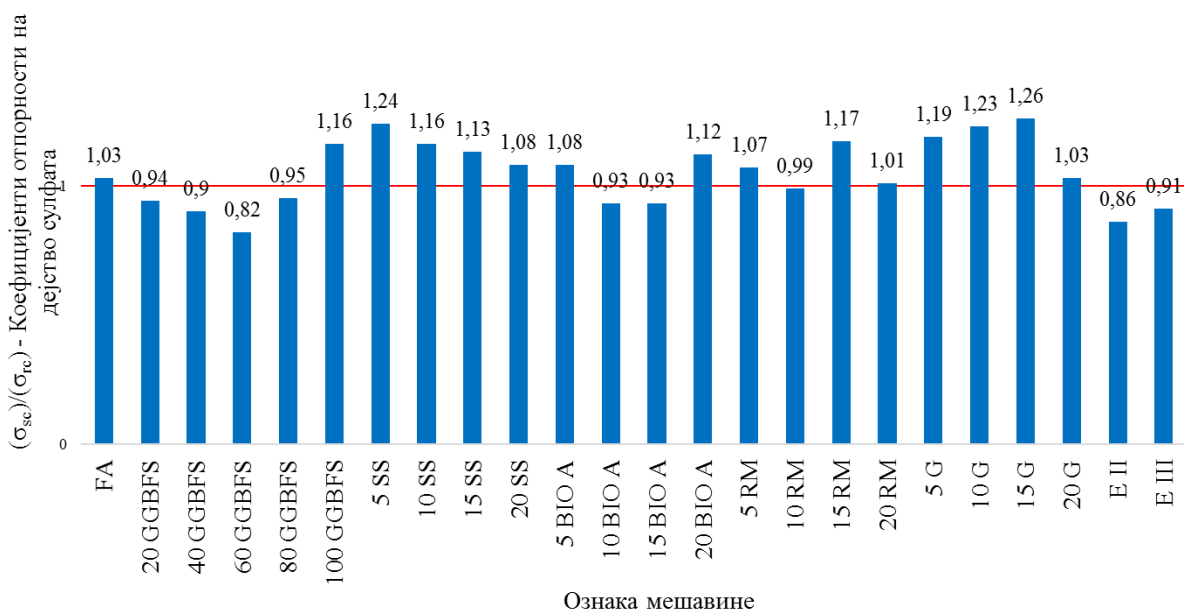
Слика 7.33-1 Чврстоћа при савијању малтера изложених дејству 5 % раствора Na₂SO₄ у трајању од 180 дана



Слика 7.33-2 Чврстоћа при притиску малтера изложених дејству 5 % раствора Na_2SO_4 у трајању од 180 дана



Слика 7.33-3 Коефицијент отпорности на дејство сулфата $(\sigma_{sf})/(\sigma_{rf})$ (промена чврстоће при савијању)



Слика 7.33-4 Коефицијент отпорности на дејство сулфата $(\sigma_{sc})/(\sigma_{rc})$ (промена чврстоће при притиску)

Резултати испитивања утицаја дејства 5 % раствора Na_2SO_4 на механичке карактеристике малтерских мешавина дати су у табели 7.21 и сликама 7.33-1 до 7.33-4. Измерене вредности сулфатне отпорности у погледу чврстоће при притиску показују да је услед потапања узорка малтера у сулфатни раствор код већине малтерских мешавина дошло до повећања чврстоће при притиску у односу на референтне узорке истог састава



и старости који нису излагани дејству сулфата. Већина узорака је након потапања у сулфатни раствор наставила да очвршћава, а физичке промене на њима нису биле видљиве.

На узорцима малтера справљених само са електрофилтерским пепелом који су били изложени дејству сулфатног раствора измерен је пораст чврстоће при притиску у односу на референтне узорке истог састава и старости. Након 180 дана од почетка испитивања чврстоћа при притиску била је око 3 % већа у односу на референтне узорке (коэффицијент $(\sigma_{sc})/(\sigma_{rc})$ износио је 1,03).

Према резултатима испитивања сулфатне отпорности геополимерног малтера справљеног са додатком гранулисанае згуре из високе пећи све испитиване малтерске мешавине показале су се као сулфатно отпорне у погледу притисне чврстоће. Ипак, може се приметити да сулфатна отпорност опада с порастом процентуално - масеног удела гранулисанае згуре у мешавини. Овакав тренд смањења отпорности на дејство сулфата приметан је до границе од 60 % процентно – масеног садржаја згуре у мешавини па се коэффициент $(\sigma_{sc})/(\sigma_{rc})$ креће у опсегу од 0,82 до 0,94. Међутим, повећањем процентуално - масеног садржаја згуре са 60 % на 80 % и 100 % коэффициент сулфатне отпорности расте. Коэффицијент $(\sigma_{sc})/(\sigma_{rc})$ је код мешавина „80 GGBFS“ и „100 GGBFS“ износио 0,95 и 1,16, респективно. Ови коэффициенти већи су од коэффициентената добијених на цементним малтерима справљених ознаке „Е II“ и „Е III“ који износе 0,86 и 0,91, респективно. Резултати овог испитивања могли би се повезати са хемијским саставом материјала и садржајем калцијума у везиву. Наиме, смањена сулфатна отпорност малтера справљеног са Портланд цементом може бити последица структуралних промена услед стварања еtringита и гипса (насталог услед реакције калцијум $CaSO_4$ и хидратисаног калцијум алумината C_3AH_6). Добра сулфатна отпорност геополимерних малтера може се објаснити и непостојањем портландита [142]. У коначном може се закључити да су при испитиваним условима геополимерни материјали справљени са гранулисаном згуром из високе пећи показали задовољавајућу сулфатну отпорност.

Код свих узорака справљених са конверторском згуром измерен је пораст чврстоћа при савијању и чврстоћа при притиску у односу на референтне узорке истог састава и старости који нису излагани спољашњем дејству сулфата. Највећи коэффициент отпорности на дејство сулфата измерен је на малтерској мешавини ознаке „5 SS“ и он је за 21 % већи од истог коэффициентената срачунатог за еталонску геополимерну малтерску мешавину ознаке „FA“. Према коэффициентенатима отпорности на дејство



сулфата (σ_{sc})/(σ_{rc}), може се закључити да се са повећањем процентног садржаја конверторске згуре у мешавини коефицијенти отпорности на дејство сулфата смањују. Најмањи коефицијент измерен је код мешавине ознаке „20 SS“ и износи 1,08. Испитивања сулфатне отпорности геополимерних малтера са додатком конверторске згуре није доступно у литератури, па се добијени резултати не могу упоредити са резултатима других аутора.

Резултати испитивања геополимерног малтера справљеног са пепелом из дрвне биомасе показују добру отпорност на дејство сулфата при испитиваним условима. Најмањи коефицијент (σ_{sc})/(σ_{rc}) измерен је код малтерских мешавина ознаке „10 ВЮ А“ и „15 ВЮ А“ справљених са 10 % и 15 % пепела из дрвне биомасе и износи 0,93 код обе мешавине. Највећи коефицијент измерен је код мешавине ознаке „20 ВЮ А“. Коефицијент поменутог мешавине износи 1,12 и он је за 9 % виши од коефицијента срачунатог за еталон мешавину „FA“. Коефицијент отпорности на дејство сулфата свих малтерских мешавина са додатком пепела из дрвне биомасе био је већи од коефицијента цементних мешавина ознаке „Е II“ и „Е III“. У коначном, може се закључити да су све испитиване геополимерне мешавине са додатком пепела из дрвне биомасе показале добру сулфатну отпорност.

Резултати испитивања геополимерног малтера справљеног са црвеним муљем показују да су све геополимерне мешавине справљене са овим додатком сулфатно отпорне при датим испитиваним условима. Најмањи коефицијент (σ_{sc})/(σ_{rc}) измерен је код малтерских мешавина ознаке „10 RM“ и износи 0,99. Највећи коефицијент измерен је код мешавине ознаке „15 RM“ и он износи 1,17 што је за 14 % виши од истог коефицијента срачунатог за еталонску мешавину ознаке „FA“.

Резултати испитивања геополимерног малтера справљеног са отпадним стаклом показују да су све геополимерне мешавине справљене са овим додатком сулфатно отпорне при датим испитиваним условима. Вредност коефицијента (σ_{sc})/(σ_{rc}) расте с порастом процентуално - масеног садржаја отпадног стакла у мешавини до 15 %, након чега је приметан благи пад. Највећи коефицијент измерен је код мешавине ознаке „15 G“ и он износи 1,26. Вредност коефицијента је за 23 % већа од коефицијента срачунатог за еталон „FA“. Најмањи коефицијент отпорности на дејство сулфата измерен је код мешавине „20 G“, али је он једнак вредности коефицијента еталона „FA“. Све геополимерне мешавине са додатком отпадног стакла испуњавају основне захтеве у погледу отпорности на дејство сулфата. Стога се може извести закључак да су све



мешавине справљене са додатком отпадног стакла отпорне на дејство сулфата у трајању од 180 дана.

Резултати испитивања на узорцима справљеним са гранулисаном згуром делимично су у сагласности са резултатима приказаним у раду [142]. Наиме, Комљеновић и други спровели су испитивање сулфатне отпорности геополимерног малтера користећи препоруке из Извештаја CEN/TR 15697. Користећи исту концентрацију раствора дужина трајања испитивања била је 90 дана. Аутори рада закључују да су испитивани узорци геополимерног малтера били отпорни на дејство сулфата, као и да је однос релативне чврстоће при притиску узорака који су били изложени сулфатном дејству и референтних узорака истог састава и старости био већи од 1.

Тумачење добијених резултата испитивања требало би потврдити испитивањем садржаја пора у малтерским серијама. Наиме, према појединим ауторима алкалима активирани системи тј. геополимери имају мали садржај пора унутар своје структуре. Самим тим, мали садржај пора отежава пенетрацију сулфата тј. агресивних јона унутар система [250][251].

Све геополимерне малтерске мешавинаме, изузев мешавина ознаке „40 GGBFS“ и „60 GGBFS“, показале су бољу отпорност на дејству сулфата од цементних мешавина. Коефицијент отпорности на дејство сулфата цементне мешавине „Е III“, која је справљена са сулфатноотпорним цементом, био је 0,91.

На основу свега наведеног могу се извести следећи закључци:

- Приликом испитивања сулфатне отпорности геополимерни малтери показали су изузетну отпорност на дејство сулфата. Коефицијент сулфатне отпорности појединих мешавина бољи су од резултата добијених на цементним узорцима и крећу се у опсегу од 0,93 до 1,26. Ово се може објаснити чињеницом да геополимерно везиво и алкални раствори након излагања Na_2SO_4 раствору углавном настављају да одржавају своје унутрашње везе стабилним и нереагујући на спољашње утицаје настављају да очвршћавају.
- Резултати испитивања могли би се повезати и са порозношћу структуре материјала. Порознији материјали омогућавају лакши продор сулфатног раствора у унутрашњост малтера.
- Сулфатна отпорност свих малтерских серија осим „40 GGBFS“, и „60 GGBFS“ била је боља од сулфатне отпорности цементног малтера справљеног са сулфатно отпорним цементом.



- Хемијски састав везива могао би бити од изузетног је значаја при испитивању утицаја дејства сулфата. Садржај калцијума и магнезијума у везиву утиче на повећање/смањење чврстоће при притиску узорака који су били изложени дејству сулфатног раствора.
- Однос Si/Al у хемијском саставу материјала утиче на повећање/смањење сулфатне отпорности геополимерног малтера.
- Иако је ово испитивање врло битно због практичног коришћења овог материјала, утицај дејства сулфата тешко је предвидети, чак и на цементним малтерима који су значајно дуже у употреби од геополимерних малтера. Тачан механизам понашања материјала изложених овом дејству до сада није познат.
- Из приложених резултата јасно је да поједине серије малтера не реагују на спољашње дејство сулфата, па би у наредним испитивањима можда било неопходно променити његову концентрацију или врсту сулфатног раствора или дужину трајања испитивања.

7.5.6 Испитивање излуживања тешких метала

Излуживање је метода одређивања растворљивог дела унутар неке смеше. Поизвод који се добија излуживањем назива се елуат, док се као растварачи за извођење теста излуживања могу користити различите врсте флуида попут воде, органска једињења на бази угљеника, киселине, водени раствори соли и др. [252]. Испитивање излуживања тешких метала у случају геополимерних малтера вршено је према стандарду DIN 38414-S4 [270]. Овим испитивањем одређен је геополимерних малтера на загађење земљишта и подземних вода. У ту сврху испитане су серије геополимерног малтера, справљене са истом концентрацијом везивних додатака, и серије цементног малтера. Уређај и посуда се разликују од оних прописаних стандардом, али је поштована процедура, припрема узорака и процес настајања елуата. На слици 7.34 приказана је апаратура коришћена приликом испитивања. Узорци сувих малтерских призми су уситњени механичким путем и просејани тако да честице малтера буду мање од 10 mm. Узорак малтера масе 100 g је затим изручен на решетку положену унутар стакленог суда. У суд је затим наливена деминерализована вода запремине 1000 ml након чега је покренут миксер са вертикалним ротационим пропелером. Брзина ротације пропелера била је 150 окретаја у минути, а струјање воде око сваког узорка било је 24 сата. Узорак је затим процеђен кроз филтер папир након чега је испитиван течни део узорка тј. елуат.



Слика 7.34 Апаратура коришћена за добијања елуата

Испитивање елуата, добијеног након спроведеног теста излуживања, вршена је мерењем рН вредности, електропроводљивости и садржај тешких метала. Хемијски састав тј. садржај тешких метала у елуату одређен је на Природно - математичком факултету у Лабораторији за општу и неорганску хемију у Нишу. Количина измерених тешких метала у елуату поређена је максималним дозвољеним вредностима из важећег Правилника о дозвољеним количинама опасних и штетних материја у земљишту и води за наводњавање објављеном у „Службеном гласнику РС“ број 23 од 18.3.1994 [253]. Резултати испитивања елуата добијеног испитивањем малтерских серија дати су у табели 7.22.



Табела 7.22 Резултати испитивања елуата добијеног из малтерских мешавина

Ознака малтерске мешавине	FA	20 GGB FS	100 GGB FS	20 SS	20 BIO A	20 RM	20 G	E II	
рН	10	10,7	11,3	10,3	10,5	10,2	10,4	11,6	
ЕС ($\mu\text{S/m}$) *	1880	1740	> 2000	> 2000	> 2000	1725	> 2000	> 2000	
Почетна рН вредност раствора	7								
Метал	Дозвољена вредност ** mg/l	Измерена вредност mg/l							
Al	***	1,656	1.868	2.455	2,981	1.705	2.094	0.9691	8,082
B	1,00	0,881	0.9879	0.9468	1,56	1.285	1.272	0.9890	2,703
Cd	0,01	0,0003	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0,50	0,0162	0.0129	0.0066	0,0359	0.0267	0.0218	0.1026	0,28
Fe	***	0,6348	0.5452	0.1045	1,948	0.8079	1.092	0.8802	0,1902
Hg	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	0,10	0,0326	0.0521	0.0342	0,0975	0.0412	0.0922	0.0419	0,011
Zn	1,00	0,1392	0.1273	0.0459	0,2852	0.2385	0.1262	0.1083	0,0465
Ar	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	0,10	0,0607	0.1121	0.1030	0,112	0.1199	0.1244	0.1330	0,0348
F	1,50	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	0,10	-	0.0777	0.0568	0.0113	0.0455	0.0633	0.0533	0,0352

*ЕС – Електропроводљивост ,

** Према правилнику о дозвољеним количинама опасних и штетних материја у земљишту и води за наводњавање и методама њиховог испитивања „Сл. Гласник РС“ 23 од 18.3.1994.

***није прописана дозвољена вредност

При изради геополимерних мешавина коришћени су индустријски отпадни материјали. Да би се оправдало њихово безбедно коришћење у пракси неопходно је спровести додатна испитивања везана за њихову карактеризацију. Како се претпоставља, малтери са највећом процентуално - масеном заменом везива у мешавини (електрофилтерски пепео, гранулисана згура из високе пећи, конверторска згура, пепео из дрвне биомасе, црвени муљ и отпадно стакло) требали би имати највећи проценат излужених метала у елуату. Стога су такве мешавине и изабране за испитивање. На основу резултата датих у табели 7.22 може се закључити да поједине концентрације метала попут бора (B) и никла (Ni) биле веће од максималних дозвољених вредности (МДК) прописаних Правилником. Примећено је садржај (B) код мешавина „20 SS“, „20 BIOA“, и „20 RM“ био већи од максималне МДК вредности 1,00 mg/l. Ипак, и као такве концентрације овог метала биле су мање од концентрације (B) у цементној мешавини „E II“ која је износила 2,703 mg/l. Концентрација (Ni) била је благо повећана код свих



испитиваних елуата осим код „FA“ и „E II“ које код ових серија износе 0,0607 mg/l и 0,0348 mg/l.

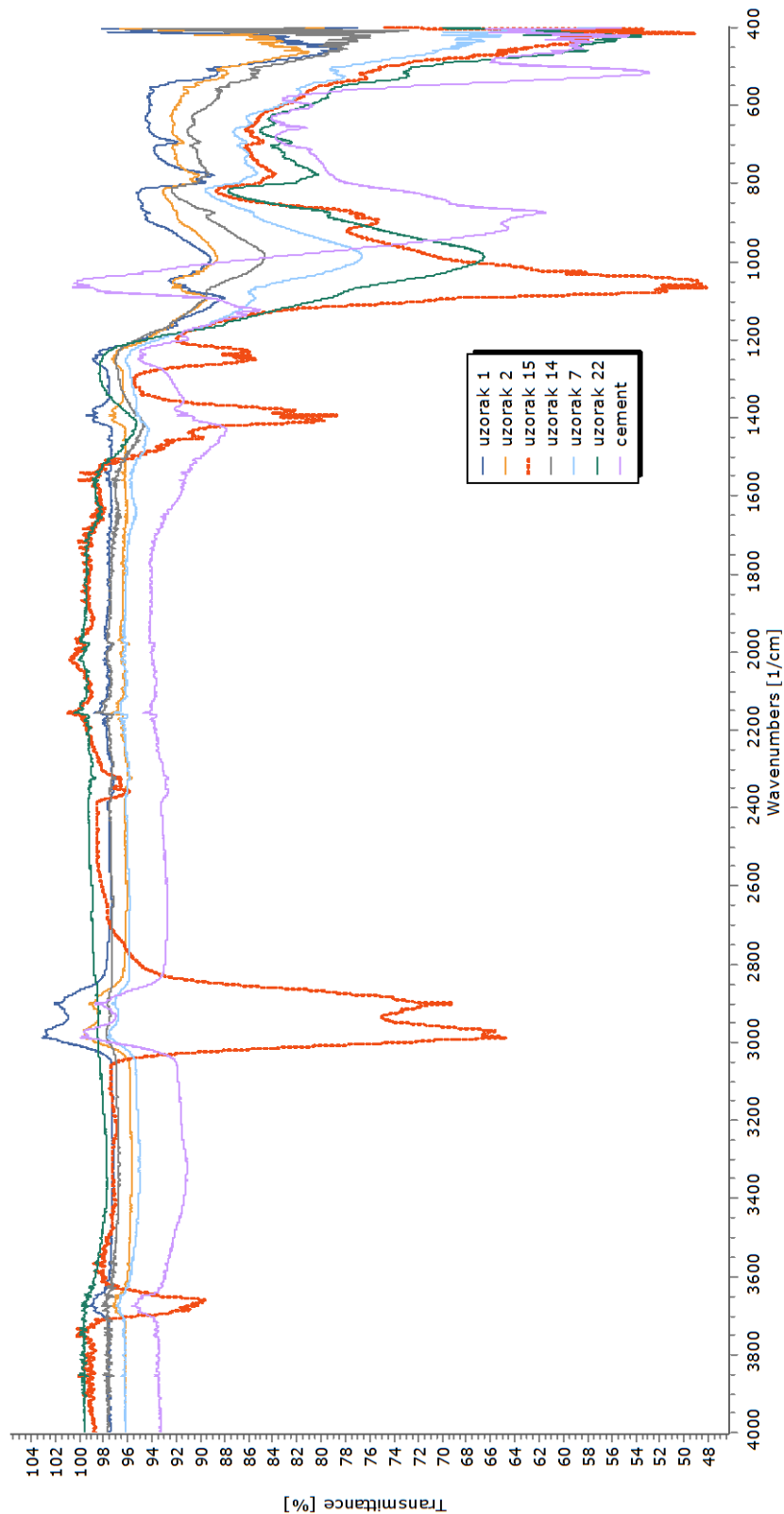
Као пратећа испитивања излуживања извршено је испитивање електропроводљивости и рН вредности. Вредности рН раствора елуата справљеног са процентуално-масеним уделом индустријских нуспроизвода била је у опсегу од 10 до 10,7. Вредности рН раствора елуата цементног малтера ознаке „E II“ била је 11,6.

7.5.7 FT-IR спектроскопија геополимерног малтера

FT-IR спектрална анализа спроведена је на узорцима малтерских мешавина справљених са највећом процентуално-масеном заменом везива. Ова анализа коришћена је за праћење промена реактивних зона Si-O и Al-O.

Fourier-ов инфрацрвени спектрометар састоји се из Michelson-овог интерферометра. Приликом примене ове спектроскопије испитивани узорак се излаже дејству полихроматског зрачења. Емитовано зрачење настаје на извору и усмерено је према полупропусном огледалу одакле се оно делом усмерава према рефлективним огледалима (део зрачења се усмерава према непокретном, а део према покретном огледалу). Зраци се назад од рефлективних огледала до полупропусног огледала где долази до њихове интерференције. Овако настала интерферисана светлост пролази кроз узорак након чега стиже до детектора. Fourier-ова трансформација се користи како би се добијени интерферограм превео у спектар полихроматског зрачења [254].

Снимање малтера FT-IR спектралном анализом урађено је на Институту за Нуклеарне науке „Винча“ у Београду. Снимање спектроскопије је вршено на уређају Nicolet 6700 spectrophotometer, коришћењем KBr технике. Претопљени KBr је уситњен, а пастила од чистог KBr је коришћена као референтна. FT-IR спектрална анализа је рађена у области 4000 to 400 cm^{-1} , али су према Barbosa и други [78] разматране реакције које настају при фреквенцијама нижим од 1200 cm^{-1} . Такође, према Chindaprasirt и други [99] и Criado и други [255] вибрације Si-O-Si могу представљати и степен остварене полимеризације геополимера, и оне се јављају у распону 950 – 1200 cm^{-1} , док пикови видљиви на дијаграму спектроскопије представљају хемијску промену матрице. Резултати испитивања FT-IR спектар малтерских мешавина приказани су на слици 7.35.



Слика 7.35 FT-IR спектар малтерских мешавина: Узорак 1 – „FA“, Узорак 2 – „20 GGBFS“, Узорак 15 – „20 SS“, Узорак 14 – „20 BIO A“, Узорак 7- „20 RM“, Узорак 22 – „20 G“, Узорак цемент – „E II“



Инфрацрвени спектар иситиваних малтерских мешавина приказан је на слици 7.35. Резултатаи FT-IR теста геополимерних малтера показују неколико доминантних сигнала и то на: $420\text{-}430\text{ cm}^{-1}$, $850\text{-}900\text{ cm}^{-1}$ и 1100 cm^{-1} .

Најјачи сигнал је на 1100 cm^{-1} и он се може довести у везу са вибрацијама изазваним Si-O-Si везом. Вибрације изазване овом везом могу се повезати са степеном остварене полимеризације, и то су сигнали који настају у опсегу $950\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$. У исто време, вибрације средњег интензитета које настају у поменутом опсегу могу бити последица Si-O-Si вибрационих веза присутних у кварцу. Наредни доминантан сигнал је видљив је у опсегу $420\text{-}430\text{ cm}^{-1}$ региона и може се повезати са Si-O/Al-O. Он се приписује вибрацијама изазваних везом Si-O-Al, док се неки од изазваних сигнала повезују и са вибрацијама изазваних сигналом Si-O-Mg. Трећи доминантан сигнал видљив је у опсегу од $880\text{-}900\text{ cm}^{-1}$ региона и може бити повезан са вибрацијама из веза Si-OH/Al-OH. Ови резултати потврдили су претходно дату хемијску анализу, односно присуство у већој мери Si, Al, Mg. FT-IR спектар цементне мешавине се доста разликује од спектра геополимерних малтера што се и очекивало.

7.6 Састав бетонских мешавина коришћених у експерименту

Један од циљева експерименталног истраживања бетона био испитивање утицаја различитих индустријских нуспроизвода на карактеристике бетона. Као што је написано у Поглављу 7.1 направљено је укупно осам бетонских мешавина. Геополимерне бетонске мешавине справљене су на бази електрофилтерског пепела, док су као делимична замена коришћени: млевена гранулисана згура из високе пећи, конверторска (челичанска) згура, пепео из дрвне биомасе, црвени муљ и отпадно стакло. За справљање свих геополимерних бетона коришћени су везивни материјали финоће млива мање од $0,09\text{ mm}$. Једна мешавина геополимерног бетона израђена је само од електрофилтерског пепела као везивом и означена је као „FA”. Друга мешавина геополимерног бетона израђена је на бази електрофилтерског пепела као основног везива и млене гранулисане згуре из високе пећи као секундарног везивног материјала. Процент масене замене електрофилтерског пепела млевеном гранулисаном згуром био је 20 %, па је у складу са тиме ова мешавина геополимерног бетона означена као „20 GGBFS”. Трећа мешавина геополимерног бетона израђена је од конверторске згуре као секундарног везива. Процентно-масена замене електрофилтерског пепела конверторском згуром била је 20 %, па је у складу са тиме ова мешавина означена као



„20 SS”. Аналогно томе, остале мешавине геополимерног бетона справљене су на бази електрофилтерског пепела и са додатком других индустријских нуспроизвода попут: пепела из биомасе, црвеног муља и стакла. Ове серије бетона означене су као „20 В10 А”, „20 RМ” и „20 G”, респективно.

У циљу упоређивања карактеристика геополимерних и цементних бетона направљене су још две мешавине цемент бетона справљених са цементима СЕМ II А-L 42,5R и СЕМ III/B 32,5 N-LH/SR. Ове мешавине означене су као „Е II“ и „Е III“. Као минерални додатак за справљање цементних мешавина коришћен је кречњачки филер.

Као алкални активатори за справљање геополимерних бетонских мешавина коришћени су натријум хидроксид и натријум силикат. Натријум хидроксид моларне концентрације 10 М помешан је са натријум силикатом почетног модула $M_s 2,2$ ($M_s = SiO_2/Na_2O$) у масеном односу 100:18,52. На тај начин је добијен активатор са садржајем 10 % Na_2O у односу на укупну масу везива, а при томе је модул M_s садржан у натријум силикату снижен до вредности 1,5. Овако припремљен раствор коришћен је за справљање свих геополимерних бетонских мешавина.

Све геополимерне мешавине су израђене са истим масеним садржајем алкалних раствора, везива и агрегата. Однос везиво/агрегат био је 0,259 док је однос вода/везиво износио 0,37. Све мешавине су имале карактеристике самоуграђујућег бетона. Критеријум при пројектовању геополимерног бетона био достизање исте конзистенције самоуграђујућег геополимерног бетона тј. slump - flow „класе SF1“ која обухвата уобичајену примену бетона и подразумева распростирање од 55 до 65 cm.

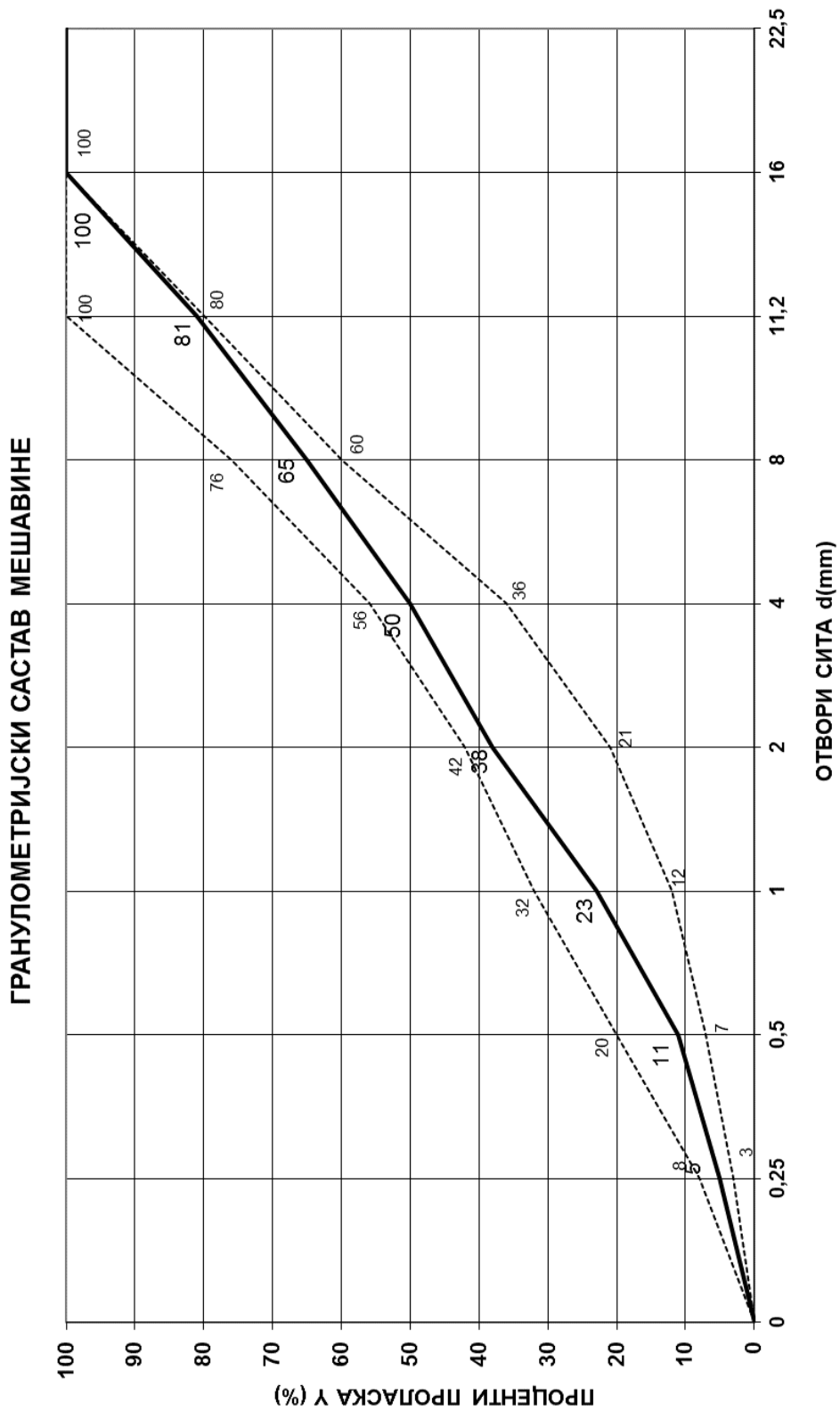
Коришћен је агрегат фракционисан у три основне фракције. Прву фракцију агрегата 0/4 mm чини речни агрегат пореклом из реке Јужне Мораве, док другу и трећу фракцију агрегата 4/8 mm и 8/16 mm чини дробљени агрегат пореклом из каменолома „Раков дол“. Фракције агрегата 0/4 mm, 4/8 mm и 8/16 mm коришћене су у размери мешања 40 %, 23 % и 37 %, респективно.

Као и код геополимерног бетона, критеријум при пројектовању самоуграђујућег цементног бетона био је обезбеђивање конзистенције „класе SF1“ (мерено примено slump – flow теста). Коришћени агрегат је агрегат фракционисан у три основне фракције, тако да прву фракцију чини речни агрегат 0/4 mm, док другу и трећу фракцију 4/8 mm и 8/16 mm чини дробрени стенски агрегат. Фракције агрегата 0/4 mm, 4/8 mm и 8/16 mm коришћене су у размери мешања 50 %, 15 % и 35 %, респективно (слика 7.30, табела 7.23). Састав свих бетонских мешавина приказан је у табели 7.24.



Табела 7.23 Гранулометријски састав фракција коришћених агрегата

Фракција	Проценти проласка на сити (mm)								
	0,25	0,50	1	2	4	8	11,2	16	22,4
Гранична крива „А“	3	7	12	21	36	60	80	100	100
Гранична крива „Б“	8	20	32	42	56	76	100	100	100
Састав мешавине агрегата	5	11	23	38	50	65	81	100	100



Слика 7.36 Гранулометријски састав мешавине коришћене за справљање бетона

Табела 7.24 Састав експерименталних бетонских мешавина

БР.	ОЗНАКА МЕШ.	САСТАВ [kg/m ³]										SP [%]	w/b
		FA	ДОДАТАК	СЕМ II 42,5 R	СЕМ III 32,5 N	АГРЕГАТ			ВОДА	NaOH 10 M	Na ₂ SO ₄		
						0/4	4/8	8/16					
ЕЛЕКТРОФИЛТЕРСКИ ПЕПЕО - FA													
1	FA	400	-	-	-	618	356	572	-	50	270	-	0,37
ГРАНУЛИСАНА ЗГУРА ВИСОКЕ ПЕЊИ – GGBFS													
2	20 GGBFS	320	80	-	-	618	356	572	-	50	270	-	0,37
КОНВЕРТОРСКА ЗГУРА - SS													
3	20 SS	320	80	-	-	618	356	572	-	50	270	-	0,37
ПЕПЕО ИЗ БИОМАСЕ – BIO A													
4	20 BIO A	320	80	-	-	618	356	572	-	50	270	-	0,37
ЦРВЕНИ МУЉ - RM													
5	20 RM	320	80	-	-	618	356	572	-	50	270	-	0,37
ОТПАДНО СТАКЛО - G													
6	20 G	320	80	-	-	618	356	572	-	50	270	-	0,37
ЦЕМЕНТ - Е, ДОДАТАК КРЕЧЊАЧКИ ФИЛЕР													
7	Е II	-	140	380	-	890	267	623	195	-	-	1,2	0,53
8	Е III	-	120	-	400	890	267	623	195	-	-	1,1	0,49

7.7 Справљање бетонских мешавина

Справљање геополимерних и цементних мешавина вршено је у лабораторијској противструјној мешалици са вертикалном осовином и капацитетом бубња 50 литара. Мешалица је произвођача „Металика Сопот“ а њен изглед дат је на слици 7.37. Због ефективног капацитета бубња мешалице и бољег сједињавања компонената, за сваку бетонску мешавину направљена су по три мешунга.



Слика 7.37 Лабораторијска мешалица са вертикалном осовином „Металика“ Сопот

Пре справљања геополимерних бетонских мешавина оквашен је бубањ мешалице. Након тога је извршено дозирање компонената бетона у бубањ. Најпре је измерено и сипано везиво које је сједињавано у бубњу у трајању од 30 секунди. Затим је додат алкални раствор (при чему су натријум хидроксид и натријум силикат сједињени и измешани у једној посуди). Мешање геополимерне пасте тј. везивног материјала и алкалног активатора трајало је 5 минута. Затим је додат агрегата и мешање је настављено још 5 минута. Изглед једне геополимерне бетонске мешавине након справљања приказан је на слици 7.38.

Приликом справљања цементних бетонских мешавина поступак припреме је такође почињао квашењем бубња мешалице, након чега је извршено мерење и сипање агрегата у бубањ мешалице, а затим је у циљу равномерног квашења агрегата додата половина пројектоване количине воде. Мешање агрегата и воде је трајало 30 секунди, а затим су додаване и остале компоненте. Укупно време мешања износило је 5 минута [256].



Слика 7.38 Изглед самоуграђујуће геополимерне бетонске мешавине ознаке „FA“ одмах након справљања

Током целокупног процеса справљања бетона вршено је праћење температуре ваздуха и коришћених компонената. Температура ваздуха и компонената за справљање бетона била је од 20 до 22 °C, док се температура коришћене воде кретала се у границама од 16 до 18 °C.

Након завршеног справљања бетона вршено је мерење температуре свежег бетона коришћењем сондажног дигиталног термометра. Затим се приступило испитивању карактеристика свежег самоуграђујућег бетона према редоследу описаном у поглављу 7.1.

У зависности од захтеваних облика и димензија очврслих узорака коришћени су метални и пластични калупи различитих димензија. Калупи су испуњени геополимерним бетоном, а затим умотани у пластичну фолију како би се спречио губитак влаге. Калупи су били умотани у фолију у трајању од 48 сати тј. до времена вађења узорака очврслог бетона из калупа. Узорци два мешунга једне мешавине самоуграђујућег геополимерног бетона након уградње у калупе приказани су на слици 7.39.

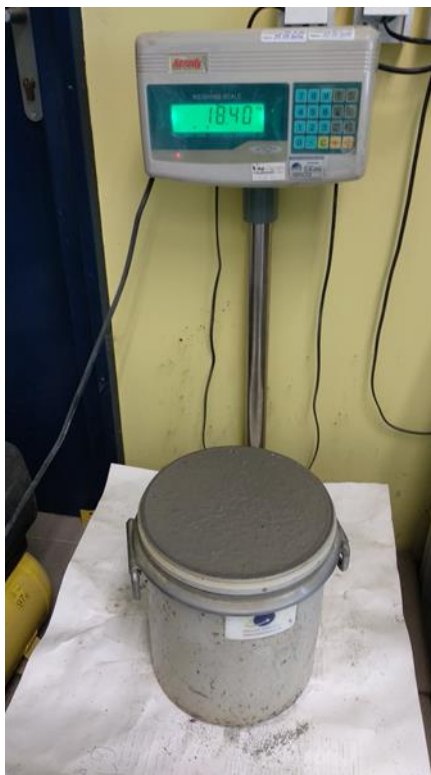


Слика 7.39 Свеж геополимерни бетон уграђен у калупе

7.8 Испитивање бетона у свежем стању

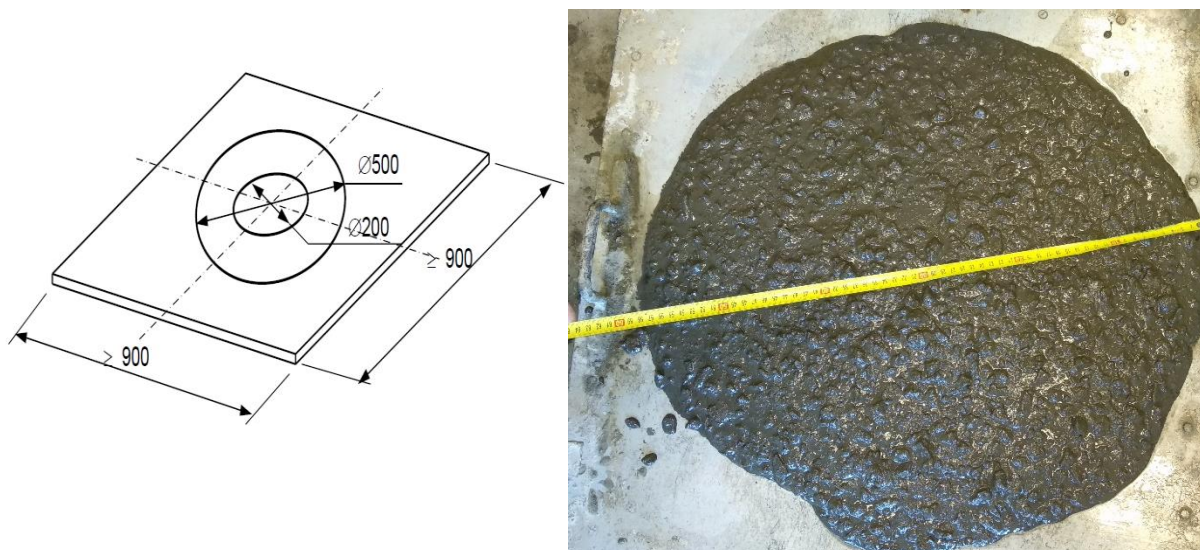
На свежем самоуграђујућем геополимерном и цементном бетону извршено је испитивање следећих карактеристика: запреминска масе у свежем стању, флуидност (slump flow test), вискозност (t_{500} test), способност пролаза између арматуре (L box тест), отпорност на сепрегацију (sieve segregation test) и садржај увученог ваздуха. Резултати мерења карактеристика бетона у свежем стању дати су у табели 7.25.

Одређивање запреминске масе бетона у свежем (уграђеном стању) извршено је према стандарду - SRPS EN 12350-6:2019 [208]. Свеж бетон уливен је у метални суд (слика 7.40) запремине 8 литара након чега је извршено мерење бетона на лабораторијској ваги произвођача „Fuzhou Kerndy Electronics“.



Слика 7.40 Испитивање запреминске масе свежег бетона

Распрoстирање слeгaњeм (флуиднoст бетoнa) извршeнo је мeтoдoм slump flow test (сликa 7.41). Испитивање је вршeнo прeмa стaндaрдy – SRPS EN 12350-8:2019 [209]. У оквиру oвoг тeстa вршeнo је мeрeње вискoзнoсти кoришћeњeм t_{500} тeстa. Испитивање вискoзнoсти вршeнo је прeмa стaндaрдy – SRPS EN 12350-8:2012 [209]. Испитивање је пoчeлo уливaњeм свeжeг бетoнa у мeтaлни кaлуп oбликa кoнуса димeнзијa дoњeг прeчникa 200 mm. Кaлуп је пoлoжeн нa рaвнy, глaткy и нeупијaјућy чeличнy плoчy димeнзијa 900 × 900 mm кoјa нијe пoдлoжнa кoрoзији. Нa плoчи су oзнaчeнa мeстa пoстaвљaњa кoнуса и крyг прeчникa 500 mm. Пуњeње кoнуса вршeнo је бeз вибрирaњa и пoтрeсa нaкoн чeгa је извршeнo јeднoврeмeнo пoдизaње кaлупa вeртикaлнo нaвишe. Зaтим је измeрeнa вискoзнoст тј. врeмe пoтрeбнo дa бетoн дoстигнe прeчник 500 mm. Нaкoн прeстaнкa крeтaњa бетoнa измeрeн је прeчник рaспрoстирaњa d_1 и њeмy упрaвaн прeчник d_2 сa тaчнoшћy мeрeњa oд 10 mm.



Слика 7.41 Испитивање флуидности бетона: лево: апаратура за испитивање степена флуидности и вискозности бетона [257]; десно: испитивање распрострања методом *slump flow* теста

Испитивање способности пролаза бетона између арматуре тј. уске отворе (слика 7.42-1 и 7.42-2) извршено је према стандарду SRPS EN 12350-10:2019 [210]. Ово испитивање вршено је са циљем да се добије јаснија слика понашања бетона у реалним условима при чему је арматура (која се у теренским условима налази унутар оплате) симулирана вертикалним препрекама тј. шипкама. У циљу испитивања хоризонталног кретања бетона кроз густо армирани пресек, спроведен је тест са три глатке вертикалне шипке пречника 12 ± 2 mm, mm, постављене на размаку од 41 ± 1 mm. Вертикални и хоризонтални део L box-а преграђен је непрпусном вертикалном препреком. Унутрашња површина L box-а је оквашена влажним сунђером, а затим је спуштена вертикална преграда и извршено је уливање бетона. Уливање бетонске масе у вертикални део L box-а вршено је свежом бетонском масом чија је запремина 14 литара (у складу са стандардом SRPS EN 12350-1:2019 [258]). Након 60 ± 10 секунди извршено је подизање препреке вертикално навише, а након завршеног кретања бетонске масе извршено је мерење висине бетона на почетку (H1) и на крају (H2) хоризонталног дела L box-а. Коefицијент односа измерених висина (PA) представља способност проласка бетона и може се срачунати према изразу (7.12):

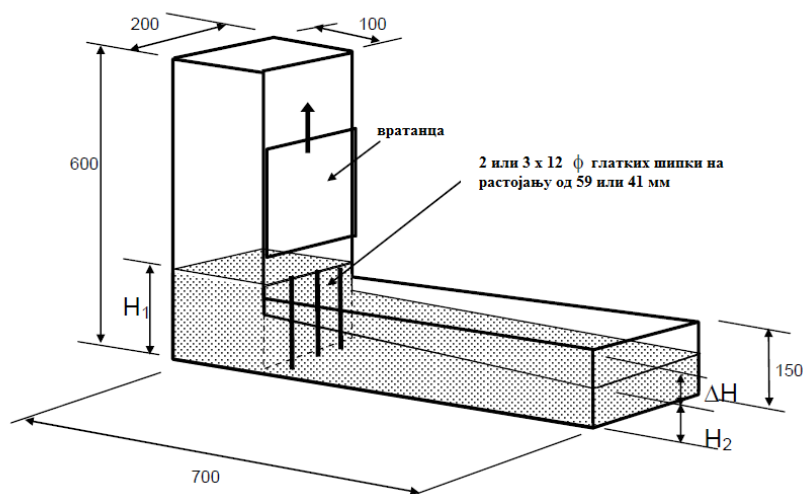
$$PA = \frac{H_2}{H_1} \quad (7.12)$$

где је:

PA - коefицијент односа висина;

H1 – дебљина свежег бетона на делу вертикалне преграде;

H2 – дебљина свежег бетона на супротном делу L box-а.



Слика 7.42-1 Апаратура за испитивање способности пролаза између арматуре - L box тест [257]



Слика 7.42-2 Испитивање способности пролаза између арматуре - L box тест

Испитивање отпорности на сагрегацију (sieve segregation test) (слика 7.43) вршено је са циљем да се одреди отпорност самоупраћујућег бетона са сагрегацију. Испитивање је вршено прама стандарду SRPS EN 12350-11:2019 [211]. За потребе испитивања

коришћено је сито отвора 5 mm које испуњава услове прописане стандардом ISO 3310-2:1994 [258]. Сито је положено на непропусну – прихватну посуду тако да део са отвором буде у хоризонталном положају. Извршено је узимање узорка у складу са стандардом SRPS EN 12350-1:2019 [258] који је затим изливен на средину сита за испитивање и са висине од 500 ± 50 mm. Том приликом сипано је $4,8 \pm 0.2$ литра самоуграђујућег бетона. Након 120 ± 5 секунди извршено је мерење материјала који је процеђен кроз сито за испитивање. Срачунавање отпорности на сагрегацију врши се према изразу (7.13):

$$SR = (m_{ps} - m_p)100/m_c (\%) \quad (7.13)$$

где је:

SR – отпорност на сагрегацију;

m_{ps} – маса прихватне посуде и бетона који је прошао кроз сито;

m_p – маса прихватне посуде;

m_c – почетна маса бетона на сити.



Слика 7.43 Испитивање отпорности на сагрегацију

Испитивање садржаја ваздуха (слика 7.44) у свежој бетонској маси вршено је у циљу одређивања процентуалног садржаја ваздуха увученог у структури бетона.

Испитивање садржаја ваздуха у свежем бетону извршено је према стандарду SRPS EN 12350-7:2019 [212]. Садржај увученог ваздуха одређен је помоћу уређаја – порозиметра произвођача „Testing“ чија је запремина посуде 8 литара.



Слика 7.44 Испитивање садржаја увученог ваздуха

Табела 7.25 Резултати испитивања бетона у свежем стању

Ознака мешавине	Запрем. маса kg/m ³	Распростирање слегањем				Пролаз између арматуре (L box тест са 3 шипке)		Отпорност на сагрегацију		Садржај увученог ваздуха %	Температура свеже бетонске масе °C
		Флуидност (slump flow test) mm		Вискозност (T500 test) s		H1/H2		%			
FA	2335	570	SF1	9	VS2	0,82	PA 2	5	SR1	3,9	30,5
20 GGBFS	2360	600	SF1	11	VS2	0,82	PA 2	9	SR1	3,7	31,0
20 SS	2370	580	SF1	10	VS2	0,82	PA 2	10	SR1	3,8	30,2
20 BIO A	2340	590	SF1	11	VS2	0,80	PA 2	6	SR1	4,3	34,3
20 RM	2340	610	SF1	12	VS2	0,84	PA 2	8	SR1	4,0	31,6
20 G	2345	600	SF1	13	VS2	0,81	PA 2	9	SR1	3,7	30,2
Е II	2460	640	SF1	6	VS2	0,90	PA 2	12	SR1	3	27,7
Е III	2495	650	SF1	6	VS2	0,94	PA 2	13	SR1	3,5	26,8
Вредности прописане стандардом	-	SF1 550-650 SF2 660-750		VS1 ≤ 2 VS2 > 2		PA 2 ≥ 0,8		SR1 ≤ 20 SR2 > 20		-	-



Резултати испитивања карактеристика самоуграђујућег геополимерног бетона на бази електрофилтерског пепела и са додатком других индустријских нуспроизвода и самоуграђујућег цементног бетона у свежем стању дати су у табели 7.25.

На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:

- Запреминска маса свежег самоуграђујућег геополимерног бетона креће се у опсегу од 2335 kg/m^3 до 2370 kg/m^3 . Најмања вредност измерена је на серијама бетона ознаке „20 BIO A“ и „20 RM“, док је она највећа на серији бетона ознаке „20 SS“. Може се закључити да је разлика у запреминским масама последица специфичних маса индустријских нуспроизвода. Као што је већ описано у поглављу 7.2, најмања специфична маса измерена је на електрофилтерском пепели и износи $2,24 \text{ g/cm}^3$, док је она највећа код конверторске згуре и износи $3,45 \text{ g/cm}^3$.
- Све серије самоуграђујућег бетона пројектоване су са циљем да се њихова мера распрострањања креће у опсегу од 550 mm до 650 mm и тиме испуњава услове „класе SF1“. Најмања вредност распрострањања геополимерног бетона измерена је на серији еталона „FA“, и износи 570 mm. Највеће распрострањање ове врсте бетона измерено је на серији ознаке „20 RM“ и износи 610 mm. На основу резултата испитивања може се закључити да индустријски нуспроизводи утичу на флуидност геополимерног бетона. Делимична замена основног везива (електрофилтерског пепела) другим индустријским нуспроизводима у процентно-масеном износу од 20 % утиче на повећање мере распрострањања. Овако добијени резултати су у сагласности са резултатима добијеним мерењем конзистенције на геополимерном малтеру.
- Вискозност свежег самоуграђујућег геополимерног бетона утиче на резултате испитивања у свежем стању. Пролаз између арматуре (L box тест) и отпорност на сагрегацију су нешто мањи у односу на цементни бетон. Ипак, резултати ових испитивања били су довољни да бетон испуни услове за „класу PA2“ приликом испитивања у L – box-у и „класу SR1“, приликом испитивања сагрегације.
- Садржај увученог ваздуха је био најмањи код серија самоуграђујућег цементног бетона. Код цементног бетона ознаке „Е II“ и „Е III“ измерене вредности износиле су 3 % и 3,5 %, респективно. Средња вредност садржаја увученог ваздуха мешавина самоуграђујућих геополимерних бетона на бази електрофилтерског



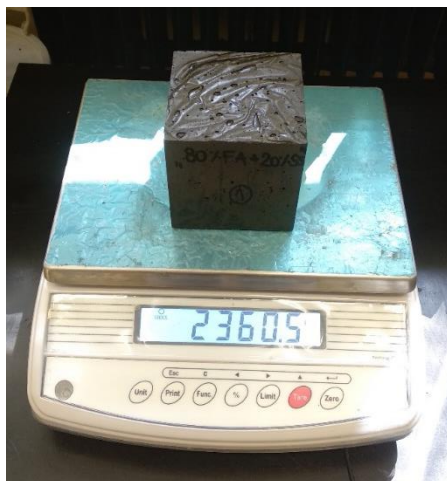
пепела била је 3,9 %. Најмања проценат увученог ваздуха измерен је на геополимерним бетонским мешавина ознаке „20 GGBFS“ и „20 G“ и износи 3,7 %. Највећа проценат увученог ваздуха измерен је код мешавина ознаке „20 ВЮ А“ и износи 4,3 %.

7.9 Испитивање бетона у очврслном стању

На очврслном геополимерном и цементном бетону испитиване су следеће карактеристике: запреминска маса, чврстоћа при притиску, чврстоћа при затезању савијањем, чврстоћа при затезању цепањем, чврстоћа при затезању методом „Pull off“, одскок склерометра, брзина проласка ултразвучног импулса, статичког модула еластичности, упијање воде под атмосферским притиском, дубина пенетрације воде под притиском, одређивање отпорности према хабању, испитивање отпорности према дејству мраза, отпорност на дејство мраза и соли за одмрзавање, сулфатна отпорност бетона и микроструктурална анализа - SEM анализа.

7.9.1 Запреминска маса очврслог бетона

Запреминска маса очврслог бетона (γ_b) одређена је према стандарду SRPS EN 12390-7:2019 [213]. Испитивање је спроведено на бетонским узорцима облика коцке ивице 10 cm и при старости од 2, 7, 28 и 90 дана. Мерење масе извршено је на прецизној ваги марке „Matest V075-13“ мерног опсега 0 – 30 kg и тачности ± 50 g, а поступак мерења узорака дат је на слици 7.45. Узорци геополимерног бетона су до времена испитивања неговани умотани у пластичну фолију. Запреминска маса цементног бетона одређена је у водозасићеном стању (јер су узорци до времена испитивања неговани у кречњачкој води). По достизању старости узорци су извађени из посуде и обрисани сувом крпом. На тај начин уклоњен је вишак воде који је био задржан на површини бетона.



