

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Сандра М. Гушевац

**СВОЈСТВА ЗЕЛЕНИХ БЕТОНА СА
АГРЕГАТОМ ОД БАКАРНЕ ШЉАКЕ ИЗ
РУДАРСКО-ТОПИОНИЧАРСКОГ
БАСЕНА “БОР”**

докторска дисертација

Београд, 2023

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Sandra M. Guševac

**PROPERTIES OF GREEN CONCRETE
WITH AGGREGATE OF COPPER SLAG
FROM MINING AND SMELTING
COMPLEX “BOR“**

Doctoral Disertation

Belgrade, 2023

Коментори: Др Снежана Маринковић, редовни професор
Грађевински факултет, Универзитет у Београду

Др Димитрије Закић, редовни професор
Грађевински факултет, Универзитет у Београду

Чланови комисије: Др Мирјана Малешев, редовни професор
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду

Др Александар Савић, ванредни професор
Грађевински факултет, Универзитет у Београду

Др Александар Радевић, доцент
Грађевински факултет, Универзитет у Београду

Датум одбране:

Илији

ЗАХВАЛНОСТ

Посебну захвалност упућујем својим менторима проф. др Димитрију Закићу и проф. др Снежани Маринковић на подршци, корисним сугестијама и професионалним саветима које су ми пружали током целокупног процеса израде овог рада.

Велику захвалност желим да изразим колегама са Института за рударство и металургију “Бор”. Посебну захвалност дугујем колегама из сектора за инжењеринг и пројектовање „МЕГА“ Јелени Ђорђевић, Филипу Грамићу, Мирославу Илићу и Ивану Јелићу који су ми помагали током рада и решавали са мном бројне проблеме на које сам наилазила. Такође, захвалност дугујем колегиници Оливери Ђокић са Институт за Путеве а.д. која ми је својим корисним саветима пружила подршку и помогла у раду.

Ово експериментално истраживање не би могло да се спроведе без помоћи мојих колега са Грађевинског факултета из Лабораторије за испитивање материјала. Посебну захвалност дугујем Марини Ашкрабић, Александру Радевићу, Ведрану Царевићу, Александру Савићу, Сави Ставњаку, Радомиру Петровићу и Младену Јовићу који су ми помагали током рада на истраживању и анализирали самном добијене резултате експеримента. Захвална сам не само на њиховом времену и труду, већ и на бодрењу током читавог овог процеса.

Ово истраживање је финансијски помогло Министарство за образовање, науку и технолошки развој Републике Србије као и Институт за рударство и металургију “Бор”. Експериментално истраживање су својим донацијама компонентних материјала помогли: “Нова Сепарација” Параћин и СРН Србија, и овом приликом желим да им се захвалим на том великом гесту и уложеном труду. Бакарну шљаку за спроведена испитивања обезбедила је компанија РТБ “Бор”. Помоћ у виду стручних консултација са колегама из свих поменутих фирми била је увек добродошла и изузетно корисна. Без поменуте помоћи, истраживање представљено у овом раду не би могло бити обављено.

РЕЗИМЕ

Бетон је најчешће коришћени конструкцијски материјал на свету са просечном годишњом светском производњом од око једне тоне по становнику планете [1], како због своје трајности и великих могућности примене, тако и због једноставности производње и доступности сировинских материјала.

Предмет овог истраживања су бетони са агрегатом од бакарне шљаке у природно гранулисаном стању, из РТБ “Бор”, као замена за крупне фракције природног агрегата. Посебан акценат је стављен на анализу неких најзначајнијих физичко-механичких својстава свежег и очврслог бетона која су битна и са аспекта пројектовања састава бетонских мешавина и са аспекта пројектовања бетонских конструкција.

У циљу постизања оптималних својстава очврслог бетона, приликом пројектовања састава бетонских мешавина, употребљене су две фракције агрегата од бакарне шљаке као замена за крупне фракције природног агрегата (у даљем тексту RA – *River Aggregate*). У свим бетонским мешавинама, као ситан агрегат је коришћен природни речни агрегат (фракције 0/4 mm, 4/8 mm), док су крупне фракције природног агрегата (фракције 8/16 mm и 16/31,5 mm) замењене са агрегатом од бакарне шљаке (у даљем тексту CSA – *Copper Slag Aggregate*) у комбинацијама садржаја 20%, 50% и 100% (у запреминским процентима). При одређивању процента замене природног агрегата агрегатом од бакарне шљаке водило се рачуна о запреминској маси бетонске мешавине проузрокованој већом запреминском масом зрна агрегата од бакарне шљаке.

Предметна испитивања су спроведена на 6 различитих бетонских мешавина. Прву бетонску мешавину чини контролни бетон справљен са природним речним агрегатом. Код друге бетонске мешавине извршена је делимична замена крупног природног речног агрегата (фракције 8/16 mm и 16/31.5 mm) агрегатом од бакарне шљаке у количини од 20%. Трећа мешавина справљена је са заменом 50% од обе фракције крупног природног речног агрегата агрегатом од бакарне шљаке (фракције 8/16 и 16/31.5 mm). У четвртој мешавини извршена је замена 50% фракције 8/16 mm и 100% фракције 16/31.5 mm. Пета мешавина представља

мешавину са 20% замене фракције 8/16 mm и 50% замене фракције 16/31.5 mm. Шеста бетонска мешавина садржала је 100% CSA крупноће 8/16 mm и 50% CSA крупноће 16/31.5 mm. Пројектоване су бетонске мешавине класе C25/30 са водоцементним фактором од 0.533.

Главни део експерименталног рада је обухватио испитивање бетона у свежем и очврслом стању. Испитано је: запреминска маса бетона у свежем и очврслом стању, конзистенција (слегање и распрострањање) бетона у свежем стању, чврстоће при притиску, чврстоће при затезању цепањем, чврстоће при затезању савијањем, зависност напона и деформација при једнооксијалном оптерећењу, отпорности на дејство мрза, скупљање, отпорност на дејство хлорида, карбонатизација и LCA (Life Cycle Analysis – Анализа животног циклуса).

Резултати су показали да бакарна шљака има различите ефекте на својства испитаних бетона у свежем и очврслом стању. Што се тиче резултата везаних за чврстоћу при притиску, укупни учинак бетона са садржајем бакарне шљаке је био сличан или бољи у односу на контролну мешавину. Како је напред наведено, максимална количина замене CSA у бетонима је ограничена запреминском масом зрна агрегата. На основу добијених резултата, CSA се може сматрати погодном заменом за крупне фракције RA у бетонима.

На основу анализе добијених резултата, развијена је методологија за употребу CSA као делимичне замене природног агрегата и дате су препоруке за даља истраживања.

Кључне речи: Бетонска мешавина, агрегат од бакарне шљаке, чврстоћа при притиску, трајност бетона, карбонатизација, LCA, експериментално испитивање.

ABSTRACT

Concrete is the most commonly used construction material in the world with an average annual world production of about one ton per inhabitant of the planet [1], both because of its durability and great application possibilities, as well as because of the simplicity of production and the availability of raw materials.

The subject of this research is concrete with copper slag aggregate in a naturally granulated state, from RTB "Bor", as a substitute for large fractions of natural aggregate, and special emphasis is put on the analysis of some of the most significant physical and mechanical properties of fresh and hardened concrete, which are important, both from the aspect of designing the composition of concrete mixtures and from the aspect of designing concrete structures.

In order to achieve optimal properties of hardened concrete, when designing the composition of concrete mixes, two fractions of copper slag aggregate were used as a substitute for large fractions of natural aggregate. In all concrete mixes, natural river aggregate (fractions 0/4 mm, 4/8 mm) was used as fine aggregate, while large fractions of natural aggregate (fractions 8/16 mm and 16/31.5 mm) were replaced with aggregate from copper slag (CSA) in combinations of content 20%, 50% and 100% (in percentage by volume). When determining the percentage of replacement of natural aggregate with copper slag aggregate, the bulk mass of the concrete mixture caused by the larger volumetric mass of copper slag aggregate grains was taken into account.

Subject tests were conducted on 6 different concrete mixes. The first concrete mix consisted of control concrete made with natural river aggregate. In the second concrete mixture, the coarse natural river aggregate (fractions 8/16 mm and 16/31.5 mm) was partially replaced with copper slag aggregate in the amount of 20%. The third mixture was made with a partial replacement of 50% of coarse fractions of natural river aggregate with copper slag aggregate (fractions 8/16 and 16/31.5 mm). In the fourth mixture, 50% of the 8/16 mm fraction and 100% of the 16/31.5 mm fraction were replaced. The fifth mixture was a mixture with 20% replacement fraction 8/16 and 50% replacement fraction 16/31.5mm. The sixth concrete mix contained 100% copper slag aggregate with a size of 8/16 mm and 50% copper slag with a size of 16/31.5 mm. All

the concrete mixes were designed as class C25/30, with the constant water-cement factor of 0.533.

The main part of the experimental work included testing concrete in fresh and hardened state. The following properties were tested: density of concrete in the fresh and hardened state, consistency (slump and flow tests) of fresh concrete, compressive strength, splitting tensile strength, bending tensile strength, stress dependence and deformation under uniaxial loading, frost resistance, shrinkage, chloride resistance, carbonation and LCA (Life Cycle Analysis).

The results showed that copper slag has different effects on the properties of the tested concrete mixtures in the fresh and hardened state. Regarding the compressive strength results, the overall performance of the copper slag concrete was similar to or better than the control mix. The maximum amount of CSA replacement in concrete is limited by the density of aggregate grains. Based on the obtained results, CSA can be considered as a suitable substitute for coarse fractions of RA in concretes.

Based on the analysis of the obtained results, a methodology was developed for the use of CSA as a partial replacement of natural aggregate, and recommendations for further research were given.

Key words: Concrete mixture, copper slag aggregate, compressive strength, durability of concrete, carbonation, LCA, experimental testing.

Садржај

| | |
|---|-----------|
| ЗАХВАЛНОСТ..... | 5 |
| РЕЗИМЕ..... | 6 |
| ABSTRACT..... | 8 |
| 1. УВОД..... | 19 |
| 1.1. Предмет истраживања | 20 |
| 1.2. Циљ истраживања | 23 |
| 1.3. Полазне хипотезе..... | 24 |
| 1.4. Структура рада | 25 |
| 2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ..... | 27 |
| 2.1. Увод..... | 28 |
| 2.2. Могућност примене бакарне шљаке у бетонима | 28 |
| 2.3. Технолошки процес прераде бабра | 31 |
| 2.4. Могућност примене бакарне шљаке у односу на њен хемијски састав..... | 36 |
| 2.5. Карактеристике бетона са садржајем CSA | 39 |
| 2.5.1. Увод | 39 |
| 2.5.2. Оптималан садржај CSA са аспекта обрадивости свежих бетонских мешавина | 42 |
| 2.5.3. Оптималан садржај CSA са аспекта физичко-механичких карактеристика очврслих бетона | 44 |
| 2.5.3. Оптималан садржај CSA са аспекта трајности бетона..... | 56 |
| 2.5.4. LCA (Life Cycle Analysis)..... | 69 |
| 2.6. Закључак | 84 |
| 3. ПЛАН ЕКСПЕРИМЕНТА..... | 86 |
| 3.1. Методологија | 87 |
| 3.2. Агрегати | 91 |
| 3.2.1. Природни агрегат | 91 |
| 3.2.2. Бакарна шљака | 92 |
| 3.3. Физичко механичке карактеристике агрегата | 95 |
| 3.4. Цемент | 110 |
| 3.5. Пројектовање бетонских мешавина | 111 |
| 3.6. Припрема узорака бетонских мешавина..... | 113 |

| | |
|---|------------|
| 3.7. Испитивање својстава свежег бетона са различитим садржајем агрегата од бакарне шљаке | 115 |
| 4. СОПСТВЕНА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА | 121 |
| 4.1. Увод | 122 |
| 4.2. Чврстоћа при притиску | 122 |
| 4.3. Чврстоћа при затезању савијањем | 127 |
| 4.4. Чврстоћа при затезању цепањем | 129 |
| 4.5. Модул еластичности..... | 130 |
| 4.6. Резонантна фреквенција и брзина ултразвука | 134 |
| 4.7. Pull-off..... | 136 |
| 4.8. Водонепропустљивост | 137 |
| 4.9. Скупљање бетона..... | 139 |
| 4.10. Отпорност на дејство мраза и соли..... | 140 |
| 4.11. Отпорност на дејство хлорида..... | 145 |
| 4.12. Карбонатизација | 146 |
| 4.13. SEM анализа бетона са агрегатом од бакарне шљаке | 150 |
| 4.14. Закључак..... | 153 |
| 5. АНАЛИЗА ЖИВОТНОГ ЦИКЛУСА (Life cycle analysis–LCA) | 156 |
| 5.1. Методологија LCA | 157 |
| 5.2. Сопствена истраживања | 158 |
| 5.3. Резултати истраживања | 161 |
| 5.4. Закључак | 165 |
| 6. ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕПОРУКЕ ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА | 166 |
| 6.1. Закључци..... | 167 |
| 6.1.1. Закључци у вези резултата испитивања агрегата..... | 167 |
| 6.1.2. Закључци у вези резултата испитивања бетонских мешавина | 169 |
| 6.2. Препоруке за даља истраживања..... | 172 |
| 7. ЛИТЕРАТУРА..... | 174 |
| Прилог А | 185 |
| Прилог Б..... | 187 |
| Прилог Ц..... | 189 |
| Прилог Д..... | 194 |
| Прилог Е | 196 |

| | |
|--|------------|
| Прилог Ф..... | 200 |
| БИОГРАФИЈА АУТОРА | 202 |
| Изјава о ауторству..... | 203 |
| Изјава о истоветности штампане и електронске верзије | 204 |
| докторског рада..... | 204 |
| Изјава о коришћењу..... | 205 |

Списак слика

| | |
|---|----|
| Слика 1. Шема пирометалуршког поступка добијања бакра из концентрата бакра [16]. | 33 |
| Слика 2. Типови макроструктуре бетона [40] | 40 |
| Слика 3. Шематски приказ међузависности између агрегата и цементне матрице у контактної зони [41] | 41 |
| Слика 4. Утицај запрљаности зрна агрегата на чврстоћу при притиску [42] | 42 |
| Слика 5. (а) Конзистенција и (б) запреминска маса бетона у функцији процента CSA [48]..... | 43 |
| Слика 6. Зависност конзистенције свежег бетона у односу | 44 |
| Слика 7. Чврстоћа при притиску бетона старости (а) 7 дана и (б) 28 дана у зависности од процента CSA [43,45–49] | 45 |
| Слика 8. Однос чврстоћа бетона старости 28 дана (f_{p28}/f_{zs28}) у зависности од процента CSA [45,46]..... | 45 |
| Слика 9. Чврстоће при притиску у односу на садржај CSA [43]..... | 46 |
| Слика 10.(а) f_p , (б) f_{zc} у зависности од % CSA [46] | 47 |
| Слика 11. (а) Чврстоћа при притиску и (б) зависност између конзистенције и чврстоће у односу на проценат CSA [50]..... | 49 |
| Слика 12. Зависност брзине абсорпције у односу на проценат замене бакарне шљаке у бетонским мешавинама [50] | 50 |
| Слика 13. Зависност (а) f_p ; и (б) f_{zc} у односу на проценат садржаја CSA [45] | 51 |
| Слика 14. f_p у односу на старост бетона [17]..... | 52 |
| Слика 15. Изглед пукотине након излагања сили притиска; (а) контролни бетон; (б) бетон са % CSA; (ц) контролни бетон; (д) бетон са % CSA; Р-правац пропагације пукотине [17]..... | 53 |
| Слика 16. Запреминска маса и чврстоћа при притиску након 28 дана [47]..... | 54 |
| Слика 17. Чврстоћа f_{zc} у односу на проценат CSA [47]..... | 55 |
| Слика 18. Pull-off метода [47] | 55 |
| Слика 19. Зависност Pull-off чврстоће у односу на проценат садржаја агрегата од бакарне шљаке у бетону [47] | 56 |
| Слика 20. Електрично наелектрисање у односу на проценат CSA [53,54]..... | 59 |
| Слика 21. Упијање воде бетона са садржајем (а) природног агрегата; (б) дробљеног агрегата [57]..... | 61 |
| Слика 22. Однос порозности и процента увученог ваздуха [57]..... | 62 |
| Слика 23. Отпорност на дејство мраза у односу на запремински садржај крупних фракција агрегата [57] | 63 |

| | |
|---|-----|
| Слика 24. Утицај цемента на карбонатизацију [76]..... | 66 |
| Слика 25. Утицај старости бетона на карбонатизацију [76] | 67 |
| Слика 26. Однос дубине карбонатизације и чврстоће при притиску [76]..... | 67 |
| Слика 27. Животни циклус грађевинског објекта [89]..... | 71 |
| Слика 28. Потрошња енергије [MJ] [89]..... | 72 |
| Слика 29. Потенцијал еутрофикације [89]..... | 72 |
| Слика 30. Потенцијал повећања киселости [89] | 73 |
| Слика 31. Потенцијал утицаја на озонски омотач [89]..... | 73 |
| Слика 32. Технолошка шема суве производње [92] | 75 |
| Слика 33. Технолошка шема мокре производње [92] | 76 |
| Слика 34. Резултати LCA (а) GWP: Потенцијал глобалног загревања; (б)POCP: фотохемијски потенцијал стварања озона; (ц) AP: Потенцијал закисељавања; (д) EP: Потенцијал еутрофикације; (е) ODP: Потенцијал оштећења озона; (ф) ADP: Потенцијал биотичких ресурса [92]..... | 77 |
| Слика 35. Животни циклус бетонске конструкције [93]..... | 79 |
| Слика 36. Учешће појединих фаза у укупној потрошњи енергије [93] | 81 |
| Слика 37. Учешће појединих фаза укупном глобалном отопљавању [93]..... | 82 |
| Слика 38. Учешће појединих фаза у укупној еутрофикацији [93] | 82 |
| Слика 39. Учешће појединих фаза у укупном закисељавању [93]..... | 82 |
| Слика 40. Учешће појединих фаза у укупном РОС [93] | 82 |
| Слика 41. План експерименталних испитивања агрегата..... | 88 |
| Слика 42. План експерименталних испитивања бетонских мешавина..... | 90 |
| Слика 43. Природни речни агрегат | 92 |
| Слика 44. (а) Депонија агрегата од бакарне шљаке у непосредној близини прерађивачких капацитета Рударско топионичарског басена у Бору; (б) макроскопски изглед агрегата CSA на депонији | 94 |
| Слика 45. (а) Макроскопски изглед агрегата од бакарне шљаке фр. 8/16 mm и (б) макроскопски изглед агрегата од бакарне шљаке фр.16/31,5 mm..... | 95 |
| Слика 46. Гранулометријска крива полазног узорка CSA | 96 |
| Слика 47. Гранулометријске криве речног агрегата (RA) и агрегата од бакарне шљаке (CSA)..... | 97 |
| Слика 48. (а) Изглед зрна агрегата RA; (б) изглед зрна агрегата CSA | 98 |
| Слика 49. Дијаграм природног речног агрегата (RA) са приказом различитих фрагмената стена у уделу 10/14 mm. Слика употребљеног агрегата је у позадини | 104 |

| | |
|--|-----|
| Слика 50. Позиција предметне бакарне шљаке (црвена тачка) на тернарном дијаграму зоне везива и адитива [42]..... | 106 |
| Слика 51. (а) SEM снимак CSA агрегата; (б) SEM снимак капљице сулфида..... | 107 |
| Слика 52. SEM агрегата CSA..... | 108 |
| Слика 53. Гранулометријске криве мешавина агрегата | 112 |
| Слика 54. (а) Лабораторијска мешалица; (б) справљање минералне мешавине..... | 113 |
| Слика 55. Испитивање конзистенције свеже бетонске мешавине | 115 |
| Слика 56. Метода слегања (Slump Method) [120] | 116 |
| Слика 57. Метода распрострањања (Flow Method) [121]..... | 116 |
| Слика 58. Мерење конзистенције (а) методом слегања и (б)распрострањања..... | 117 |
| Слика 59. Конзистенција свежих бетонских мешавина методом слегања..... | 117 |
| Слика 60. Конзистенција свежих бетонских мешавина методом распрострањања..... | 118 |
| Слика 61. Апаратура за мерење увученог ваздуха [42,122]..... | 118 |
| Слика 62. Запремиска маса свежег бетона | 120 |
| Слика 63. Чврстоћа бетона у функцији количине воде..... | 122 |
| Слика 64. Зависност m_v/m_c-f_p | 123 |
| Слика 65. Одређивање чврстоће при притиску..... | 123 |
| Слика 66. Чврстоће при притиску на бетонима старости 1 дан | 124 |
| Слика 67. Запреминска маса код бетона старости 1 дан..... | 124 |
| Слика 68. Чврстоће при притиску на бетонима старости 7 дана..... | 125 |
| Слика 69. Запреминска маса код бетона старости 7 дана | 125 |
| Слика 70. Чврстоће при притиску на бетонима старости 28 дана..... | 126 |
| Слика 71. Запреминска маса бетона старости 28 дана | 126 |
| Слика 72. Испитивање чврстоће при затезању савијањем..... | 127 |
| Слика 73. Чврстоћа при савијању након неге од 3 дана..... | 128 |
| Слика 74. Чврстоћа при савијању након неге од 28 дана..... | 128 |
| Слика 75. Испитивање чврстоће при затезању цепањем | 129 |
| Слика 76. Чврстоћа при затезању цепањем након неге од 28 дана..... | 129 |
| Слика 77. Општа шема режима испитивања модула еластичности бетона [42]..... | 130 |
| Слика 78. Одређивање модула еластичности..... | 131 |
| Слика 79. Мерење брзине ултразвука..... | 134 |
| Слика 80. “Pull off“ чврстоћа бетона након неге од 7 дана..... | 136 |
| Слика 81. “Pull off“ чврстоћа бетона након неге од 28 дана..... | 137 |

| | |
|--|-----|
| Слика 82. Преломна површина узорка са јасно уочљивом дубином квашења; (а) еталон; (б) 20% III + 20% IV; (ц) 50% III + 50% IV; (д) 50% III + 100% IV; (е) 20% III + 50% IV; (ф) 100% III + 50% IV | 138 |
| Слика 83. Дубина продирања воде под притиском | 138 |
| Слика 84. Деформације скупљања | 140 |
| Слика 85. Плочасти узорак исечен из коцке | 141 |
| Слика 86. Узорак спреман за испитивање | 142 |
| Слика 87. Циклус време (t)-температура (Т) у комори за замрзавање у току једног циклуса [140] | 143 |
| Слика 88. Оштећење бетонске површине након 28 циклуса смрзавања и одмрзавања; (а) контролна бетонска мешавина; (б) бетонска мешавина 20% III + 50% IV; (ц) бетонска мешавина 50% III + 50% IV | 143 |
| Слика 89. Отпорност на дејство мрза и соли..... | 144 |
| Слика 90. Испитивање отпорности на дејство хлорида за мешавину..... | 145 |
| Слика 91. Отпорност на дејство хлорида | 146 |
| Слика 92. Изглед узорака изложених карбонатизацији | 147 |
| Слика 93. Карбонатизациони фронт узорка након 28 дана изложености концентрацији од 5% CO ₂ ; (а) контролни бетон; (б) мешавина 20% III + 50% IV; (ц) мешавина 50% III + 50% IV | 148 |
| Слика 94. Дубина карбонатизације | 149 |
| Слика 95. Узорци бетона са додатком CSA припремљени за SEM анализу | 150 |
| Слика 96. SEM микрофотографије..... | 151 |
| Слика 97. SEM бетона | 152 |
| Слика 98. SEM бетона узорак 2 | 152 |
| Слика 99. SEM бетона узорак 2 | 153 |
| Слика 100. Дијаграм тока процене животног циклуса | 157 |
| Слика 101. Животни циклус бетона са садржајем замене агрегата CSA..... | 159 |
| Слика 102. Технолошка шема добијања CSA – РТБ „Бор“(а) двостепеним дробљењем и сепарацијом; (б) двостепеном сепарацијом..... | 161 |
| Слика 103. Индикатори категорије утицаја – основне претпоставке | 162 |
| Слика 104. Индикатори категорије утицаја – дробљени природни агрегат..... | 163 |
| Слика 105. Индикатори категорије утицаја – транспортне удаљености до 50 km | 164 |

Списак табела

| | |
|--|-----|
| Табела 1. Резултати хемијских анализа бакарне шљаке (CS)..... | 36 |
| Табела 2. Састав бетонских мешавина [17]..... | 52 |
| Табела 3. Количине енергије за 1m ³ бетона [89]..... | 71 |
| Табела 4. Табела инвентара по 1m ³ бетона са природним агрегатом [93]..... | 79 |
| Табела 5. Табела инвентара по 1m ³ бетона са рециклираним агрегатом [93]..... | 80 |
| Табела 6. Категорије утицаја по 1m ³ бетона са природним агрегатом [93]..... | 81 |
| Табела 7. Категорије утицаја по 1m ³ бетона са рециклираним агрегатом [93]..... | 81 |
| Табела 8. Садржај природног агрегата и агрегата од бакарне шљаке у бетонским мешавинама..... | 89 |
| Табела 9. Индекс облика..... | 97 |
| Табела 10. Запреминске масе RA и CSA у растреситом и збијеном стању..... | 99 |
| Табела 11. Специфична маса зрна агрегата..... | 99 |
| Табела 12. Упијање воде природног речног агрегата (RA)..... | 100 |
| Табела 13. Отпорност на дробљење природног агрегата у цилиндру..... | 101 |
| Табела 14. Отпорност према дробљењу и хабању „Лос Анђелес“..... | 101 |
| Табела 15. Садржај ситних честица природног речног агрегата..... | 102 |
| Табела 16. Отпорност на хабање..... | 102 |
| Табела 17. Резултати испитивања полирности..... | 102 |
| Табела 18. Хемијска анализа агрегата од бакарне шљаке (CSA)..... | 105 |
| Табела 19. Класификација бакарне шљаке..... | 106 |
| Табела 20. Фазе бакарне шљаке добијене SEM-EDS анализом..... | 109 |
| Табела 21. Физичко-механичке карактеристике цемента СЕМ II / A-L 42.5R..... | 110 |
| Табела 22. Гранулометријски састав мешавина агрегата..... | 111 |
| Табела 23. Учешће појединих фракција у контролној бетонској мешавини..... | 112 |
| Табела 24. Количине агрегата појединих фракција у контролном бетону..... | 113 |
| Табела 25. План испитивања..... | 114 |
| Табела 26. Садржај увученог ваздуха..... | 119 |
| Табела 27. Срачунате вредности модула еластичности бетонских мешавина према Еврокоду 2..... | 132 |
| Табела 28. Срачунате вредности модула еластичности бетонских мешавина према Model Code 2010..... | 132 |
| Табела 29. Срачунате вредности модула еластичности бетонских мешавина према АСИ 318-11..... | 133 |
| Табела 30. Вредности брзине ултразвука након неге бетона од 7 дана..... | 135 |

| | |
|---|-----|
| Табела 31. Вредности брзине ултразвука након 28 дана..... | 135 |
| Табела 32. Просечне вредности максималне дубине продора воде под притиском | 138 |
| Табела 33. Испитивање отпорности бетонских мешавина на дејство | 144 |
| Табела 34. Мерене вредности коефицијента миграције $D_{RCM} \cdot 10^{-12}$ | 145 |
| Табела 35. Измерене дубине карбонатизације (x_c) и срачунате вредности коефицијената карбонатизације (k_c)..... | 148 |

1. УВОД

1.1. Предмет истраживања

Глобална употреба од око 25×10^9 тона годишње чини бетон једним од најчешће коришћених грађевинских материјала [2]. Велика могућност пројектовања, лака доступност и економични трошкови израде погодују доминацији бетона у грађевинској индустрији [3]. Бетон је широко заступљен како у зградарству, мостоградњи, путоградњи, тако и при изради многих префабрикованих бетонских елемената попут ивичњака, плоча, цеви, каналета, итд. То је композитни материјал који у свом саставу најчешће садржи преко 70% агрегата (масено и запремински). Када се узме у обзир податак да 1m^3 бетона садржи више од 1m^3 агрегата, онда све присутнији тренд прекомерне потрошње агрегата отвара питање исцрпљивања природних ресурса и потребе проналажења нових могућности за добијање агрегата [4]. Агрегати заузимају између 55% – 80% запремине бетона [5]. Што значи да огромна производња бетона уједно повлачи и потребу за обезбеђивањем енормних количина агрегата, које су процењене на око 10 до 11 милијарди тона годишње [6]. Због брзог раста инфраструктуре у развијеним земљама и земљама у развоју, постоји огромна потражња за агрегатима, нарочито ситним због њиховог великог учешћа у бетонској мешавини. Међутим, многе земље се суочавају са проблемима недостатка квалитетног песка са једне стране и нарастајућим еколошким проблемима са друге стране. Наиме, брзо вађење наслага агрегата из речних корита истовремено доводи и до озбиљне забринутости за животну средину (продубљивање корита, клизање обала, губитак вегетације на обали река, и тако даље) [7]. Пример за то је и податак да тренутна стопа вађења речног агрегата може да задовољи само 9% укупне годишње потребе у Кини [8]. Све веће потребе грађевинске индустрије се не могу задовољити расположивим ресурсима [8].

Са друге стране, познато је да разне индустријске активности заједно са производњом примарних производа, резултирају стварањем различитих нуспроизвода који имају малу или никакву индустријску примену. Ови индустријски нуспроизводи, који се генеришу у огромним количинама широм света, доводе до озбиљних изазова везаних за њихово одлагање [9]. Из тог разлога потребно је пронаћи друга алтернативна решења, која би била прихватљива са

аспекта екологије. Једно од таквих решења је употреба агрегата од бакарне шљаке као замене за природни агрегат у бетону [10].

Индустријски отпад, који настаје из пирометалуршког процеса производње бакра, представља један од значајнијих еколошких проблема у многим развијеним земљама света. По свакој тони произведеног бакра у пирометалуршкој производњи настаје 2.2-3.0 t шљаке, што на светском нивоу износи око 40 милиона тона шљаке годишње [11]. Ови алармантни подаци о годишњој количини депонованог отпадног материјала, представљају разлог за глобалну забринутост, а решење овог проблема мора се потражити у оквиру опште прихваћених принципа одрживог развоја.

Једно од решења за проблеме одлагања овог индустријског отпада и исцрпљивања природних налазишта агрегата је примена бакарне шљаке у грађевинарству. Због повољних физичко-механичких и хемијских карактеристика бакарне шљаке, њена примена је могућа као додатка у производњи грађевинских материјала попут цемента, агрегата, абразива, стакла, керамичких плочица, итд. Присуство бакарне шљаке у овим материјалима потенцијално побољшава њихове механичке карактеристике и снижава цену. Оваквом употребом бакарне шљаке се решава проблем њеног одлагања. Из свега напред наведеног, види се да је употреба бакарне шљаке битна у индустрији управљања отпадом [12]. Бакарна шљака је такође постала погодна за примену у грађевинарству као материјал за испуну. У поређењу са осталим испунама, нема толико штетан утицај на животну околину. Због тога се може користити као носећи неvezани материјал за путеве, зграде или друге површине. Такође је њена употреба повољна у бетонима, као делимична замена за природни агрегат. Употребом бакарне шљаке на овакав начин, могу да се побољшају поједине карактеристике бетона. Због високе запреминске и специфичне масе, погодна је за примену у бетонским елементима на тлу или испод земље, односно као материјал испуне у насипима приликом изградње саобраћајница [13].

Основне предности употребе агрегата од бакарне шљаке представљају:

- смањење отпада на депонијама;

- очување природних ресурса;
- низак степен ризика по здравље и животну средину.

У свету је до данас извршен велики број испитивања примене бакарне шљаке у бетонима: као замене за цемент, односно као делимичне или целокупне замене за крупне и ситне фракције природног агрегата. Досадашњим испитивањима бетона са различитим процентима замене агрегата агрегатом од бакарне шљаке показано је да се оптималним процентом замене агрегата агрегатом од бакарне шљаке добијају бетони бољих карактеристика. Испитивањима је показано да оптимална употреба агрегата од бакарне шљаке у својству замене ситних фракција природног агрегата (зрна 0-2 mm) износи 40% [9-12, 14-17]. Овакви бетони имају добру обрадљивост, веће чврстоће при притиску и затезању, али се због мањег упијања воде агрегата од бакарне шљаке, мора водити рачуна приликом избора водоцементног фактора. Даљим повећањем процента замене ситних фракција природног агрегата агрегатом од бакарне шљаке опада чврстоћа при притиску и затезању, у поређењу са бетоном справљеним само са природним агрегатом. Такође, претходна истраживања показују да бетони са агрегатом од бакарне шљаке као замене за ситне фракције природног агрегата имају нешто нижу отпорност на дејство сулфата и мрза, као и да у зависности од хемијског састава употребљене шљаке овакав бетон показује добру отпорност на дејство хлорида. Релативно мањи број испитивања се односи на област физичко-механичких карактеристика бетона са делимичном заменом крупних фракција природног агрегата агрегатом од бакарне шљаке. Разлози изостанка шире примене бетона са агрегатом од бакарне шљаке као замене за крупне фракције природног агрегата, леже у недостатку резултата истраживања самог материјала која би дала јаснију слику механизма који се одвија током процеса очвршћавања и омогућила формирање опште прихваћених принципа пројектовања бетонских мешавина, као и непостојање поузданих релација између хемијских и физичких карактеристика бакарне шљаке, њене количине, водоцементног фактора и појединих својстава бетона са агрегатом од бакарне шљаке (уградљивости, чврстоће при притиску и затезању, напонско-деформацијског дијаграма) [18].

1.2. Циљ истраживања

Главни циљ истраживања приказаног у овој тези био је испитивање могућности примене агрегата од бакарне шљаке у конструкцијским бетонима као замене за крупне фракције природног речног агрегата уз задржавање квалитета бетона у границама које прописују технички услови. Посебан акценат стављен је на одређивање физичко-механичких својстава свежих и очврслих бетонских мешавина, која су битна како са аспекта пројектовања бетонских мешавина, тако и са аспекта пројектовања бетонских конструкција.

У оквиру истраживања анализирана су следећа својства бетона:

Свеж бетон:

- запреминска маса;
- конзистенција;
- количина увученог ваздуха.

Очврсли бетон:

- чврстоћа при притиску;
- чврстоћа при затезању савијањем;
- чврстоћа при затезању цепањем;
- модул еластичности;
- водонепропустљивост;
- отпорност на дејство хлорида;
- отпорност на дејство мраза и соли;
- скупљање при сушењу;
- карбонатизација.

Основни циљ овог истраживања је одређивање међусобне зависности физичко-механичких својстава конструкцијских бетона и својстава агрегата од бакарне шљаке, чиме би се омогућило пројектовање ове врсте бетона и подстакла њихова шира примена. Конкретно, кроз преглед истраживања доступних у литератури планирано је спровођење следећих циљева:

- анализа постојећег стања у области примене агрегата од бакарне шљаке у обичним бетонима;
- дефинисање основних принципа и поступака справљања бетона са агрегатом од бакарне шљаке тако да он има задовољавајуће физичко-механичке карактеристике за примену у грађевинарству;
- упоредна оцена утицаја животног циклуса бетона са агрегатом од бакарне шљаке и бетона са природним агрегатом на животну средину.

Како би се постигао задати циљ, кроз преглед истраживања доступних у литератури планирано је спровођење следећих активности:

- прикупљање, систематизација и критичка анализа претходних истраживања у области физичко-механичких, реолошких и својстава трајности бетона са агрегатом од бакарне шљаке у функцији делимичне замене крупних фракција природног агрегата;
- дефинисање проблема;
- припрема експеримента - израда плана и програма сопственог експерименталног истраживања ;
- експериментално испитивање физичко-механичких карактеристика бетона са агрегатом од бакарне шљаке у својству делимичне замене крупних фракција природног агрегата, количине цемента и водо-цементног фактора;
- статистичка обрада сопствених експерименталних резултата и резултата из литературе;
- извођење закључака и препорука за примену.

1.3. Полазне хипотезе

На основу постављеног циља, као основа за дефинисање плана и програма истраживања, постављене су следеће полазне хипотезе:

Хипотеза 1: Агрегат од бакарне шљаке битно се разликује од природног агрегата тако да има: мање упијање воде, веће чврстоће при притиску и затезању, већу запреминску масу и већу отпорност на хабање.

Хипотеза 2: Претпоставља се да хрпава површина зрна бакарне шљаке, као и повољне физичко-механичке карактеристике, могу утицати на бољу укљештеност самих зрна, што ће позитивно утицати на физичко-механичке карактеристике бетона справљеног са оваквим агрегатом.

Хипотеза 3: Заменом фракција 8/16mm и 16/31.5mm природног речног агрегата у бетонској мешавини агрегатом од бакарне шљаке, могу се добити бетони сличних или бољих физичко-механичких карактеристика него контролни бетон справљен само са природним речним агрегатом.

Имајући у виду предмет и циљ истраживања, као и постављене хипотезе докторске тезе, рад на наведеној теми реализован је применом следећих метода научно-истраживачког рада:

- синтезом и критичком анализом доступних резултата истраживања других аутора везаних за област теорије и технологије бетона формирана је база података као основа за сопствено експериментално истраживање;
- статистичка метода коришћена је у анализи резултата;
- компаративна метода примењена је на извођењу закључака сопственог истраживања.

1.4. Структура рада

У првом поглављу дисертације дат је приказ позадине и опис предмета истраживања, дефинисани су циљеви, постављене су полазне хипотезе и састављена је структура рада.

Друго поглавље садржи анализу досадашњих истраживања из домаће и светске литературе. Приказана су основна својства бетона са заменом ситних и крупних

фракција агрегата од бакарне шљаке, у смислу поређења са контролним бетонима, и дефинисане границе очекиваних резултата за поједина својства бетона справљених са заменом агрегата од бакарне шљаке, у функцији процента замене крупног природног агрегата одговарајућим фракцијама агрегата од бакарне шљаке. Такође је приказан преглед досадашњих испитивања физичко-механичких карактеристика оваквих бетона.

У трећем поглављу описан је план експеримента. Описана је методологија, приказане су физичко-механичке карактеристике компонентних материјала (RA, CSA, цемент) који су употребљени приликом пројектовања бетонских мешавина. Описан је поступак настанка предметне бакарне шљаке. Описан је начин припреме узорака за лабораторијска испитивања. Спроведена је анализа резултата испитивања свежих бетонских мешавина са садржајем CSA као замене за крупне фракције RA.

У четвртном поглављу овог рада приказани су и анализирани резултати испитивања физичко-механичких својстава бетона у очврслом стању. На 6 бетонских мешавина испитане су чврстоће при притиску, чврстоће при затезању цепањем, чврстоће при затезању савијањем, отпорност на дејство хлорида, отпорност на дејство мраза и соли, скупљање при сушењу, пенетрација воде под притиском (водонепропустљивост), дејство хлорида, карбонатизација. Приказани су резултати SEM анализе на бетонима са различитим садржајем CSA.

У петом поглављу је приказана LCA анализа бетона са агрегатом од бакарне шљаке за три бетонске мешавине (контролна мешавина, мешавина 20% III + 50% IV, 50% III + 50% IV).

У шестом поглављу су дати закључци у вези резултата испитивања агрегата и испитивања бетонских мешавина. Такође су описане смернице и препоруке за будућа истраживања.

У последњем поглављу је наведен списак домаће и стране литературе коришћене у писању овог рада. Након списка литературе, у прилозима су дати нумерички подаци везани за пројектовање бетонских мешавина и резултати испитивања физичко-механичких испитивања бетонских мешавина.

2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

2.1. Увод

У складу са темом дисертације, главни део прегледа литературе чине радови који се односе на експериментално испитивање карактеристика бетона у којима је извршена делимична или потпуна замена ситних и крупних фракција природног агрегата агрегатом од бакарне шљаке. Разлике у понашању бетона са и без садржаја агрегата од бакарне шљаке последица су различитих карактеристика природног агрегата и агрегата од бакарне шљаке. Да би се те разлике на што бољи начин објасниле, прегледом литературе су, у првом делу, обухваћене основне карактеристике агрегата од бакарне шљаке.

2.2. Могућност примене бакарне шљаке у бетонима

Бакарна шљака је отпадни материјал који се добија током производње бабра. Његово одлагање је брига агенција за заштиту животне средине и владе, и потребно је пронаћи адекватан алтернативни начин његове употребе.

У прошлости се сматрало да бакарна шљака представља изузетно опасан материјал за животну средину. У вези са овим питањем, 1991. године у САД је Агенција за заштиту животне средине (USEPA) донела закон за око 20 отпадних минералних материја попут бакарне шљаке, који их је квалификовао као отпадни материјал штетан за животну средину [19, 20]. Касније, 1996. године, Базелска конвенција Уједињених нација о прекограничном кретању опасног отпада и његовом одлагању, описала је бакарну шљаку као неопасан материјал, на основу чега њена употреба не представља опасност по животну средину [19, 20].