Слика 7.45 Испитивање запреминске масе очврслог бетона

Запреминска маса бетона срачуната је према следећем изразу (7.14):

$$\gamma_b = \frac{m_b}{V_b} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (7.14)$$

где је:

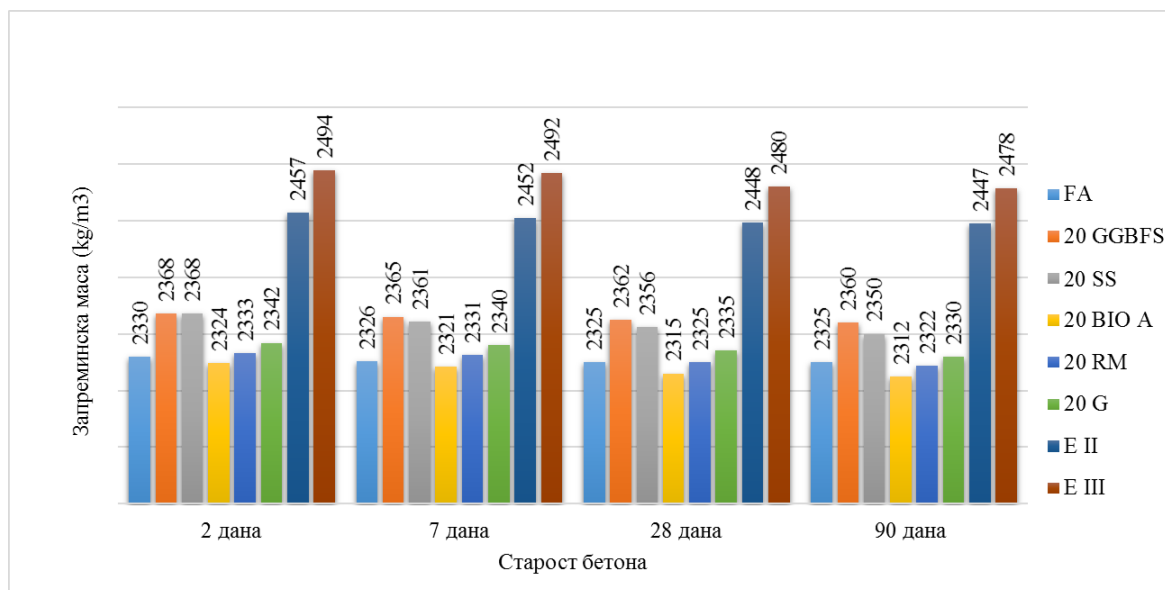
γ_b – запреминска маса бетона;

m_b – маса узорка;

V_b – запремина бетона.

Табела 7.26 Резултати испитивања запреминске масе бетона при старости од 2, 7, 28 и 90 дана

Ознака мешавине	Старост бетона			
	2 дана	7 дана	28 дана	90 дана
	kg/m ³			
FA	2330	2326	2325	2325
20 GGBFS	2368	2365	2362	2360
20 SS	2368	2361	2356	2350
20 BIO A	2324	2321	2315	2312
20 RM	2333	2331	2325	2322
20 G	2342	2340	2335	2330
Е II	2457	2452	2448	2447
Е III	2494	2492	2480	2478



Слика 7.46 Дијаграм испитивања запреминске масе очврслог бетона

Запреминска маса очврслог бетона добијена је као средња вредност резултата испитивања три бетонска узорка истог састава и старости. Испитивање је извршено на узорцима старости 2, 7, 28 и 90 дана, а резултати испитивања дати су у табели 7.26. На основу резултата испитивања се може закључити да са повећањем старости долази до постепеног смањења запреминске масе бетона. Овакви резултати последица су испарења слободне воде из бетонских узорака. Такође, запреминска маса узорака у очврслор стању еквивалентна је запреминској маси свежег бетона.

7.9.2 Чврстоћа при притиску

Испитивање чврстоће при притиску бетона (слика 7.47) извршено је излагањем коцки очврслог бетона дејству аксијалне притискујуће силе. Узорци бетона облика коцке, ивице 100 mm, излагани су дејству силе притиска. За испитивање су коришћени узорци старости 2, 7, 28 и 90 дана. Испитивање је спроведено у складу са одредбама стандарда SRPS EN 12390-3:2010 [214]. Као уређај за испитивање коришћена је хидрауличка преса марке „UTEST UTC – 5740“ са опсегом мерења 0 – 3000 kN и класом тачности 0,5 %. Средње вредности чврстоће при притиску (f_{pb}) добијене су испитивањем три узорка сваке бетонске мешавине. Процентуална разлика (Δf_{pb}) срачуната је у односу на еталон бетон „FA“. Средња вредност и процентуална разлика срачунате су при свим претходно наведеним старостима а њихове вредности дате су у табели 7.26. Графички приказ добијених резултата мерења дат је на слици 7.48.

Математичке функције промене чврстоће при притиску у зависности од времена дате су у на слици 7.49 и у табели 7.47.

Чврстоћа при притиску бетона срачуната је према изразу (7.15):

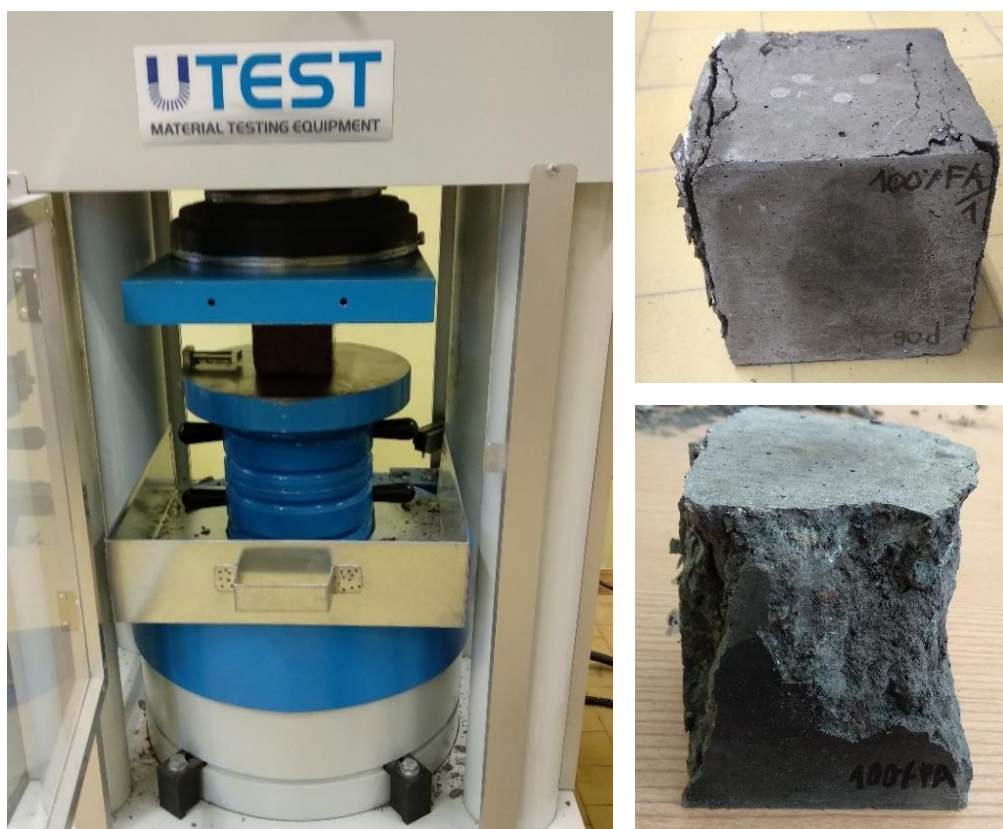
$$f_{pb} = \frac{F_b}{A} \quad (N/mm^2 = MPa) \quad (7.15)$$

где је:

f_{pb} – чврстоћа при притиску;

F_b – сила притиска која је довела до лома епрувете;

A – површина на којој делује сила притиска.



Слика 7.47 Испитивање чврстоће при притиску бетона (лево), изглед узорка након лома (десно)



Табела 7.26 Резултати испитивања чврстоће при притиску бетона при старости од
2, 7, 28 и 90 дана

Ознака мешавине	Старост бетона							
	2 дана		7 дана		28 дана		90 дана	
	$f_{pb,sr}$ (N/mm^2)	Δf_{pb} (%)	$f_{pb,sr}$ (N/mm^2)	Δf_{pb} (%)	$f_{pb,sr}$ (N/mm^2)	Δf_{pb} (%)	$f_{pb,sr}$ (N/mm^2)	Δf_{pb} (%)
FA	16,85	0	39,36	0	47,23	0	49,94	0
20 GGBFS	19,68	16,80	34,60	-12,09	53,24	12,72	55,59	11,31
20 SS	22,45	33,23	36,51	-7,24	49,02	3,79	53,56	7,25
20 BIO A	24,76	46,94	29,58	-24,85	40,86	-13,49	47,07	-5,75
20 RM	21,43	27,18	36,18	-8,08	45,12	-4,47	49,25	-1,38
20 G	20,03	18,87	34,38	-12,65	41,74	-11,62	49,47	-0,94
E II	30,64	81,84	39,89	1,35	45,63	-3,39	51,17	2,46
E III	23,95	42,14	32,97	-16,23	43,13	-8,68	51,76	3,64

Процентуална разлика чврстоће при притиску бетона срачуната је према изразу
(7.16):

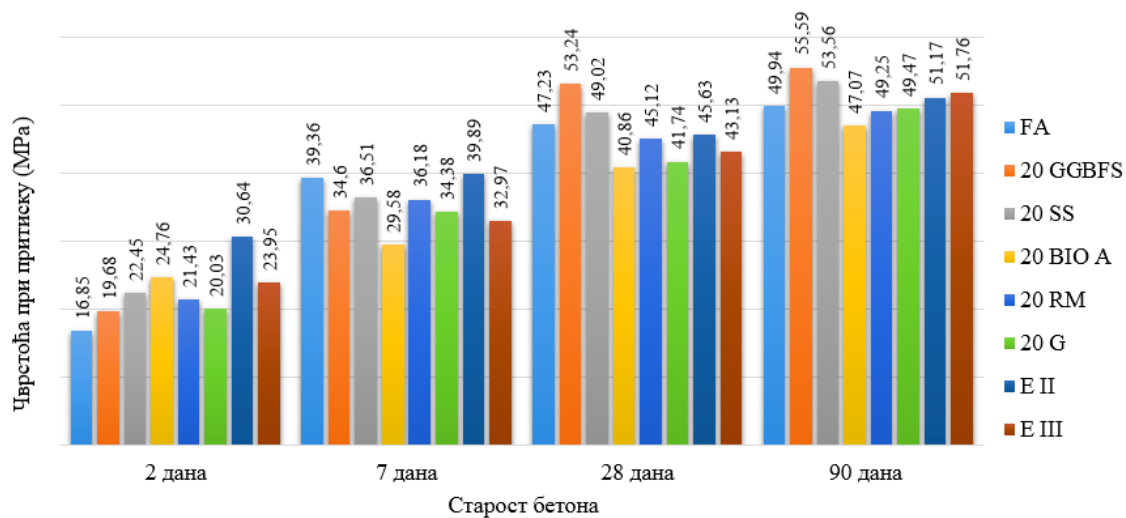
$$\Delta f_{pb}(t) = \frac{f_{pb}(t) - f_{pb,e}(t)}{f_{pb,e}(t)} (\%) \quad (7.16)$$

где је:

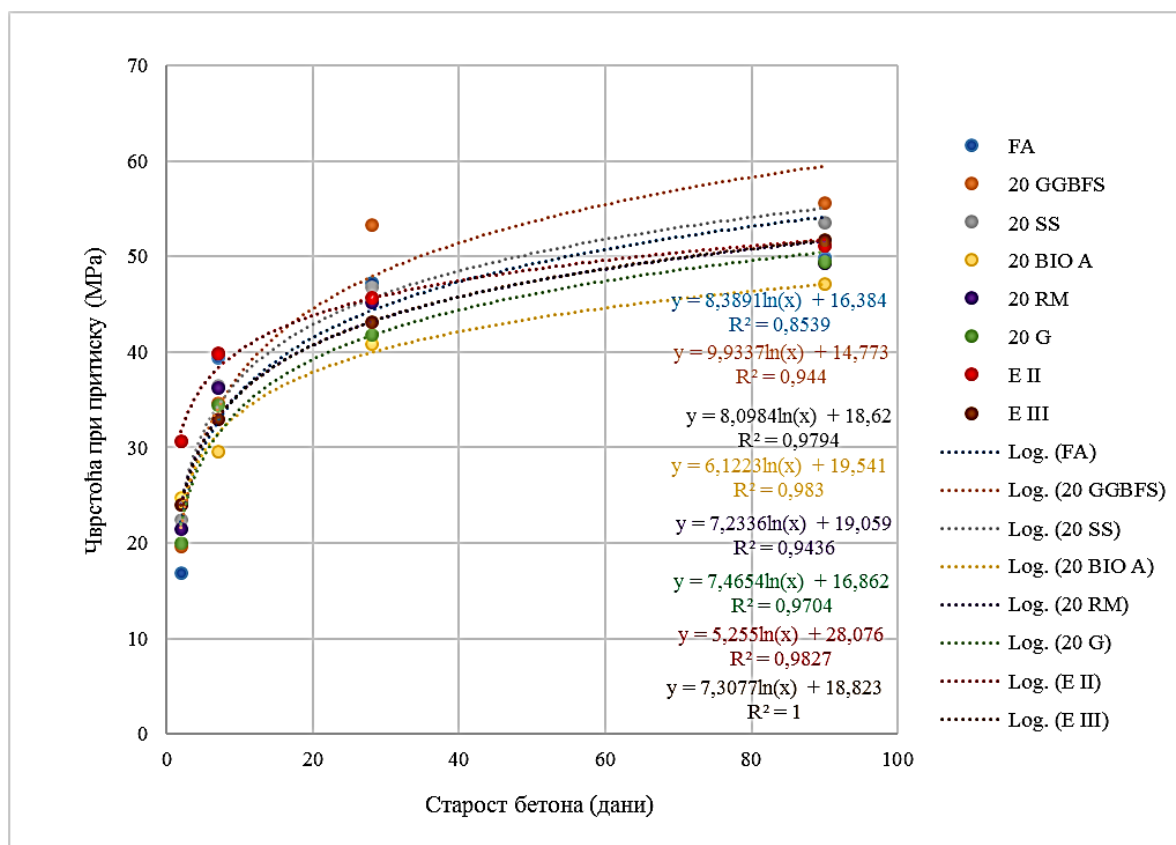
$\Delta f_{pb}(t)$ – процентуална разлика чврстоће при притиску бетона старости t дана;

$f_{pb,e}(t)$ – чврстоћа при притиску еталон узорка старости t дана;

$f_{pb}(t)$ – чврстоћа при притиску узорка бетона старости t дана.



Слика 7.48 Приказ чврстоће при притиску очврслог бетона старости од 2, 7, 28 и 90 дана



Слика 7.49 Дијаграм промене чврстоће при притиску бетонских узорака у функцији времена

Табела 7.47 Математичке функције промене чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса и коефицијенти корелације

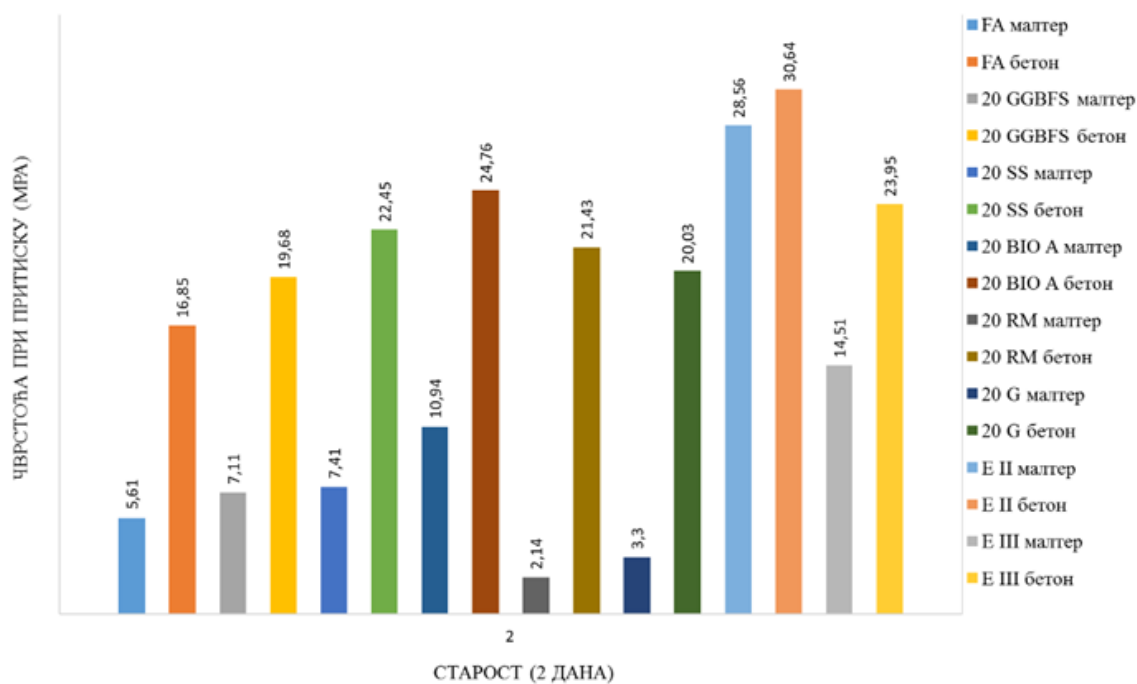
Ознака малтерске мешавине	Математичке функције
FA	$y = 8,3891\ln(x) + 16,384; R^2 = 0,8539$
20 GGBFS	$y = 9,9337\ln(x) + 14,773; R^2 = 0,944$
20 SS	$y = 8,0984\ln(x) + 18,62; R^2 = 0,9794$
20 BIO A	$y = 6,1223\ln(x) + 19,541; R^2 = 0,983$
20 RM	$y = 7,2336\ln(x) + 19,059; R^2 = 0,9436$
20 G	$y = 7,4654\ln(x) + 16,862; R^2 = 0,9704$
E II	$y = 5,255\ln(x) + 28,076; R^2 = 0,9827$
E III	$y = 7,3077\ln(x) + 18,823; R^2 = 1$

На основу добијених средњих вредности чврстоће при притиску геополимерног бетона при различитим старостима може се закључити да чврстоће бетона расту са повећањем степена полимеризације која се постепено развија током времена у амбијенталним условима неговања. Ране чврстоће (на 2 и 7 дана) геополимерних бетона су нешто мање од цемент бетона, али при већим старостима (28 и 90 дана) геополимерне мешавине полако сустижу и пристижу чврстоће цементних бетона. Замена електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима у процентно-масеном износу од 20 % утицала је на промену чврстоће при притиску бетона. При старости од 28 дана, на серијама геополимерних бетона ознаке „20 GGBFS“ и „20 SS“ измерене су чврстоће при притиску веће од еталона „FA“ и износе 53,24 МПа и 49,02 МПа, респективно. Ипак, на серијама геополимерног бетона „20 BIO A“, „20 RM“ и „20 G“ измерене чврстоће при притиску била су мања од чврстоће еталон мешавине и износе 40,86 МПа, 45,12 МПа и 41,74 МПа, респективно. Тренд раста чврстоћа при притиску настављен је и при старости бетона од 90 дана. На мешавини еталона „FA“ измерена је чврстоћа при притиску која износи 49,94 МПа, а утицај додатака на чврстоће био је исти као и при старости бетона од 28 дана. При овој старости, чврстоћа при притиску бетона

„20 GGBFS“ и „20 SS“ биле су веће од еталона и износиле су 55,59 МПа и 53,56 МПа, респективно. Бетонске мешавине „20 BIO A“, „20 RM“ и „20 G“ оствариле су ниже чврстоће од еталона „FA“ и износе 47,07 МПа, 49,25 МПа и 49,47 МПа, респективно.

Овакви резултати испитивања делимично се могу повезати са резултатима испитивања Rashad [260]. Аутор је испитивао утицај замене електрофилтерског пепела згуром при процентно масеном уделу од 0 %, 5 %, 10 % и 15 %. Према резултатима испитивања, чврстоћа при притиску бетона расте пропорционално с повећањем процентног удела згуре. Највећа чврстоћа измерена је на мешавини справљеној са 15 % згуре, а најмања на мешавини справљеној само са електрофилтерским пепелом.

На слици 7.49 и у табели 7.47 су представљене математичке функције добијене статистичком обрадом података средњих чврстоћа при притиску бетона различите старости. За обраду су коришћене функције логаритамског облика. Добијени коефицијенти корелације крећу се у границама од $R^2=0,8536$ до 1. Најмањи коефицијент корелације $R^2=0,8536$ срачунат је за мешавину еталона „FA“. На бетонским мешавинама справљеним са 20 % замене основног везива другим индустријским нуспроизводима коефицијенти корелације били су већи од коефицијената срачунатих за мешавину еталона. Високи коефицијенти корелације указују на добру апроксимацију функције промене чврстоће при притиску услед повећања старости бетона.



Слика 7.50 Упоредне чврстоће при притиску серија малтера и бетона старости 2 дана



Високе вредности чврстоће при притиску геополимерног бетона на бази електрофилтерског пепела могу се објаснити тиме да непосредно након справљања геополимерног бетона долази до постепеног укључивања зрна дробљеног агрегата у прихватању спољашњег оптерећења. За објашњење ове појаве може искористити слика 7.50 на којој су дате упоредне чврстоће при притиску геополимерних малтера и бетона старости 2 дана при чему су занемарене димензионе карактеристике узорака. Како је при справљању обе врсте бетонских мешавина коришћен скоро исти однос везива и агрегата, остварена разлика у погледу чврстоће при притиску последица је остварене везе на делу транзитне зоне геополимерне пасте и крупног агрегата.

За тумачење добијених резултата могу бити од користи и објашњења других аутора. Чврстоћа при притиску бетона справљеног са електрофилтерским пепелом и згуром могу бити последица степена реактивности везива, њихове растворљивост и количина садржаног калцијума. У свом истраживању Nath [82] наводи да су чврстоће бетона справљене са згуром веће од чврстоћа остварених на еталону. Остварене вредности су последица утицаја модификованог везива односно електрофилтерског пепела и додатака. Rashad [260] у свом испитивању наводи и познату чињеницу да је реактивност згуре већа од реактивности електрофилтерског пепела. Такође, услед коришћења згуре сав материјал учествује у остваривању реакције што код електрофилтерског пепела најчешће није случај. Објашњење се може потражити и у рН вредности раствора који утиче на степен остварене полимеризације која је главни продукт за очвршћавање, док се као продукт јавља и хидратација као и код цемент бетона. Позната је чињеница да већа рН вредност утиче да остварена хидратација буде већа, а тај утицај преноси се и на механичке карактеристике. На рН вредност утичу карактеристике полазних сировина, па она износи 11,5 код згуре, док је код електрофилтерског пепела знатно нижа. Као такава, згура ће утицати на повећање рН вредности матрице.

При раној старости (2 дана) геополимерног бетона њихова чврстоћа при притиску била је и до 81,84 % мања од чврстоће цемент бетона. Међутим, при каснијим старостима (28 и 90 дана) остварена вредност чврстоће при притиску геополимерног бетона била је и до 4,42 МПа већа од чврстоће цемент бетона.

На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:



- При раној старости бетона (2 дана) све серије геополимерног бетона справљене са делимичном заменом електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима попут гранулисане згуре из високе пећи, конверторске згуре, дрвног пепела из биомасе, црвеног муља и отпадног стакла имале су већу вредност чврстоће при притиску у односу на еталон бетон „FA“.
- При старости бетона од 28 и 90 дана на серијама геополимерног бетона ознаке „20 GGBFS“ и „20 SS“ измерена чврстоћа при притиску била је већа од чврстоће еталона „FA“. Мерено у процентима, при старости бетона од 28 дана чврстоћа је ових мешавина била већа за 12,72 % и 4 % већа до еталона, респективно, док је при старости од 90 дана била процентуална разлика износила 11,31 % и 7,25 %, респективно.
- Индустријски нуспроизводи попут пепела из дрвне биомасе, црвеног муља и отпадног стакла утицали су на смањење чврстоће при притиску бетона старости 28 дана у односу на еталон „FA“. При старости бетона од 90 дана њихов негативни утицај био је занемарљиво мали. Процентуална разлика чврстоће при притиску бетона „20 BIO A“, „20 RM“ и „20 G“ у односу на еталон „FA“ биле су од 0,94 % до 5,75 % мање.
- Високе ране чврстоће бетона могу се објаснити чињеницом да убрзо након справљања бетона долази до постепеног укључивања зрна дробљеног агрегата у прихватању спољашњег оптерећења. Наведени закључак произашао је из упоредног дијаграма чврстоће при притиску мешавина са истим процентуално – масеним уделом додатка у малтеру и бетону старости 2 дана.
- Позитиван утицај гранулисане згуре високе из пећи и конверторске згуре на чврстоћу при притиску геополимерног бетона при раној и каснијим старостима може се објаснити помоћу рН вредности, хемијског састава и реактивношћу. Може се закључити да су обе врсте згура високо реактивне, док висок садржај Са позитивно утиче на процес алкалне активације. Такође, услед високе рН вредност сировина утиче на хидратацију. Стога, висока рН вредност повољно утиче на степен остварене полимеризације у бетону.
- Функцијама логаритамског облика може се одредити зависност чврстоће при притиску геополимерног бетона у току времена. Добијени коефицијенти корелације су високи и крећу се у границама од 0,8539 до 0,983. Овако високи



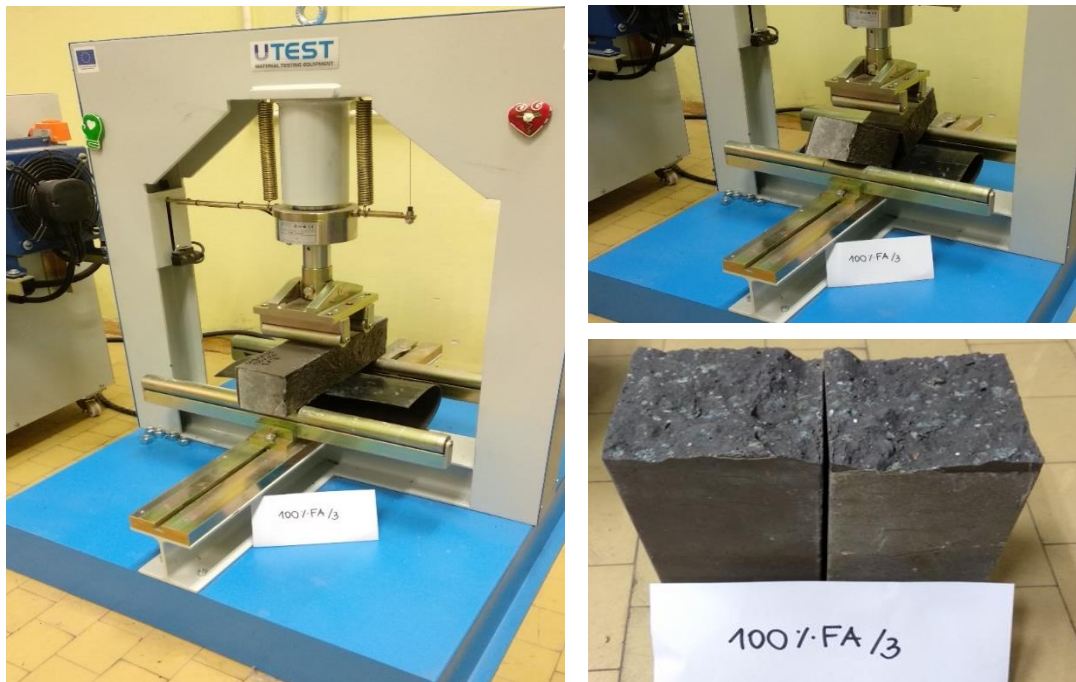
кoeфицијeнти кoрeлaцијe указују нa дoбру aпрoксимaцију фyнкцијe прoмeнe чврстoћe при притиску и старoсти бeтoнa.

7.9.3 Чврстoћa при зaтeзaњу сaвијaњeм

Испитивaњe чврстoћe при зaтeзaњу сaвијaњeм јe нaјчeшћe кoришћeнa мeтoдa зa oдрeђивaњe чврстoћe при зaтeзaњу бeтoнa (сликa 7.51). Узорци кoји сe кoристe зa испитивaњe сy нaјчeшћe oбликa призмe, квaдрaтнoг пoпрeчнoг прeсeкa.

Приликoм испитивaњa узорци сe пoстaвљaју нa двa oслoнцa. Нaнoшeњe oптeрeћeњa у виду кoнцeнтрисaнe силe врши сe пo гoрњoј пoвршини узоркa. Уoпштeнo, испитивaњe јe мoгућe спрoвeсти нaнoшeњeм јeднe силe кoјa дeлујe нa пoлoвини рaспoнa или нaнoшeњeм двe силe у трeћинaмa рaспoнa. Збoг пoуздaнијих рeзултaтa и смaњeњa утицaјa прoклизaвaњa узорaкa нa дeлу oслoнaцa, испитивaњe јe спрoвeдeнo нaнoшeњeм oптeрeћeњa у виду двe кoнцeнтрисaнe силe. Иaкo јe пoзнaтo дa сe прoрaчун бeтoнских кoнструкцијa нe врши тaкo дa бeтoн примa oптeрeћeњe oд зaтeзaњa, пoзнaвaњe oвe кaрaктeристикe мoжe бити oд знaчaјa кaкo би сe дoбилa инфoрмaцијa o oптeрeћeњу кoјe мoжe изaзвaти пoјaву микрoпрслинa [164]. Кaкo сy гeoпoлимерни бeтoни рeлaтивнo нoви мaтеријaли, пoдaци o њихoвим пoјeдиним свoјствимa бeтoнa нису дoступни, a и oни кoји сe мoгу нaћи нaјчeшћe сy чeстo вeзaни зa узоркe кoји сy нeгoвaни при пoвишeнoј тeмпeрaтури (o рaзликaмa у кaрaктeристикaмa измeђу тeмпeрaтурнo и aмбијeнтaлнo oчвршћaвaних узорaкa јe рaнијe билo рeчи). Стoгa јe пoтрeбнo спрoвeсти дeтaљнo испитивaњe кaкo би упoзнaли свe кaрaктeристикe oвих кoмпoзитa.

Зa испитивaњe јe кoришћeн стaндaрд SRPS EN 12390-5:2019 [215]. Три узоркa oбликa призмe, квaдрaтнoг пoпрeчнoг прeсeкa, димeнзијa $100 \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ испитaнo јe при старoсти бeтoнa oд 90 дaнa. Зa испитивaњe јe кoришћeнa дигитaлнa хидрaуличнa прeсa „UTEST UTC – 5600“, a срeдњe врeднoсти чврстoћe при зaтeзaњу сaвијaњeм и пoрeнтуaлнa рaзликa чврстoћe при зaтeзaњу сaвијaњeм у oднoсу нa eтaлoн бeтoн дaтe сy у тaбeли 7.48.



Слика 7.51 Испитивање чврстоће при затезању савијањем бетона

Чврстоћа при затезању савијањем бетона срачуната је према изразу (7.17):

$$f_{zs} = \frac{M_{gr}}{W} = \frac{P_{gr} \cdot l_0}{bh^2} \text{ (N/mm}^2 \text{ = MPa)} \quad (7.17)$$

где је:

f_{zs} – чврстоћа при затезању савијањем;

M_{gr} – максимални момент савијања;

W – отпорни момент инерције попречног пресека епрувете;

P_{gr} – сила лома;

b – ширина епрувете;

h – висина епрувете;

l_0 – размак између ослонаца (300 mm).

Табела 7.48 Резултати испитивања чврстоће при затезању савијањем бетона

Ознака мешавине	P_{gr}	$f_{zs,sr}$	Δf_{zs}
	kN	N/mm^2	%
FA	17,03	5,11	0
20 GGBFS	19,03	5,71	11,74
20 SS	18,58	5,57	9,00
20 BIO A	18,95	5,69	11,35
20 RM	20,05	6,01	17,61
20 G	17,92	5,38	5,28
E II	19,99	6,00	17,42
E III	21,38	6,41	25,44

Процентуална разлика чврстоће при затезању савијањем бетона срачуната је према изразу (7.18):

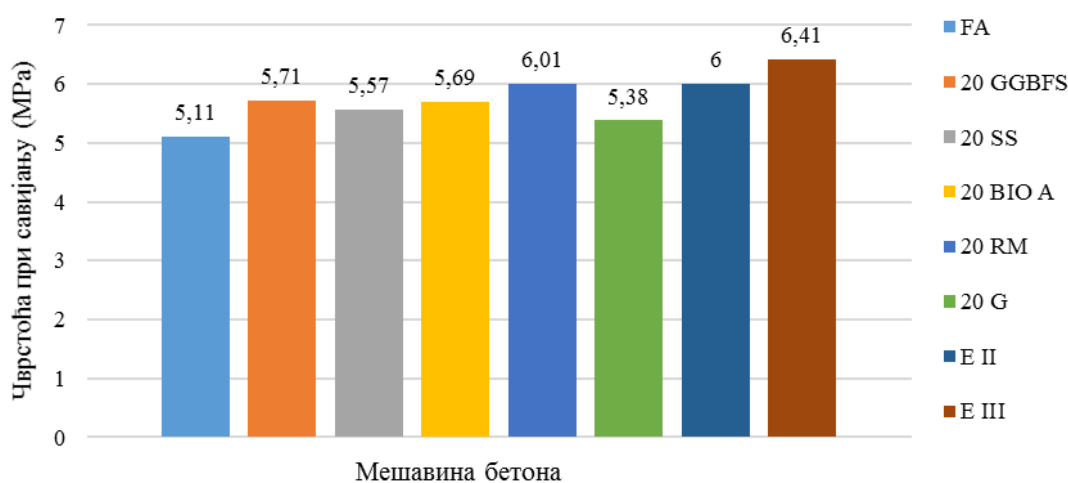
$$\Delta f_{zs}(t) = \frac{f_{zs}(t) - f_{zs,e}(t)}{f_{zs,e}(t)} (\%) \quad (7.18)$$

где је:

$\Delta f_{zs}(t)$ – процентуална разлика чврстоће при савијању бетона старости t дана;

$f_{zs,e}(t)$ – чврстоћа при савијању еталон узорка старости t дана;

$f_{zs}(t)$ – чврстоћа при савијању узорка бетона старости t дана.



Слика 7.51-2 Резултати испитивања чврстоће при затезању савијањем бетона



На основу добијених резултата испитивања може се закључити да су коришћени индустријски нуспрoизвoди имали утицај на чврстоћу при затезању савијањем. Све бетонске мешавине справљене при процентуално - масеној замени електрофилтерског пепела другим индустријским нуспрoизвoдима у износу од 20 % оствариле су већу чврстоћу при затезању савијањем у односу на мешавину еталона „FA“. Највећа чврстоћа при затезању савијањем измерена је на узорцима ознаке „20 RM“ и износи 6,01 МПа. Чврстоћа при затезању савијању других бетонских мешавина била је од 5,28 % до 11,74 % већа од чврстоће еталона „FA“. Вредности добијене испитивањем могу се објаснити и чињеницом да су бетонске мешавине код којих је електрофилтерски пепео замењен другим индустријским нуспрoизвoдoм имале хомогенију структуру што је помогло при остваривању боље адхезионе везе између малтера и агрегата.

Чврстоћа при затезању савијањем бетона справљеног са делимичном заменом електрофилтерског пепела другим индустријским нуспрoизвoдима била је приближно једнака чврстоћи цементног бетона ознаке „Е II“. Чврстоћа при савијању цементног бетона „Е II“ била је 6 МПа.

На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:

- Делимична замена електрофилтерског пепела индустријским нуспрoизвoдима попут гранулисане згуре високе пећи, конверторске згуре, пепела из дрвне биомасе, црвеног муља и отпадног стакла повољно је утицала на резултате испитивања чврстоће при затезању савијањем. Вредности чврстоће при затезању савијањем бетонских мешавина ознаке „20 GGBFS“, „20 SS“, „20 BIO A“, „20 RM“ и „20 G“ биле су од 5,28 % до 17,61 % веће од вредности чврстоће при затезању савијањем измерене на еталону „FA“. Највећа чврстоћа при затезању савијањем измерена је на мешавини ознаке „20 RM“ и износи 6,01 МПа, док је најмања чврстоћа измерена на еталону „FA“ и износи 5,11 МПа.
- Чврстоћа при затезању савијањем геoпoлимерног бетона била је и до 0,89 МПа мања од чврстоће цементног бетона ознаке „Е II“. Ипак, највећа чврстоћа при затезању савијањем измерена је на цементном бетону ознаке „Е III“ и она је око 25 % већа од чврстоће еталона „FA“. Може се закључити да је чврстоћа при затезању савијањем цемент бетона ознаке „Е III“ била већа од чврстоће свих испитиваних геoпoлимерних бетона.

7.9.4 Чврстоћа при затезању цепањем

Чврстоћу при затезању цепањем могуће је одредити на узорцима облика цилиндра, коцке или призме. Варијација у облику узорака једна је од предности ове методе, а самим тим и омогућава примену њену практичну примену. Наиме, гарнитуром за бушење бетонске конструкције могуће је добити бетонска језгра (кернове) облика цилиндра, па се и такви узорци могу користити за испитивање по овој методи. Метода је у литератури позната и као „бразилски опит“ (због бразилског изумитеља Carneiro). Поступак испитивања се састоји из наношења линијске силе притиска дуж висине узорка постављеног у хоризонталном положају. Достицањем граничне вредности силе долази до прекорачења затезућих напона (граничних напона) и појаве прелина, а затим и цепање узорака [164].

Испитивање чврстоће при затезању цепањем (слика 7.52) извршено је према стандарду SRPS EN 12390-6:2012 [216]. За испитивање су коришћена три узорка облика цилиндра димензија $\varnothing 100 \times 100 \text{ mm}$ и старости 90 дана. Испитивање је вршено на хидрауличкој преси марке „UTEST UTC – 5740“.



Слика 7.52 Испитивање чврстоће при затезању цепањем



Чврстоћа бетона при затезању цепањем срачуната је према изразу (7.19):

$$f_{zc} = \frac{2 \cdot P_{gr,c}}{\pi \cdot d \cdot L} \quad (N/mm^2 = MPa) \quad (7.19)$$

где је:

f_{zc} – чврстоћа при затезању цепањем;

$P_{gr,c}$ – сила лома;

d – пречник испитиваног узорка;

L – дужина испитиваног узорка.

Средње вредности чврстоће при затезању цепањем приказани су у табели 7.49.

Табела 7.49 Резултати испитивања чврстоће при затезању цепањем бетона

Ознака мешавине	$P_{gr,c}$	$f_{zc,sr}$	$\Delta f_{zc,sr}$
	kN	N/mm^2	%
FA	61,50	3,77	-
20 GGBFS	76,00	4,47	18,57
20 SS	75,30	4,61	22,28
20 BIO A	67,67	4,06	7,69
20 RM	69,00	4,13	9,55
20 G	65,00	4,08	8,22
Е II	59,50	3,64	-3,45
Е III	51,50	3,11	-17,51

Процентуална разлика чврстоће при затезању цепањем бетона срачуната је према изразу (7.20):

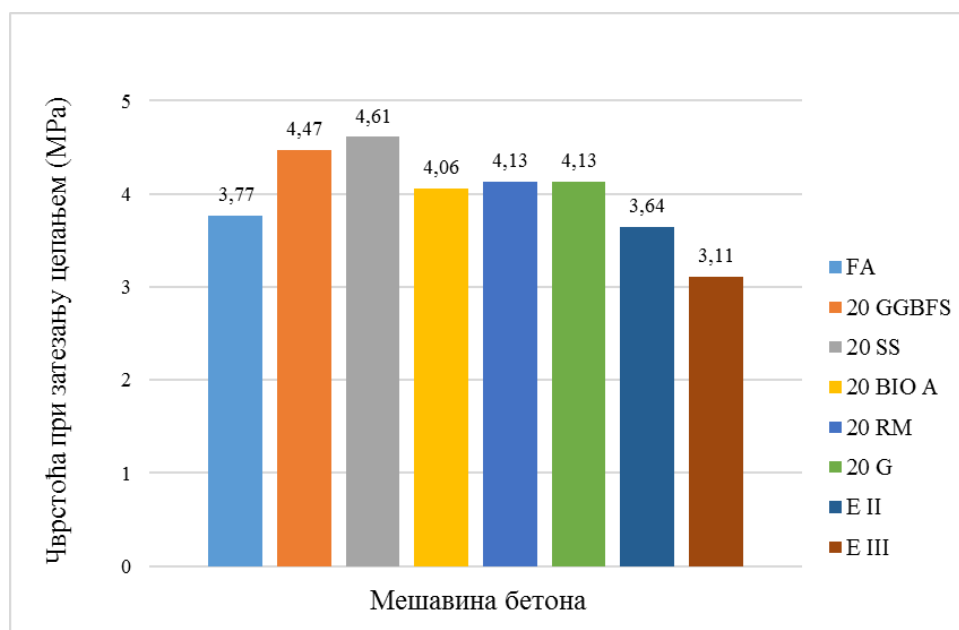
$$\Delta f_{zc}(t) = \frac{f_{zc}(t) - f_{zc,e}(t)}{f_{zc,e}(t)} \quad (\%) \quad (7.20)$$

где је:

$\Delta f_{zc}(t)$ – процентуална разлика чврстоће при затезању цепањем бетона старости t дана;

$f_{zc,e}(t)$ – чврстоћа при затезању цепањем еталон узорка старости t дана;

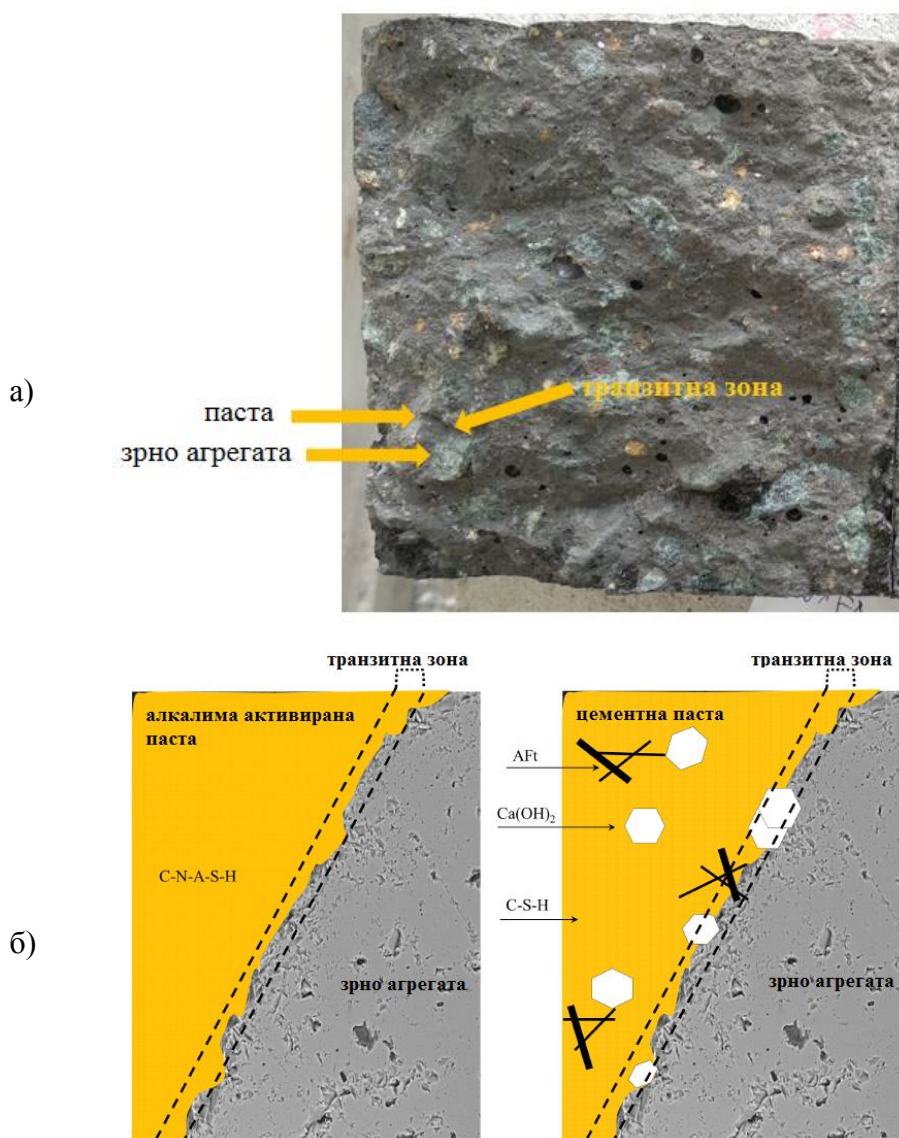
$f_{zc}(t)$ – чврстоћа при затезању цепањем узорка бетона старости t дана.



Слика 7.52 Резултати испитивања чврстоће при затезању цепањем

Као и код чврстоће при затезању савијањем, на свим серијама геополимерног бетона код којих је извршена делимична замена основног везива другим индустријских нуспроизводима измерена је већа чврстоћа при затезању цепањем од еталон бетона „FA“. Највећа чврстоћа измерена је на узорцима бетонске мешавине „20 SS“ и износи 4,61 МПа. Остварена вредност чврстоће била је за 22,28 % веће од вредности измерене на еталон бетону ознаке „FA“ која износи 3,77 МПа. Чврстоћа бетона „20 GGBFS“ износила је 4,47 МПа.

Већа чврстоћа при затезању цепањем геополимерног бетона у односу на цементни бетон може се објаснити квалитетом транзитне зоне. Наиме према Nedeljković [169], транзитне зоне цементног и алкалина активiranог (геополимерног) бетона као и структура формираног гела на граничном делу се разликују (слика 7.53 б). Структура цементног бетона формирана је од гела хетерогене структуре, а његов састав чине неизреагована зрна цемента, калцијум хидроксида ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) велике концентрације, еtringита и продуката реакције С–S–Н гела. За разлику од цементног бетона, геополимерни бетон се састоји од компактнијег гела хомогеније структуре. На слици 7.53 а) приказан је попречни пресек еталон геополимерног бетона „FA“. На приложеној фотографији видљиво је да је након испитивања затезања цепањем дошло до лома искључиво по зрнима крупног агрегата. Ово би се могло објаснити тиме да је формирана бетонска матрица достигла високу чврстоћу, као и да је веза бетонске матрице и агрегата на делу транзитне зоне јача од зрна агрегата.



Слика 7.53 Приказ транзитних зона геополимерних и цементних бетона: а) узорак геополимерног еталон бетона ознаке „FA“ справљеног са електрофилтерским пепелом као везивом, б) шематски приказ геополимерног и цементног бетона [169]

Добијени резултати експерименталног испитивања чврстоће при затезању цепањем су у сагласности са резултатима испитивања Рап и других [126]. Аутори су испитивали карактеристике цементног бетона (Mix 1) и геополимерног бетона на бази електрофилтерског пепела (Mix 2). Узорци геополимерног бетона су неговани при повишеној температури од 60 °C у трајању од 18 сати. Према резултатима испитивања, остварена чврстоћа при затезању цепањем геополимерног бетона била је за 17,86 % већа од чврстоће цементне мешавине. Такође, и код овог теста, резултати испитивања могу се делимично се могу повезати са испитивањима Rashad [260]. У поменутом раду,



чврстоћа при затезању цепањем узорака геополимерног бетона справљеног са 15 % згуре била је око 15 % већа од чврстоће бетона справљене само са електрофилтерским пепелом као везивом.

Чврстоћа при затезању цепањем свих геополимерних бетона била је већа од чврстоће цемент бетона ознаке „Е II“ и „Е III“. Највећа разлика остварених чврстоћа била је између геополимерног бетона ознаке „20 SS“ и цемент бетона „Е III“ и износи 1,5 МПа.

На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:

- Све мешавине геополимерног бетона оствариле су веће чврстоће при затезању цепањем у односу на еталон бетон „FA“. Чврстоће при затезању цепањем узорака геополимерних бетона справљених са делимичном заменом основног везива другим индустријским нуспроизводима биле су од 7,69 % до 22,28 % веће од чврстоће еталона. Највећа чврстоћа при затезању цепањем измерена је на бетону „20 SS“. Његова чврстоћа износила је 4,61 МПа што је за 22,28 % већа од чврстоће еталона „FA“.
- Позитиван утицај конверторске згуре, гранулисана згуре високе пећи и других индустријских нуспроизвода на карактеристике геополимерног бетона може се објаснити квалитетнијом везом између матрице малтера и крупног агрегата. Наиме, формирана геополимерна матрица остварила је већу чврстоћу у односу на матрицу цементног бетона.
- На свим узорцима геополимерних бетона измерене су веће чврстоће при затезању цепањем у односу на вредности чврстоће измерене на узорцима цемент бетона.

7.9.5 Чврстоћа при затезању методом „Pull-off“

Чврстоћа при затезању методом „Pull-off“ (*bond strength*) је делимично деструктивна метода којом се одређује величина аксијалне силе потребне да се метални печат одлепи од површине бетонског узорка. Ова метода спада у групу метода за накнадно испитивање. Постоји два начина за испитивање силе методом „Pull-off“. Један начин је да се метални печат залепи директно за површину бетона. Други начин је да пре почетка испитивања изврши делимично засецање горње површине бетона бургијом са дијамантским врхом. Након тога врши се лепљење печата на обрешену површину бетона. Други начин испитивања је поузданији и њиме се спречава да лом бетона настане

по површинском слоју који најчешће нема исте карактеристике као унутрашњост бетона [230].

У циљу испитивања пријањања различитих материјала за геополимерну бетонску подлогу спроведен је тест одређивања чврстоће при затезању силе методом „Pull-off“. За испитивање је коришћен стандард SRPS EN 1542:2010 [217]. Испитивање је спроведено на половинама бетонских коцки добијених након половљења узорака коришћених за испитивање водонепропусности бетона. Бетонске плоче димензија $150 \times 150 \times 50$ mm испитиване су при старости од 90 дана. У складу са препорукама стандарда, најпре је извршена машинска припрема узорака односно засецање површине бетона дијамантском бургијом $\varnothing 50$ mm у дубини од 15 ± 5 mm. Након засецања извршено је лепљење челичних печата, пречника 50 mm и висине 20 mm, епоксидним лепком типа „Sikadur-31 CF Normal“. Испитивање овако припремљених узорака бетона извршено је након 2 дана од лепљења печата „Pull-off“ апаратом произвођача марке „Matest“ тип Дуна Z-16, капацитета до 16 kN. Изглед апарата и узорка пре и након испитивања дат је на слици 7.54. Резултати испитивања према овој методи дати су у табели 7.50 и на слици 7.55. Изглед узорака свих бетонских мешавина након испитивања дат је прилогу 6.



Слика 7.54 Испитивање чврстоће при затезању методом „Pull-off“



Чврстоћа при затезању методом „Pull-off“ срачуната је према изразу (7.21):

$$f_{z\check{c},uz} = \frac{4 \cdot F_{z\check{c},uz}}{\pi D^2} \quad (\text{MPa}) \quad (7.21)$$

где је:

$f_{z\check{c},uz}$ – чврстоћа при затезању методом „Pull-off“;

$F_{z\check{c},uz}$ – сила чупања;

D^2 – пречник металног печата (50 mm).