Због чињенице да је бакарна шљака настала од неопасних хемијских материјала, омогућена јој је примена као минералне сировине у различитим производним индустријама [20]. *Vipra Gorai и остали* [12] бавили су се анализом претходно добијених резултата испитивања могуће употребе бакарне шљаке и закључили да због повољних физичко-механичких карактеристика бакарна шљака може да има широку примену у производњи цемента, абразива, алата за сечење, агрегата, кровног покривача, стакла, керамичких плочица и др.

Једна од највећих потенцијалних примена за поновну употребу бакарне шљаке је у производњи цемента и бетона. Употребом агрегата од бакарне шљаке као делимичне замене цемента, значајно се може уштедети количина енергије потребне за производњу цемента, јер је за овакву примену бакарне шљаке потребно само млевење. Такође, веће количине бакарне шљаке могу се употребити као ситан и крупан агрегат у бетону, јер више од 70% запремине бетона заузимају агрегати. Анализом резултата досадашњих истраживања, уочено је да постоји релативно мали број истраживања у којима је анализиран утицај крупних фракција CSA у бетону као замена за одговарајуће фракције RA, као и могућност примене оваквих бетона.

Бакарна шљака ситније гранулације може да се користи уместо песка приликом израде бетона. Тада може да послужи као агрегат, или као везивни агенс, који помаже у везивању већих честица шљунка у самом бетону. Када се користи на овакав начин, шљака у принципу побољшава карактеристике бетона [21].

Овај материјал представља популарну алтернативу за песак као медијум за индустријско пескарење. Користећи пескарење или технику прскања под притиском, компаније користе бакарну шљаку да чисте велике пећи за топљење руде или другу опрему. Пескарење шљаком се такође користи за одстрањивање рђе, фарбе и других материјала са металних, бетонских или камених површина. Тиме се потпомаже припрема површине за фарбање или се једноставно отклања нежељени завршни премаз или талог.

Такође, поједина својства бакарне шљаке указују на могућност њене примене у коловозним конструкцијама. Најбоља варијанта примене CSA је њена употреба на начин како би се искористиле њене добре физичко-механичке карактеристике. Оваквом применом бакарне шљаке решава се проблем њеног одлагања. Из напред наведеног, оваква употреба бакарне шљаке је битна у индустрији управљања отпадом [12].

Ravindra и остали [22] истраживали су, на пример, геотехничка својства бакарне шљаке. Утврдили су да је бакарна шљака непластични материјал са већом стишљивошћу у односу на песак. Угао унутрашњег трења бакарне шљаке је

сличан песку, а њена употреба као насипа иза потпорних конструкција смањује активни бочни притисак. Бакарна шљака погодна је, даље, за примену у грађевинарству као материјал за испуну. Из разлога што нема штетног утицаја на животну средину, може се користити као материјал за засторе код коловозних конструкција, железничких пруга, као тампонски слој код фундарања зграда или других типова грађевинских објеката.

Важно је напоменути да је главни проблем са бетоном заправо цемент, односно његова производња. Цементне пећи обично се састоје од загрејаног ротационог цилиндра који загрева глину и кречњак на око 1400 °С. То захтева велике количине енергије и процес ослобађа велике количине угљен-диоксида као нуспроизвода. Отприлике 40% емисија CO₂ из производње цемента јесу резултат начина на који се пећ заправо загрева. Ово се обично постиже коришћењем фосилних горива, како би се температуре довољно подигле да процес функционише. Преостале емисије из процеса потичу од припреме сировина, прво за њихово ископавање, а затим и за транспортовање.

Према неким проценама, ако би се изоловала бетонска индустрија и направила од ње држава, она би била трећи највећи емитер CO₂ на свету. Само у 2015. читава индустрија је емитовала негде око 2,8 милијарди тона угљен-диоксида, што је еквивалент од око 8% укупне емисије. Са Кином која доприноси око 28% (2019) и Сједињеним Државама са око 14% (2019), бетон је, дакле, материјал чијом се производњом емитују највеће количине CO₂ у атмосферу.

C. Shi, C. Meyer u A. Behnood [23] су се бавили испитивањем могућности употребе бакарне шљаке као сировине у производњи клинкера. Они су закључили да се оваквом применом бакарне шљаке побољшава процес млевења клинкера (тзв. интензификатор млевења). Када се користи као замена цемента или агрегата, малтер и бетон који садрже различите облике бакарне шљаке имају исту или већу чврстоћу у поређењу са бетоном који садржи обичан портланд цемент. Таква испитивања су све важнија због већ поменуте чињенице да је производња цемента енергетски интензиван процес који ослобађа значајне количине CO₂.

Последњих година, бакарна шљака је коришћена као замена за цемент [23, 24]. Бакарна шљака је испитивана као замена за цемент, јер 70% укупне количине светске бакарне шљаке садржи повољну комбинацију $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ [25]. Због изражене пуцоланске активности, може се користити као додаток цементу [26].

LCA анализом је разматрано управљање јаловином, укључујући њено одлагање, употребу у грађевинским материјалима и враћање у процес производње. Истраживање је вршено на бетонима сличних механичких чврстоћа. Закључено је да је одлагање јаловине на депонијама жариште загађења у процесу производње по питању токсичности и екотоксичности. Употреба јаловине у грађевинским материјалима на глобалном нивоу омогућава еколошке користи, док еколошки учинак поновне прераде захтева даља истраживања [27]. Одлагање индустријског отпада који настаје пирометалуршким процесом производње бакра представља значајно оптерећење животне средине у многим развијеним земљама [28]. Разматрана је потенцијална примена бакарне шљаке (CS) као абразива, и њен утицај на животну средину. Од избора начина хлађења бакарне шљаке у току производње бакра зависи степен овог утицаја. CSA има низак садржај хлорида и сулфата. Ваздушним начином хлађења бакарна шљака се може уситнити до крупних и ситних фракција агрегата, док је гашена бакарна шљака зрнаста, слична песку [29]. Резултати показују да је коришћење отпада довело до смањења емисије гасова стаклене баште, смањене потрошње ресурса, а највише до смањења утицаја на животну средину. Утицај технолошког процеса на животну средину се генерално повећавао са смањењем енергетске ефикасности [30].

2.3. Технолошки процес прераде бакра

Све интензивнији развој људског друштва базира се на развоју индустријске производње и енергетике, због чега се намеће потреба обимније експлоатације рудног богатства, односно минералних сировина. Република Србија спада у ред земаља са разноврсним и релативно богатим минералним ресурсима, где су лежишта бакра концентрисана у тимочком еруптивном басену. Значајнија лежишта бакра се налазе у Мајданпеку, Бору, Великом Кривељу и Церову, а

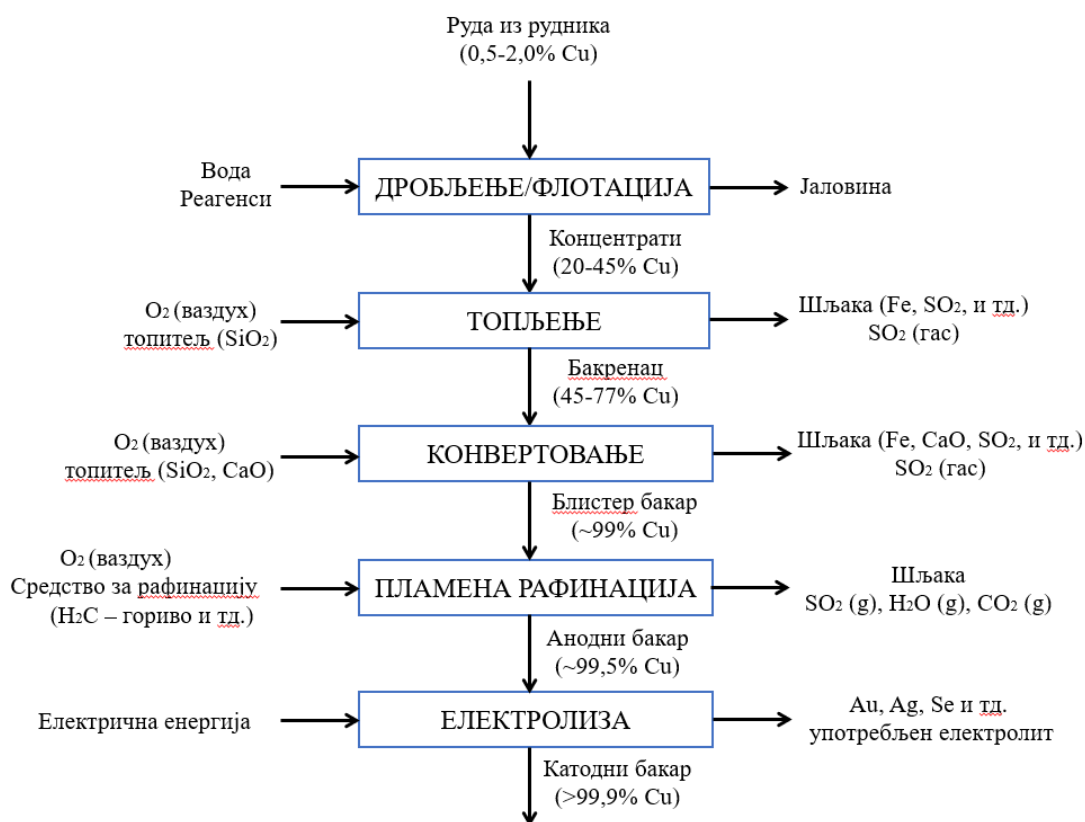
такође постоји и низ локалитета где је вршено делимично истраживање бакроносних орудњења. Дугогодишња експлоатација у Бору и околини је у великој мери утицала на животну средину, преко деградације великих површина земљишта (површински копови), депоновања великих запремина чврстог отпада (раскривка и јаловина), појаве отпадних вода и загађења ваздуха. Неке од отпадних сировина садрже корисне компоненте, бакар и племените метале у границима економске исплативости њихове прераде. Већи део индустријског отпада може се данас корисно употребити, те представља секундарне сировине. Рециклажом отпадних сировина насталих при експлоатацији и преради минералних сировина и топљењу концентрата, омогућено је поново коришћење материјала који нису имали употребну вредност. На овај начин се отпаду насталом у рударству даје нова употребна вредност и истовремено смањује негативан утицај на животну средину [28].

Концентрати бакра се добијају различитим процесима припреме минералних сировина, најчешће флотацијском концентрацијом и лужењем, а затим се исти шаљу на металуршку прераду. Поступак производње бакра је врло сложен и одвија се у неколико фаза да би се на крају електролизом добио чист бакар [31].

Око 90% бакра добија се пирометалуршким поступком. У овом тренутку примена хидрометалуршког поступка добијања бакра ограничена је на оксидне руде бакра [32]. Пирометалуршки поступци за производњу бакра могу се класификовати на аутогене (топљење у лебдећем стању и топљење у растопу) и стандардне (топљење у пламеној пећи, електро пећи, шахтној пећи). Карактеристика стандардних процеса за прераду сулфидних бакарних концентрата је та што обухвата фазу пржења у којој се ослобађа и неповратно губи велика количина топлоте, док наредна фаза топљења захтева потрошњу велике количине додатне скупе топлоте (нафта, мазут, угаљ или природни гас). Због тога су ови поступци за производњу бакра постали нерентабилни. Такође, додатно неповољне околности, као што су нагли пораст цене енергената у свету и ригорозни закони о заштити животне средине, средином прошлог века утицале су да се развију и примене модернија и рационалнија технолошка решења базирана на принципима аутогености топљења, тј. коришћења хемијске енергије сумпора из сулфидних

бакарних концентрата. Аутогеност у пирометалуршкој производњи бакра позната је дуже од једног века и то код: пржења сулфидних концентрата, топљења пиритних руда и конвертовања бакренца. За аутогено топљење бакарних концентрата највећи део топлоте се добија на рачун егзотермалних реакција сулфида гвожђа и бакра: пирита (FeS_2) и халкопирита (CuFeS_2). То значи да садржај сулфидне компоненте у концентратима бакра дефинише параметре оксидационог агенса, и то степен обогаћења ваздуха кисеоником, температуру обогаћеног ваздуха и количину допунског горива. Сулфиди имају прилично високу хемијску енергију која треба максимално да се искористи у процесу топљења концентрата бакра.

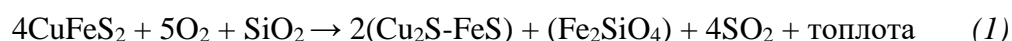
Технолошка шема пирометалуршког поступка добијања бакра из концентрата бакра дата је на слици 1 [16].



Слика 1. Шема пирометалуршког поступка добијања бакра из концентрата бакра [16]

Обично је прва фаза пирометалуршке производње бакра топљење. Да би се отклониле нечистоће, повремено се неки концентрати претходно прже или иду

директно на топљење. Пржење се изводи у реакторима са флуидизационим слојем на око 650 °C, по правилу без коришћења допунског горива, јер је топлота од сагоревања сумпора довољна за одвијање процеса. Као оксиданс се користи ваздух, или ваздух обогаћен кисеоником. Пржењем настају прженац и гасови, који се одпрашују, а потом се користе за производњу H₂SO₄, јер садрже довољну количину SO₂. Добијени прженац се са температуром од око 600 °C отпрема на топљење у пламену пећ. Топлота потребна за топљење обезбеђује се сагоревањем горива (угља). При процесу топљења на 1500 °C, прженац (бакарни концентрат) се топи и део сумпора и гвожђа се отклања оксидацијом. Шаржа у пећима за топљење састављена је од прженца (бакарног концентрата), топитеља (SiO₂), ваздуха или ваздуха обогаћеног кисеоником, повратне прашине и отпада. Да би се уравнио топлотни биланс процеса, понекад је неопходно додати гориво и/или инертни материјал. Модерна топљења одвијају се у пећима на температурама од око 1200 °C под оксидационом атмосфером. Реакција топљења халкопиритног концентрата може бити написана као:

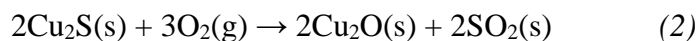


концентрат + ваздух + топитељ → бакренац + шљака + излазни гас

Производи топљења су: бакренац (45÷77% Cu), шљака и излазни гас богат сумпор-диоксидом. Бакренац и шљака се у пламеној пећи раздвајају на основу разлике у густинама и посебно испуштају из ње. Бакренац се, као течан, посудама транспортује до конвертора. Шљака се директно одбацује ако је садржај бакра у њој низак (обично < 1% Cu) или се прерађује флотацијским или пирометалуршким путем због добијања бакра и повратка племенитих метала и након тога се одбацује. Излазни гас који је богат сумпор диоксидом, пре него што се преради у сумпорну киселину или течан сумпор-диоксид, “опере се” да би се отклонила прашина. Када то прописи о животној средини дозвољавају, излазни гас и сумпор диоксид емитују се директно у атмосферу. У већини развијених земаља ова пракса није више дозвољена законом.

Оксидација бакренца у конвертору се изводи продувавањем ваздуха, а у новије време ваздуха обогаћеног кисеоником на око 1100 °C. Ради превођења гвожђа у

шљаку, у првом периоду продувавања у конвертор се уноси SiO_2 у циљу стварања фајалита Fe_2SiO_4 , односно фајалитне шљаке. Настала шљака се потом излива из конвертора, а у њему остаје Cu_2S такозвани бели мат. У другом периоду продувавања, бели мат се оксидише, при чему настаје сирови, елементарни блистер бакар по следећим реакцијама:



Продукти конвертовања су блистер бакар, шљака и гасови. Шљака богата багром се враћа на прераду у пламену пећ, док се гасови са високим садржајем SO_2 користе за производњу H_2SO_4 . Блистер бакар садржи различите штетне примесе, па се рафинише пламеном рафинацијом. Она се изводи у анодним пећима у два ступња. Прво се продувавањем ваздуха кроз растоп блистер бакра оксидишу нечистоће до оксида (осим племенитих метала), који испливавају на површину и са ње се скидају у виду шљаке. Након тога, у другом периоду, заостали растворени Cu_2O се редукује гасовима суве дестилације буковог дрвета, који урања у растоп. Овај ступањ пламене рафинације се назива полање. Коначни продукт пламене рафинације је анодни бакар. Шљака пламене рафинације је богата багром, па се шаље као повратни материјал на прераду [32].

У Србији се пирометалуршким начином топљења руде бакра сумпор-диоксид директно испуштао у атмосферу, што је негативно утицало на здравље људи, јер је концентрација SO_2 у ваздуху премашивала границе дозвољеног. Проблем емисије сумпор-диоксида у атмосферу може бити решен системима за пречишћавање, чијом применом би се спречило даље ширење штетних гасова и честица.

2.4. Могућност примене бакарне шљаке у односу на њен хемијски састав

Првенствено, даља употреба бакарне шљаке зависи од врсте саме шљаке. Узимајући у обзир да на сваку тону произведеног бакра у свету настаје око 2.2 t бакарне шљаке, долази се до податка да се сваке године генерише око 24.6×10^6 t ове шљаке која се одлаже на депонијама као отпадни материјал [11]. Могућности евентуалне употребе шљаке су различите, од рециклаже, поновне прераде у циљу добијања заосталих садржаних метала, до производње различитих производа са додатком шљаке и њеног одлагања на депонију шљаке - што се сматра најлошијим решењем. Употреба CSA у грађевинској индустрији зависи од садржаја CaO. Уколико је садржај CaO у бакарној шљаци низак, тада она показује пуцоланска својства и може се користити као цементна сировина. Међутим, уколико се садржај CaO повећава или под активацијом NaOH, бакарна шљака може показивати везивна својства и тада је њена употреба могућа као делимична замена за Портланд цемент. Примена бакарне шљаке као замена за Портланд цемент у бетону и/или као цементна сировина у производњи цемента, има двоструку предност у елиминисању трошкова одлагања и смањењу коштања бетона.

Прегледом хемијских анализа бакарних шљака, узоркованих са површинских депонија у кругу фабрике у Бору у различитим временским периодима, уочене су две групе сличних података, табела 1. Прва група анализираних шљака имала је нижи садржај силицијума и калцијума и већи гвожђа [33-36]. Друга група узорака имала је већи садржај силицијума и калцијума, а нижи гвожђа [37].

Табела 1. Резултати хемијских анализа бакарне шљаке (CS)

| Једињења (%) | Испитивање по годинама | | | | | | |
|--------------------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | 1989 | 1995 | 2001 | 2016 | 2012 | 2012 | 2020 |
| SiO ₂ | 36.5 | 35.02 | 33.65 | 33.75 | 46.72 | 32.77 | 42.54 |
| Al ₂ O ₃ | 5.0 | 5.17 | 4.75 | 3.78 | 4.52 | 4.86 | 3.57 |
| Fe (summ) | | | 38.4 | 39.09 | 27.92 | 37.05 | |
| FeO | 47.6 | | 36.1 | 33.80 | | | |
| Fe ₂ O ₃ | | 48.08 | | 8.05 | | 3.02 | 6.92 |
| Fe ₃ O ₄ | | | 9.58 | 9.39 | 3.41 | | |
| CaO | 5.7 | 5.07 | 1.54 | 6.00 | 19.60 | 4.49** | 20.29 |
| Ca | | | | | | 3.21 | |
| MgO | | 2.06 | 0.94 | 1.16 | | 1.03** | 0.51 |
| Mg | | | | | | 0.62 | |

| | | | | | | |
|--------------------------------|-----|-------|-------|--------|------|------|
| SO ₃ | | 1.58 | | | | 1.18 |
| K ₂ O | | 1.38 | 0.96 | 0.86** | | 0.43 |
| K | | 1.15* | 0.31* | 0.72 | | 0.36 |
| Na ₂ O | | 0.58 | 0.42 | 0.24** | | 0.15 |
| Na | | 0.43* | 0.80* | 0.18 | | 0.11 |
| TiO ₂ | | 0.68 | | | | 0.28 |
| Mn ₂ O ₃ | | | | | | 0.04 |
| ZnO | | 0.70 | | | | |
| Cu | 0.5 | | 0.87 | 0.97 | 0.33 | 0.84 |
| CuO | | 0.71 | 0.16 | 0.15 | | 0.16 |
| S | 0.5 | | 0.81 | | 0.20 | 0.81 |
| PbO | | 0.12 | | | | |
| Pb | | | | 0.10 | | |
| As ₂ O ₃ | | 0.16 | | | | |
| MoO ₃ | | 0.21 | | | | |

Напомена: [33][34]; 2001 [35]; 2016 [35]; 2012 [37]; 2012 [36,38]; 2020 [39]; *-результати добијени рачунским путем на основу процентуалног садржаја оксида; **-результати добијени рачунским путем на основу процентуалног садржаја елемената.

Зависно од одабраног процеса производње бабра, добијена бакарна шљака има низ повољних физичких и механичких својстава за даљу употребу, укључујући одличну проводљивост, добру отпорност на абразију и добру постојаност. На основу података приказаних у табели 1, примећује се да коефицијент киселости шљаке из РТБ-а варира у границама 1,0-1,5. На основу изнетих података може се закључити да се на добијање жељеног квалитета бакарне шљаке може утицати додавањем топитеља у току процеса топљења. То значи да сваком успостављеном односу саставних компонената бакарне шљаке одговара продукт, тј. минерална сировина одређених физичко-механичких карактеристика.

Саставне компоненте бакарне шљаке су: FeO, SiO₂, CaO, Al₂O₃ и удео осталих примеса у знатно мањем проценту. Учешће наведених компонената на особине шљаке (згуре) је значајан, па се учешће сваке од њих посебно анализира.

- FeO је најчешћа база у руди бабра. Увек је саставни део бакарне згуре која својим присуством повећава запреминску масу без пора. У фази хлађења изазива трансформацију згуре у минерални материјал стенске структуре.
- SiO₂ (кварц) је компонента која неутралише скоро све оксиде база који се налазе у руди бабра. Он смањује течљивост згуре па је често потребно додати топитеље (оксиде база) да би течљивост згуре била поправљена.

Вишак SiO_2 у згури смањује запреминску масу без пора и на зрнима згуре проузрукује појаву стакластих површна.

- CaO је јак оксид базе који се додаје као топитељ са циљем да се смањи вредност степена киселости “к” код добијене згуре. То је у процесу топљења битно за остваривање жељеног квалитета. Зависно од садржаја CaO могу се издвојити две врсте згуре:

1. Згура са 0-15% CaO ;

2. Згура са 35-45% CaO .

1. Згуре са 0-15% CaO имају добре физичко-механичке особине (чврстоћа при притиску, хабање по Бемеу, коефицијент Лос Анђелес и др.) неосетне су на воду и на атмосфериле, те их све то сврстава у групу материјала који се могу користити за грађење коловозних конструкција;

2. Згуре са 35-45% CaO су такође добар грађевински материјал, који због знатног присуства CaO има другачије особине. Наведена згура у присуству воде показује одређену хидрауличку активност и врло лако реагује на присуство негашеног креча или цемента, стварајући очврслу мешавину након механичког мешања.

- Al_2O_3 је компонента која згури даје посебне особине. Додатак одређене количине Al_2O_3 и FeO даје згури следећа својства:

1. Згура се лако лије у калупе и обликује у жељене елементе;

2. Згура добија хrapаве површине и изражену уситњеност после завршеног хлађења.

Са становишта заштите животне средине, бакарна шљака је самоодрживи материјал који задовољава критеријуме различитих стандарда. Као што је већ напоменуто, америчка Агенција за заштиту животне средине и Базелска конвенција Уједињених нација (УН) о прекограничном кретању опасног отпада и њиховом одлагању одлучиле су да бакарна шљака није опасан отпад. Може се закључити да употреба бакарне шљаке у цементу и бетону пружа додатну

могућност техничке употребе за све сродне индустрије, посебно за индустрију производње значајне количине бакарне шљаке [23].

2.5. Карактеристике бетона са садржајем CSA

2.5.1. Увод

Највећи број својстава бетона зависи од остварене структуре бетона која се формира након уградње свежег бетона, а као резултат хидратације цемента. У зависности од v/c фактора, одређена количина цемента може да остане необухваћена процесом хидратације, а са друге стране у оквиру бетона може да се добије и цементни камен велике порозности (пре свега капиларне порозности, која неповољно утиче на све физичко-механичке карактеристике бетона).

У случају бетона постоје три етапе формирања структуре:

- I – почетна етапа, етапа формирања почетне структуре, када услед везивања цемента маса свежег бетона почиње да прелази у чврсто агрегатно стање;
- II етапа – етапа постепеног формирања структуре очврслог бетона коју прати повећање чврстоће;
- III етапа – етапа стабилизације структуре, када се достигнута чврстоћа током времена битније не мења.

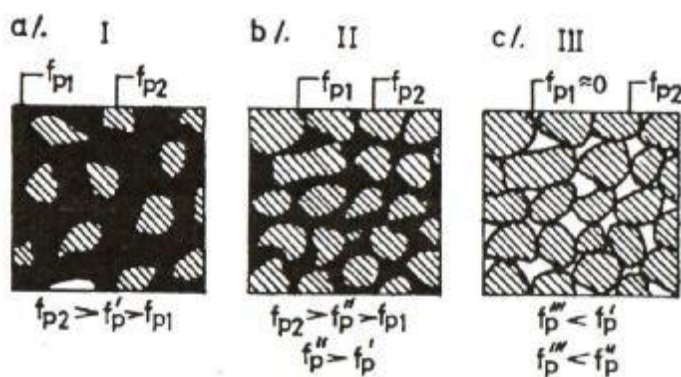
Током периода формирања структуре бетона, а услед одвијања процеса хидратације цемента и развијања одређене хидратационе топлоте, долази до промене температуре бетона у оквиру бетонских елемената и конструкција. Структуру бетона у општем случају чине:

- макроструктура-структура двокомпонентног система у чији састав улазе малтерска компонента и крупан агрегат;
- микроструктура тј. структура цементног камена;
- прелазна (транзитна) зона између агрегата и цементног камена.

У макроструктури бетона се издвајају два основна структурна елемента – агрегат и цементни камен. Макроструктура бетона је нехомогена. Треба поћи од запремине свеже уграђеног бетона:

$$\bar{v}_a + \bar{v}_{cp} + v_p = 1 \quad (4)$$

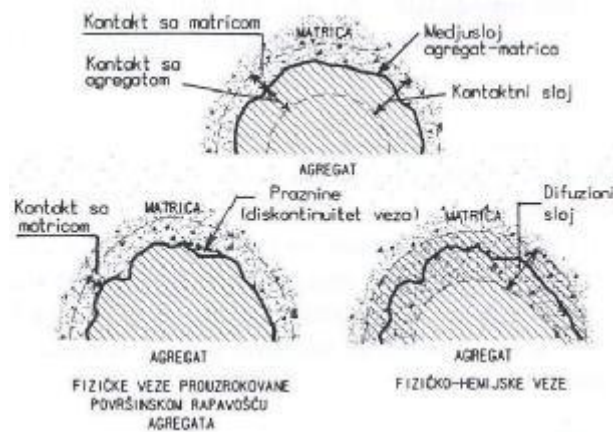
, где је \bar{v}_a апсолутна запремина агрегата, \bar{v}_{cp} је апсолутна запремина цементне пасте, v_p запремина ваздуха у свежем бетону, односно запремина намерно увученог ваздуха за постизање веће отпорности бетона на дејство мрза. Из тога ћемо добити податак да макроструктура може да се изрази у виду односа агрегата и цементног камена садржаних у маси бетона.



Слика 2. Типови макроструктуре бетона [40]

У принципу, постоје три типа макроструктуре бетона (слика 2). Први је када су зрна агрегата на знатним међусобним растојањима и не постоји међудејство између појединих зрна. Други је када је мање цементног камена и он само испуњава просторе између зрна и постоји још танак слој цементног камена на контакту суседних зрна. Трећи је када имамо мањак цементног камена и он само обавија зрна агрегата у слојевима мале дебљине, и само делимично испуњава просторе између зрна.

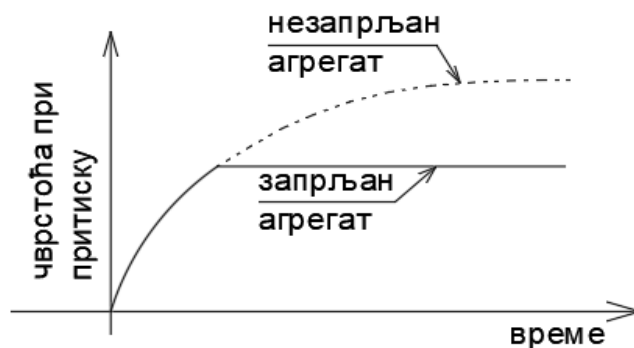
Уколико се тражи бетон високих физичко-механичких карактеристика, потребно је да има макроструктуру II у комбинацији са гранулометријским саставом агрегата који омогућава оптималну упакованост зрна. Такође, то зависи и од чврстоће самог агрегата и његове компактности, као и од оптимално ниске порозности цементног камена.



Слика 3. Шематски приказ међузависности између агрегата и цементне матрице у контактної зони [41]

У микроструктури се подразумева дефинисање унутрашње структуре сваког од два основна структурна елемента бетона: агрегата и цементног камена, њихове порозности, и анализа грађе контактної слоја на граници ова два елемента. При вишем v/c фактору, унутар масе свежег бетона долази до издвајања воде која се скупља испод зрна крупног агрегата стварајући водене џепове. Тиме се добија слабија веза између крупних зрна агрегата и малтера, па се дуж тих зона под утицајем скупљања цемента јављају микропрслине. Може се рећи да је укупна порозност бетона збир гелске порозности цементног камена, порозности услед неефикасног уграђивања, примене аераната и сл, као и капиларне порозности. Најеефикасније смањење порозности у бетону је услед смањења присуства воде. Контактни слој је исто значајан у склопу укупне масе бетона. Ширина контактної слоја је сса 0,06 mm. Та контактна зона се по саставу и својствима битно разликује од осталог цементног камена. Повезивање-срастање зрна агрегата са цементним каменом повезано је са калцијум-хидроксидом који је један од продуката хидратације Портланд цемента. Он на површинама зрна агрегата делом кристалише, а делом прелази у калцијум-карбонат. Калцијум-хидроксид условљава појаву Вандервалсових сила, које представљају основни фактор везе (атхезије) агрегат-цементни камен. Контактна зона између агрегата и цементног камена има увек већу порозност, па је у тој контактної зони најинтензивније кретање воде, па се та зона зове и транзитна зона. Чврстоћа везе агрегат-цемент зависи и од чистоће површине зрна. На пример, ако су зрна агрегата запрљана

филмом глине или слојем прашине, ова веза биће угрожена, што доводи до смањења чврстоће бетона, слика 4. Такође, приликом испитивања отпорности на дејство мрза, већ након 5-10 циклуса смрзавања-одмрзавања ће се појавити пукотине између зрна агрегата и цементног камена, уколико је агрегат запрљан.



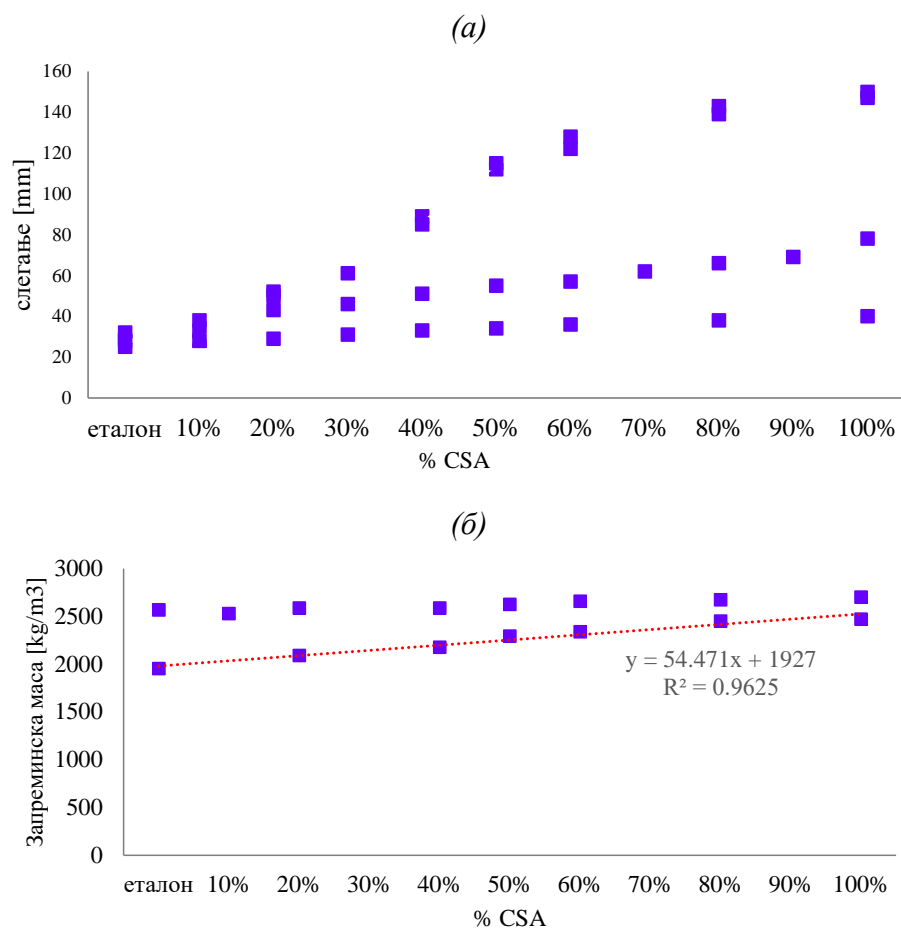
Слика 4. Утицај запрљаности зрна агрегата на чврстоћу при притиску [42]

2.5.2. Оптималан садржај CSA са аспекта обрадивости свежих бетонских мешавина

Количина употребљеног агрегата CSA као замена за одговарајуће фракције природног агрегата у бетонским мешавинама утиче на физичко-механичке карактеристике бетона и у свежем и у очврслом стању. Са повећањем садржаја замене агрегата CSA побољшава се конзистенција свежих бетонских мешавина [43]. Овај тренд је последица повећаног садржаја слободне воде у бетонским мешавинама, насталог услед мањег упијања воде од стране зрна CSA.

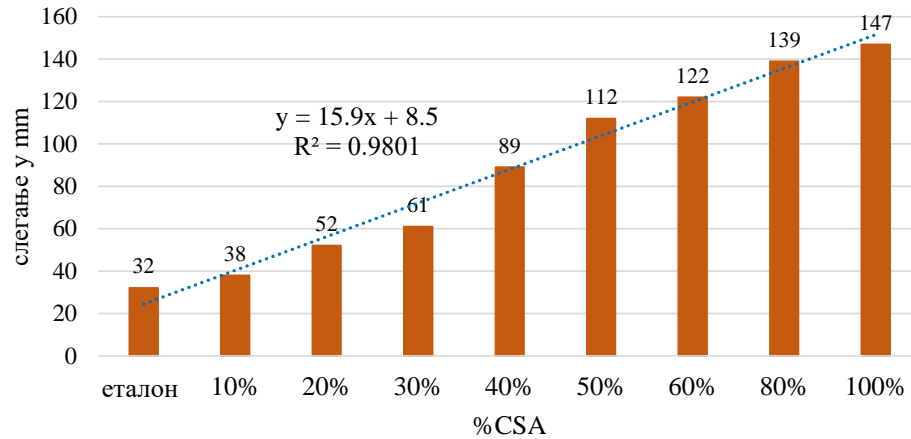
Зрна CSA имају оштре ивице, за разлику од заобљених зрна RA. Овакав облик зрна CSA, који обично смањује обрадљивост, чинећи бетон грубим и повећана отпорност на трење може делимично да уравнотежи ефекат ниже апсорпције воде код бетона (што би имплицирало већу количину слободне воде у мешавини, а самим тим и потенцијално бољу обрадљивост) у поређењу са природним агрегатом [44].

На слици 5 приказане су запреминска маса и конзистенција свежег бетона у функцији процента CSA. Веће вредности слегања добијене су на мешавинама са већим процентом CSA. Вредност R^2 од 0.9625 представља директну корелацију између садржаја CSA и запреминске масе бетона.



Слика 5. (а) Конзистенција и (б) запреминска маса бетона у функцији процента CSA [48]

Запреминска маса зрна агрегата CSA се креће у границама $3160-3300 \text{ kg/m}^3$ и за око 30% је већа у поређењу са запреминском масом зрна RA. Такође, упијање воде код зрна RA износи 1.2%, док за CSA износи 0.65%. Са повећањем процента CSA расте запреминска маса бетонских мешавина. Ово је очигледна последица веће запреминске масе зрна CSA у односу на RA.

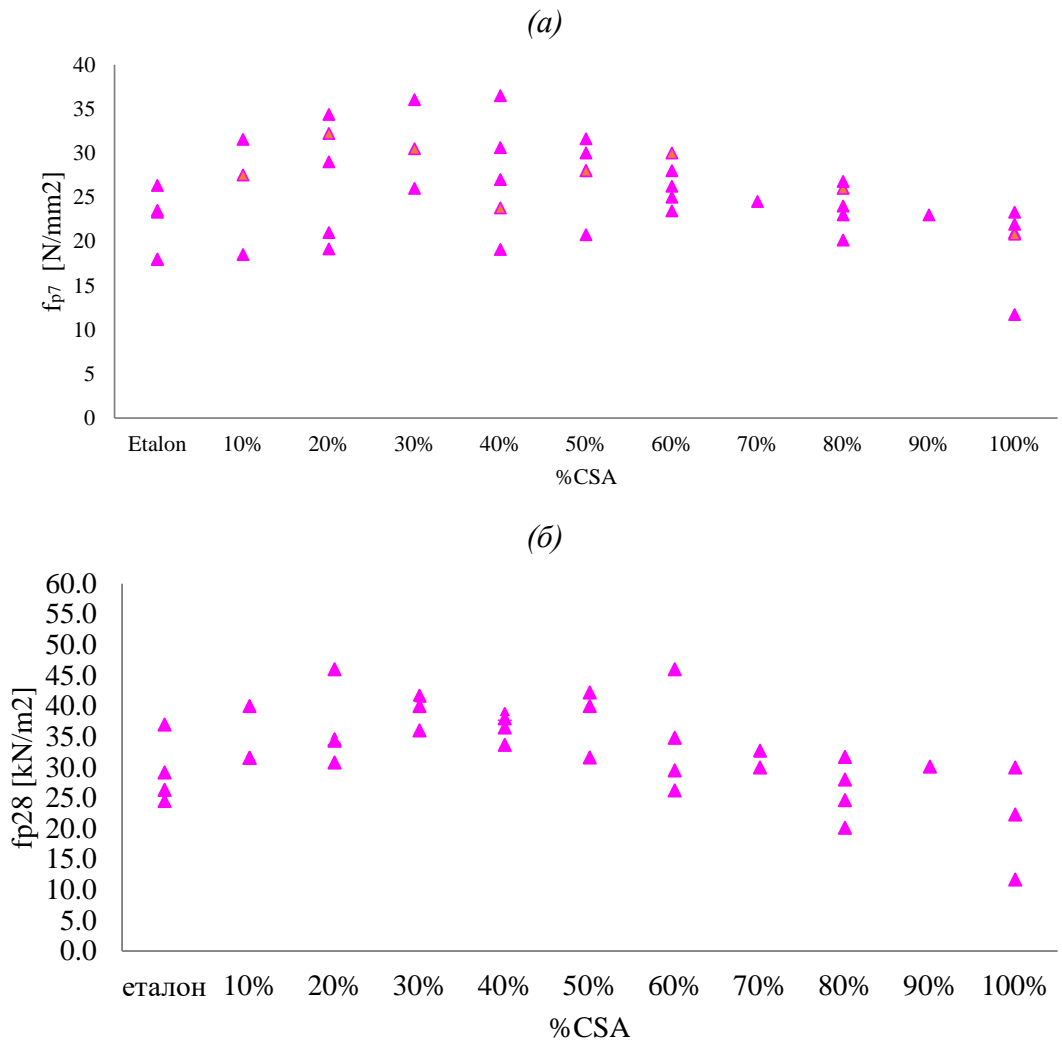


Слика 6. Зависност конзистенције свежег бетона у односу на проценат CSA [45]

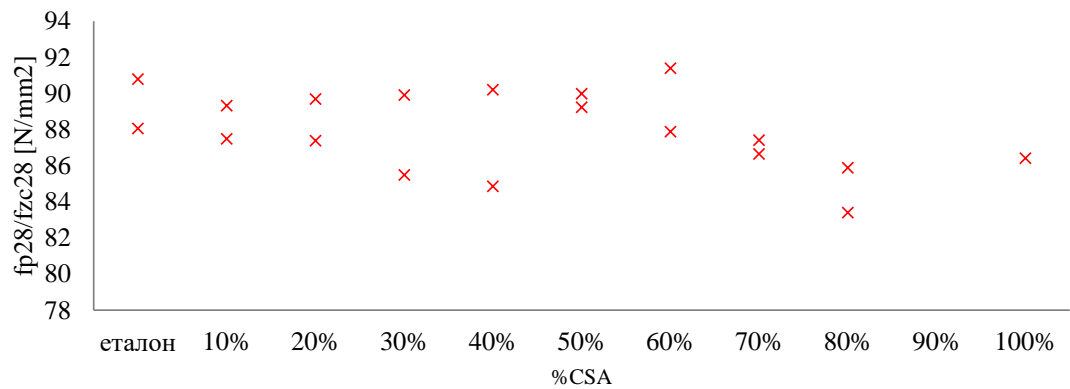
При испитивању свежих бетонских мешавина, на основу вредности приказаних на слици 6, може се закључити да се са повећањем процента CSA утиче на обрадљивост и уградљивост бетона. Приликом испитивања, аутори су закључили да код бетона са високим процентима CSA постоји блага тенденција избијања вишка воде на површину узорка услед чега се, са аспекта уградљивости бетона, препоручује проценат садржаја од 80% CSA. Стога се овај проценат замене сматра оптималним са аспекта обрадљивости свежих бетонских мешавина [45].

2.5.3. Оптималан садржај CSA са аспекта физичко-механичких карактеристика очврслих бетона

Чврстоћа при притиску је једна од најзначајнијих механичких карактеристика бетона, својство које утиче на низ других физичко-механичких својстава бетона и својство на које се најчешће мисли када се говори о квалитету бетона. Чврстоћа при притиску бетона справљеног са додатком агрегата CSA зависи од великог броја параметара. Овде су детаљно анализирани утицаји физичко-механичких карактеристика зрна агрегата CSA, као и утицаји примењених фракција и количина CSA. Такође, у циљу истраживања могућности побољшања карактеристика бетона са садржајем замене CSA, анализиран је и утицај водоцементног фактора на карактеристике бетона.

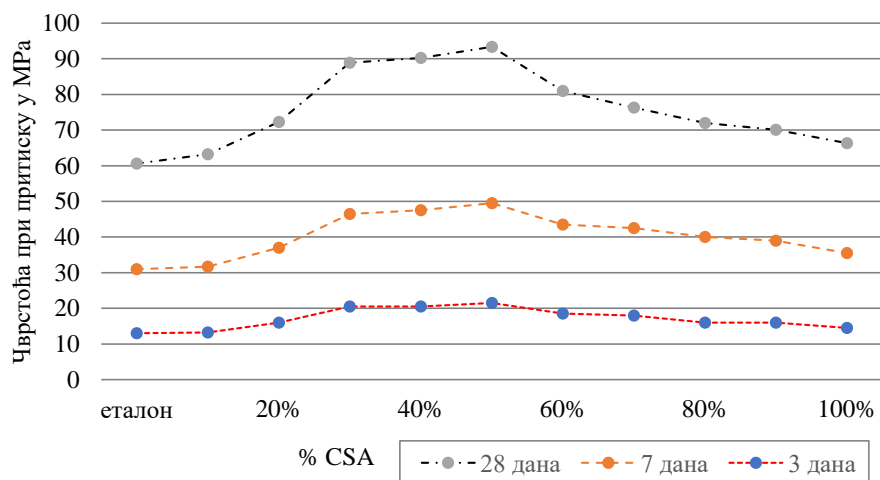


Слика 7. Чврстоћа при притиску бетона старости (а) 7 дана и (б) 28 дана у зависности од процента CSA [43,45–49]



Слика 8. Однос чврстоћа бетона старости 28 дана (f_{p28}/f_{zc28}) у зависности од процента CSA [45,46]

Sambhaji и остали [43] су анализирали утицај количине CSA на својства бетона у свежем и очврслном стању. Испитивањима је обухваћено 6 бетонских мешавина које су се разликовале по проценту садржаја CSA као замене за ситне фракције природног речног агрегата и по старости. Номинално најкрупније зрно агрегата у бетонским мешавинама износило је 10 mm и 20 mm. На слици 9 приказани су резултати спроведених испитивања.



Слика 9. Чврстоће при притиску у односу на садржај CSA [43]

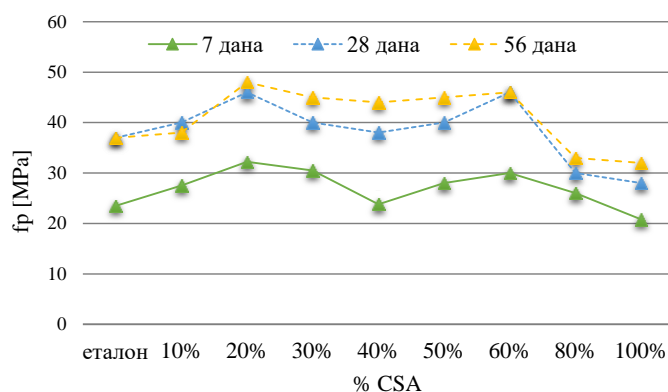
Са повећањем садржаја замене агрегата CSA у бетону расте и чврстоћа при притиску, при старостима бетона од 3, 7 и 28 дана и при различитим процентима садржаја CSA. Ово је последица добре интеракције зрна CSA и цементне матрице настале због оштрих ивица зрна CSA. Веза између цементне матрице и агрегата CSA је боља због облика зрна CSA. Ово повећање интеракције агрегата и цементне матрице могло би објаснити добру чврстоћу при притиску мешавина бетона са већим садржајем CSA, упркос смањеној апсорпцији воде код зрна агрегата CSA што имплицира већу количину слободне воде у мешавини (што негативно утиче на чврстоћу) и стакластој површини за коју се очекује да ће имати негативан утицај на везивање [43]. Тако на пример, при старости од 3 дана, мешавине са садржајем 30% CSA и 50% CSA оствариле су пораст чврстоће од 57.7%, односно 65.4%, респективно, у односу на контролну мешавину. При старости од 7 дана, код истих мешавина пораст чврстоћа износио је 44.4%, односно 55.6%, респективно, у односу на контролну мешавину. Пораст чврстоће при притиску за

мешавине 30% CSA и 50% CSA након неге од 28 дана износио је 42.9%, односно 44.6%, респективно, у односу на контролну мешавину.

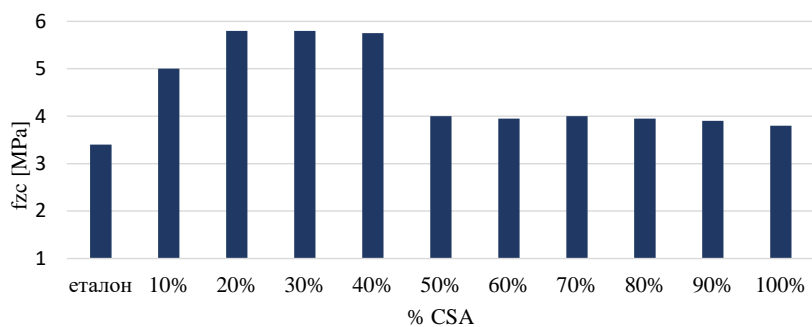
На основу поменутих резултата стиче се утисак пораста чврстоће при притиску код мешавина са садржајем замене CSA до 50%. Даљим повећањем садржаја CSA, изнад 50%, чврстоћа при притиску се смањује, а конзистенција постаје течнија, као последица повећања садржаја слободне воде у бетону насталог услед мањег упијања воде зрна CSA.

Сличном проблематиком у својим истраживањима бавили су се *V. Patil* и остали [46] који су узели у обзир и запреминску масу свежих бетонских мешавина. На испитаним бетонским узорцима варирали су проценте садржаја CSA у бетонима и старости бетона.

На слици 10а приказана је зависност између f_p и процента замене ситних фракција CSA у бетонским мешавинама при старости 7, 28 и 56 дана.



(а)



(б)

Слика 10.(а) f_p , (б) f_{zc} у зависности од % CSA [46]

Запажа се пораст чврстоће при притиску при старости од 56 дана код мешавине са 20% CSA у односу на контролни бетон. Даљим повећањем процента замене вредност f_p (чврстоће при притиску) опада. На истим узорцима испитана је и f_{zc} .

Чврстоћа при затезању цепањем (f_{zc}) представља однос силе лома и површине основе узорка. Одређена је према обрасцу:

$$f_{zc} = \frac{2P}{\pi LD} \quad (5)$$

Чврстоћа при затезању цепањем расте са порастом процента CSA до 30%. Даљим повећањем процента CSA опада вредност f_{zs} али је и даље већа у односу на контролну мешавину. Са порастом процента CSA до 50% расте вредност f_{zc} . Даљим повећањем процента CSA чврстоћа при затезању цепањем опада, али је њена вредност и даље већа у односу на контролни бетон.

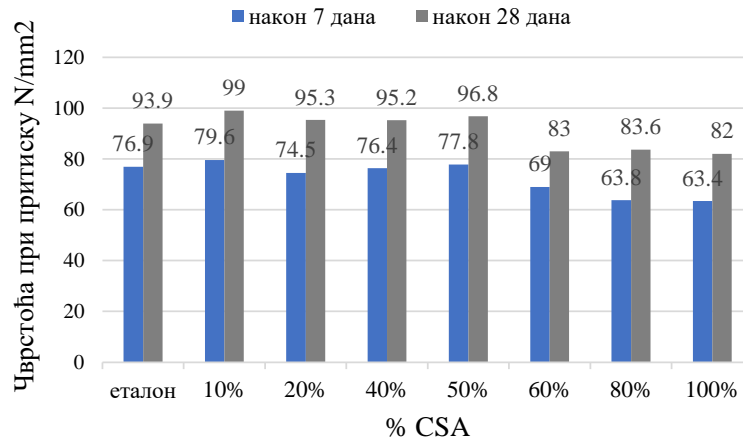
На основу поменутих испитивања, тренд раста f_{zc} је примећен до процента замене 60% CSA, након чега наступа благи пад измерених вредности. Битно је истаћи да бетонске мешавине са већим процентом CSA имају боље чврстоће при притиску и да се ово приписује доброј интеракцији између зрна агрегата и цементне матрице у бетону.

За разлику од претходних аутора који су своја испитивања спровели на обичним бетонима са садржајем CSA као замене за RA, *Khalifa S. Al-Jabri и остали* [50] су се бавили бетонима високих чврстоћа. Поменути аутори су дошли до закључка да се са повећањем садржаја CSA запреминска маса очврслог бетона повећава око 5%, у односу на контролну мешавину.

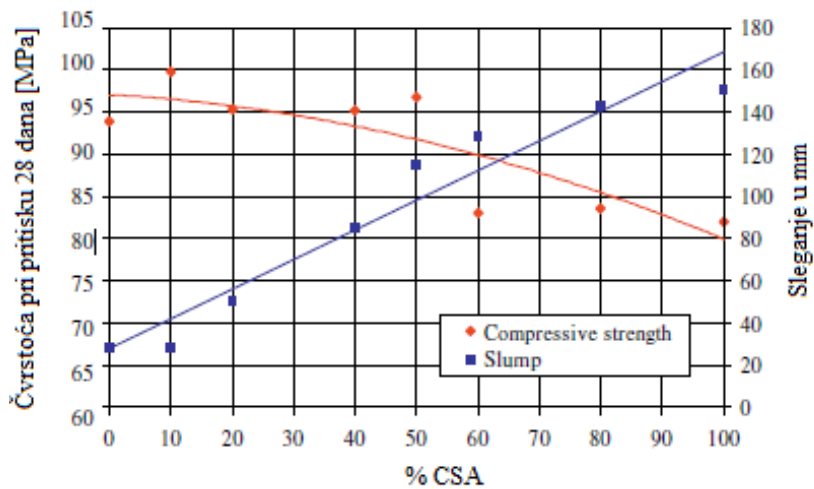
Испитивања су рађена на 8 мешавина са процентуалним садржајем CSA који варира од 0 до 90% при старостима бетона од 7 и 28 дана. На испитаним узорцима, осим садржаја CSA и времена неге бетона, варирано је и време апсорбције узорака. Време абсорпције износило је 10 min, 30 min, 60 min и 120 min.

Оптималан проценат садржаја CSA у бетонима износи 50%. Бетони са овим процентом CSA постижу боље физичко-механичке карактеристике. Даље повећање процента CSA преко 50% утиче на смањење чврстоће при притиску у

односу на контролни бетон, слика 11. Разлог се проналази у повећаном садржају слободне воде у мешавинама услед мањег упијања зрна CSA.



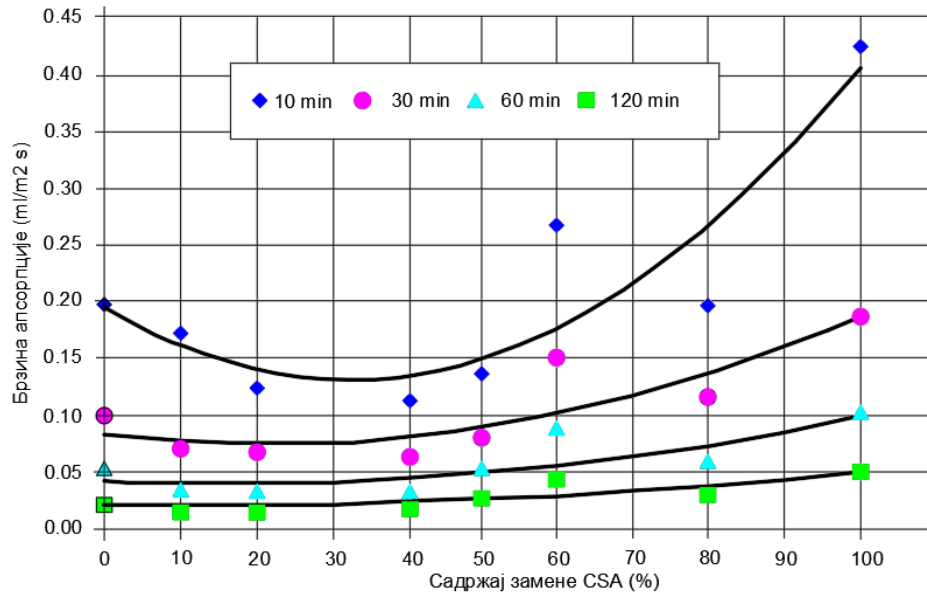
(a)



(б)

Слика 11. (а) Чврстоћа при притиску и (б) зависност између конзистенције и чврстоће у односу на проценат CSA [50]

Бетонске мешавине са садржајем 40% CSA имају мању брзину абсорпције површинске воде. Са даљим повећањем процента замене изнад 40% повећава се и брзина абсорпције. Ово се може приписати већој порозности бетона са процентом садржаја CSA агрегата као замене за природни речни агрегат. На слици 12 је приказан однос брзине абсорпције и процента CSA у бетонским мешавинама.

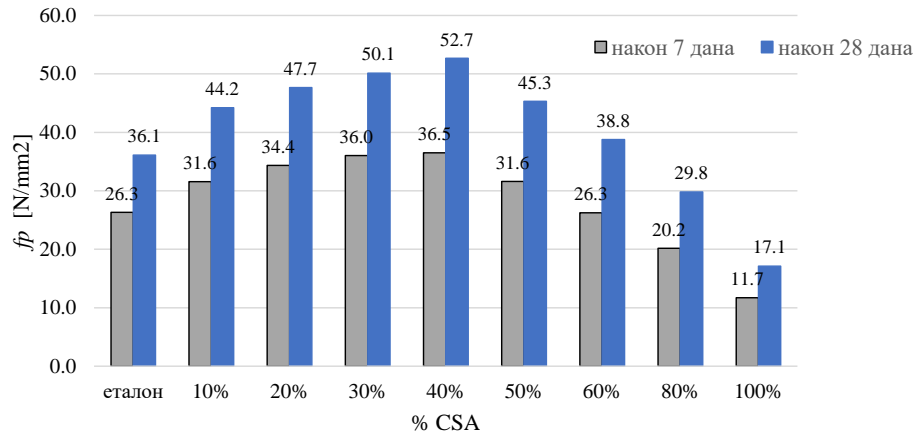


Слика 12. Зависност брзине абсорпције у односу на проценат замене бакарне шљаке у бетонским мешавинама [50]

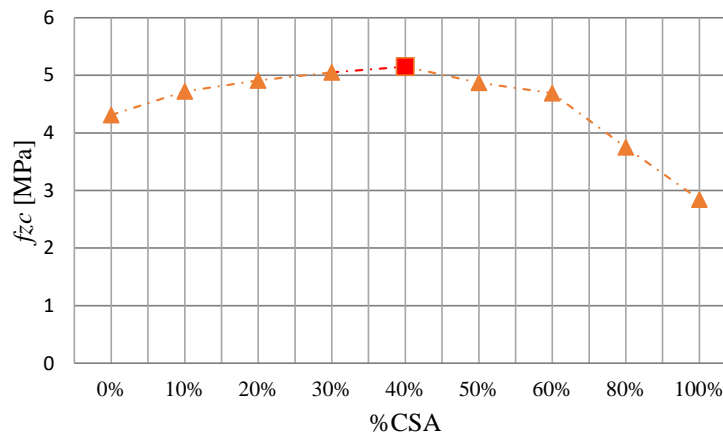
На основу поменутих радова, даје се препорука оптималног процента CSA од 40% за добијање бетона са добрим физичко-механичким карактеристикама. При овом проценту CSA примећен је пораст чврстоће при притиску уз рапидно повећање брзине абсорпције.

Приликом испитивања физичко-механичких карактеристика бетона *Achudhan и остали* [45] су закључили да се са запреминским повећањем процента бакарне шљаке у бетонским мешавинама од 40% повећава чврстоћа при притиску. Даље повећање процента изнад 40% доводи до пада чврстоће.

На слици 13 приказане су вредности чврстоћа при притиску бетонских мешавина са различитим процентом садржаја CSA у односу на контролну мешавину.



(a)



(б)

Слика 13. Зависност (а) f_p ; и (б) f_{zc} у односу на проценат садржаја CSA [45]

Са дијаграма на слици 13а може се видети да проценат повећања чврстоће при притиску код мешавине са 40% CSA износи 45.8% у односу на контролни бетон.

Одатле и закључак да је оптимални садржај замене агрегата од бакарне шљакке у бетонима са аспекта обрадљивости свежих бетонских мешавина једнак 80%, док је са аспекта чврстоће при притиску тај проценат мањи и износи 40% CSA.

Приликом испитивања физичко-механичких карактеристика бетона *Mostafa Khanzadi* и *Ali Behnood* [17] су узели у обзир количину цемента, водовезивни фактор и старост мешавина, па су тако анализирали вредности чврстоће при притиску и чврстоће при затезању. Испитивање је рађено на 6 бетонских мешавина. Састав мешавина приказан је у табели 2.

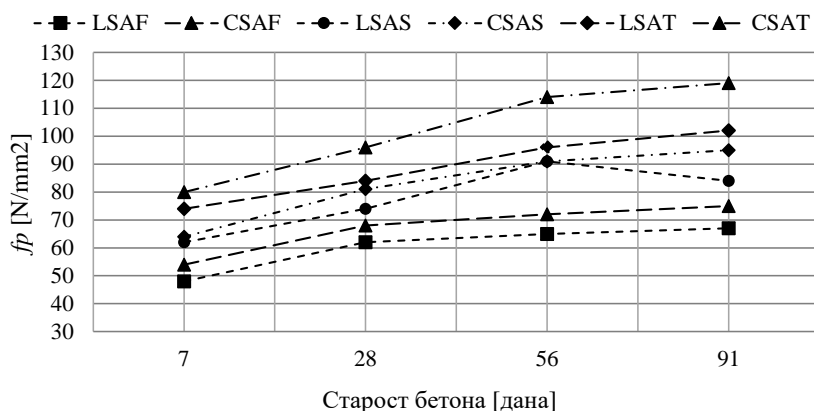
Табела 2. Састав бетонских мешавина [17]

| Мешавине | LSAF | LSAS | LSAT | CSAF | CSAS | CSAT |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Цемент, kg/m ³ | 430 | 450 | 441 | 441 | 430 | 450 |
| Силикатна прашина, kg/m ³ | - | 45 | 26.5 | 26.5 | - | 45 |
| Вода, kg/m ³ | 172 | 149 | 164 | 164 | 172 | 149 |
| Фине фракције, kg/m ³ | 687 | 615 | 653 | 653 | 687 | 615 |
| Шљунак | 1030 | 1168 | - | 1115 | - | - |
| Крупне фракције, kg/m ³ | - | - | - | - | - | - |
| CSA | - | - | 1511 | - | 1395 | 1582 |
| Водовезивни фактор | 0.40 | 0.30 | 0.35 | 0.35 | 0.40 | 0.30 |

Напомена: v/c – водоцементни фактор.

За овако пројектоване бетонске мешавине извршена су испитивања чврстоће при притиску. Резултати испитивања приказани су на слици 14 на којима се виде вредности f_p у односу на старост бетона.

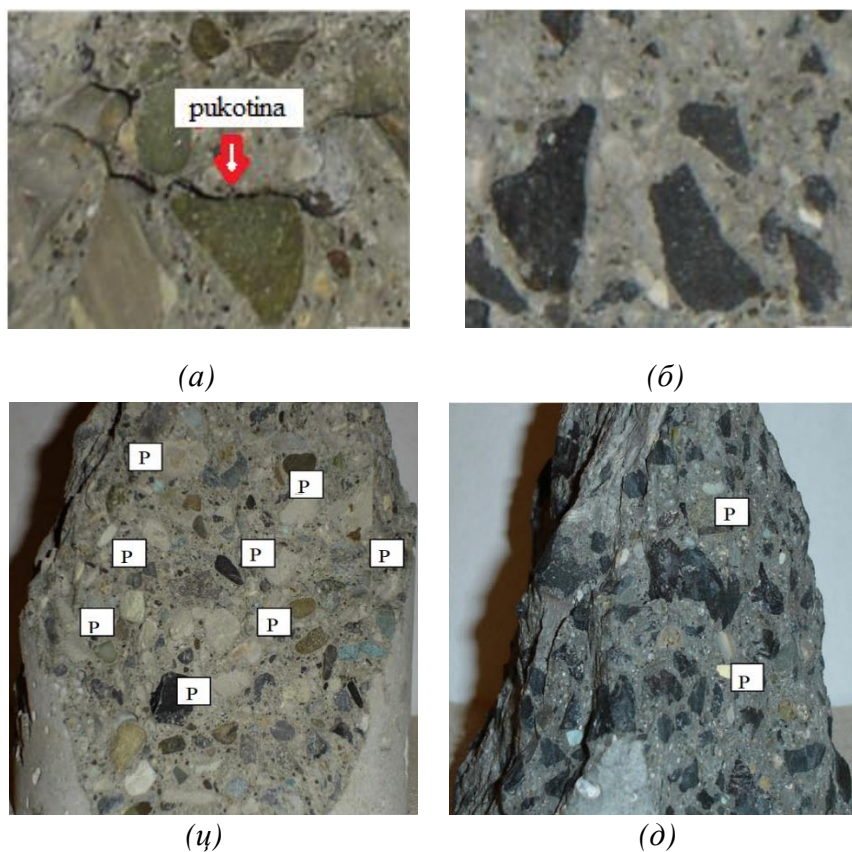
Са порастом количине цемента и силикатне прашине и смањењем водовезивног фактора расте f_p у мешавинама са садржајем CSA као замене за крупне фракције RA. Овај пораст је највећи код мешавине LSAT и износи 37% за f_p . Овакав пораст чврстоће при притиску се приписује бољем укљештењу зрна CSA у цементну матрицу.



Слика 14. f_p у односу на старост бетона [17]

Са слике 15а се може видети, да се при лому контролног бетона јављају пукотине које се простиру дуж контакта између цементног малтера и зрна дробљеног

агрегата, док се на слици 15б види да не постоје такве пукотине између зрна CSA и цементне матрице, што значи да је у овом случају та веза компактнија.



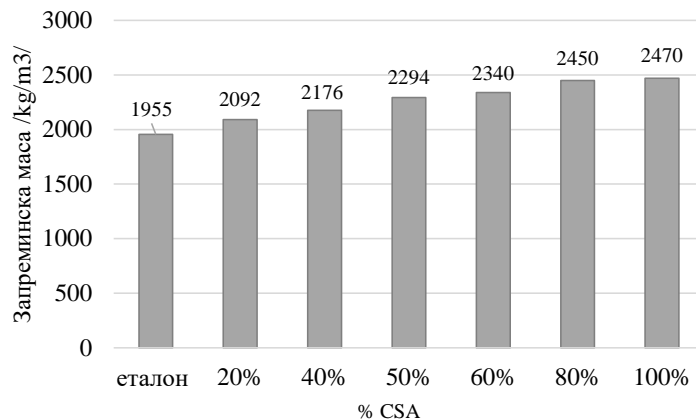
Слика 15. Изглед пукотине након излагања сили притиска; (а) контролни бетон; (б) бетон са % CSA; (ц) контролни бетон; (д) бетон са % CSA; P-правац пропације пукотине [17]

Одатле и закључак да су зрна CSA створила јачу везу са цементном матрицом у односу на зрна RA, услед хрпаве површинске текстуре зрна CSA, што је последица технологије производње бакра.

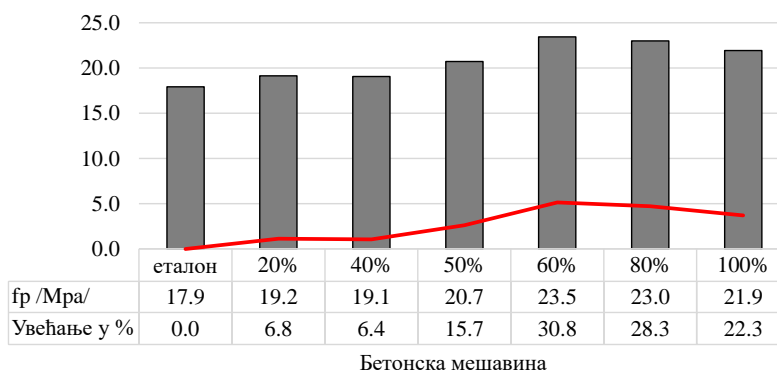
Генерално, додатком агрегата CSA у бетонима побољшавају се њихове механичке карактеристике, због веће тврдоће зрна CSA и веће контактне површине између агрегата и цементне матрице.

Овим се још једном потврђује предност употребе CSA у бетонима у односу на RA кроз побољшање физичко-механичких карактеристика очврслог бетона услед боље интеракције између зрна CSA и цементне матрице [17].

Ali Rezaei Lori, Abolfazl Hassani u Reza Sedghi [47] су анализирали утицај CSA у справљању бетона. Испитивањима је обухваћено 7 мешавина са различитим процентима CSA као замене за крупне фракције RA.



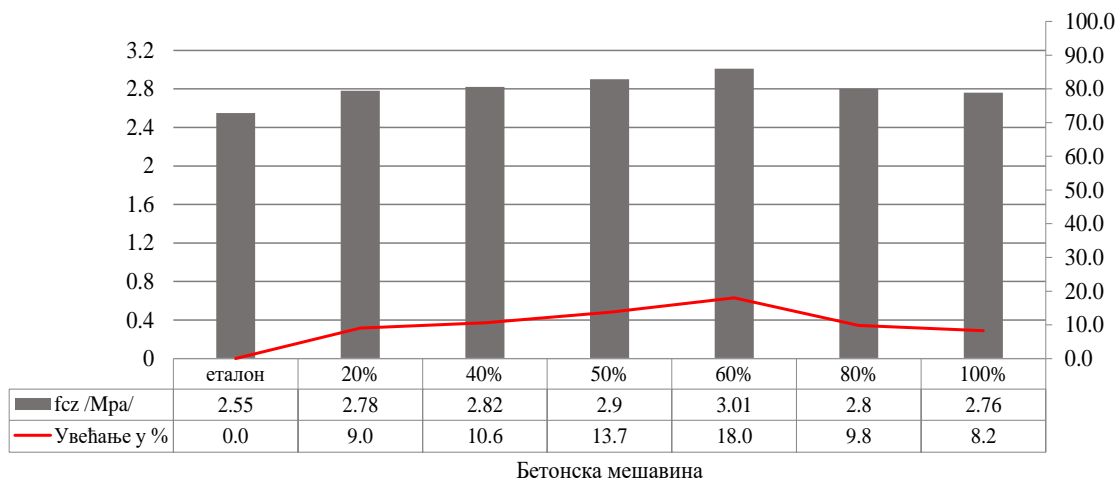
(a)



(б)

Слика 16. Запреминска маса и чврстоћа при притиску након 28 дана [47].

Вредности испитаних чврстоћа при притиску достигле су највећу вредност при садржају 60% CSA, слика 16. Тада је то повећање износило 30.8%. Такође, примећено је нешто мање повећање f_{zc} , слика 17. Вредности f_{zc} су се кретале од 2.5 МПа до 3.0 МПа колико је измерено при садржају 60% CSA, што представља за 18% већу вредност у односу на контролну мешавину.



Слика 17. Чврстоћа f_{zc} у односу на проценат CSA [47]

Паралелно са f_p и f_{zc} извршено је испитивање чврстоћа при затезању чупањем “Pull-off” методом. Испитивање је рађено на узорцима димензија 100 x 100 x 300 mm, који су исечени 50 mm са сваке стране. Након тога су узорци, управно на исечену површину, бушени пречником 20 mm како би се избегла већа препоручена чврстоћа по препоруци *Lori* и *осталих* [47], слика 18.

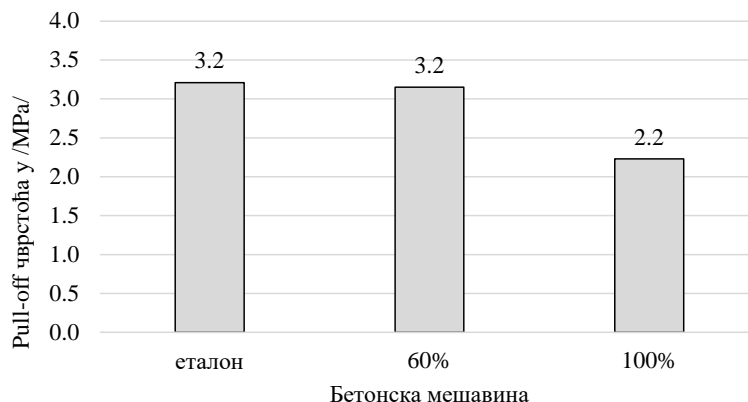
Резултати испитивања су показали да је чврстоћа при затезању чупањем код мешавине са садржајем 60% CSA слична чврстоћи контролне мешавине, слика 18. Међутим, ова чврстоћа се са даљим увећањем садржаја CSA приметно смањује [47].



Слика 18. Pull-off метода [47]

Повећани садржај од 60% CSA уграђене у мешавину није променио чврстоћу везе између цементне матрице и агрегата. Међутим, ова вредност је приметно смањена

са садржајем 100% CSA, слика 19. На основу овога се може утврдити да је смањена чврстоћа везе цементне матрице и агрегата настала услед високог садржаја шупљина у контактної зони.



Слика 19. Зависност Pull-off чврстоће у односу на проценат садржаја агрегата од бакарне шљаке у бетону [47]

Примећени пад чврстоће при затезању чупањем је настао као резултат високе порозности услед повећаног садржаја шупљина на прелазној зони између цементне матрице и зрна CSA [47].

2.5.3. Оптималан садржај CSA са аспекта трајности бетона

Основни медијум кроз који потенцијално штетни хемијски агенси могу да уђу у бетон је вода. У води су често растворени хлориди (нпр. морска вода, подземне воде или вода са коловоза који су третирани сољу за одмрзивање). Хлориди изузетно неповољно утичу како на бетон, тако и на арматуру која кородира. Поред хлорида, заједно са водом у бетон могу да уђу и сулфати, карбонати, органске материје, итд. Додатно, сама вода која уђе у бетон, уколико се претвори у лед, може физички да деградира његову структуру.

2.2.5.1. Порозност бетона

У принципу, бетони настали додавањем агрегата од бакарне шљаке као замене за природни агрегат, су релативно водопропусни што им даје предност у примени код коловоза и тротоара за сакупљање атмосферске воде у градовима. Непропустност оваквих бетона постиже се додавањем одговарајућих хемијских додатака. Истраживања су показала да 100%-тном запреминском заменом

природног агрегата са агрегатом од бакарне шљаке у пропусном бетону повећана се порозност бетона за 3% у односу на контролну мешавину [47]. Може се закључити да са повећањем процента замене агрегата доломита агрегатима бакарне шљаке, долази до повећања порног простора у систему, што се одражава на повећање упијања воде у бетону. Чини се да је ово повећање упијања воде у бетону повезано са обликом и стакластим изгледом површине зрна агрегата CSA. Стога, порозност еталонских узорака бетонских мешавина разликује се од испитаних узорака бетонских мешавина са садржајем замене CSA. Водонепропусност бетона зависи од величина пора присутних у бетону [51]. Два важна фактора која одређују пропустљивост бетона за воду су садржај заробљеног ваздуха и капиларна порозност хидратисане цементне матрице [52].

2.2.5.2. Отпорност на дејство хлорида

Корозија арматуре је главни проблем у бетону који може настати услед продирања хлоридних јона у бетон. Процена садржаја хлорида је веома битна са аспекта трајности бетона.

Хлоридни јони, који потичу од морске воде или од соли за одмрзавање, могу кроз поре бетона да продру у унутрашњост бетонског елемента. Осим из спољашње средине, хлоридни јони у бетон могу доспети преко хлоридима контаминираног агрегата или воде за справљање бетонске мешавине. Интересантно је да се и поред потенцијалне опасности од корозије, традиционално као акцелератори процеса очвршћавања бетона користе смеше на бази калцијум хлорида. Транспорт хлоридних јона одвија се путем дифузије или капиларног упијања. Да би дошло до транспорта хлоридних јона путем дифузије, неопходно је да постоји разлика у концентрацији хлоридних јона у спољашњој средини и у бетону, као и присуство течне фазе. Пренос хлорида путем капиларног упијања дешава се када је бетонска конструкција изложена циклусима сушења и влажења водом која садржи хлоридне јоне. Критична концентрација хлорида при којој се дешава корозија арматуре зависи од многих параметара и не може се усвојити као константна величина у општем случају.

Процедуре које се примењују за одређивање отпорности бетона на продор хлорида подразумевају држање узорак потопљених у раствор натријум-хлорида или се узорак излаже цикличном потапању у раствор NaCl-а и сушењу. С обзиром да су ови поступци временски приметни, често се примењује неки од убрзаних тестова, нпр. мерење електричног отпора [53].

J. Swathi и остали [53] бавили су се испитивањем трајности бетона са садржајем CSA као замене за ситне и крупне фракције RA. У овом истраживању коришћени су узорци облика цилиндра пречника 50 mm и висине 100 mm. Узорци су неговани 28 дана у води. Карактеристике коришћеног агрегата су специфична тежина 2.7 g/cm³, апсорпција воде 0,3% и максимална величина зрна агрегата 20 mm.

Катодни одељак напуњен је 3% раствором NaCl, док је анодни одељак напуњен је са 0.3% NaOH. Бетонски узорак је подвргнут испитивању хлорида, а вредности су очитане са монитора који је повезан са извором напајања од 60 V. Продор хлорида је мерен на сваких 30 минута у току бh.

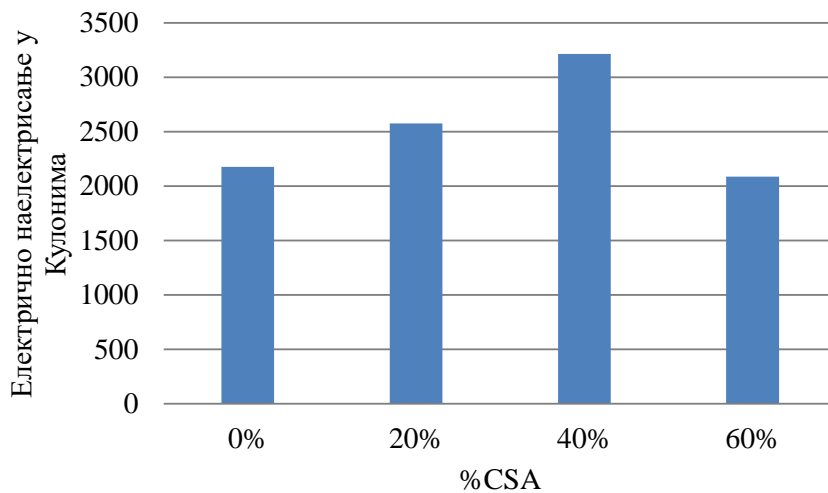
На основу очитаних вредности, а према једначини добијено је електрично наелектрисање:

$$Q=900 \cdot (I_0+2I_{30}+2I_{60}+\dots+2I_{300}+2I_{330}+2I_{360})/1000 \quad (6)$$

, где је Q-рачунско електрично наелектрисање [K]; I- очитане вредности јачине струје [A].

Добијено електрично наелектрисање је приказано у односу на проценат CSA, слика 20.

Брзина пенетрације хлорида код бетона са садржајем CSA већа је у односу на контролни бетон, што говори о томе да је отпорност бетона на дејство хлорида нижа у поређењу са еталонским узорком, слика 20. Пенетрација хлорида оваквих бетона према ASTM C1202, оцењена је као “умерена”.



Слика 20. Електрично наелектрисање у односу на проценат CSA [53,54]

Истом тематиком бавио се *D. Brindha и остали* [21] који је приказао резултате експерименталних испитивања отпорности бетона на дејство хлорида. У оквиру његових експерименталних испитивања, одређивање трајности бетона вршено је испитивањем отпорности на дејство хлорида код бетона са делимичном заменом CSA према стандарду ASTM C1202. Процент замене је варирао од 0% до 60%. Добијени резултати су упоређени са резултатима контролног бетона.

2.2.5.3. Отпорност бетона на дејство мрза

Отпорност бетона на мраз је један од главних фактора који утиче на његову трајност. Ово је посебно важно у областима оштрих климатских услова, где вода у бетонским порима бива изложена дејству више циклуса смрзавања-одмрзавања.

Отпорност бетона на мраз се може повећати са променом запреминског садржаја крупног агрегата у бетонској мешавини, чиме се мења и порозност бетона.

Такође је утврђено да повећање запреминског садржаја крупног агрегата негативно утиче на предвиђену отпорност бетона на смрзавање – одмрзавање.

Утврђена је корелација између затворене порозности бетона, запреминске концентрације крупног агрегата, садржаја ваздуха у бетону, бетонске мешавине и предвиђене отпорности бетона на мраз. Након статистичке обраде резултата теста, утврђено је да је значајна зависност између запреминске концентрације крупног

агрегата у бетону, његове затворене порозности и предвиђеног смрзавања бетона – отпорност на одмрзавање и трајност бетона [55].

Поре које постоје у цементној матрици могу се поделити у три групе: капиларне поре, гелске поре и заостале поре испуњене ваздухом. Главни узрок лошег дејства мрза на бетон је задржавање воде у капиларним порама цементног камена. Капиларне поре у цементном камену настају након испаравања вишка воде из бетонске мешавине. Капиларне поре су отворене и лако се пуне водом. Количина воде у цементној матрици је главни фактор који узрокује деструктивни ефекат дејства мрза на бетон. Што је већа запремина и величина капиларних пора, то је нижа отпорност бетона према дејству мрза [56]. Порозност бетона углавном зависи од величине зрна агрегата, његовог облика и процентуалног садржаја фракција у мешавини. Утврђено је да се са повећањем садржаја CSA у мешавини, повећава порозност бетона [42].

Облик зрна агрегата нема значајан утицај на отпорност бетона према дејству мрза. Отпорност бетона према дејству мрза одређује садржај крупних фракција у испитаној бетонској мешавини. Овом темом су се бавили *L. Zarauskas, G. Skripkiūnas* и *G. Girskas* [57] који су у својим испитивањима показали да се отпорност бетона на мраз може повећати са променом запреминског садржаја крупног агрегата у бетонској мешавини, чиме се мења и порозност бетона.