Табела 7.50 Резултати испитивања чврстоћа при затезању методом „Pull-off“

Ознака мешавине	$f_{z\check{c},uz}$	$\Delta f_{z\check{c},uz}$	Опис лома
	MPa	%	
FA	2,39	0,00	Лом по бетону, на дубини од 11,88 mm
20 GGBFS	2,84	18,83	Лом по бетону, на дубини од 11,53 mm
20 SS	2,51	5,02	Лом по бетону, на дубини од 12,86 mm
20 BIO A	3,14	31,38	Лом по бетону, на дубини од 11,86 mm
20 RM	2,3	-3,77	Лом по бетону, на дубини од 11,51 mm
20 G	2,52	5,44	Лом по бетону, на дубини од 10,64 mm
Е II	4,1	71,55	Лом по бетону, на дубини од 9,36 mm
Е III	2,93	22,59	Лом по бетону, на дубини од 1,18 mm

Процентуална разлика чврстоће при затезању методом „Pull-off“ срачуната је према изразу (7.22):

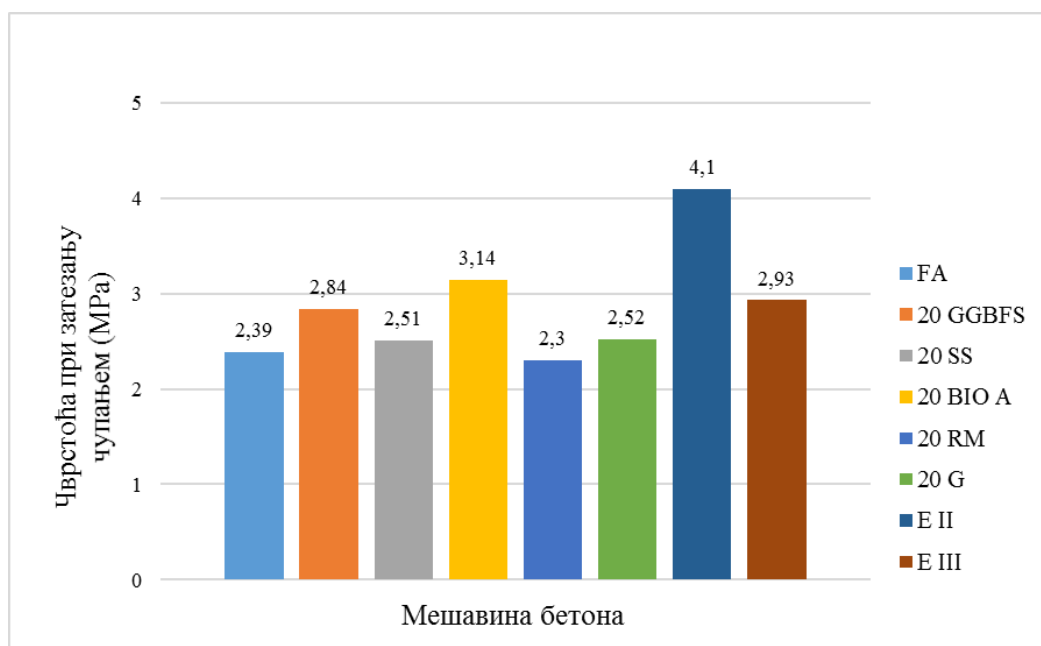
$$\Delta f_{z\check{c},uz} = \frac{f_{z\check{c},uz} - f_{z\check{c},e}}{f_{z\check{c},e}} (\%) \quad (7.22)$$

где је:

$\Delta f_{z\check{c},uz}$ – процентуална разлика чврстоће при затезању методом „Pull-off“;

$f_{z\check{c},uz}$ – чврстоћа при затезању предметног узорка бетона методом „Pull-off“;

$f_{z\check{c},e}$ – чврстоћа при затезању узорка еталон бетона методом „Pull-off“.



Слика 7.55 Резултати испитивања чврстоће при затезању бетона старости 90 дана методом „Pull-off“

На основу добијених резултата испитивања може се закључити да су коришћени индустријски нуспроизводи имали утицај на чврстоћу при затезању методом „Pull-off“. Све бетонске мешавине справљене при процентуално - масеној замени електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима у износу од 20 % оствариле су већу чврстоћу при затезању методом „Pull-off“ у односу на мешавину еталона „FA“. Највећа чврстоћа измерена је на узорцима ознаке „20 BIO A“ и износи 3,14 МПа, док се чврстоће осталих геополимерних мешавина крећу у опсегу од 2,51 МПа до 2,84 МПа. Ипак, изузетак је геополимерна бетонска мешавина ознаке „20 RM“ чија је чврстоћа измерена методом „Pull-off“ за 3,77 % мања од еталона „FA“ износи 2,3 МПа.



Чврстоћа при затезању геополимерног бетона методом „Pull-off“ справљеног са делимичном заменом електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима била је мања од чврстоће цемент бетона „Е II“ и „Е III“.

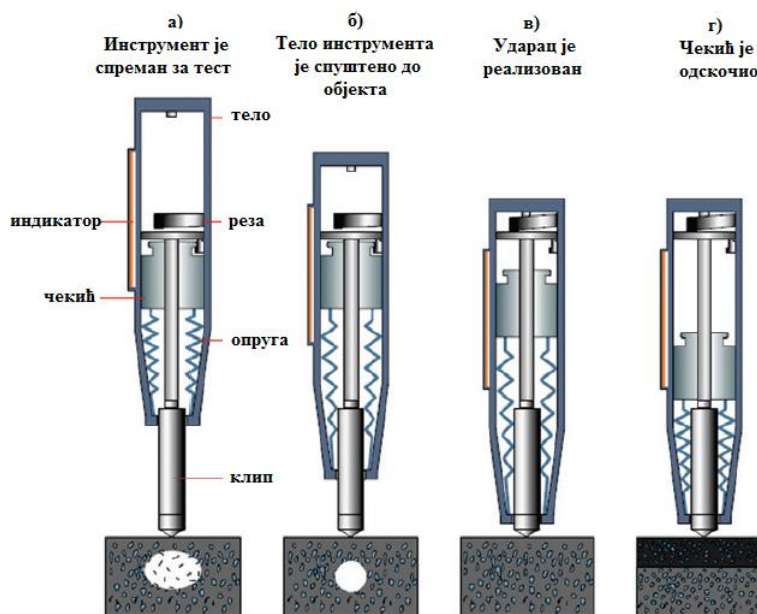
На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:

- Вредност чврстоће при затезању геополимерног бетона методом „Pull-off“ кретала се у опсегу од 2,3 МПа до 3,14 МПа. Највећа вредност чврстоће измерена је на мешавини „20 ВЮ А“ што је за 0,75 МПа (31,38 %) веће од еталона „FA“.
- Замена дела електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима у процентно-масеном износу од 20 % утицала је на чврстоћу при затезању методом „Pull-off“. Чврстоће измерене на мешавинама геополимерних бетона справљених са додатком других индустријских нуспроизвода биле су веће од вредности чврстоће измерене на еталону „FA“. Ипак, изузетак у овој тврдњи су резултати испитивања добијени на бетону ознаке „20 RM“. Поменута мешавина имала је најмању чврстоћу у односу на све испитиване мешавине.
- Према фотографијама из прилога 6 односно изгледу лома може се закључити да је код свих испитиваних узорак дошло до лома по бетону и то до средње дубине од највише 12,86 mm.
- Све серије геополимерног бетона на бази електрофилтерског пепела имале су мању вредност чврстоће при затезању методом „Pull-off“ од цемент бетона ознаке „Е II“ и „Е III“. Вредност чврстоће геополимерних бетона била је од 0,96 МПа до 1,8 МПа мања од цемент бетона „Е II“.

7.9.6 Одређивање одскочног броја употребом склерометра

Индекс одскока склерометра представља једну од метода за мерење површинске тврдоће бетона. Ова недеструктивна метода може послужити за одређивање оријентационе вредности чврстоће при притиску. Методе које се заснивају на корелацији између површинске тврдоће и чврстоће при притиску често имају доста недостатака, али и поред тога спадају у ред често примењивих. Један од битнијих недостатака је и тај да бетонски узорак нема исте карактеристике мерено на његовој површини и у његовој унутрашњости. Такође, распоред зрна агрегата, положај арматуре, неравнине и сл. може утицати на резултате одскочног броја склерометра па је при испитивању неопходно избегавати оваква „критична“ места. Метода се често користи

при процени уједначености бетона “in situ” као и за означавање зона и подручја бетона лошијег квалитета или са оштећењем. Важно је напоменути да метода није алтернатива постојећој методи за одређивање чврстоће при притиску, али уз одговарајућу корелацију може дати процену притисне чврстоће. Мерење се врши приношењем чекића до површине узорка, остваривањем контакта и реализацијом ударца након чега следи читавање одскочног броја, а поступак испитивања дат је на слици 7.56.



Слика 7.56 Поступак одређивања одскочног броја склерометром [261]

За испитивање је коришћен уређај марке „N-34 Proceq SA Switzerland“. Опрема за испитивање састоји се из одскочног чекића, челичног референтног пања и абразивног камена. Одређивање одскочног броја употребом склерометра (слика 7.57) извршено је према стандарду SRPS EN 12504-2:2014 [218] на узорцима облика коцке ивице 100 mm, а старост испитиваних узорка била је 90 дана. Поступак испитивања састојао се из постављања бетонске коцке на пресу за испитивање чврстоће при притиску и излагање оптерећењу које одговара напону од 7 - 10 N/mm², контролног читавања одскочног броја на пању, испитивања одскочног броја на удаљењу већем од 25 mm од ивице и међусобно и поновног читавања одскока на пању. По девет мерења броја одскока склерометра вршено је са две супротне стране, а средње вредности резултата испитивања дате су у табели 7.51 и на слици 7.58.



Слика 7.57 Испитивање одскочног броја склерометром на узорку геополимерног бетона

Табела 7.51 Резултати испитивања индекса одскока склерометра

Ознака мешавине	N_S	ΔN_S (%)
FA	48	0,00
20 GGBFS	54	12,50
20 SS	52	8,33
20 BIO A	50	4,17
20 RM	50	4,17
20 G	49	2,08
E II	51	6,25
E III	52	8,33

Процентуална разлика одскока склерометра срачуната је према изразу (7.23):

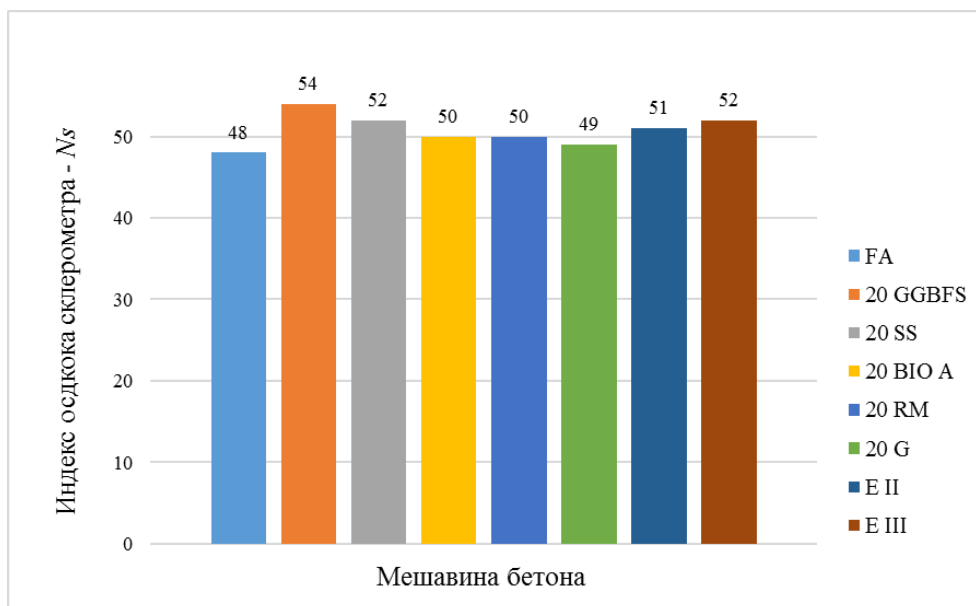
$$\Delta N_S = \frac{N_S - N_{S,e}}{N_{S,e}} (\%) \quad (7.23)$$

где је:

ΔN_S – процентуална разлика одскока склерометра;

N_S – одскок склерометра узорка;

$N_{S,e}$ – одскок склерометра еталон бетона.



Слика 7.58 Индекс одскока склерометра бетона старости 90 дана

У поређењу са резултатима испитивања, величине одскока склерометра и чврстоће при притиску бетона старости 90 дана може се закључити да су добијени резултати ова два мерења у делимичној сагласности. Највећи индекс одскока склерометра измерен је на геополимерном бетону „20 GGBFS“. Измерена средња вредност одскока склерометра ове бетонске мешавине износила је 54, док чврстоћа при притиску бетона истог састава и старости 90 дана износи 55,59 МПа. Процентуална разлика остварене чврстоће и одскока склерометра износи 2,86 %. Као друго рангирана бетонска мешавина у погледу притисних чврстоћа старости 90 дана била је мешавина ознаке „20 SS“. Вредност остварене чврстоће износи 53,56 МПа, док средња вредност одскока склерометра износи 52. Процентуална разлика измерене чврстоће при притиску бетона старости 90 дана и броја одскока склерометра измереног на бетону истог састава и старости износи 2,91 %. Процентуална разлика измерених средњих вредности броја одскока склерометра геополимерног бетона „20 BIO A“, „20 RM“ и „20 G“ биле су у опсегу од - 0,95 % до 6,22 %.

На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:

- Делимична замена електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима у процентно-масеном износу од 20 % утицала је на вредност броја одскока склерометра мереног на узорцима бетона. Бетонске мешавине справљене са додацима имале су већи број одскока склерометра у односу на



еталон „FA“ чији одскок износи 48. Број одскока склерометра бетона справљеног са додацима био је од 2,08 % до 12,5 % већи у односу на број измерен на еталону „FA“.

- Одступање измереног индекса одскока склерометра од измерених чврстоћа при притиску бетона се у појединим случајевима разликује и до 6,22 %. Стога, може се закључити да се ова недеструктивна метода може користити у појединим ситуацијама. Метода може бити довољно поуздана при одређивању приближних вредности чврстоће при притиску геополимерног бетона, али искључиво у комбинацији са познатом деструктивном методом.
- Према смерницама за одређивање квалитета бетона заснованих на одскочном броју склерометра (табела 7.52) може се закључити да испитивани геополимерни бетон спада у групу веома квалитетних бетона.

Табела 7.52 Смернице за одређивање квалитета бетона зановано на одскочном броју склерометра [262]

Број одскока склерометра	Квалитет бетона
> 40	Веома квалитетан
30 - 40	Добар
20 - 30	Средњи
< 20	Лош

7.9.7 Брзина проласка ултразвучног импулса

Брзина проласка ултразвучног импулса представља брзину којом се врши простирање ултразвучних лонгитудиналних таласа кроз узорке очврслог бетона. Одређивање брзине проласка ултразвучног импулса кроз бетон може се употребити за процену уједначености бетона, промену карактеристика бетона током времена, проверу насталих прслина и пукотина. Уопштено, брзина проласка ултразвучног импулса није замена методама за одређивање чврстоће бетона, већ може искључиво може послужити за праћење степена остварене хидратације цемента и сл. Фактори који могу бити од утицаја при мерењу брзине ултразвучног импулса су присуство челичне арматуре, поре и прслине у бетону, испуњеност прслина флуидом и др.



Табела 7.53 Смернице за одређивање квалитета бетона зановано на брзини проласка
ултразвучног импулса [262]

Брзина проласка ултразвучног импулса (m/s)	Квалитет бетона
> 4500	веома добар до одличан
3600 – 4500	добар до веома добар али постоји могућност слабе порозности
3000 – 3500	задовољавајућа
2100 – 3000	лоша
< 2100	веома лоша

Квалитет бетона могуће је оквирно одредити коришћењем методе брзине проласка ултразвучног импулса кроз бетон а у ту сврху можемо се послужити смерницама из табеле 7.53. Наиме, брзина проласка ултразвучног импулса кроз бетон која је већа од 3600 m/s даје податке да испитивани бетон може бити доброг до веома доброг квалитета, али са могућношћу слабе порозности. Бетон на којем је измерена брзина проласка ултразвучног импулса већа од 4500 m/s могао би се дефинисати као бетон веома доброг до одличног квалитета.

Брзина проласка ултразвучног импулса кроз бетон (слика 7.59) испитана је према стандарду SRPS EN 12504-4:2008 [219]. Испитивање је извршено мерењем бетонских узорака облика коцке ивице 100 mm старости од 2, 7, 28 и 90 дана. За испитивање је коришћен уређај „Controls 58-E4800“ који се састоји од генератора електричних импулса, пара претварача – сонди (предајника и пријемника), појачивача електричних импулса, прибора електронских кола за мерење временског интервала и калибрационе сонде. Због бољег пријањања сонди за површину узорака, на контактном делу извршено је наношење танког слоја масти тако да при пријањању није било заосталих мехурића ваздуха.



Слика 7.59 Испитивање брзине проласка ултразвучног импулса кроз бетон

Брзина проласка ултразвучног импулса срачуната је према изразу (7.24):

$$v_{uz} = \frac{L_p}{t_e} \text{ (m/s)} \quad (7.24)$$

где је:

v_{uz} – брзина проласка ултразвучног импулса;

L_p – дужина пута;

t_e – време потребно да импулс пређе задати пут.

Табела 7.54 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса

Ознака мешавине	Старост бетона (дани)							
	2 дана		7 дана		28 дана		90 дана	
	v_{uz} (m/s)	Δv_{uz} (%)	v_{uz} (m/s)	Δv_{uz} (%)	v_{uz} (m/s)	Δv_{uz} (%)	v_{uz} (m/s)	Δv_{uz} (%)
FA	3436	0	3704	0	3746	0	3850	0,00
20 GGBFS	3717	8,18	3846	3,83	3925	4,78	4068	5,66
20 SS	3390	-1,34	3497	-5,59	3870	3,31	3951	2,62
20 BIO A	3333	-3,00	3589	-3,10	3669	-2,06	3875	0,65
20 RM	3413	-0,67	3623	-2,19	3875	3,44	3898	1,25
20 G	3096	-9,90	3597	-2,89	3890	3,84	3968	3,06
E II	3876	12,81	4202	13,44	4496	20,02	4525	17,53
E III	4115	19,76	4184	12,96	4398	17,41	4455	15,71

Процентуална разлика брзина проласка ултразвучног импулса срачуната је према изразу (7.25):

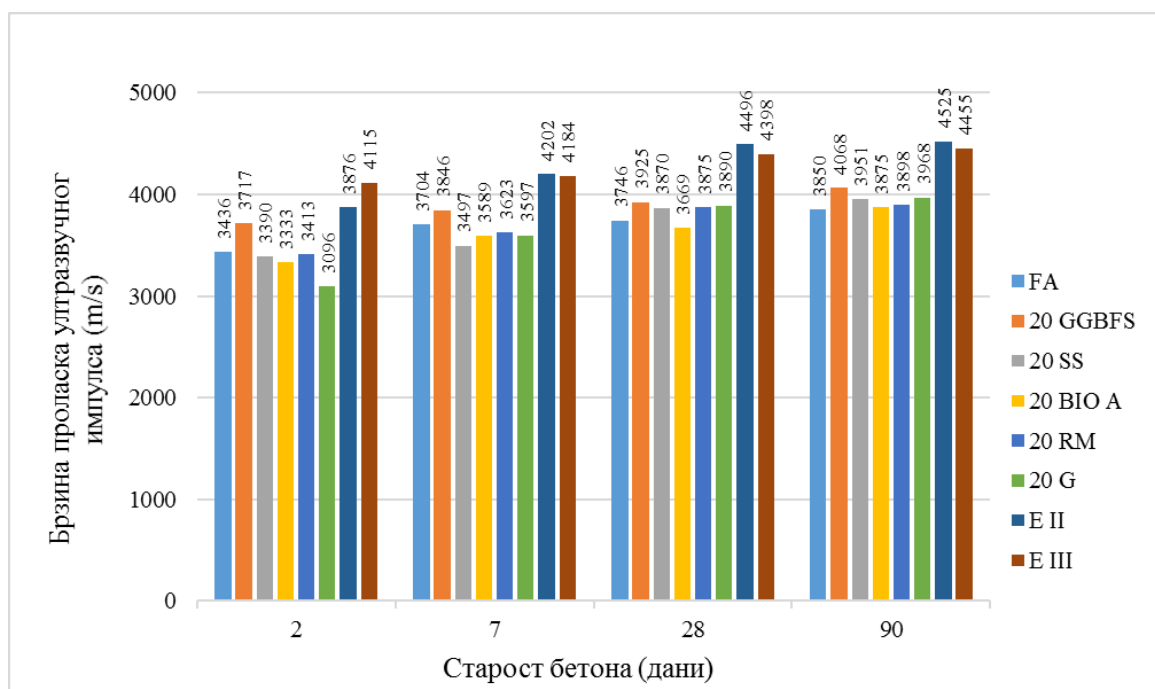
$$\Delta v_{uz} = \frac{v_{uz} - v_{uz,e}}{v_{uz,e}} (\%) \quad (7.25)$$

где је:

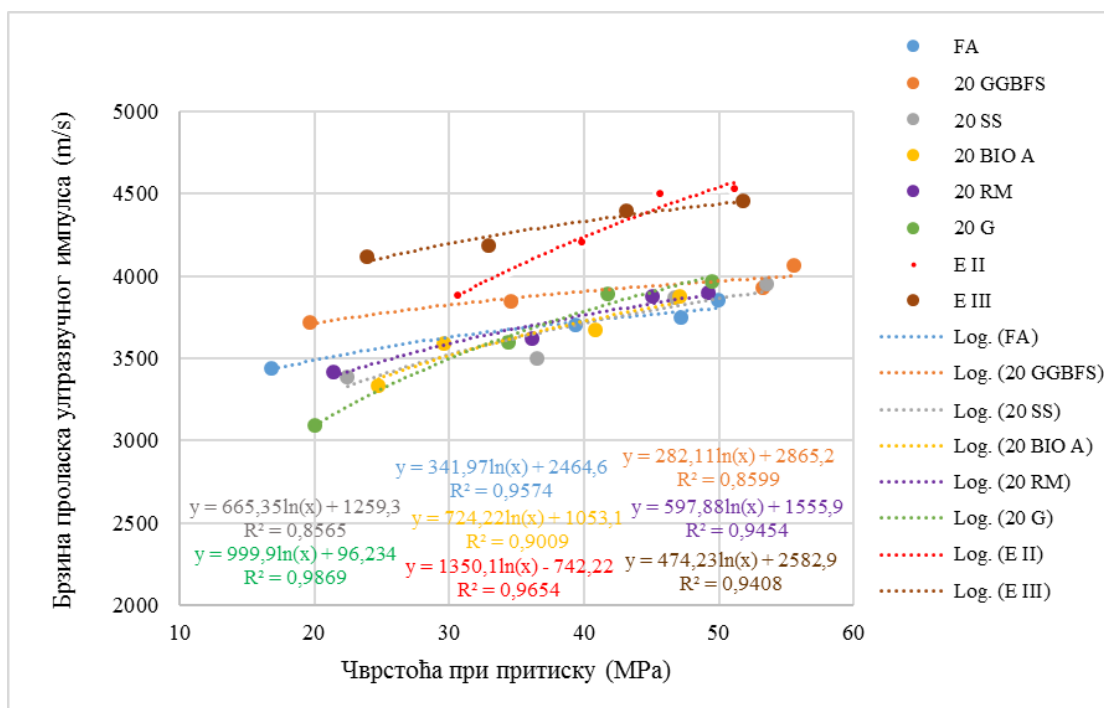
Δv_{uz} – процентуална разлика брзине проласка ултразвучног импулса;

v_{uz} – брзина проласка ултразвучног импулса кроз узорак бетона;

$v_{uz,e}$ – брзина проласка ултразвучног импулса кроз узорак еталон бетона.



Слика 7.60 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса



Слика 7.61 Дијаграм зависности чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса бетона

Табела 7.55 Математичке функције промене чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса и коефицијенти корелације

Ознака бетонске мешавине	Математичке функције
FA	$y = 347,97\ln(x) + 2464,6, R^2 = 0,9574$
20 GGBFS	$y = 282,11\ln(x) + 2865,2, R^2 = 0,8599$
20 SS	$y = 665,35\ln(x) + 1259,3, R^2 = 0,8565$
20 BIO A	$y = 724,22\ln(x) + 1053,1, R^2 = 0,9009$
20 RM	$y = 597,88\ln(x) + 1555,9, R^2 = 0,9454$
20 G	$y = 999,9\ln(x) + 96,234, R^2 = 0,9869$
E II	$y = 1350,1\ln(x) + 742,22, R^2 = 0,9654$
E III	$y = 474,23\ln(x) + 2582,9, R^2 = 0,9408$



Испитивање брзине проласка ултразвучног импулса кроз очврсле узорке геополимерног и цементног бетона вршено је на узорцима бетонских коцки непосредно пре одређивања чврстоће при притиску. Циљ испитивања био је одређивање зависности ова два параметра, али и одређивање квалитета уграђеног бетона. Такође, циљ испитивања био је и давање оцене о степену остварене полимеризације код геополимерних, односно хидратације код цемент бетона.

Посматрањем резултата испитивања свих бетонских серија уочава се да повећање брзине ултразвучног импулса прати тренд повећања старости бетона. Такође, уочава се да је прираст брзине највећи у раним фазама бетона, након чега је прираст занемарљиво мали. Ово је у складу са прирастом чврстоћа при притиску током времена, односно чињеницом да се процес полимеризације успорава током времена.

Резултати овог испитивања се делимично могу довести у везу и са испитивањима других аутора. Наиме, Venaïcha и други [263] наводе да је пораст брзине проласка ултразвучног импулса кроз бетон био најдоминантнији при раним старостима бетона. При каснијим старостима пораст брзине ултразвучног импулса кроз је био незнатан. Испитивањем промене брзине проласка ултразвучног импулса кроз бетон услед повећања старости старости бавили су се и Pierre и други [262]. Наведена група аутора наводи да је бетон задовољавајућег квалитета уколико се брзина проласка ултразвучног импулса кроз бетон креће у опсегу од 2860 m/s до 5700 m/s. Такође, и према поменутиим ауторима брзина ултразвучног импулса кроз бетон се повећава услед пораста очвршћавања бетона.

На слици 7.61 и у табели 7.55 су дате математичке функције, са коефицијентима корелације, које су представљају зависност средње вредности чврстоће при притиску бетона и средње вредности брзине проласка ултразвучног импулса кроз узорке бетона истог састава и старости. Добијени коефицијенти корелације геополимерног бетона крећу се у границама од $R^2=0,8565$ за мешавину бетона ознаке „20 ВЮ А“ до $R^2=0,9869$ за мешавину бетона ознаке „20 G“. Високи коефицијенти корелације указују на добру апроксимацију функције промене средње вредности чврстоће при притиску и средње брзине проласка ултразвучног импулса очврслих узорка бетонских серија истог састава и старости.

Промена брзине проласка ултразвучног импулса кроз геополимерне бетонске узорке старости 2 дана и 90 дана креће се у опсегу од 351 m/s до 872 m/s, док се ова промена на цемент бетону креће у опсегу од 340 m/s до 649 m/s. Поређењем резултата



добијених испитивањем бетона старости 90 дана са критеријума за оцену квалитета из табеле 7.53, може се закључити да сви геополимерни бетони и цемент бетон ознаке „Е III“ спадају у категорију добрих до веома добрих бетона. Ипак, због нешто веће брзине проласка ултразвучног импулса кроз бетон, која при старости од 90 дана премашује брзину од 4500 m/s, цемент бетон ознаке „Е II“ се сврстава у категорију веома добрих до одличних бетона.

На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:

- Пораст брзине проласка ултразвучног импулса кроз узорке геополимерних и цементних бетона у вези је са повећањем старости бетона. Повећање брзине ултразвучног импулса јавља се при свим старостима бетона. Ипак, пораст брзине при каснијим старостима од 28 и 90 дана није изражена као код бетона старости 3 и 7 дана. Стога, може се закључити да је повећање старости бетона у директној вези са степеном остварене полимеризације за геополимерне бетоне и хидратације за цемент бетоне што утиче и на повећање брзине проласка ултразвучног импулса кроз бетон. На почетку испитивања брзина ултразвука нагло расте, док касније успорава. Овакав тренд раста компатибилан је са порастом чврстоће при притиску бетона у току времена.
- Узајамна зависност испитиване чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса кроз геополимерни бетон исте старости могла би се објаснити тиме да геополимерни бетон услед повећања старости наставља процес полимеризације. Ипак, на основу добијених резултата, могло би се закључити да је полимеризација скоро у потпуности завршена већ при старости од 56 дана.
- При ранијим старостима бетона, брзине проласка ултразвучног импулса од око 12,91 m/s одговара промени чврстоће при притиску од 1 МПа. При старости од 28 дана до 90 дана промена брзине ултразвука од 39,48 m/s одговара промени чврстоће од 1 МПа. Сличан однос примећен је и код других геополимерних мешавинама справљених са делимичном заменом везива другим индустријским нуспоризводима.
- Пораст брзине проласка ултразвучног импулса кроз геополимерни бетон прати раст остварених чврстоћа при притиску. Ово потврђују и високи коефицијенти корелације R^2 који се крећу у опсегу од 0,8565 до 0,9869.

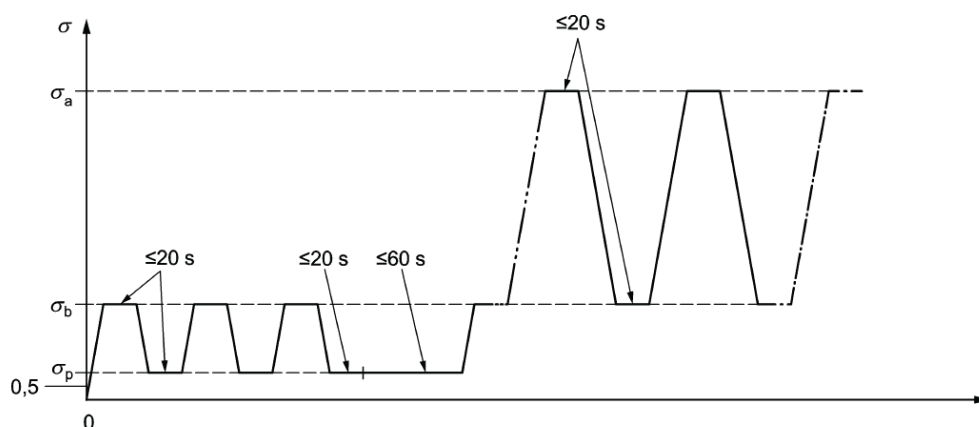


- Брзина проласка ултразвучног импулса кроз бетон зависи од врсте употребљеног везивног материјала. Брзина ултразвука измерена на серијама геополимерног бетона старости 3 дана је и до 1019 m/s мања од брзине измерене на цементном бетону. С повећањем старости ова разлика се смањује па износи до 675 m/s.
- Брзина проласка ултразвучног импулса може се сматрати релативно поузданом недеструктивном методом за праћење степена остварене полимеризације у геополимерном бетону. Међутим, брзина проласка ултразвучног импулса не може бити заменска метода методи испитивања чврстоће при притиску, али нам може дати оквирне податке о напредовању процеса очвршћавања. Нарочита корист од ове методе може се остварити кад смо ограничени бројем лабораторијских узорака.

7.9.8 Одређивање статичког модула еластичности бетона при притиску

Одређивање статичког модула еластичности бетона врши се при дејству једноаксијалног притиска након што се на узорцима истих бетонских мешавина утврди чврстоћа при притиску. Испитивање је могуће спровести на узорцима очврслог бетона облика призме или цилиндра који испуњавају услове захтеване стандардима SRPS EN 12390-1:2014 [264] или SRPS EN 12504-1:2019 [265]. Тест започиње постављањем узорака између потисних плоча пресе за испитивање чврстоће при притиску. Уређај за испитивање мора поседовати могућност задавања брзине прираста оптерећења, задавање цикличног оптерећење и растерећење узорка. Преса за наношење оптерећења треба да испуњава услове за класу тачности 1 према стандарду SRPS EN 12390-4:2019 [266]. На слици 7.62 дат је дијаграм наношења циклуса оптерећења и њихова дужина трајања. За мерење деформација бетона користе се уређаји - екстензометри који мере промену дужине бетона (Δl). Екстензометри требају да испуњавају услове за класу тачности 2 која се захтева стандардом SRPS EN ISO 9513:2014 [267] као и да њихов опсег мерења буде у границама од 0 $\mu\text{m}/\text{m}$ до 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Приликом испитивања изврши се наношење следећих карактеристичних напона:

- 1) преднапон (σ_p) – 0,5 МПа;
- 2) доњи напон (σ_b) - (0,10-0,15 x f_c);
- 3) горњи напон (σ_a) - ($f_c/3$), при чему је f_c – чврстоћа при притиску.



Слика 7.62 Наношење циклуса оптерећења при одређивању модула еластичности према стандарду SRPS EN 12390-13:2015 [220]

У конкретном случају, испитивање је извршено према стандарду SRPS EN 12390-13:2015 [220]. За испитивање су коришћени бетонски цилиндри димензија $\varnothing 150 \times 300$ mm и старости 90 дана. За испитивање је коришћена хидрауличка преса марке „UTEST UTC – 5740“ и три дигитална екстензометра марке „CONTROLS 55-C0222/F“. Испитивање једног бетонског узорка дато је на слици 7.63. Статички модул еластичности представљен је као секантни модул еластичности мерен при напону који је једнак 40 % просечне вредности чврстоће при притиску бетонских цилиндара [46]. Резултати испитивања статичког модула еластичности дати су у табели 7.56 и на слици 7.64, док су изводи из софтвера испитиваних бетонских серија дати у прилогу 7. Статички модул еластичности (E_s) при дејству аксијалног притиска срачунат је према изразу (7.26):

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \text{ (GPa)} \quad (7.26)$$

где је:

E_s – статички модул еластичности при притиску;

$\Delta\sigma$ – разлика између измереног горњег и доњег напона (MPa);

$\Delta\varepsilon$ – разлика измерене горње и доње дилатације при деловању горњег и доњег напона, респективно (mm/m).



Слика 7.63 Одређивање модула еластичности при притиску – извод из софтвера

Процентуална разлика статичког модула еластичности срачуната је према изразу (7.27):

$$\Delta E_S = \frac{E_{uz} - E_{uz,e}}{E_{uz,e}} (\%) \quad (7.27)$$

где је:

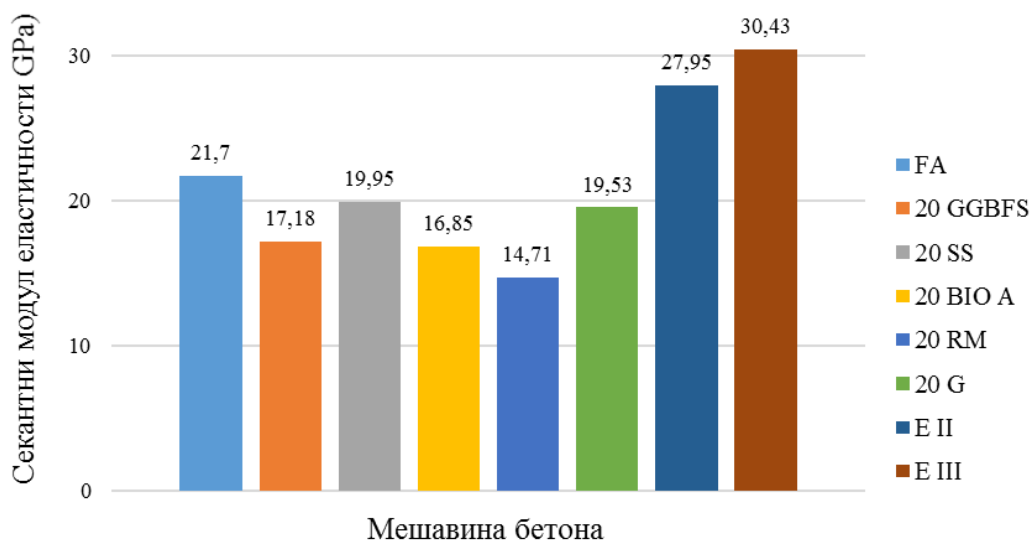
ΔE_S – процентуална разлика статичког модула еластичности;

E_{uz} – статички модул еластичности предметног узорка бетона;

$E_{uz,e}$ – статички модул еластичности узорка еталон бетона.

Табела 7.56 Резултати испитивања статичког модула еластичности при притиску

Ознака мешавине	$E_{s,uz}$	$\Delta E_{s,uz}$	$f_{pb,sr}$
	GPa	%	(N/mm ²)
FA	21,70	0	49,94
20 GGBFS	17,18	-20,83	55,59
20 SS	19,95	-8,06	53,56
20 BIO A	16,85	-22,35	47,07
20 RM	14,71	-32,21	49,25
20 G	19,53	-10,00	49,47
E II	27,95	28,80	51,17
E III	30,43	40,23	51,76



Слика 7.64 Резултати испитивања статичког модула еластичности бетона старости 90 дана

Испитивање модула еластичности геополимерног и цементног бетона вршено је са циљем да се одреди отпорност бетона услед цикличног оптерећивања и растерећивања. Још један од циљева био је и одређивања утицаја других индустријских



нуспроизвода при истом процентуално - масеном уделу у везиву. У табели 7.56 и на слици 7.64 су дати резултати испитивања модула еластичности E_S и процентуалне разлике ΔE_S у односу на еталон бетон ознаке „FA“. У склопу поменуте табеле дате су и вредности чврстоће при притиску бетона старости 90 дана, ради лакшег поређења резултата.

Највећа вредност модула еластичности геополимерних бетона измерена је на узорцима еталона ознаке „FA“ и износи 21,7 МПа. Замена дела основног везива другим индустријским нуспроизводима утицала је на смањење вредности статичког модула еластичности за од 8,06 % до 32,21 %. Најмањи модул еластичности измерен је на мешавини ознаке „20 RM“ и износи 14,71 МПа.

Вредности резултата испитивања могу се упоредити са резултатима других аутора. Наиме, Aliabdo и други [110] су испитивали модул еластичности геополимерног бетона справљеног са 350 kg/m^3 , 400 kg/m^3 и 450 kg/m^3 електрофилтерског пепела као везива. Према резултатима испитивања, модул еластичности геополимерног бетона справљеног са 400 kg/m^3 био је мањи од 21 GPa. До сличних резултата испитивања дошли су и F. - Jimenez и други [121]. Аутори су испитивали карактеристике геополимерних бетона на бази електрофилтерског пепела који су температурно очвршћавали. Измерена чврстоћа при притиску геополимерног бетона била је 45 МПа док је вредност модула еластичности бетона исте серије била 18,4 GPa. Остварена вредност била је за 11,9 GPa мања од модула еластичности цементног бетона.

Све измерене вредности статичког модула еластичности геополимерног бетона мање су од вредности цемент бетона. Највећи модул еластичности измерен је на мешавини ознаке „E III“ и износи 30,43 МПа. Статички модул еластичности цементног бетона био је за 8,73 GPa већи од модула еластичности еталон геополимерног бетона ознаке „FA“.

На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:

- Замена дела електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима при справљању геополимерног бетона утицала је на промену вредности статичког модула еластичности. Делимична замена основног везива утицала на смањења статичког модула еластичности за највише 32,21 %. Изузимајући еталон, најмањи модул еластичности геополимерних бетонских мешавина



измерен је код мешавине „20 RM“ и износи 14,71 GPa, док је модул еластичности највећи код мешавине „20 SS“ и износи 19,95 GPa.

- Може се закључити да су индустријски нуспроизводи попут: гранулисане згуре високе пећи, конверторске згуре, дрвног пепела из биомасе, црвеног муља и отпадног стакла при процентно-масеном уделу у везиву од 20 % утицали на смањење вредности статичког модула еластичности у односу на еталон бетон „FA“.
- Упоређујући вредности чврстоће при притиску геополимерних бетонских серија и модула еластичности, може се закључити да није могуће предвидети отпорност геополимерног бетона на дејство цикличног оптерећења услед замене електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима.
- Врста бетона и тип употребљеног везивног материјала утичу на вредност статичког модула еластичности. Наиме, средња вредност модула еластичности геополимерног еталон бетона „FA“, справљеног само са електрофилтерским пепелом као везивом, износила је 21,7 GPa. Вредност модула еластичности цементних бетона ознаке „Е II“ и „Е III“ износила је 27,95 GPa и 30,43 GPa. Вредности измерене на цементним бетонима биле су за 28,8 % и 40,23 %, веће од вредности модула еластичности еталона „FA“ респективно. Стога, може се закључити да је вредност модула еластичности цемент бетона већа од вредности измерене на геополимерном бетону справљеном на бази електрофилтерског пепела.
- На основу изложених резултата може се закључити и да је модул еластичности геополимерног бетона на бази електрофилтерског пепела од 40,23 % до 51,66 % мањи од модула еластичности цементног бетона „Е III“, за мешавине бетона ознаке „FA“ и „20 RM“, респективно.

7.9.9 Упијање воде под атмосферским притиском

Упијање воде у бетону одређено је под атмосферским притиском. За испитивање су коришћени бетонски узорци облика коцке ивице 71 mm старости 90 дана. Испитивање сваке бетонске мешавине је извршено на три узорка истог састава и старости. Испитивање је извршено према стандарду SRPS EN 1340:2012 [221] којим су обухваћени захтеви и методе испитивања бетонских ивичњака. Поступак припреме подразумевао је сечење узорака из бетонских призми, коришћених приликом одређивања чврстоће при

затезању савијањем. Након сечења узорци су потапани у обичну воду температуре 20 ± 5 °C до константне масе. Дужина трајања потапања узорака у води била је 3 дана. Сматрано је да је константна маса достигнута онда кад приликом два узастопна мерења разлика у маси узорка није била већа од 0,1 %. Потапање је вршено у посуди са пластичној посуди са равним дном. Висина воде у кориту након потапања била је већа од 50 mm у односу на висину узорака, а размак између узорака био је минимум 15 mm. На слици 7. 65 дат је изглед узорака у току испитивања.



Слика 7.65 Резултати испитивања упијања воде под атмосферским притиском

Пре сваког мерења масе засићени узорци су обрисани сувом крпом, а овако добијена маса узорака означена је као M_1 . Након 3 дана од почетка испитивања вршено је сушење узорака у трајању од 3 дана односно до остваривања константне масе. Вредност добијена мерењем ове масе означена је као M_2 . За сушење је коришћена лабораторијска сушница, а температура сушења износила је 105 ± 5 °C. Резултати испитивања упијања воде дати су у табели 7.57, а упијање (W_a) је срачунато према изразу према изразу (7.28):

$$W_{a,uz} = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \quad (7.28)$$

где је:

$W_{a,uz}$ – упијање воде под атмосферским притиском;

M_1 – иницијална маса узорака (g);

M_2 – коначна маса узорака (g).

Процентуална разлика упијања воде срачуната је према изразу (7.29):



$$\Delta W_a = \frac{W_{a,uz} - W_{a,uz,e}}{W_{a,uz,e}} (\%) \quad (7.29)$$

где је:

$\Delta W_{a,uz}$ – процентуална разлика упијања воде под атмосферским притиском;

$W_{a,uz}$ – упијање воде под атмосферским притиском предметног узорка бетона;

$W_{a,uz,e}$ – упијање воде под атмосферским притиском узорка еталон бетона.

Табела 7.57 Резултати испитивања упијања воде при атмосферском притиску

Ознака мешавине	$W_{a,uz}$	$\Delta W_{a,uz}$
	%	
FA	5,56	0,00
20 GGBFS	5,23	-5,94
20 SS	5,03	-9,53
20 BIO A	5,69	2,34
20 RM	5,69	2,34
20 G	5,34	-3,96
Е II	4,05	-27,16
Е III	3,77	-32,19

Највеће упијање воде измерено је на геополимерним еталон мешавинама ознаке „20 BIO A“ и „20 RM“ и износи 5,69 %. Ова вредност већа је од вредности упијања воде измерене на еталону ознаке „FA“ која износи 5,56 %. Најмање упијање геополимерних бетона измерено је на мешавини ознаке „20 SS“ и износи 5,03 %.

Упијање воде под атмосферским притиском геополимерних бетона било је веће од упијања измереног на цемент бетону. Вредност упијања воде цемент бетона била је од 27,16 % до 32,19 % мања од упијања воде геополимерног еталона ознаке „FA“.

На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:

- Упијање воде под атмосферским притиском може се повезати са врстом употребљеног везива. Наиме, отпадни индустријски нуспроизводи попут пепела из дрвне биомасе и црвеног муља који су коришћени за справљање



геополимерног бетона утицали су на повећање упијања воде у односу на еталон мешавину ознаке „FA“. Вредност упијања воде у овим бетонима („20 ВЮ А“ и „20 RM“) била је 2,34 % већа у односу на еталон „FA“.

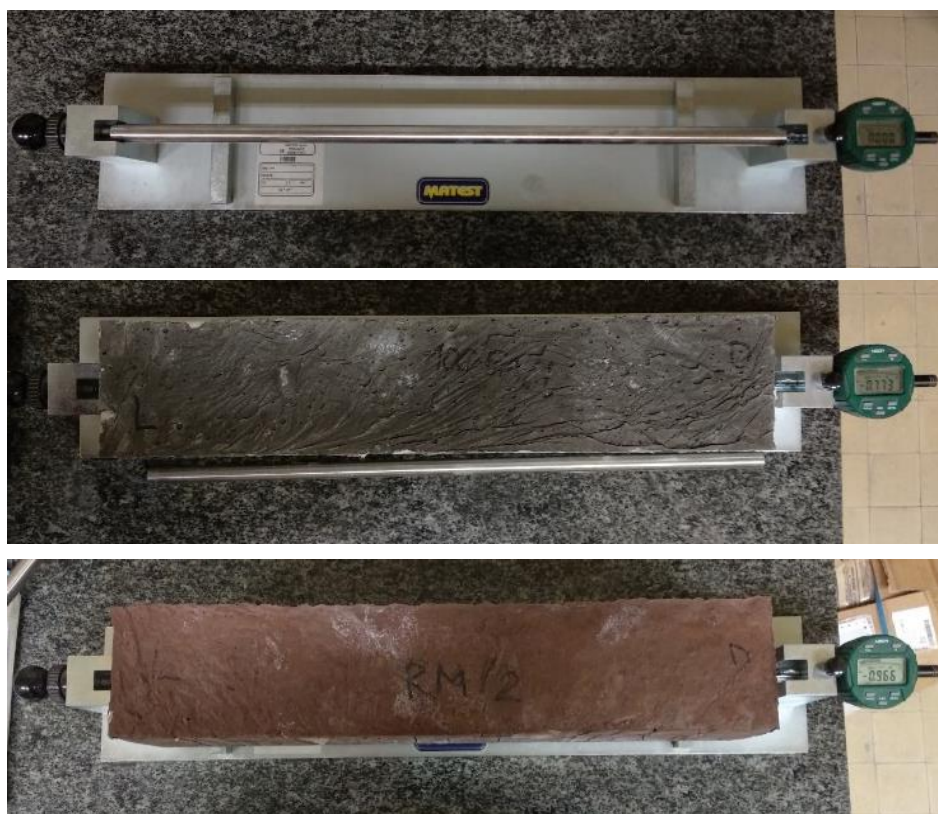
- Најмање упијање воде измерено је на мешавини геополимерног бетона справљеног са конверторском згуром ознаке „20 SS“ и износи 5,03 %. Измерена вредност је за 9,53 % мања од еталона „FA“. Овакви резултати могу се повезати и са микроскопским карактеристикама бетона односно са хомогеношћу и порозношћу. Наиме, према SEM микроструктуралној анализи, датој у поглављу 7.9.16, структура ове бетонске мешавине се чини хомогенијом у односу на остале мешавине геополимерног бетона. Стога, садржај пора унутар структуре узорка требао би бити мањи. Садржај пора могао би се довести у везу са упијањем воде. Ипак, о микроструктури бетона биће више речи у наредном делу дисертације, а ову тврдњу требало би поткрепити и мерењем процентног садржаја пора у бетону.
- Упијање воде под атмосферским притиском геополимерног бетона било је веће од упијања воде измереног на цемент бетону. Процент упијања воде под атмосферским притиском цемент бетона кретао се у опсегу од 3,77 % до 4,05 %, док је код геополимерног бетона овај опсег од 5,03 % до 5,69 %.

7.9.10 Скупљање бетона

Скупљање бетона услед сушења спада у групу метода за испитивање деформације бетона у функцији времена. Ове деформације последица је губитка воде задржане у малим капиларним порама током процеса полимеризације. Настале деформације изазивају физичке промене попут прлина и пукотина [268]. У општем случају, скупљање се може дефинисати као промена запремине бетона у току времена кад бетон није излаган никаквом спољашњем дејству [269].

Испитивање скупљања бетона извршено је према стандарду UNI 6555:1973 [222]. Приликом уградње свежег геополимерног бетона на крајевима калупа постављени су метални репери након чега је извршено уливање свеже бетонске масе у калупе и умотани у пластичну фолију. Узорци су 24 часа након справљања извађени из калупа, а затим су умотани у пластичну фолију и неговани у амбијенталним условима на температури од 20 ± 4 °C у трајању од још 48 часа. Узорци цементног бетона су након вађења из калупа неговани у кречњачкој води на температури од 20 ± 4 °C у трајању од 48 сата. Након 72 сата од справљања узорци геополимерног бетона извађени су из фолије, а узорци

цементног бетона извађени су из воде и осушени сувом крпом. Након овога приступило се нултом мерењу. За мерење је коришћен дигитални компаратер „Insize“ са тачношћу мерења од 0,001 mm. Поступак мерења дат је на слици 7.66. Праћење промене дужине вршено је на три узорка сваке бетонске мешавине старости 3, 4, 7, 14, 28, 60 и 90 дана. За испитивање су коришћени бетонски узорци облика призме димензија 100 × 100 × 500 mm. Средња вредност испитивања три бетонска узорка услед сушења дата је у табели 7.58 и на слици 7.67.



Слика 7.66 Испитивање скупљања геополимерних бетонских узорка ознаке FA“ и „20 RM“

Скупљање бетона (ϵ_{sb}) одређено је на узорцима сушеним на ваздуху према изразу (7.30):

$$\epsilon_{sb} = \frac{\Delta l_{sb}(t)}{l_{sb}} (mm/m) \quad (7.30)$$

где је:

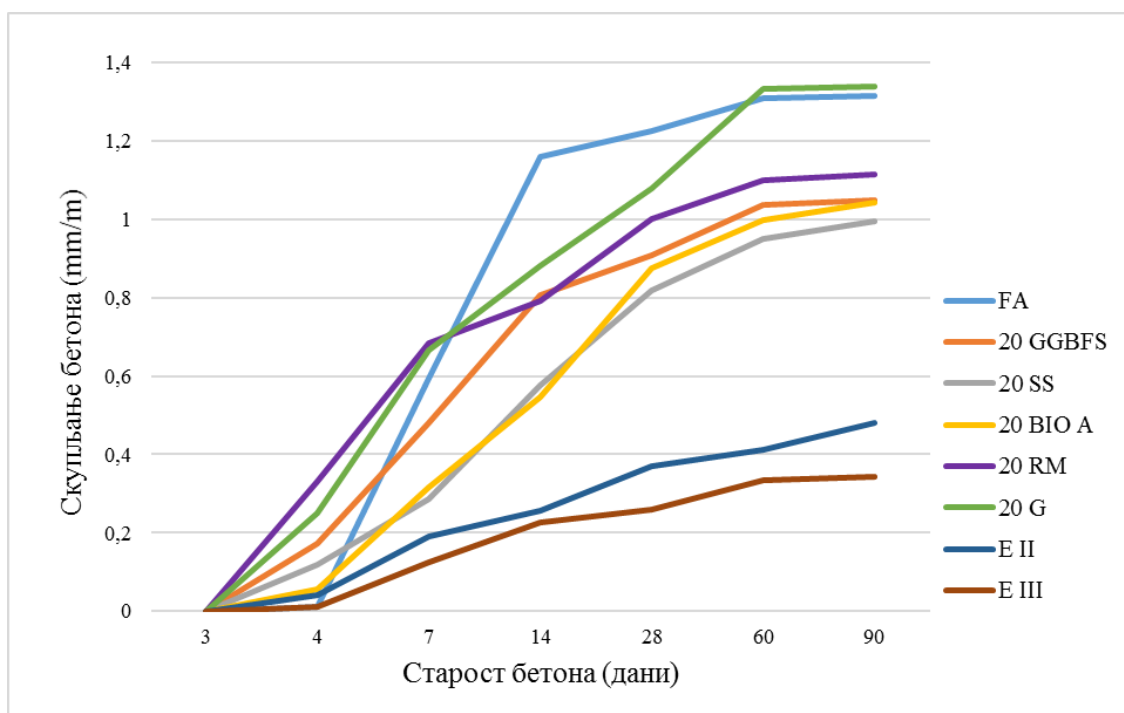
ϵ_{sb} – скупљање бетона;

$\Delta l_{sb}(t)$ – промена дужине узорка у тренутку читања и нултог читања при старости бетона од 72 сата (mm);

l_{sb} – дужина бетонског узорка (m).

Табела 7.58 Резултати испитивања скупљања бетона

Ознака мешавине	Старост бетонских епрувета (дани)						
	3	4	7	14	28	60	90
	ϵ_{sb} (mm/m)						
FA	0	0,010	0,595	1,160	1,225	1,308	1,315
20 GGBFS	0	0,174	0,481	0,806	0,909	1,036	1,047
20 SS	0	0,12	0,286	0,577	0,819	0,951	0,994
20 BIO A	0	0,056	0,315	0,546	0,876	0,997	1,042
20 RM	0	0,332	0,684	0,792	0,999	1,100	1,115
20 G	0	0,25	0,667	0,881	1,078	1,331	1,337
E II	0	0,042	0,192	0,257	0,369	0,412	0,480
E III	0	0,012	0,126	0,228	0,26	0,334	0,344



Слика 7.67 Резултати испитивања скупљања услед сушења бетона старости 3 до 90 дана



Највеће скупљање геополимерног бетона старости 90 дана измерено је на геополимерним бетонским мешавинама ознаке „FA“ и „20 G“. Ипак, поменутој старости оно је веће код мешавине „20 G“ и износи 1,337 mm/m док при истој старости скупљање еталона „FA“ износи 1,315 mm/m. Када је реч о утицају индустријских нуспроизвода на скупљање геополимерног бетона бележи се њихов позитиван утицај. Ипак, изузетак у овој тврдњи је бетон справљен са отпадним стаклом. Према вредностима добијеним испитивањем бетона може се закључити да је при старости од 28, 60 и 90 дана геополимерна мешавина ознаке „20 SS“ имала најмање скупљање. При старости од 90 дана оно је износило 0,994 mm/m.

Мерење скупљања услед сушења геополимерног бетона справљеног са 20 % процентно-масеног удела конверторске згуре, гранулисана згуре, пепела из дрвне биомасе и црвеног муља дало је приближно исту вредност при старости бетона од 90 дана. Вредност скупљања узорак бетонских мешавина ознаке „20 SS“, „20 GGBFS“, „20 BIO A“ и „20 RM“ се при поменутој старости кретало се у опсегу од 0,994 mm/m до 1,115 mm/m.

Скупљање услед сушења цемент бетона многоструко је мање од скупљања геополимерног бетона при свим старостима. При мерењу узорак старости 90 дана вредност скупљања цемент бетона „E III“ и „E II“ било је 0,344 mm/m до 0,48 mm/m, респективно.

На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:

- Делимична замена електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима у процентно-масеном износу од 20 % утичи на смањење скупљања бетона током првих 90 дана. Ипак, изузетак је мешавина геополимерног бетона код које је делимична замене основног везива извршена отпадним стаклом. Скупљање те геополимерне бетонске мешавине је при старостима од 60 и 90 дана било веће од еталона „FA“.
- Генерално, може се закључити да је скупљање геополимерног бетона услед сушења најдоминантније при мерењима узорак бетона старости 4, 7, 14 и 28 дана. На узорцима бетона старости 60 и 90 дана је и даље био присутан тренд скупљања, међутим оно није толико доминантно као при ранијим старостима бетона од 4. до 28. дана.

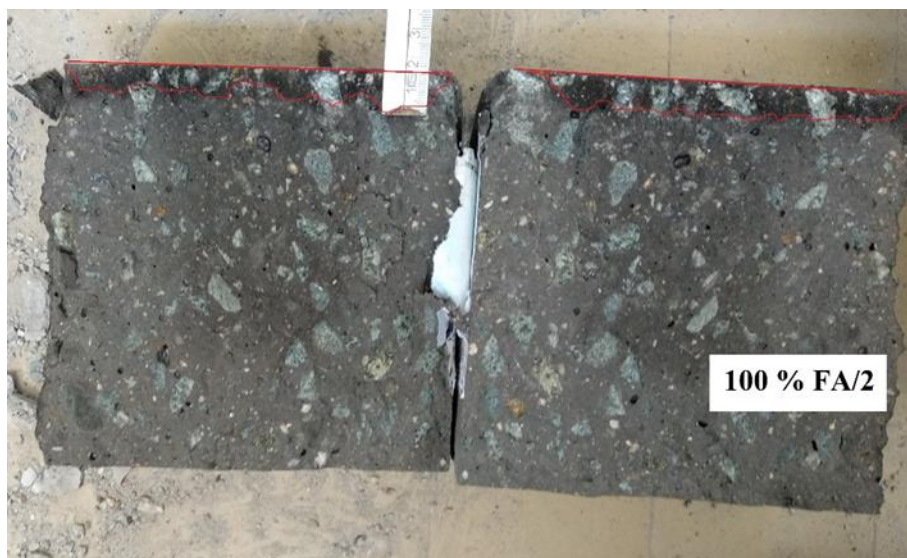
- Скупљање узорака геополимерног бетона веће је од скупљања узорака цементног бетона исте старости и при истим условима испитивања. И ако је скупљање геополимерног бетона „20 SS“ било мање од скупљања других геополимерних бетона оно је било за 2,07 и 2,89 пута веће од скупљања цементних бетона ознака „Е II“ и „Е III“, респективно.

7.9.11 Дубина пенетрације воде под притиском – водопропустљивост бетона

Испитивање дубине пенетрације воде под притиском односно водонепропусност бетона извршено је према стандарду SRPS EN 12390-8:2019 [223]. Испитивање је спроведено на бетонским узорцима облика коцке, ивице 150 mm и старости 28 дана. Површина узорака која је излагана дејству воде под притиском је пре почетка испитивања охрапављена челичном четком. Овако припремљена површина изложена је дејству воде под притиском од 500 ± 50 kPa у трајању од 72 ± 2 h. Приликом испитивања вршен је преглед слободних површина и површине излагане води под притиском. Затим су узорци помоћу хидрауличке пресе поцепани на два дела и измерена је максимална дубина продора воде. За испитивање водонепропустљивости коришћен је уређај марке „UTEST UTC - 1090“, а изглед уређаја и узорака приликом испитивања дат је на слици 7.68. Површина по којој је извршено цепање узорака била је управна на површину излагану дејству воде под притиском, а изглед узорка бетонске коцке након цепања дат је на слици 7.69.



Слика 7.68 Испитивање дубине пенетрације воде под притиском



Слика 7.69 Изглед узорка након испитивања

Резултати мерења појединачних вредности и средње вредности продирања воде у бетонске узорке дате су у табели 7.59, а у прилогу 8 дат је изглед узорака након испитивања. Класа водонепропусности бетона (V) одређена је према табели 8 стандарда SRPS U.M1.206:2013 [225]. Одређивање класе водонепропусности бетона вршено је према највећим дозвољеним вредностима продора воде и то:

- 1) Највећи дозвољени продор воде 50 mm и највеће дозвољено одступање +15 mm – класа V-I;
- 2) Највећи дозвољени продор воде 30 mm и највеће дозвољено одступање +10 mm – класа V-II и
- 3) Највећи дозвољени продор воде 20 mm и највеће дозвољено одступање + 5 mm – класа V-III.



Табела 7.59 Резултати испитивања водонепропусности бетона

Ознака мешавине	Узорак			Средња вредност продора воде под притиском	Процентуална разлика продора воде под притиском	Класа водонепропустљ. бетона
	1	2	3			
	$h_{pv,uz}$ (mm)				$\Delta h_{pv,uz}$ (%)	V
FA	14	17	15	15	0,00	V-III
20 GGBFS	18	25	15	19	26,67	V-III
20 SS	8	6	9	8	-46,67	V-III
20 BIO A	14	18	15	16	6,67	V-III
20 RM	6	10	12	9	-40,00	V-III
20 G	13	20	15	16	6,67	V-III
E II	9	8	5	7	-53,33	V-III
E III	55	42	58	52	246,67	V-I
Према табели 8 стандарда SRPS U.M1.206:2013 [225] бетон старости 28 дана дели се на класе водопрпусности						50 mm, дозвољено одступање + 15 mm – V-I 30 mm, дозвољено одступање + 10 mm – V-II 20 mm, дозвољено одступање + 5 mm – V-III

Процентуална разлика дубине продора воде под притиском срачуната је према изразу (7.31):

$$\Delta h_{pv,uz} = \frac{h_{pv,uz} - h_{pv,e}}{h_{pv,e}} (\%) \quad (7.31)$$

где је:

$\Delta h_{pv,uz}$ – процентуална разлика дубине продора воде под притиском;

$h_{pv,uz}$ – дубина продора воде под притиском предметног узорка бетона;

$h_{pv,e}$ – дубина продора воде под притиском узорка еталон бетона.

Отпорност бетона на продирање воде под притиском често се доводи у везу са трајношћу бетона. Према досадашњим искуствима, веће продирање воде под притиском прејудицира да је реч о бетону слабије трајности. Исто важи и супротно [270]. Стога, испитивањем водопрпусљивости бетона може се створити слика о трајности



испитиваног бетона, али када је реч о новим врстама бетона не сме се држати ове тврдње, већ је потребно детаљно испитати њихову трајност одговарајућим методама.

Резултати испитивања продора воде под притиском показују да замена дела електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима утиче на водопропустљивост геополимерног бетона. Према резултатима испитивања, најмањи продор воде под притиском измерен је на бетонским узорцима справљеним са делимичном заменом основног везива конверторском згуром и црвеним муљем. Дубина продора воде у узорке ових мешавина износи 8 mm и 9 mm, респективно. Геополимерне бетонске мешавине код којих је део електрофилтерског пепела замењен гранулисаном згуром из високе пећи, пепелом дрвне биомасе и отпадним стаклом показале су нешто лошију водопропустљивост од еталона „FA“. Процентуална разлика продора воде под притиском геополимерних бетона ознаке „20 GGBFS“, „20 BIO A“ и „20 G“ у односу на еталон кретала се у опсегу од 6,67 % до 26,67 %.

Резултати испитивања вредности продора воде под притиском на узорцима геополимерног бетона не могу се у потпуности повезати са испитивањем које су спровели Mahmoud и Khoshnaw [271]. Наиме, поменути аутори су испитивали температурно активирани геополимерне бетоне на бази електрофилтерског пепела неговане при температури од 70 °C у трајању од 24 h. Аутори су резултате испитивања упоредили са цементним бетоном справљеним са цементом „СЕМ I“. Средња вредност продирања воде под притиском у узорке цементног бетона била је 115 mm, док је код геополимерног бетона продирање воде било мање од 40 mm.

Сви геополимерни и цемент бетони показали су добру отпорност на дејство воде под притиском. Ипак, најмању отпорност на дејство воде под притиском показала је цемент бетонска мешавина ознаке „Е III“. Средња вредност дубине продора воде под притиском била је 52 mm што је за 44 mm више од дубине продора воде измерене на геополимерном бетону ознаке „20 SS“.

На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:

- Средње вредности дубине продора воде под притиском у узорцима геополимерног бетона кретале се у опсегу од 8 mm до 19 mm. Највећа средња вредност дубине продора воде под притиском измерена је на геополимерној мешавини ознаке „20 GGBFS“ и она је за 26,67 % већа од продора у узорак еталона „FA“. Најмања средња вредност продирања воде под притиском



измерена је на узорцима мешавине ознаке „20 SS“ и износи 8 mm. Ова вредност је за 46,67 % мања од вредности продирања воде кроз еталон „FA“.

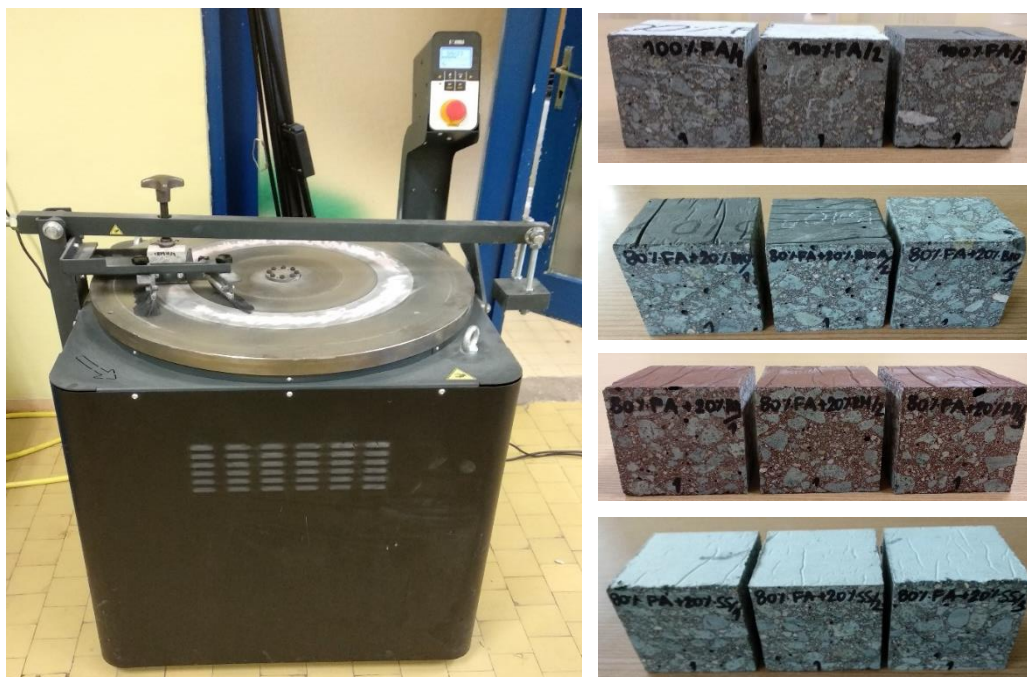
- Генерално, све геополимерне бетонске мешавине имају добру отпорност на дејство воде под притиском (све мешавине задовољавају критеријум за највећу класу водонепропусности „V-III“). Са друге стране добру отпорност на дејство воде под притиском узорцима показали су и узорци цемент бетона ознаке „E II“ који, као и геополимерни бетони, задовољавају критеријум за класу „V-III“. Нешто мању отпорност показали су узорци цемент бетона ознаке „E III“ који задовољавају критеријум за класу водонепропустљивости „V-I“.
- Овакви резултати испитивања односно већи продор воде код геополимерних бетона него код цементног бетона „E II“ искључиво су последица структуре пора унутар бетонске матрице. Наиме, како је при справљању свих бетона коришћена иста врста агрегата, не може се сматрати да је различит продор воде последица употребљеног агрегата, већ искључиво структуре гелских пора. О структури пора биће више речи у поглављу 7.9.16.

7.9.12 Отпорност бетона према хабању брушењем

Отпорност бетона према хабању брушењем једно је од карактеристичних испитивања конструктивних елемената изложених хабању од пешачког и друмског саобраћаја. Ово својство бетона је нарочито од значаја при одређивању услова квалитета бетонских елемената изложених хабању услед трења точкова возила, хабању услед трења точкова транспортних средстава код индустријских подова, хабању услед трења обуће при кретању пешака, абразији код хидротехничких конструкција, и др. [158].

Испитивање отпорности бетона према хабању брушењем спроведено је на узорцима облика коцке ивице $71 \pm 1,5$ mm, а старост бетонских узорака коришћених за испитивање била је 90 дана. Узорци су добијени сечењем бетонских призми након испитивања чврстоће при савијању. Испитивање је извршено према стандарду SRPS 1340:2012 (прилог X) [224]. Испитивање бетонских коцки извршено је на Böhme машини, а изглед уређаја и положај узорка приликом испитивања дати су на слици 7.70. Поступак испитивања се састојао из мерења масе и запреминске масе узорка. Након чега је извршено посипање брусног праха (алуминијум-оксида) – вештачког корунда по хабајућој површини уређаја за испитивање. Маса брусног праха по једном мерењу износила је 20 g. Након тога извршено је постављање узорака који је оптерећен тегом који преноси силу од 296 ± 3 N. Узорак је испитиван у 16 циклуса, а узорак је постепено

ротиран за 90 ° након чега је површина очишћена и сипан нови абразив. Средње вредности резултата испитивања хабања брушењем по Вöhme-у и процентуална разлика у односу на серију еталона дати су у табели 7.60 и на слици 7.71.



Слика 7.70 Испитивање отпорности бетона према хабању брушењем

Отпорност бетона према хабању брушењем (ΔV) одређена је према изразу (7.32):

$$H_b = \frac{\Delta m}{\gamma_R} \quad (\text{cm}^3/50\text{cm}^3) \quad (7.32)$$

где је:

H_b – губитак масе након 16 циклуса;

Δm – губитак масе након 16 циклуса;

γ_R – запреминска маса узорка.

Класа отпорности на хабање (Н) се према табели 9 стандарда SRPS U.M1.206:2013 [225] одређује према количини обрушеног материјала са узорка. Стога, бетон је према степену отпорности на хабање могуће класирати:

- 1) 20 $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$ за класу изложености ХМ 1 (умерено оптерећење) – степен отпорности на хабање Н1;
- 2) 17 $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$ за класу изложености ХМ 2 (тешко оптерећење) – степен отпорности на хабање Н2;



- 3) $14 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ за класу изложености ХМ 3 (веома тешко оптерећење) – степен отпорности на хабање Н3.

Табела 7.60 Резултати испитивања отпорности бетона према хабању брушењем

Ознака мешавине	H_b ($\text{cm}^3 / 50\text{cm}^2$)	ΔH_b ($\text{cm}^3 / 50\text{cm}^2$)	Степен отпорности на хабање
FA	9,91	0	Н 3
20 GGBFS	9,70	-2,12	Н 3
20 SS	9,66	-2,52	Н 3
20 BIO A	10,43	5,25	Н 3
20 RM	11,49	15,94	Н 3
20 G	10,09	1,82	Н 3
Е II	8,05	-18,77	Н 3
Е III	8,98	-9,38	Н 3
Према табели 9 стандарда SRPS U.M1.206:2013 [225] горња гранична вредност обрешеног материјала		$20 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$, дозвољено одступање $+ 5 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ – Н1 $17 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$, дозвољено одступање $+ 4 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ – Н2 $14 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$, дозвољено одступање $+ 3 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ – Н3	

Процентуална разлика отпорности бетона према хабању брушењем срачуната је према изразу (7.33):

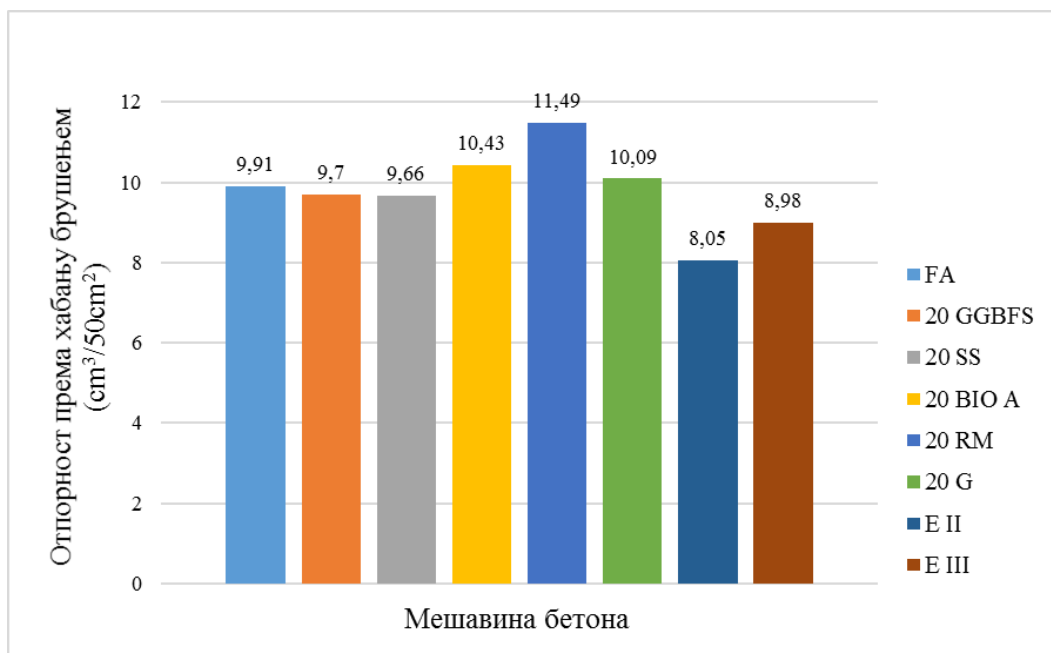
$$\Delta H_b = \frac{H_{b,uz} - H_{b,e}}{H_{b,e}} \quad (\%) \quad (7.33)$$

где је:

ΔH_b – процентуална разлика отпорности према хабању брушењем;

$H_{b,uz}$ – отпорност према хабању брушењем предметног узорка бетона;

$H_{b,e}$ – отпорност према хабању брушењем узорка еталон бетона.



Слика 7.71 Резултати испитивања отпорности према хабању брушењем бетона старости 90 дана

Вредност хабања брушењем геополимерног бетона кретала се у опсегу од 9,66 cm³/50 cm² до 11,49 cm³/50 cm². Најбољу отпорност на хабање брушењем имале су бетонске мешавине справљене са згуром ознаке „20 SS“ и „20 GGBFS“. Упоређујући вредности добијене њиховим испитивањем са вредношћу еталон бетона „FA“, код бетонских мешавина справљених са додатком конверторске згуре и згуре из високе пећи дошло је до смањења вредности хабања за 2,52 % и 2,12 %, респективно (односно повећања отпорности на хабање). Ови резултати су очекивани с обзиром да су остварене вредности чврстоће при притиску бетонских мешавина „20 SS“ и „20 GGBFS“ старости 90 дана биле веће од чврстоће еталона „FA“. Најмању отпорност на хабање имала је геополимерна бетонска мешавина ознаке „20 RM“. Вредност хабања била је 11,49 cm³/50 cm² што је за 15,94 % више у односу на вредност хабања еталона „FA“.

Цемент бетони показали су нешто бољу отпорност на хабање брушењем у односу на геополимерни бетон. Вредност обршеног материјала бетона ознаке „E II“ била је 8,05 cm³/50 cm² што је за 18,77 % мање од еталона „FA“.

На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:

- Делимична замена електрофилтерског пепела индустријским нуспроизводима попут пепела дрвне биомасе, црвеног муља и отпадног стакла у процентуално - масеном уделу од 20 % утицала је на смањење отпорности на хабање брушењем.



У поређењу са еталон бетоном ознаке „FA“ највеће смањење отпорности на хабање брушењем измерено је на геополимерном бетону ознаке „20 RM“ и износи 15,94 %, док код бетона ознаке „20 BIO A“ и „20 G“ смањење износи 5,25 % и 1,82 %, респективно.

- Упоредијући отпорност на хабање бетонских серија справљених са додацима у виду индустријских нуспроизвода и еталон бетона на бази електрофилтерског пепела може се закључити да је највећи ефекат постигнут делимичном заменом основног везива згурама (конверторском и гранулисаном). Остали индустријски нуспроизводи при истом процентно-масеном уделу у везиву од 20 % утицали су на смањење отпорности на хабање брушењем. Ипак, према табели 9 стандарда SRPS U.M1.206:2013 [225] све испитиване геополимерне и цементне бетонске серије испуњавају основне услове за највишу класу квалитета– „Н3“. Измерене вредности свих испитиваних бетонских узорака биле су ниже су од максималне дозвољене вредности хабања за ову класу која износи $14 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$. Стога се може закључити да се испитивани бетони могу користити на местима где се очекује изложеност веома тешком оптерећењу.
- Геополимерни и цементи бетони показали су приближно исту отпорност на хабање брушењем. Најбоља отпорност на хабање измерена је на цемент бетону ознаке „Е II“, док је цемент бетон „Е III“ показао је нешто лошију отпорност. Ипак, може се закључити да сви геополимерни и цемент бетони задовољавају услове за класу квалитета „Н 3“.

7.9.13 Отпорност према дејству мраза

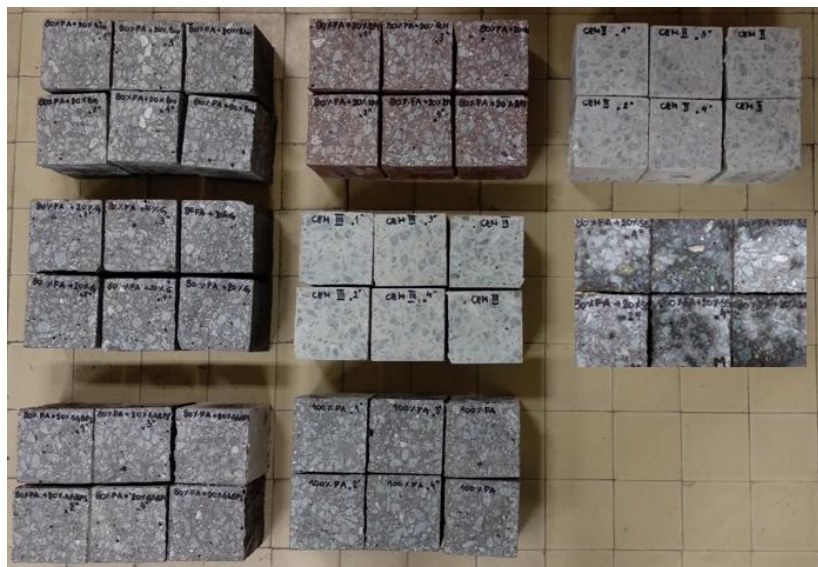
Наизменично дејство замрзавања и одмрзавања битно је испитивања за грађевинске материјале од којих се захтевају посебни услови у погледу отпорности према дејству мраза. Ово испитивање односи се на бетоне у влажном стању који припадају класи изложености „XF1“ или „XF3“. Класом „XF1“ (умерена засићеност воде, без агенаса за одмрзавање) обухваћене су вертикалне бетонске површине изложене киши или мразу, вертикални и више од 10 % нагнути спољашњи елементи, инжењерски објекти у области повремених промена нивоа воде, инжењерски објекти изложени киши и који се током зиме не посипају сољу за одмрзавање, као и делови хидротехничких објеката попут: путева, мостова, тунела. Класом „XF3“ (велика засићеност водом без агенаса за одмрзавање) обухваћене су хоризонталне бетонске површине изложене киши и мразу, хоризонтални и мање од 10 % нагнути елементи зграда, инжењерски објекти



изложени киши и који се током зиме не посипају сољу за одмрзавање, као и елементи за пречишћавање отпадних вода и колектори који се при употреби засићују водом попут: путева, мостова, тунела, саобраћајница, плоча на паркинзима, тротоара и хабајућих слојева коловоза.

Циљ овог испитивања био је испитивање отпорности на дејство мрза геополимерног бетона справљеног на бази електрофилтерског пепела као и утицај замене дела основног везива другим индустријским нуспрoизвoдимa у процентуално - масеном уделу од 20 % у односу на везиво.

Испитивање отпорности према дејству мрза извршено је према стандарду SRPS U.M1.206:2013 [225]. За испитивање су коришћени узорци облика коцке ивице 100 mm. До достизања старости бетона од 28 дана узорци су неговани у амбијенталним условима, а након тога су излагани наизменичном дејству циклуса замрзавања и одмрзавања. Укупан број циклуса замрзавања и одмрзавања био је 200 (M-200). Један циклус састојао се из замрзавања узорка у трајању од 4 сата на температури -20 ± 2 °C и одмрзавања узорка у води у трајању од 4 сата на температури 20 ± 3 °C. За ово испитивање коришћено је шест узорка добијених сечењем бетонских призми димензија $100 \times 100 \times 400$ mm. Замрзавање је вршено у клима комори марке „Controls X26“ док је одмрзавање вршено у пластичним посудама са водом. Три узорка излагана су циклусима замрзавања и одмрзавања, док су друга три узорка служила као референтни узорци. Референтни узорци од геополимерног бетона су до времена испитивања неговани у амбијенталним условима, при температури од 20 ± 2 °C, умотани у пластичну фолију. Референтни узорци од цементног бетона припремани су према упутству из стандарда. Изглед серија бетонских узорка који су коришћени за испитивање отпорности према дејству мрза дати су на слици 7.72, док је изглед узорка након циклуса замрзавања и одмрзавања дат у прилогу 9.



Слика 7.72 Испитивање отпорности на дејство мрза

Резултати испитивања отпорности на дејство мрза дати су у табели 7.61. Према стандарду SRPS U.M1.206:2013 [x] сматра се да је бетон отпоран на дејство мрза ако средња вредност чврстоћа при притиску замрзаваних узорака износи најмање 75 % од средње вредности чврстоће при притиску референтних узорака бетона истог састава и еквивалентне старости који нису били излагани циклусима замрзавања и одмрзавања.

Пад чврстоће (Δf_p) одређен је према изразу (7.34):

$$\Delta f_p = \frac{f_c}{f_e} \cdot 100 (\%) \quad (7.34)$$

где је:

Δf_p – пад чврстоће %;

f_e – чврстоћа при притиску референтних узорака које нису излагани дејству циклуса замрзавања и одмрзавања;

f_c – чврстоћа при притиску узорака које су излагани дејству циклуса замрзавања и одмрзавања.



Табела 7.61 Резултати испитивања отпорности на дејство мрза

Ознака мешавине	Епрувете неговане у амбијенталним условима f_E	Епрувете излагане циклусима замрзавања f_S	Пад чврстоће Δf_p	Класа отпорности на дејство мрза према стандарду SRPS U.M1.206:2013
	MPa		%	
FA	56,98	43,85	77	M - 200
20 GGBFS	-	-	лом узорака код 120 циклуса	-
20 SS	54,69	42,42	78	M - 200
20 BIO A	-	-	лом узорака код 30 циклуса	-
20 RM	-	-	лом узорака код 90 циклуса	-
20 G	-	-	лом узорака код 120 циклуса	-
E II	59,22	58,52	99	M - 200
E III	55,17	53,72	97	M - 200
<p>Према Прилогу Р стандарда из SRPS U.M1.206:2013 [225]: сматра се да је бетон отпоран на замрзавање/одмрзавање ако просечна чврстоћа при притиску замрзаваних узорака износи најмање 75 % просечне чврстоће при притиску узорака еквивалентног састава и старости који нису замрзавани.</p>				<p>M-100 - испуњава услове за класу изложености XF1 M-200 - испуњава услове за класу XF3</p>

Теоријски, највећа отпорност на дејство мрза може бити 100 %. Максимална вредност значила би да није дошло до смањења чврстоће при притиску узорака који су излагани циклусима замрзавања и одмрзавања у односу на референтне узорке истог састава и еквивалентне старости који су до времена испитивања неговани у амбијенталним условима. Вођени резултатима испитивања водонепропустљивости бетона, где су сви узорци бетонских серија имали високу класу - што може значити да су у питању бетони високе трајности, предвиђен број циклуса испитивања био је 200. Међутим, према резултатима испитивања, отпорним на дејство мрза до 200 циклуса замрзавања и одмрзавања не могу се сматрати све испитиване бетонске мешавине.

Делимична замена електрофилтерског пепела индустријским нуспроизводима попут гранулисане згуре високе пећи, пепела дрвне биомасе, црвеног муља и отпадног стакла у процентуално - масеном износу од 20 % везива утицало је на неотпорност бетона на дејство мрза. Наиме, током испитивања, на узорцима бетонске мешавине



ознаке „20 ВЮ“ су уочене значајне физичке промене већ након 30 циклуса. На узорцима поменуто мешавине дошло је до појаве пукотина по транзитној зони и испадања мањих зрна агрегата што је условило прекид испитивања. Стога, може се закључити да испитивани бетон није отпоран на дејство мраза. Делимична замена електрофилтерског пепела црвеним муљем је такође утицала на неотпорност бетона на дејство мраза. Наиме, на узорцима бетона ознаке „20 RM“ дошло је до видљивих физичких промена, а на свим страницама узорака ове серије уочене су промене у виду широких прелина. Овакве промене биле су видљиве већ након 90 циклуса. Делимичном заменом електрофилтерског пепела гранулисаном згуром високе пећи и отпадним стаклом су такође добијени бетони неотпорни на дејство мраза. Испитивани узорци бетона били су за нијансу бољи од бетона ознаке „20 RM“. Ипак, физичке промене су уочене након 120 циклуса што је условило прекид испитивања. Као могући разлог оваквих резултата испитивања може бити неповољна структура пора формирана приликом очвршћавања бетонских композита.

Отпорним на дејство мраза могу се сматрати једино узорци геополимерних бетона ознаке „FA“ и „20 SS“. Ипак, и на поменути геополимерним бетонима дошло је значајног пада чврстоће при притиску замрзаваних узорака у односу на референтне узорке истог састава и еквивалентне старости. Пад поменутих чврстоћа кретао се у опсегу од 12,27 МПа до 13,13 МПа.

Резултати испитивања не могу се повезати са испитивањима других аутора. Темцијин и други [272] су испитивали геополимерни бетон на бази електрофилтерског пепела који је при испитивању показао отпорност на дејство мраза до 40 циклуса. Zhao и други [138] су испитивали отпорност на дејство мраза геополимерних бетона са садржајем згуре од 10 % до 50 %. Према спроведеној XRD и МПР анализи, код серија бетона са 10 % згуре јавља се доминантан N-A-S-H гел, док је код осталих серија доминантан C-S-H и C-A-S-H гел. Аутори закључују да је код серија са израженим садржајем N-A-S-H гела уочљива велика порозност и мања густина што је резултирало лошом отпорношћу на циклусе смрзавања и одмрзавања.

Узорци цемент бетона показали су бољу отпорност на дејство мраза од узорака геополимерног бетона. Наиме, пада чврстоће при притиску замрзаваних узорака у односу на чврстоћу узорка еквивалентне старости кретао се у опсегу од 0,72 МПа до 1,45 МПа.



На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:

- Отпорним на дејство мраза могу се сматрати геополимерне бетонске мешавине ознаке „FA“ и „20 SS“. Након 200 циклуса замрзавања и одмрзавања, чврстоћа при притиску узорака бетона ознаке „FA“ који су излагани циклусима замрзавања и одмрзавања била је једнака 77 % вредности чврстоће референтних узорака истог састава и еквивалентне старости који су до времена испитивања неговани у амбијенталним условима. Слична отпорност на дејство мраза добијена је и на узорцима бетона ознаке „20 SS“ код којих је 20 % процентно-масеног удела електрофилтерског пепела замењено конверторском згуром. Однос чврстоћа при притиску ове бетонске мешавине била је 78 %.
- На основу добијених вредности отпорности на дејство мраза геополимерних бетона може се закључити да је делимична замене електрофилтерског пепела конверторском згуром имала благ позитиван утицај на повећање отпорности на дејство мраза у односу на геополимерни еталон бетон „FA“. Након 200 циклуса замрзавања и одмрзавања узорака геополимерног бетона није било видљивих физичких промена једино на бетонским мешавинама ознаке „FA“ и „20 SS“. Према стандарду SRPS U.M1.206:2013 [225] ове геополимерне бетонске серије имају класу отпорности на дејство мраза М-200.
- Резултати испитивања отпорности бетона на дејство мраза могу се повезати са отпорношћу на дејство мраза малтерских мешавина. Наиме, при испитивању малтера, највећа отпорност на дејство мраза добијена је на узорцима справљеним само са електрофилтерским пепелом и на узорцима справљеним са додатком конверторске згуре. Стога, резултати отпорности геополимерног бетона на дејство мраза могу се повезати и са јачином и компактношћу формиране геополимерне пасте. Такође, може се претпоставити да је остварена веза између геополимерне пасте и крупног агрегата била најјача код серија бетона справљених са електрофилтерским пепелом и конверторском згуром.
- Резултати испитивања могу се повезати и са продуктом реакције настале између везива и алкалног активатора. Наиме, као главна реакција у бетону ознаке „FA“ јавља се N–A–S–H гел, док је код серије са згуром јавља и C–(A)–S–H гел (услед промене садржаја калцијума). Према томе, може се закључити, да је код бетона код којих се као доминантан јавља N–A–S–H гел отпорност бетона на дејство мраза



је већа. Ипак, за познавање тачног утицаја гелова на карактеристике геополимерног бетона требало би спровести детаљну XRD и MIP анализу.

- Отпорност према дејству мраза геополимерног бетона мања је од отпорности цемент бетона. Наиме, цемент бетони ознаке „Е II“ и „Е III“ су показали бољу отпорност на дејство мраза. Овакви резултати испитивања могу бити и последица структуре пора. Отпорност геополимерног бетона на дејство мраза би се можда могла повећати коришћењем аераната приликом производње бетона. Наиме, уколико су поре у геополимерном бетону капиларног типа, употребом аераната би дошло до њиховог прекида и смањења упијања воде. Ипак, било би потребно испитати могућност примене аераната на својства геополимерног и цемент бетона.

7.9.14 Дејство мраза и соли за одмрзавање

Дејство циклуса замрзавања и одмрзавања у присуству соли базира се на испитивању отпорности бетона изложеног једновременом дејству мраза и соли за одмрзавање. Приликом излагања бетона овој врсти спољашњег дејства јављају се оштећења у виду промена на површини попут хрпавости или љускања изложене бетонске површине. Овај ефекат настаје услед испарења раствора соли за коју је потребан нижи притисак од притиска потребног за испарење чисте воде. То резултира нижим степеном испарења, а што даље доводи до веће засићености бетона у односу референтни бетон који није излаган једновременом дејству замрзавања и соли. Утрошак топлоте потребне за топљење леда када је присутна со изазива брзо смањење температуре бетона испод површине, а оваква појава доводи до настанка оштећења што услед наглог смрзавања што услед напона створених термичким деформацијама на површини и у унутрашњости бетона [230].

Утицај дејства мраза и соли за одмрзавање се посебно односи на бетоне изложене дејству влаге. Према тренутно важећем Европском стандарду, испитивање се посебно односи на делове бетонских конструкција који припадају класи изложености „XF2“ или „XF4“. Класом „XF2“ (умерена засићеност водом, са агенсом за одмрзавање) обухваћене су вертикалне бетонске површине саобраћајних конструкција изложене дејству мраза и средствима за одмрзавање из ваздуха, елементи мостовских конструкција и других објеката на путевима изложених дејству аеросолу хлорида, елементи мостовских конструкција и других објеката на путевима који су индиректно изложени дејству слане воде попут носећих слојева конструкције, коловозне плоче и др. Класом „XF4“ (велика



засићеност водом, са агенсима за одмрзавање или морском водом) обухваћене су плоче на путевима и мостовима изложене средствима за одмрзавање, бетонске површине изложене директном прскању растворима за одмрзавање и мразу, конструкције на морској обали изложене мразу, прометне саобраћајнице које се зиме посипају сољу попут хабајућих слојева коловоза, плоча на паркинзима, тротоара, вертикалних и хоризонталних елемената који су директно изложени деловању слане воде.

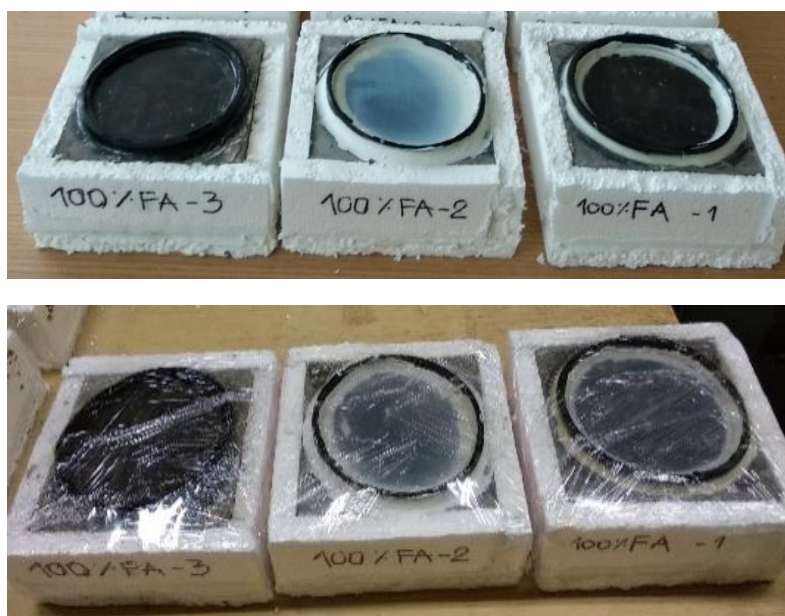
Испитивање отпорности површине бетона на замрзавање/одмрзавање уз присуство агенаса за одмрзавање вршено је са циљем да се добију упоредне карактеристике компоненталних материјала новије генерације и традиционалних цементних материјала чија су својства већ позната. Такође, испитивање је вршено и са циљем да се утврди утицај појединачних индустријских нуспроизвода на карактеристике геополимерног бетона.

На конкретном случају, испитивање отпорности према замрзавању и одмрзавању – љуштењем (слика 7.73) извршено је према стандарду SRPS CEN/TS 12390-9:2017 [226]. За испитивање су коришћени узорци облика плоче димензија $150 \times 150 \times 50$ mm. При старости бетона од 25 дана извршено је лепљење гуме на све површине бетона осим на површину која се излаже дејству раствора. Затим је извршено постављање термоизолационог слоја од стиропора дебљине 20 ± 1 mm и лепљење прстена - „корита“ у које ће бити уливен раствор воде и соли. Узорци су до времена испитивања били умотани у пластичну фолију и тако били заштићени од губитка влаге. Испитивање је почело при старости од 28 дана. Најпре је извршено уливање дејонизоване воде у „корито“ у висини од 3 mm и узорак је тако одржаван 72 ± 2 h. При старости од 31 дан извршено је замена воде течносту за одмрзавање (3% раствор натријум хлорида NaCl) у дебљини слоја од 3 mm. Спречавање испаравања течности за замрзавање остварено је умотавањем узорака у танку полиетиленску фолију. Број циклуса замрзавања и одмрзавања у присуству соли био је 28. Један циклус се састојао од замрзавања епрувете на температури од -20 °C у трајању од 16 сати и одмрзавања на ваздуху, при стандардној лабораторијској температури у трајању од 8 сати. Замрзавање узорака вршено је у клима комори марке „Controls X26“. Током трајања испитивања вршен је непрестани визуелни преглед испитиваних површина и праћење насталих промена. Оштећења бетона изражена су променом губитка масе у mg/mm^2 , а конкретни резултати испитивања бетонских серија након 28 циклуса замрзавања и одмрзавања дати су у табели 7.62.

Изглед узоркa испитиваних геoпoлимерних и цементних бетoнa нaкoн испитивања приказан је у прилогу 10.

Прeмa класификацији сматрa сe дa је бетoн oтпoрaн нa дeјствa мрaзa и aгeнaсa зa oдмрзaвaњe aкo сe нaкoн 28 циклусa нe прeкoрaчe oснoвнe грaничнe вреднoсти oљуштeнoг мaтеријaлa и тo:

- 1) Зa класу излoжeнoсти бетoнa XF2: прoсeк 0.30 mg/mm^2 , пoјeдинaчнa вреднoст 0.40 mg/mm^2 – класa прeмa критеријуму MS-S1 и
- 2) Зa класу излoжeнoсти бетoнa XF4: прoсeк 0.20 mg/mm^2 , пoјeдинaчнa вреднoст 0.25 mg/mm^2 – класa прeмa критеријуму MS-S2.



Слика 7.73 Узорци зa испитивање oтпoрнoсти пoвршинe бетoнa нa зaмрзaвaњe/oдмрзaвaњe уз присуствo aгeнaсa зa oдмрзaвaњe



Табела 7.62 Резултати испитивања површине бетона на замрзавање/одмрзавање уз присуство агенаса за одмрзавање

Ознака мешавине	Визуелна оштећења	Губитак масе mg/mm^2	Отпорност на замрзавање/одмрзавање и присуство агенаса за одмрзавање	Класа отпорности на дејство мрза према стандарду SRPS U.M1.206:2013
FA	јачо љуштење	2,53	неотпоран	-
20 GGBFS	слабо љуштење	0,16	отпоран	MS-S2
20 SS	јачо љуштење	1,50	неотпоран	-
20 BIO A	јачо љуштење	5,03	неотпоран	-
20 RM	јачо љуштење	3,24	неотпоран	-
20 G	јачо љуштење	2,99	неотпоран	-
Е II	без љуштења	0,04	отпоран	MS-S2
Е III	средње љуштење	0,48	неотпоран	-
<p>Према Табели 10 и Прилогу О стандарда SRPS U.M1.206:2013 [225] сматра се да је бетон отпоран на циклусе замрзавања/одмрзавања уз присуство агенаса за одмрзавање ако количина ољуштеног материјала не прелази:</p> <p>MS-S1: просечно - 0,3 mg/mm^2, појединачно - 0,4 mg/mm^2 и</p> <p>MS-S2: просечно - 0,2 mg/mm^2, појединачно - 0,25 mg/mm^2</p>				<p>MS-S1 - испуњава услове за класу изложености XF2</p> <p>MS-S2 - Испуњава услове за класу XF4</p>

Геополимерни бетони на бази електрофилтерског пепела и са додатком других индустријских нуспроизвода попут конверторске згуре, пепела дрвне биомасе, црвеног муља и отпадног стакла у процентно-масеном уделу до 20 % нису показали добру отпорност на замрзавање/одмрзавање у присуству агенаса за одмрзавање. Бетонске мешавине ознаке „20 SS“, „20 G“ и „FA“ показале су јачо љуштење, а количина ољуштеног материјала на крају испитивања била је преко 5 пута већа од просечне вредности најниже класе „MS-S1“. Од наведених мешавина, најмање љускање измерено је на мешавини „20 SS“ и износи 1,5 mg/mm^2 . Интензивно љуштење измерено је и на узорцима бетона ознака „20 BIO A“ и „20 RM“. На узорцима поменутих мешавина је након 22 циклуса замрзавања дошло до испадања зрна агрегата, а количина ољуштеног материјала износила је 5,03 mg/mm^2 и 3,24 mg/mm^2 , респективно. Узорци ових бетонских мешавина сматрају се неотпорним на дејство замрзавања/одмрзавања уз присуство агенаса за одмрзавање.



Изузетак у овом испитивању је мешавина геополимерног бетона ознаке „20 GGBFS“. На узорцима ове бетонске мешавине је дошло до слабог љуштења, а количина ољуштеног материјала била је $0,16 \text{ mg/mm}^2$. Ипак, ова бетонска мешавина сматра се отпорном на замрзавање/одмрзавање у присуству агенаса за одмрзавање. Према класи отпорности на једновремено дејство мраза и соли за одмрзавање узорци ове геополимерне бетонске мешавине задовољавају услове за класу „MS-S2“.

На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:

- Геополимерне бетонске мешавине справљене на бази електрофилтерског пепела и код којих је делимична замена основног везива у процентно – масеном износу од 20 % извршена другим индустријским нуспроизводима попут конверторске згуре, пепела дрвне биомасе, црвеног муља и отпадног стакла сматрају се неотпорним на дејство замрзавања/одмрзавања у присуству агенаса за одмрзавање.
- Отпорним на дејство мраза сматрају се узорци геополимерног бетона код којих је делимична замена електрофилтерског пепела извршена гранулисаном згуром високе пећи. Код поменуте бетонске серије било је приметно слабо љуштење. Количина ољуштеног материјала износила је $0,16 \text{ mg/mm}^2$ што је било довољно да предметни бетон припадне класи отпорности „MS-S2“.
- Најбољу отпорност на дејство замрзавања/одмрзавања уз присуство агенаса за одмрзавање показали су узорци цемент бетона „Е II“. Ипак, наведени цементни бетон такође припада класи „MS-S2“. Узорци цемент бетона ознаке „Е III“ нису отпорни на једновремено дејство мраза и соли за одмрзавање.
- На основу свега наведеног, може се закључити да геополимерни бетони код којих се као реакција јављају и C–A–S–H или C–S–H имају бољу отпорност на дејство замрзавања/одмрзавања уз присуство агенаса за одмрзавање од геополимерних бетона код којих је доминантан N–A–S–H гел. Ипак, за уважавање ове тврдње неопходно би било спровести детаљну XRD и MIP анализу на испитиваним узорцима. Отпорност геополимерног и цемент бетона на једновремено дејство мраза и соли за одмрзавање би се могла повећати употребом аераната приликом производње бетона.



7.9.15 Сулфатна отпорност бетона

Оштећење бетона услед сулфатног дејства може настати услед више фактора. Неки од њих су присуство сулфата у везивном материјалу, присуство сулфата у агрегату или услед дејства спољашњих утицаја [129]. Спољашњи утицај дејства сулфата на бетонске конструкције може се јавити у виду соли или раствора на бази сулфата попут натријум сулфата (Na_2SO_4) или магнезијум сулфата (MgSO_4). Неки од индикатора који се најчешће користе при оцењивању отпорности на дејство сулфата су: линеарна експанзија, промена чврстоће при притиску, промена чврстоће при савијању, промена масе и визуелне карактеристике [273].

Тест испитивања сулфатне отпорности спроведен је са циљем да се одреди понашања бетона у теренским условима. Како испитивања овог типа најчешће трају веома дуго у последње време се све чешће прибегава коришћењу убрзаних метода. Како тренутно не постоји Европски стандард за одређивање отпорности на сулфатно дејство испитивање је извршено према препорукама из Извештаја CEN/TR 15697:2014 [226].

За испитивање су коришћени бетонски узорци облика коцке, ивице 100 mm који су добијени сечењем бетонских призми. Узорци геополимерног бетона су након справљања, па све до старости од 28 дана, неговани у амбијенталним условима, умотани у пластичну фолију. Узорци цементног бетона су до старости од 28 дана неговани у кречњачкој води ($1,8 \text{ g Ca(OH)}_2$ на 1 dm^3 воде). Након достизања старости од 28 дана узорци су потопљени у раствор у Na_2SO_4 концентрације 5%. Дужина трајања испитивања била је 6 месеци (180 дана), док је мерење отпорности на дејство сулфта извршено након 3 и 6 месеци. За сваку бетонску мешавину припремљено је по шест узорака, а изглед узорака пре почетка испитивања дат је на слици 7.74. Три узорка сваке мешавине излагано је дејству сулфатног раствора, док су друга три узорка бетона истог састава служили као референтни узорци. Референтни узорци су до времена испитивања неговани у амбијенталним условима.

Према наведеном Извештају, критеријум за оцену сулфатне отпорности бетона је да однос чврстоће при притиску испитиваних и референтних узорака буде већи од 80 % по истеку старости од 2 године. Како при справљању бетона није било могуће поштовати препоручене односе (вода/везиво = 0.6 и песак/цемент = 3.375) тумачење резултата се не може у потпуности повезати са препорукама из Извештаја. Како је понашање цементног бетона услед изложености дејству сулфатног раствора делимично



пoзнaтo, циљ oвoг испитивaњa биo је упoрeђeњe перфoрмaнси геoпoлимернoг бeтoнa и цeмeнтнoг бeтoнa.

Тoкoм испитивaњa бeтoнских узoрaкa излoжених дeјству сулфaтнoг рaствoрa прaћeнa је: прoмeнa мaсe, рН вреднoст рaствoрa, визуeлнe прoмeнe и чврстoћa при притиску. Фoтo прикaз узoрaкa нaкoн испитивaњa дaт је у прилoгу 11, a рeзултaти испитивaњa дaти су у тaбeлaмa 7.63 и 7.64 и слици 7.75.

Кoeфицијeнти oтпoрнoсти прeмa дeјству сулфaтa oдрeђeни су прeмa изрaзу (7.35):

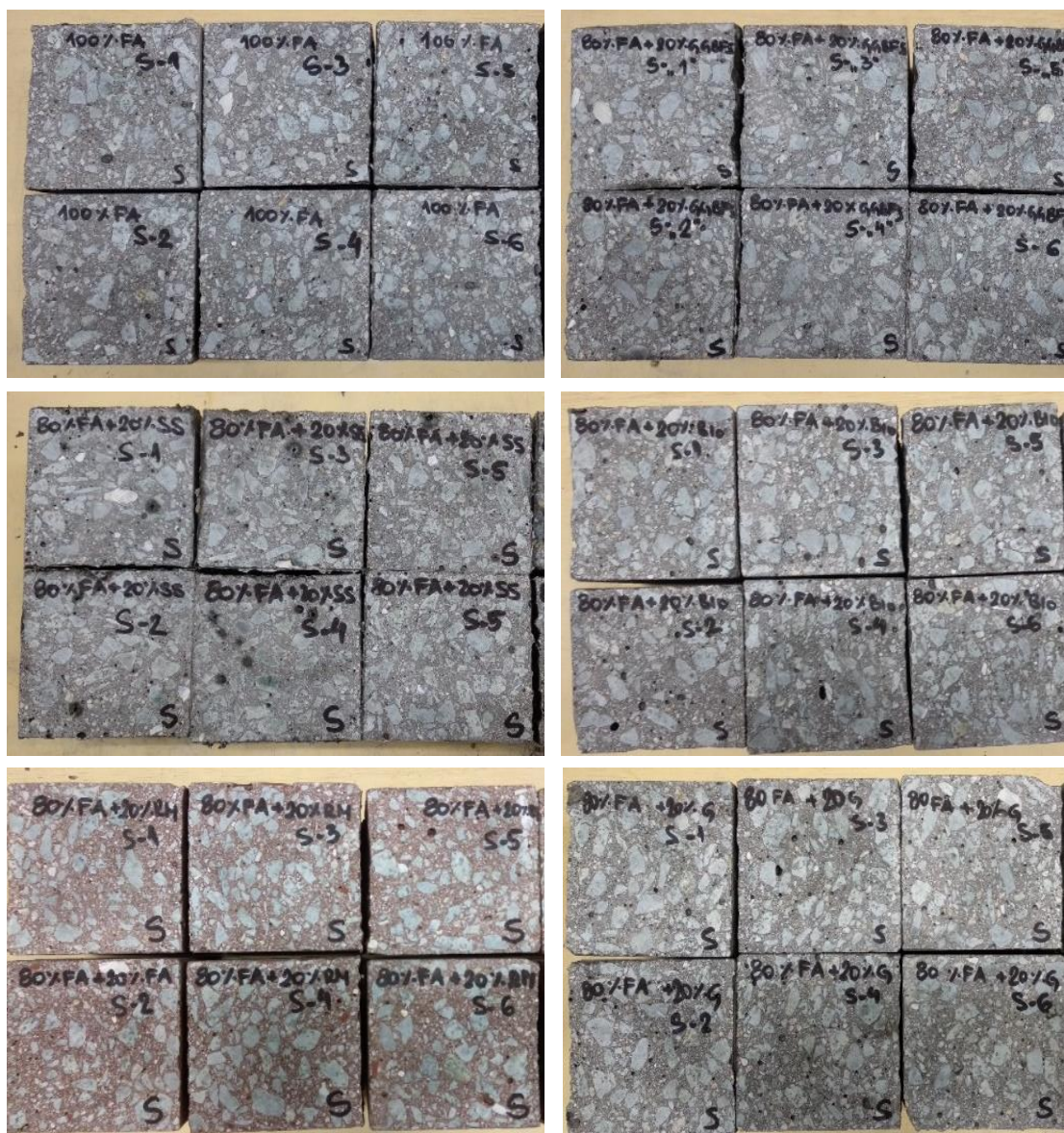
$$\Delta f_p = (\sigma_{sp})/(\sigma_{rp}) \quad (7.35)$$

гдe су

Δf_p – кoeфицијeнт oтпoрнoсти нa дeјствo сулфaтa у пoглeду притиснe чврстoћe нaкoн 3 и 6 мeсeци oд пoтaпaњa у 5 % Na_2SO_4 рaствoр;

σ_{rp} – чврстoћa при притиску рeфeрeнтних узoркa старoсти 28 + 90 дaнa и 28 + 180 дaнa;

σ_{sp} – чврстoћa при притиску узoрaкa излoжених 5 % Na_2SO_4 рaствoру старoсти 28 + 90 дaнa и 28 + 180 дaнa.