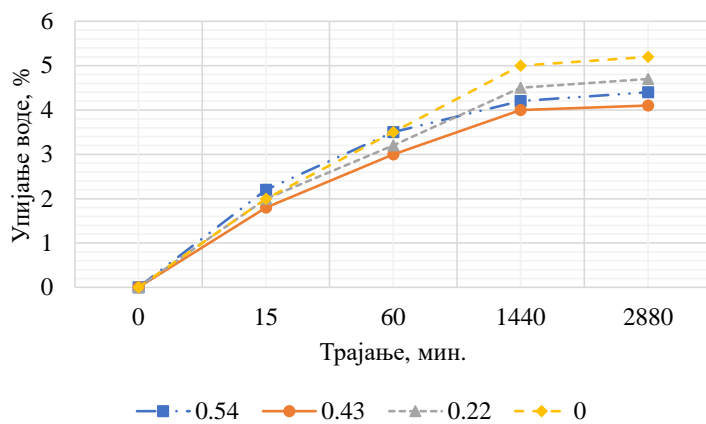
Бетонске мешавине су направљене са различитим количинама крупних фракција природног агрегата и агрегата CSA. Испитивање је рађено на 10 различитих бетонских мешавина.

На слици 21 су приказани резултати испитивања упијања воде предметних бетонских мешавина у функцији времена. Највеће упијање воде је примећена код бетона без садржаја крупних фракција агрегата.

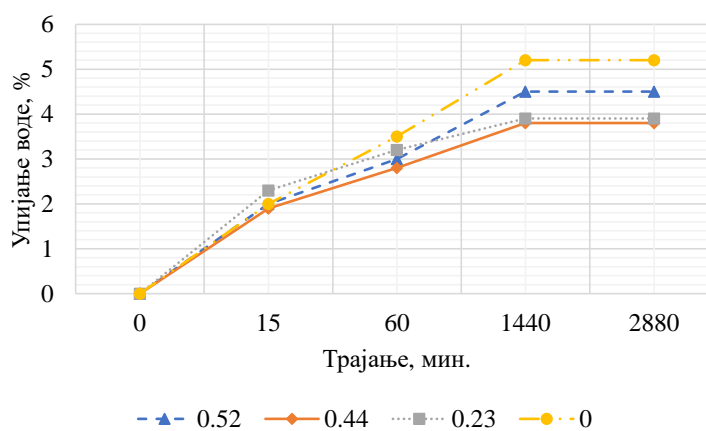
Са повећањем концентрације крупног агрегата (φ_{st}), количина затворене порозности се смањује.

$$\varphi_{st} = \frac{S_t}{\rho_{st}} \quad (7)$$

, где је S_t -садржај крупних фракција агрегата у бетону; ρ_{st} -запреминска маса крупних фракција агрегата.



(а)



(б)

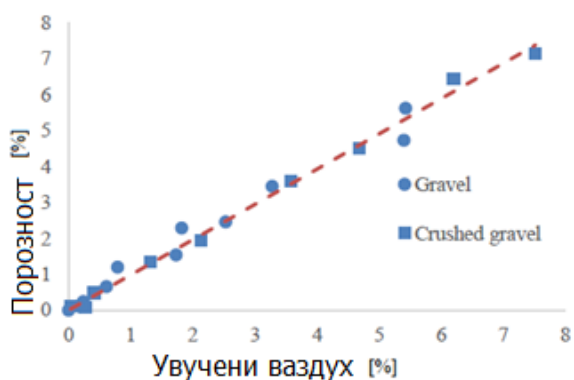
Слика 21. Упијање воде бетона са садржајем (а) природног агрегата; (б) дробљеног агрегата [57]

За $\varphi_{st} = 0.54$ бетон скоро нема затворене поре и мања је отпорност на дејство мраза. Порозност бетона са садржајем дробљеног агрегата се смањује 19,74 % за $\varphi_{st} = 0$, односно 13,33 % за $\varphi_{st} = 0.52$ у поређењу са бетонима са садржајем крупних фракција природног агрегата код којих је порозност 16.95% за $\varphi_{st} = 0$, односно 10.37% са $\varphi_{st} = 0.52$.

Облик крупних зрна агрегата нема значајан утицај на количину задржаног ваздуха у бетону и на његову отпорност на дејство мраза, слика 22. Запремински садржај крупног агрегата у бетону одређује критеријум отпорности бетона на дејство

мраза, која се може предвидети на основу брзине апсорпције воде очврслог бетона или садржаја задржаног ваздуха у бетонској мешавини [57].

Утврђена је корелација између затворене порозности бетона, запреминске концентрације крупног агрегата и садржаја ваздуха у бетонским мешавинама и предвиђене отпорности бетона на мраз, слика 22.



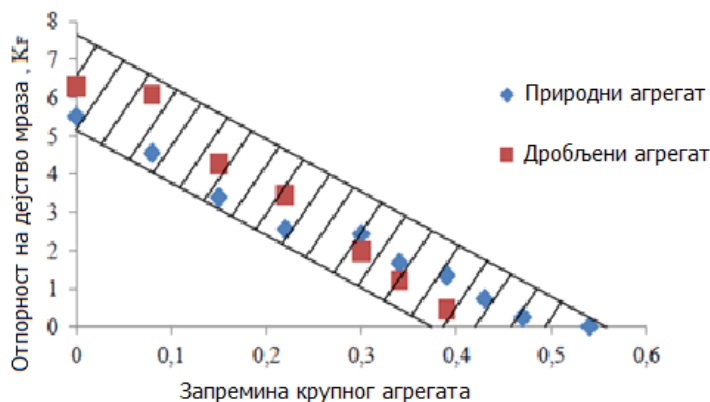
Слика 22. Однос порозности и процента увученог ваздуха [57]

Такође је утврђено да се са повећањем запреминског садржаја крупног агрегата негативно утиче на предвиђену отпорност бетона на мраз. Ово је посебно важно у областима оштре климе у којима се вода заробљена у порама бетона излаже дејству мраза у циклусима.

Употребом обе врсте крупног агрегата, критеријум отпорности бетона на дејство мраза (K_F) одређен је линеарном функцијом:

$$K_F = 5.88 - 12 \cdot \varphi_{st} \quad (8)$$

Након анализе добијених резултата испитивања, утврђена је значајна зависност између запреминског садржаја крупних фракција агрегата у бетону, упијања воде, отпорности на дејство мраза и трајности бетона [57], слика 23.



Слика 23. Отпорност на дејство мрза у односу на запремински садржај крупних фракција агрегата [57]

2.2.5.4. Карбонатизација

Карбонатизација бетона је хемијски процес током кога реагују калцијум хидроксид из бетона и угљен диоксид који је дифузијом кроз порни систем бетона доспео из спољашње средине. У реакцији се формира калцијум карбонат чиме се значајно смањује R_h фактор бетона (испод 9), а поменути процес пропагира кроз заштитни слој бетонског елемента током времена. Када карбонатизација захвати слој филма фероксида који обавија арматуру, каже се да је арматура депасивизована, односно, створени су предуслови за њену корозију [58].

Током процеса карбонатизације није само калцијум хидроксид онај који реагује са CO_2 . Остале компоненте у цементној пасти реагују са CO_2 , као што је C-S-H гел, еtringит и нехидратисани креч. Кинетика процеса карбонатизације је одређена и изложеношћу и микроструктурним условима. Карбонатизација хидратисане цементне пасте узрокује промену у порозности и расподели пора унутар мешавине. Међутим, карбонатизација се не може посматрати као континуирани процес који утиче на порозност, чак и у Портланд цементној пасти: у каснијим фазама порозност се повећава, вероватно услед карбонатизације C-S-H гела и његове декалцификације.

Осим пасивног процеса реакције атмосферског CO_2 са цементним каменом, карбонатизација се понекад користи у циљу побољшања одређених својстава цементних материјала [59].

Карбонатизација изазива сложене микромеханичке промене цементне пасте: повећање чврстоће због структурних промена у C-S-H гелу, што може бити праћено карбонатизацијом. Стога је тешко априори проценити утицај карбонатизације на механичка својства бетона. Контролисана карбонатизација се може користити као активна технологија за побољшање цементне пасте. На пример, убрзано очвршћавање карбонатизацијом може се користити за постизање високе чврстоће и побољшање трајности цементних материјала. Даље, анализа убрзане карбонатизације показује обећавајуће резултате у многим областима, као што је рециклирање бетона и смањење отпада [60].

Реакције карбонатизације материјала на бази цемента се у природном окружењу одвијају веома споро због ниске концентрације CO₂ у атмосфери (400 ppm или 0,04% [61]). У лабораторијском испитивању чији ће резултати бити анализирани у Поглављу 4, одређивање отпорности бетона на карбонатизацију (карбонатизациона отпорност) вршено је применом убрзаних тестова [62]. Мера карбонатизационе отпорности је дубина некарбонатизованог дела бетона, што се утврђује наношењем раствора фенол-фталеина на узорак, претходно изложен стандардом дефинисаним условима (температура, влажност, концентрација CO₂) и мерењем дубине слоја који је обојен карактеристичном љубичастом бојом. Јасно, што је већа измерена дубина карбонатизованог слоја, сматра се да је карбонатизациона отпорност бетона мања.

Изведена су бројна истраживања која се базирају на лабораторијским експериментима у циљу разумевања кинетике карбонатизације [63–65]. Најчешћи, поједностављен и широко коришћен [66–68] израз за одређивање дубине карбонатизације у материјалима на бази цемента приказан је једначином:

$$X_c(t) = k\sqrt{t} \quad (9)$$

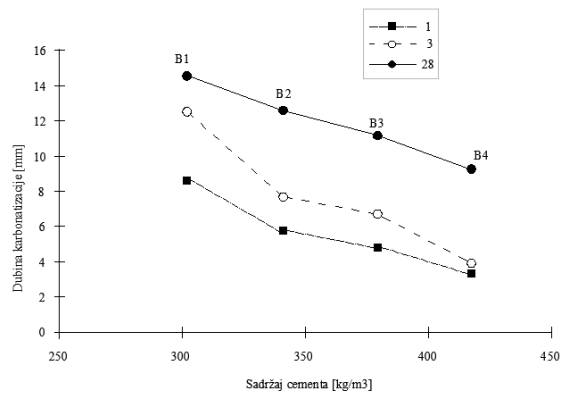
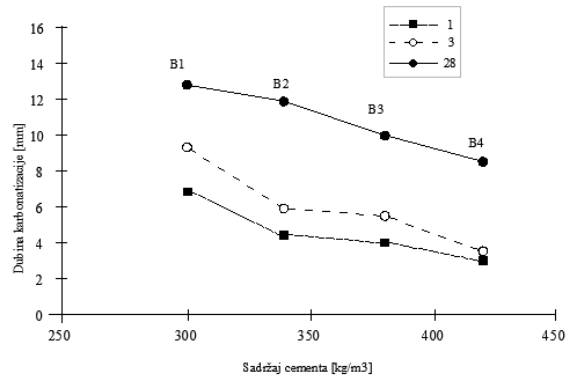
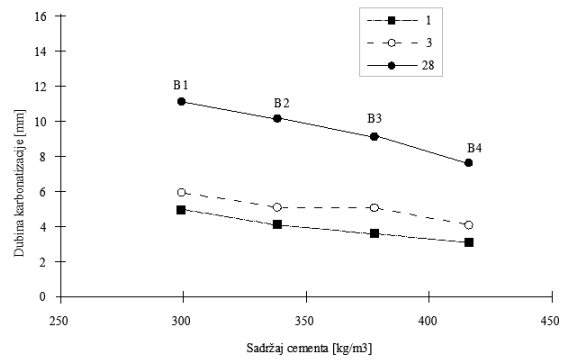
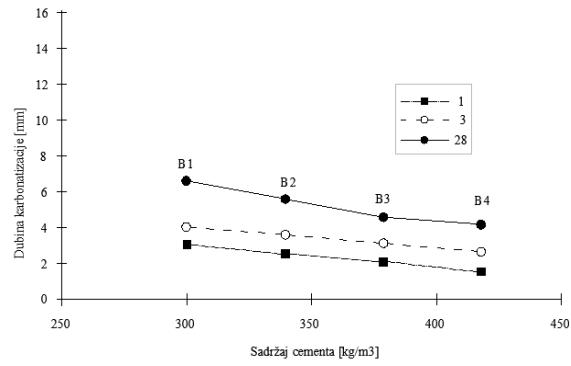
, где је, $X_c(t)$ = дубина карбонатизације након времена t , t = трајање изложености дејству карбонатизације и k = емпиријска константа. Како су истакли *Houst и Vittmann* [68], извођење једначине (10) заснива се на претпоставци да је брзина дифузије CO₂ константна. Међутим, стопа дифузије CO₂ практично није

константа и зависи од више фактора укључујући степен хидратације, порозност, концентрацију CO_2 , влажност, количине и врсте микроскопских фаза, итд.

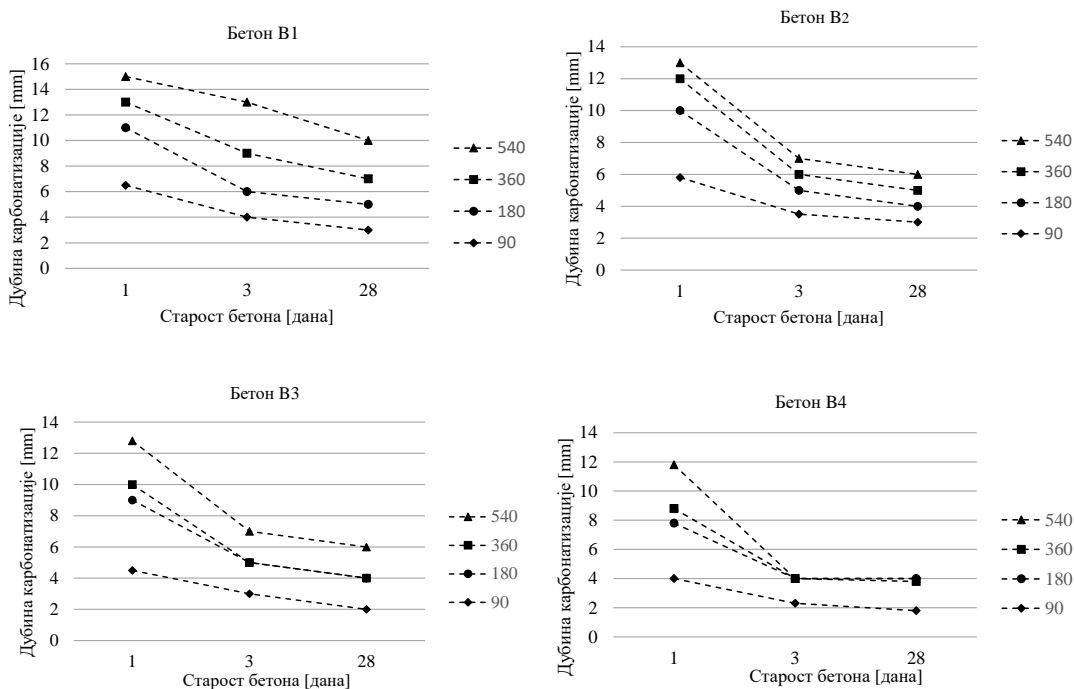
Седамдесетих година прошлог века је први пут је откривено да се употребом CO_2 убрзава хидратација C_3S и C_2S [69–72] при чему се повећавају механичке чврстоће бетона [73]. Карбонатизација такође доводи до брзог повећања чврстоће у случају садржаја бакарне шљаке у бетону [74]. Међутим, треба напоменути да ово повољно дејство CO_2 на механичке особине се запажа када се свеже бетонске мешавине подвргну карбонатизацији. Када се очврсли узорци бетона подвргну карбонатизацији, дубина продирања CO_2 углавном је ограничена на спољашњи слој узорка због споре брзине дифузије кроз густу микроструктуру. У очврслном стању, повећање чврстоће услед карбонатизације није истакнуто [75].

J. P. Balayssac, Détriché C u J. Grandet [76] испитивали су трајност бетона методом карбонатизације. У обзир су узели утицај цемента и v/c фактора на дубину карбонатизације. Након три различита времена очвршћавања бетона (1, 3 и 28 дана) узорци су чувани на $20\text{ }^\circ\text{C}$ и 60% релативне влажности (са садржајем од 0,03% CO_2), до 18 месеци.

На слици 24 приказан је однос дубине карбонатизације након 18 месеци бетона са три различите врсте цемента (обични цемент, цемент са додатком кречњака и цемент са додатком шљаке) у односу на чврстоћу након завршетка очвршћавања. Садржај цемента је био у распону од 250 до 420 kg/m^3 . Бетони са цементом са додатком шљаке у количини од 340 и 420 kg/m^3 , показују ниску чврстоћу и високу дубину карбонатизације. С друге стране, бетони са Портланд цементом или цементом са додатком кречњака, у количини од 340 kg/m^3 имају веће чврстоће и ниже дубине карбонатизације. Показано је да се утицај количине и врсте цемента и време очвршћавања бетона могу изразити једним параметром који омогућава процену трајности бетона.

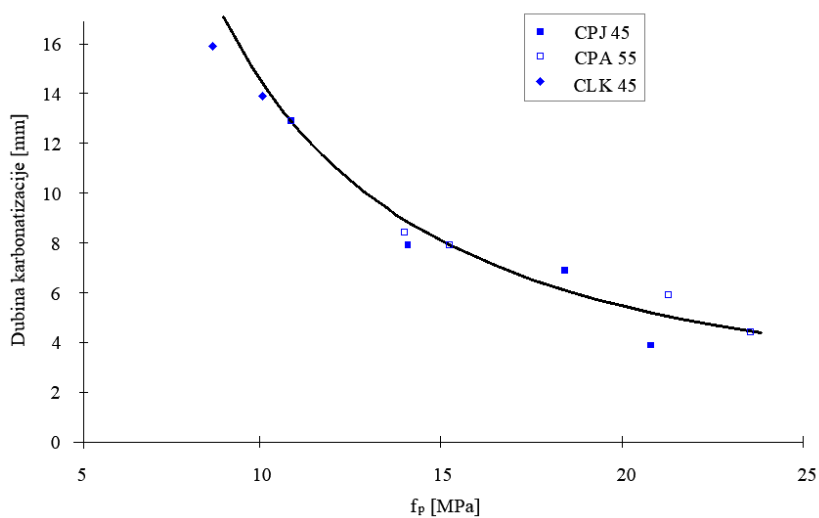


Слика 24. Утицај цемента на карбонатизацију [76]



Слика 25. Утицај старости бетона на карбонатизацију [76]

Што се тиче добијених резултата, једнодневна нега бетона није довољна за све бетоне без обзира на садржај цемента (у распону од 300 до 420 kg/m³). Након 18 месеци, дубина карбонатизације варираше између 10 и 15 mm, у односу на садржај цемента, што је једнако уобичајеној дебљини заштитног слоја арматуре у неагресивној средини, слика 25.



Слика 26. Однос дубине карбонатизације и чврстоће при притиску [76]

Ефекти очвршћавања зависе од врсте цемента. Повећање периода очвршћавања нема исти ефекат, за исти садржај цемента, на бетону од Портланд цемента као на бетону справљеном са цементом са додатком шљаке. Очвршћавање је уочљивије за бетон са шљаком, слика 26.

Фактори који утичу на карбонатизацију могу се поделити у две групе: фактори животне средине и фактори својстава бетона. Фактори животне средине укључују: појаву циклуса сушење-квашење [77], релативну влажност [78] и концентрацију CO_2 [78]. Фактори својстава бетона се углавном односе на порозност бетона, што утиче на количину супстанце која се може трансформисати у карбонате.

2.5.4. LCA (Life Cycle Analysis)

Производња и употреба бетона и бетонских конструкција има велики утицај на животну средину, па је еколошка процена бетона од великог значаја у смислу постизања одрживог развоја. Побољшање друштвеног, економског и еколошког утицаја индикатори су одрживог развоја грађевинске индустрије [79]. Индустрија бетона се сматра великим потрошачем енергије и природних ресурса и један је од главних извора емисија стаклене баште и стварања отпада. Производња и употреба бетона и бетонских конструкција имају велики утицај на животну средину, па је еколошка процена бетона од великог значаја у смислу постизања одрживог друштва [80].

С обзиром да је тема овог рада употреба CSA у справљању бетона, али услед недостатка литературе која се бави испитивањем оваквих бетона, акценат је у овом поглављу стављен на анализу бетона са RCA и до сада испитаних отпадних материјала, као пример и подстицај LCA анализи бетона са CSA.

Производња бетона, најкоришћенијег грађевинског материјала на глобалном нивоу, наноси велику штету животној средини. Познато је да се ово првенствено приписује производњи обичног портланд цемента (OPC). Стога се у бетонској индустрији улаже велики напор да се пронађу алтернативе које би дале одрживији бетонски производ. Истовремено, индустријски отпадни материјали (IBM) се повећавају у обиму и, без јасног пута валоризације, углавном се бацају на депоније. *Jorge de Brito и остали* бавили су се, кроз процену животног циклуса (LCA), утицајем производње бетонских везива на животну средину са делимичном или потпуном заменом OPC са једним или више најчешћих IBM [81]. Испитивање је вршено са неколико IBM, како би се утврдила могућност употребе у бетону. Летећи пепео (FA), млевена гранулисана згура из високих пећи (GGBS) и силикатна прашина (SF) су до сада доказани као индустријски ефикасни. За потребе ове студије коришћене су просечне вредности инвентарских података FA, GGBS и SF у LCA, а утицаји на животну средину сваког од њих су упоређени са OPC. Резултати показују да, по јединици масе, само FA заправо постиже уштеду животне средине у поређењу са OPC. Међутим, важно је истаћи да се очекује

смањење доступности FA на међународном нивоу због тренда затварања електрана на угаљ. Коначно, припремљена је анализа осетљивости да се истакне допринос утицаја из првобитних процеса производње IBM-а која је показала да би сва три материјала имала мањи утицај на животну средину од OPC за алокацију утицаја мању од 1% [81].

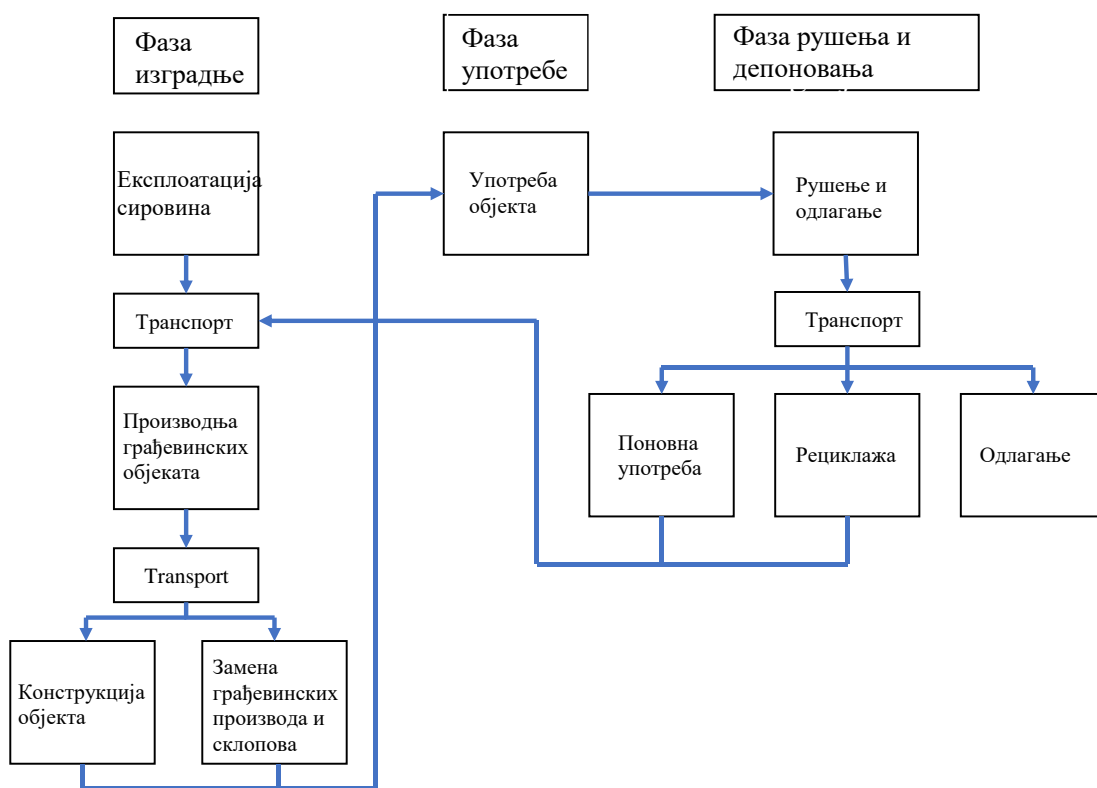
Анализа животног циклуса, којој се придаје значај у грађевинском сектору, системски је приступ који омогућава детаљно утврђивање утицаја грађевинског материјала на животну средину. Ове анализе покривају све фазе, од фазе потрошње сировина грађевинског материјала до производних процеса, отпреме, употребе од стране потрошача и отпада након употребе. Избор добављача материјала у процесу производње је јако битан фактор за смањење утицаја загађења животне средине, оштећења озонског омотача и глобалног загревања, будући да се смањењем удаљености смањује утицај емисија гасова. Овом тематиком се у својим истраживањима бавио *И. Лукић* [82]. Примена LCA у грађевинарству може бити комплексна, поготово ако се као циљ постави анализа целог објекта [82]. На слици 27 је приказан животно циклус грађевинског објекта [83]. Најважније фазе овог животног циклуса су фаза изградње, фаза употребе и фаза рушења и депоновања.

Свака од ових фаза се може поделити у подфазе (основни материјал, транспорт итд.) које се могу анализирати посебно. Добијени резултати подфаза се могу повезати и заједно дати резултат LCA анализе целог објекта.

На следећем примеру ће бити приказани резултати поједностављене LCA анализе животног циклуса 1m³ бетона [83], при чему су анализиране следеће категорије:

- потрошња енергије (EU),
- потенцијал глобалног загревање (GWP),
- потенцијал еутрофикације (EP),
- потенцијал за повећање киселости (AP),
- потенцијал утицаја на озонски омотач (POCP).

Како је раније речено, дељењем сваке фазе на подфазе се анализа поједностављује, па је и у овом примеру анализа утицаја производње бетона подељена на четири подфазе: анализу утицаја добијања агрегата, цемента, транспорт и рад фабрике. Вода није узимана у обзир, пошто њена употреба нема утицаја ни на један од горе наведених фактора.



Слика 27. Животни циклус грађевинског објекта [89]

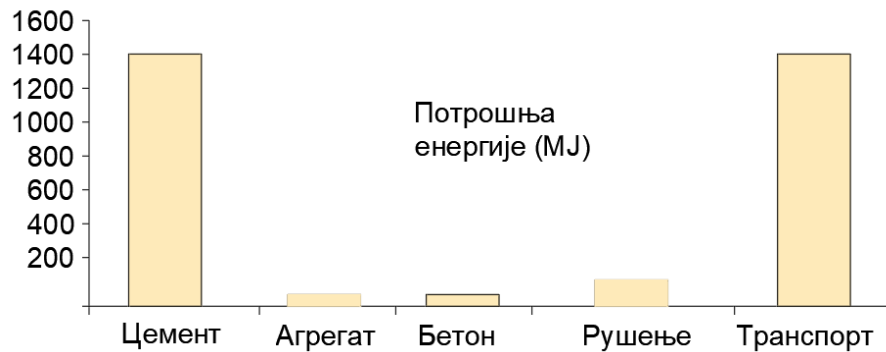
Потребне количине енергије за производњу 1m^3 бетона и количине штетних материја избачених у ваздух, добијених на основу LCI, приказане су у табели 3 [89].

Табела 3. Количине енергије за 1m^3 бетона [89]

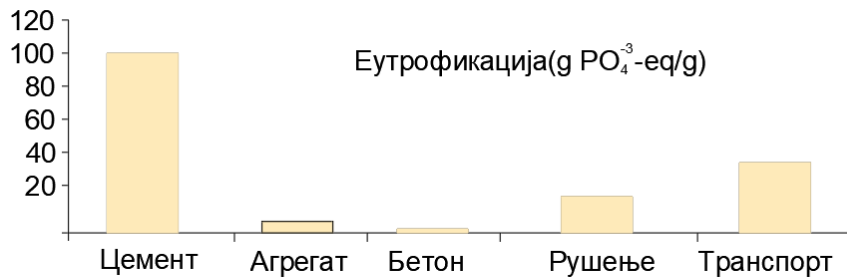
| | Цемент | Агрегат | Бетон | Транспорт | Рушење |
|---------------|---------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 350kg | 1857kg | 1m ³ | 1m ³ | 1m ³ |
| Енергија (MJ) | | | | | |
| Угаљ | 1179.55 | | | | |
| Дизел | 8.53 | 27.45 | | 268.33 | 89.59 |
| Природни гас | 29.11 | | | | |

| | | | | | |
|--------------------------|---------|---------|---------|----------|---------|
| Струја | 177.69 | | 20.07 | | |
| Емисије у ваздуху | | | | | |
| CO | 1471.13 | 6.45 | 0.72 | 90.73 | 21.06 |
| NO _x | 797.67 | 28.93 | 13.22 | 227.97 | 94.44 |
| SO _x | 1276.44 | 10.12 | 98.75 | 100.47 | 33.02 |
| CH ₄ | 350.96 | 2.41 | 0.43 | 27.77 | 7.85 |
| CO ₂ | 301421 | 2558.81 | 5698.21 | 25615.08 | 8352.51 |
| N ₂ O | 0.26 | 0.1 | 0.03 | 0.75 | 0.33 |
| HCl | 23.73 | | 2.68 | | |
| HCl | 0.2 | | 0.02 | | |
| NMVOС | 12.16 | 0.73 | 0.07 | 45.41 | 2.27 |
| честице | 249.19 | 2.7 | 11.99 | 47.73 | 8.82 |

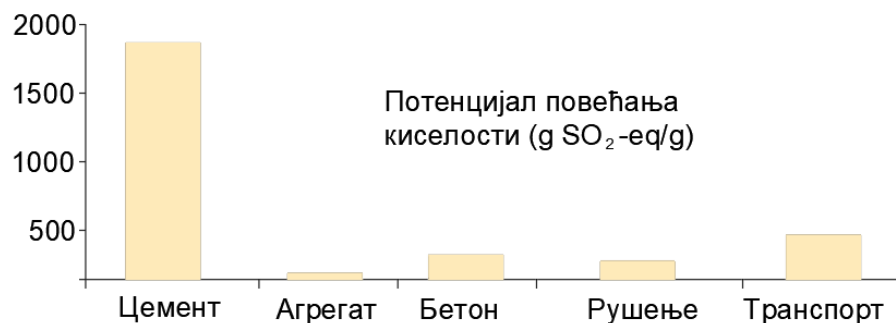
На основу података добијених након LCI анализе, извршена је LCA анализа, при чему се сви утицаји одређују преко еквивалентних утицаја, на пример за POCP еквивалент је C₂H₄, утицај 1g CO је једнак утицају 0,032g C₂H₄. Након LCA анализе добијени су следећи резултати [89]:



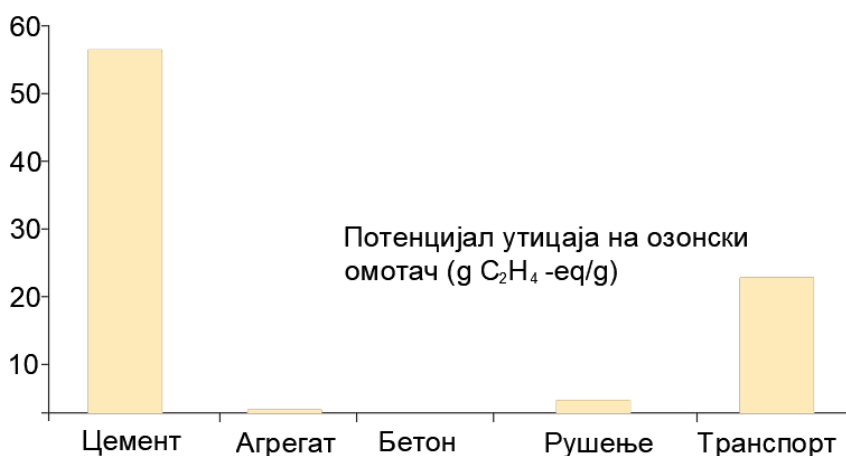
Слика 28. Потрошња енергије [MJ] [89]



Слика 29. Потенцијал еутрофикације [89]



Слика 30. Потенцијал повећања киселости [89]



Слика 31. Потенцијал утицаја на озонски омотач [89]

Како се из ових дијаграма види, највећи утицај на посматране категорије има производња цемента, затим транспорт, што значи да ако бисмо желели да смањимо утицај производње 1m³ бетона на животну околину, један од начина би био да покушамо да променимо нешто у производњи цемента или да нађемо начин да се смањи количина цемента у бетону. Други начин је да се смањи употреба фосилних горива или да се замени неким обновљивим врстама горива. Треба напоменути да је, приликом оваквих анализа, веома битно да подаци прикупљени током LCI анализе буду поуздани.

Употреба природног агрегата у индустрији бетона се постепено смањује у циљу заштите животне средине и успоравања исцрпљивања ресурса. Употреба дробљеног агрегата и морског песка је све присутнија као замена за природни агрегат, али ови материјали изазивају и разне проблеме, нпр. уништавање екосистема и повећану дужину транспорта [84].

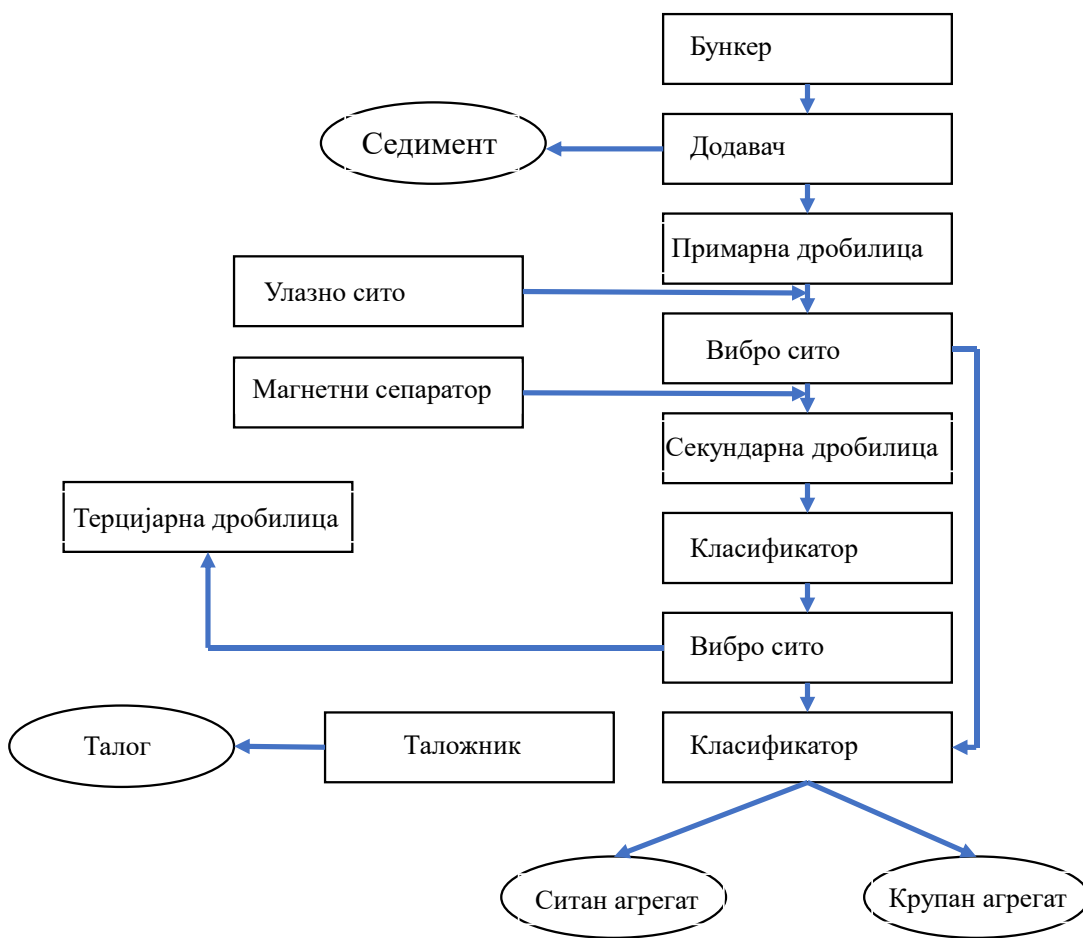
Анализирана је потрошња енергије и утицај производње агрегата у оквиру LCA. У циљу што шире и детаљније анализе представљена је методологија тј. специфичност утицаја производње агрегата пореклом са више различитих каменолома. Карактеристике и разлике локација су процењене у погледу опреме постројења и врсте транспорта. Ова процена је извршена за 1 тону агрегата произведеног током 1 године и са разликом у категорији класирања. Резултати показују да се разлика у локалној потрошњи енергије налази у интервалу између $-9,5\%$ и $+13,7\%$, док је за потенцијал глобалног загревања у распону од $-15,4\%$ до $+12,9\%$ [85] .

Сваке године се у земљама Европске уније произведе три милијарде тона агрегата [93]. С друге стране, отпад који настаје из грађевинске индустрије, тзв. грађевински отпад и отпад од рушења (C&D отпад), такође је релевантна брига у заштити животне средине. На пример, око 850 милиона тона C&D отпада се генерише у ЕУ годишње, што представља 31% укупне производње отпада [86].

Учесталост примене бетона са садржајем замене рециклираног агрегата се повећава у различитим областима. Тренутно је у развоју технологија за коришћење рециклираног агрегата добијеног дробљењем отпадног бетона, као материјала високе чврстоће за примену у изградњи путева и справљање новог бетона [87]. Рециклирани агрегати представљају замену за природни речни или дробљени агрегат и њихова примена је све учесталија [88]. Примена грађевинског отпада и отпада од рушења у изградњи путева као заменски материјал за природни шљунак је прихватљивије у односу на утицај депоније самог грађевинског отпада на животну средину [89–91]. Међутим, процес производње рециклираног агрегата ствара велика загађења животне средине из разлога што захтева више обраде у поређењу са прикупљањем природног речног агрегата, док у поређењу са дробљеним агрегатом практично нема разлике. Поред тога, квалитет рециклираног агрегата је нижи у поређењу са природним, што га чини погодним за коришћење на депонијама или насипима. Вршена су опсежна испитивања процене утицаја рециклираног агрегата на животну средину методом LCA.

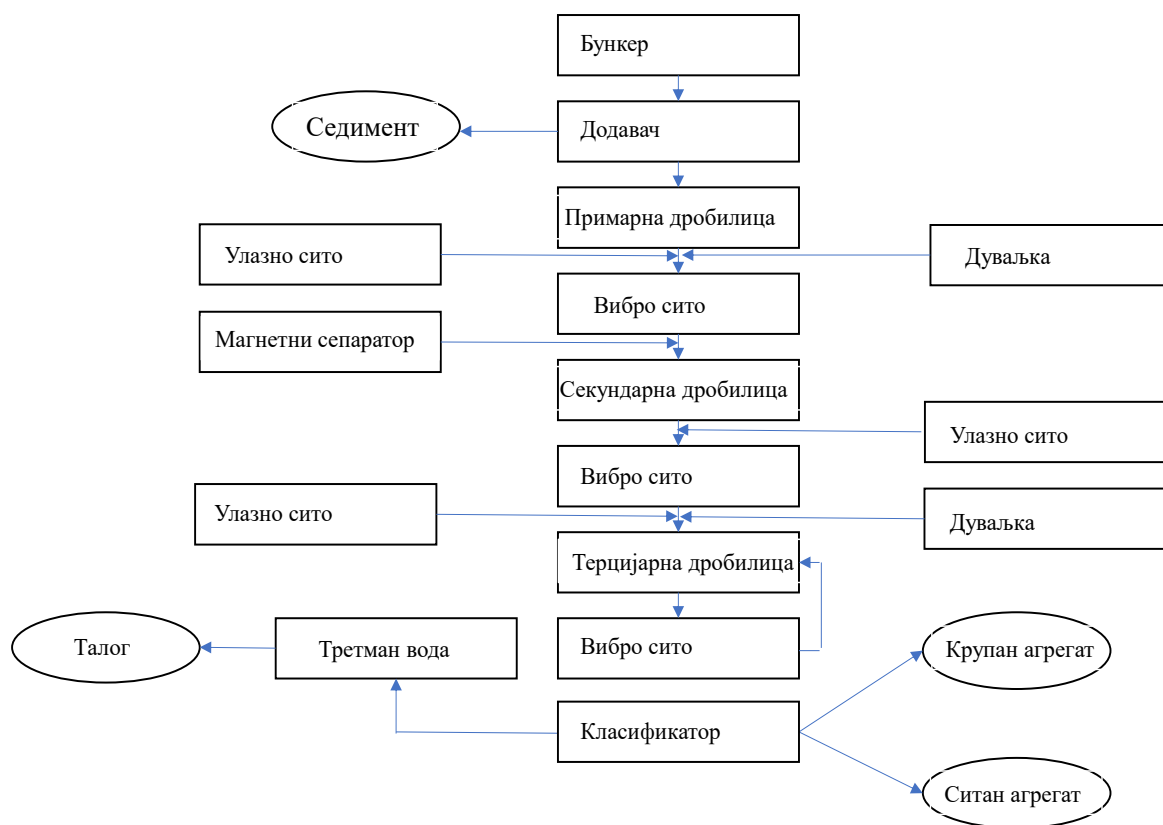
Won-Jun Park и остали [92] су се бавили упоредном анализом утицаја на животну средину материјала који се добијају током производње рециклираног агрегата сувим и мокрим технолошким поступком. За категорије утицаја изабране су: укупна потрошња енергије (EU), глобално отопљавање (GWP), еутрофикација (EP), закисељавање (AP), потенцијал оштећења озона (ODP), потенцијал исцрпљивања биотичких ресурса (ADP) и фотохемијски потенцијал стварања озона (POCP) коришћењем стандарда ISO 14044 (LCA).