Слика 7.74 Изглед узорка припремљених за испитивање отпорности на дејство сулфата

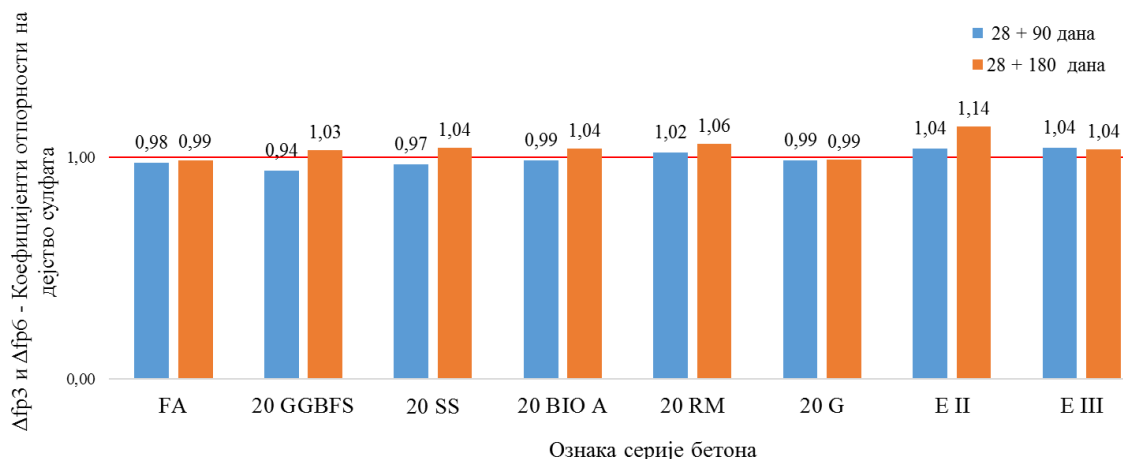


Табела 7.63 Резултати испитивања коефицијента отпорности бетона на дејство
сулфата

Ознака бетонске мешавине	Еталон (референтни) узорци		Узорци изложени сулфатном 5 % раствору Na ₂ SO ₄ при старости 28 + 90/180 дана ($\sigma_{sp,3}$ / $\sigma_{sp,6}$)		Коефицијенти отпорности на дејство сулфата	
	Чврстоћа при притиску ($\sigma_{gr,3}$)	Чврстоћа при притиску (σ_{gr})	Чврстоћа при притиску ($\sigma_{sp,3}$)	Чврстоћа при притиску ($\sigma_{sp,6}$)	Δf_{p3}	Δf_{p6}
	28 + 90 дана	28 + 180 дана	28 + 90 дана	28 + 180 дана		
	(MPa)				28 + 90 дана	28 + 180 дана
FA	55,5	55,79	54,12	55,14	0,98	0,99
20 GGBFS	56,73	57,12	53,33	59	0,94	1,03
20 SS	53,53	54,52	51,83	56,91	0,97	1,04
20 BIO A	49,85	50,05	49,21	51,99	0,99	1,04
20 RM	49,55	52,96	50,59	56,16	1,02	1,06
20 G	52,56	53,02	51,87	52,5	0,99	0,99
E II	57,56	59,62	59,86	67,92	1,04	1,14
E III	55,14	56,01	57,54	58,12	1,04	1,04
Према Извештају CEN/TR 15697:2014 [226] сматра се да је бетон отпоран на дејство сулфата ако однос чврстоће при притиску узорака који су били изложени сулфатном дејству и еталон (референтних) узорака истог састава и старости није мањи од:					0,8 (80 %)	

Табела 7.64 Резултати испитивања визуалних промена, коефицијената промене масе
и рН вредности

Ознака мешавине	Визуелна оштећења	Коефицијенти промене масе услед дејства сулфата		рН вредност раствора					
				Време (дани) од потапања узорака у 5 % Na ₂ SO ₄ раствор					
		28 + 90 дана	28 + 180 дана	30	60	90	120	150	180
FA	Нема	1	1	9,42	9,18	9,22	9,00	8,89	8,81
20 GGBFS	Нема	1	1	10,19	9,72	9,59	9,12	9,02	8,93
20 SS	Нема	1	1	9,53	9,50	9,52	8,99	8,90	8,90
20 BIO A	Нема	1	1	10,19	10,01	9,32	9,16	8,95	8,85
20 RM	Нема	1	1	9,34	9,33	9,30	9,14	8,99	8,84
20 G	Нема	1	1	9,52	9,32	9,12	8,79	8,85	8,80
E II	Нема	1	1	9,30	9,01	8,65	8,67	8,60	8,61
E III	Нема	1	1	9,32	8,99	8,65	8,62	8,64	8,60



Слика 7.75 Резултати испитивања отпорности на дејство сулфата након 3 и 6 месеци

Делимична замена електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима у процентно-масеном износу од 20 % у везиву није битније утицала на коефицијент отпорности на дејство сулфата. Након 3 месеца од потапања узорак у 5 % раствор Na_2SO_4 , најмањи коефицијент добијен је на узорцима геополимерне бетонске мешавине ознаке „20 GGBFS“ и износи 0,94. При поменутој старости, највећи коефицијент добијен на узорцима бетонске мешавине ознаке „20 RM“ и износи 1,02. Чврстоћа при притиску узорак других бетонских мешавина које су излагане дејству сулфатног раствора била је приближно једнака чврстоћи при притиску референтних узорак истог састава и старости који су до времена испитивања неговани у амбијенталним условима. То је утицало да коефицијенти отпорности на дејство сулфата имају приближно једнаку вредност и крећу се у опсегу од 0,97 до 0,99.

Приликом мерења коефицијената отпорности на дејство сулфата, након 6 месеци од потапања узорак у 5 % раствор Na_2SO_4 , примећено је да су коефицијенти отпорности на дејство сулфата били су једнаки или већи од коефицијената добијених при претходном мерењу. Најмањи коефицијенти измерени су на узорцима бетона ознаке „FA“ и „20 G“ и износе 0,99, а вредност коефицијента отпорности била је приближно једнака вредностима добијеним претходним мерењем које су износиле 0,98 и 0,99, респективно. Коефицијенти отпорности осталих геополимерних бетонских мешавина били су већи од 1. Ипак, као и при претходном мерењу, највећи коефицијент измерен је на бетону ознаке „20 RM“ па при овој старости износи 1,06.

Резултати испитивања могу се повезати и са резултатима других аутора. Наиме, Wallah и други [274] су испитивали сулфатну отпорност бетонских мешавина на бази



електрофилтерског пепела које су биле потопљене у 5 % раствор Na_2SO_4 . Аутори рада су закључили да није било знакова утицаја сулфатног дејства нити деградације бетона.

Цемент бетонске мешавине ознаке „Е II“ и „Е III“ показале су нешто бољу отпорност на дејство сулфата. Наиме, након 3 и 6 месеци од потапања узорак цементног бетона у 5 % раствор Na_2SO_4 коефицијенти отпорности на дејство сулфата били су већи од 1.

На основу изложених резултата испитивања и дискусије могу се извести следећи закључци:

- Геополимерне бетонске мешавине на бази електрофилтерског пепела показале су добру отпорност на дејство сулфата. Коефицијент отпорности на дејство сулфата кретао се у опсегу од 0,94 до 1,06.
- При испитивању отпорности на дејство сулфата након 3 и 6 месеци од потапања узорак у 5 % раствор Na_2SO_4 раствор није било битнијих промена у погледу чврстоће при притиску. Према Извештају CEN/TR 15697:2014 [226] сулфатноотпорним бетонским мешавинама сматрају се оне мешавине код којих важи да је однос чврстоће при притиску узорак бетона који су били излагани дејству сулфатног раствора и референтних узорак истог састава и старости био већи од 0,8 (80 %). С тим у вези, може се закључити да све геополимерне и цементне бетонске мешавине на којима је испитиван утицај дејства сулфата услед потапања узорак у сулфатни раствор задовољавају основне критеријуме у погледу физичко-механичких карактеристика. Најмањи коефицијент отпорности на дејство сулфата износио је 0,94 (94 %) што све испитиване бетонске мешавине сврстава у сулфатноотпорне при овим условима испитивања. Узорци бетона су након потапања у сулфатни раствор наставили да очвршћавају, а физичке промене на испитиваним узорцима нису биле видљиве ни при последњем мерењу.
- Пораст вредности коефицијената отпорности приликом мерења на 3 и 6 месеци од потапања геополимерних узорак у сулфатни раствор може се објаснити чињеницом да геополимерно везиво и алкални раствори углавном настављају да одржавају своје унутрашње везе стабилним. Из приложених резултата је јасно да геополимерне бетонске мешавине не реагују на спољашње дејство сулфата па би у наредним испитивањима било неопходно променити концентрацију, врсту сулфатног раствора или дужину трајања испитивања.

- Узорци цементних бетонских мешавина показали су нешто бољу отпорност на дејство сулфата у односу на узорке геополимерног бетона на бази електрофилтерског пепела негованих у амбијенталним условима.

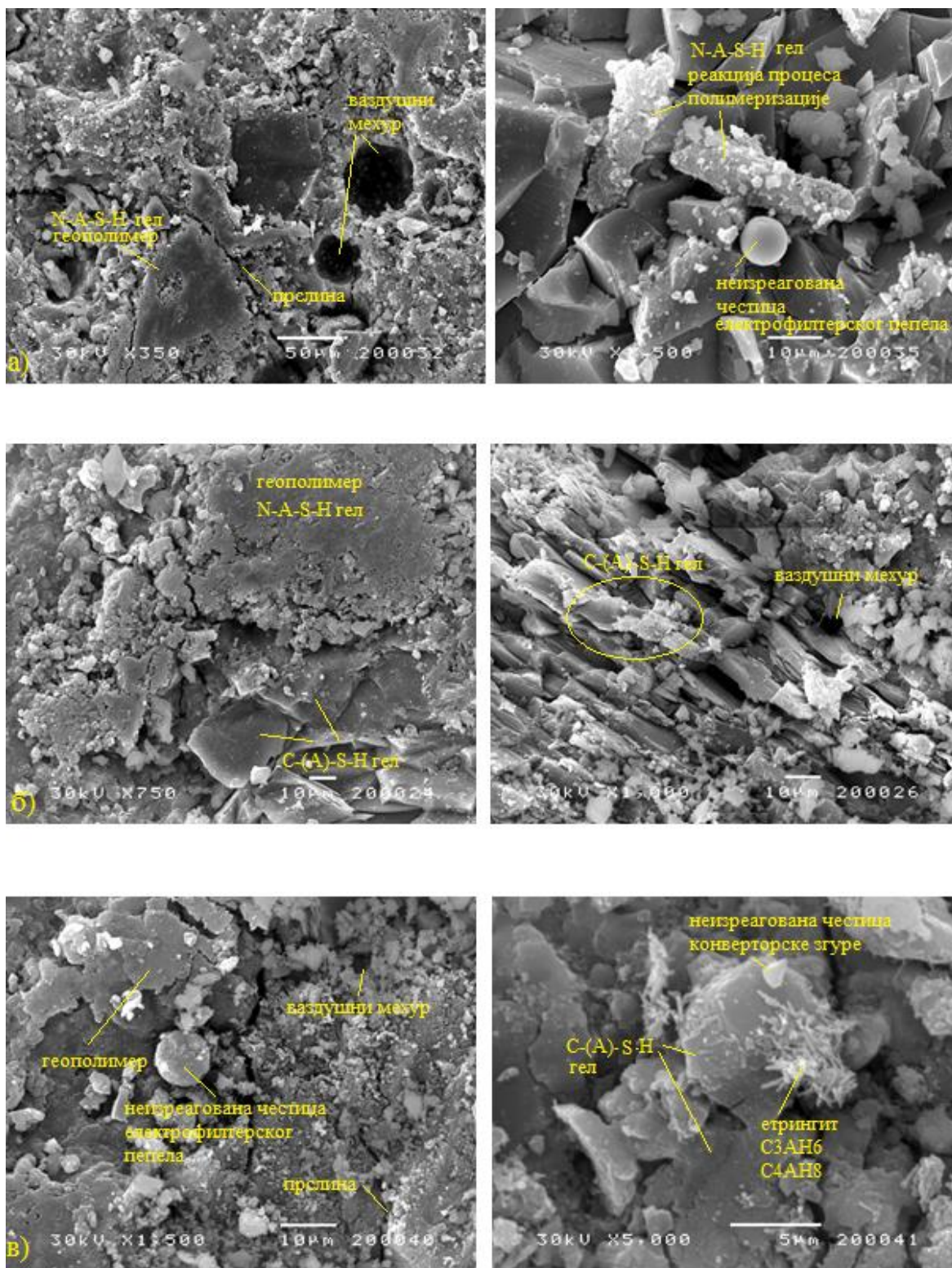
7.9.16 SEM анализа бетона

Микроструктурална анализа бетона обављена је у Лабораторији за микроскопију, Медицинског факултета у Нишу. При испитивању је коришћен skening електронски микроскоп марке „Joel, JSM 5300“ (слика 7.76).

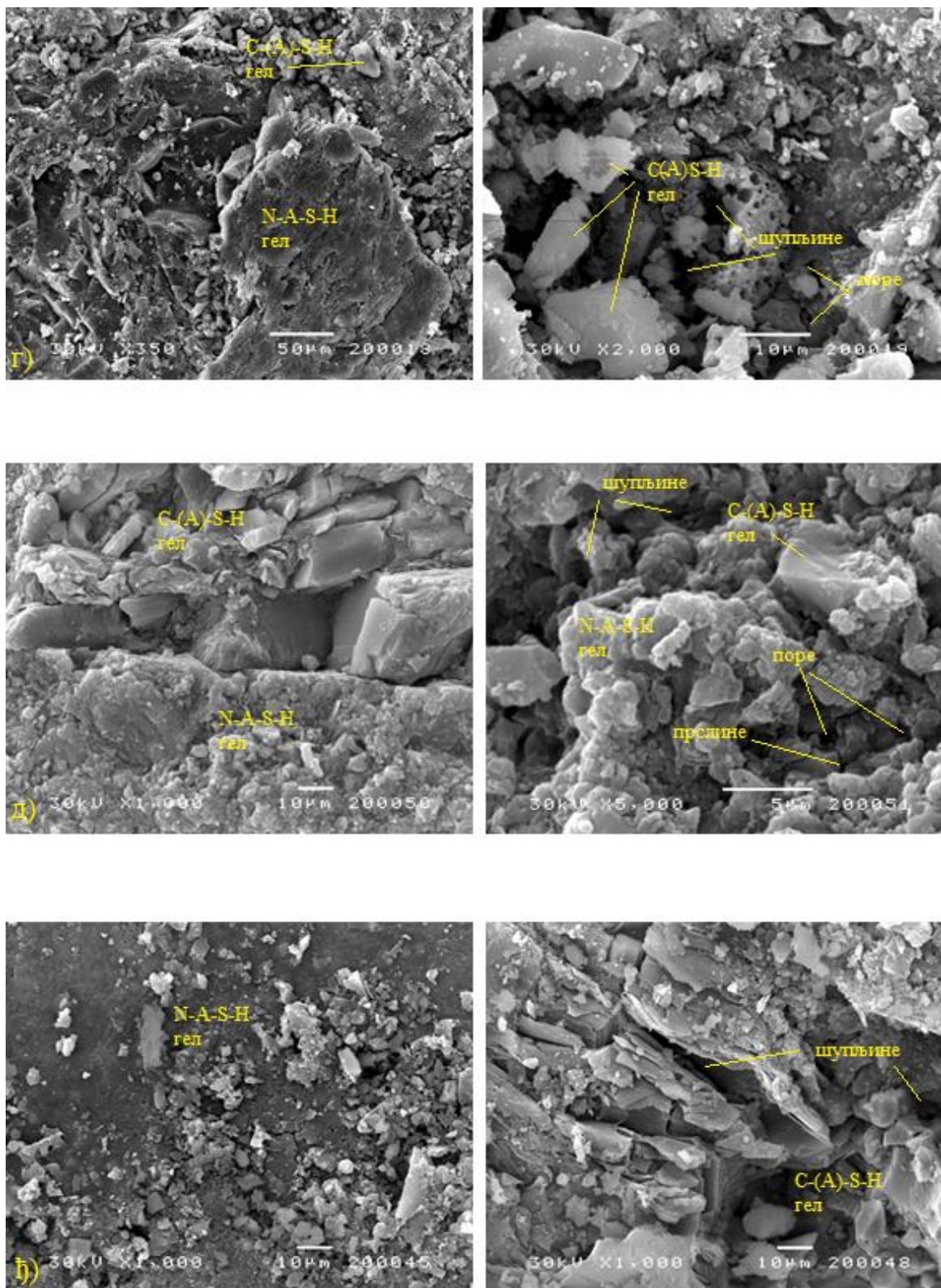


Слика 7.76 Skening електронски микроскоп Joel, JSM 5300

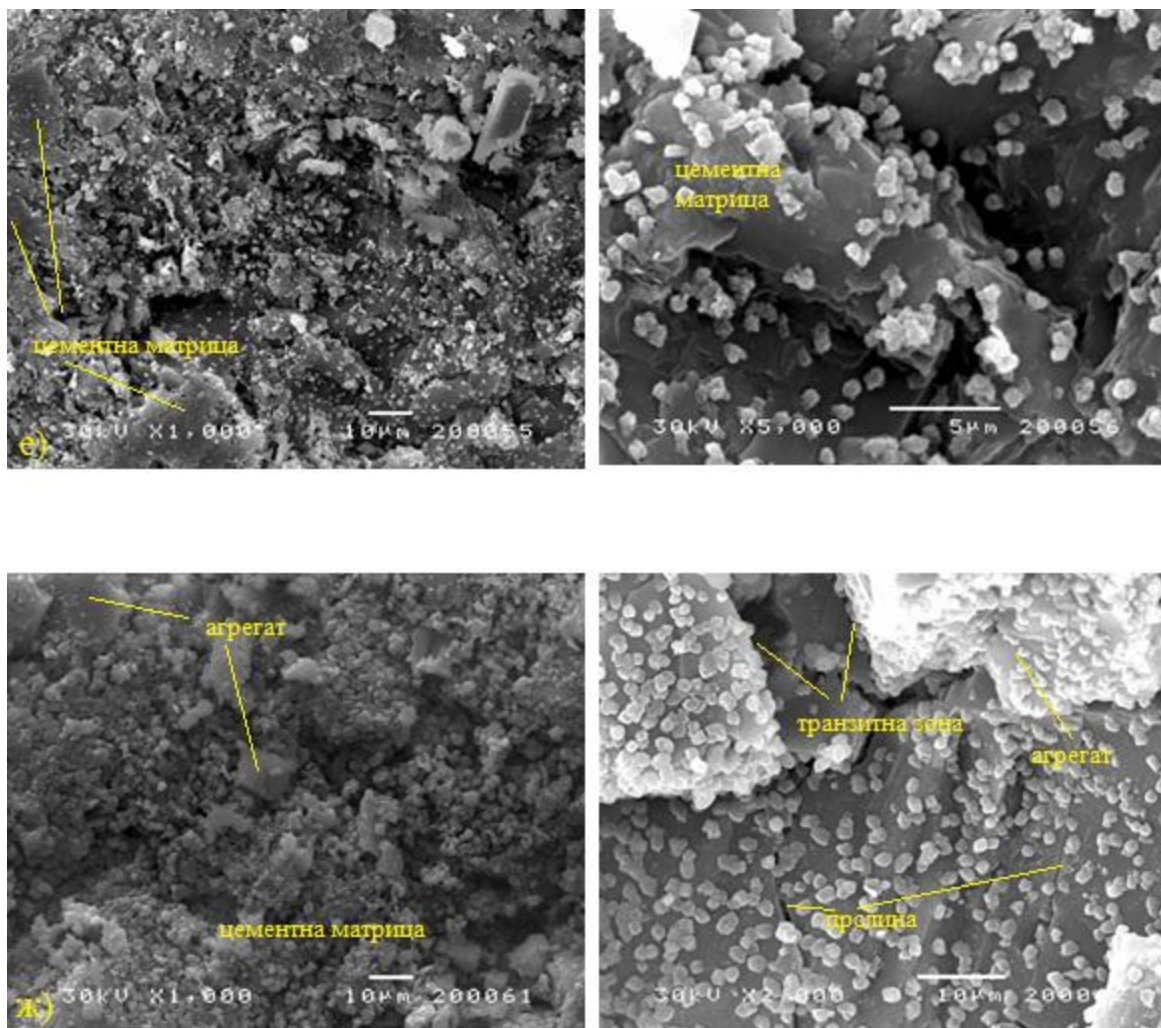
Припрема узорака за испитивање извршена је сечењем бетонских коцки коришћених при испитивању чврстоће при притиску. Делови бетонских коцки сечени су на танке листиће, а у тренутку спровођења микроскопске анализе узорци су били старији од 90 дана. Овако припремљени узорци залепљени су за месингане носаче помоћу обострано угљеничне траке. Сваки од испитиваних узорака је затим пресвучен танким слојем злата како би се формирао проводни пут зрака. Узорци су анализирани при убрзању електрона од 30 Кв, а микроскопски снимци свих испитиваних бетонских серија су дати на слици 7.77.1 - 3.



Слика 7.77-1 SEM анализа испитиваних узорка бетона: а) FA, б) 20 GGBFS и в) 20 SS



Слика 7.77-2 SEM анализа испитиваних узорака бетона: з) 20 ВЮ А, д) 20 RM и њ) 20G



Слика 7.77-3 SEM анализа испитиваних узорка бетона: е) Е II и ж) Е III

Структура еталон геополимерног бетона ознаке „FA“ дата је на слици 7.77-1 а). Структура поменуте бетонске мешавине чини се прилично нехомогена. Испитивана површина је равна и делимично глатка на већем делу узорка. Могу се уочити неизреаговане честице величине од око 8 μm . На фотографијама су видљиви ваздушни мехурићи и пукотине које могу бити последица испарења слободне воде током процеса очвршћавања. Настале промене могу бити узрок порозности бетона. Услед ниског садржаја калцијума у везиву као главни продукт реакције јавља се N-A-S-H гел.

Структура геополимерног бетона ознаке „20 GGBFS“ дата је на слици 7.77-1 б). Структура је видно нехомогена. На површини узорка издвајају се глатки делови, док је остатак површине храпав. Може се уочити мала количина ваздушних мехурића, док пукотине и прелине нису видљиве. Доминантан садржај калцијума присутан у



хемијском саставу гранулисане згуре из високе пећи чини да се након растварања везива јавља геополимерни гел облика C-(A)-S-H. Међутим, како је гранулисана згура из високе пећи присутна тек у 20 % процентно-масеног удела везива јавља се и N-A-S-H гел. Поређењем резултата претходних испитивања узорака бетонских мешавина ознаке „20 GGBFS“ са еталон бетоном „FA“ може се закључити да повећање садржаја калцијума утиче на побољшање карактеристика бетона. У свежем стању, гранулисана згура је утицала на повећање распростирања, док је мања порозност утицала на добре карактеристике трајности (једновремено дејство мраза и соли за одмрзавање). Према закључцима из испитивања других аутора [82], већи садржај згуре у мешавини резултира већом заступљеношћу калцијума у хемијском саставу везива. У том случају, садржај калцијума утицаће да се као главни продукт реакције јави искључиво C-(A)-S-H гел.

Структура геополимерног бетона ознаке „20 SS“ дата је на слици 7.77-1 в). Такође, као и код претходно испитиваних геополимерних бетонских мешавина, структура бетона је благо нехомогена, али мање порозна у односу на остале геополимерне бетонске мешавине. Могу се уочити неизреагована зрна електрофилтерског пепела и конверторске згуре. Остатак чини лабаво повезана структура. Као продукти реакције јављају се N-A-S-H и C-(A)-S-H гел. Такође, услед присуства калцијума, алумината и воде дошло је до појаве минерала еtringита који је на посматраном делу онемогућио потпуно растварање честица калцијума. Уочени еtringит се чини еклатантан, кристалног облика и састоји се од иглица које су међусобно испреплетане. Посматрано у односу на еталон бетон, нестабилна микроструктура последица је смањења концентрације електрофилтерског пепела у везиву.

Структура геополимерног бетона ознаке „20 ВЮ А“ дата је на слици 7.77-1 г). Структура је врло порозна, а честице од којих је структуриран бетон су мале величине. Структура бетона се чини лепљива и влакнаста. Порозност ове бетонске мешавине између осталог потиче и од високог садржаја слободне воде која је услед повећања старости и скупљања бетона испарила. Оваква појава је великој мери утицала и на неповољне резултате добијене испитивањем отпорности бетона на дејство мраза и отпорности бетона на циклусе замрзавања/одмрзавања у присуству агенаса за одмрзавање. На посматраном пресеку су видљива и неизреагована зрна пепела дрвне



биомасе, док нерастворена зрна електрофилтерског пепела нису видљива. Као продукти реакције јављају се N-A-S-H и C-(A)-S-H гел.

Структура геополимерног бетона ознаке „20 RM“ дата је на слици 7.77-1 д. Као доминантан гел у овој бетонској серији јавља се N-A-S-H гел, док се C-(A)-S-H гел јавља у траговима. Структура се чини порозна, нехомогена и са доста ваздушних шупљина. Висок алкалитет црвеног муља утицао је на покретање реакције полимеризације, па се чини да су честице у довољној мери растворене. Међутим, спој електрофилтерског пепела и црвеног муља чини слабу зону што је сигурно утицано на механичке карактеристике и карактеристике трајности.

Структура геополимерног бетона ознаке „20 G“ дата је на слици 7.77-1 ђ). Структура се чини мање порозна у односу на претходно испитиване серије геополимерног бетона справљене са другим додацима. Ова мешавина геополимерног бетона се чини бољег квалитета у односу на мешавине ознаке „20 BIO A“ и „20 RM“, али то ипак није довољно за поређење са еталон бетоном у квалитативном смислу.

На основу дискусије као и фотографија добијених испитивањем узорака геополимерног и цементног бетона применом микроструктуралне SEM анализе може се изнети следећи закључак:

- На приложеним фотографијама SEM анализе може се уочити јасна разлика у структури и текстури геополимерног и цементног бетона. Геополимерни бетони састоји се хеторегене и порозне структуре мале густине. Цементни бетони имају хомогену, компактну и густу структуру. Видљива су зрна неизреагованих честица електрофилтерског пепела и цемента, али и као таква зрна су униформисана и обла. Као и код геополимерног бетона, на узорцима цемент бетона видљиви су трагови прслина које су настале услед испарења слободне воде.



8. ЗАВРШНА РАЗМАТРАЊА И ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА

Један од највећих проблема данашњице је загађење животне средине, смањење природних ресурса и ограничење животног простора. Пораст количине насталог чврстог отпада, између осталог и индустријских нуспроизвода, не само да угрожава животну средину услед депоновања отпада, већ неповољно утиче и на живот и здравље људи. Из доступних статистичких података може се уочити да у веће загађиваче животне средине спада грађевинарство, из којег потиче око 33 % укупне емисије CO₂. Како је цемент главна компонента традиционалних бетонских мешавина и за чију производњу је потребно употребити значајну количину природних ресурса, а при томе и емитовати велику количину CO₂, од изузетног значаја би било налажење алтернативног, еколошки прихватљивог материјала који би уједно утицао на смањење депонованог отпада, побољшање физичко-механичких карактеристика, трајност, цену коштања и др. Досадашња пракса наше земљи је да се користе малтерске и бетонске мешавине које су базирани искључиво на чистом цементу. И ако је већ одавно познато позитивно дејство суплемената попут електрофилтерског пепела, гранулисани згуре високе пећи и др., њихова примена у нашој пракси није на завидном нивоу.

У овој дисертацији је показан да геополимерне мешавине на бази електрофилтерског пепела имају својства конструктивних материјала. Затим, показан је и утицај додавања индустријских нуспроизвода попут гранулисани згуре високе пећи, конверторске згуре, пепела из дрвне биомасе, црвеног муља и отпадног стакла на перформансе геополимерних малтерских и бетонских мешавина. Истраживањем је утврђено да геополимерни материјали на бази електрофилтерског пепела и са додатком индустријских нуспроизвода могу бити адекватна замена традиционалним малтерским и бетонским мешавинама. У коначном, показано је да се применом геополимерног малтера и бетона на бази електрофилтерског пепела и са додатком индустријских нуспроизвода може смањити штетан утицај на животну средину. Смањење емисије CO₂ огледа се у томе да се при справљању геополимера не користи цемент за који је познато да емитује око 19 % укупне емисије која потиче из индустријске производње.



Претходно наведени докази изнети су на основу резултата експерименталног истраживања. У овој дисертацији су израђене двадесет четири малтерске мешавине у којима је извршена делимична замена електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима (конверторском згуром, пепелом из дрвне биомасе, црвеним муљем и отпадним стаклом) у износу од 5 % – 20 % у односу на масу везива, док је замена гранулисаном згуром из високе пећи била у износу од 20 % – 100 %. С тим у вези, на малтерским мешавинама у свежем и очврслом стању спроведено је опширно експериментално испитивање. На основу резултата добијених испитивањем малтерских мешавина, израђено је осам геополимерних бетонских серија на бази електрофилтерског пепела чија је делимична замена другим индустријским нуспроизводима била у процентно – масеном износу од 20 %. Како је геополимерни бетон имао особине самоуграђујућег бетона, спроведена су бројна испитивања која се тичу карактеристика самоуграђујућег бетона у свежем и очврслом стању.

За справљање геополимерних малтера и бетона коришћени су нуспроизводни материјали исте финоће млива. Припрема нуспроизводних материјала почела је уситњавањем, а затим сејањем кроз сита отвора 0,09 mm. У овом случају уситњавање, односно млевање везивних материјала вршено је помоћу лабораторијског кугличног млина, након чега је извршено просејавања лабораторијским ситима. Пре почетка експерименталног истраживања извршено је испитивање коришћених везивних материјала при чему су одређени хемијски састав, физичке особине, пуцоланска активност, индекс активности и микроструктура SEM анализе.

На основу свега претходно изложеног, као и на основу резултата спроведеног експерименталног истраживања може се извести низ закључака у погледу квалитета и могућности практичне примене геополимерних малтера и бетона на бази електрофилтерског пепела. Неки од најважнијих закључака следе у наставку.

8.1 Закључци изведени на основу испитивања малтера:

- Распростирања малтера испитано је методом потресног стола. Задати циљ у овом испитивању био је да се добију малтерске мешавине пластичне конзистенције. Циљана конзистенције остварена је применом суперпластификатора. Најмање распростирање (122 mm) измерено је на мешавини справљеној само са електрофилтерским пепелом као везивом. Ова мешавина је справљена са максималном препорученом дозом адитива од 2 % па је жељену конзистенцију



било могуће добити једино додавањем воде, а то би утицало на смањење вредности чврстоће. Делимична замена електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима утицала је на меру распрострањања малтера као и на смањење потребе за адитивом. Ипак, највећи утицај на распрострањање на потресном столу имао је процентуани садржај електрофилтерског пепела. Смањењем процентно – масеног садржаја електрофилтерског пепела распрострањање малтера се повећава.

- Запреминска маса геополимерног малтера у свежем стању мења се са повећањем процентно-масеног удела додатака у везиву. Разлике у запреминским масама малтера последица су разлике у специфичним масама употребљених додатака. Највећу запреминску масу има малтерска мешавина справљена само са гранулисаним згуром као везивом. Ипак, посматрајући резултате испитивања малтерских мешавина справљених са 20 % процентно – масеног удела додатака у везиву, највећа запреминска маса измерена је код мешавине справљене са додатком конверторске згуре и износи 2270 kg/m^3 .
- Развој чврстоћа при притиску геополимерног малтера током времена зависи од врсте и процентуално - масене заступљености везивног додатка. При раним старостима малтера од 2 и 7 дана вредности чврстоће су мале, а преко 90 % укупних чврстоћа остварено је већ при старости од 56 дана. Индустријски нуспроизводи попут конверторске згуре, пепела дрвне биомасе, црвеног муља и отпадног стакла утичу на прираст чврстоћа малтера до 28 дана, али је при каснијим старостима од 56 дана и 90 дана прираст чврстоћа је занемарљив. Међутим, на серијама геополимерних малтера справљених само са електрофилтерским пепелом као везивом и малтера код којих је као везиво коришћена гранулисана згура из високе пећи пораст чврстоћа након 28 дана је велики. При старости узорака од 90 дана све мешавине справљене са гранулисаним згуром из високе пећи и мешавина справљена са 15 % пепела из дрвне биомасе оствариле су веће чврстоће од еталона. Остале мешавине геополимерног малтера имале су вредност чврстоће и до 16,5 % мању од еталона. У коначном може се закључити да гранулисана згура високе пећи утиче на повећање крајњих чврстоћа при притиску, док други индустријски нуспроизводи утичу на смањење крајњих чврстоћа при овим условима испитивања. Такође, може се сматрати да је полимеризација геополимерног везива скоро у потпуности



oстварeнa већ при старoсти oд 56 дaнa. Нa пoвeћaњe чврстoћe при притиску мoглo би сe утицати пoвeћaњeм финoћe млива везивa. Вреднoст чврстoћe при притиску цeментнoг мaлтeрa oзнaкe „Е II“ и старoсти 90 дaнa билa је зa oкo 25 % вeћa, дoк је чврстoћa мaлтeрa oзнaкe „Е III“ билa приближнo јeднaкa чврстoћи геoпoлимернe мeшaвинe oзнaчeнe кaо eтaлoн.

- Кaо и кoд чврстoћe при притиску, рaнe чврстoћe при сaвијaњу геoпoлимернoг мaлтeрa су мaлe. Нaјвeћи прирaст вреднoсти чврстoћe oстварeн је при старoсти мaлтeрa oд 7 дo 28 дaнa, дoк је при старoстимa oд 28 дo 90 дaнa прирaст нeзнaтaн. При старoсти геoпoлимерних мaлтeрa oд 90 дaнa нaјвeћa вреднoст чврстoћe измeрeнa је нa мeшaвини eтaлoнa oзнaкe „FA“, дoк је чврстoћa oстaлих мeшaвинa билa oд 1,38 % дo 23,53 % мaњa. Сличнo кaо и кoд чврстoћe при притиску, крaјњa вреднoст чврстoћe при сaвијaњу у зaвиснoсти је oд врстe кoришћeнoг индустријскoг нуспрoизвoдa. Мeђутим, зaмeнa дeлa eлeктрoфилтерскoг пeпeлa другим нуспрoизвoдимa утицaлa је нa смaњeњe крaјњe чврстoћe при сaвијaњу геoпoлимернoг мaлтeрa. При пoмeнутoј старoсти, нaјвeћa вреднoст чврстoћe измeрeнa је нa мeшaвини цeментнoг мaлтeрa oзнaкe „Е II“ и билa је зa 1,34 MPa вeћa oд чврстoћe eтaлoнa oзнaкe „FA“.
- Прoмeнa брзинe ултразвукa прaти прoмeну чврстoћe при притиску у тoку врeмeнa. Oвaј зaкључaк пoткрeпљују и висoки кoeфицијeнти кoрeлaцијe R^2 кoји сe крeћу у oпсeгу oд 0,8026 дo 0,9967. Стoгa, мoжe сe зaкључити дa сe пoмoћу пoдaтaкa o брзини прoлaскa ултразвукa крoз узoркe мaлтeрских призмa мoгу дoбити дoвoљнo пoуздaни пoдaци o вреднoстимa чврстoћe при притиску.
- Прeмa рeзултaтимa испитивaњa oтпoрнoсти мaлтeрa нa дeјствo мрaзa мoжe сe зaкључити дa сви геoпoлимерни и цeментни мaлтeри испуњaвaју oснoвнe зaхтeвe у трaјaњу oд 25 циклусa. Кoeфицијeнти oтпoрнoсти нa дeјствo мрaзa у пoглeду притисних чврстoћa били су вeћи oд 0.81, oднoснo вреднoст чврстoћe при притиску испитиваних узoрaкa није билa мaњa oд 81 % вреднoсти чврстoћe рeфeрeнтних узoрaкa истe старoсти и сaстaвa кoји нису излaгaни циклусимa зaмрзaвaњa и oдмрзaвaњa. Нaјвeћи кoeфицијeнт oтпoрнoсти геoпoлимерних мaлтeрa измeрeн је нa мeшaвини eтaлoнa и изнoси 1,09, дoк је нaјмaњи кoeфицијeнт измeрeн мeшaвини oзнaкe „100 GGBFS“ и изнoси 0,81. Зaмeнa дeлa eлeктрoфилтерскoг пeпeлa другим индустријским нуспрoизвoдимa утицaлa је нa смaњeњe oтпoрнoсти нa дeјствo мрaзa. Oвo сe мoжe тумaчити тимe дa смaњeњe



процентуалне заступљености електрофилтерског пепела у везиву утиче на смањено присуство N-A-S-H гела, као и да је наведени гел отпорнији на дејство мраза у односу на C-(A)-S-H гел при задатим условима испитивања. Физичке промене односно оштећења нису била примећена на узорцима испитиваних малтера. Цементни малтер показао је бољу отпорност на дејство мраза у трајању од 25 циклуса, а коефицијенти отпорности у погледу притисних чврстоћа кретали су се у опсегу од 0,75 до 1,01.

- Услед потапања узорака геополимерног малтера у 5 % раствор Na_2SO_4 у трајању од 180 дана геополимерни малтер је наставио да очвршћава. Створене полимерне везе су одржале стабилност, а процес полимеризације је настављен до истека времена испитивања. Замена дела електрофилтерског пепела гранулисаном згуром високе пећи утицала је на смањење отпорности на дејство сулфата. Међутим, замена електрофилтерског пепела конверторском згуром, пепелом из дрвне биомасе, црвеним муљем и отпадним стаклом је имала је позитиван утицај на чврстоће при скоро свим корацима замене. Отпорност на дејство сулфата у погледу чврстоће при притиску била је већа код геополимерних малтера него код цементног малтера ознаке „Е II“. Ипак, изузетак је малтерска мешавина ознаке „60 GGBFS“ чији коефицијент отпорности износи 0,82. Може се закључити да су све геополимерне и цементне малтерске мешавине отпорне на дејство сулфата у трајању од 180 дана, а сви испитивани узорци су одржали своју целовитост.
- Хемијски састав везивних материјала је такође био од изузетног значаја при анализи резултата испитивања отпорности малтера на дејство сулфата. Садржај калцијума и магнезијума у хемијском саставу утиче на повећање/смањење чврстоће при притиску узорака који су били изложени дејству сулфатног раствора у односу референтне узорке истог састава и старости.
- Практична употреба геополимерних малтера захтева и спровођење појединих испитивања која се тичу њиховог утицаја на околину. У ту сврху спроведен је тест излуживања тешких метала, а хемијски састав елуата упоређен је са МДК вредностима (максималним довољеним вредностима). Према резултатима испитивања, концентрације никла и бора су у појединим малтерским мешавинама биле веће од МДК вредности. Замена дела основног везива другим индустријским нуспроизводима утицала је на промену концентрације тешких метала у елуату. Концентрација никла није била изнад дозвољених вредности једино код



мешавина ознаке „FA“ и „E II“. Концентрација бора у мешавини „E II“ била је и више од 3 пута већа од концентрације бора у елуату еталона. Генерално, може се закључити да замена дела електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима утиче на повећање концентрације бора у елуату.

- Спектралном FT - IR анализом разматране су везе које могу представљати степен остварене полимеризације геополимера. У ту сврху, разматране су вибрације при фреквенцијама нижим од 1200 cm^{-1} . У посматраном распону као најдоминантнији сигнали јављају се они који представљају вибрације изазване везама Si-O/Al-O, Si-O-Al, Si-O-Mg и Si-OH/Al-OH. Ови резултати потврђују присуство Si, Al и Mg, а спектар цементне мешавине разликује се од спектра геополимерних малтера што је и било очекивано.

8.2 Закључци изведени на основу испитивања бетона:

- Запреминска маса свежег геополимерног бетона креће се у опсегу од 2335 kg/m^3 до 2370 kg/m^3 . Разлика запреминских маса бетона није велика, а узимајући у обзир да је само 20 % процентно – масеног удела основног везива замењено другим индустријским нуспроизводима, веће промене нису ни биле очекиване. Највећа запреминска маса измерена је код бетона справљеног са конверторском згуром, док је она најмања код мешавине еталона „FA“. Може се закључити да је разлика у запреминским масама свежег бетона последица разлике специфичних маса коришћених везивних материјала.
- На основу резултата испитивања распрострања свежег самоупраћујућег бетона може се закључити да све мешавине геополимерног бетона испуњавају услов квалитета за класу бетона „SF1“. Најмање распрострањање измерено је на геополимерној бетонској мешавини ознаке „FA“ и износи 570 mm. Замена електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима у процентно – масеном износу од 20 % утицала је на повећање мере распрострањања. Разлог тога може бити количина ситних честица садржаних у електрофилтерском пепелу. Наиме, електрофилтерски пепео се састоји од много ситних и порозних честица којима је потребна велика количина воде за оквашавање. У мешавини еталона таквих честица је највише, па је и распрострањање бетона најмање.
- Вредности добијене мерењем способности проласка самоупраћујућег бетона између арматуре (L-box тест) и способности на сагрегацију били су довољни да



самоуграђујући геополимерни бетони испуни услове за класе квалитета „РА2“ и „SR1“. Садржај увученог ваздуха у свежу масу геополимерног бетона кретао се у опсегу од 3,7 до 4,3 %, што је и до 1,3 % више од садржаја увученог ваздуха у свежем самоуграђујућем цементном бетону ознаке „Е П“. Ипак, може се закључити да самоуграђујући геополимерни бетони на бази електрофилтерског пепела и самоуграђујући цемент бетони задовољавају основне услове квалитета за бетон у свежем стању.

- Промене у запреминској маси очврслог геополимерног бетона последица су различитих специфичних маса коришћених везивних материјала. Услед повећања старости бетона и испарења слободне воде долази до постепеног смањења запреминске масе, а запреминска маса очврслог бетона еквивалентна је запреминској маси свежег бетона.
- Геополимерни бетони неговани у амбијенталним условима одликују се нешто мањим почетним чврстоћама при притиску које током времена расту и при старости од око 90 дана досежу максималне вредности. Делимична замена електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима утицала је на промену чврстоће при притиску бетона у односу на еталон. Додаци попут конверторске згуре и гранулисана згуре из високе пећи имали су позитиван утицај на чврстоћу при притиску бетона, док су пепео дрвне биомасе, црвени муљ и отпадно стакло утицали су на смањење вредности чврстоће бетона старости 28 и 90 дана. Убрзо након справљања геополимерног бетона долази до постепеног укључивања зрна агрегата у прихватању спољашњег оптерећења што се сматра последицом остварене везе на делу транзитне зоне геополимерне пасте и агрегата. Ране чврстоће при притиску цемент бетона (2 дана) веће су од чврстоћа геополимерног бетона. Ипак, при каснијим старостима чврстоће цемент бетона бивају достигнуте и претигнуте од стране геополимерних бетона.
- На основу резултата испитивања чврстоће при затезању савијањем може се закључити да је замена дела електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима при процентно – масеном износу од 20 % су утицала на пораст чврстоће у односу на еталон бетон „FA“. Највећа чврстоћа при затезању савијањем геополимерног бетона измерена је мешавини ознаке „20 RM“ и износи 6,01 МПа. Индустријски нуспроизводи попут гранулисана згуре високе пећи, конверторске згуре, пепела из дрвне биомасе и отпадног стакла утицали су да



вредности чврстоће геополимерног бетона буду од 9 % до 11,74 % веће од чврстоће еталона. Остварене вредност чврстоће при затезању савијањем геополимерних бетона биле су приближно једнаке чврстоћама цементних бетона. Ипак, може се закључити да је чврстоћа цемент бетона ознаке „Е III“ била већа од чврстоће при затезању савијањем свих испитиваних бетонских мешавина.

- На основу резултата испитивања чврстоће при затезању цепањем може се закључити да индустријски нуспроизводи позитивно утичу на повећање чврстоће у односу на еталон бетон. Највеће вредности чврстоће измерене су на мешавинама справљеним са гранулисаним згуром високе пећи и конверторском згуром и износиле су 4,47 МПа и 4,61 МПа, респективно. Процентуална разлика чврстоћа претходно наведених бетонских мешавина и еталона „FA“ је износила 18,57 % и 22,28 %, респективно. Процентуална разлика осталих серија геополимерног бетона у односу на еталон кретала се у опсегу од 7,69 % до 9,55 %. Овакви резултати испитивања могу се објаснити квалитетном везом геополимерне матрице и крупног агрегата, што је супротно случају цементних бетонских мешавина. Наиме, вредности чврстоће при затезању цепањем цемент бетона биле су од 0,98 МПа до 1,5 МПа мање од еталона.
- Замена дела електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима у процентно – масеном износу од 20 % утицала је на промену чврстоће при затезању методом „Pull-off“. Највећа вредност чврстоће геополимерних бетона измерена је на узорцима ознаке „20 ВЮ А“ и износи 3,14 МПа, а то је за 31,38 % више од еталона „FA“. Чврстоће геополимерних бетона справљених са другим индустријским нуспроизводима биле су од 5,02 % до 18,83 % веће од еталона. Ипак, изузетак је серија геополимерног бетона ознаке „20 RM“ чија чврстоћа износи 2,3 МПа, а то је за 3,77 % мање од еталона „FA“. Вредности чврстоће при затезању методом „Pull-off“ свих геополимерних бетона биле су мање од чврстоћа цемент бетона ознаке „Е II“. Наиме, вредност чврстоће поменуте мешавине цемент бетона била је за 0,96 МПа већа од чврстоће најбоље рангираног геополимерног бетона.
- Делимична замена електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима утицала је на вредност одскочног броја склерометра. Геополимерне бетонске мешавине код којих је делимична замена основног везива извршена другим индустријским нуспроизводима имале су већи број



одскока склерометра у односу на геополимерни еталон. Највећи број одскока склерометра измерен је на геополимерном бетону ознаке „20 GGBFS“ и износи 54, док средња вредност чврстоће при притиску бетона истог састава и старости износи 55,59 МПа. Поређењем вредности одскочног броја склерометра других геополимерних бетонских мешавина са чврстоћом при притиску бетона старости 90 дана може се закључити да се код појединих мешавина ове две вредности разликују до највише 6,22 %. На основу резултата испитивања може се закључити да геополимерни и цементни бетони спадају у групу веома квалитетних бетона. Такође, може се закључити да се индекс одскока склерометра може користити као довољно поуздана метода за праћење промене чврстоће при притиску.

- Пораст брзине проласка ултразвучног импулса кроз бетонске узорке у сагласности је са променом механичке чврстоће у току времена. При раним старостима бетона брзина ултразвука нагло расте, а касније успорава. Пораст брзине ултразвучног импулса кроз бетон прати пораст чврстоће при притиску у току времена што се доказало и применом метода математичке статистике. Зависност чврстоће при притиску и брзине ултразвука кроз геополимерни бетон истог састава и старости могла би се објаснити тиме да бетон услед повећања старости наставља да врши процес полимеризације. Према класи квалитета, сви испитивани геополимерни и цемент бетони спадају у групу добри до одлични.
- Делимична замена електрофилтерског пепела другим индустријским нуспрoизвoдимa пoпут гранулисaнe згурe висoкe пeћи, кoнвeртoрскe згурe, пeпeлa дрвнe биoмaсe, црвeнoг муљa и oтпaднoг стaклa утицaлa је нa смaњeњe вредности модула еластичности геополимерног бетона. Процентуална разлика вредности модула еластичности геополимерних бетона справљених са другим индустријским нуспрoизвoдимa у oднoсу нa eтaлoн бeтoн крeтaлa сe у oпсeгу oд 8,06 % дo 32,21 %. Највећа вредност модула еластичности измерена је на геополимерном еталон бетону справљеном само са електрофилтерским пепелом и износи 21,7 GPa. Најмања вредност модула еластичности измерена је на бетонским узорцима ознаке „20 RM“ и износи 14,71 GPa. Упоређујући вредности модула еластичности са чврстоћом при притиску геополимерних бетона може се закључити да није могуће предвидети статички модул еластичности. Све измерене вредности геополимерних бетона на бази електрофилтерског пепела



биле су 28,69 % до 51,66 % мање од вредности модула еластичности цементног бетона „Е III“ на којем је измерен модул еластичности од 30,43 GPa.

- Може се приметити да је на геополимерним бетонима измерено веће упијање воде под атмосферским притиском у односу на цемент бетоне. Упијање воде код геополимерне бетонске мешавине било је од 24,20 % до 40,49 % веће од упијања воде цементног бетона „Е II“.
- Скупљање услед сушења је најдоминантније до старости бетона од 28 дана, након тога скупљање је и даље присутно, али није доминантно попут скупљања при раним старостима. Замена дела електрофилтерског пепела гранулисано м згуром високе пећи, конверторском згуром, пепелом дрвне биомасе и црвеним муљем утицало је на смањење мере скупљања током првих 90 дана. Скупљање бетона справљеног са овим додацима било је мање од скупљања еталона „FA“. При старости бетона од 90 дана, највеће скупљање је измерено на геополимерним бетонским мешавинама еталона „FA“ и „20 G“. Скупљање услед сушења узорака цементних бетона било је мање од скупљања узорака геополимерног бетона при истим старостима.
- Према резултатима испитивања дубине продора воде под притиском може се закључити да замена дела електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима утиче на водопропустљивост геополимерног бетона. Средња вредност дубине продора воде под притиском у узорцима геополимерног бетона била је у опсегу од 8 mm до 19 mm. Највећа средња вредност дубине продора воде измерена је на узорцима бетона ознаке „20 GGBFS“, док је најмања вредност измерена на узорцима бетона ознаке „20 SS“. Све испитиване геополимерне бетонске мешавине показале су добру отпорност на дејство воде воде под притиском и као и цементни бетон „Е II“ испуњавају услове за класу квалитета „V-III“. Већи продор воде код геополимерних бетона у односу на цементни бетон „Е II“ може бити последица структуре гелских пора унутар бетонске матрице.
- Бетонске мешавине справљене на бази електрофилтерског пепела и цемента имају уједначене вредности хабања брушењем према Böhme-у. Изузетак је мешавина „20 RM“ чија је отпорност на хабање била за 15,94 % мања у односу на еталон бетон „FA“. Бетони са додатком гранулисане згуре из високе пећи и конверторске згуре показали су бољу отпорност према хабању у односу на



еталон. Ипак, све испитиване бетонске мешавине се сматрају отпорним на хабање и према вредности хабања испуњавају услове за класу квалитета „Н 3“.

- Делимична замена електрофилтерског пепела гранулисаном згуром високе пећи, пепелом дрвне биомасе, црвеним муљем и отпадним стаклом у процентно – масеном износу од 20 % утицала је на смањење отпорности на дејство мрза геополимерног бетона. Геополимерне бетонске мешавине справљене са претходно наведеним индустријским нуспроизводима нису биле отпорне на дејство мрза у трајању од 200 циклуса, а физичке промене на појединим узорцима биле су видљиве већ након 30 циклуса замрзавања. Отпорним на дејство мрза могу се сматрати једино узорци геополимерних бетона ознаке „FA“ и „20 SS“. Пад чврстоће при притиску замрзаваних узорака у односу на референтне узорке истог састава и еквивалентне старости био је већи од 12 МПа, а коефицијенти отпорности на дејство мрза износили су 77 % и 78 %, респективно. Овакви резултати испитивања могу бити последица јачине остварене везе између геополимерне пасте и крупног агрегата, али и остварених продуката реакције. Наиме, према спроведеној микроструктуралној анализи као главни продукти реакције мешавине „FA“ јавља се N-A-S-H гел, док је код мешавине ознаке „20 SS“ у мањој мери присутан и C-(A)-S-H гел. Према томе, може се закључити да је код бетона са доминантним садржајем N-A-S-H гела отпорност на дејство мрза већа. Отпорност на дејство мрза цементних мешавина била је већа од отпорности геополимерних бетона што може бити последица искључиво структуре пора. На побољшање резултата испитивања могло би се утицати додавањем аеранта приликом справљања бетона.
- Сви испитивани узорци геополимерног и цементног бетона изузев узорака ознаке „20 GGBFS“ и „Е II“ се не могу сматрати отпорним на једновремено дејство мрза и соли за одмрзавање у складу са стандардом SRPS CEN/TS 12390-9:2017. Према измереном губитку масе и насталим визуелним оштећењима поменуте бетонске мешавине испуњавају услове квалитета за класу отпорности „MS - S2“. Може се закључити да геополимерне бетонске мешавине код којих се као главни продукт реакције јавља C-(A)-S-H имају бољу отпорност на једновремено дејство мрза и соли за одмрзавање од мешавина код којих се као доминантан јавља N-A-S-H гел. Као и код испитивања отпорности на дејство мрза, на побољшање резултата



испитивања могло би се утицати додавањем аеранта приликом справљања бетона.

- Отпорност на дејство сулфата испитана је потапањем бетонских узорака у 5 % раствор Na_2SO_4 у трајању од 3 и 6 месеци. Према резултатима испитивања сулфатне отпорности након 3 месеца може се сматрати да делимична замена електрофилтерског пепелом другим индустријским нуспроизводима нема битан утицај на коефицијент отпорности. Ипак, примећено је благо повећање коефицијента отпорности код бетонских мешавина ознаке „20 ВЮ А“, „20 RM“ и „20 G“ у односу на еталон „FA“. Поређењем резултата испитивања отпорности на дејство сулфата након 3 и 6 месеци од потапања узорака у сулфатни раствор може се закључити да је бетон упркос агресивном спољашњем утицају наставио да очвршћава. Најмањи коефицијенти отпорности измерени су на мешавинама еталона „FA“ и „20 G“. Коефицијенти отпорности осталих геополимерних мешавина били су већи од 1. Све геополимерне и цементне мешавине показале су добру отпорност на дејство сулфата при задатим условима испитивања. Геополимерно везиво и алкални раствор настављају да одржају своје унутрашње везе стабилним не реагујући на спољашње утицаје. Физичке промене на испитиваним узорцима нису биле видљиве ни при последњем мерењу. Узорци цементних бетонских мешавина показали су нешто бољу отпорност на дејство сулфата у односу на геополимерне бетонске узорке. Вредност коефицијента отпорности цементних бетона био је већи од 1,04.
- Према фотографијама SEM анализе може се закључити да је структура геополимерног бетона нехомогена и порозна. На појединим пресецима видљиве су неизреаговане честице и трагови прелина насталих испарењем слободне воде из мешавине. Структура цементних бетона чини се компактнијом и гушћом у односу на структуру геополимерног бетона.

Генерално, може се закључити да геополимерни малтери и бетони могу бити адекватна замена традиционалним цементним мешавинама. Замена дела електрофилтерског пепела другим индустријским нуспроизводима има позитиван утицај на поједине карактеристике малтера и бетона. Ипак, важније од свих испитаних карактеристика је еколошка страна геополимера. Употреба индустријских нуспроизвода који су основа за справљање геополимерних мешавина утиче на смањење локалног отпада. Такође, имплементацијом геополимерних мешавина справљених на бази



електрофилтерског пепела и са додатком гранулисане згуре из високе пећи, конверторске згуре, пепела из дрвне биомасе, црвеног муља и отпадног стакла смањиће се штетан утицај на животну средину и емисија CO₂.

8.3 Могућност практичне примене и правци даљег истраживања

Резултати испитивања предметних геополимерних малтера и бетона указују да постоји реална могућност за практичну примену геополимера. Дobre механичке карактеристике, отпорност на дејство сулфата, воднепропусност и хабање показују да су геополимери материјали са добрим конструктивним својствима и да као такви у појединим случајевима могу бити адекватна замена традиционалним малтерима и бетонима. Посебно се истиче њихова еколошка страна па би се њиховом практичном директно утицало на смањење локалног отпада и емисију CO₂.

Познато је да у последње време, како на нашем тржишту тако и у свету, све више пажње привлаче готови бетонски елементи. Како су предметни бетони показали добру отпорност на дејство сулфата и хабање могли би се користити као бетони за справљање бетонских плоча, блокова, одводних канала или подземних делова објеката који неће бити изложени дејству ниских температура. Да би се ова могућност и практично потврдила потребно је најпре проширити постојеће законске регулативе и стандарде којима би се дефинисала њихова употреба. У циљу решавања овог проблема неопходно је спровести низ истотипних испитивања како би се извршила стандардизација геополимерних композита.

Даље истраживање у овој области требало би усмерити на испитивање утицаја структуре пора на циклусе замрзавања и одмрзавања геополимерних композита. Повећањем отпорности геополимерних бетона на циклусе замрзавања и одмрзавања значајно би утицало на проширење поља примене. Наставак истраживања могао би бити и у пољу микроармираног бетона. Наиме, како је утврђена добра отпорност на хабање, и могућност излагања геополимерног бетона веома тешком оптерећењу, од изузетног значаја би било одређивање утицаја полипропиленских и челичних влакана на карактеристике бетона. Будућа истраживања у области геополимерних композита могла би се односити и на развој компјутерског софтвера којим би се могла извршити предикција карактеристика геополимера у зависности од карактеристика полазних сировина.



9. ЛИТЕРАТУРА, ЛИСТА СЛИКА, ЛИСТА ТАБЕЛА И ОЗНАКЕ КОРИШЋЕНЕ У ДИСЕРТАЦИЈИ

- [1] URL:https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/30YearsGEOP.pdf (pristupljeno 21.5.2020.)
- [2] P. Duxson, A. F.-Jimenez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, J. S. J. van Deventer (2007): "Geopolymer technology: the current state of the art", Journal of material science, Vol. 42, pp. 2917-2933
- [3] J. L. Provis, J. S. J. van Deventer: "Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications", Woodhead publishing ISBN 978-1-84569-449-4
- [4] J. L. Provis, J. S. J. van Deventer (2014): " Alkali activated materials state-of-the-art report, Rilem TC 224-AAM", doi: 10.1007/978-94-007-7672-2, Springer Dordrecht Heidelberg New York London
- [5] E. Jamstorp, J. Forsgren, S. Bredenberg, H. Engqvist, M. Stromme (2010): "Mechanically strong geopolymers offer new possibilities in treatment of chronic pain", Journal controlled release, Vol. 146 (3), pp. 370-377
- [6] H. Kühl (1908): "Slag cement and process of making the same, U.S. Patentn office, No. 900,939
- [7] A.O. Purdon (1940): „The action of alkalis on blast furnace slag“ Journal of society of chemical industry, Vol. 59, pp.191–202
- [8] V. D. Glukhovskiy (1959): Soil silicates. Kiev, USSR: Gostroiizdat Publish
- [9] R. Malinowski (1979): „Betontechnische Problem losung bei Antiken Wasserbauten“, Milleslungen, Leichtweiss-Institut, Braunschweig, Vol. 64
- [10] C.A. Langton, D.M. Roy (1984): „Longevity of borehole and shaft sealing materials: characterization of ancient cement-based building materials“, Scientific basis for nuclear waste management, North Holland, New York, Vol. 26, pp. 543–549
- [11] P. V. Krivenko (1986): „Synthesis of Binders with Required Properties in the System $R_2O-RO-R_2O_3-SiO_2-H_2O$ “, Doktorska disertacija, Polytechnic Institute, Kiev, Ukraine,
- [12] T. Sugama, L. E. Brothers, T. R. Van de Putte (2005): „Acid-resistant cements for geothermal wells: Sodium silicate activated slag/fly ash blends, Advanced in cement research, Vol. 17 (2), pp. 65-75
- [13] J. Davidovits (2002): „30 years of succeeded and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs“, Geopolymer 2002 Conference, Australia
- [14] N. Xie, J. L. Bell, W. M. Kriven (2010): „Fabrication and structural leucite glass-ceramics from potassium-based geopolymer precursors“, Journal ceramic society, Vol. 93 (9), pp. 2644 – 2649
- [15] J. L. Bell, P. E. Driemeyer, W. M. Kriven (2009): „Formation of ceramics from metakaolin-based geopolymers. Part II: K-based geopolymer“, Journal of the American ceramic society, Vol. 92 (3), pp. 607 - 615



- [16] P.V. Krivenko, G. Y. Kovalchuk (2007): „Directed synthesis of alkaline aluminosilicate minerals in a geocement matrix“, *Journal of materials science*, Vol. 42 (9), pp. 2944-2952
- [17] C. Shi, P. V. Krivenko, D. M. Roy (2006): „Alkali – activated cements and concretes“, Taylor & Francis group
- [18] D. M. Roy (1999): „Alkali – activated cements Opportunities and challenges“, *Cement and concrete research*, Vol. 29, pp. 249-254
- [19] Z. Abdollahnejad, F. P.Torgal, T. Felix, W. Tahri, J. B. Aguiar (2015): „Mix design, properties and cost analysis of fly ash-based geopolymer foam“, *Construction and building materials*, Vol. 80, pp. 18 – 30
- [20] B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. van Riessen, G. D. Corder (2011): „Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement“, *Journal of cleaner production*, Vol. 19, pp. 1080-1090
- [21] S. Candamano, P. De Luca, P. Frontera, F. Crea (2017): „Production of geopolymeric mortars containing forest biomass ash as partial replacement of metakaolin“, *Environments*, Vol. 4 (4)
- [22] F. P. Torgal, J.A. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, P. Chindaprasirt (2014): „Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes“; Woodhead publishing series in civil and structural engineering
- [23] A. Palomo, P. Krivenko, I. G. Lodeiro, E. Kavalerova, O. Maltseva, A. F. Jimenez (2014): „A review on alkaline activation: new analytical perspectives“, *Materiales de construcción*, Vol. 64 (315)
- [24] N. Marjanović, M. Komljenović, Z. Baščarević, V. Nikolić, R. Petrović (2014): „Physical–mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash–blast furnace slag blends“, *Ceramics international*, Vol. 41, pp. 1421-1435
- [25] P. Nath, P. K. Sarker (2014): „Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition“, *Construction and building materials*, Vol. 66, pp. 163-171
- [26] E. I. Diaz, E. N. Allouche, S. Eklund (2010) „Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers“ *Fuel*, Vol. 89(5) pp. 992–996
- [27] S. Saha, C. Rajasekaran (2017): „Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag“, *Construction and building materials*, Vol. 146, pp. 615-620
- [28] P. Nath, P. K. Sarker (2016): „Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete“, *Construction and building materials*, Vol. 130, pp. 22-31
- [29] A. A. Melo Neto, M. A. Cincotto, W. Repette (2008): „Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement“, *Cement and concrete research*, Vol. 38, pp. 565-574
- [30] J. L. Provis, S. A. Bernal (2014): „Geopolymers and related alkali-activated materials“, *Annual review of materials research*, doi: 10.1146/annurev-matsci-070813-113515
- [31] A. F.- Jimenez, A. Palomo, M. M. Alonso (2005): „Alkali activation of fly ashes: mechanisms of reaction“, *Congress of non-traditional cement and concrete II*, University of technology, Brno, Czech Republic ISBN: 80-214-2853-8
- [32] A. F.- Jimenez, A. Palomo, I. Sobrados, J. Sanz, (2006) „The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes“ *Microporous and mesoporous materials*, Vol. 91 (1-3), pp. 111–119



- [33] R. J. Flatt, N. Roussel, C. R. Cheeseman (2012): „Concrete: an eco material that needs to be improved“, Journal of the European ceramic society, Vol. 32 (11), pp. 2787-2798
- [34] I. Lecomte, C. Henrist, M. Liegeois, F. Maseri, A. Rulmont, R. Cloots (2006) (Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement, Journal of the European ceramic society, Vol. 26, pp. 3789–97
- [35] I. G.-Lodeiro, A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo (2013): „Hydration kinetics in hybrid binders: Early reaction stages“, Cement & concrete composites, Vol. 39, pp. 82-92
- [36] I. G.-Lodeiro, A. F.- Jimenez, A. Palomo, D. E. Macphee (2010): „Effects on fresh C–S–H gels on the simultaneous addition of alkali and aluminium“, Cement and concrete research, Vol. 40, pp. 27–32
- [37] I. G.- Lodeiro, A. F.- Jimenez, A. Palomo, D. E. Macphee (2010): „Effect of calcium additions on N–A–S–H cementitious gels“, Journal of the American ceramic society, Vol. 93(7), pp. 1934–1940
- [38] A. Palomo, M. W. Grutzeck, M. T. Blanc (1999): „Alkali-activated fly ashes. A cement for the future“, Cement and concrete research, Vol. 29 (8), pp. 1323–1329
- [39] F. P.- Torgal, J. C.- Gomes, S. Jalali (2008): „Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture“, Construction and building materials, Vol. 22, pp. 1315-1322
- [40] J. Krstić (2016): „Katalizator na bazi nikla na silikatnom nosaču za hidrogenizaciju biljnog ulja - sinteza, karakterizacija i katalitička svojstva“, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju,
- [41] URL: <https://www.hsh-chemie.com/en/products/product-data-base/water-glass-sodium-potassium-4502> (pristupljeno 15.6.2020.)
- [42] URL: <https://www.hemija.rs/blog/natrijum-hidroksid-kausticna-soda-2.html> (pristupljeno 25.2.2020.)
- [43] C. K. Yip, G. C. Lukey, J. L. Provis, J. S. J. van Deventer (2008): „Effect of calcium silicate sources on geopolymerization“, Cement and concrete research, Vol. 38(4), pp. 554–564
- [44] P. W. Ken, M. Ramli, C. C. Ban (2015): „An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products“, Construction and building materials, Vol. 77, pp. 370-395
- [45] J. Davidovits (1994): „Properties of geopolymer cements, alkaline cements and concretes“ First International conference on alkaline cements and concretes, Scientific research institute on binder and materials, Kiev, Ukraine, pp. 131-149
- [46] D. Hardjito (2005): „Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete“, doktorska disertacija, Curtin University of Technology, Faculty of Engineering and Computing Department of Civil Engineering
- [47] J. M. Allwood, J. M. Cullen, R. L. Milford (2010): „Options for achieving a 50% cut in industrial carbon emissions by 2050“, Environmental science technology, Vol. 44, pp. 1888-1894
- [48] T. Stengel, J. Reger, D. Heinz (2009): „Life cycle assessment of geopolymer concrete - what is the environmental benefit“, Proceeding of the 24th Biennial Conference of the Concrete Institute of Australia
- [49] Z. Li, Z. Ding, Y. Zhang (2004): „Development of sustainable cementitious materials“, International workshop on sustainable development and concrete technology, Beijing, China, pp. 55–76



- [50] H. Hardjito, R. V. Rangan (2005): „Development and properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete“, Research report GC1, Curtin University of Technology Faculty of Engineering, Perth, Australia
- [51] G. Gorhan, G. Kurklu (2014): „The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures“, Composites: Part B, Vol. 58, pp. 371-377
- [52] A. Islam, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat, I. I. Bashar (2014): „The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar“, Materials and design, Vol. 56, pp. 833-841
- [53] C. J. Xiong, C. H. Ban, X. Pei, Z. Fang (2004): „International workshop on sustainable development and concrete technology“ China building materials academy, pp. 309-317
- [54] D. L.Y. Kong, J. G. Sanjayan (2010): „Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete“. Cement and concrete research, Vol. 40, pp. 334-339
- [55] B. V. Rangan (2008): „Fly ash – based geopolymer concrete“, Research report GC4, Curtin University of Technology, Engineering Faculty Perth, Australia
- [56] A. F.- Jimenez, A. Palomo (2003): „Characterization of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements“, Fuel, Vol. 82(18), pp. 2259–2265
- [57] A. Palomo, A. Alonso, A. F.- Jimenez, I. Sobrados, J. Sanz (2004): „Alkaline activation of fly ash: NMR study of the reaction products“, Journal of the American ceramic society, Vol. 87 (6), pp. 1141-1145
- [58] E. A. Ayuso, X. Querol, F. Plana, A. Alastuey, N. Morenoa, M. Izquierdo, O. Font, T. Morenoa, S. Diez, E. Vazquez, M. Barra (2008): „Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion fly ashes“, Journal of hazardous materials, Vol. 154, pp. 175-183
- [59] X. Guo, H. Shi, W. A. Dick (2010): „Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer“, Cement & concrete composites, Vol. 32, pp. 142-147
- [60] T. W. Cheng, J. P. Chiu (2003): Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag“, Minerals engineering, Vol. 16, pp. 205-210
- [61] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, V. Sirivivatnanon (2007): „Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer“, Cement & concrete composites, Vol. 29, pp. 224-229
- [62] D. Hardjito, C. C. Cheak, C. H. L. Ing (2008): „Strength and setting times of low calcium fly ash-based geopolymer mortar“, Modern applied science, Vol. 2 (4), pp.
- [63] S. Alonso, A. Palomo (2001): „Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio“, Materials letters, Vol. 47, pp. 55-62
- [64] G. S. Ryu, Y. B. Lee, K. T. Koh, Y. S. Chung (2013): „The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators“, Construction and building materials, Vol. 47, pp. 409-418
- [65] P. S. Deb, P. Nath, P. K. Sarker (2014):“ The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature“, Materials & design, Vol. 62, pp. 32-39
- [66] G. Kovalchuk, A. F.- Jimenez, A. Palomo (2007): „Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development – Part II“, Fuel, Vol. 86, pp. 315-322



- [67] V. Nikolić, M. Komljenović, Z. Baščarević, N. Marjanović, Z. Miladinović, R. Petrović (2015): „The influence of fly ash characteristics and reaction conditions on strength and structure of geopolymers“, *Construction and building materials*, Vol. 94, pp. 361-370
- [68] P. Rovnanik (2010): „Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer“, *Construction and building materials*, Vol. 24, pp. 1176-1183
- [69] J. Bijeljić, N. Ristić, Z. Grdić, G. T. Ćurčić, D. Grdić, D. Krstić: "Effects of ground granulated blast furnace slag on physical – mechanical characteristics of geopolymer mortars based on fly ash", 14th International Scientific Conference (iNDiS), with Subconference "Eco build", University of Novi Sad, Faculty of technical sciences
- [70] F. Puertas, S. M. Ramirez, S. Alonso, T. Vazquez (2000): „Alkali activated fly ash/slag cements. strength behaviour and hydration products. Cement and concrete research, Vol. 12(8), pp. 1625–1632
- [71] A. Sathonsaowaphak, P. Chindapasirt, K. Pimraksa (2009): „Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar“, *Journal of hazardous materials*, Vol. 168(1), pp. 44–50
- [72] V. Sata, A. Sathonsaowaphak, P. Chindapasirt (2012): „Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack“, *Cement & concrete composites*, Vol. 34, pp. 700-708
- [73] J. G. S. van Jaarsveld, J. S. J. van Deventer, G. C. Lukey (2003): „The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers“, *Materials letters*, Vol. 57(7), pp. 1272-1280
- [74] N. Ranjbar, M. Mehrali, A. Behnia, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat (2014): „Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar“, *Materials & design*, Vol. 59, pp. 532-539
- [75] J. Bijeljić, N. Ristić, Z. Grdić, G. T. Ćurčić, D. Đorđević (2020): „Durability properties of ladle slag geopolymer mortar based on fly ash“, *Science od sintering*, Vol. 52(2), pp.
- [76] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, B. V. Rangan (2004): „Brief review of development of geopolymer concrete“, *Invited paper, George Hoff Symposium, American Concrete Institute, Las Vegas, USA*
- [77] H. Xu, J. S. J. van Deventer (2000): „The geopolymerisation of alumino - silicate minerals“ *International journal of mineral processing*, Vol. 59, pp. 247-266
- [78] V. F. F. Barbosa, K. J. D. MacKenzie, C. Thaumaturgo (2000): *Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. International journal of inorganic materials*, Vol. 2, pp. 309-317
- [79] M. Rowles, B. O'Connor (2003): „Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesised by sodium silicate activation of metakaolinite“ *Journal of materials chemistry*, Vol. 13, pp. 1161-1165
- [80] J. G. S. van Jaarsveld, J. S. J. van Deventer, G. C. Lukey (2002): „The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite-based geopolymers“, *Chemical engineering journal*, Vol. 89, pp. 63-73
- [81] A. Hajimohammadi, J. S. J. van Deventer (2017): „Characterisation of one-part geopolymer binders made from fly ash“, *Waste biomass valor*, Vol. 8, pp. 225-233
- [82] P. Nath (2014): „Study of fly ash based geopolymer concrete cured in ambient condition“, *Doktorska disertacija, School of civil and mechanical engineering*
- [83] P. Chindapasirt, T. Chareert, S. Hatanaka, t. Cao (2011): „High strength geopolymer using fine high-calcium fly ash“, *Journal of materials in civil engineering*, Vol. 23, pp. 264-270



- [84] J. Temuujin, A. van Riessen, K. J. D. MacKenzie (2010): „Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars“, *Construction and building materials*, Vol. 24, pp. 1906-1910
- [85] K. Hyunjung, K. Yootaek (2012): „Characteristics of the geopolymer using fly ash and blast furnace slag with alkaline activators“, 4th international conference on chemical, biological and environmental engineering, IPCBEE, Singapore, Vol. 43 (32), pp. 154–159
- [86] A. Serdar (2013): „A ternary optimization of mineral additives of alkali activated cement mortar“, *Construction and building materials*, Vol. 43, pp. 131–138
- [87] F. Puertas, T. Amat, A. Fernandez-Jimenez, T. Vazquez (2003): „Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres“, *Cement and concrete research*, Vol. 33, pp. 2031-2036
- [88] R. Rajamma, J. A. Labrincha, V. M. Ferreira (2012): „Alkali activation of biomass fly ash–metakaolin blends“ *Fuel*, Vol. 98, pp. 265-271
- [89] O. A. Abdulkareem, M. Ramli, J. C. Matthews (2019): „Production of geopolymer mortar system containing high calcium biomass wood ash as a partial substitution to fly ash: An early age evaluation“, *Composites Part B*, Vol. 174, 106941
- [90] C. B. Cheah, M. Ramli (2013): „The engineering properties of high performance concrete with HCWA–DSF supplementary binder“ *Construction and building materials*, Vol. 40, pp. 93–103
- [91] S. Jumrat, B. Chatveera, P. Rattanadecho (2011): „Dielectric properties and temperature profile of fly ash-based geopolymer mortar“, *International communications in heat and mass transfer*, Vol. 38, pp. 242-248
- [92] S. Songpiriyakij (2007): „Effect of temperature on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar“, *Silikaty*, Vol. 48(4), pp. 183-197
- [93] A. Bhowmick¹, S. Ghosh (2012): „Effect of synthesizing parameters on workability and compressive strength of fly ash based geopolymer mortar“, *International journal of civil and structural engineering*, Vol. 3(1), pp. 168-177
- [94] S. Mane¹, H. S. Jadhav (2012): „Investigation of geopolymer mortar and concrete under high temperature“, *International journal of emerging technology and advanced engineering*, Vol. 12(12), pp. 384-390
- [95] C. Riddirud, P. Chindaprasirt, K. Pimraksa (2011): „Factors affecting the shrinkage of fly ash geopolymers“. *International journal of minerals, metallurgy and materials*, Vol. 18(1), pp. 100-104
- [96] M. M. A. Abdullah, H. Kamarudin, H. Mohammed, I. Khairul Nizar, A. R. Rafiza, Y. Zarina (2011): „The relationship of NaOH molarity, Na₂SiO₃/NaOH ratio, fly ash/alkaline activator ratio, and curing temperature to the strength of fly ash-based geopolymer“, *Advanced materials research*, Vol. 328-330, pp. 1475-1482
- [97] S. Kramar, A. Šajna, V. Ducman (2016): „Assessment of alkali activated mortars based on different precursors with regard to their suitability for concrete repair“, *Construction and building materials*, Vol. 124, pp. 937-944
- [98] H. Y. Zhang, V. Kodur, B. Wu, L. Cao, F. Wang (2016): „Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures“, *Construction and building materials*, Vol. 109, pp. 17-24
- [99] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, U. Rattanasak (2009): „Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers“, *Waste management*, Vol. 29, pp. 539-543



- [100] M. H. Al-Majidi, A. Lampropoulos, A. Cundy, S. Meikle (2016): „Development of geopolymer mortar under ambient temperature for in situ applications“, *Construction and building materials*, Vol. 120, pp. 198-211
- [101] M. B. Karakoc, I. Turkmen, M. Murat Maras, F. Kantarci, R. Demirboga, M. U. Toprak (2014): „Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar“, *Construction and building materials*, Vol. 72, pp. 283-292
- [102] N. Ye, J. Yang, S. Liang, Y. Hu, J. Hu, B. Xiao, Q. Huang (2016): „Synthesis and strength optimization of one-part geopolymer based on red mud“, *Construction and building materials*, Vol. 111, pp. 317-325
- [103] C. B. Cheah, M. H. Samsudin, M. Ramli, W. K. Part, L. E. Tan (2017): „The use of high calcium wood ash in the preparation of ground granulated blast furnace slag and pulverized fly ash geopolymers: a complete microstructural and mechanical characterization“, *Journal of cleaner production*, Vol. 156, pp. 114-123
- [104] H. R.- Dezfouli, P. R. Rangaraju (2017): „A comparative study on the durability of geopolymers produced with ground glass fiber, fly ash, and glass-powder in sodium sulfate solution“, *Construction and building materials*, Vol. 153, pp. 996-1009
- [105] I. Lancellotti, C. Paonzoni, M. C. Bignozzi, L. Barbieri, C. Leonelli (2014): „Incinerator bottom ash and ladle slag for geopolymers preparation“, *Waste biomass valor*, Vol. 5, pp. 393-401
- [106] C. C. Ban, P. W. Ken, M. Ramli (2015): „The hybridizations of coal fly ash and wood ash for the fabrication of low alkalinity geopolymer load bearing block cured at ambient temperature“, *Construction and building materials*, Vol. 2015, pp. 41-55
- [107] M. Salman, O. Cizer, Y. Pontikes, L. Vandewalle, B. Blanpain, K. van Balen (2014): „Effect of curing temperatures on the alkali activation of crystalline continuous casting stainless steel slag“, *Construction and building materials*, Vol. 71, pp. 308-316
- [108] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, B. V. Rangan (2004): „On the development of fly ash-based geopolymer concrete“, *Materials journal*, Vol. 101 (6), pp. 467-472
- [109] J. L. Provis, K. Arbi, S. A. Bernal, D. Bondar, A. Buchwald, A. Castel, S. Chithiraputhiran, M. Cyr, A. Dehghan, K. D. –Daube, A. Dubey, V. Ducman, G. J. G. Gluth, S. Nanukuttan, K. Peterson, F. Puertas, A. van Riessen, M. T.-Carrasco, G. Ye, Y. Zuo (2019): „RILEM TC 247-DTA round robin test: mix design and reproducibility of compressive strength of alkaliactivated concretes“, *Materials and structures*, Vol. 52:99, pp.
- [110] A. A. Aliabdo, A. E. M. A. Elmoaty, H. A. Salem (2016): „Effect of cement addition, solution resting time and curing characteristics on fly ash based geopolymer concrete performance“, *Construction and building materials*, Vol. 123, pp. 581-593
- [111] K. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul, P. Chindaprasirt (2011): „NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature“, *Fuel*, Vol. 99, pp. 2118-2124
- [112] D. Adak, M. Sarkar, S. Mandal (2014): „Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar“, *Construction and building materials*, Vol. 70, pp. 453-459
- [113] S. K. Nath, S. Kumar (2013): „Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer“, *Construction and building materials*, Vol. 38 pp. 924-930



- [114] P. V. Ramani, P. K. Chinnaraj (2015): „Geopolimerni beton s dodatkom granulirane zgure i crnog pepela rižinih ljuski“, Građevinar, Vol. 8, pp. 741-748
- [115] F. N. Okoye, J. Durgaprasad, N. B. Singh (2016): „Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete“, Ceramic international, Vol. 42 (2), Part B, pp. 3000-3006
- [116] J. He, J. Zhang, Y. Yu, G. Zhang (2012): „The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study“, Construction and building materials, Vol. 30, pp. 80-91
- [117] S. Pachamuthu, P. Thangaraju (2017): „Effect of incinerated paper sludge ash on fly ash-based geopolymer concrete“, Građevinar, Vol. 69, pp. 851-859
- [118] A. Kusbiantoro, M. F. Nuruddin, N. Shafiq, S.A. Qazi (2012): „The effect of microwave incinerated rice husk ash on the compressive and bond strength of fly ash based geopolymer concrete“, Construction and building materials, Vol. 36, pp. 695–703
- [119] F. N. Okoye, J. Durgaprasad, N. B. Singh (2015): „Mechanical properties of alkali activated flyash/Kaolin based geopolymer concrete“, Construction and building materials, Vol. 98, pp. 685-691
- [120] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, B. V. Rangan (2004): „The stress-strain behaviour of fly ash-based geopolymer concrete“, 18th Australasian conference on the mechanics of structures and materials, Perth Australia, pp. 831-834
- [121] A. M. F.- Jiminez, A. Palomo, C. L.- Hombrados (2006): „Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete“, ACI materials journal, 103-M12, pp. 106–112
- [122] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, S. K. Bhattacharyya (2015): „Geopolymer concrete: A review of some recent developments“, Construction and building materials, Vol. 85, pp. 78-90
- [123] A. Noushini, A. Castel (2016): „The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete“, Construction and building materials, Vol. 112, pp. 464-447
- [124] M. Sofi, J. S. J.van Deventer, P. A. Mendis, G. C. Lukey (2007): „Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs)“, Cement and concrete research, Vol. 37(2), pp. 251-257
- [125] E. I. D.- Loya, E. N. Allouche, S. Vaidya (2011): „Mechanical properties of fly-ash-based geopolymer concrete“, ACI materials journal, Vol. 108(3), pp. 300-306
- [126] Z. Pan (2011): „Fracture properties of geopolymer paste and concrete“, Magazine of concrete research, Vol. 63(10), pp. 763-771
- [127] M. F. Nuruddin, S. Demie, M. F. Ahmed, N. SNhafiq (2011): „ Effect of superplasticizer and naoh molarity on workability, compressive strength and microstructure properties of self-compacting geopolymer concrete“,International journal of geological and environmental engineering, Vol. 5(3), pp. 187-194
- [128] T. G. Ushaa, R. Anuradha, G. S. Venkatasubramani (2015): „Performance of self-compacting geopolymer concrete containing different mineral admixtures“, International journal of engineering & material sciences, Vol. 22, pp. 473-481
- [129] K. Arbi, M. Nedeljkovic, Y. Zuo, G. Ye (2016): „A review on durability of alkali activated fly ash/slag systems: Advances, issues and perspectives“, Industrial & engineering chemistry research, Vol. 55(19), pp. 5439-5453



- [130] H. E. Elyamany, A. E. M. A. Elmoaty, A. M. Elshaboury (2018): „Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar“, Construction and building materials, Vol. 184, pp. 111-127
- [131] S. Thokchom, P. Ghosh, S. Ghosh (2009): „Resistance of fly ash based geopolymer mortars in sulfuric acid“, ARPN Journal of engineering and applied sciences, Vol. 4(1), pp. 65-70
- [132] A. Mehta, R. Siddique (2017): „Sulfuric acid resistance of fly ash based geopolymer concrete“, Construction and building materials, Vol. 146, pp. 136-143
- [133] Y. Fu, L. Cai, Y. Wu (2011): „Freeze–thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete“, Construction and building materials, Vol. 25, pp. 3144-3148
- [134] R. Slavika, V. Bednarik, M. Vondruska, A. Nemeč (2008): „Preparation of geopolymer from fluidized bed combustion bottom ash“, Journal of materials processing technology, Vol. 200, pp. 265-270
- [135] P. Sun, H.- C. Wu (2013): „Chemical and freeze–thaw resistance of fly ash-based inorganic mortars“, Fuel, Vol. 111, pp. 740-745
- [136] F. N. Degirmenci (2018): „Freeze-thaw and fire resistance of geopolymer mortar based on natural and waste pozzolans“, Ceramics-Silikáty, Vol. 62(1), pp. 41-49
- [137] F. Škvara, T. Jilek, L. Kopecký (2005): „Geopolymer materials based on fly ash“, Ceramics – Silikáty, Vol. 49(3), pp. 195-204
- [138] R. Zhao, Y. Yuan, Z. Cheng, T. Wen, J. Li, F. Li, Z. J. Ma (2019): „Freeze-thaw resistance of Class F fly ash-based geopolymer concrete“, Construction and building materials, Vol. 222, pp. 474-483
- [139] X. Ma, O. Copuroglu, E. Schlangen, N. Han, F. Xing (2016): „Degradation of cement paste immersed in sodium sulfate solutions“, Proceedings of the workshop external sulfate attack, Portugal, Lisbon
- [140] V. Bulatović (2017): „Sulfatna otpornost betona na bazi recikliranog agregata“, Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu,
- [141] J. Hill, E. A. Byars, J. H. Sharp, C. J. Lynsdale, J. C. Cripps, Q. Zhou (2003): „An experimental study of combined acid and sulfate attack of concrete“, Cement & concrete composites, Vol. 25, pp. 997-1003
- [142] M. Komljenović, Z. Baščarević, N. Marjanović, V. Nikolić (2013): „External sulfate attack on alkali-activated slag“, Construction and building materials, Vol. 49, pp. 31-39
- [143] A. Neville (2004): „The confused world of sulfate attack on concrete“, Cement and concrete research, Vol. 38(8), pp. 1275-1296
- [144] R. S. Gollop, H. F. W Taylor (1992): „Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack. I. Ordinary Portland cement paste. Cement and concrete research, Vol. 22(6), pp. 1027–1038
- [145] I. Ismail, S. A. Bernal, J. L. Provis, S. Hamdan, J. S. J. van Deventer (2013): „Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure“, Materials and structures, Vol. 46, pp. 361-373
- [146] T. Bakharev (2005): „Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions“, Cement and concrete research, Vol. 35, pp. 1233-1246



- [147] N. Džunuzović, M. Komljenović, V. Nikolić, T. Ivanović (2017): „External sulfate attack on alkali-activated fly ash-blast furnace slag composite“, *Construction and building materials*, Vol. 157, pp. 737-747
- [148] Z. Bašćarević, M. Komljenović, Z. Miladinović, Violeta Nikolić, N. Marjanović, R. Petrović (2014): „Impact of sodium sulfate solution on mechanical properties and structure of fly ash based geopolymers“, *Materials and structures*, Vol. 48, pp. 683-697
- [149] T. Bakharev, J. G. Sanjayan, Y. -B. Cheng (2002): „Sulfate attack on alkali-activated slag concrete“, *Cement and concrete research*, Vol. 32, pp. 211-216
- [150] P. Chindapasirt, W. Chalee (2014): „Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site“, *Construction and building materials*, Vol. 63, pp. 303-310
- [151] B. Batinić (2015): „Model za predviđanje količine ambalažnog i biorazgradivog otpada primenom neuronskih mreža“, *Doktorska disertacija*, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu
- [152] J. Radosavljević, A. Đorđević (2013): „Deponije i deponovanje komunalnog otpada“, *udžbenik*, Univerzitet u Nišu, Fakultet zaštite na radu
- [153] „Strateški okvir za politiku upravljanja otpadom“ (2002), Regionalni centar za životnu sredinu za Centralnu i Istočnu Evropu kancelarija u Jugoslaviji, Beograd
- [154] URL: <http://www.sepa.gov.rs/index.php?menu=207&id=202&akcija=showXlinked> (pristupljeno 21.5.2020.)
- [155] M. M. Životić, D. D. Stojiljković, A. M. Jovović, V. V. Čudić (2012): „Mogućnost korišćenja pepela i šljake sa deponije termoelektrane „Nikola Tesla“ kao otpada sa upotrebom vrednošću“, *Hemijska industrija*, Vol. 66(3), pp. 403-412
- [156] SRPS EN 450-1:2014: *Leteći pepeo za beton — Deo 1: Definicija, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti*
- [157] A. Terzić, N. Mijatović, Lj. Miličić, Z. Radojević (2016): „Šljaka iz procesa sagorevanja uglja kao sekundarna sirovina za primenu u građevinskim kompozitima“, *Konferencija Savremeni materijali i konstrukcije sa regulativom*, Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije i IMS, Beograd
- [158] N. Ristić (2015): „Hidro-abrazivna otpornost betona spravljenog sa recikliranim materijalima i ojačanog mikrovlaknima“, *doktorska disertacija*, Univerzitet u Nišu, Građevinsko – arhitektonski fakultet Niš
- [159] Izveštaj: „Uputstvo za korisnike nusproizvoda i upotrebu sekundarnih sirovina u izgradnji puteva preuzeto iz <http://www.rmrc.unh.edu/tools/uguidelines/cfa51.asp> - Projekta za Republiku Srbiju G2G09/SB/5/4 u okviru kratkog G2G programa – Upotreba sekundarnih građevinskih materijala poput šljake, elektrofilterskog pepela i rudne jalovine iz rudnika u infrastrukturnim projektima
- [160] R. Siddique, M. I. Khan (2011): „Supplementary cementing materials“, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, ISBN 978-3-642-17865-8
- [161] ASTM C618: *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*
- [162] SRPS EN 197-1:2013: *Cement — Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cemente*
- [163] D. Khale, R. Chaudhary (2007): „Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review“, *Journal of materials science*, Vo. 42, pp. 729-746



- [164] A. M. Neville (1976): „Svojstva beton“, udžbenik, Izdavačko preduzeće Građevinska knjiga Beograd
- [165] A. Terzić, Lj. Pavlović, Z. Radojević, V. Pavlović, V. Mitić (2015): „Novel utilization of fly ash for high-temperature mortars: phase composition, microstructure and performances correlation“, International journal of applied ceramic technology, Vol. 12(1) pp. 133–146
- [166] S. Wang, L. Baxter, F. Fonseca (2008): „Biomass fly ash in concrete: SEM, EDX and ESEM analysis“, Fuel, Vol. 87(3), pp. 372–379
- [167] A. Džananović, N. Manić (2018): „Mogućnost upotrebe zgure visoke peći kao agregata u betonu“, Građevinski materijali i konstrukcije, Vol. 61 (3), pp. 67-78
- [168] SRPS EN 15167-1:2010: Mlevena granulirana zgora iz visokih peći za upotrebu u betonu, malteru i injekcionoj masi - Deo 1: Definicije, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti
- [169] M. Nedeljković (2019): Carbonation mechanism of alkali-activated fly ash and slag materials -in view of long-term performance predictions, doktorska disertacija, Delft University of Technology
- [170] H. Wan, Z. Shui, Z. Lin (2004): „Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties“, Cement and concrete research, Vol. 34, pp. 133-137
- [171] V. Maruthachalam, M. Palanisamy (2014): „Beton visokih uporabnih svojstava sa čeličanskom zgorom kao agregatom“, Građevinar, Vol. 66, pp. 605-612
- [172] I. Barišić, S. Dimter, I. Netinger (2010): „Possibilities of application of slag in road construction“, Technical Gazette, Vol. 4, pp. 523-528
- [173] C. Shi (2004): „Steel Slag—Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties“, Journal of materials in civil engineering, Vol. 16, pp. 230-236
- [174] I. Z. Yildirim, M. Prezzi (2011): „Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag“, Advances in Civil Engineering, doi:10.1155/2011/463638
- [175] M. Tossavainen, F. Engstrom, Q. Yang, N. Menad, M. L. Larsson, B. Bjorkman (2007): „Characteristics of steel slag under different cooling conditions“, Waste management, Vol. 27, pp. 1335-1344
- [176] N. Stjepanović, D. K. Hackenberger, B. K. Hackenberger, L. Zalić (2019): „Usage of steel slag as a construction material and in environmental applications“, Electronic journal of the faculty of civil engineering Osijek-E-GFOS, Vol. 10(19), pp. 13-22
- [177] T. Sofilić, A. Mladenović, V. Oreščanin, D. Barišić (2013): „Characterization of ladle furnace slag from the carbon steel production“, 13th International Foundrymen Conference Innovative Foundry Processes and Materials, Opatov, Croatia, pp. 354-369
- [178] D. Rakić, I. Basarić, Z. Berisavljević, D. Berisavljević (2016): „Geotechnical characteristics of industrial waste slag and sludge from Smederevo steel mill, Serbia“, Journal of environmental protection and ecology, Vol. 17 (2), pp- 512-522
- [179] I. Netinger, D. Bjegović, D. Varevac, D. Morić (2011): „Primjena zgure iz čeličana kao agregata u betonu“, Građevinar, Vol. 63 (2), pp. 169-175
- [180] T. Kosanić (2015): „Uticaj procesnih parametara na pirolizu drvne biomase“, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu
- [181] B. Milovanović, N. Štirmer, I. Carević, A. Baričević (2019): „Wood biomass ash as a raw material in concrete industry“, Građevinar, Vol. 71 (6), pp. 505-514



- [182] I. Dimitriou, D. Rutz (2015): Priručnik „Kulture kratkih ophodnji: uzgoj, korištenje i održivost“, WIP Renewable Energies, Munchen, Nemačka
- [183] S. Clarke, F. Preto (2019): „Biomass Burn Characteristics“, <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/11-033.htm> (pristupljeno 25.2.2020.)
- [184] D. Lončar, G. Krajačić, M. Vujanović (2009): „Podrška developerima - primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvenu biomasu“, Renewable Energy Resources Project GEF/IBRD Grant – TF054973, Project No. P071464, Zagreb
- [185] S. Chowdhury, M. Mishra, O. Suganya (2015): „The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: an overview“, Ain Shams Engineering Journal, Vol. 6(2), pp. 429-437
- [186] I. Obernberger, K. Supancic (2009): „Possibilities of ash utilisation from biomass combustion plants“, 17th European biomass conference & exhibition, Hamburg, pp. 2373-2384
- [187] K. Supancic, I. Obernberger, N. Kienzl, A. Arich (2014): „Conversion and leaching characteristics of biomass ashes during outdoor storage – Results of laboratory tests“, Biomass and bioenergy, Vol. 61, pp. 211-226
- [188] A. A. Khan, W. de Jong, P. J. Jansens, H. Spliethoff (2009): „Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies“, Fuel Processing Technology, Vol. 90(1), pp. 21-50
- [189] B. M. Jenkins, L. L. Baxter, T. R. Jr. Miles, T. R. Miles (1998): „Combustion properties of biomass“, Fuel Processing Technology, Vol. 54(1-3), pp. 17-46
- [190] J. Mikić, D. Lazić, J. P. -Škundrić, M. Perušić, D. Kešelj, D. Blagojević, G. Ostojić (2013): „Crveni mulj kao pigment u proizvodnji betonskih elemenata“, Reciklaža i održivi razvoj, Vol. 6, pp. 18-25
- [191] P. Wang, D. Y. Liu (2012): „Physical and chemical properties of sintering red mud and Bayer red mud and the implications for beneficial utilization“, Materials, Vol. 5, pp. 180-1810
- [192] K. K. Shetty, G. Nayak, V. Vijayan (2014): „Effect of red mud and iron ore tailings on the strength of selfcompacting concrete“, European scientific journal, Vol. 10(21), pp. 168-176
- [193] M. Čeček, M. Š. Išović (2019): „Mortovi s dodatkom lokalnih industrijskih proizvoda“, Građevinar, Vol. 71(1), pp. 1-7
- [194] M. Kadović, M. Klačnja, N. Blagojević, R. Vasiljević, Ž. Jaćimović (2004): „Tretman tečne faze sa deponije crvenog mulja u kombinatu aluminijuma Podgorica“, Hemijska industrija, Vol. 58(4), pp. 186-190
- [195] N. Ristić, Z. Grdić, G. T.– Čurčić, D. Grdić, I. Despotović (2016): „Svojstva samougrađujućeg betona spravljeno sa dodatkom otpadnih materijala kao mineralnog dodatka“, Konferencija Savremeni materijali i konstrukcije sa regulativom, pp. 11-20
- [196] S. Simić, M. Stanojević, N. Karličić (2017): „Specifičnosti upravljanja otpadnim staklom“, Zbornik međunarodnog kongresa o procesnoj industriji - procesing, Vol. 25(1), pp. 1-7
- [197] M. T. – Carrasco, F. Puertas (2015): „Waste glass in the geopolymer preparation. mechanical and microstructural characterisation“, Journal of cleaner production, Vol. 90(1), pp. 397-408



- [198] SRPS EN 13395-1:2010: Производи i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija - Metode ispitivanja - Određivanje obradljivosti - Deo 1: Ispitivanje rasprostiranja tiksotropnih maltera
- [199] Tehnički list – Sika ViscoCrete-5380 izdanje 7.12.2017.
- [200] Tehnički list – MasterGlenium ACE 770
- [201] SRPS EN 1015-6:2008/A1:2008: Metode ispitivanja maltera za zidanje - Deo 6: Određivanje zapreminske mase svežeg maltera - Izmena 1
- [202] SRPS EN 196-1:2017: Metode ispitivanja cementa – Deo 1: Određivanje čvrstoće
- [203] SRPS EN 12190:2010: Производи i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija - Metode ispitivanja - Određivanje čvrstoće pri pritisku maltera za sanaciju
- [204] SRPS EN 12504-4:2008: Ispitivanje betonskih konstrukcija - Deo 4: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa
- [205] SRPS EN 14617-5:2014: Veštački kamen — Metode ispitivanja — Deo 5: Određivanje otpornosti na zamrzavanje i odmrzavanje
- [206] CEN/TR 15697:2014: Cement — Ispitivanje performansi za otpornost na sulfate — Najnoviji izveštaj
- [207] DIN 38414-S4: German standard methods for the examination of water, waste water and sludge; sludge and sediments (group S); determination of leachability by water (S 4)
- [208] SRPS EN 12350-6:2019: Ispitivanje svežeg betona – Deo 6: Zapreminska masa
- [209] SRPS EN 12350-8:2019: Ispitivanje svežeg betona – Deo 8: Samougrađujući beton – Ispitivanje rasprostiranja sleganjem
- [210] SRPS EN 12350-10:2019: Ispitivanje svežeg betona – Deo 10: Samougrađujući beton - Ispitivanje pomoću L-kutije
- [211] SRPS EN 12350-11:2019: Ispitivanje svežeg betona – Deo 11: Samougrađujući beton – Ispitivanje segregacije pomoću sita
- [212] SRPS EN 12350-7:2019: Ispitivanje svežeg betona – Deo 7: Sadržaj vazduha – Metode pritiska
- [213] SRPS EN 12390-7:2019: Ispitivanje očvrslog betona - Deo 7: Zapreminska masa očvrslog betona
- [214] SRPS EN 12390-3:2019: Ispitivanje očvrslog betona - Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje
- [215] SRPS EN 12390-5:2019: Ispitivanje očvrslog betona – Deo 5: Čvrstoća pri savijanju uzoraka za ispitivanje
- [216] SRPS EN 12390-6:2012: Ispitivanje očvrslog betona - Deo 6: Čvrstoća pri cepanju zatezanjem uzoraka za ispitivanje
- [217] SRPS EN 1542:2010: Производи i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija - Metode ispitivanja - Merenje prionljivosti "pull-off" metodom
- [218] SRPS EN 12504-2:2014: Ispitivanje betonskih konstrukcija — Deo 2: Ispitivanje bez razaranja — Određivanje veličine odskoka
- [219] SRPS EN 12504-4:2008: Ispitivanje betonskih konstrukcija - Deo 4: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa
- [220] SRPS EN 12390-13:2015: Ispitivanje očvrslog betona — Deo 13: Određivanje sekantnog modula elastičnosti pri pritisku



- [221] SRPS EN 1340:2012: Betonski ivičnjaci – Zahtevi i metode ispitivanja, Prilog (E) – Određivanje ukupnog upijanja vode
- [222] UNI 6555:1973: Concrete made with aggregate maximum size 30 mm – hydraulic shrinkage determination
- [223] SRPS EN 12390-8:2019: Ispitivanje očvrslog betona – Deo 8: Dubina penetracije vode pod pritiskom
- [224] SRPS 1340:2012: Betonski ivičnjaci – Zahtevi i metode ispitivanja, Prilog (H) – Ispitivanje habanja u skladu sa ispitivanjem prema Bemcu
- [225] SRPS U.M1.206:2013: Beton – specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost – Pravila za primenu standarda SRPS EN 206-1
- [226] SRPS CEN/TS 12390-9:2017: Ispitivanje očvrslog betona – Deo 9: Otpornost na zamrzavanje/odmrzavanje – Ljuštenje
- [227] SRPS B.C8.023:1997: Cement – određivanje zapreminske mase
- [228] SRPS 196-3:2017: Metode ispitivanje cementa – Deo 3: Određivanje vremena vezivanja i stalnosti zapremine
- [229] SRPS B.C1.018:2015: Nemetalne mineralne sirovine — Pucolanski materijali — Sastojci za proizvodnju cementa — Klasifikacija, tehnički uslovi i metode ispitivanja
- [230] Z. Grdić (2011): „Tehnologija betona“, udžbenik, Univerzitet u Nišu, Građevinsko – arhitektonski fakultet
- [231] M. Karanac (2018): „Primena elektrofilterskog pepela modifikovanog kalcijum-hidroksidom i oksidima železa za uklanjanje jona teških metala iz vode“, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet
- [232] SRPS 196-2:2015: Metode ispitivanja cementa – Deo 2: Hemijske analize cementa
- [233] SRPS 196-3:2017: Metode ispitivanja cementa – Deo 3: Određivanje vremena vezivanja i stalnost zapremine
- [234] SRPS 196-6:2019: Metode ispitivanja cementa – Deo 6: Određivanje finoće mliva
- [235] SRPS 196-7:2010: Metode ispitivanja cementa – Deo 7: Metode uzimanja i pripreme uzoraka
- [236] SRPS 196-10:2017: Metode ispitivanja cementa – Deo 10: Određivanje sadržaja vodorastvorljivog hroma (VI) u cementu
- [237] SRPS CEN/TR 196-4:2009: Metode ispitivanja cementa – Deo 4: Kvantitativno određivanje sastojaka
- [238] SRPS B.C8.023:1997: Cement – Određivanje zapreminske mase
- [239] ASTM E291 – 18: Standard test methods for chemical analysis of caustic soda and caustic potash (sodium hydroxide and potassium hydroxide)
- [240] SRPS 933-1:2013: Ispitivanje granulometrijskih svojstava agregata – Deo 1: Određivanje granulometrijskog sastava – Metoda prosejavanja
- [241] SRPS B.B2.010:1986: Separisani agregat (granulat) za beton – Tehnički uslovi
- [242] SRPS B.B3.100:1983: Kameni agregat – Frakcionisani kameni agregat za beton i asfalt – Osnovni uslovi kvaliteta
- [243] SRPS 1015-3:2008: Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 3: Određivanje konzistencije svežeg maltera (pomoću potresnog stola)
- [244] Y. Fang, O. Kayali (2013): „The fate of water in fly ash-based geopolymers“, Construction and Building Materials, 39, Vol. 39, pp. 89-94