Метода суве производње висококвалитетног рециклираног агрегата користи технологију која елиминише малтер са површине агрегата дробљењем отпадног бетона и одваја приличну количину финог праха. Технолошка шема је приказана на слици 32.



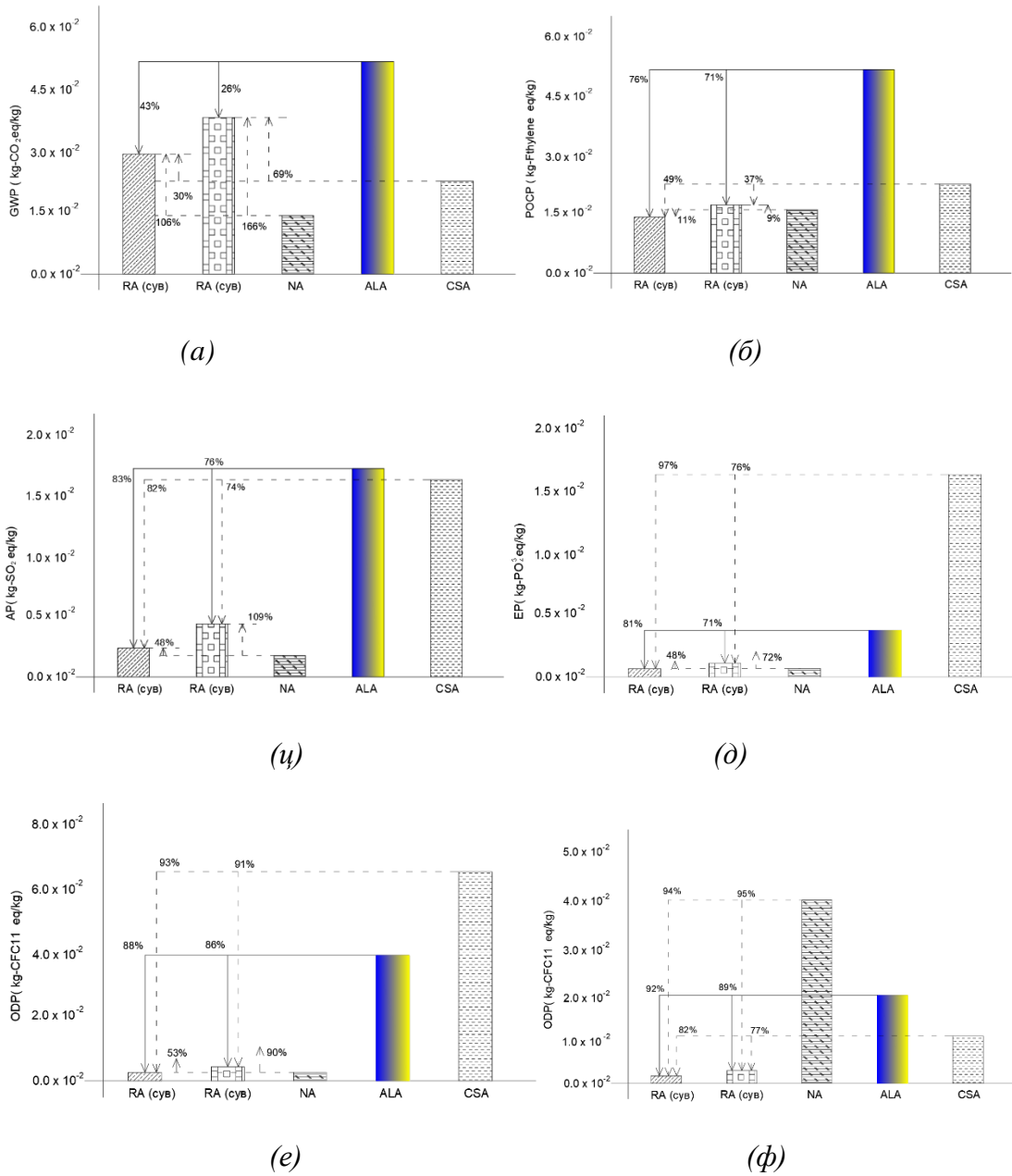
Слика 32. Технолошка шема суве производње [92]

Метода мокре производње обухвата процес селекције који није укључен методом суве производње. За разлику од сувог начина производње код којих се примењују две врсте дробилица, метода мокре производње користи само ударну дробилицу. Систем мокре производње захтева значајне почетне трошкове и велики простор за смештање опреме. Овим начином производње може се лакше произвести висококвалитетни рециклирани агрегат у поређењу са сувим системом, а процес је повољан за производњу великих количина. Технолошка шема мокрог процеса производње приказана је на слици 33.



Слика 33. Технолошка шема мокрог процеса производње [92]

За функционалну јединицу изабран је 1 kg, а граница система била је Cradle to Gate. Фаза производње рециклираног агрегата подељена је на сировину, транспорт и фазе производње. Извршена је процена утицаја на животну средину за сваку од ових фаза.



Слика 34. Резултати LCA (а) GWP: Потенцијал глобалног загревања; (б) POCP: фотохемијски потенцијал стварања озона; (у) AP: Потенцијал закисељавања; (д) EP: Потенцијал еутрофикације; (е) ODP: Потенцијал оштећења озона; (ф) ADP: Потенцијал биотичких ресурса [92]

Утицај рециклираног агрегата (мокрим методом производње) на животну средину био је до 16~40% већи у поређењу са рециклираним агрегатом (сувом методом производње) што је последица повећане количине енергије коју користи ударна дробилица при мокром процесу производње рециклираног агрегата. Утврђено је да је утицај коришћења рециклираног агрегата на животну средину и до два пута

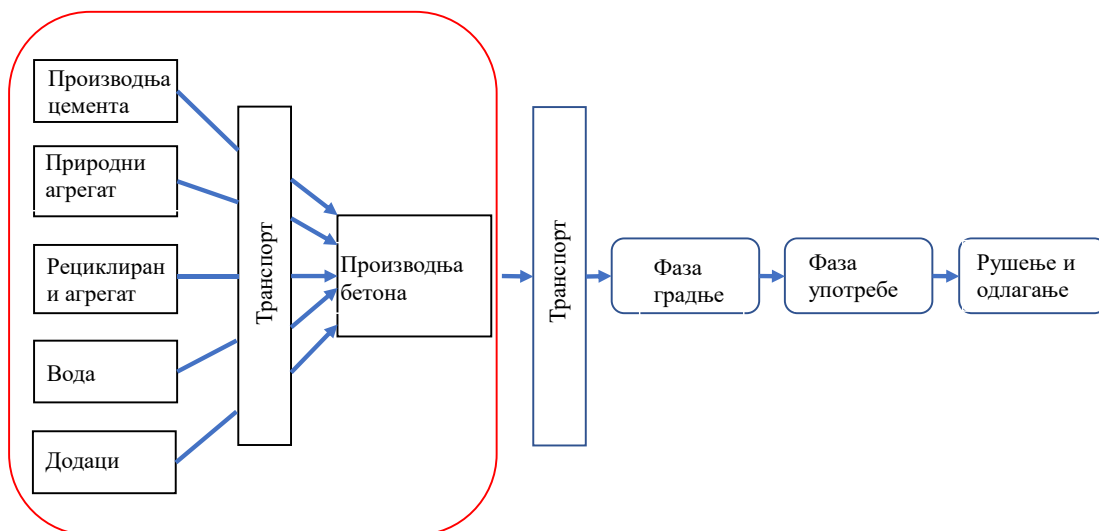
већи од утицаја употребе природног агрегата, углавном због веће једноставности производње природног агрегата који захтева мању потрошњу енергије. Процес производње природног речног агрегата троши врло мало енергије јер укључује једноставне процесе, као што су сакупљање, транспорт и (минимална) прерада. Ово не важи за дробљени агрегат. Међутим, ADP је био приближно 20 пута већи при употреби природног речног агрегата због потрошње природних ресурса, док се рециклирани агрегат добија прерадом постојећег грађевинског отпада.

Према слици 34, утврђено је да је утицај рециклираног агрегата на животну средину и до два пута већи од природног агрегата. У поређењу са природним агрегатом, потенцијал глобалног загревања (GWP) је био приближно 106% (суво) и 166% (мокро), AP је био 48% (сув) и 109% (влажан), EP је био 48% (сув) и 72% (мокри), а ODP је био 53% (сув) и 90% (мокри) за рециклирани агрегат.

S. Marinković [93] бавила се упоредном анализом оцене утицаја на животну средину бетона са рециклираним и бетона са природним агрегатом. Циљ анализе је упоређивање добијених резултата утицаја на животну средину бетонске конструкције направљене од бетона са крупним рециклираним и ситним природним агрегатом (BRA) и бетонске конструкције направљене од бетона справљеним само са природним агрегатом (BPA). Анализирани животни циклус приказан на слици 35.

У циљу извођења упоредне анализе, одређен је састав бетона на бази рециклираног агрегата (BRA) и бетона на бази природног агрегата (BPA) тако да обе врсте бетона имају исту чврстоћу при притиску и исту уградљивост. Под овом претпоставком и претпоставком да бетонска конструкција неће бити изложена агресивној средини, утицај фаза животног циклуса: изградња, употреба, одржавање и рушење биће сличан за обе врсте бетона и не мора се узети у обзир у упоредној анализи. За функционалну јединицу изабран је 1 m³ бетона. Врста транспортног средства и транспортне даљине усвојене су као да се ради о градилишту у Београду. Цемент се транспортује камионима на даљину од 150 km, природни речни агрегат се транспортује бродовима на даљину од 100 km,

рециклирани агрегат се транспортује камионима на даљину од 15 km и бетон се транспортује миксерима на даљину од 10 km.



Слика 35. Животни циклус бетонске конструкције [93]

Сви подаци везани за производњу компонената бетона (агрегат, цемент) и производњу бетона добијени су од српских произвођача. Подаци који се односе на производњу енергената (струја, дизел, природни гас) као и емисије при транспорту, узете су из базе података програма SimaPro (за струју подаци за бившу Југославију), односно из базе података програма Gemis (дизел, природни гас и транспорт за земље у развоју).

У табелама 4 и 5 приказана је кумулативна потрошња енергије и емисије гасова у ваздух за 1 m³ бетона са природним агрегатом и бетона са рециклираним агрегатом, респективно.

Табела 4. Табела инвентара по 1m³ бетона са природним агрегатом [93]

| | Цемент | Агрегат | Бетон | Транспорт | Укупно |
|----------------------|----------|---------|-----------------|-----------------|----------|
| | 315 kg | 1879 kg | 1m ³ | 1m ³ | |
| Енергија (MJ) | | | | | |
| Угаљ | 1061.594 | | | | 1061.594 |
| Дизел | 7.676 | 27.772 | | 267.187 | 302.635 |
| Природни гас | 26.201 | | | | 26.201 |
| Струја | 159.917 | | 20.069 | | 179.986 |

| <i>Емисије у ваздуху</i> | | | | | |
|--------------------------|------------|----------|---------|----------|----------|
| CO | 1324.016 | 6.53 | 0.723 | 66.836 | 1398.104 |
| NO _x | 717.906 | 29.273 | 13.224 | 175.22 | 935.623 |
| SO _x | 1148.789 | 10.235 | 98.754 | 75.587 | 1333.364 |
| CH ₄ | 315.866 | 2.435 | 0.433 | 20.894 | 339.628 |
| CO ₂ | 271278.882 | 2589.123 | 5698.21 | 19257.74 | 298824 |
| N ₂ O | 0.238 | 0.103 | 0.029 | 0.557 | 0.928 |
| HCl | 21.357 | | 2.68 | | 24.037 |
| HCl | 0.183 | | 0.023 | | 0.206 |
| NMVOС | 10.941 | 0.737 | 0.071 | 32.527 | 44.275 |
| честице | 224.274 | 2.734 | 11.991 | 42.377 | 291.376 |

Табела 5. Табела инвентара по 1m³ бетона са рециклираним агрегатом [93]

| | Цемент | Агрегат | | Бетон | Транспорт | Укупно |
|--------------------------|----------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|----------|
| | 330 kg | РА: 1115.00 kg | РА: 601.00 kg | 1m ³ | 1m ³ | |
| Енергија (МЈ) | | | | | | |
| Угаљ | 1112.146 | | | | | 1112.146 |
| Дизел | 8.042 | 20.271 | 8.883 | | 248.629 | 285.824 |
| Природни гас | 27.449 | | | | | 27.449 |
| Струја | 167.532 | | | 20.069 | | 187.601 |
| Емисије у ваздуху | | | | | | |
| CO | 1387.064 | 4.766 | 2.088 | 0.723 | 62.788 | 1457.429 |
| NO _x | 752.092 | 21.367 | 9.363 | 13.224 | 155.351 | 951.398 |
| SO _x | 1203.493 | 7.47 | 3.274 | 98.754 | 70.024 | 1383.014 |
| CH ₄ | 330.907 | 1.777 | 0.779 | 0.433 | 19.476 | 353.372 |
| CO ₂ | 284196.9 | 1536.387 | 828.134 | 5698.21 | 17889.85 | 310149.5 |
| N ₂ O | 0.249 | 0.075 | 0.033 | 0.029 | 0.516 | 0.903 |
| HCl | 22.374 | | | 2.68 | | 25.054 |
| HCl | 0.191 | | | 0.023 | | 0.214 |
| NMVOС | 11.462 | 0.537 | 0.236 | 0.071 | 31.413 | 43.718 |
| честице | 234.954 | 0.874 | 0.874 | 11.991 | 26.507 | 276.322 |

За категорије утицаја изабране су: укупна потрошња енергије, глобално отопљавање, еутрофикација, закишељавање и фотохемијско формирање озона. Срачунате категорије утицаја приказане су у табелама 6 и 7 за бетон са природним и бетон са рециклираним агрегатом.

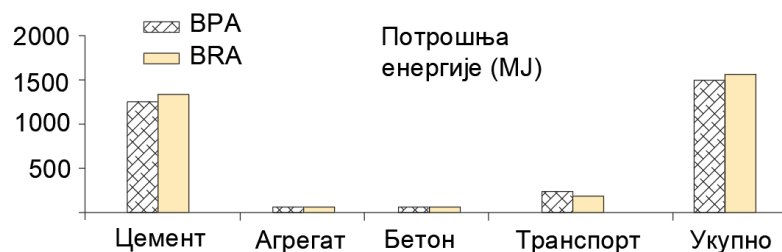
Табела 6. Категорије утицаја по 1m³ бетона са природним агрегатом [93]

| | Потрошња енергије (MJ) | Глобално отопљавање | Еутрофикација | Закисељавање | POC |
|----------------------|------------------------|---------------------|---------------|--------------|--------|
| Енергија (MJ) | | | | | |
| Цемент | 1255.388 | 279251.727 | 93.328 | 1670.117 | 49.054 |
| Агрегат | 27.772 | 2683.073 | 3.805 | 30.726 | 0.527 |
| Бетон | 20.069 | 5718.354 | 1.719 | 110.369 | 0.055 |
| Транспорт | 267.187 | 19958.41 | 22.779 | 198.241 | 15.589 |
| Укупно | 1570.415 | 307611.565 | 121.631 | 2009.453 | 65.225 |

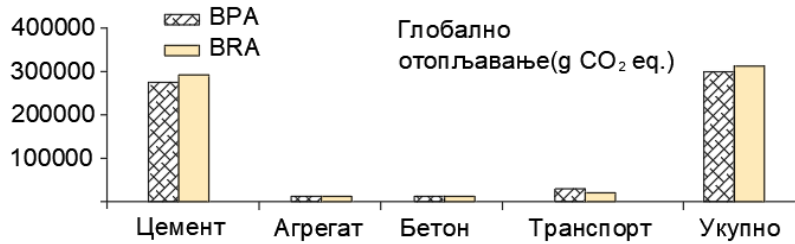
Табела 7. Категорије утицаја по 1m³ бетона са рециклираним агрегатом [93]

| | Потрошња енергије (MJ) | Глобално отопљавање | Еутрофикација | Закисељавање | POC |
|----------------------|------------------------|---------------------|---------------|--------------|--------|
| Енергија (MJ) | | | | | |
| Цемент | 1315.168 | 292549.429 | 97.772 | 1749.647 | 51.39 |
| Агрегат | 29.153 | 2462.935 | 3.995 | 32.255 | 0.553 |
| Бетон | 20.069 | 5718.354 | 1.719 | 110.369 | 0.055 |
| Транспорт | 248.629 | 18541.993 | 20.196 | 178.77 | 14.994 |
| Укупно | 1613.019 | 319272.711 | 123.682 | 2071.04 | 66.992 |

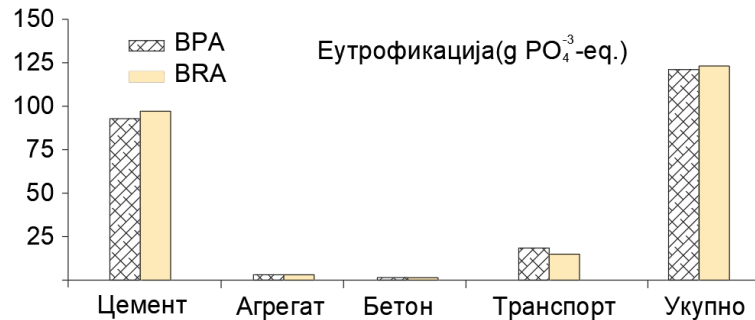
На сликама 36-40 приказано је учешће појединих фаза у укупној потрошњи енергије, глобалном отопљавању, укупној еутрофикацији и у укупном закисељавању за обе анализирани врсте бетона.



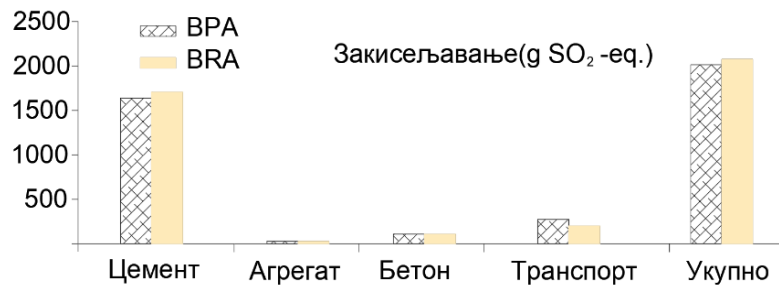
Слика 36. Учесће појединих фаза у укупној потрошњи енергије [93]



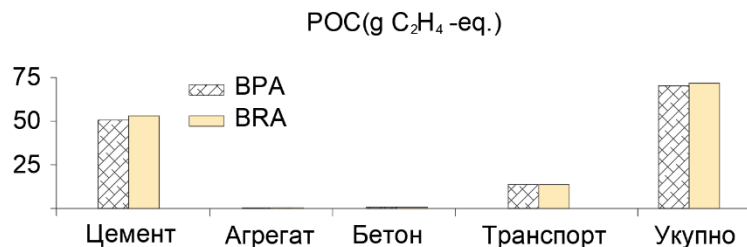
Слика 37. Учесће појединих фаза укупном глобалном отопљавању [93]



Слика 38. Учесће појединих фаза у укупној еутрофикацији [93]



Слика 39. Учесће појединих фаза у укупном закисељавању [93]



Слика 40. Учесће појединих фаза у укупном POC [93]

У свим анализираним категоријама утицаја на животну средину далеко највеће учешће има производња цемента за обе врсте бетона. Она заузима око 80% укупне потрошње енергије, 91% укупног глобалног отопљавања, 77% укупне еутрофикације, 83% укупног закисељавања и 75% укупног фотохемијског формирања озона код бетона са природним агрегатом. Основни разлог за овакву

ситуацију је велика емисија CO₂ током производње клинкера (калцинација) и употреба фосилних горива-угља у том процесу. Учешће производње агрегата и бетона у наведеним категоријама утицаја је веома мало.

Фаза транспорта међутим, може имати значајно учешће у појединим категоријама утицаја, нарочито када су у питању РОС и ЕР. Утицај транспорта директна је функција дужине транспорта, и за транспортне даљине веће од оних које су у овој студији усвојене, могуће је да учешће транспорта премаши учешће производње цемента у појединим категоријама утицаја. Такође, са слика 37- 40 се може видети да је утицај на животну средину бетона на бази рециклираног агрегата (BRA), посматрано кроз укупне вредности разматраних категорија утицаја, занемарљиво већи од утицаја бетона са природним агрегатом. Пошто су разматране категорије утицаја приближно исте за обе врсте бетона, корист од рециклирања у смислу смањења отпада и очувања природних ресурса може се у потпуности реализовати.

2.6. Закључак

- На основу вредности добијених испитивањем свежих бетонских мешавина може се закључити да се са повећањем процента CSA утиче на обрадивост бетона. Примећено је да се обрадивост бетона повећава са повећањем садржаја финог агрегата CSA при истом v/c фактору. Код бетона са високим процентима CSA постоји блага тенденција избијања вишка воде на површину испитаног узорка услед чега се, са аспекта уградљивости бетона, препоручује оптимални проценат садржаја од 80% CSA;
- Већа запреминска маса зрна агрегата CSA утиче на повећану запреминску масу бетонских мешавина са процентуалним садржајем агрегата CSA. При повећању процента замене финог агрегата агрегатом од бакарне шљаке постепено се повећава запреминска маса бетонских мешавина. То се приписује слабој апсорпцији агрегата CSA. Додавањем бакарне шљаке повећава се запреминска маса бетона за око 4,5% при 50% CSA. Код бетонске мешавине са 100% CSA запреминска маса је већа за око 7% у односу на контролну мешавину. Побољшане механичке карактеристике бетона са агрегатом CSA потврђују могућност употребе бакарне шљаке као крупног агрегата за справљање бетона;
- Водонепропусност бетона зависи од величина пора присутних у бетону. Са повећањем процента замене природног агрегата агрегатом CSA, повећава се порни притисак у систему што се одражава на повећање упијања воде у бетону. Чини се да је повећање упијања воде у бетону повезано са обликом и текстуром површине зрна агрегата CSA.
- Уградња крупних фракција агрегата CSA у бетонске мешавине као замена за крупне фракције природног агрегата, побољшава механичка својства бетона услед веће чврстоће зрна агрегата CSA и боље укљештености зрна агрегата CSA у цементној матрици;
- Примећено је повећање чврстоће при притиску бетона са делимичном заменом песка до 50% CSA у поређењу са контролном мешавином. Даљим

повећањем садржаја CSA, изнад 50%, чврстоћа при притиску се смањује, а конзистенција повећава, као последица повећања садржаја слободне воде у бетону насталог услед мањег упијања воде зрна CSA;

- Такође, чврстоћа при савијању бетона већа је за 14% са садржајем замене 30% крупних фракција CSA. За све мешавине са садржајем CSA, чврстоћа при савијању је виша у односу на контролну мешавину. Ово се приписује повећаној жилавости агрегата CSA;
- Што се тиче резултата везаних за трајност, укупни учинак бетона са садржајем CSA је у већини случајева био сличан или бољи од контролног бетона са природним агрегатом. На овај начин се отвара могућност за нови начин решења питања одлагања бакарне шљаке;
- Утицај објеката на околину током њихове изградње, употребе и рушења је изузетно значајан и неопходно је да се што пре укључи у процес пројектовања, како би се пројектовали и изводили објекти са што мањим негативним утицајем на животну околину. LCA је потенцијално моћан алат који може помоћи у дефинисању регулативе везане за заштиту животне средине, помоћи произвођачима у анализирању процеса и унапређењу производа и помоћи пројектантима у пројектовању енергетски ефикасних објеката;

3. ПЛАН ЕКСПЕРИМЕНТА

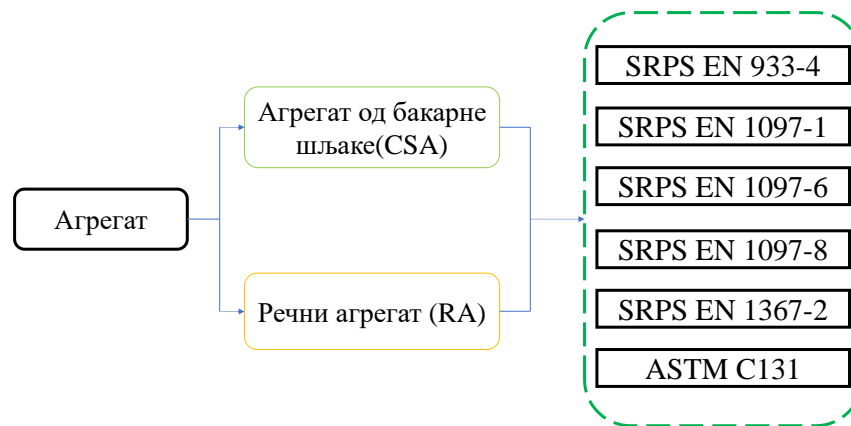
3.1. Методологија

Бакарна шљака се, као вештачки агрегат добијен из пирометалуршког процеса производње бакра у Бору може потенцијално користити за израду бетонских мешавина. Ранија испитивања ове шљаке потврдила су добре техничке карактеристике [37, 73], али је, због техничке регулативе у Србији, CSA посматрана као отпад [95, 36]. Међутим, усаглашавањем важеће техничке регулативе са регулативом из Европске уније, појавила се могућност употребе бакарне шљаке са депоније као грађевинског материјала. Стога су истраживања приказана у овом раду усмерена на употребу бакарне шљаке као делимичне замене природног агрегата у цементним бетонима.

У овим истраживањима су испитана техничка својства природног речног агрегата и агрегата од бакарне шљаке, као и бетонских мешавина справљених са додатком агрегата од бакарне шљаке.

У оквиру предметних истраживања, извршена су испитивања физичко-механичких карактеристика бетонских мешавина (у свежем и очврслом стању), са различитим садржајем крупних фракција CSA (фракције 8/16 и 16/31.5 mm). Добијени резултати су упоређивани са карактеристикама контролне бетонске мешавине, справљене искључиво са природним речним агрегатом.

У циљу што већег искоришћења природно гранулисана бакарне шљаке, првобитна бакарна шљака била је изложена додатном дробљењу. Приликом додатног дробљења бакарне шљаке, примећено је велико оштећење дробилица које су у овом процесу коришћене. Из тог разлога је за даља испитивања коришћена природно гранулисана бакарна шљака са депоније. С обзиром да у њеном природном депонованом стању највећи проценат фракција припада групама 8/16 и 16/31.5 mm, у експерименту је извршена делимична или потпуна замена управо ових фракција. На слици 41 приказан је план експерименталних испитивања која су спроведена на употребљеним агрегатима, а која су претходила пројектовању и справљању бетонских мешавина.



Слика 41. План експерименталних испитивања агрегата

При одређивању процента замене природног агрегата агрегатом од бакарне шљаке водило се рачуна о запреминској маси бетонских мешавина, услед веће запреминске масе зрна агрегата CSA. Предметна испитивања су спроведена на 6 различитих бетонских мешавина са заменом природног речног агрегата одговарајућим фракцијама агрегата од бакарне шљаке.

Процентуални садржај агрегата RA и CSA у бетонским мешавинама приказан је у табели 8.

Након одређивања процентуалних садржаја агрегата у бетонским мешавинама, извршено је справљање и уградња бетонских мешавина у калупе различитих димензија. На тако добијеним узорцима, спроведена су испитивања бетона у свежем и очврслом стању. Испитано је: запреминска маса бетона у свежем и очврслом стању, слегање и распростирање бетона у свежем стању, чврстоћа при притиску, чврстоћа при затезању цепањем, чврстоћа при затезању савијањем, зависност напона и деформација при једнооксијалном оптерећењу, водонепропустљивост, отпорност на дејство мраза, скупљање, отпорност на дејство хлорида и карбонатизација. На слици 42 дат је приказ плана експерименталних испитивања која су спроведена на овим бетонским мешавинама. С обзиром да се запреминске масе RA и CSA битно разликују, проценти делимичне замене агрегата, приказани у табели 8, односе се на запреминска учешћа CSA у наведеним фракцијама агрегата.

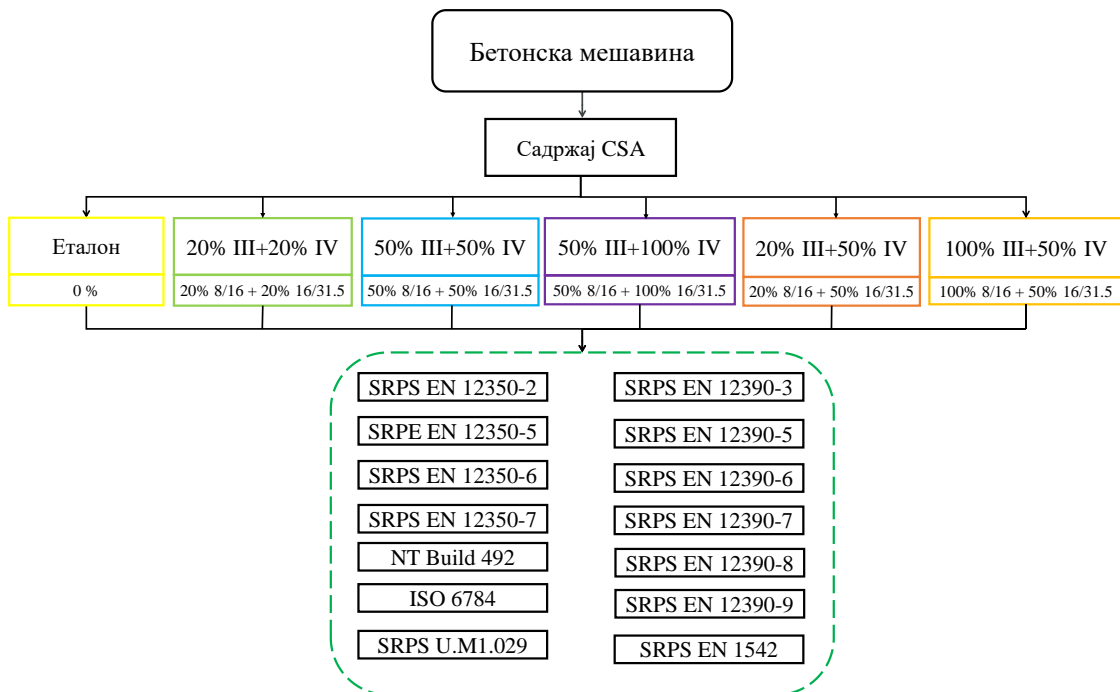
Табела 8. Садржај природног агрегата и агрегата од бакарне шљаке у бетонским мешавинама

| Р.бр. | Мешавина | Природни речни агрегат | | | | Агрегат од бакарне шљаке | |
|-------|----------------|------------------------|-----|-----|-----|--------------------------|-----|
| | | I | II | III | IV | III | IV |
| 1. | ЕТАЛОН | | | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 2. | 20% III+20%IV | | | 80 | 80 | 20 | 20 |
| 3. | 50% III+50%IV | | | 50 | 50 | 50 | 50 |
| | | 100 | 100 | | | | |
| 4. | 50% III+100%IV | | | 50 | 0 | 50 | 100 |
| 5. | 20% III+50%IV | | | 80 | 50 | 20 | 50 |
| 6. | 100% III+50%IV | | | 0 | 50 | 100 | 50 |

На слици 42 дат је приказ плана експерименталних испитивања која су спроведена на бетонским мешавинама. С обзиром да се запреминске масе RA и CSA битно разликују, проценти делимичне замене агрегата, приказани у табели 8, односе се на запреминска учешћа CSA у наведеним фракцијама агрегата.

Пре састављања програма испитивања бетонских мешавина справљених са крупним фракцијама CSA, детаљно су анализирани резултати досадашњих испитивања истих и сличних бетона справљених са додатком CSA.

Сва предметна испитивања обе врсте агрегата, као и свих бетонских мешавина, спроведена су у Лабораторији за материјале Грађевинског факултета Универзитета у Београду, Лабораторији за SEM анализе на Институту за рударство и металургију у Бору и у Институту за путеве.



Слика 42. План експерименталних испитивања бетонских мешавина

Основна сврха пројектовања бетонских мешавина било је одређивање оптималног садржаја агрегата од бакарне шљаке у циљу побољшања карактеристика бетонске мешавине пројектоване класе C25/30. Оптималним садржајем замене агрегата од бакарне шљаке у бетонским мешавинама добијају се бетони бољих физичко–механичких карактеристика. Уколико је количина употребљеног агрегата од бакарне шљаке нижа од оптималне, бетон ће показати механичке карактеристике сличне контролном бетону. Такође, уколико се употреби већа количина замене агрегата од бакарне шљаке, бетон ће показивати пад механичких карактеристика уз повећање запреминске масе, што говори о томе да употреба CSA не мора неминовно довести до побољшања карактеристика бетона.

Досадашња испитивања која су се бавила бетонима са додатком CSA као замене за природни агрегат, показала су да се на овакав начин могу побољшати одређена својства бетона као што су запреминска маса, уградљивост, чврстоћа при притиску, чврстоћа при затезању савијањем и трајност [96]. У истраживању које су извели *M. Khanzadi* и *A. Behnood* [17] показано је да се потпуном заменом крупних фракција RA са истим фракцијама CSA, вредности чврстоће при притиску и при затезању могу повећати за 11%, односно 12%, респективно. Такође је показано да се агрегат од бакарне шљаке понаша попут природног

речног агрегата, због садржаја SiO_2 (улази у састав силикатних стена). Са повећањем процента замене RA са CSA, постепено се повећава запреминска маса бетона [97].

3.2. Агрегати

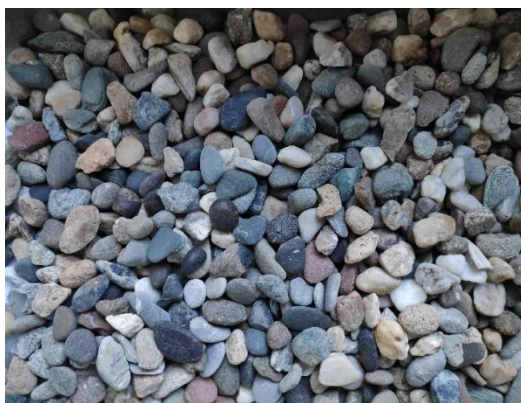
Као што је већ напоменуто, у оквиру предметних испитивања вршена су и испитивања својстава агрегата. За справљање бетонских мешавина коришћени су природни речни агрегат (RA) и агрегат од бакарне шљаке (CSA).

Позната је чињеница да се природни агрегати обично добијају или дробљењем стенских маса у каменоломима, или вађењем шљунка и песка из речних корита. Међутим, многе земље се суочавају са проблемима недостатка квалитетног агрегата (а пре свега ситног агрегата – песка) са једне стране и нарастајућим еколошким проблемима са друге стране.

Већ је истакнуто да агрегат, разврстан у стандардом дефинисане фракције, чини највећи део бетонске мешавине. Поред агрегата природног порекла, у савременом грађевинарству се све више користе и рециклирани агрегати (из грађевинског отпада, отпада од рушења и ископа), као делимична замена за природне агрегате. При томе, ови вештачки добијени агрегати, као што су на пример гранулисана млевена згура високих пећи, бакарна шљака као нуспроизвод у процесу обраде руде бакра или летећи пепео, све чешће и у све већим количинама се успешно употребљавају као делимична замена природног агрегата у бетону.

3.2.1. Природни агрегат

Природни речни агрегат који је коришћен у овом истраживању добијен је са сепарације “Нова сепарација”, што значи де је пореклом из реке Велике Мораве код Параћина. Пре самих испитивања, агрегат је опран, осушен у сушници до константне масе и сепарисан у четири стандардне фракције: 0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm и 16/31,5 mm (видети слику 43).



Слика 43. Природни речни агрегат

Испитивања основних физичко-механичких карактеристика компонентних материјала спроведена су за потребе пројектовања, као и сагледавања евентуалних ефеката које свака од компонената може имати на својства пројектованих бетонских мешавина. Природном речном агрегату се у пракси најчешће даје предност. Поред економског фактора, што је у првом реду последица јефтине сепарисања, природни агрегат због заобљености зрна много повољније утиче на уградљивост и обрадљивост бетонских мешавина.

3.2.2. Бакарна шљака

Као што је већ раније објашњено, у пирометалуршкој преради бакра настају различите врсте шљаке: шљака пламене пећи, конверторска шљака, шљака анодне пећи, шљака електричних и флеш пећи и др. Већина ових шљака, нарочито оних са већим садржајем бакра, рециклирају се поновним враћањем у процес. Ипак највеће количине шљаке настају приликом топљења (топионичка шљака) и конвертовања (конверторска шљака). Концентрација бакра у топионичкој шљаци се обично креће у опсегу 0.5-2.0% (0.3-1.0% из пламених пећи и преко 1% из флеш пећи), док конверторска шљака може садржати 2-10% бакра. Шљака са садржајем бакра 0.5-2.0% традиционално се сматрала чврстим отпадом и одлагана је на депоније. Са падом просечног садржаја бакра у руди испод 1% шљака је постала значајна секундарна сировина [98].

Бакарна шљака добијена из прве фазе пирометалуршке производње бакра оксидационим топљењем у пламеној пећи представља значајну рециклажну сировину која осим бакра (садржај < 1%) може садржати и Zn, Ni, Co, Mo, Sn и

др. хемијске елементе. Њеном даљом прерадом, штити се животна средина, земљишни простор и минерални ресурси, уз економску добит. Под бакарном шљаком се подразумева растоп минерала сједињених на температури 1100÷1200 °C, који се ствара при топљењу сировине. Основне компоненте овог растопа су: SiO₂, FeO, Mn₂O₃ и MgO. Поред тога, доста су присутни Fe₃O₄, CaO и мале количине Cu₂S и зрна CaCO₃. Наиме, оксидационим топљењем концентрата бакара на високим температурама (1200°C), уз додатак топитеља (SiO₂), формира се бакренац и силикатна шљака која, због своје мање густине у односу на бакренац (тешке фазе топљења), испливава на површину растопа и уклања се из система топљења. Део сулфида гвожђа оксидује и реагује са SiO₂, дајући течну бакарну шљаку чију основу чини феро-силикатна матрица, тј. фајалит (Fe₂SiO₄), док се извесна количина оксидује у магнетит (Fe₃O₄) [99]. Изливањем, врела бакарна шљака се, наглим проласком кроз фазу хлађења и тренутном кристализацијом, трансформише у чврсту тамно сиву масу. Услед температурног шока, настаје зрнасти материјал различите крупноће. Дакле, према структури, бакарна шљака представља зрнаст и некохерентни отпадни материјал чији квалитет зависи од више фактора: од врсте и квалитета сировине чијим се топљењем добија, начина топљења, начина хлађења и тренутне кристализације. Као последица свих ових фактора добија се бакарна шљака различитог хемијског и гранулометријског састава [100]. Процентуални садржај појединих хемијских елемената у бакарној шљаци зависи и од начина хлађења усијане бакарне шљаке на депонији [101]. Најважнија компонента која служи као критеријум квалитета шљаке је SiO₂, која по правилу смањује садржај FeO и проценат бакара у шљаци. Из тог разлога се настоји да шљаке пламених пећи имају минимум 36%, а најбоље би било 36÷42% SiO₂. Већи садржај SiO₂ повећава температуру топљења шљаке.

Шљака која је коришћена у предметном истраживању, добијена је из прве фазе пирументаушког процеса топљења у погону Флотације у оквиру Рударско топионичарског басена у Бору. Ова шљака се директно одлаже на депонију (уколико је садржај Cu < 1%), односно шаље се у процес додатне обраде због садржаја бакара у њој, након чега се одлаже као нуспроизвод из процеса прераде. Предметна шљака је депонована је на депонији “Депо 1” у кориту Борске реке у

непосредној близини прерађивачких капацитета (слика 44а), у количини која је процењена на $16 - 18 \times 10^6$ t. Ова врста шљаке настала је процесом хлађења вреле бакарне згуре на депонији. Процес настанка је спор из разлога што се кристализација минералног материјала споро одвија, па се услед тога, поред растреситог ситног материјала, добијају и крупнији комади (величина појединих комада и до 600 mm), неподесни за уграђивање у бетон, а чија се потенцијална примена може остварити само даљим дробљењем и мљењем (слика 44б).



(а)

(б)

Слика 44. (а) Депонија агрегата од бакарне шљаке у непосредној близини прерађивачких капацитета Рударско топионичарског басена у Бору; (б) макроскопски изглед агрегата CSA на депонији

Наведена врста агрегата (CSA) одабрана је за истраживање због потенцијално бољих физичко-механичких карактеристика у односу на природни речни агрегат (RA), мање дробљивости, веће запреминске масе, мањег упијања воде, итд. Наравно да је од ништа мањег значаја била и еколошка компонента – у смислу рециклаже депонованог отпадног материјала. Све ово морало је да буде праћено детаљном анализом својстава предметног гранулата, у циљу сагледавања утицаја агрегата од бакарне шљаке на истраживане карактеристике свежег и очврслог бетона [12].



(a)



(б)

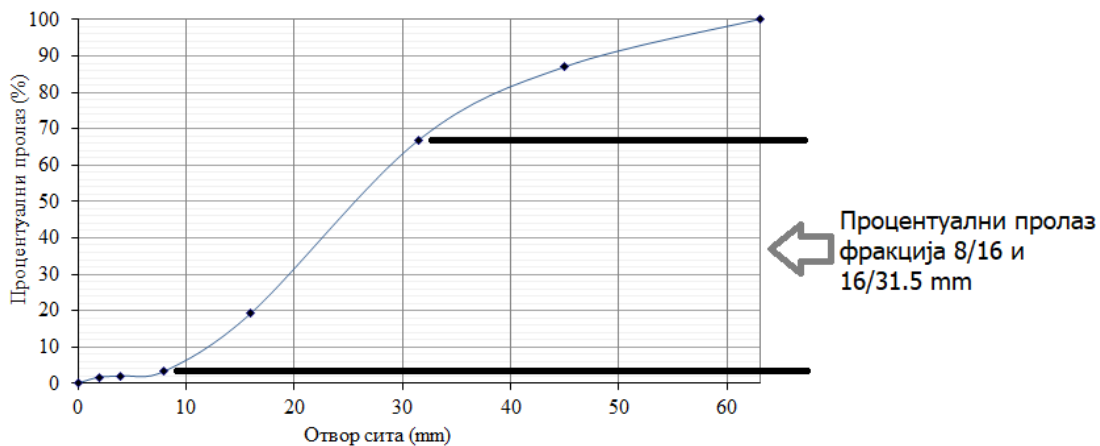
Слика 45. (а) Макроскопски изглед агрегата од бакарне шљаке фр. 8/16 mm и (б) макроскопски изглед агрегата од бакарне шљаке фр. 16/31,5 mm

Према испитаним физичким и хемијским карактеристикама бакарне шљаке, њена употреба је могућа у производњи бетона где би се успешно користила као замена за уобичајене врсте агрегата. Због велике запреминске масе, погодна је за примену пре свега у масивним бетонима, код бетонских темеља и плоча на земљи, или као материјал за изградњу слојева крутих коловозних конструкција [13, 25, 102].

3.3. Физичко механичке карактеристике агрегата

Агрегат, као зрнасти материјал (гранулат), састоји се од зрна различитих величина, што утиче како на својства самог агрегата тако и на својства бетона, у којима се он јавља као неизоставна компонента. Сматра се да је агрегат погодан за справљање бетона ако се његова гранулометријска крива налази унутар одређеног референтног подручја.

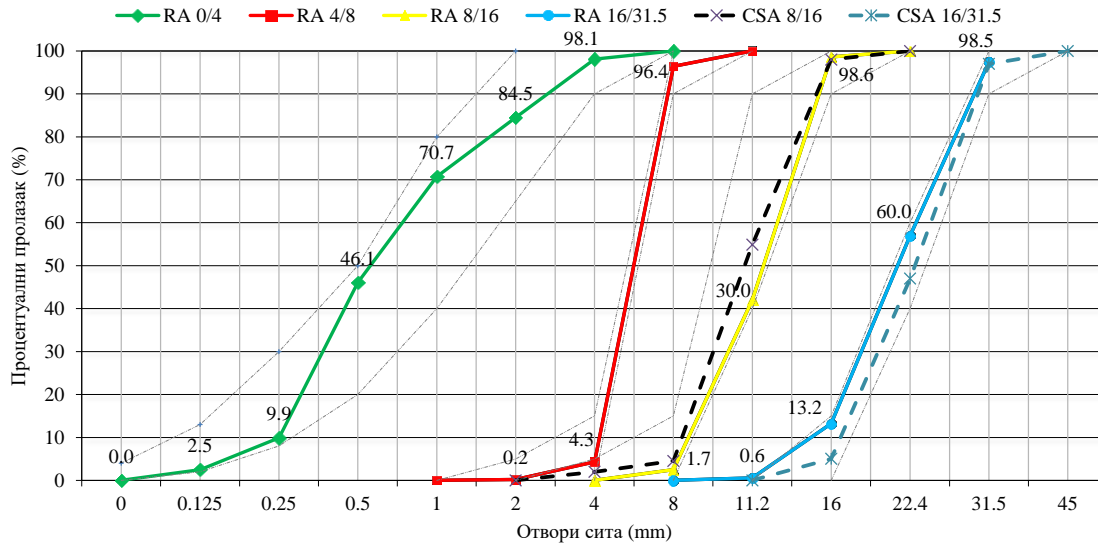
Како би се највећи део агрегата са депоније употребио за потребе овог испитивања коришћене су фракције 8/16 и 16/31.5 mm, чији проценат заступљености, према гранулометријској кривој полазног узорка CSA ускладиштеног на депонији, износи у збиру око 70%, слика 46.



Слика 46. Гранулометријска крива полазног узорка CSA

У припреми за просејавање агрегата, спроведена је процедура узимања репрезентативног узорка, тј. четвртање агрегата (ISS 1985). Након тога извршено је сушење узорака у сушници на температури $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ до константне масе. Одређивање гранулометријског састава извршено је методом сувог сејања, према стандарду SRPS EN 933-1 [103]. Гранулометријски састави фракција агрегата RA и CSA, коришћених у овом истраживању, приказани су на слици 47. Испрекидане линије на графику представљају гранична подручја фракција агрегата RA и CSA. Комплетан поступак одређивања гранулометријског састава агрегата извршен је према стандарду SRPS EN 933-1 [103].

Као што се може видети, гранулометријске криве фракција RA (0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm и 16/31.5 mm), као и примењених фракција CSA (8/16 mm и 16/31.5 mm), налазе се у оквиру референтних подручја, слика 47.



Слика 47. Градуометријске криве речног агрегата (RA) и агрегата од бакарне шљаке (CSA)

Испитивање облика зрна оба типа агрегата вршено је према стандарду SRPS EN 933-4 [104]. Испитивање је обављено у Лабораторији за камен и агрегат Института за путеве Београд. Резултати испитивања су приказани у табели 9. На основу утврђеног облика зрна, извршена је категоризација агрегата према важећем стандарду SRPS EN 12620 [105].

Испитан је процентуални садржај зрна неповољног облика. Под оваквим зрнима подразумевају се зрна код којих је однос највеће према најмањој димензији већи од 3. На сликама 48а и 48б дати су прикази изгледа зрна агрегата RA и CSA (респективно), за мешавине фракција 8/16 и 16/31.5 mm.

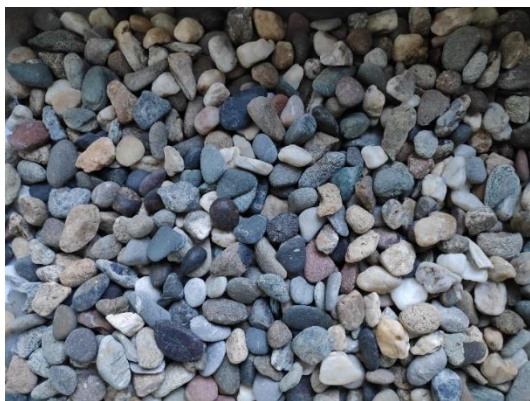
Табела 9. Индекс облика

| Метода | Стандард | Фракције | Вредности | | Категоризација према SRPS EN 12620 | |
|---------------|---------------|---------------|-----------|-----|------------------------------------|------------------|
| | | | RA | CSA | RA | CSA |
| Индекс облика | SRPS EN 933-4 | 8/11 10/14 | 16 | 5 | SI ₂₀ | SI ₁₅ |

Напомена: CSA – агрегат од бакарне шљаке; RA – природни речни агрегат, SI – индекс облика 3:1 (%).

Зрна агрегата бакарне шљаке су претежно коцкастог и дугуљастог облика, оштрих ивица, док је изглед површине зрна гладак до стакласт (слика 48б). Просечни садржај зрна лошег (пљоснатог) облика је мали и износи свега 5%, табела 9. Облик зрна природног агрегата је углавном дугуљаст и сферичан, а зрна су, због различитог учешћа стена, глатка, финохрапава и песковито храпава са нешто већим просечним процентуалним садржајем зрна неповољног облика од 16% (видети табелу 9). Према наведеним геометријским карактеристикама, а на основу садржаја зрна лошег облика, CSA је сврстан у категорију SI₁₅, а природни агрегат у категорију SI₂₀.

Одређивање запреминске масе у растреситом и збијеном стању природног речног агрегата и агрегата од бакарне шљаке, обављено је према SRPS B.B8.030 [106].



(a)



(б)

Слика 48. (a) Изглед зрна агрегата RA; (б) изглед зрна агрегата CSA

Запреминска маса γ (kg/m³) представља масу по јединици запремине материјала заједно са шупљинама и порама које су у њему садржане, тако да се вредност добија путем израза:

$$\gamma = \frac{m_0}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad (10)$$

где је:

m_0 - маса потпуно сувог узорка, добијена сушењем до константне масе на температури која најчешће износи 100-110 °C;

V - укупна запремина узорка материјала (са шупљинама и порама).

У табели 10 је дат приказ резултата добијених приликом одређивања запреминске масе оба агрегата у збијеном и растреситом стању.

Табела 10. Запреминске масе RA и CSA у растреситом и збијеном стању

| Фракција | Природни агрегат (RA) | | Агрегат од бакарне шљаке (CSA) | |
|-----------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| | Растресито (kg/m ³) | Збијено (kg/m ³) | Растресито (kg/m ³) | Збијено (kg/m ³) |
| I (0/4 mm) | 1540 | 1660 | | |
| II (4/8 mm) | 1490 | 1580 | | |
| III (8/16 mm) | 1500 | 1590 | 1629 | 1756 |
| IV (16/31.5 mm) | 1530 | 1630 | 1621 | 1805 |

Запреминске масе агрегата од бакарне шљаке у растреситом стању за фракције III и IV веће су за 8% и 6%, респективно, у односу на III и IV фракцију природног агрегата. Однос запреминске масе CSA у збијеном стању у поређењу са RA је нешто већи и износи 9% и 10%, респективно. Разлог је боље „паковање“ зрна агрегата од бакарне шљаке услед набијања металном шипком.

Одређивање специфичне масе и упијања воде агрегата RA и CSA извршено је према стандарду SRPS EN 1097-6 [107]. Резултати испитивања су приказани у табели 11.

Табела 11. Специфична маса зрна агрегата

| Специфична маса | RA | CSA |
|-----------------|------|------|
| ρ_{rd} | 2660 | |
| ρ_a | 2580 | |
| ρ_{ssd} | 2610 | |
| ρ_{rd} | | 3400 |
| ρ_a | | 3330 |
| ρ_{ssd} | | 3360 |

Напомена: ρ_{rd} – специфична маса узорка осушеног у сушници (kg/m³); ρ_a – привидна специфична маса (kg/m³); ρ_{ssd} – специфична маса површински осушеног узорка (kg/m³).

За одређивање специфичне масе агрегата употребљена је метода пикнометра. Специфична маса зрна агрегата израчунава се према обрасцу:

$$\rho_{rd} = \frac{M_s}{V}; V = \frac{M_2 + M_s - M_3}{\gamma^{vode}} \quad (11)$$

где је:

ρ_{rd} - специфична маса зрна агрегата са отвореним и затвореним порама, g/cm^3 ;

M_s - маса сувог узорка агрегата за појединачно испитивање, у g;

V - запремина зрна агрегата масе M_s , у cm^3 ;

M_1 - маса празног сувог пикнометра, у g;

M_2 - маса пикнометра напуњеног водом, у g;

M_3 - маса пикнометра са узорком и водом, у g;

$\gamma_{\text{воде}}$ - специфична маса воде, у g/cm^3 .

Резултати испитивања специфичних маса показују да је привидна специфична маса зрна агрегата CSA (3330 kg/m^3) за око 30% већа у односу на природни речни агрегат (2580 kg/m^3).

Табела 12. Упијање воде природног речног агрегата (RA)

| Метода | Стандард | Фракције (mm) | Вредност | | Категоризација SRPS EN 12620 | |
|------------------|----------------|---------------|----------|-----|------------------------------|--------------------|
| | | | RA | CSA | RA | CSA |
| Упијање воде у % | SRPS EN 1097-6 | 10/14 8/11 | 1.2 | 0.6 | WA ₂₄ 2 | WA ₂₄ 1 |

Напомена: RA- природни агрегат, CSA – агрегат од бакарне шљаке, WA₂₄1, WA₂₄2-граница упијања воде <1, односно <2.

Испитивање упијања воде је извршено према стандарду SRPS EN 1097-6 [107]. Дозвољени проценат упијања воде агрегата који се могу користити за справљање бетонских мешавина је највише 1,5%. Измерени проценат упијања воде агрегата од бакарне шљаке је 0.6%. Из табеле 12 се може видети да је упијање воде природног агрегата 1.2% што је такође у границама дозвољењих техничких услова за примену у бетонима. Према наведеним вредностима упијања, зрна агрегата CSA сврстана су у категорију WA₂₄1, са границом упијања мањом од 1%.

Испитивање дробљивости крупних фракција агрегата за бетон се врши дробљењем узорка у нарочитом цилиндричном суду према одредбама стандарда SRPS B. B8. 033 [108]. Осушена, гранулометријски “чиста” фракција агрегата се сипа у суд до одређене висине, затим се постави поклопац (клип) и узорак у цилиндру се излаже сили притиска која се постепено повећава до 400 kN. Затим се узорак извади из цилиндра и просеје кроз одговарајуће сито. Резултати испитивања дробљивости приказани су у табели 13.

Табела 13. Отпорност на дробљење природног агрегата у цилиндру

| Дробљивост (%) | RA | | |
|----------------|-------|-------|-------|
| | 0/4 | 4/8 | 8/16 |
| | 21.51 | 22.28 | 25.91 |

У табели 14 приказани су резултати испитивања агрегата методом Лос Анђелес у складу са одредбама стандарда SRPS EN 1097-2 [107]. Да би бетон био отпоран на абразију и ерозију коефицијент “Лос Анђелес” (L_A) мора бити мањи од 30%. Отпорност агрегата према дробљењу и хабању дефинише се обрасцем који гласи:

$$L_a = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100$$

где је:

m_0 - маса узорка пре испитивања;

m_1 - маса остатка узорка на ситу 1,6 mm.

Табела 14. Отпорност према дробљењу и хабању „Лос Анђелес“

| Метода | Фракције (mm) | RA | CSA |
|---|---------------|-------------------------|------|
| Отпорност према дробљењу и хабању "Лос Анђелес" у % | 0/4 | 26.3 (градација “B”) | 9.69 |
| | 4/8 | | |
| | 8/16 | | |
| | 16/31.5 | | |

Резултати показују да агрегат CSA има дупло већу отпорност на хабање од природног агрегата RA. Вредност коефицијента отпорности према дробљењу и хабању агрегата RA је 26.3 % за све три фракције, док је за агрегат CSA за фракцију 8/16 mm ова вредност 9.69%, односно 12.76 % за фракцију 16/31.5 mm.

Садржај ситних честица одређен је методом мокрог просејавања, према стандарду SRPS B. B8.036 [109] кроз сита са отворима 1.0, 0.25, 0.125, 0.09 и 0.063 mm. У табели 15 дат је приказ процентуалног садржаја ситних честица по фракцијама.

Табела 15. Садржај ситних честица природног речног агрегата

| Фракције | | 0/4 | 4/8 | 8/16 | 16/31.5 |
|------------------------|---|-----|-----|------|---------|
| Садржај ситних честица | | | | | |
| <0.063 mm | % | 0.7 | | | |
| <0.09 mm | | 0.9 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |

Меродавни су процентуални пролази кроз сито 0.09 mm и 0.063 mm. Услов квалитета ситних фракција речног агрегата је да садржај ситних честица не буде већи од 5%, док тај садржај код крупних фракција не сме бити већи од 1%.

Модул финоће (зрnavости) ситног агрегата износи 2.9 и налази се у дозвољеним границама (од 2.3 од 3.6) према предметном стандарду.

Испитивање отпорности на хабање агрегата CSA и RA урађено је према стандарду SRPS EN 1097-1 [110]. Добијена вредност за агрегат од бакарне шљаке је M_{DE} 10% што је приближно три пута боља вредност у поређењу са M_{DE} 4% (RA).

Табела 16. Отпорност на хабање

| Метода | Стандард | | Фракција (mm) | Вредности | | Категоризација SRPS EN 12620 | |
|---------------------|-------------|----|---------------|-----------|-----|------------------------------|------------|
| | | | | RA | CSA | RA | CSA |
| Отпорност на хабање | SRPS 1097-1 | EN | 8/11 | 4 | | $M_{DE}10$ | |
| | | | 10/14 | | 10 | | $M_{DE}10$ |

За агрегат CSA је урађено и испитивање полирности према стандарду EN 1097-8 [55].

Табела 17. Резултати испитивања полирности

| Метода | Стандард | | Фракција (mm) | Вредности | | Категоризација SRPS EN 12620 | |
|-----------|-------------|----|---------------|-----------|-----|------------------------------|-------------------|
| | | | | RA | CSA | RA | CSA |
| Полирност | SRPS 1097-8 | EN | стандард | -* | 43 | - | PSV ₄₄ |

Агрегат CSA има вредност коефицијента полирности 43, што га према стандарду SRPS EN 12620 [105] сврстава у категорију PSV₄₄. Полирност ове врсте шљаке је

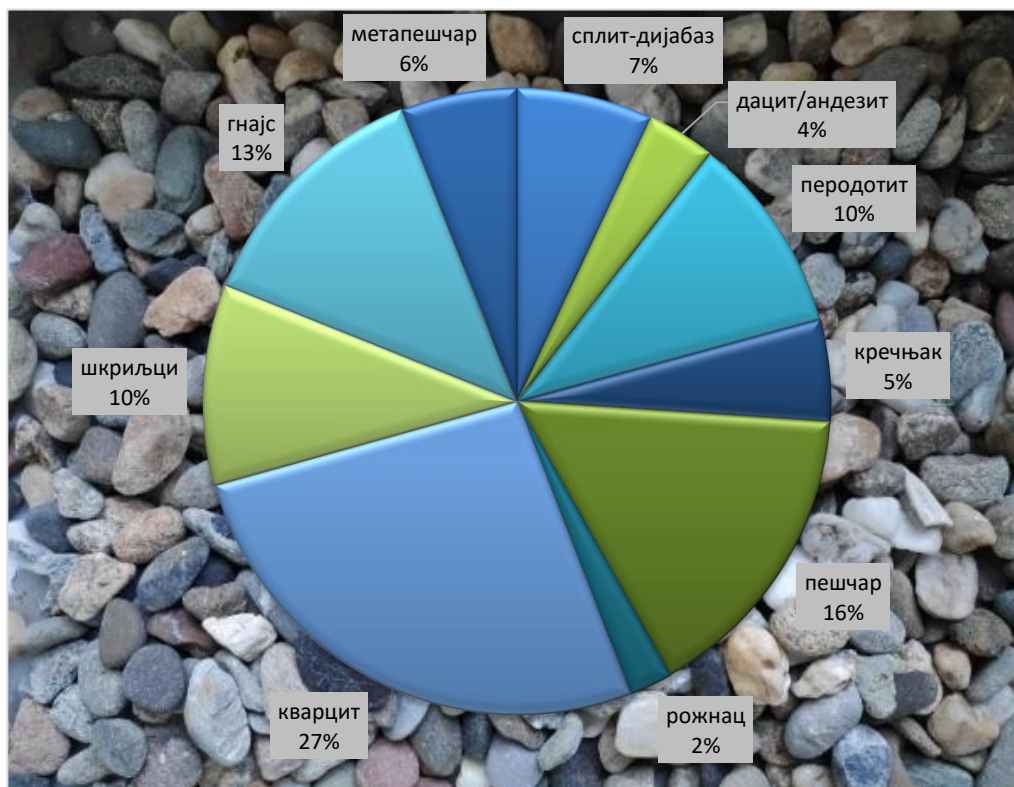
нижа од вредности које су утврђене за, на пример, челичну шљаку (PSV 54), али су ипак знатно више у односу на кречњаке (PSV 34, 37) [112].

На агрегату RA није извршено испитивање полирности из разлога што се природни агрегат не користи за хабајуће слојеве саобраћајница (осим за врло лако саобраћајно оптерећење, пешачке и бицикличке стазе).

Петрографском анализом утврђено је да се зрна агрегата RA састоје углавном од фрагмената метаморфних стена (56%) и исте количине седиментних (23%) и магматских стена (21%), слика 49. Унутар фрагмената метаморфних стена најзаступљенији су били кварцити, затим фрагменти гнајса и шкриљаца. Међу седиментним стенама пешчари су били најчешћи, али је пронађен и мали број кречњака и рожнаца.

Магматске стене су формирале фрагменте спилите-дијабаза, дацита-андезита и перидотита (често серпентинизованих), слика 49. Фрагменти RA су углавном имали сферне и издужене облике и глатке површине. У испитиваној фракцији нису пронађена минерална зрна.

Хемијски и минералшки састав бакарне шљаке варира, пре свега, у зависности од улазних концентрата, домаћих и увозних, који су прерађивани у дугом временском периоду. Ипак, само неколико основних кристалних фаза идентификовано је XRD анализом, у различитим узорцима шљаке. То су, најзаступљенији фајалит (Fe_2SiO_4), затим фајалит обогаћен магнезијумом ($(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$ – оливин), магнетит (Fe_3O_4), пирит (FeS_2) и евентуално кварц (SiO_2) [113].



Слика 49. Дијаграм природног речног агрегата (RA) са приказом различитих фрагмената стена у уделу 10/14 mm. Слика употребљеног агрегата је у позадини

Генерално, бакарна шљака није уједначеног хемијског састава. Поједини истраживачи утврдили су да садржаји хемијских једињења у шљаци варирају у распонима Fe_2O_3 : 35-60%, SiO_2 : 25-40%, CaO : 2-10%, Al_2O_3 : 3-15%, CuO : 0.3-2.1%, MgO : 0.7-3.5% [23]. Други су пак, утврдили да садржај CaO и MgO може да буде и већи (28%, односно 12%) [101, 114].

У табели 18 дат је приказ хемијског састава узорка агрегата од бакарне шљаке која је коришћена у овом раду као замена за крупне фракције природног речног агрегата. Мерења су спроведена у лабораторији за хемијско-техничку контролу “ХТК” Института за рударство и металургију “Бор”. Добијени резултати показују да је шљака доминантно изграђена од оксида силицијума, гвожђа, калцијума и алуминијума. Оксиди осталих елемената су знатно мање заступљени. Садржај бакра је испод 0.50%.

Табела 18. Хемијска анализа агрегата од бакарне шљаке (CSA)

| Једињења | Садржај (%) |
|--------------------------------|-------------|
| | CSA |
| SiO ₂ | 42.54 |
| Al ₂ O ₃ | 3.57 |
| FeO | 22.17 |
| Fe ₂ O ₃ | 6.92 |
| Fe ₃ O ₄ | 1.23 |
| CaO | 20.29 |
| MgO | 0.51 |
| SO ₃ | 1.18 |
| K ₂ O | 0.43 |
| K | 0.36 |
| Na ₂ O | 0.15 |
| Na | 0.11 |
| TiO ₂ | 0.28 |
| Mn ₂ O ₃ | 0.042 |
| Cl- | <0.01 |
| Cu-ox | 0.96 |
| P ₂ O ₅ | 0.094 |
| Cu | 0.30 |

Обојене шљаке, попут бакарне, могу се класификовати као базне, киселе или неутралне, на основу степена силиката и односа базних и киселих оксида. Степен силиката и однос базних и киселих оксида [115] могу се израчунати као:

$$\text{Степен силиката} = \frac{\text{Кисели оксиди (SiO}_2\text{)}}{\text{Базни оксиди (CaO, MgO, FeO)}} \quad (12)$$

$$\frac{MO}{SiO_2}, \text{ где } MO \text{ представља базни оксид} \quad (13)$$

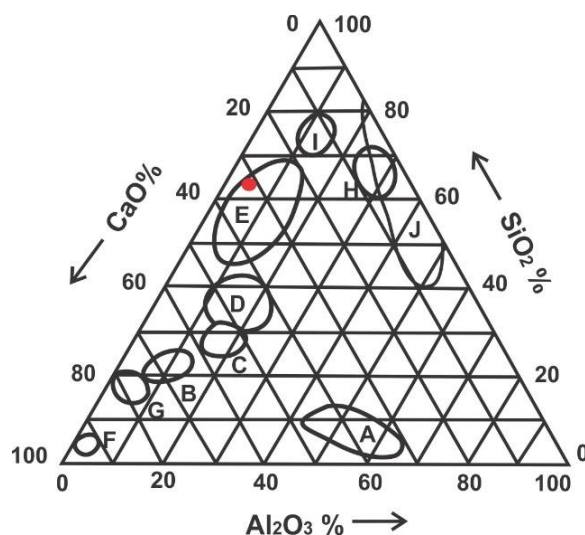
На основу формула (12) и (13), степен силиката за ову пироксену бакарну шљаку био је 2.1, а однос основних оксида и силицијум-оксида 1.0. Према предложеној класификацији (табела 19), испитивана бакарна шљака припада групи киселих шљака.

Табела 19. Класификација бакарне шљаке

| | Степен силиката | MO/SiO ₂ | CSA |
|-------------------------------------|--------------------|---------------------|-----------|
| Класификација | <1 | >2 | базна |
| | >1 | <2 | кисела |
| | 2 | 2 | неутрална |
| 2020 (Пироксенска бакарна шљака) | 2.1 | 1.0 | кисела |

Напомена: MO—базни оксиди.

То такође може да потврди трокомпонентни дијаграм [116] CaO – SiO₂ – Al₂O₃ (слика 50). Фајалит и магнетит били су најзаступљенији минерали у агрегатима бакарне шљаке, са просечним садржајем CaO од 5% и садржајем Fe₂O₃ од 45% [43]. Повећани садржај калцијума и силицијума у хемијској анализи у овој студији (CaO 20%; SiO₂ 42%) утицао је на повећани садржај минерала из групе клинопироксена (хеденбергит, 82.35%), што је потврђено SEM анализом.



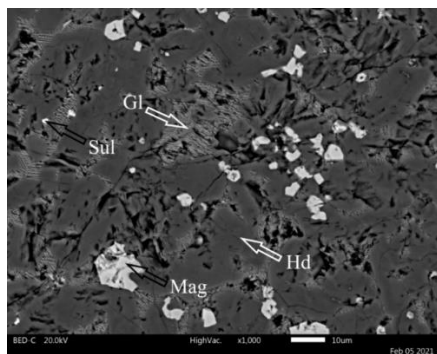
Напомена: А—глинасти цемент; В—Портланд цемент; С—цемент са садржајем шљаке; D—бакарна шљака; Е—кисела шљака; F—калцијум-оксид; G—хидратисани креч; H—грас (пуцолани); I—силикатне супстанце; J—пуцолани (природни и вештачки).

Слика 50. Позиција предметне бакарне шљаке (црвена тачка) на тернарном дијаграму зоне везива и адитива [42].

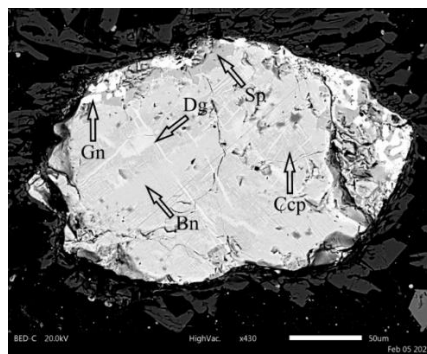
Узорак CSA уграђен је у епоксидну смолу, полиран и превучен угљеником за SEM-EDS анализу. Анализа је извршена помоћу скенирајућег електронског микроскопа JEOL JSM-IT300 упареним са Oxford Instruments KSMak 50 mm² SDD енергетско-дисперзивним спектрометром, у режиму високог вакуума, при

убрзању напона од 20 kV и струји сонде од ~0,1 nA. SEM слике су добијене увећањем од 1000 пута, према величини зрна анализираних узорка. Фракције фазе (у вол.%) израчунате су помоћу софтвера ImageJ (вл.53а, Национални институт за здравље, САД). EDS елементарна анализа извршена је у свим откривеним фазама, у више тачака. Интерни стандарди су коришћени за квантификацију и сви резултати су нормализовани на 100%. За хомогене кристалне фазе, кристалохемијске формуле су израчунате на основу просечног састава.

SEM-EDS анализа узорка бакарне шљаке открила је присуство четири опште фазе у CSA, слика 51. Апсолутно доминантна фаза, која обухвата 82.35% узорка, је силикатни минерал групе клинопироксена, назван хеденбергит (идеалне формуле $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$). Са 13.94 %, следи још једна силикатна фаза-девитрификована стакласта матрица. Две помоћне фазе су магнетит (оксидни минерал групе спинела, који има идеалну формулу $\text{Fe Fe}_2\text{O}_4$) и сулфидне капљице, које садрже 2.34 и 1.37 % узорка, респективно.



(a)



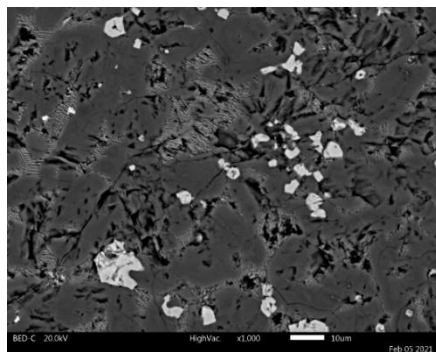
(б)

Напомена: Hd – хеденбергит, Gl – девитрификована стакласта матрица, Mag – магнетит, Sul – капљице сулфида, Ccp – халкопирит, Bn – борнит, Dg – дигенит, Gn – галена, Sp – сфалерит

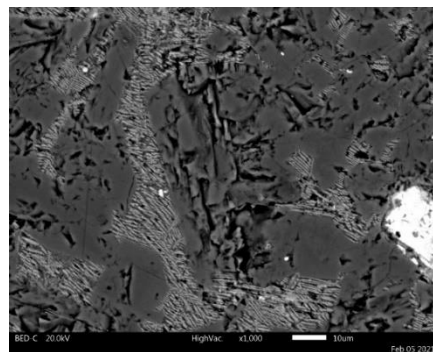
Слика 51. (а) SEM снимак CSA агрегата; (б) SEM снимак капљице сулфида

Капљице сулфида су генерално врло хетерогене, а Cu, Fe и S су главни састојци. Њихова текстура је веома сложена (слика 51б), услед распада чврстих раствора између халкопирита (CuFeS_2), борита (Cu_5FeS_4) и дигенита (Cu_9S_5). Такође садрже мале количине галенита (PbS), сфалерита (ZnS), леллингита (FeAs_2) и других минерала сулфида / арсенида. Због своје сложености и малог обиља, ове сулфидне капљице су у овом раду разматране као једна фаза. Састав све четири фазе

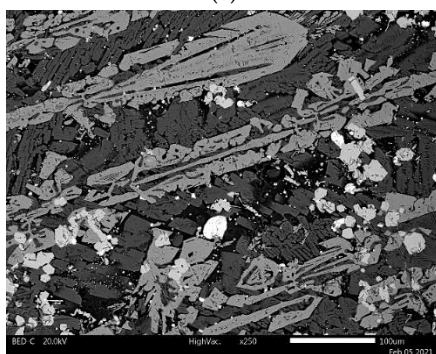
откривене у узорку бакарне шљаке дат је у табели 20, са њиховом заступљеношћу у процентима.



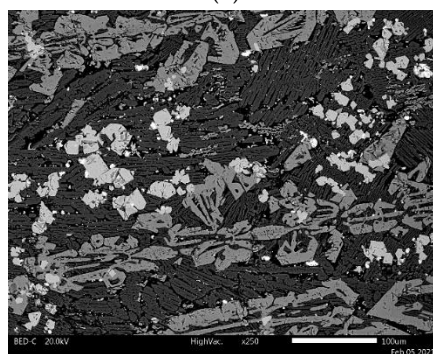
(a)



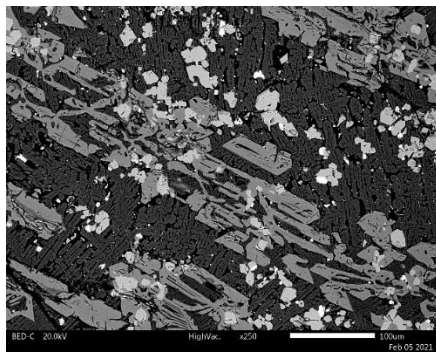
(б)



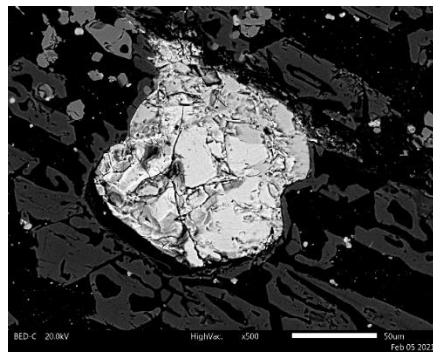
(и)



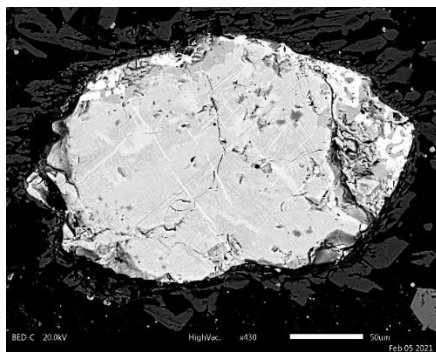
(а)



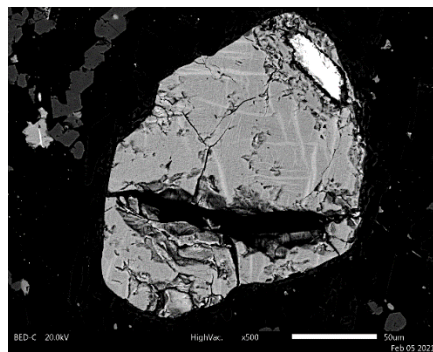
(е)



(ф)



(г)



(х)

Слика 52. SEM агрегата CSA

Преостали садржај калцијума и силицијума везан је за силикатну фазу-девитрификовану стакласту матрицу (13,94%), а гвожђе је претежно везано за оксидни минерал из групе спинела-капљице магнетита и сулфида са садржајем 2,34%, односно 1,37% (табела 20).

У поређењу са идеалним формулама, и хеденбергит и магнетит показују обогаћивање алуминијумом, уз мање замене магнезијумом, титаном и другим катјонима. Будући да је главна силикатна кристална фаза хеденбергит, стакласта матрица је веома богата гвожђем (33.3%). Пошто су други мањи елементи распоређени између кристалних фаза (хеденбергит, магнетит и сулфиди), обогаћен је алуминијумом и некомпатибилним елементима, као што су баријум, калијум, натријум, фосфор и арсен (табела 20).

Табела 20. Фазе бакарне шљаке добијене SEM-EDS анализом

| Фазе/ Елементи | Хеденбергит | Стакласта матрица | Магнетит | Капљице сулфида |
|----------------|-------------|-------------------|----------|-----------------|
| wt. % | | | | |
| O | 38.57 | 36.40 | 28.80 | |
| Na | | 0.28 | | |
| Mg | 0.58 | 0.02 | 0.06 | |
| Al | 1.56 | 4.18 | 1.27 | |
| Si | 21.18 | 17.93 | | |
| P | | 0.13 | | |
| S | | | | 32.89 |
| K | | 0.90 | | |
| Ca | 15.17 | 4.65 | 0.44 | |
| Ti | 0.13 | 0.19 | 1.16 | |
| V | | | 0.20 | |
| Cr | | | 0.02 | |
| Mn | 0.03 | 0.02 | | |
| Fe | 22.73 | 33.31 | 67.98 | 19.50 |
| Cu | | | | 47.61 |
| Zn | 0.05 | 0.09 | 0.07 | |
| As | | 0.07 | | |
| Ba | | 1.83 | | |
| Σ | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| Vol. % | 82.35 | 13.94 | 2.34 | 1.37 |
| n* | 10 | 8 | 4 | 7 |

Напомена: n*-број мерних тачака

Према вредностима из табеле 20, кристало-хемијске формуле израчунате су на следећи начин:

- $(\text{Ca}_{0.932}\text{Fe}_{1.003}\text{Mg}_{0.059}\text{Ti}_{0.007}\text{Zn}_{0.002}\text{Mn}_{0.001})_{2.004}(\text{Si}_{1.858}\text{Al}_{0.142})_{2.000}\text{O}_{6.000}$ за хеденбергит и
- $(\text{Fe}_{0.967}\text{Ca}_{0.025}\text{Mg}_{0.006}\text{Zn}_{0.002})_{1.000}(\text{Fe}_{1.826}\text{Al}_{0.108}\text{Ti}_{0.056}\text{V}_{0.009}\text{Cr}_{0.001})_{2.000}\text{O}_{4.000}$ за магнетит.

3.4. Цемент

Цемент који је коришћен у овом истраживању за справљање бетона је Портланд цемент (PC) ознаке CEM II/ A-L 42.5R специфичне масе 3.15 Mg/m^3 . Класификација цемента извршена је према европском стандарду EN 197-1 [117].

Табела 21. Физичко-механичке карактеристике цемента CEM II / A-L 42.5R

| Блаине | Остатак Р45 | Остатак Р90 | Вода за станд.конзис | Експанзија | Поцетак везивања | Крај везивања | Савојна цврстоца 2 дана | Савојна цврстоца 28 дана | Притисна цврстоца 2 дана | Притисна цврстоца 28 дана |
|------------------------|-------------|-------------|-------------------------|------------|---------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| cm^2/g | % | % | % | m m | min | min | MPa | MPa | MPa | MPa |
| 4130 | 2.9 | 0.1 | 27.4 | 0.1 | 170 | 235 | 5.3 | 8.1 | 29.8 | 54.1 |

Цемент, најчешће Портланд цемент, најзаступљенија је врста везива у бетонима. За цементна везива, вода се помеша са сувим прахом и агрегатом, што даје полутекућу смесу која се може обликовати, обично изливањем у калупе. Бетон везује и очвршћава кроз хемијски поступак који се назива хидратација. Вода реагује са цементом, који повезује остале компоненте, стварајући тврд материјал сличан камену. Остали латентно везивни материјали, попут летећег пепела и гранулисане згуре високих пећи, понекад се додају - или претходно помешани са цементом или као бетонска компонента и постају део везива. Летећи пепео и згура могу побољшати нека својства бетона, попут својстава бетона у свежем стању, хемијске отпорности и трајности [41].

3.5. Пројектовање бетонских мешавина

Сврха пројектовања бетонских мешавина је одређивање оптималног садржаја крупних фракција агрегата CSA, као замене за одговарајуће фракције RA, у циљу постизања бољих физичко-механичких карактеристика бетона са CSA у односу на контролну мешавину.

Приликом одређивања процента садржаја CSA у бетонским мешавинама потребних за ова испитивања водило се рачуна да запреминска маса оваквих бетона не премаши вредност од 2500 kg/m^3 због садржаја агрегата CSA чија је запреминска маса значајно већа у односу на природни RA. Такође се водило рачуна да овако добијени бетони буду економски исплативи - из тог разлога су за справљање бетона коришћене само фракције 8/16 mm и 16/31.5 mm агрегата CSA чије присуство на депонији износи близу 70%.