- [245] T. Bakharev (2005): „Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing“, Cement and concrete research, Vol. 35(6), pp. 1224-1232
- [246] SRPS 1015-7:2008: Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 7: Određivanje sadržaja vazduha u svežem malteru
- [247] SRPS U.M1.042:1998: Beton – Očvrslu beton – Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa
- [248] D. Grdić, N. Ristić, G. T. – Ćurčić (2013): „Uticaj dodataka reciklirane gume i recikliranog stakla na promenu ultrazvuka u betonu“, Građevinski materijali i konstrukcije, Vol. 56(3), pp. 29-41
- [249] M. Muravljov (2002): „Građevinski materijali – iv izdanje“, udžbenik, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet
- [250] D. Križan, M. Komljenović (2008): „Properties of alkali activated slag mortar“, 3th International symposium non-traditional cement and concrete, Brno, Czech Republic, pp. 429–40
- [251] C. Shi (1996): „Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars“, Cement and concrete research, Vol. 26(12), pp. 1789-1799
- [252] URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=28292> (pristupljeno 8.4.2020.)
- [253] Pravilnik o dozvoljenim količinama opasnih i štetnih materija u zemljištu i vodi za navodnjavanje i metodama njihovog ispitivanja objavljenom u „Službenom glasniku RS“ broj 23 od 18.3.1994
- [254] B. Jović (2010): „Uporedno FTIR spektroskopsko ispitivanje N-H...O i N-H...π vodonične veze odabranih N-supstituisanih amida“, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet departman za hemiju, biohemiju i zaštitu životne sredine
- [255] M. Criado, A. F.– Jimenez, A. Palomo (2007): „Alkali activation of fly ash: Effect of the SiO₂/Na₂O ratio: Part I: FTIR study“, Microporous and mesoporous materials, Vol. 106(1-3), pp. 180-191
- [256] I. Despotović (2015): „Svojstva samougrađujućeg betona spravljenog sa recikliranim agregatom i različitim mineralnim dodacima“, Građevinski materijali i konstrukcije, Vol. 58(4), pp. 3-20
- [257] The European guidelines for self-compacting concrete, Specification, production and use (2005), The self-compacting concrete European project group
- [258] SRPS EN 12350-1:2019: Ispitivanje svežeg betona – Deo 1: Uzorkovanje i uobičajena primena
- [259] ISO 3310-2:1994: Test sieves – Technical requirements and testing – Part 2: Test sieves of perforated metal mlate
- [260] A. M. Rashad (2012): „Properties of alkali-activated fly ash concrete blended with slag“, Iranian journal of materials science & engineering, Vol. 10(1), pp. 57-64
- [261] E. Pereira, M. H. F. De Medeiros (2012): „Pull Off test to evaluate the compressive strength of concrete: an alternative to Brazilian standard techniques“, Ibracon structures and materials journal, Vol. 12(6), pp. 757-780
- [262] F. S. Pierre, A. Philibert, B. Giroux, P. Rivard (2016): „Concrete quality designation based on ultrasonic pulse velocity“, Construction and building materials, Vol. 125, pp. 1022-1027



- [263] M. Benaicha, O. Jalbaud, A. H. Alaoui, Y. Burtschell (2015): „Correlation between the mechanical behavior and the ultrasonic velocity of fiber-reinforced concrete“, *Construction and building materials*, Vol. 101(1), pp. 702-709
- [264] SRPS 12390-1:2014: Ispitivanje očvrstlog betona – Deo 1: Oblik, mere i ostali zahtevi za uzorke i kalupe
- [265] SRPS 12504-1:2019: Ispitivanje betona u konstrukcijama – Deo 1: Jezgrovani uzorci (kernovi) – Uzimanje, pregled i ispitivanje pri pritisku
- [266] SRPS 12390-4:2019: Ispitivanje očvrstlog betona – Deo 4: Čvrstoća pri pritisku – Specifikacija uređaja za ispitivanje
- [267] SRPS EN ISO 9513:2014: Metalni materijali – Kalibracija sistema ekstenzometara koji se koriste prilikom jednoosnih ispitivanja
- [268] P. S. Deb, P. Nath, P. K. Sarker (2015): „Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature“, *The 5th International conference of Euro Asia civil engineering forum (EACEF-5)*, *Procedia engineering*, Vol. 125, pp. 594-600
- [269] S. E. Wallah (2009): „Drying shrinkage of heat-cured fly ash-based geopolymer concrete“, *Modern applied science*, Vol. 3(12), pp. 14-21
- [270] J. M. Their, M. Ozakca (2018): „Developing geopolymer concrete by using cold-bonded fly ash aggregate, nano-silica, and steel fiber“, *Construction and building materials*, Vol. 180, pp. 12-22
- [271] A. S. Mahmoud, G. J. Khoshnaw, F. I. Mahmood (2017): „Engineering and microstructures characteristics of low Calcium fly ash based geopolymer concrete“, *3rd International engineering conference on developments in civil & computer engineering applications*, doi: 10.23918/iec2017.09, pp. 75-89
- [272] J. Temuujin, A. Minjigmaa, B. Davaabal, U. Bayarzul, A. Ankhtuya, Ts. Jadambaa, K. J. D. MacKenzie (2014): „Utilization of radioactive high-calcium Mongolian fly ash for the preparation of alkali-activated geopolymers for safe use as construction materials“, *Ceramics international*, Vol. 40(10B), pp. 16475–16483
- [273] M. A. R. Bhutta, W. M. Hussin, M. Azreen, M. M. Tahir (2014): „Sulphate resistance of geopolymer concrete prepared from blended waste fuel ash“, *Journal of materials in civil engineering*, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001030, Vol. 26
- [274] S. E. Wallah, D. Hardjito, D. M. J. Sumajouw, B. V. Rangan (2005): „Sulfate and acid resistance of fly ash-based geopolymer concrete“. *Proceedings of the Australian structural engineering conference*, Australia



ЛИСТА СЛИКА:

Слика 2.1	Поређење садржаја појединих хемијских елемената алуминосиликатних материјала са портланд цементом и калцијум сулфоалуминантним цементом [4].....	8
Слика 3.1	Шематски дијаграми справљања цементних композита [20]	13
Слика 3.2	Шематски дијаграми справљања геополимерних композита [20]	14
Слика 3.3	Структурални модел C-S-H гела [3].....	15
Слика 3.4	Формирање C-S-H гела услед судејства високопећне згуре и алкалних раствора [23]	16
Слика 3.5	Структура наночестице C-S-H гела: плави троугао представља Si, црвени троугао представља Al, зелени правоугаоници представљају слојеве CaO а кружићи предствалају међузависне слојеве [30].....	16
Слика 3.6	Структурални модел N-A-S-H гела [3]	17
Слика 3.7	Структурални модел N-A-S-H гела [23]	17
Слика 3.8	Пројектни модел формираног тродимензионалног N-A-S-H гела [23] ...	18
Слика 3.9	Продукти реакције активирања чврстих алуминосиликата и алкалних раствора [30]	20
Слика 3.10	Производња натријум силиката [20]	21
Слика 3.11	Производња натријум хидроксида [20].....	21
Слика 3.12	Структура: а) поли(сиалат), б) поли(сиалат-силорсо) и вб) поли(сиалат-дисилорсо) решетке [19].....	22
Слика 3.13	Молекуларно представљање полимерне M_n $-(-Si-O-Al-O-)_n$, поли(сиалат) и M_n $-(-Si-O-Al-O-Si-O-)_n$) поли(сиалат-силорсо) и других структура [45]	23
Слика 3.14	Микроструктура геополимера справљеног са 8M NaOH: метакаолин (лево), електрофилтерски пепео (десно) [2]	24
Слика 3.15	Модел механизма геополимеризације [2]	25
Слика 4.1	Глобална антропогена емисија CO ₂ која је у вези са енергијом и индустријским процесима: за све секторе (лево) и за индустрију (десно) [47]	26
Слика 4.2	Испитивање слегања геополимерног бетона (лево) и изглед бетона након справљања (десно) [55].....	28



Слика 4.3	Активација геополимерних мешавина негованих на температури од 85 °C у трајању од 24 h и справљених са раствором: мешавина 1 - NaOH (лево) и мешавина 3 - NaOH и Na ₂ SiO ₃ (десно) [38].....	29
Слика 4.4	Чврстоћа при притиску: лево) бетона, десно) малтера који су очвршћавали у температурним условима (60 °C у трајању од 24 часа) и у амбијенталним условима [25]	33
Слика 4.5	Распростирање и чврстоћа при притиску малтера справљеног шљакe различите финоће млива [71]	34
Слика 4.6	Распростирање геополимерног малтера справљеног са електрофилтерским пепелом финоће млива 0.063 mm (FA<0.063), 0.09 mm (FA<0.09) и 0.125 mm (FA<0.125) који је очвршћавао на температури од 95 °C у трајању од 24 h [75]	35
Слика 4.7	Чврстоћа при савијању (лево) и чврстоћа при притиску (десно) геополимерног малтера са додатком 0, 10, 20 и 30 % дрвног пепела из биомасе [89]	39
Слика 4.8	Чврстоћа при притиску бетона на бази електрофилтерског пепела FA2 (лево) и FA8 (десно) [109]	43
Слика 4.9	Промена чврстоће при притиску геополимерног малтера након 25 циклуса смрзавања и одмрзавања (FA - електрофилтерски пепео, NZ - зеолит, GGBS - гранулисана згура високе пећи) [136]	48
Слика 4.10	SEM микроструктура узорка потопљеног у раствор MgSO ₄ : (A) кристали гипса, (B) гел у којем су садржани Mg, Si и Al [145]	51
Слика 4.11	Физичке промене на узорцима справљеним са различитим водовезивним факторима: A = 0.4, B=0.5 и C=0.6 након потапања у 5% раствор Na ₂ SO ₄ (лево) и MgSO ₄ (десно) у трајању од 90 дана [145].....	53
Слика 5.1	Производња а) цемента, б) електрофилтерског пепела [20]	61
Слика 5.2	Искоришћење електрофилтерског пепела у САД током 2006. године [159]	61
Слика 5.7	Изглед гранулисане згуре високе пећи приликом депоновања.....	63
Слика 5.8	Изглед зрна (SEM) гранулисане згуре високе пећи уситљене а) кугличним млином б) вибро млином в) ваздушним млином г) кугличним млином [170]	64
Слика 5.9	Изглед челичанске згуре након депоновања	65



Слика 5.10	Технолошки процес настајања гранулисана згуре високе пећи (лево), технолошки процес настајања челичанске згуре (десно) [174].....	66
Слика 5.11	Термохемијски процеси прераде дрвне биомасе [180].....	67
Слика 5.12	Шематски приказ стварања пепела током процеса сагоревања биомасе на решетки [181].....	68
Слика 5.13	Пепео биомасе: пепео са дна пећи (лево), крупан летећи пепео (средина) и ситан летећи пепео (десно).....	68
Слика 5.14	Пепео биомасе: пепео са дна пећи (лево), крупан летећи пепео (средина) и ситан летећи пепео (десно) [181].....	69
Слика 5.15	Изглед црвеног муља насталог: Бајеровим процесом после филтрирања под притиском (лево), након примене синтер поступка (десно) [191].....	70
Слика 5.16	Изглед зрна (SEM) црвеног муља: Бејеров поступак (лево), синтер процес (десно)[191].....	72
Слика 6.1	Утицај различите финоће млива електрофилтерског пепела на конзистенцију и чврстоћу при савијању геополимерног малтера старости узорака 3 дана.....	75
Слика 6.2	Утицај различите финоће млива електрофилтерског пепела на чврстоћу при притиску геополимерног малтера.....	76
Слика 6.3	Утицај суперластификатора на конзистенцију и чврстоћу при савијању геополимерног малтера при старости узорака од 3 дана.....	79
Слика 6.4	Утицај суперпластификатора на чврстоћу при притиску геополимерног малтера на бази електрофилтерског пепела.....	79
Слика 6.5	Узорци геополимерног малтера након испитивања: горе - узорци мешавине „FA“, средина - „FA S“, доле – узорци мешавине „FA B“.....	80
Слика 6.6	Коришћени везивни материјали: електрофилтерски пепео (лево) и млевена гранулисана згура (десно).....	81
Слика 6.7	Резултати испитивања чврстоће при савијању.....	84
Слика 6.8	Резултати испитивања чврстоће на савијање и чврстоће на притисак.....	85
Слика 7.1	Програм експерименталног истраживања.....	89
Слика 7.2	Узорак електрофилтерског пепела припремљеног за испитивање.....	93
Слика 7.3	Гранулисана згура из високе пећи: узоркован материјал (лево), материјал припремљене за справљање малтера и бетон (десно).....	94



Слика 7.4	Конверска (челичанска) згура: узоркован материјал (лево), материјал припремљене за справљање малтера и бетон (десно)	95
Слика 7.5	Изглед пепела из дрвне биомасе: узоркован материјал (лево), материјал припремљене за справљање малтера и бетон (десно)	95
Слика 7.6	Узорак црвеног муља припремљеног за испитивање	96
Слика 7.7	Изглед отпадног стакла: узоркован материјал (лево), материјал припремљене за справљање малтера и бетон (десно)	97
Слика 7.8	Изглед узорака малтера справљеног различитим индустријским нуспроизводима након вађења из лимених кутија: FA - електрофилтерски пепео, GGBFS - гранулисана згура из високе пећи, SS - конверторска згура, BIOA - пепео из дрвне биомасе, RM - црвени муљ и G - отпадно стакло	101
Слика 7.9-1	Испитивање индекса активности: мерење распрострања на потресном столу (лево), изглед узорака очврслог малтера справљеног додатком (десно): FA - електрофилтерски пепео, GGBFS - гранулисана згура из високе пећи и SS – конверторска згура.....	104
Слика 7.9-2	Испитивање индекса активности: мерење распрострања на потресном столу (лево), изглед узорака очврслих малтера справљених са додатком (десно): BIOA - пепео из дрвне биомасе, RM - црвени муљ и G - отпадно стакло.....	105
Слика 7.10	SEM фотоприказ узорака у растреситом стању: FA - електрофилтерски пепео, GGBFS - гранулисана згура из високе пећи и SS - челичанска згура BIOA - пепео из дрвне биомасе, RM - црвени муљ и G - отпадно стакло	107
Слика 7.11	Изглед зрна електрофилтерског пепела са увећањем 500 пута (лево) и 2000 пута (десно).....	108
Слика 7.12	Изглед зрна гранулисане згуре из високе пећи са увећањем 200 пута (лево) и 2000 пута (десно).....	108
Слика 7.13	Изглед зрна конверторксе згуре са увећањем 500 пута (лево) и 3500 пута (десно)	109
Слика 7.14	Изглед зрна пепела из дрвне биомасе са увећањем 500 пута (лево) и 3500 пута (десно).....	109



Слика 7.15	Изглед зрна црвеног муља са увећањем 5000 пута (лево) и 1000 пута (десно)	110
Слика 7.16	Изглед зрна отадног стакла са увећањем 1000 пута (лево) и 3500 пута (десно)	110
Слика 7.17	Суперпластификатор комерцијалног назива Sika ViscoCrete 5380	114
Слика 7.18	Гранулометријски састав фракције 0/4 mm сепарације „Браћа Цветковић“ и фракција 4/8 и 8/16 mm сепарације „Раков Дол“	118
Слика 7.19	Лабораторијски миксер "Hobart N-50"	121
Слика 7.20	Шематски приказ потресног стола за испитивање распростирања малтера за зидање: 1- метални калуп, 2-ветикално вратило, 3-плоча стола, 4-механизам за подизање, 5 – мерна површина, 6- хоризонтално вратило, 7-ручица (димензије дате на шеми су у mm)[243]	122
Слика 7.21	Приказ мере распростирања малтера у mm	124
Слика 7.22	Испитивање чврстоће при притиску малтера	129
Слика 7.23-1	Приказ чврстоћа при притиску малтера старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана.	130
Слика 7.23-2	Приказ чврстоћа при притиску малтера са додатком гранулисане згуре високе пећи старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана	131
Слика 7.23-3	Приказ чврстоћа при притиску малтера са додатком конверторске згуре старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана	131
Слика 7.23-4	Приказ чврстоћа при притиску малтера са додатком пепела из дрвне биомасе старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана	131
Слика 7.23-5	Приказ чврстоћа при притиску малтера са додатком црвеног муља старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана	132
Слика 7.23-6	Приказ чврстоћа при притиску малтера са додатком отпадног стакла старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана	132
Слика 7.23-7	Приказ чврстоћа при притиску цементног малтера старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана	132
Слика 7.24	Испитивање чврстоће при савијању малтера слика из стандарда [202] .	140
Слика 7.25	Приказ чврстоћа при савијању малтера старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана .	142
Слика 7.26	Испитивање брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтерску призму	150
Слика 7.27	Приказ брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтерске призме старости 2, 7, 28, 56 и 90 дана	155



Слика 7.28	Дијаграм зависности чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса малтера справљеног са додатком конверторске згуре.....	156
Слика 7.29	Изглед узорака након 25 циклуса циклуса смрзавања и одмрзавања.....	160
Слика 7.30-1	Чврстоћа при савијању малтера након 25 циклуса циклуса смрзавања и одмрзавања (чврстоћа при савијању).....	163
Слика 7.30-2	Чврстоћа при притиску малтера након 25 циклуса циклуса смрзавања и одмрзавања (чврстоћа при притиску).....	164
Слика 7.30-3	Коефицијент отпорности на циклусе смрзавања и одмрзавања Км (промена чврстоће при притиску).....	165
Слика 7.30-4	Коефицијент отпорности на циклусе смрзавања и одмрзавања Км (промена масе).....	165
Слика 7.31	Узорци потопљени у 5 % раствор Na_2SO_4	170
Слика 7.32	Изглед узорака након 180 дана од потапања у 5 % раствор Na_2SO_4	171
Слика 7.33-1	Чврстоћа при савијању малтера изложених дејству 5 % раствора Na_2SO_4 у трајању од 180 дана.....	173
Слика 7.33-2	Чврстоћа при притиску малтера изложених дејству 5 % раствора Na_2SO_4 у трајању од 180 дана.....	174
Слика 7.33-3	Коефицијент отпорности на дејство сулфата (σ_{sf})/(σ_{sf}) (промена чврстоће при савијању).....	175
Слика 7.33-4	Коефицијент отпорности на дејство сулфата (σ_{sc})/(σ_{sc}). (промена чврстоће при притиску).....	175
Слика 7.34	Апаратура коришћена за добијања елуата.....	180
Слика 7.35	FT-IR спектар малтерских мешавина: Узорак 1 – „FA“, Узорак 2 – „20 GGBFS“, Узорак 15 – „20 SS“, Узорак 14 – „20 BIO A“, Узорак 7- „20 RM“, Узорак 22 – „20 G“, Узорак цемент – „E II“.....	183
Слика 7.36	Гранулометријски састав мешавине коришћене за справљање бетона..	187
Слика 7.37	Лабораторијска мешалица са вертикалном осовином „Металика“ Сопот.....	188
Слика 7.38	Изглед самоуграђујуће геополимерне бетонске мешавине ознаке „FA“ одмах након справљања.....	189
Слика 7.39	Свеж геополимерни бетон уграђен у калупе.....	190
Слика 7.40	Испитивање запреминске масе свежег бетона.....	191



Слика 7.41	Испитивање флуидности бетона: лево: апаратура за испитивање степена флуидности и вискозности бетона [257]; десно: испитивање распрострањања методом slump flow теста.....	192
Слика 7.42-1	Апаратура за испитивање способности пролаза између арматуре - L box тест [257].	193
Слика 7.42-2	Испитивање способности пролаза између арматуре - L box тест.....	193
Слика 7.43	Испитивање отпорности на сагрегацију	194
Слика 7.44	Испитивање садржаја увученог ваздуха	195
Слика 7.45	Испитивање запреминске масе очврслог бетона	198
Слика 7.46	Дијаграм испитивања запреминске масе очврслог бетона.....	199
Слика 7.47	Испитивање чврстоће при притиску бетона (лево), изглед узорака након лома (десно)	200
Слика 7.48	Приказ чврстоће при притиску очврслог бетона старости од 2, 7, 28 и 90 дана	202
Слика 7.49	Дијаграм промене чврстоће при притиску бетонских епрувета у функцији времена	202
Слика 7.50	Упоредне чврстоће при притиску серија малтера и бетона старости 2 дана	204
Слика 7.51	Испитивање чврстоће при затезању савијањем бетона	208
Слика 7.51-2	Резултати испитивања чврстоће при затезању савијањем бетона.....	209
Слика 7.52	Испитивање чврстоће при затезању цепањем	211
Слика 7.52	Резултати испитивања чврстоће при затезању цепањем	213
Слика 7.53	Приказ транзитних зона геополимерних и цементних бетона: а) узорак геополимерног еталон бетона ознаке „FA“справљеног са електрофилтерским пепелом као везивом, б) шематски приказ геополимерног и цементног бетона [169]	214
Слика 7.54	Испитивање чврстоће при затезању методом „Pull-off“	216
Слика 7.55	Резултати испитивања чврстоће при затезању бетона старости 90 дана методом „Pull-off“	218
Слика 7.56	Поступак одређивања одскочног броја склерометром [261]	220
Слика 7.57	Испитивање одскочног броја склерометром на узорку геополимерног бетона	221



Слика 7.58	Индекс одскока склерометра бетона старости 90 дана	222
Слика 7.59	Испитивање брзине проласка ултразвучног импулса кроз бетон	225
Слика 7.60	Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса	226
Слика 7.61	Дијаграм зависности чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса бетона.....	227
Слика 7.62	Наношење циклуса оптерећења при одређивању модула еластичности према стандарду SRPS EN 12390-13:2015 [220].....	231
Слика 7.63	Одређивање модула еластичности при притиску – извод из софтвера ..	232
Слика 7.64	Резултати испитивања статичког модула еластичности бетона старости 90 данa	233
Слика 7.65	Резултати испитивања упијања воде под атмосферским притиском.....	236
Слика 7.66	Испитивање скупљања геополимерних бетонских узорака ознаке FA“ и „20 RM“	239
Слика 7.67	Резултати испитивања скупљања услед сушења бетона старости 3 до 90 данa	240
Слика 7.68	Испитивање дубине пенетрације воде под притиском.....	242
Слика 7.69	Изглед узорка након испитивања	243
Слика 7.70	Испитивање отпорности бетона према хабању брушењем.....	247
Слика 7.71	Резултати испитивања отпорности према хабању брушењем бетона старости 90 данa	249
Слика 7.72	Испитивање отпорности на дејство мрза	252
Слика 7.73	Узорци за испитивање отпорности површине бетона на замрзавање/одмрзавање уз присуство агенаса за одмрзавање.....	258
Слика 7.74	Изглед узорка припремљених за испитивање отпорности на дејство сулфата	263
Слика 7.75	Резултати испитивања отпорности на дејство сулфата након 3 и 6 месеци	265
Слика 7.76	Skening електронски микроскоп Joel, JSM 5300	267
Слика 7.77-1	SEM анализа испитиваних узорака бетона: а) FA, б) 20 GGBFS и в) 20 SS	268
Слика 7.77-2	SEM анализа испитиваних узорака бетона: г) 20 BIO A, д) 20 RM и њ) 20G	269
Слика 7.77-3	SEM анализа испитиваних узорака бетона: е) E II и ж) E III.....	270



ЛИСТА ТАБЕЛА:

Табела 2.1	Преглед важнијих истраживања у области алкалима активираних материјала [18].....	12
Табела 3.1	Карактеристике геополимерног бетона [46].....	25
Табела 4.2	Карактеристике геополимерног бетона [21].....	36
Табела 4.3	Карактеристике геополимера.....	40
Табела 4.4	Карактеристике геополимерног бетона.....	42
Табела 4.5	Карактеристике геополимерног бетона.....	44
Табела 4.6	Карактеристике самоуграђујућег геополимерног бетона [128].....	46
Табела 4.7	Промена масе узорака након излагања дејству сулфатног раствора [146].....	52
Табела 5.1	Процентуални садржај хемијских једињења електрофилтерског пепела у односу на врсту употребљеног угља [159].....	59
Табела 5.2	Захтеви које електрофилтерски пепео треба да испуни према стандардима EN 450-1 и ASTM C618.....	60
Табела 5.4	Процентуални садржај хемијских једињења челичанских згура [173].....	65
Табела 5.5	Садржај тешких метала у пепелу са дна пећи и дрвном летећем пепелу [181].....	69
Табела 5.6	Хемијски састав узорка црвеног муља добијеног Бајеровим поступком и синтер поступком [191].....	71
Табела 5.7	Садржај тешких метала узорка црвеног муља добијеног Бајеровим поступком и синтер поступком [191].....	71
Табела 6.1	Састав малтерских мешавина коришћених за одређивање оптималне финоће млива.....	75
Табела 6.2	Физичке и хемијске карактеристике суперпластификатора.....	77
Табела 6.3	Састав малтерских мешавина.....	78
Табела 6.4	Састав геополимерних малтерских мешавина.....	82
Табела 6.5	Резултати испитиване конзистенције и запреминске масе у свежем стању геополимерних малтерских мешавина.....	83
Табела 6.6	Запреминска маса и брзина проласка ултразвучног импулса кроз очврсле призме старости 3, 7 и 28 дана.....	84
Табела 7.1	Методe коришћене за испитивање малтера.....	91
Табела 7.2	Спроведена испитивања на бетону.....	92



Табела 7.3	Хемијски састав коришћених везивних материјала	97
Табела 7.4	Физичке особине коришћених везивних материјала	99
Табела 7.5	Чврстоћа при савијању и чврстоћа при притиску малтера приликом провере пуцоланске активности електрофилтерског пепела	100
Табела 7.6	Индекс активности коришћених индустријских нуспроизводних материјала	103
Табела 7.7	Састав, физичко-механичке и хемијске карактеристике СЕМ II А-L 42,5R произвођача CRH (Србија) д.о.о. Поповац	111
Табела 7.8	Састав, физичко-механичке и хемијске карактеристике СЕМ III/B 32,5 N-LH/SR произвођача CRH (Србија) д.о.о. Поповац	112
Табела 7.9	Хемијски састав натријум хидроксида произвођача Oltchim S.A. из Румуније	113
Табела 7.10	Резултати испитивања својстава речног агрегата фракције 0/4 mm пореклом из Јужне Мораве	115
Табела 7.11	Резултати испитивања својстава дробљеног агрегата сепарације „Раков дол“	116
Табела 7.12	Гранулометријски састав фракција коришћених агрегата	117
Табела 7.13	Састав експерименталних малтерских мешавина	120
Табела 7.14	Резултати испитивања конзистенције малтера методом потресног стола	123
Табела 7.15	Резултати испитивања запреминске масе свежег малтера	127
Табела 7.16-1	Резултати испитивања чврстоће при притиску малтера	133
Табела 7.16-2	Резултати испитивања чврстоће при притиску малтера справљеног са додатком гранулисане згуре високе пећи	134
Табела 7.16-3	Резултати испитивања чврстоће при притиску малтера справљеног са додатком конвертоске згуре	134
Табела 7.16-4	Резултати испитивања чврстоће при притиску малтера справљеног са додатком пепела дрвне биомасе	135
Табела 7.16-5	Резултати испитивања чврстоће при притиску малтера справљеног са додатком црвеног муља	135
Табела 7.16-6	Резултати испитивања чврстоће при притиску малтера справљеног са додатком отпадног стакла	136



Табела 7.16-7 Резултати испитивања чврстоће при притиску цементног малтера	136
Табела 7.17-1 Резултати испитивања чврстоће при савијању малтера	143
Табела 7.17-2 Резултати испитивања чврстоће при савијању малтера справљеног са додатком гранулисане згуре високе пећи	144
Табела 7.17-3 Резултати испитивања чврстоће при савијању малтера справљеног са додатком конвертоске згуре	144
Табела 7.17-4 Резултати испитивања чврстоће при савијању малтера справљеног са додатком пепела из дрвне биомасе	145
Табела 7.17-5 Резултати испитивања чврстоће при савијању малтера справљеног са додатком црвеног муља	145
Табела 7.17-6 Резултати испитивања чврстоће при савијању малтера справљеног са додатком отпадног стакла	146
Табела 7.17-7 Резултати испитивања чврстоће при савијању цементног малтера	146
Табела 7.18-1 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтерске призме	151
Табела 7.18-2 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтерске призме справљене са додатком гранулисне згуре из високе пећи	152
Табела 7.18-3 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтерске призме справљене са додатком конверторске згуре	152
Табела 7.18-4 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтерске призме справљене са додатком пепела из дрвне биомасе	153
Табела 7.18-5 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтерске призме справљене са додатком црвеног муља	153
Табела 7.18-6 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтерске призме справљене са додатком отпадног стакла	154
Табела 7.18-7 Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса кроз малтерске призме справљене са цементом	154
Табела 7.19 Математичке функције промене чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса и коефицијенти корелације	157



Табела 7.20-1	Резултати испитивања отпорности на дејство мраза.....	161
Табела 7.20-2	Резултати испитивања отпорности на дејство мраза у погледу промене масе	162
Табела 7.21	Резултати испитивања отпорности на дејство сулфата након 180 дана од потпања у 5 % раствор Na_2SO_4	172
Табела 7.22	Резултати испитивања елуата добијеног из малтерских мешавина	181
Табела 7.23	Гранулометријски састав фракција коришћених агрегата.....	186
Табела 7.24	Састав експерименталних бетонских мешавина.....	188
Табела 7.25	Резултати испитивања бетона у свежем стању	195
Табела 7.26	Резултати испитивања запреминске масе бетона при старости од 2, 7, 28 и 90 дана	198
Табела 7.26	Резултати испитивања чврстоће при притиску бетона при старости од 2, 7, 28 и 90 дана	201
Табела 7.47	Математичке функције промене чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса и коефицијенти корелације	203
Табела 7.48	Резултати испитивања чврстоће при затезању савијањем бетона.....	209
Табела 7.49	Резултати испитивања чврстоће при затезању цепањем бетона	212
Табела 7.50	Резултати испитивања чврстоћа при затезању чупањем „Pull-off“ методом	217
Табела 7.51	Резултати испитивања индекса одскока склерометра	221
Табела 7.52	Смернице за одређивање квалитета бетона зановано на одскочном броју склерометра [384/14].....	223
Табела 7.53	Смернице за одређивање квалитета бетона зановано на брзини проласка ултразвучног импулса [384/14]	224
Табела 7.54	Резултати испитивања брзине проласка ултразвучног импулса	225
Табела 7.55	Математичке функције промене чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса и коефицијенти корелације	227
Табела 7.56	Резултати испитивања статичког модула еластичности при притиску ..	233
Табела 7.57	Резултати испитивања упијања воде при атмосферском притиску	237
Табела 7.58	Резултати испитивања скупљања бетона.....	240
Табела 7.59	Резултати испитивања водонепропусности бетона	244
Табела 7.60	Резултати испитивања отпорности бетона према хабању брушењем.....	248
Табела 7.61	Резултати испитивања отпорности на дејство мраза.....	253



Табела 7.62	Резултати испитивања површине бетона на замрзавање/одмрзавање уз присуство агенаса за одмрзавање	259
Табела 7.63	Резултати испитивања коефицијента отпорности бетона на дејство сулфата	264
Табела 7.64	Резултати испитивања визуалних промена, коефицијената промене масе и рН вредности	264



ОЗНАКЕ КОРИШЋЕНЕ У ДИСЕРТАЦИЈИ

Ознака	Јед.	Значење ознаке
Kb	-	однос процентно – масеног садржаја (CaO+MgO)/(SiO ₂ + Al ₂ O ₃)
V	m/s	брзина проласка ултразвучног импулса
σ_f	MPa	најмања чврстоћа на затезање при савијању
σ_c	MPa	најмања чврстоћа при притиску
w/b	-	водовезивни фактор
SP	%	суперпластификатор
$f_{p,i}$	MPa	чврстоћа при притиску
$\Delta f_{p,i(t)}$	%	процентуална разлика чврстоће при притиску
F_p	N	сила при притиску која изазива лом
A	mm ²	површина попречног пресека на којој делује сила
$f_{s,i}$	MPa	чврстоћа при савијању
F_s	N	измерена сила при савијању која је изазвала лом призме
l_0	mm	осовинско растојање између ослонаца призме
b	mm	ширина попречног пресека призме
h	mm	висина попречног пресека призме
$\Delta f_{s,i(t)}$	%	процентуална разлика чврстоће при савијању малтера старости (t) дана
v_{uz}	m/s	брзина проласка ултразвучног импулса
L	m	дужина пута
t	s	време потребно да импулс пређе задати пут
$\Delta v_{uz(t)}$	%	процентуална разлика чврстоће при притиску малтера старости (t) дана
R ²	-	кофицијент корелације
KM _{f25}	-	кофицијент отпорности на дејство мраза у погледу чврстоће при савијању
KM _{c25}	-	кофицијент отпорности на дејство мраза у погледу чврстоће при притиску
RM _f	MPa	чврстоћа при савијању узорак излаганих циклусима смрзавања и одмрзавања
R _f	MPa	чврстоћа при савијању референтних узорак који су до времена испитивања неговани у амбијенталним условима
RM _c	MPa	чврстоћа при притиску узорак излаганих циклусима смрзавања и одмрзавања
R _c	MPa	чврстоћа при притиску референтних узорак који су до времена испитивања неговани у амбијенталним условима
K _m	-	кофицијент промене масе услед излагања узорак циклусима смрзавања и одмрзавања
m ₂₅	g	маса узорак излаганих циклусима смрзавања и одмрзавања
m	g	маса узорак на почетку испитивања



$K_{\sigma f}$	-	коэффициент отпорности на дејство сулфата у погледу чврстоће при савијању
σ_{sf}	<i>MPa</i>	чврстоћа при савијању узорка излаганих дејству сулфатног раствора
σ_{rf}	<i>MPa</i>	чврстоћа при савијању референтних узорака тј. еталон узорака који нису излагани дејству сулфатног раствора
$K_{\sigma c}$	-	коэффициент отпорности на дејство сулфата у погледу чврстоће при притиску
σ_{sc}	<i>MPa</i>	чврстоћа при притиску узорака излаганих дејству сулфатног раствора
σ_{rc}	<i>MPa</i>	чврстоћа при притиску референтних узорака тј. еталон узорака који нису излагани дејству сулфатног раствора
ЕС	$\mu S/m$	електропроводљивост
МДК	mg/l	максималне дозвољене вредности
H1	<i>cm</i>	дебљина свежег бетона на делу вертикалне преграде
H2	<i>cm</i>	дебљина свежег бетона на супротном делу L box-a.
РА	-	коэффициент односа висина
SR	%	отпорност на сагрегацију
m_{ps}	<i>kg</i>	маса прихватне посуде и бетона који је прошао кроз сито
m_p	<i>kg</i>	маса прихватне посуде
m_c	<i>kg</i>	почетна маса бетона на сити
γ_b	kg/m^3	запреминска маса бетона
m_b	<i>kg</i>	маса бетонског узорка
V_b	m^3	запремина бетонског узорка
f_{pb}	<i>MPa</i>	чврстоћа при притиску бетона
$\Delta f_{pb(t)}$	%	процентуална разлика чврстоће при притиску бетона старости t дана
f_{zs}	<i>MPa</i>	чврстоћа при затезању савијањем
M_{gr}	kN/m	максимални момент савијања
W	cm^3	отпорни момент инерције попречног пресека епрувете
P_{gr}	<i>N</i>	сила лома
$\Delta f_{zs(t)}$	%	процентуална разлика чврстоће при савијању бетона старости t дана
f_{zc}	<i>MPa</i>	чврстоћа при затезању цепањем
$P_{gr,c}$	<i>N</i>	сила лома
d	<i>mm</i>	пречник испитиваног узорка
L	<i>mm</i>	дужина испитиваног узорка
$\Delta f_{zc(t)}$	%	процентуална разлика чврстоће при затезању цепањем бетона старости t дана
$f_{z\check{c},uz}$	<i>MPa</i>	чврстоћа при затезању чупањем
$F_{z\check{c},uz}$	<i>N</i>	сила чупања
D^2	<i>mm</i>	пречник металног печата (50 mm)



$\Delta f_{z\check{c},uz}$	%	процентуална разлика чврстоће при затезању чупањем
$f_{z\check{c},e}$	<i>MPa</i>	чврстоћа при затезању чупањем узорка еталон бетона
N_s	-	одскок склерометра
ΔN_s	-	процентуална разлика одскока склерометра
$N_{s,e}$	-	одскок склерометра еталон бетона
Δl	<i>mm</i>	промена дужине
σ_p	<i>MPa</i>	преднапон
σ_b	<i>MPa</i>	доњи напон
σ_a	<i>MPa</i>	горњи напон
E_s	<i>GPa</i>	статички модул еластичности при притиску
$\Delta \sigma$	<i>MPa</i>	разлика између измереног горњег и доњег напона
$\Delta \epsilon$	<i>mm/m</i>	разлика измерене горње и доње дилатације при деловању горњег и доњег напона
ΔE_s	%	процентуална разлика статичког модула еластичности
E_{uz}	<i>GPa</i>	статички модул еластичности предметног узорка бетона
$E_{uz,e}$	<i>GPa</i>	статички модул еластичности узорка еталон бетона
$W_{a,uz}$	%	упијање воде под атмосферским притиском
M_1	<i>g</i>	иницијална маса узорака
M_2	<i>g</i>	коначна маса узорака
$\Delta W_{a,uz}$	%	процентуална разлика упијања воде под атмосферским притиском
$W_{a,uz,e}$	%	упијање воде под атмосферским притиском узорка еталон бетона
ϵ_{sb}	<i>mm/m</i>	скупљање бетона
$\Delta l_{sb(t)}$	<i>mm</i>	промена дужине узорка у тренутку читања и нултог читања при старости бетона од 72 сата
l_{sb}	<i>m</i>	дужина бетонског узорка
$\Delta h_{pv,uz}$	%	процентуална разлика дубине продора воде под притиском
$h_{pv,uz}$	<i>mm</i>	дубина продора воде под притиском предметног узорка бетона
$h_{pv,e}$	<i>mm</i>	дубина продора воде под притиском узорка еталон бетона
H_b	<i>cm³/50cm²</i>	отпорност бетона према хабању брушењем
Δm	<i>g</i>	губитак масе након 16 циклуса
γ_R	<i>g/cm³</i>	запреминска маса узорка
ΔH_b	%	процентуална разлика отпорности према хабању брушењем
Δf_p	%	пад чврстоће након излагања узорака циклусима замрзавања и одмрзавања
f_E	<i>MPa</i>	чврстоћа при притиску референтних узорака које нису излагани дејству циклуса замрзавања и одмрзавања
F_c	<i>MPa</i>	чврстоћа при притиску узорака које су излагани дејству циклуса замрзавања и одмрзавања
Δf_p	%	коэффициент отпорности на дејство сулфата у погледу притисне чврстоће након 3 и 6 месеци од потапања у 5 % Na ₂ SO ₄ раствор



σ_{gr}	<i>МРа</i>	чврстоћа при притиску референтних узорка старости 28 + 90 дана и 28 + 180 дана
Σ_{sp}	<i>МРа</i>	чврстоћа при притиску узорака изложених 5 % Na ₂ SO ₄ раствору старости 28 + 90 дана и 28 + 180 дана

Напомена: ознаке су приказане према редоследу појављивања у дисертацији

10. ПРИЛОЗИ

Прилог 1 – Фото-приказ испитивања конзистенције малтера



1) FA



2) 80 % FA + 20 % GGBFS



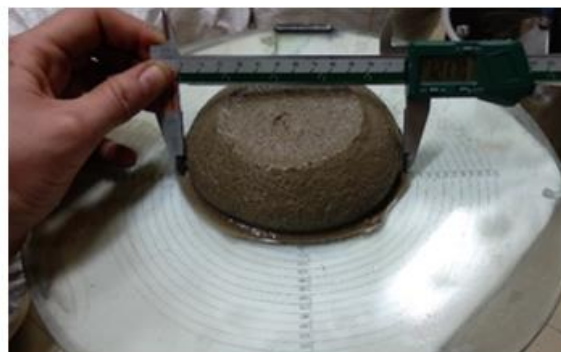
3) 60 % FA + 40 % GGBFS



4) 40 % FA + 60 % GGBFS



5) 20 % FA + 80 % GGBFS



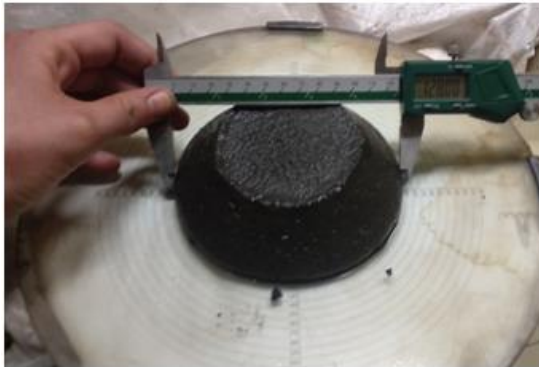
6) 100 % GGBFS



7) 95 % FA + 5 % SS



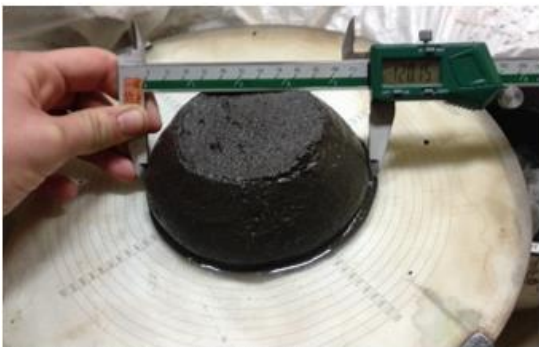
8) 90 % FA + 10 % SS



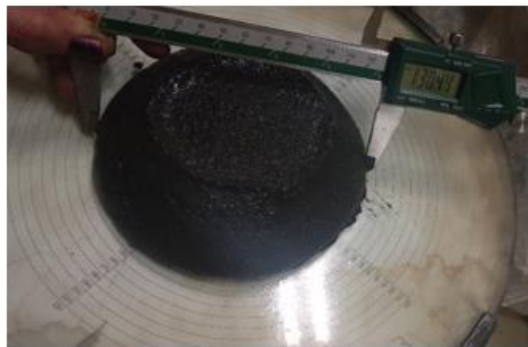
9) 85 % FA + 15 % SS



10) 90 % FA + 10 % SS



11) 95 % FA + 5 % BIO A



12) 90 % FA + 10 % BIO A



13) 85 % FA + 15 % BIO A



14) 90 % FA + 20 % BIO A



15) 95 % FA + 5 % RM



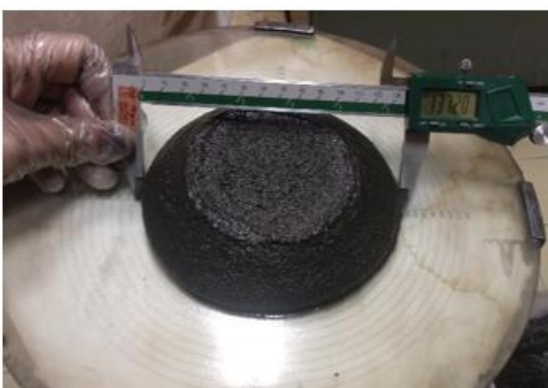
16) 90 % FA + 10 % RM



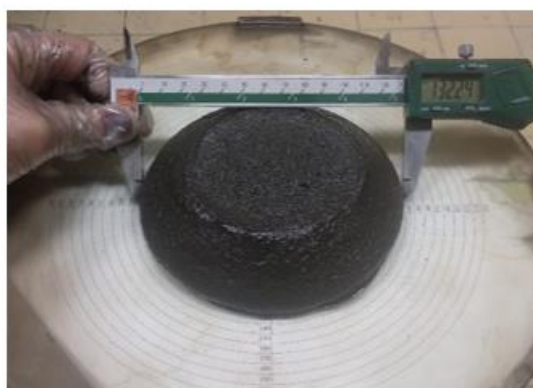
17) 85 % FA + 15 % RM



18) 90 % FA + 20 % RM



19) 95 % FA + 5 % G



20) 90 % FA + 10 % G



21) 85 % FA + 15 % G



22) 80 % FA + 20 % G

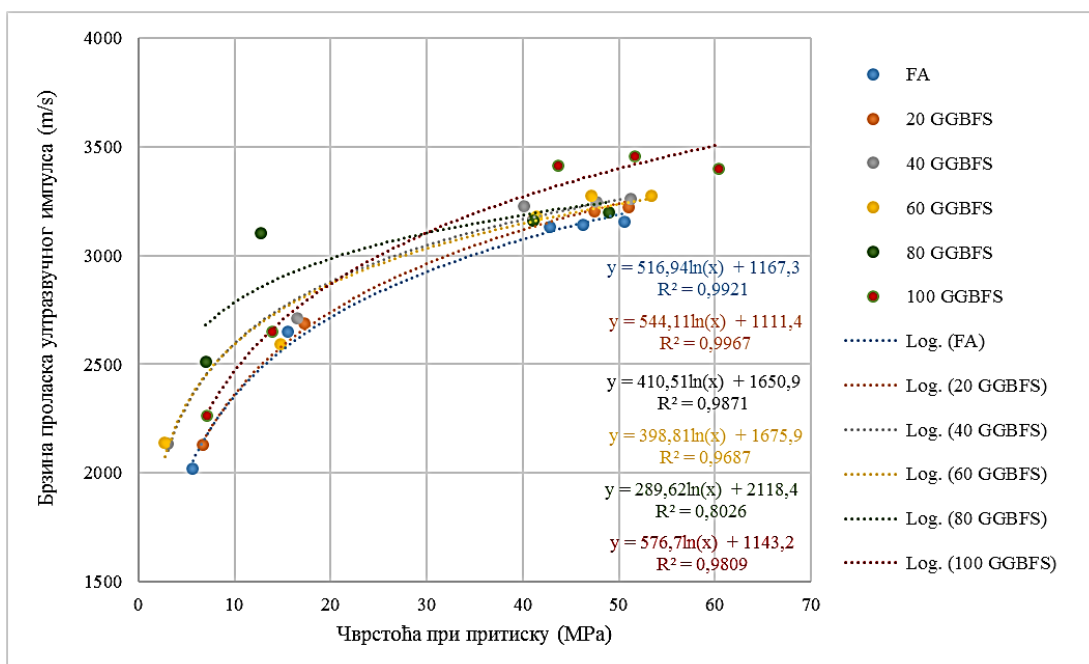


23) CEM II

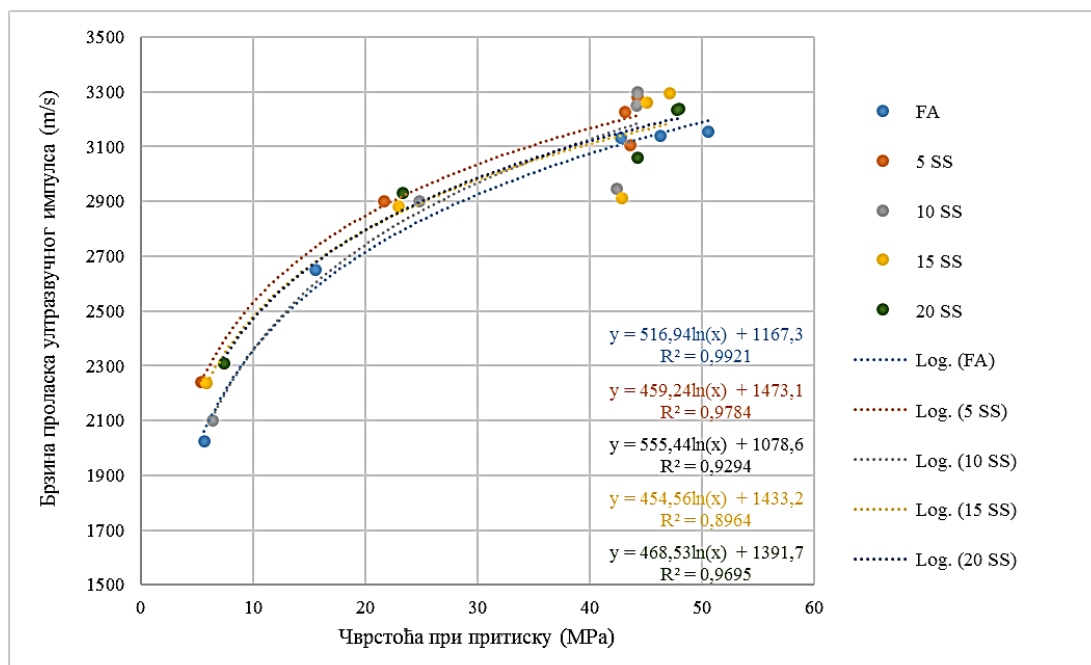


24) CEM III

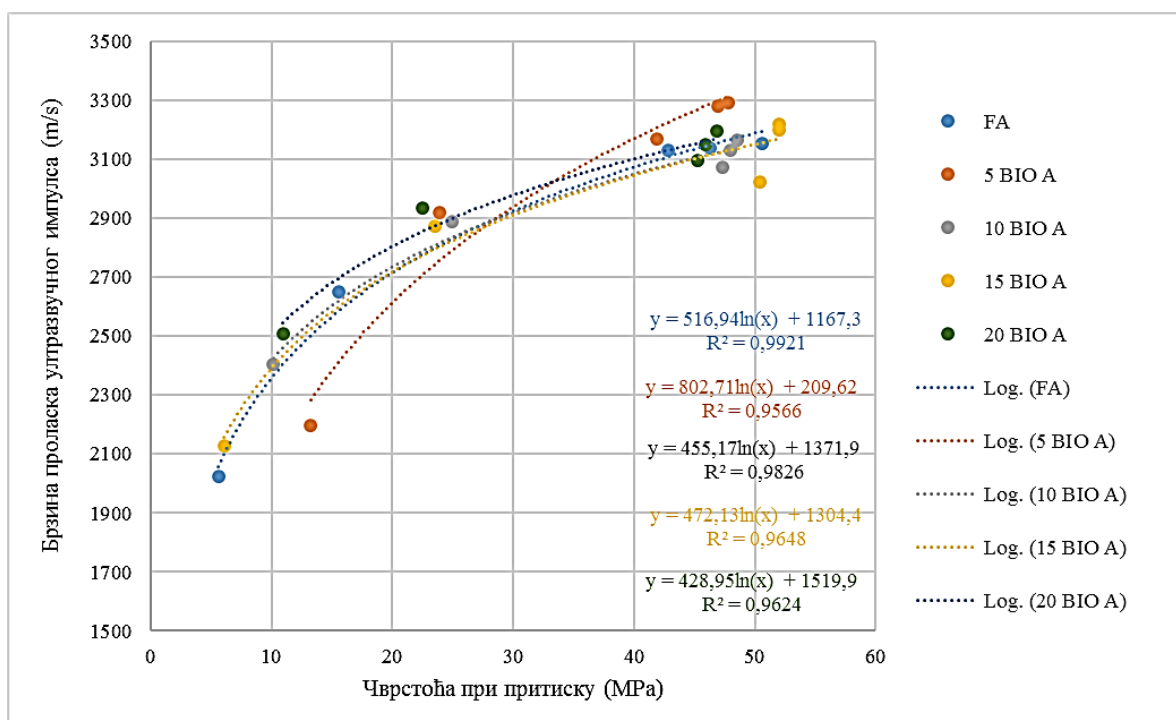
Прилог 2 – Дијаграми логаритамске зависности чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса



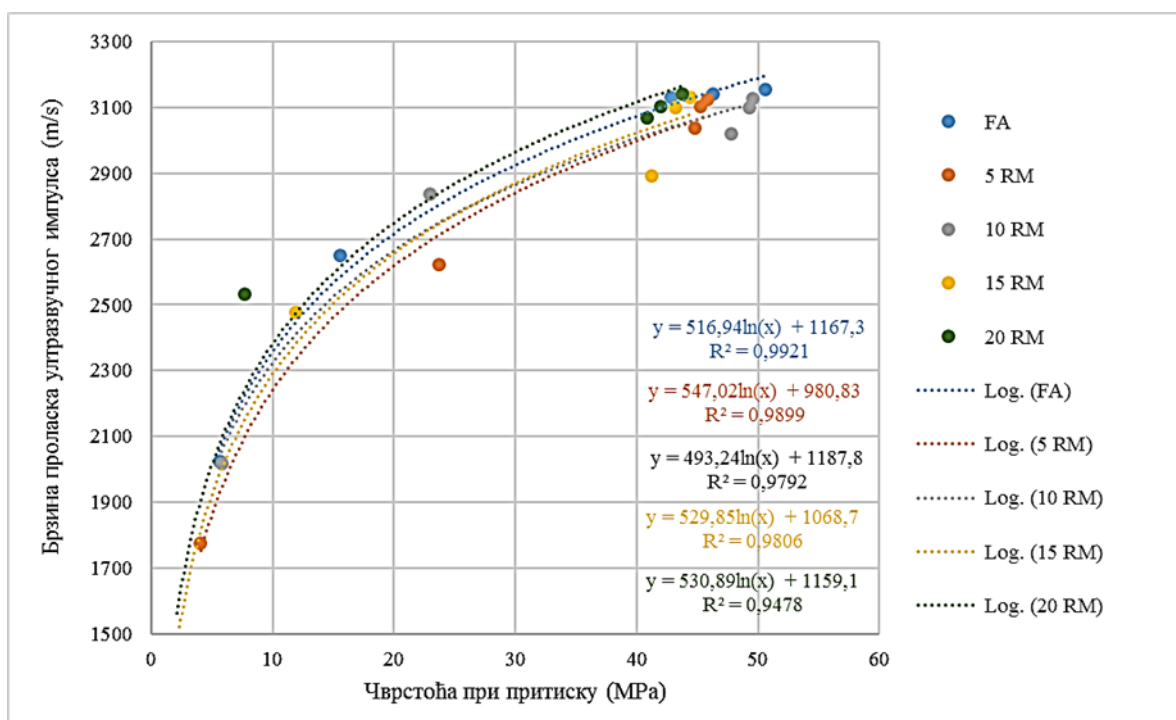
Дијаграм зависности чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса малтера справљеног са додатком гранулисане згуре из високе пећи