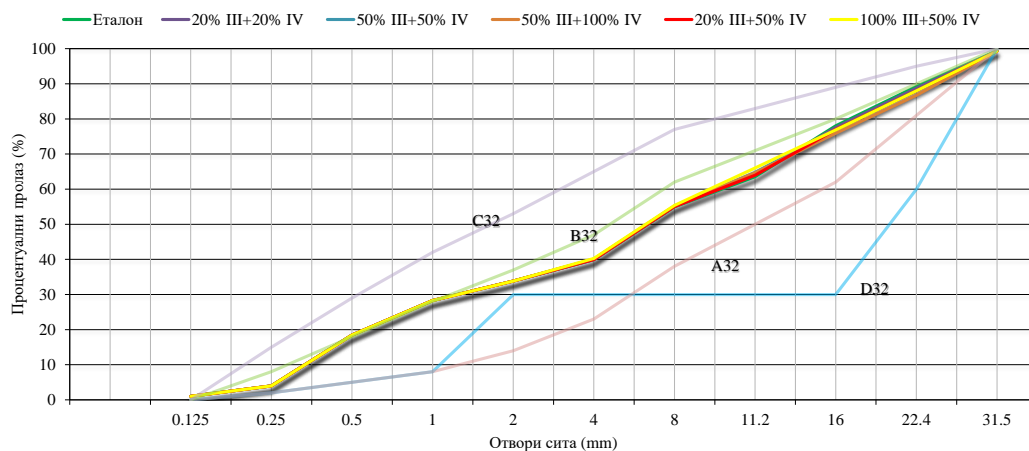
Састав бетонских мешавина са садржајем замене CSA је приказан у табели 22.

Табела 22. Гранулометријски састав мешавина агрегата

| Мешавине | Пролази у % масе кроз сита отвора у mm | | | | | | | | | | |
|-----------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0.125 | 0.25 | 0.5 | 1 | 2 | 4 | 8 | 11.2 | 16 | 22.4 | 31.5 |
| Еталон | 1.0 | 4.0 | 18.4 | 28.3 | 33.8 | 39.9 | 55.0 | 63.6 | 78.0 | 89.3 | 99.4 |
| 20% III+20% IV | 1.0 | 4.0 | 18.4 | 28.3 | 33.8 | 40.0 | 55.0 | 64.0 | 77.6 | 88.8 | 99.4 |
| 50% III+50% IV | 1.0 | 4.0 | 18.4 | 28.3 | 33.8 | 40.1 | 55.2 | 64.8 | 76.9 | 88.0 | 99.3 |
| 50% III+100% IV | 1.0 | 4.0 | 18.4 | 28.3 | 33.8 | 40.1 | 55.2 | 64.7 | 75.9 | 86.8 | 99.3 |
| 20% III+50% IV | 1.0 | 4.0 | 18.4 | 28.3 | 33.8 | 40.0 | 55.0 | 64.0 | 77.0 | 88.0 | 99.3 |
| 100% III+50% IV | 1.0 | 4.0 | 18.4 | 28.3 | 33.8 | 40.3 | 55.4 | 66.0 | 76.9 | 88.0 | 99.3 |

У табели 22 приказан је процентуални пролаз агрегата по фракцијама за сваку мешавину на основу кога су пројектоване гранулометријске криве минералних мешавина. На слици 53 је дат дијаграм гранулометрије агрегата свих 6 мешавина са граничним кривама из стандарда SRPS U.M1.206 [118].

Са дијаграма на слици 53 се запажа да се крива мешавина агрегата налази у подручју добре уградљивости, с обзиром да се налази унутар граничних кривих B32 и A32 [118].



Слика 53. Гранулометријске криве мешавина агрегата

Као основа за пројектовање коришћена је готова рецептура за бетон класе C25/30, бетоњерке “Металка” у Бору. Циљ примене готове рецептуре бетонске мешавине у овом истраживању била је конкретна примена бакарне шљаке код локалног произвођача бетона.

Састав бетонских мешавина одређен је на основу полазних параметара (вредности добијене од предметне бетоњерке):

- количина цемента СЕМ II / А-L 42.5 R - $m_c=398 \text{ kg/m}^3$;
- количина воде одређена на основу усвојеног v/c фактора $m_v/m_c=0.533$ износи $m_v=212 \text{ kg/m}^3$;
- учешћа појединих фракција агрегата усвојена су тако да гранулометријски састав мешавине фракција агрегата одговара Фулеровој кривој. Учешћа фракција износе:

Табела 23. Учешће појединих фракција у контролној бетонској мешавини

| Фракције (mm) | Учешће (%) |
|---------------|------------|
| 0/4 | 40 |
| 4/8 | 15 |
| 8/16 | 20 |
| 16/31.5 | 25 |

На основу датих параметара и учешћа појединих фракција агрегата у бетону, количине агрегата у контролној мешавини бетона износе:

Табела 24. Количине агрегата појединих фракција у контролном бетону

| Фракције (mm) | Количина (kg) |
|---------------|---------------|
| 0/4 | 686 |
| 4/8 | 257 |
| 8/16 | 343 |
| 16/31.5 | 429 |

3.6. Припрема узорака бетонских мешавина

У циљу утврђивања утицаја CSA на понашање бетона, израђени су узорци за лабораторијска испитивања који треба на реалан начин да симулирају понашање бетона у оквиру конструкције. Да би оцена резултата испитивања била меродавна, такви узорци треба да поседују што сличније карактеристике бетону уграђеном на градилишту.



(a)



(б)

Слика 54. (а) Лабораторијска мешалица; (б) справљање минералне мешавине

На основу испитивања дефинисаних планом за све врсте бетонских мешавина, прорачунате су потребне количине компонентних материјала. Потребне количине материјала одмераване су непосредно пре справљања бетона. Бетонске мешавине справљане су у лабораторијској противструјној мешалици за бетон запремине 60 литара, произвођача Controls, са фиксним бубњем и лопатицама-мешачима на вертикалној осовини у оси бубња, слика 54.

Количине материјала за мешање (дозаже) дефинисане су за сваку бетонску мешавину у зависности од броја и димензија узорака предвиђених за испитивања. Све компоненте одмерене су масено. Након убацивања сувих компоненти у мешалицу, приступило се њиховом мешању ради постизања што компактније смеше сувих компонената, након чега је додата течна фаза (вода). Време мешања у мешалици након додавања воде износило је 3 минуте. Просечна температура бетонских мешавина износила је 25 °С.

За потребе испитивања која су приказана у овом раду коришћени су различити типови узорака, у зависности од одредби стандарда за поједине врсте испитивања. Димензије и број направљених узорака, са бројем понављања за сваку врсту испитивања, приказани су у табели 25.

Табела 25. План испитивања

| Испитивање | Димензије узорака [m] | Број узорака | Број понављања [дана] | | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|--------------|-----------------------|---|---|----|
| | | | | | | |
| Чврстоћа при затезању савијањем | 0.12 x 0.12 x 0.36 | 3 x 2 = 6 | / | 3 | / | 28 |
| Чврстоћа при затезању цепањем | $(0.15^2 \times \pi/4) \times 0.15$ | 3 x 2 = 6 | / | 3 | / | 28 |
| Чврстоћа при притиску | 0.15 x 0.15 x 0.15 | 3 x 4 = 12 | 1 | / | 7 | 28 |
| Отпорност на дејство мраза | 0.10 x 0.10 x 0.05 | 3 | / | / | / | 28 |
| Скупљање | 0.12 x 0.12 x 0.36 | 3 | / | / | / | 28 |
| Хлориди | 0.10 x 0.10 x 0.10 | 3 | / | / | / | 28 |
| Карбонатизација | 0.15 x 0.15 x 0.15 | 3 | / | / | / | 28 |

Чврстоћа при притиску испитивана је на узорцима облика коцке са димензијама 15 x 15 x 15 cm. Испитивања су вршена на 3 узорка са понављањима након 1, 7 и 28 дана. На оваква три узорка, након прописане неге бетона од 28 дана, испитана је водонепропустљивост (VDP), након чега се приступило лому узорка.

На узорцима облика цилиндра висине 15 cm и пречника 15 cm, пре испитивања чврстоће при затезању савијањем, а након неге од 3 дана, испитана је чврстоћа

при чупању “Pull-off” методом и отпорност на дејство мрза. Такође, на преостала три узорка, након неге бетона од 7 и 28 дана, испитани су “Pull-off”, резонантна фреквенција и брзина ултразвука.

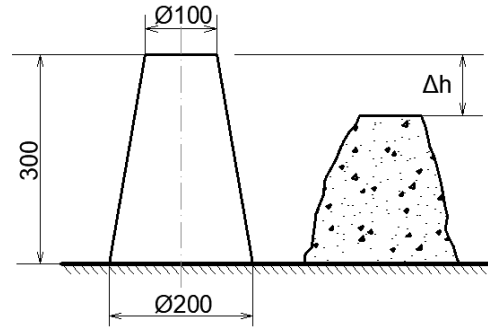
3.7. Испитивање својстава свежег бетона са различитим садржајем агрегата од бакарне шљаке

На припремљеним свежим бетонским мешавинама мерене су конзистенција, количина увученог ваздуха и запреминска маса. Просечна температура свежих бетонских мешавина након справљања у мешалици износила је 25 °C. Након испитивања својстава свежих бетонских мешавина, приступило се уграђивању бетона у калупе. Уграђивање је вршено вибрирањем на вибро-столу у трајању од 30 секунди. Након компактирања, узорци су чувани у калупима 24 h, а затим вађени и неговани у складу са одговарајућим режимом неге. На сваком узорку означена је врста бетонске мешавине којој припада и редни број узорка.



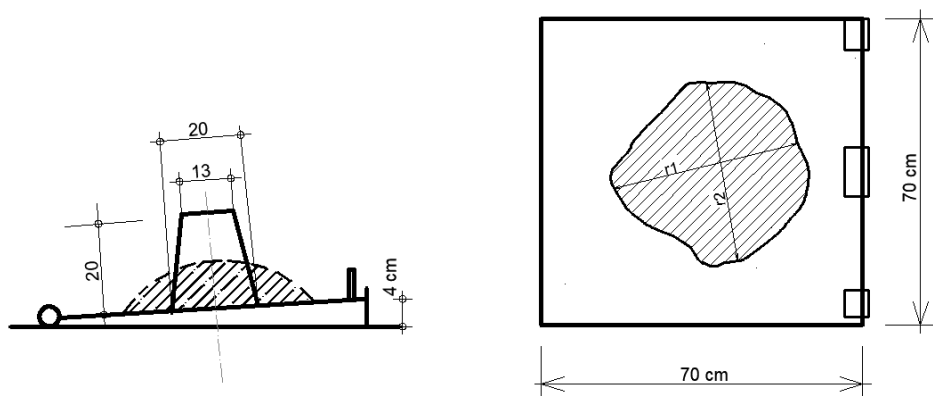
Слика 55. Испитивање конзистенције свеже бетонске мешавине

Конзистенција свежег бетона одређена је методом слегања у складу са стандардом EN 12350-2 [119]. Метода слегања (слика 56), дефинише конзистенцију на бази мерења покретљивости свежег бетона. Користи се Абрамсов конус који се пуни бетонском мешавином у три слоја приближно једнаке висине, при чему се сваки слој набија стандардном металном шипком са по 25 удараца. Напуњени конус се пажљиво подиже и поставља непосредно поред бетонске масе. Због силе земљине теже бетон ће се деформисати тако да ће моћи да се измери слегање Δh . Оцена конзистенције даје се на основу измерене вредности слегања. Како би се резултати испитивања могли упоређивати, слегање је мерено у једнаким временским интервалима, након 5 и 15 минута.



Слика 56. Метода слегања (*Slump Method*) [120]

Метода распрострањања (*Flow test*) – користи се за дефинисање конзистенције код пластичних и течних бетонских мешавина. Испитује се применом потресне табле/сточића, састављене од 2 плоче. Те плоче су на једној страни спојене, а на другој страни се на горњој плочи налази ручка за подизање, а с доње су граничници како би се плоче могле развајати само 4 cm. На сточић се постави нешто мањи конус него код методе за слегање и у њега се убацује смеша бетона у два слоја, сваки слој се збије помоћу дрвене летвице пресека 4 x 4 cm. Након 30 s од убацивања бетона, конус се подиже и почиње испитивање: 15 пута се подиже плоча до висине од 4cm и спушта по принципу слободног пада. Мера конзистенције се утврђује мерењем полупречника распрострарте масе, при чему се израчунава средња вредност. Три пута се изведе испитивање, па се усвоји средња вредност. Овим поступком се може извршити и оцена сегрегације свежег бетона.



Слика 57. Метода распрострањања (*Flow Method*) [121]

На слици 58 приказан је поступак одређивања конзистенције готове бетонске мешавине методом слегања, слика 58а и методом разастирања, слика 58б.



(a)

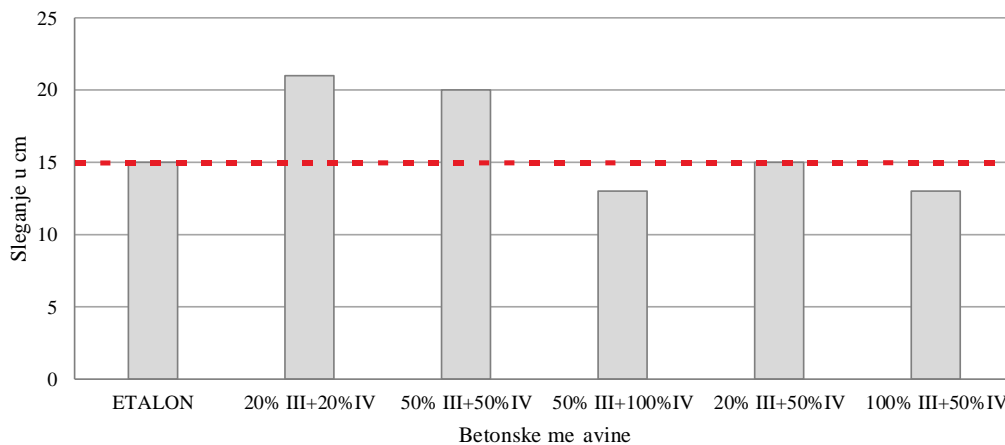


(b)

Слика 58. Мерење конзистенције (а) методом слегања и (б)распростирања

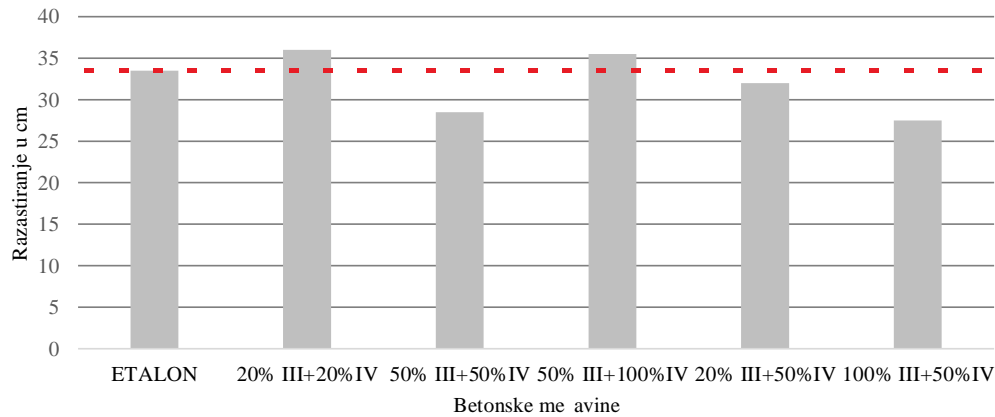
Графички прикази измерених вредности слегања и распростирања бетонских мешавина у свежем стању дати су на сликама 59 и 60. Измерене вредности конзистенције за сваку бетонску мешавину приказане су у Прилогу Б, табела Б.1.

Средње вредности конзистенције на бази методе слегања, добијене на бетонским мешавинама, приказане су графичким путем на слици 59.



Слика 59. Конзистенција свежих бетонских мешавина методом слегања

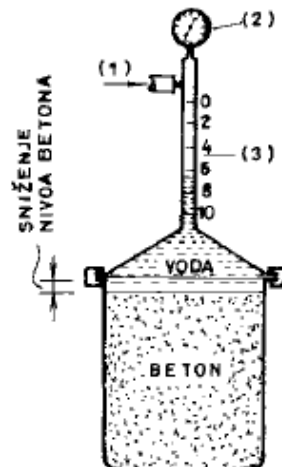
Са слике 59 се може запазити да је конзистенција за бетонске мешавине 20% III + 20% IV и 50% III + 50% IV нешто течнија у односу на контролни бетон.



Слика 60. Конзистенција свежих бетонских мешавина методом распрострања

Са слике 60 се може запазити да је распрострањање бетонских мешавина у свежем стању слично распрострањању контролне мешавине. Вредности измерене овом методом указују на крућу конзистенцију код мешавина 50%III+50%IV и 100%III+50%IV у односу на контролну мешавину. Код мешавине 20% III + 50% IV вредност распрострања у свежем стању је слична контролној мешавини, док је код мешавина 20% III + 20% IV и 50% III + 100% IV ова вредност нешто већа, 36.0 cm и 35.5 cm, респективно.

Садржај увученог ваздуха у свежем бетону одређен је према одредбама стандарда SRPS EN 12350-7 [122], 10 до 15 минута након завршеног мешања бетона.



Слика 61. Апаратура за мерење увученог ваздуха [42,122]

За мерење увученог ваздуха коришћен је мерач увученог ваздуха (порозиметар) који ради на принципу смањења запремине узорка свежег бетона изложеног притиску. Притисак се остварује помоћу ваздушне пумпе, а мери манометром, слика б1. Због тога што притисак ваздуха постаје већи од атмосферског, бетонска маса се збија и смањује се запремина ваздуха у бетону што се изражава у виду смањења нивоа воде. Количина ваздуха је показатељ квалитета гранулометријске линије употребљеног агрегата. Измерене вредности увученог ваздуха у готовим бетонским мешавинама приказане су у табели 25.

Табела 26. Садржај увученог ваздуха

| Мешавина | Увучени ваздух [%] |
|-----------------|--------------------|
| ЕТАЛОН | 1.9 |
| 20% III+20% IV | 1.7 |
| 50% III+50% IV | 1.6 |
| 50% III+100% IV | 1.4 |
| 20% III+50% IV | 1.8 |
| 100% III+50% IV | 1.7 |

Запреминска маса бетонских мешавина у свежем стању одређена је према стандарду SRPS EN 12350-6 [122] за сваку врсту бетона. Одређује се применом калуца облика коцке са димензијама 15 x 15 x 15 cm који се користи и за израду узорака за испитивање механичко–физичких карактеристика очврслог бетона.

Запреминска маса свежег уграђеног бетона срачунава се применом израза:

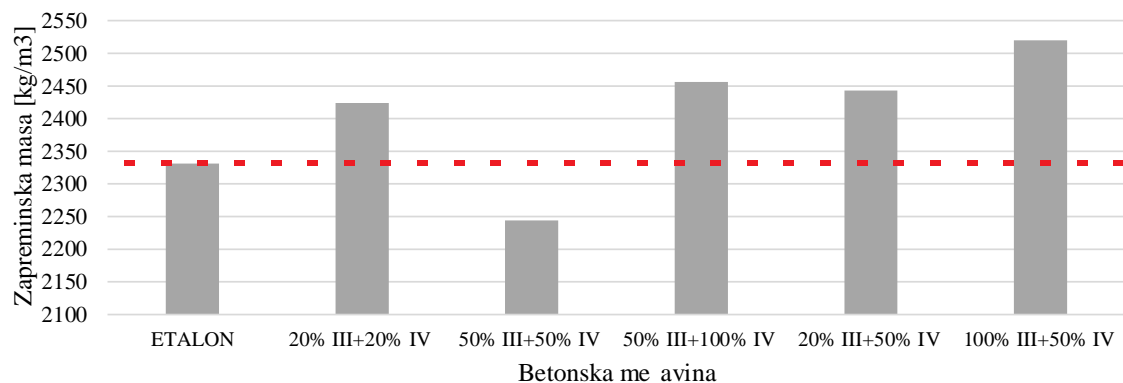
$$\gamma_{b,sv} = \frac{m_{b,sv}}{V_{b,sv}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (14)$$

где је:

$m_{b,sv}$ – маса свежег бетона у калуцу;

$V_{b,sv}$ – запремина калуца.

Средње измерене вредности запреминских маса за сваку бетонску мешавину у свежем стању дате су у Прилогу Б, табела Б.1.



Слика 62. Запреminsка маса свежег бетона

На основу измерених вредности, може се закључити да са повећањем садржаја CSA конзистенција бетона постаје крућа. Супротно томе, мешавине са већим садржајем CSA имале су вишу вредност запреминске масе и мањи садржај увученог ваздуха у односу на контролну мешавину.

Запреminsка маса свежег бетона испитује се сваки пут при мерењу конзистенције, испитивању садржаја увученог ваздуха или узимању узорка за испитивање чврстоће бетона. Испитује се уграђивањем и збијањем у посуди познате запремине. Резултат се пореди са прорачунском запреминском масом свежег бетона. Бетони са већом количином агрегата имају у принципу и већу запреминску масу. Мерењем запреминске масе бетона, посредно се може проценити и садржај увученог ваздуха у бетону. Највећи утицај на промене у запреминској маси бетона има промена у количини увученог ваздуха.

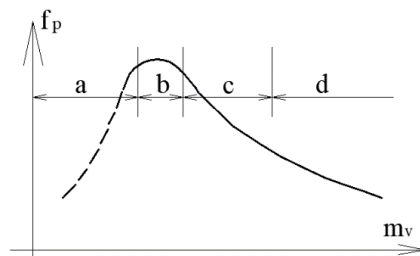
4. СОПСТВЕНА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

4.1. Увод

Након припреме одговарајућих узорака приступило се експерименталним испитивањима бетона са различитим садржајем CSA. Највећи део испитивања, спроведен је у Лабораторији за материјале на Грађевинском факултету у Београду. Та испитивања су обухватила одређивање: чврстоће при притиску, чврстоће при затезању савијањем, чврстоће при затезању цепањем, отпорности на дејство мрза, деформација скупљања, водонепропустљивости, отпорности на дејство хлорида, карбонатизације, Pull-off, резонантне фреквенције, брзине ултразвука и SEM анализе бетона.

4.2. Чврстоћа при притиску

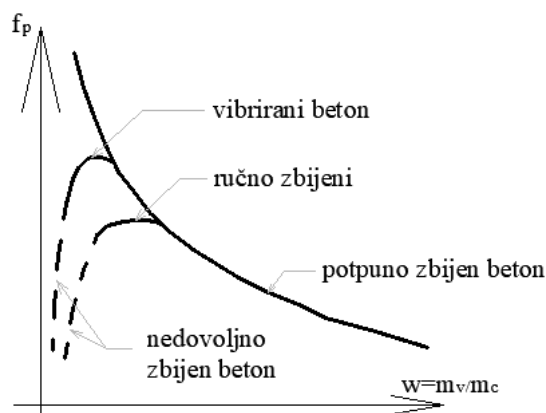
Чврстоћа при притиску представља просечан напон у узорку изложеном аксијалном притиску при сили лома, за случај одређене старости бетона [40]. Чврстоћа при притиску представља једно од најчешће испитиваних својстава очврслог бетона, с обзиром да се ради о најважнијем параметру за примену бетона у конструкцији.



Слика 63. Чврстоћа бетона у функцији количине воде

Зависност између чврстоће бетона и количине воде можемо приказати помоћу дијаграма (слика 63). Крива овог облика највише одговара чврстоћи при притиску f_p . Део криве за подручје *a* представља бетон справљен са недовољном количином воде. Додавањем воде, тј. повећањем *v/c* фактора, чврстоћа се повећава и при оптималној количини додате воде достиже своју максималну вредност, подручје *b*. Даљим додавањем воде, добијамо све више течнији бетон, лакше се уграђује али чврстоћа му опада јер се јавља и повећана порозност, подручје *c*. У подручју *d*, конзистенција бетона је исувише течна, па често долази и до сегрегације.

Чврстоћа бетона зависи у првом реду од v/c фактора и степена збијености или компактности. Потпуно збијен бетон је такав бетон у коме је након уграђивања заостало свега 1-3% ваздушних (заосталих) шупљина. Крива која показује функционалну повезаност чврстоће при притиску f_p реалних бетона и v/c фактора, приказана је на слици 64 пуном линијом.



Слика 64. Зависност m_w/m_c-f_p

Чврстоћа при притиску одређена је на по три узорка облика коцке са димензијама 15 x 15 x 15 cm, за сваку бетонску мешавину према стандарду SRPS EN 12390-3 [123]. Узорци су испитани након неге бетона од 1, 7 и 28 дана. Испитивање чврстоће при притиску вршено је поступним оптерећењем до лома бетонских узорака, у хидрауличкој преси произвођача Amsler опсега 2500 kN, слика 65. Брзина наношења оптерећења износила је 0.6 ± 0.4 MPa/s.

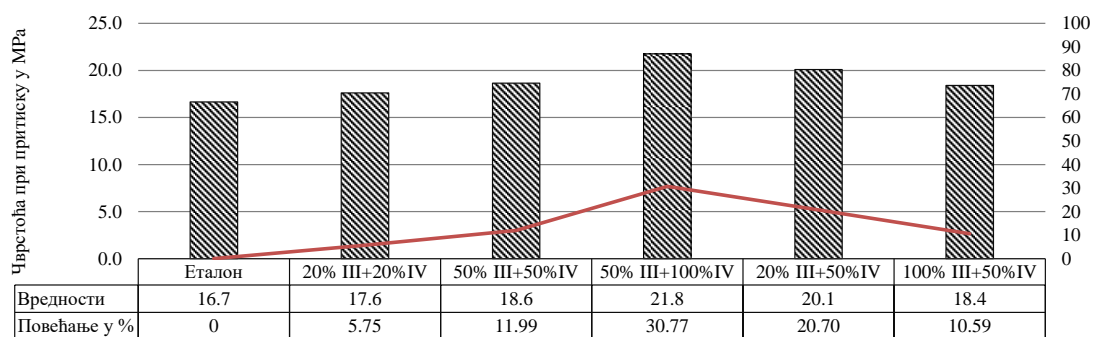


Слика 65. Одређивање чврстоће при притиску

Непосредно пре испитивања силе лома, измерене су димензије и маса узорка у циљу одређивања запреминске масе бетона у очврслном стању, у складу са стандардом SRPS EN 12390-7 [124].

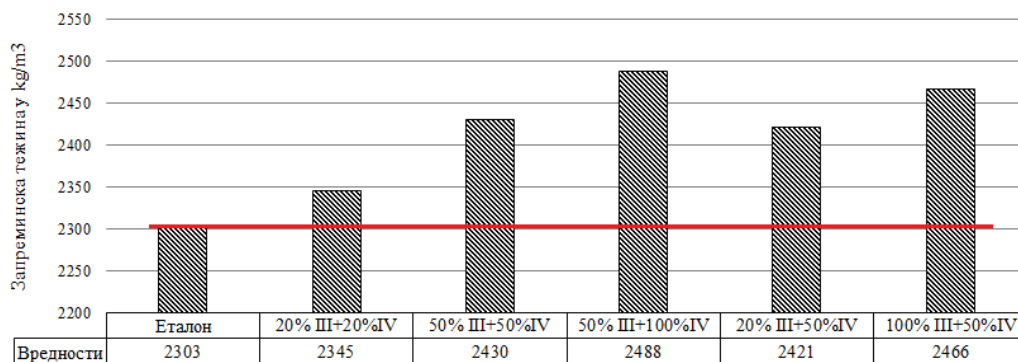
Добијени резултати испитивања чврстоће при притиску и запреминске масе очврслих бетонских мешавина за сваки испитани узорак приказани су у Прилогу Ц, табела Ц.2. Резултати испитивања чврстоће при притиску су показали да у поређењу са контролном мешавином, мешавине са агрегатом CSA имају веће чврстоће при притиску, при свим старостима бетона.

На дијаграму (слика бб), графички су приказане просечне вредности чврстоће при притиску, добијене на по три узорка, након неге бетона од 1 дана.



Слика бб. Чврстоће при притиску на бетонима старости 1 дан

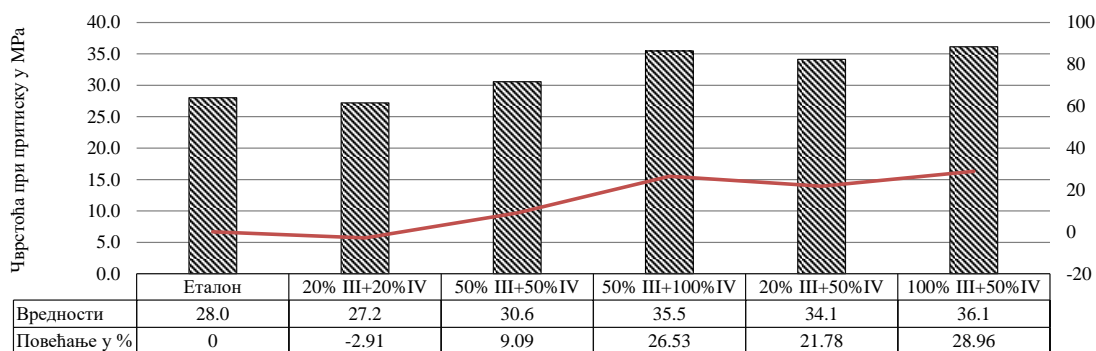
На слици б7 дати су резултати испитивања запреминске масе бетона у очврслном стању након неге бетона од 1 дана.



Слика б7. Запреминска маса код бетона старости 1 дан

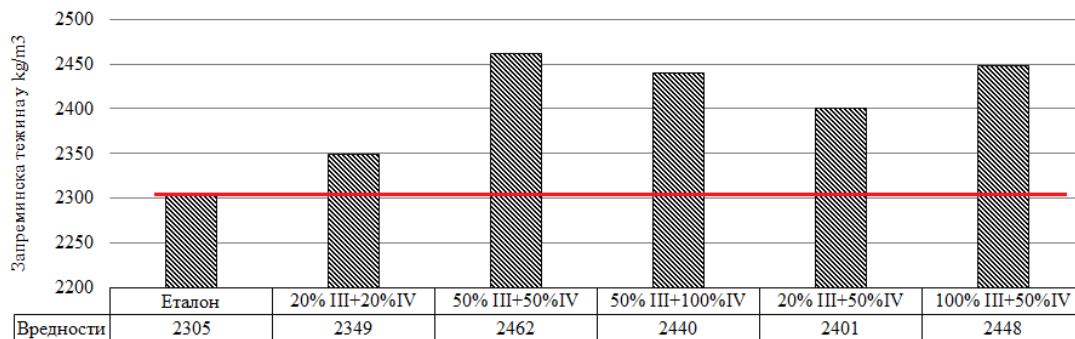
При старости бетона од 1 дан, мешавине 20% III + 20% IV и 50% III + 50% IV остварују пораст чврстоће од 5.75%, односно око 12% у односу на контролну мешавину, мешавине 50% III + 100% IV, 20% III + 50% IV и 100% III + 50% IV остварују пораст чврстоће од 30.77%, 20.70%, односно 10.59%, респективно. Исти тренд је примећен и у случају запреминске масе бетона у очврслем стању, које су веће у односу на еталон за 1.85%, 5.53%, 8.05%, 5.15% и 7.10%, респективно.

На слици 68 приказане су вредности испитивања чврстоће при притиску бетонских мешавина након неге од 7 дана.



Слика 68. Чврстоће при притиску на бетонима старости 7 дана

На слици 69 дати су резултати испитивања запреминске масе бетона у очврслем стању након неге бетона од 7 дана. Приказани резултати су средње вредности, добијене на бази испитивања по три узорка од сваке мешавине.

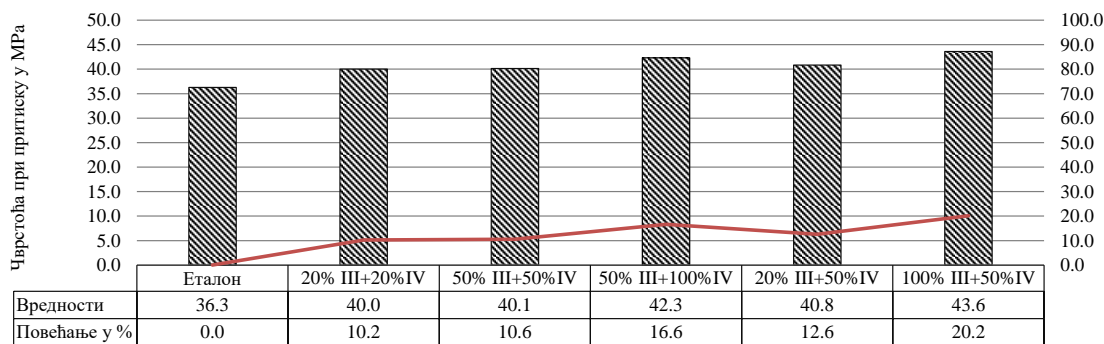


Слика 69. Запреминска маса код бетона старости 7 дана

При старости бетона од 7 дана, мешавина 20% III + 20% IV остварује пад чврстоће од 2.90%, док мешавине 50% III + 50% IV, 50% III + 100% IV, 20% III + 50% IV и

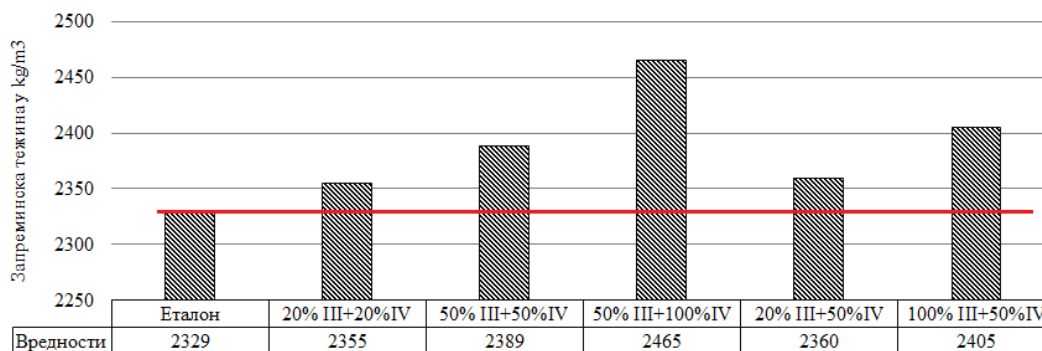
100% III + 50% IV остварују пораст чврстоће од 9.10%. 26.53%. 21.78% и 28.96%. респективно. Исти тренд је примећен и у случају запреминске масе бетона у очврслном стању, које су веће за 1.92%, 6.84%, 5.90%, 4.18% и 6.23%, респективно.

На слици 70 су дати резултати испитивања чврстоће при притиску након неге бетона од 28 дана. Приказане су просечне вредности добијене испитивањем по три узорка од сваке мешавине.



Слика 70. Чврстоће при притиску на бетонима старости 28 дана

На слици 71 дати су резултати испитивања запреминске масе бетона у очврслном стању након неге бетона од 28 дана.



Слика 71. Запреминска маса бетона старости 28 дана

При старости бетона од 28 дана, мешавине 20% III + 20% IV, 50% III + 50% IV, 50% III + 100% IV, 20% III + 50% IV и 100% III + 50% IV остварују пораст чврстоће у односу на еталон од 12.33%, 10.57%, 16.62%, 12.58%, односно 20.17%, респективно. Примећен је и тренд пораста запреминске масе бетона у очврслном стању, које су веће за 1.08%, 2.55%, 5.83%, 1.30 % и 3.25%, респективно.

4.3. Чврстоћа при затезању савијањем

Чврстоћа бетона при затезању савијањем одређена је према стандарду EN 12390-5 [125] на узорцима облика призме димензија $12 \times 12 \times 36$ cm, при старостима од 3 и 28 дана, као средња вредност добијена на по три узорка од сваке врсте бетона. Сила затезања је одређена помоћу хидрауличне пресе и нанета је на призму преко цилиндричног подметача, док је призма приликом испитивања такође постављена на два цилиндрична подметача (испитивање једном силом у средини распона).

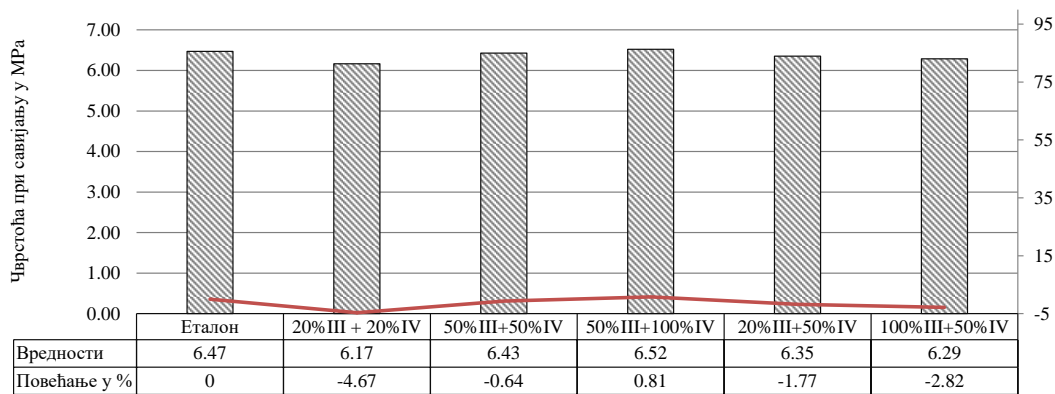
На слици 72 је приказан поступак испитивања чврстоће при затезању савијањем.



Слика 72. Испитивање чврстоће при затезању савијањем

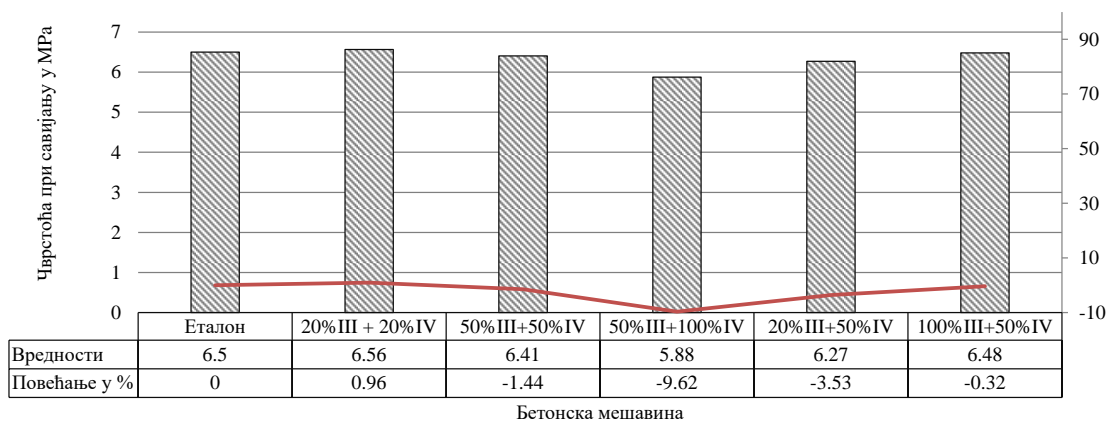
На слици 73 дати су резултати испитивања чврстоће при затезању савијањем након неге бетона од 3 дана. Приказани резултати су аритметичке средине добијене испитивањем по три узорка од сваке мешавине.

При старости бетона од 3 дана, мешавине 20% III + 20% IV, 50% III + 50% IV, 20% III + 50% IV и 100% III + 50% IV остварују пад чврстоће од 4.67%, 0.64%, 1.77%, односно 2.81%, респективно, док мешавина 50% III + 100% IV остварује пораст чврстоће од 0.81%.



Слика 73. Чврстоћа при савијању након неге од 3 дана

На слици 74 су дати резултати испитивања чврстоће при затезању савијањем након неге бетона од 28 дана. Приказани су резултати средњих вредности испитивања на по три узорка од сваке мешавине.



Слика 74. Чврстоћа при савијању након неге од 28 дана

Резултати испитивања чврстоће при затезању савијањем су показали да у поређењу са контролном мешавином, мешавине са агрегатом од бакарне шљаке (CSA) имају приближно једнаке или нешто мање чврстоће при затезању савијањем. Тако на пример, при старости од 28 дана, мешавина 20% III + 20% IV остварује пораст чврстоће од 0.96%, док мешавине 50% III + 50% IV, 50% III + 100% IV, 20% III + 50% IV и 100% III + 50% IV остварују пад чврстоће од 1.44%, 9.62%, 3.53%, односно 0.32%, респективно, у односу на контролну мешавину.