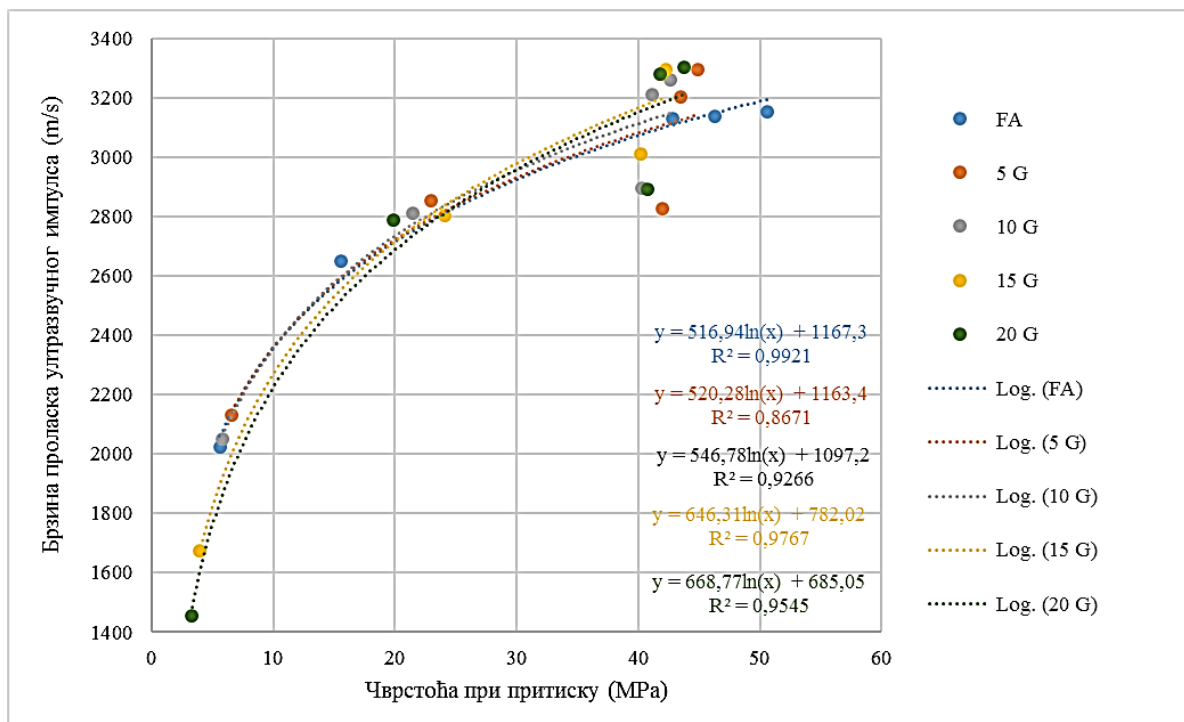
Дијаграм зависности чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса малтера справљеног са додатком конверторске згуре



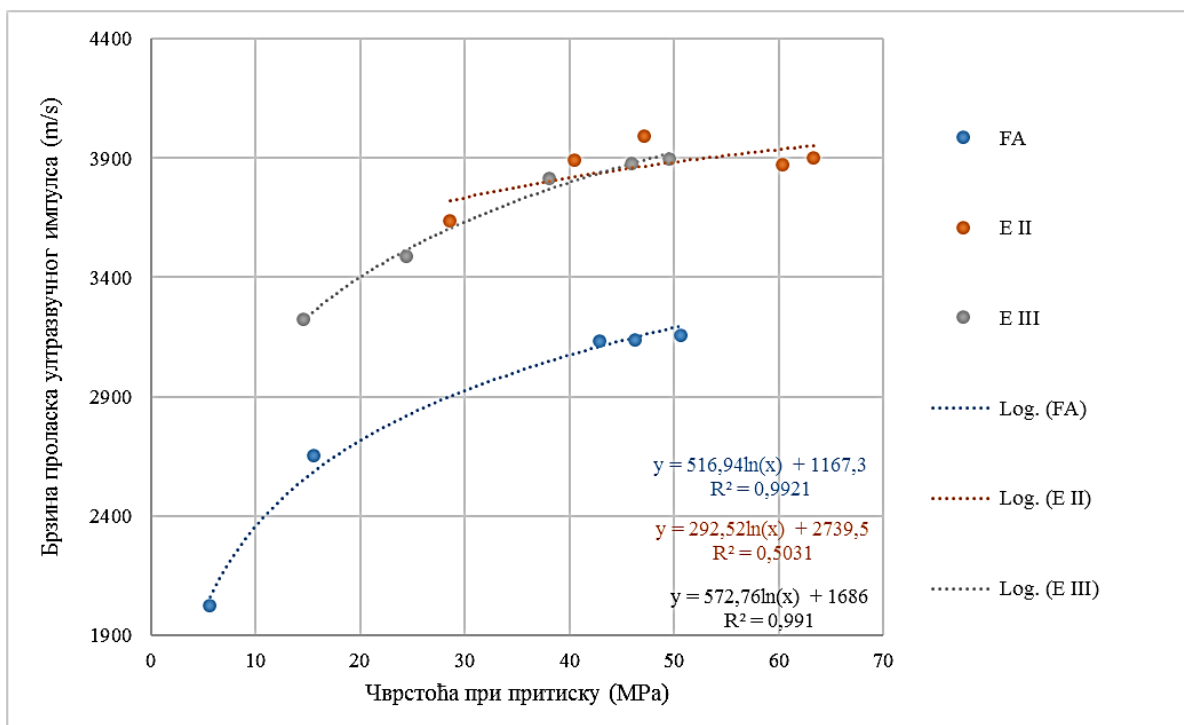
Дијаграм зависности чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса малтера справљеног са додатком дрвог пепела из биомасе



Дијаграм зависности чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса малтера справљеног са додатком црвеног муља



Дијаграм зависности чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса малтера справљеног са додатком отпадног стакла

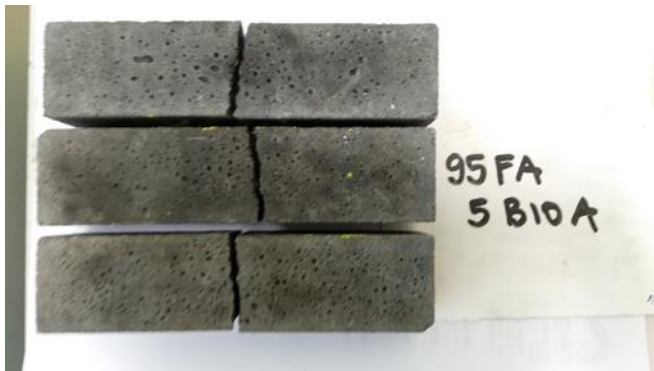
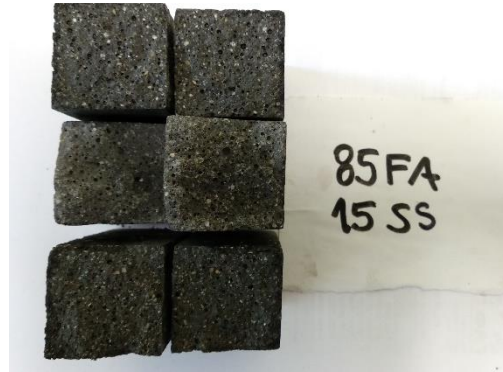


Дијаграм зависности чврстоће при притиску и брзине проласка ултразвучног импулса цементног малтера

Прилог 3 – Фото-приказ узорака малтера након 25 циклуса замрзавања и одмрзавања

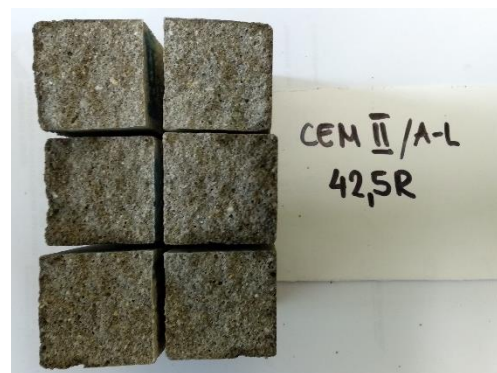












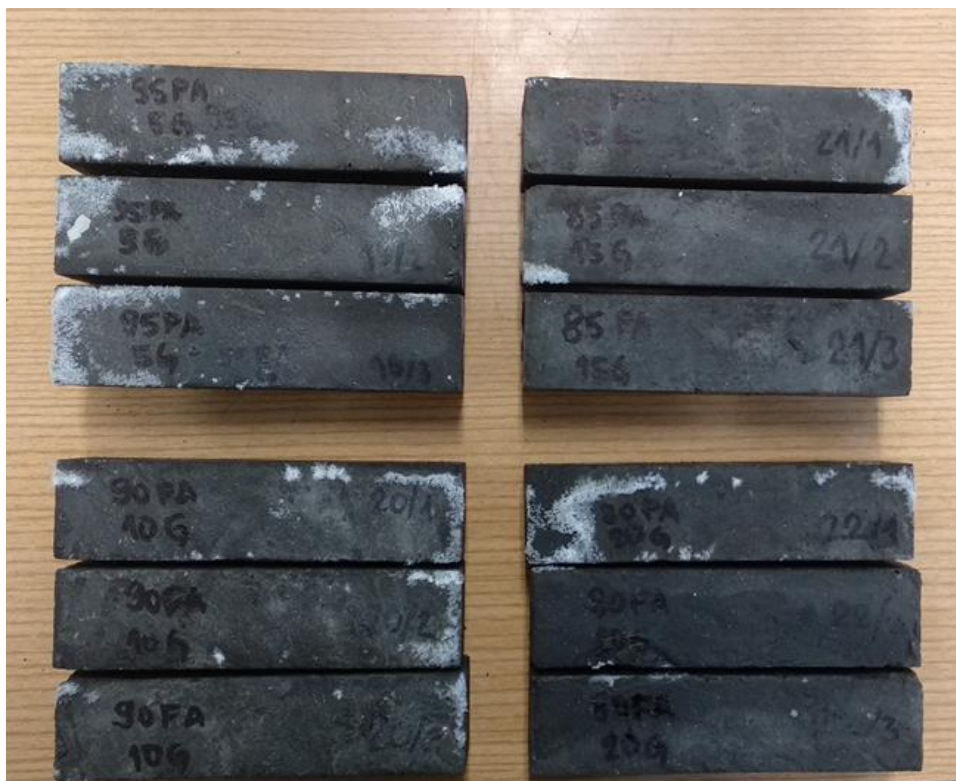
Прилог 4 – Фото-приказ узорака малтера након 180 дана од потапања у сулфатни раствор





p

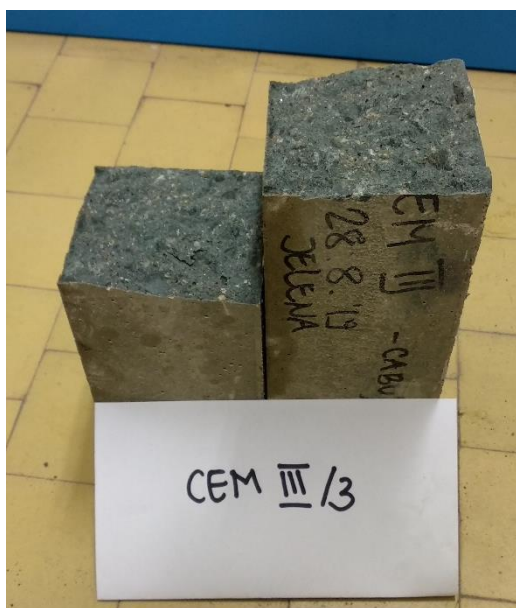




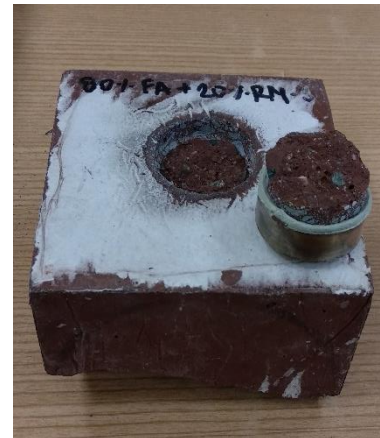


Прилог 5 – Фото-приказ узорака бетона након испитивања чврстоће при савијању



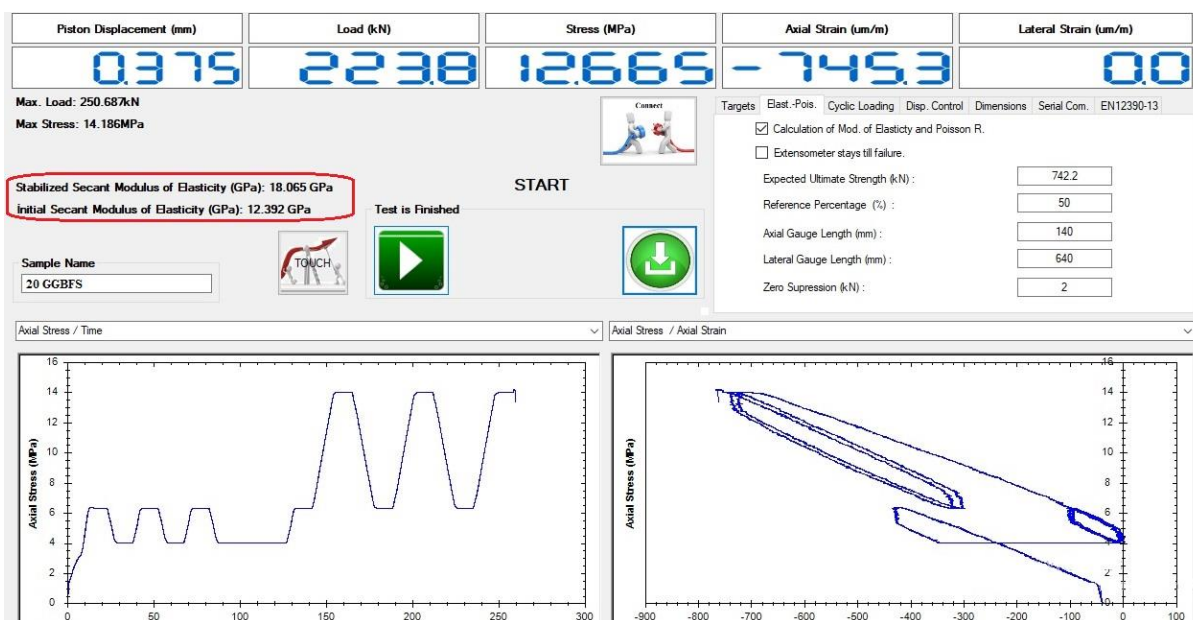


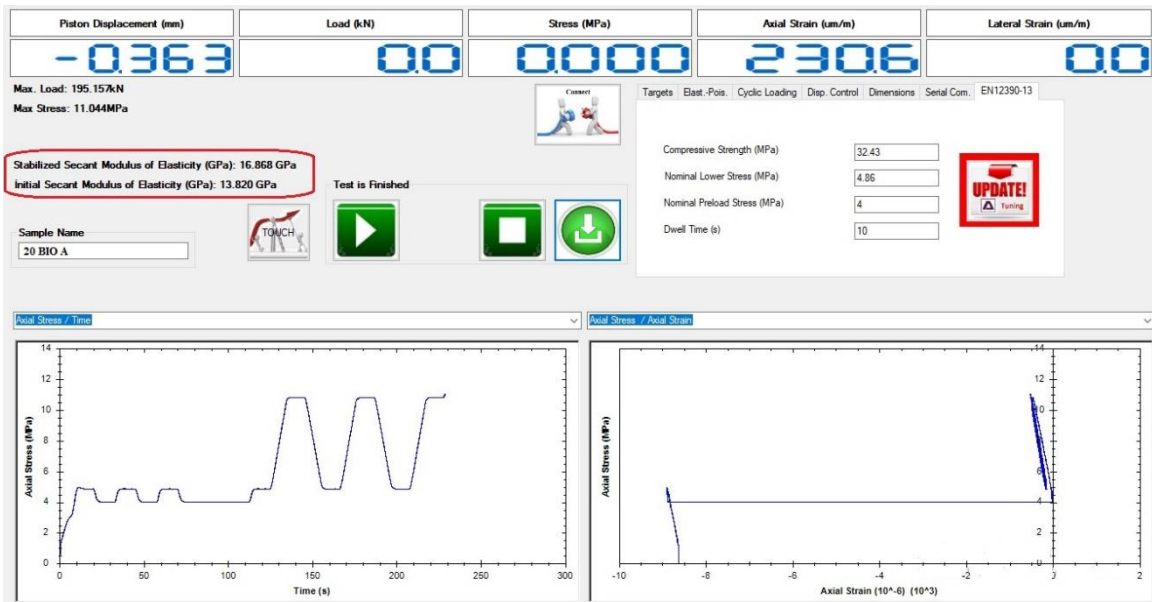
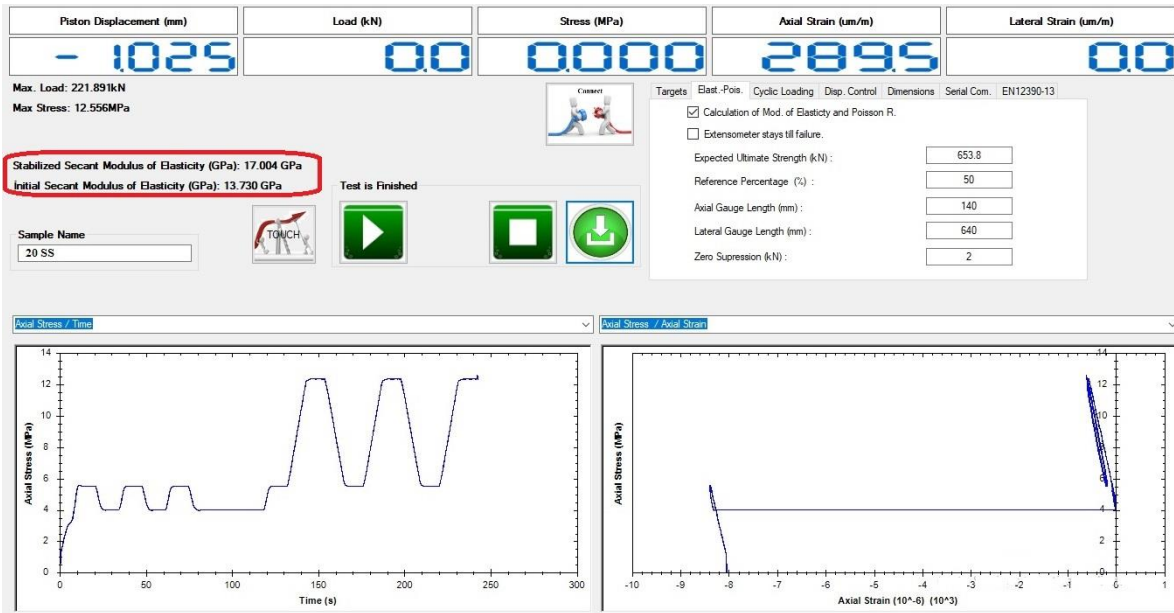
Прилог 6 – Фото-приказ испитивања чврстоће при затезању „pull-off“ методом





Прилог 7 – Фото-приказ испитивања секантног модула еластичности (извод из софтвера)







Piston Displacement (mm)	Load (kN)	Stress (MPa)	Axial Strain ($\mu\text{m/m}$)	Lateral Strain ($\mu\text{m/m}$)
-0588	00	0000	2575	00

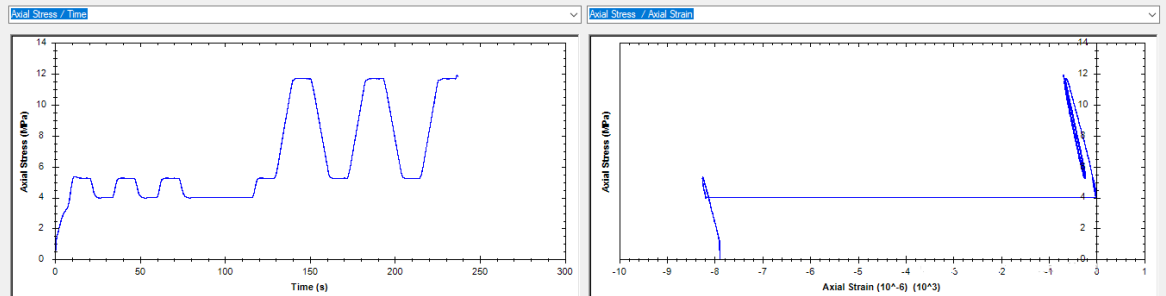
Max. Load: 210.279kN
Max Stress: 11.899MPa

Stabilized Secant Modulus of Elasticity (GPa): 14.980 GPa
Initial Secant Modulus of Elasticity (GPa): 11.237 GPa

Sample Name: 20 RM

Test is Finished

Compressive Strength (MPa): 35
Nominal Lower Stress (MPa): 5.25
Nominal Preload Stress (MPa): 4
Dwell Time (s): 10



Piston Displacement (mm)	Load (kN)	Stress (MPa)	Axial Strain ($\mu\text{m/m}$)	Lateral Strain ($\mu\text{m/m}$)
-2013	00	0000	2119	00

Max. Load: 221.764kN
Max Stress: 12.549MPa

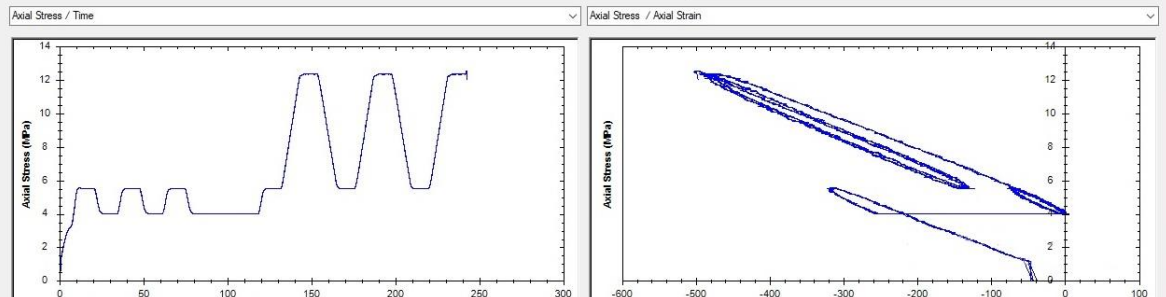
Stabilized Secant Modulus of Elasticity (GPa): 19.528 GPa
Initial Secant Modulus of Elasticity (GPa): 16.817 GPa

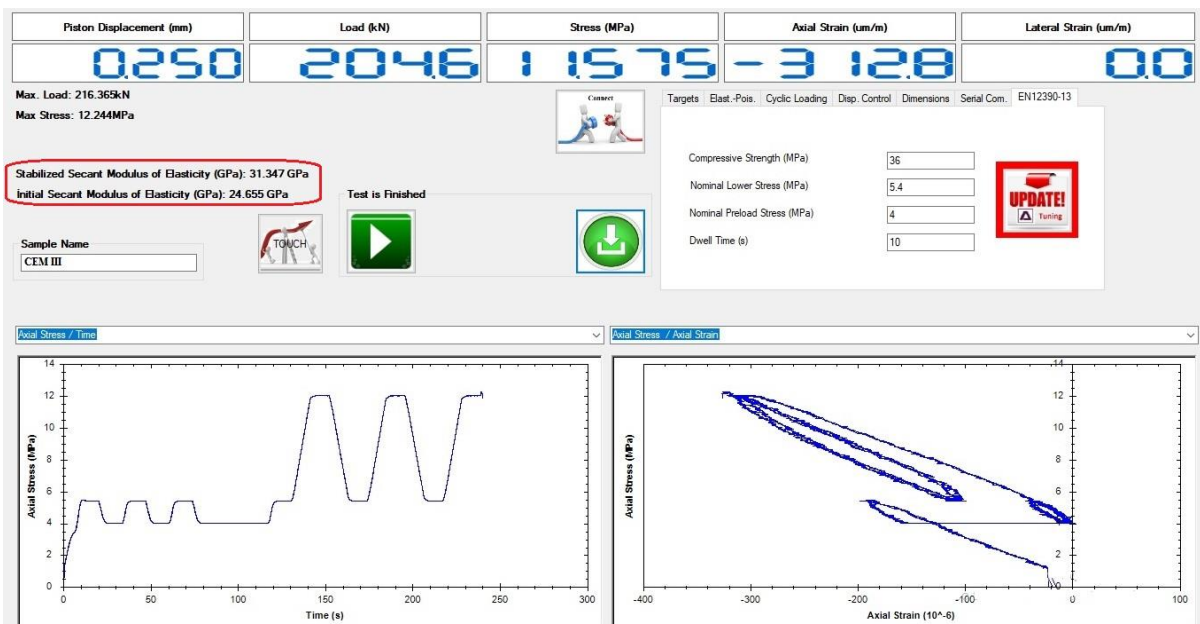
Sample Name: 20 G

UNLOAD

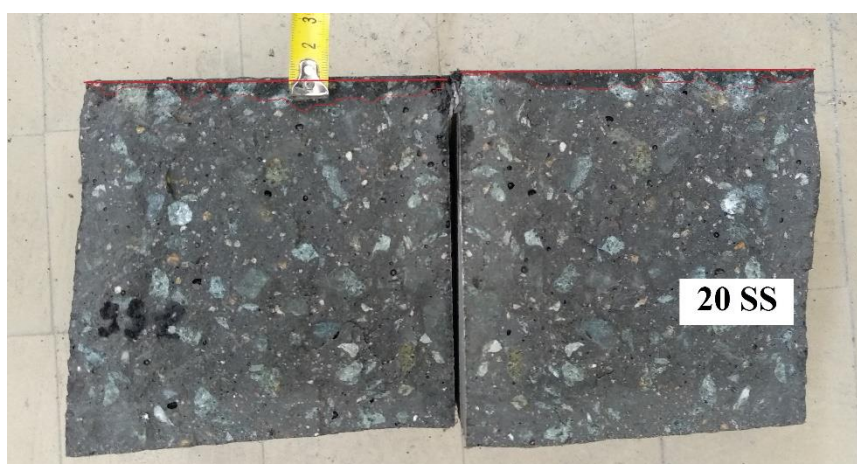
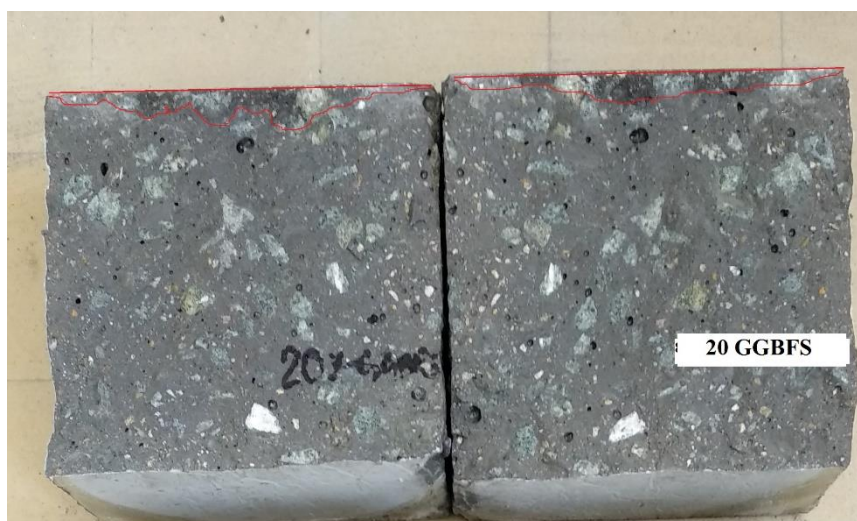
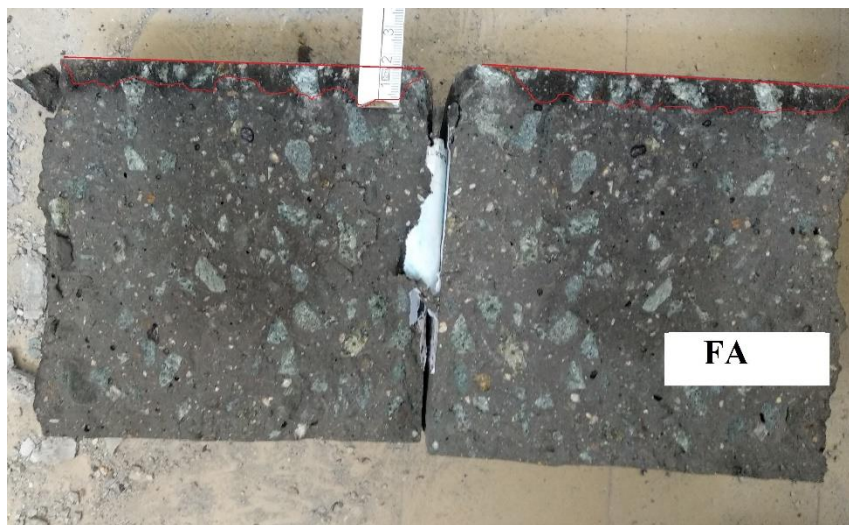
Test is Finished

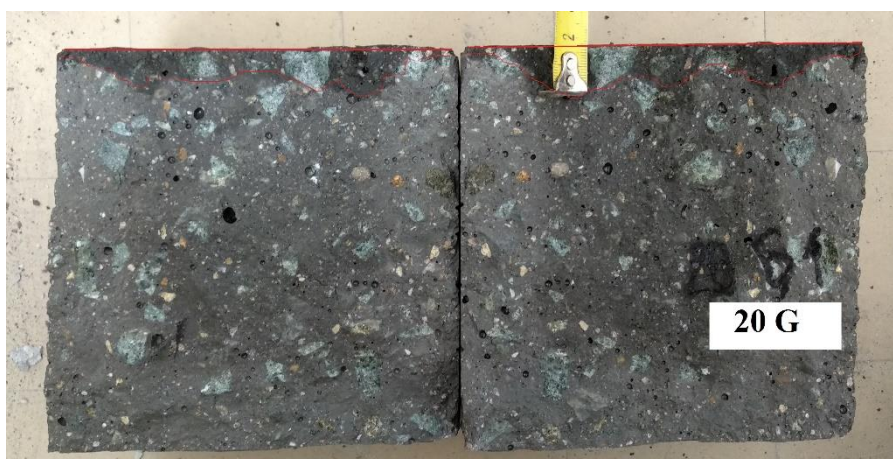
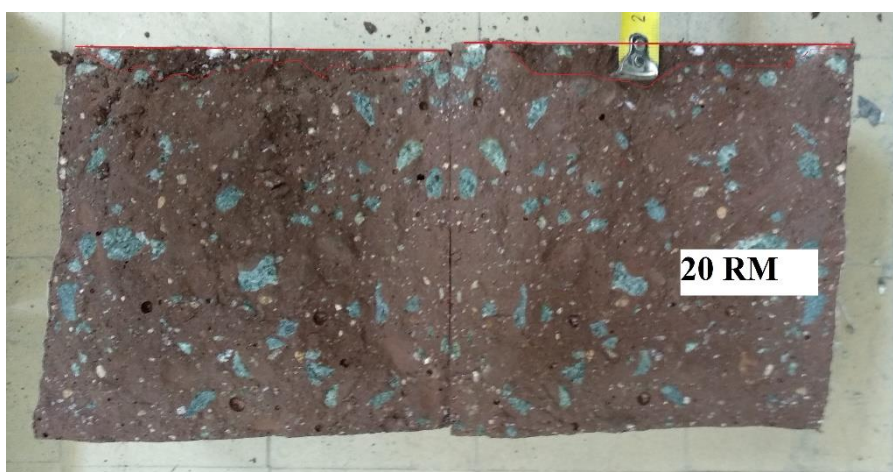
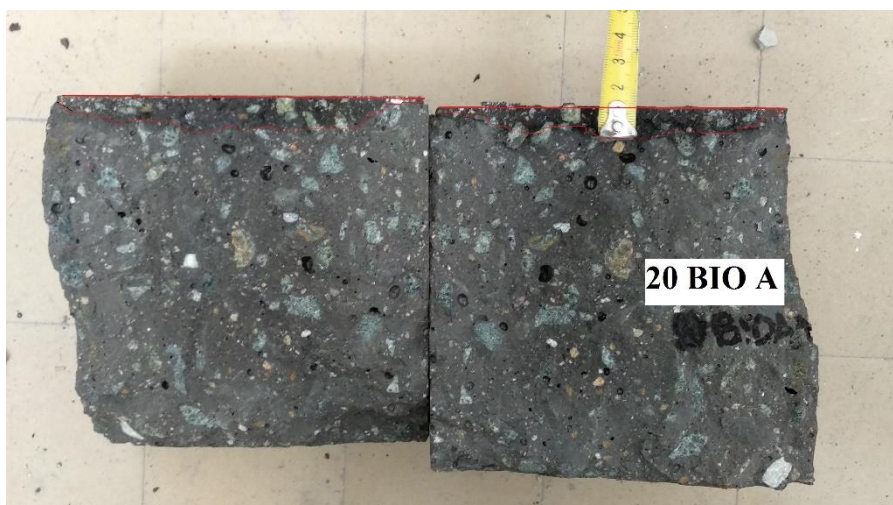
Compressive Strength (MPa): 37
Nominal Lower Stress (MPa): 5.5
Nominal Preload Stress (MPa): 4
Dwell Time (s): 10

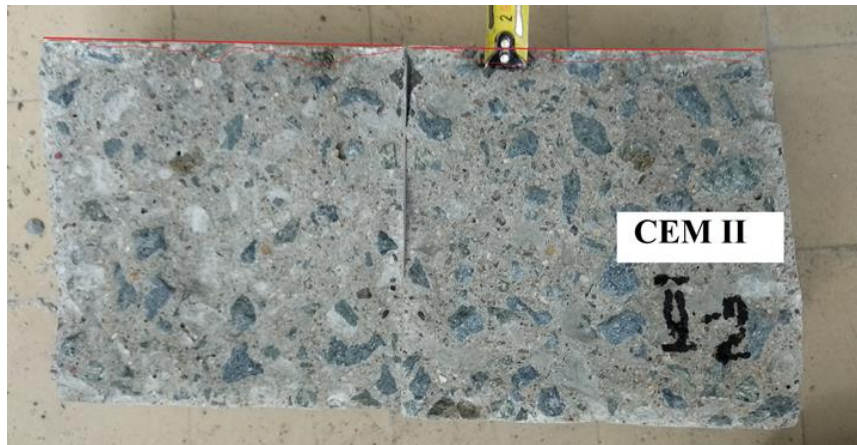




Прилог 8 – Фото-приказ испитивања дубине пенетрације воде под притиском

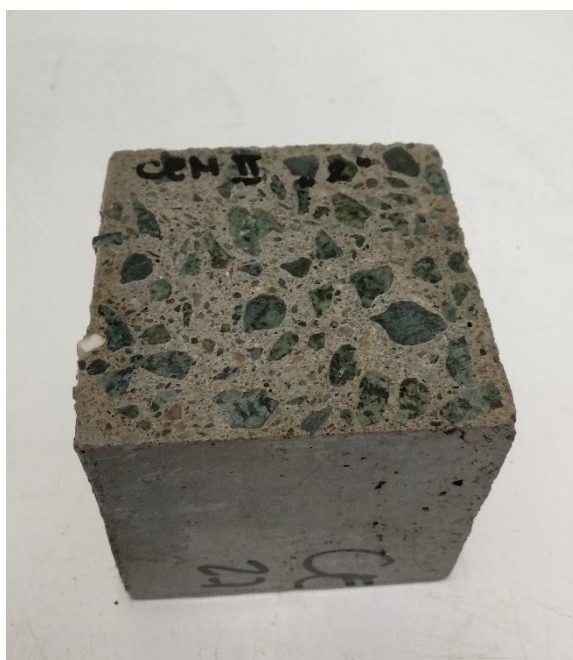




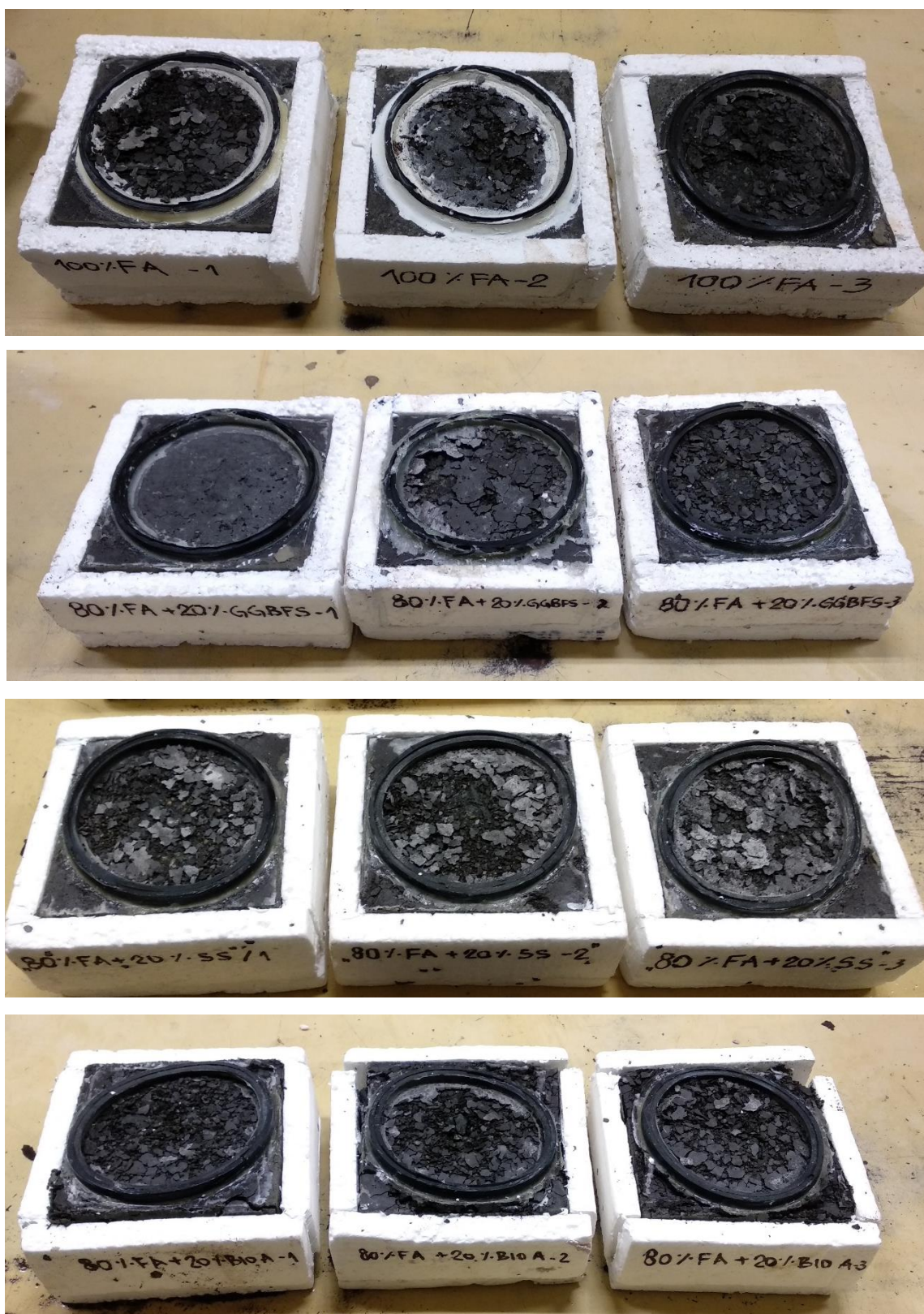


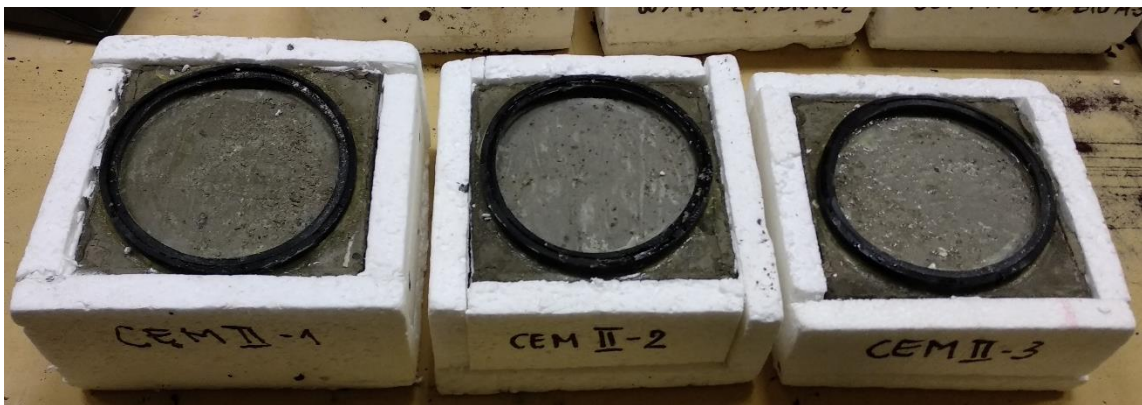
Прилог 9 – Фото-приказ узорака након испитивања циклуса замрзавања и одмрзавања



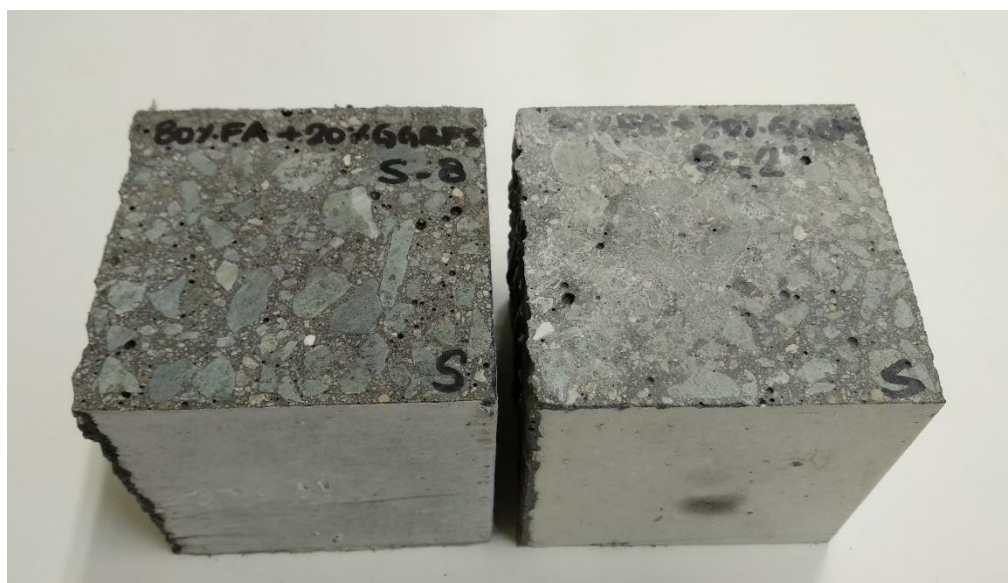


Прилог 10 – Фото-приказ узорака након испитивања једновременог дејства мрза и соли за одмрзавање

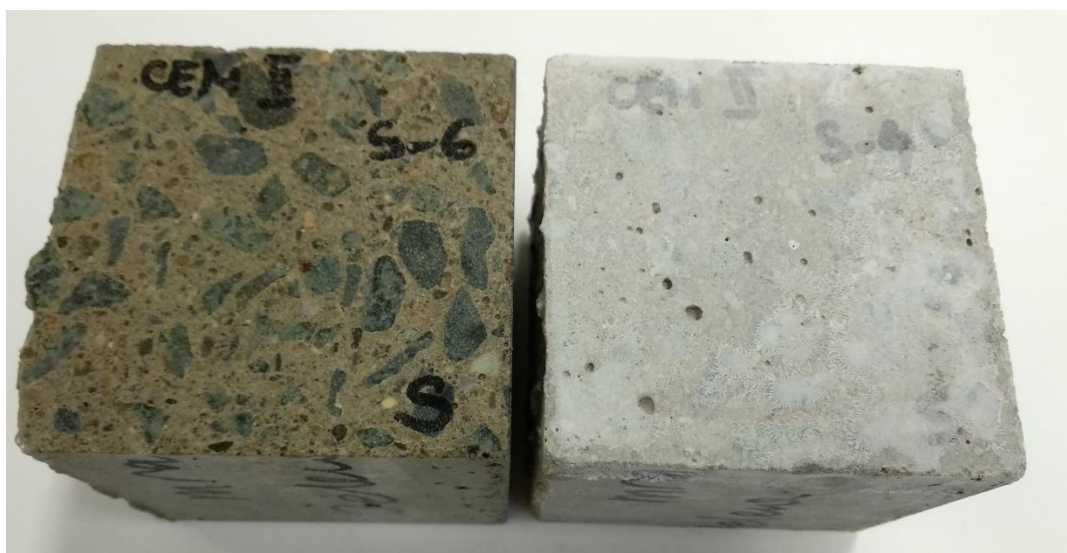
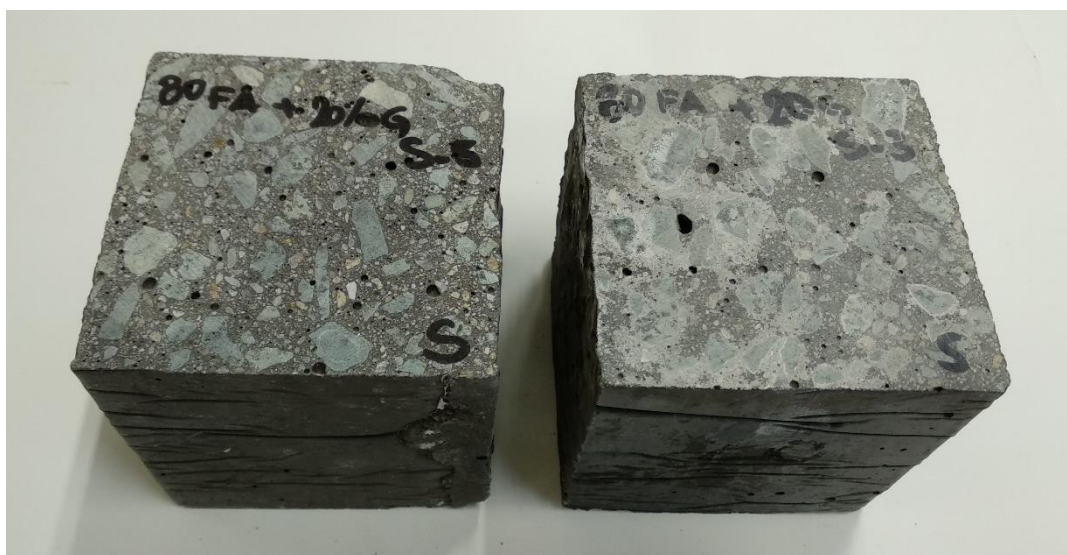




Прилог 11 – Фото-приказ узо­ра­ка на­кон 180 да­на од по­та­па­ња узо­ра­ка у сул­фат­ни рас­тво­р: ре­фе­рент­ни узо­рци (ле­во) и испи­ти­ва­ни узо­рци (де­сно)







БИОГРАФИЈА АУТОРА



Јелена П. Бијељић, мастер инжењер грађевинарства, рођена је 02.12.1989. године у Нишу. Основну и средњу школу завршила је у Нишу. Грађевинско - архитектонски факултет Универзитета у Нишу, уписала је 2008. године. Дипломске академске студије на смеру грађевинског одсека завршила је 2013. године. Одбраном дипломског рада из предмета Организација грађења стакла је академски назив дипломирани инжењер грађевинарства. Мастер академске студије уписала је 2013. године. Исте године одбранила је мастер рад из предмета Дрвени мостови и тиме стакла академски назив Мастер инжењер грађевинарства. По завршетку мастер студија одлази на студентску размену и бива запошљена на Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, под менторством Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch.Thienel. Школске 2014/15 уписала је мастер академске студије на Машинском факултету у Нишу на студијском програму Инжењерски менаџмент. Јуна 2016. године одбранила је мастер рад под називом „Логистика управљања грађевинским отпадом“ и стакла академски назив Мастер инжењер менаџмента – менаџмент транспорта и логистике. Школске 2013/14 уписала је докторске студије на Грађевинско – архитектонском факултету у Нишу и до школске године 2015/16 године положила је све испите предвиђене планом и програмом на докторским студијама. Током школовања била је награђивана посебним дипломама из техничког образовања и физичког васпитања, а као талентовани млади спортиста била је прималац вишегодишње стипендије од стране Града Ниша. Током 2009. године била је представник Универзитета на летњим универзитетским играма.

У току досадашњег рада била је учесник више пројеката: 561821-EPP-1-2015-1-RS-EPPKA2-SBHE-JP Waste management curricula development in partnership with public and private sector, Пројекта иновирање садржаја групе предмета из енергетске ефикасности на студијском програму Заштита животне средине ВТШ Ниш – Еколошка енергија EN-ЕСО, пројекта TR 36017 и др. Аутор је и преко 30 научних и стручних радова из области Грађевинских материјала и једног практикума за студенте из предмета „Рециклабилни материјали“.

Од 2013. године запослена је у фирми „Неимар“ Д.О.О. Ниш у Нишу најпре као сарадник, а затим и као руководилац сектора за извођење грађевинских радова. Као сарадник и одговорни пројектант радила је на већем броју пројеката изведеног стања. Члан је Инжењерске коморе Србије. Поседује лиценце одговорног пројектанта и одговорног извођача радова грађевинских конструкција објеката високоградње, нискоградње и хидроградње и сертификат лица одговорног за транспорт робе у друмском саобраћају. Течно говори енглески и служи се немачким језиком.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

„Могућност примене индустријских нуспроизвода у геополимерним малтерима и бетонима на бази електрофилтерског пепела“

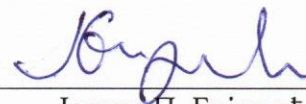
која је одбрањена на Грађевинско – архитектонском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 2.7.2020.

Потпис аутора дисертације:



Јелена П. Бијељић

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације: „**Могућност примене индустријских нуспроизвода у геополименрим малтерима и бетонима на бази електрофилтерског пепела**“

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 2.7.2020.

Потпис аутора дисертације:



Јелена П. Бијељић

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

„Могућност примене индустријских нуспроизвода у геополимерним малтерима и бетонима на бази електрофилтерског пепела“

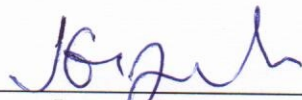
Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, 2.7.2020.

Потпис аутора дисертације:



Јелена П. Бијељић

ЗАХТЕВ

одређивање Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације

ОПШТИ И КОНТАКТ ПОДАЦИ КАНДИДАТА

Презиме, име једног родитеља и име	Јелена П. Бијељић
Матични број	0212989735036
Датум и место рођења	2.12.1989., Ниш
Адреса	Белопаланачка 45, 18000 Ниш
Број фиксног и мобилног телефона	018/590-945; 063/8352784
Е-пошта	neimar.jelena@gmail.com
Назив студијског програма (за студенте докторских студија)	Студијски програм Грађевинарство
Наслов теме докторске дисертације	Могућност примене индустријских нуспроизвода у геополимерним малтерима и бетонима на бази електрофилтерског пепела
Број и датум одлуке о добијању сагласности за тему докторске дисертације	НСВ број 8/20-01-004/19-014 У Нишу, 20.5.2019.

ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОЦЕНУ И ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у часопису са SCI листе

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
1	J. Bijeljić, N. Ristić, Z. Grdić, G. T.- Ćurčić, D. Đorđević (2020): „ <i>Durability properties of ladle slag geopolymers based on fly ash</i> “, Science of sintering, Vol. 52, No. 2 <i>Web адреса на којој је рад објављен*:</i> http://ojs.itn.sanu.ac.rs/index.php/scisint/article/view/544	М 22
2	J. Bijeljić, N. Ristić, Z. Grdić, G. T.- Ćurčić, N. Stojković (2018): “ <i>Influence of used waste cathode ray tube glass on alkali silicate reaction and mechanical properties of mortar mixtures</i> ”, Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 437-448, https://doi.org/10.2298/FUACE180704020B <i>Web адреса на којој је рад објављен*:</i> http://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUArchCivEng/article/view/4199	М 24
3	<i>Web адреса на којој је рад објављен*:</i>	

УЗ ЗАХТЕВ ПРИЛАЖЕМ:

- 8 одштампаних и повезаних примерака докторске дисертације
- електронску верзију докторске дисертације у ПДФ формату на диску.
- * копије објављених радова, скениране корице часописа, странице на којој се налази списак чланова уређивачког одбора, странице са садржајем часописа у коме је рад објављен (опционо уколико се часопис не издаје у електронском облику).

Име и презиме: Јелена П. Бијељић
Потпис:
(име и презиме подносиоца захетва)

Датум и место:

2.7.2020.