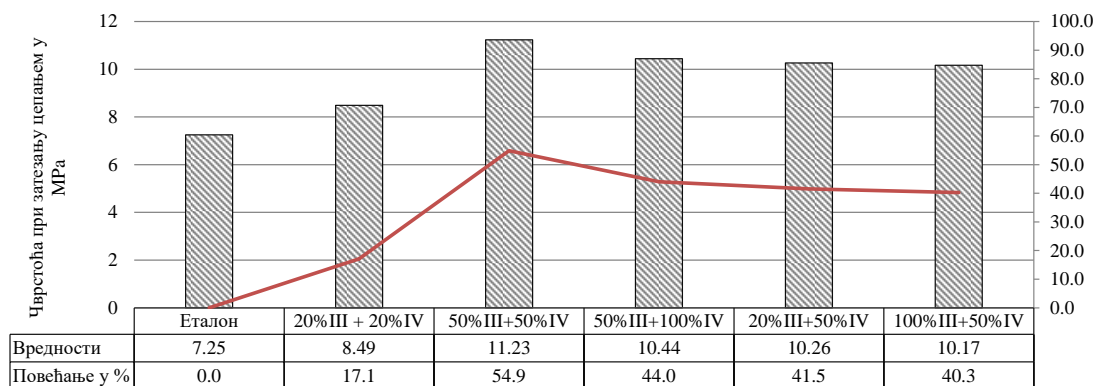
4.4. Чврстоћа при затезању цепањем

Чврстоћа бетона при затезању цепањем одређена је према стандарду EN 12390-6 [126] на узорцима облика цилиндара пречника 15 cm и дужине 15 cm, при старости бетона од 28 дана, као средња вредност чврстоћа добијених на три узорка, за сваку врсту бетона. Сила затезања цепањем је одређена помоћу хидрауличне пресе.

Испитивање чврстоће при затезању цепањем приказано је на слици 75, док су вредности мерења по мешавинама дате на дијаграму (видети слику 76).



Слика 75. Испитивање чврстоће при затезању цепањем



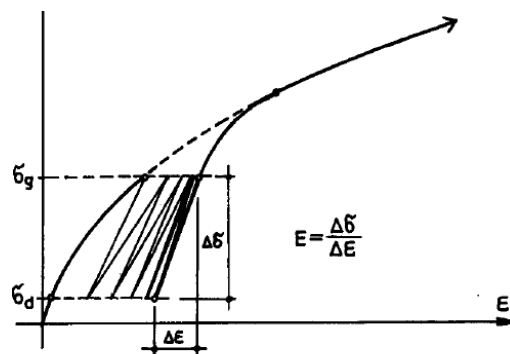
Слика 76. Чврстоћа при затезању цепањем након неге од 28 дана

При старости од 28 дана, мешавине бетона 20% III + 20% IV, 50% III + 50% IV, 50% III + 100% IV, 20% III + 50% IV и 100% III + 50% IV остварују пораст чврстоће од 17.1%, 54.9%, 44%, 41.5% и 40.3% у односу на контролну мешавину.

На дијаграму су приказане просечне вредности мерења на сва три испитана узорка за сваку од испитаних бетонских мешавина. Очитане вредности мерења са сваког узорка су приказане у Прилогу Ц, табела Ц.1.

4.5. Модул еластичности

Испитивање модула еластичности се заснива на тзв. тренирању узорака, односно вишекратном оптерећивању и растерећивању, како би се елиминисале све деформације изузев еластичних. Показује се да након неког броја циклуса вишекратног оптерећења и растерећења функција $\sigma(\epsilon)$ приближно одговара правој линији чији нагиб одређује модул еластичности E . То се односи на подручје радних напона, односно напона у опсегу од $(0.3-0.5) \times f_p$. Али, када се испитује модул еластичности увек се креће од одређене вредности напона, па се испитивање може извести по шеми са слике 77.



Слика 77. Општа шема режима испитивања модула еластичности бетона [42]

Оптерећење до напона σ_g , а затим растерећење до напона σ_d , тј. тренирање узорка бетона у подручју $\sigma_d - \sigma_g$, врши се све док се вредност $\sigma-\epsilon$ не понови за два узастопна циклуса. Постоји још сличних шема према којима се може поступити. Када се заврши испитивање, вредност модула еластичности се израчунава према формули: $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$ (у МПа или GPa). Ова врста модула назива се још и статички модул еластичности, из разлога што се за случај деловања кратких оптерећења, а у подручју радних напона, може сматрати да бетон са довољном тачношћу следи Хуков закон. Такође, код бетона је овај модул и функција времена (старости). Он се повећава током старења бетона, поготово у првих 28 дана. Испитивањем је доказано да бетони већих чврстоћа имају и веће вредности модула еластичности. Динамички модул еластичности бетона се може одредити методом без разарања, тј. ултразвучном методом и методом резонантне фреквенције. Метода ултразвука се заснива на мерењу времена проласка лонгитудиналних ултразвучних таласа кроз узорак бетона од сонде одашиљача до сонде пријемника.

Поступак испитивања модула еластичности приказан је на слици 78, али с обзиром да експериментална испитивања нису урађена за све бетонске мешавине, одлучено је да се вредности овог параметра срачунају према следећим прописима: Еврокод 2 (EN 1992-1-1, 2004), Model Code 2010 (FIB, 2013) и АСI 318-11 (АСI 318-11, 2011). На овај начин добијене вредности модула еластичности приказане су у табелама 27, 28 и 29.



Слика 78. Одређивање модула еластичности

Модул еластичности бетона E_{ce} представља однос напона и еластичне, повратне деформације бетона при краткотрајном оптерећењу и растерећењу.

Еврокод 2 користи следећи израз:

$$E_{ce} = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_{ce}} \approx E_{ci} \quad (15)$$

$$E_{ci} = E_{c0} \alpha_E \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

E_{ci} – модул еластичности бетона при старости од 28 дана (МПа);

E_{c0} – 21.5×10^3 МПа;

α_E – коефицијент који зависи од врсте арегата;

f_{cm} – средња вредност чврстоће бетона при притиску у старости од 28 дана (МПа).

$$E_{ci}(t) = \beta_E(t) \cdot E_{ci} \quad (17)$$

$$\beta_E(t) = [\beta_{cc}(t)]^{0.5} \quad (18)$$

$E_{ci}(t)$ – модул еластичности при старости од t дана (МПа);

E_{ci} – модул еластичности при старости од 28 дана (МПа);

$\beta_E(t)$ – коефицијент који зависи од старости бетона t ;

$\beta_{cc}(t)$ – функција која описује развој кроз време.

Добијене вредности модула еластичности за сваку од пројектованих бетонских мешавина према једначинама (17) и (18) су приказане у табели 27.

Табела 27. Срачунате вредности модула еластичности бетонских мешавина према Еврокоду 2

| Мешавине | E_{ci} [GPa] | | |
|-------------------|----------------|--------------|---------|
| | 7 дана | 28 дана | 90 дана |
| Еталон | 35.14 | 39.63 | 40.70 |
| 20% III + 20% IV | 34.83 | 40.94 | 42.04 |
| 50% III + 50% IV | 36.09 | 40.97 | 42.07 |
| 50% III + 100% IV | 37.73 | 41.71 | 42.83 |
| 20% III + 50% IV | 37.28 | 41.21 | 42.31 |
| 100% III + 50% IV | 37.92 | 42.13 | 43.26 |

С друге стране, Model Code 2010 користи следећи израз:

$$E_{ci}(t) = E_{ci} \cdot \beta_{cc}^{0.5} \quad (19)$$

Добијене вредности модула еластичности за сваку од пројектованих бетонских мешавина према једначини (19) приказане су у табели 28.

Табела 28. Срачунате вредности модула еластичности бетонских мешавина према Model Code 2010

| Мешавине | E_{ci} [GPa] | | |
|-------------------|----------------|--------------|---------|
| | 7 дана | 28 дана | 90 дана |
| Еталон | 35.86 | 39.63 | 41.43 |
| 20% III + 20% IV | 37.04 | 40.94 | 42.79 |
| 50% III + 50% IV | 37.07 | 40.97 | 42.82 |
| 50% III + 100% IV | 37.74 | 41.71 | 43.59 |
| 20% III + 50% IV | 37.28 | 41.21 | 43.07 |
| 100% III + 50% IV | 38.12 | 42.13 | 44.03 |

Амерички стандард АСИ 318-11 даје следећу функцију за модул еластичности:

$$E_{ci}(t) = E_{ci} \cdot \sqrt{\frac{t}{4 + 0.85 \cdot t}} \quad (20)$$

Добијене вредности модула еластичности за сваку од пројектованих бетонских мешавина према једначини (20) су приказане у табели 29.

Табела 29. Срачунате вредности модула еластичности бетонских мешавина према АСI 318-11

| Мешавине | E _{ci} [GPa] | | |
|-------------------|-----------------------|--------------|---------|
| | 7 дана | 28 дана | 90 дана |
| Еталон | 33.24 | 39.63 | 41.91 |
| 20% III + 20% IV | 34.34 | 40.94 | 43.28 |
| 50% III + 50% IV | 34.36 | 40.97 | 43.32 |
| 50% III + 100% IV | 34.98 | 41.71 | 44.10 |
| 20% III + 50% IV | 34.56 | 41.21 | 43.57 |
| 100% III + 50% IV | 35.34 | 42.13 | 44.54 |

Приказане вредности модула еластичности бетона E_{ci} старости 28 дана срачунате су на основу испитаних вредности чврстоћа при притиску (Прилог А, табела А.1), а на основу њих одређене су вредности модула еластичности бетона старости 7 и 90 дана - према једначинама за прорачун $E_{ci}(t)$.

Може се видети да су све срачунате вредности модула код бетонских мешавина са агрегатом од бакарне шљаке као замене за крупне фракције природног агрегата веће у односу на еталон. Стандард АСI 318-11 даје нешто ниже вредности модула еластичности за све пројектоване мешавине при старости од 7 дана, док су вредности нешто више код бетона старости од 90 дана, у односу на бетоне исте старости према Еврокоду 2 и Model Code 2010. С друге стране, вредности срачунате према Еврокоду 2 и Model Code 2010 су доста сличне при различитим старостима бетонских мешавина и разликују се до највише 6% за бетонску мешавину 20% III + 20% IV.

Може се закључити да са порастом процента садржаја CSA у бетонима, донекле расту и вредности модула еластичности, као последица пораста вредности чврстоће при притиску бетонских мешавина са додатком CSA као замене за крупне фракције природног агрегата (видети Прилог А, табела А.1).

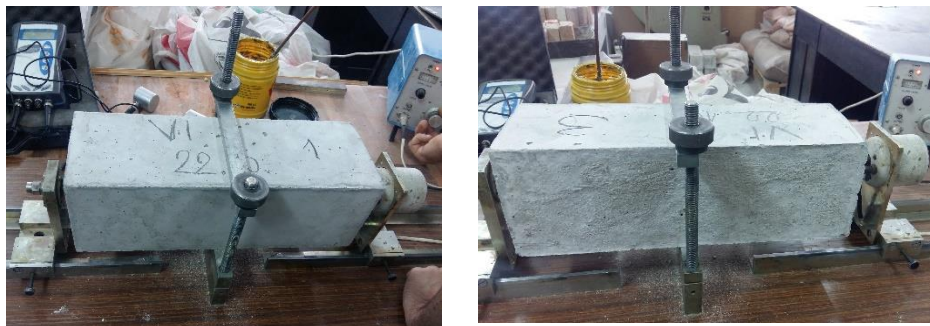
4.6. Резонантна фреквенција и брзина ултразвука

Метода ултразвука, заснована на одредбама стандарда SRPS U.M1.042, примењена је на узорцима облика призме димензија 12 x 12 x 36 cm, при старостима од 7 и 28 дана. На по три узорка је најпре извршено мерење брзине простирања ултразвука, а затим је на истим узорцима испитана чврстоћа при притиску према стандардном поступку. Примењени уређај за испитивање састоји се од мерног инструмента, две сонде од којих је једна предајник, а друга пријемник ултразвучних импулса, каблова који спајају мерни инструмент са сондама и калибратора за проверу нуле инструмента. На слици 79 дат је приказ узорка са постављеним уређајем за испитивање.

Поступак испитивања састоји се у читавању времена t проласка ултразвучног таласа од предајника до пријемника и прецизног мерења растојања s између предајника и пријемника. Брзина ултразвука је срачуната из израза:

$$v = \frac{s}{t} \text{ (m/s)} \quad (21)$$

Вредности мерења при старости од 7 и 28 дана су приказане у табелама 30 и 31.



Слика 79. Мерење брзине ултразвука

Табела 30. Вредности брзине ултразвука након неге бетона од 7 дана

| Мешавина | Старост 7 дана | | | | | |
|----------------|----------------|---------------------------|-----------|-----------|--|---------------------------------|
| | m (kg) | g (kg/m ³) | f (Hz) | t (ms) | Динамички модул E _d (GPa) | Брзина ултразвука v (m/s) |
| ЕТАЛОН | 11.478 | 2214 | 5255 | 82.2 | 31.7 | 4380 |
| | 11.985 | 2312 | 5202 | 84.5 | 32.4 | 4260 |
| | 12.045 | 2323 | 5130 | 86.4 | 31.7 | 4167 |
| 20% III+20%IV | 13.055 | 2518 | 5378 | 82.1 | 37.8 | 4385 |
| | 12.950 | 2498 | 5275 | 82.9 | 36.0 | 4343 |
| | 12.875 | 2484 | 5285 | 81.6 | 36.0 | 4412 |
| 50% III+50%IV | 11.545 | 2227 | 5370 | 81.7 | 33.3 | 4406 |
| | 12.075 | 2329 | 5284 | 82.8 | 33.7 | 4348 |
| | 12.135 | 2341 | 5273 | 81.3 | 33.7 | 4428 |
| 50% III+100%IV | 12.128 | 2340 | 5391 | 82.4 | 35.2 | 4369 |
| | 13.050 | 2517 | 5425 | 80.2 | 38.4 | 4489 |
| | 13.063 | 2520 | 5400 | 79.8 | 38.1 | 4511 |
| 20% III+50%IV | 11.252 | 2170 | 5354 | 82.6 | 32.3 | 4358 |
| | 11.493 | 2217 | 5297 | 82.1 | 32.2 | 4385 |
| | 12.34 | 2380 | 5300 | 83.2 | 34.7 | 4327 |
| 100% III+50%IV | 12.863 | 2481 | 5380 | 80.6 | 37.2 | 4467 |
| | 12.989 | 2505 | 5400 | 82.6 | 37.9 | 4358 |
| | 12.530 | 2417 | 5539 | 80.2 | 38.4 | 4489 |

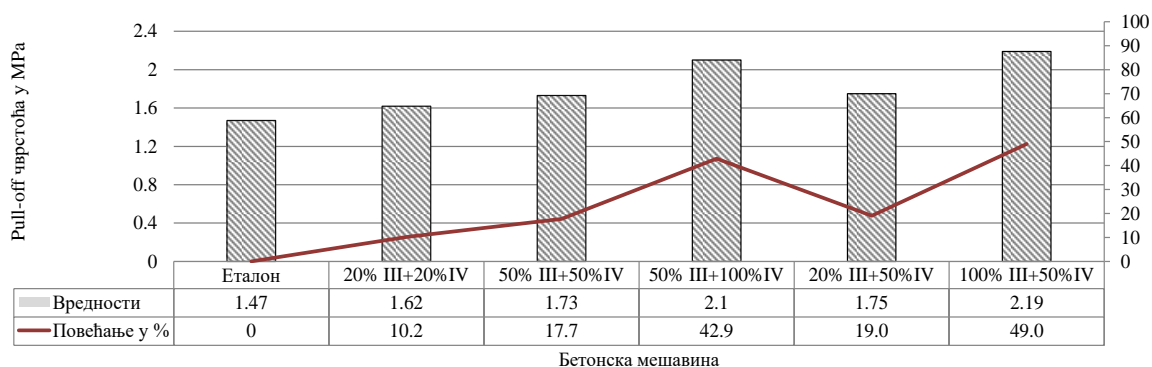
Табела 31. Вредности брзине ултразвука након 28 дана

| Мешавина | Старост 28 дана | | | | | |
|----------------|-----------------|---------------------------|-----------|-----------|--------------------|----------------------|
| | m (kg) | g (kg/m ³) | f (Hz) | t (ms) | Динамички модул | Брзина ултразвука |
| ЕТАЛОН | 12.12 | 2337 | 5371 | 81.5 | 34.95 | 4417 |
| | 11.94 | 2303 | 5377 | 82.8 | 34.52 | 4348 |
| | 11.96 | 2306 | 5265 | 81.4 | 33.14 | 4423 |
| 20% III+20%IV | 11.89 | 2294 | 5507 | 80.6 | 36.06 | 4466 |
| | 11.97 | 2309 | 5413 | 81.8 | 35.07 | 4401 |
| | 12.54 | 2419 | 5486 | 80.2 | 37.74 | 4489 |
| 50% III+50%IV | 12.37 | 2386 | 5499 | 80.1 | 37.40 | 4494 |
| | 12.77 | 2464 | 5455 | 80.3 | 38.01 | 4483 |
| | 12.77 | 2463 | 5406 | 81.7 | 37.31 | 4406 |
| 50% III+100%IV | 12.13 | 2340 | 5523 | 81.7 | 36.99 | 4406 |
| | 13.05 | 2517 | 5544 | 81.1 | 40.11 | 4439 |
| | 13.06 | 2520 | 5584 | 80.3 | 40.73 | 4483 |

| | | | | | | |
|----------------|-------|------|------|------|-------|------|
| | 11.25 | 2171 | 5512 | 82 | 34.19 | 4390 |
| 20% III+50%IV | 11.49 | 2217 | 5445 | 82.3 | 34.07 | 4374 |
| | 12.34 | 2380 | 5458 | 82 | 36.76 | 4390 |
| 100% III+50%IV | 12.45 | 2402 | 5555 | 78.7 | 38.42 | 4574 |
| | 13.08 | 2522 | 5567 | 82.1 | 40.52 | 4385 |
| | 10.95 | 2112 | 5623 | 79.5 | 34.61 | 4528 |

4.7. Pull-off

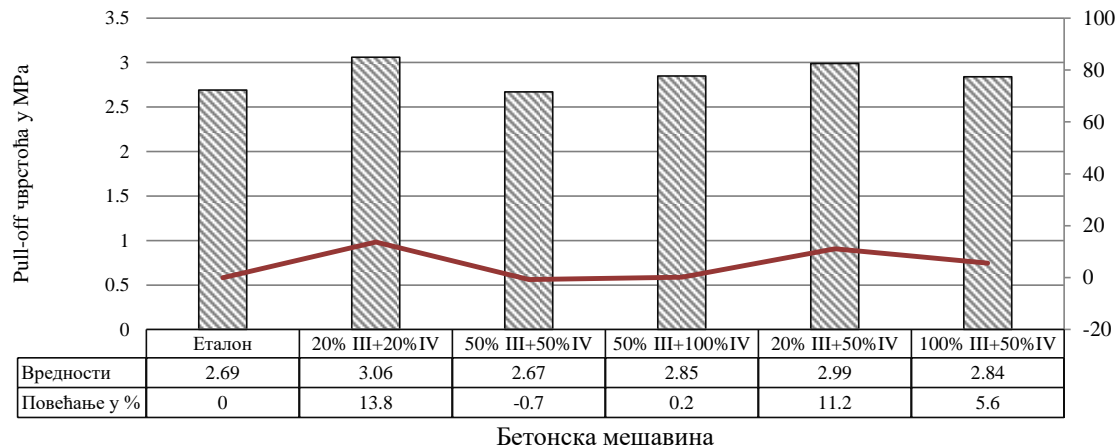
Чврстоћа при затезању “чупањем” је испитивана “Pull-off” методом према стандарду SRPS EN 1542 [127]. Испитивање је вршено на узорцима старости 7 и 28 дана. Вредности измерених сила чупања су дате у Прилогу Ц, табела Ц.5. На слици 80 приказане су просечне вредности резултата испитивања чврстоће “Pull-off” методом након неге бетона од 7 дана.



Слика 80. “Pull off” чврстоћа бетона након неге од 7 дана

При старости бетона од 7 дана, мешавине 20% III + 20% IV, 50% III + 50% IV, 20% III + 50% IV, 100% III + 50% IV и 50% III + 100% IV остварују пораст чврстоће у односу на еталон од 10.2%, 17.7%, 42.9%, 19.0%, односно 49.0%, респективно.

На слици 81 приказане су просечне вредности очитаних мерења при испитивању чврстоће при затезању чупањем након неге бетона од 28 дана.

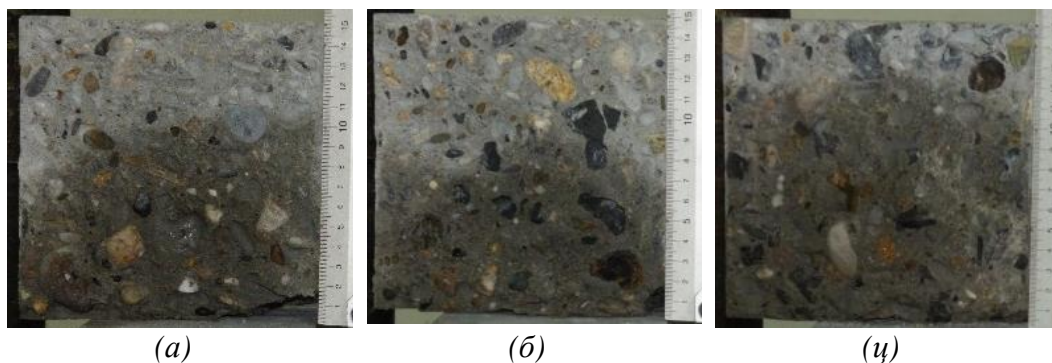


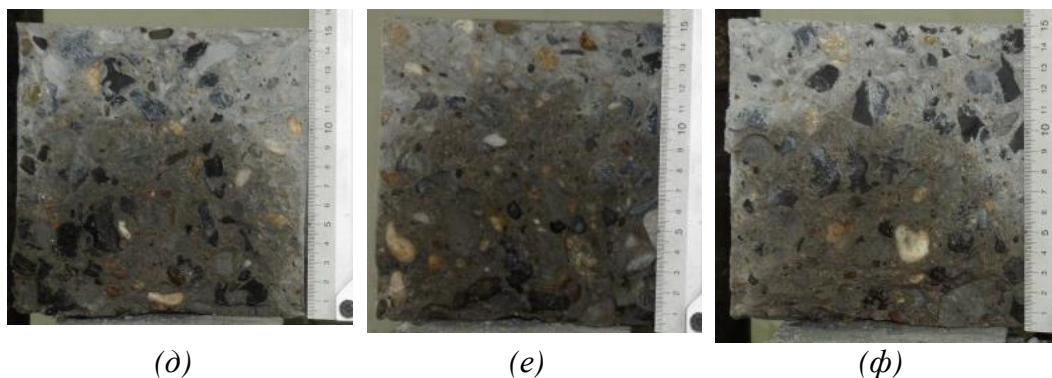
Слика 81. “Pull off“ чврстоћа бетона након неге од 28 дана

При старости бетона од 28 дана, мешавине 20% III + 20% IV, 20% III + 50% IV, 100% III + 50% IV и 50% III + 100% IV оствариле су увећање чврстоће од 13.8%, 0,2%, 11.2% и 5.6%, респективно, осим код мешавине 50% III + 50% IV код које је примећен занемарљив пад чврстоће од 0,7%.

4.8. Водонепропустљивост

Ово испитивање је рађено на по 3 узорка облика коцке димензија 15 x 15 x 15 cm за сваку од испитаних бетонских мешавина према стандарду SRPS EN 12390-8 [128]. Испитивање се врши на узорку старости најмање 28 дана. Узорци се постављају у апаратуру под притиском воде од (500 ± 50) kPa током (72 ± 2) h. По завршетку испитивања, узорци се ваде из апаратуре, а затим се приступа мерењу дубине продора воде. Ово се врши тако што се узорци ломе по изводницама, чиме се на преломној површини јасно уочава дубина квашења, слика 82.





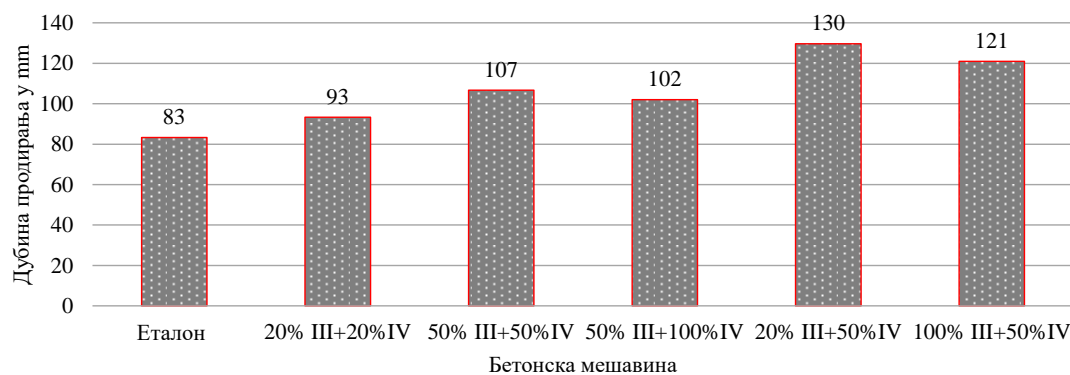
Слика 82. Преломна површина узорка са јасно уочљивом дужином квашења;
 (а) еталон; (б) 20% III + 20% IV; (в) 50% III + 50% IV; (г) 50% III + 100% IV; (д)
 20% III + 50% IV; (е) 100% III + 50% IV

У оквиру предметних испитивања, вршено је испитивање водонепропустљивости на свих 6 бетонских мешавина. Испитивање је рађено на по три узорка од сваке бетонске мешавине. Просечне вредности измерених максималних дубина продора воде су приказане у табели 32.

Табела 32. Просечне вредности максималне дубине продора воде под притиском

| Бетонска мешавина | Дубина продора воде под притиском (mm) |
|-------------------|--|
| Еталон | 83 |
| 20% III + 20% IV | 93 |
| 50% III + 50% IV | 107 |
| 50% III + 100% IV | 102 |
| 20% III + 50% IV | 130 |
| 100% III + 50% IV | 121 |

Добијени резултати мерења дубине продора воде под притиском приказани су и на дијаграму (слика 83).



Слика 83. Дубина продирања воде под притиском

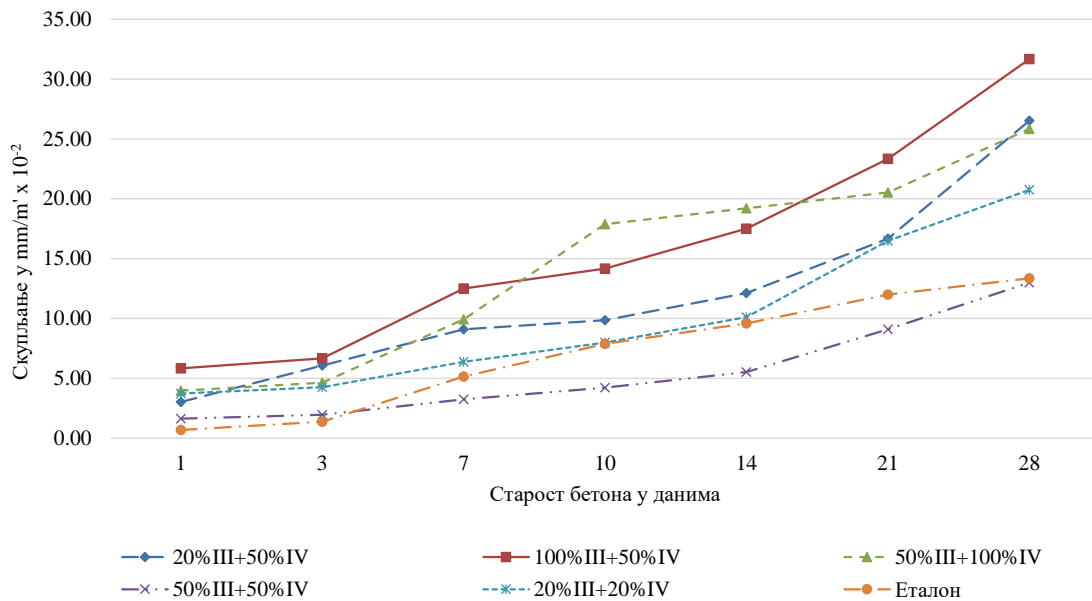
Упоредивањем резултата мерења дубине продора воде под притиском у контролној мешавини и мешавинама 20% III + 20% IV, 50% III + 50% IV, 20% III + 50% IV, 100% III + 50% IV и 50% III + 100% IV са критеријумима за оцену класе водонепропустљивости (SRPS U.M1.206:2013), закључено је да контролни бетон (еталон) и бетонске мешавине са ознакама 20% III + 20% IV, 50% III + 50% IV, 20% III + 50% IV, 100% III + 50% IV и 50% III + 100% IV имају већи продор воде од 50 mm, што практично све мешавине сврстава у групу водопрпусних бетона.

4.9. Скупљање бетона

Запреминске деформације, у првом реду скупљање, веома су важне за бетон, зато што могу произвести напоне затезања унутар бетона, што води развоју прелина и омогућава гасовима, води и штетним једињењима да продру у бетон и изазову даље проблеме у смислу корозије и деградације материјала.

Мерење деформација скупљања бетона вршено је у складу са одредбама стандарда SRPS U.M1.029 на призмама димензија 12 x 12 x 36 cm.

Након вађења из калупа, узорци су чувани у води 48 h, а затим су неговани на ваздуху до краја испитивања. Средња вредност релативне влажности ваздуха износила је 67% ($\pm 1\%$). Скупљање је мерено при старостима 1, 3, 7, 10, 14, 21 и 28 дана. Деформације су мерене на две наспрамне мерне линије на подужним странама узорка у свему према напред наведеном стандарду. Вредности скупљања су одређене као средње вредности резултата добијених на по три узорка од сваке бетонске мешавине.



Слика 84. Деформације скупљања

У Прилогу Е, табеле Е.1 - Е.6, приказане су вредности мерења на по три узорак за сваку испитивану бетонску мешавину.

Развој запреминских деформација скупљања услед сушења у функцији времена код свих испитиваних мешавина приказан је на слици 84.

На основу анализе максималних вредности измерених деформација скупљања уочава се да сви испитивани бетони имају скупљање у релативно уским границама, односно између $0.14 - 0.32 \text{ mm/m}^3$, при старости од 28 дана.

4.10. Отпорност на дејство мраза и соли

Отпорност бетона према дејству мраза и соли узорак засићених водом у присуству 3%-ног раствора NaCl вршено је у складу са стандардом EN 12390-9 [129]. Према овом стандарду постоје три методе за испитивање: slab test, cube test и CD-CIF test.

У овом раду вршено је испитивање плочастих узорак (Slab test). Отпорност на замрзавање и одмрзавање се процењује мерењем масе ољуштеног материјала са плочастих узорак после 56 циклуса смрзавања и одмрзавања.

За испитивање су потребна 3 узорка, сваки исечен из посебне коцке израђене у складу са одредбама стандарда SRPS EN 12390-2 [130] , слика 85.



Слика 85. Плочасти узорак исечен из коцке

Током првог дана после изливања, узорак стоји у калупу заштићен од исушивања са полиетиленском фолијом, на температури од (20 ± 2) °C. После (24 ± 2) h коцке се ваде из калупа и чувају у води на температури од (20 ± 2) °C.

Када су коцке старе 7 дана, ваде се из воде и стављају у клима-комору, где стоје све до почетка цикличног испитивања на замрзавање/одмрзавање. Плочасти узорци дебљине 50 ± 2 mm и старости од 21 дан, секу се из сваке коцке управно на горњу страну коцке, тако што се тестером сече прво по средини коцке, а потом према ивици (50 ± 2) mm. На овај начин се добија плочасти узорак дебљине 50 mm, а толеранција висине је ± 2 mm.

Одмах након сечења, узорак се опере у води и обрише вишак воде влажним сунђером. Измере се све димнзије узорка са тачношћу од $\pm 0,5$ mm, користећи помично мерило. Без одлагања се исечени узорак враћа у клима-комору, осигуравајући при томе да површина која се испитује стоји вертикално, а растојање између узорака треба да је најмање 50 mm.

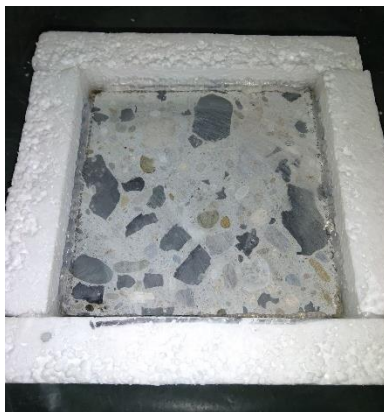
Када је бетон стар 25 ± 1 дан, лепи се гума на све површине узорка осим на површину која се испитује. Потребно је поставити лепак или силиконску гуму око површине која се испитује у везу између бетона и гуме. Преостала површина за испитивање после наношења лепка или силиконске гуме на ивице не сме бити мања од 90 % од оригиналне површине узорка која се испитује. Ивица гуме

надвишује (20 ± 1) mm испитну површину узорка. После фиксирања гуме узорак се враћа у клима-комору.

Када је бетон стар 28 дана сипа се око 3 mm дејонизоване воде температуре (20 ± 2) °C на испитну површину. Ово натапање треба наставити (72 ± 2) h на температури од (20 ± 2) °C, а за то време ниво воде мора бити око 3 mm изнад површине узорка.

Пре самог испитивања се све површине узорка, осим испитне површине, термички изолују (20 ± 1) mm дебелим стиропором, према слици 87. Може се користити и други материјал, али се мора обезбедити еквивалентна термичка изолација узорка.

Испитивање се почиње онда када су узорци стари 31 дан. Најраније 15 min пре него што се узорци ставе у комору за замрзавање, потребно је заменити дејонизовану воду на испитној површини са 67 ml течности за замрзавање, тако да се добије дебљина од 3 mm, на температури од (20 ± 2) °C.

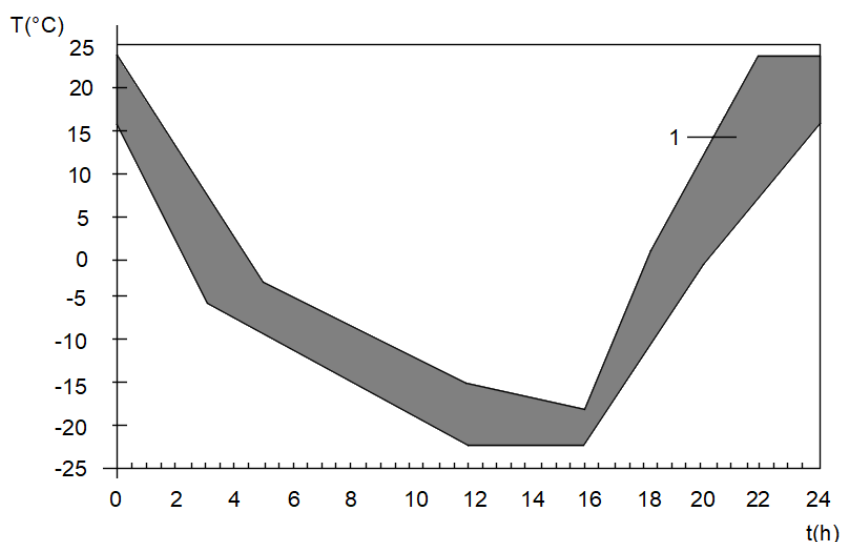


Слика 86. Узорак спреман за испитивање

Испаравање течности за замрзавање се спречава наношењем танке фолије. Полиетиленска фолија треба да остане равна током испитивања, тако да растојање између фолије и површине буде најмање 15 mm.

Током испитивања, температура у комори за замрзавање треба да се креће у границама засенченог подручја приказаног на слици 87. Температура треба да

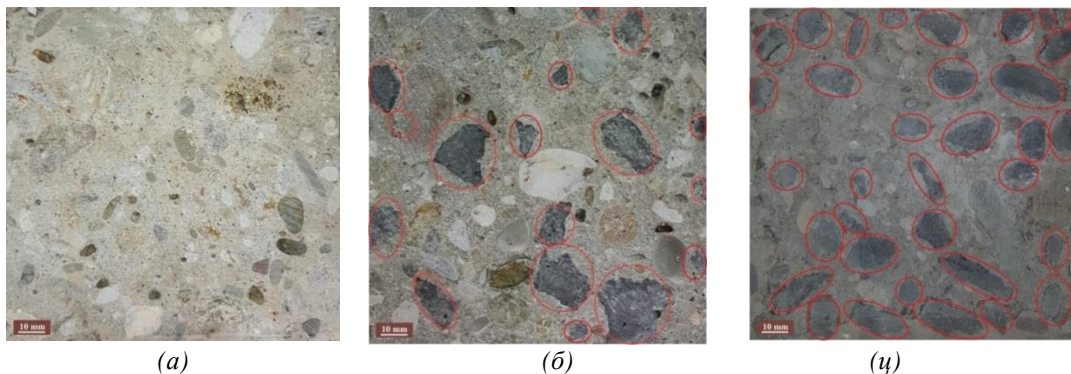
прелази $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ током сваког циклуса у трајању од најмање 7 h, али не дуже од 9 h. Температура ваздуха у комори никада не сме пасти испод $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Напомена: 1-Опсег температуре у центру испитне површине.

Слика 87. Циклус време (t)-температура (T) у комори за замрзавање у току једног циклуса [140]

Испитивање је вршено на по три узорака за три бетонске мешавине: контролна мешавина, мешавина 20% III + 50% IV и мешавина 50% III + 50% IV.



Слика 88. Оштећење бетонске површине након 28 циклуса смрзавања и одмрзавања; (а) контролна бетонска мешавина; (б) бетонска мешавина 20% III + 50% IV; (ц) бетонска мешавина 50% III + 50% IV

Отпорност бетона на дејство мрза и соли подразумева отпорност бетона засићеног водом према одређеном броју циклуса смрзавања и одмрзавања. Оно што доводи до деградације бетона у том стању, јесу унутрашњи напони који се јављају у бетону приликом смрзавања воде у порама или прслинама. Ти унутрашњи напони су последица ширења леда, јер је познато да је запремина леда

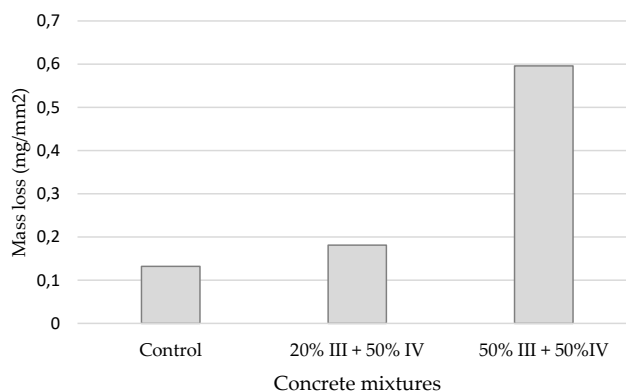
за око 9% већа од запремине воде од које је настао. То важи само за макрокапиларе у бетону (капиларе веће од 10^{-7} m), јер се вода у микрокапиларима не претвара у лед, чак ни на веома ниским температурама. Испитивање се врши у циклусима смрзавања и одмрзавања, при чему се смрзавање одвија на температури -20 °C у трајању од 16 до 18 h, док се одмрзавање врши на собној температури од 20 °C.

Табела 33. Испитивање отпорности бетонских мешавина на дејство мраза и соли

| Мешавина | m (mg/mm ²) |
|------------------|----------------------------|
| Еталон | 0.132 |
| 20% III + 50% IV | 0.181 |
| 50% III + 50% IV | 0.596 |

Напомена: m (mg/mm²) – губитак масе услед дејства циклуса смрзавања – одмрзавања.

После 28 циклуса смрзавања – одмрзавања на узорцима бетона из контролне и бетонске мешавине 20% III + 50% IV измерен је губитак масе од 0.132 mg / mm² и 0.181 mg / mm². Мешавина 50% III + 50% IV имала је значајно већи губитак масе од 0.596 mg / mm², видети слику 89. Визуелни преглед испитиваних бетонских мешавина након 28 циклуса смрзавања и одмрзавања показао је различит степен разградње бетонске површине узорака (слика 87). Бетонска мешавина 50% III + 50% IV показала је не само површинско оштећење финих зрна, већ и испадање крупних зрна агрегата, слика 88ц.



Слика 89. Отпорност на дејство мраза и соли

За добру отпорност бетона на дејство мраза и соли потребно је да је бетон приликом уградње компактан. Потребна компактност бетона се остварује

применом ниских водоцементних фактора. Уколико је потребно, бољу отпорност на мраз можемо постићи и хемијским додацима, тзв. аерантима.

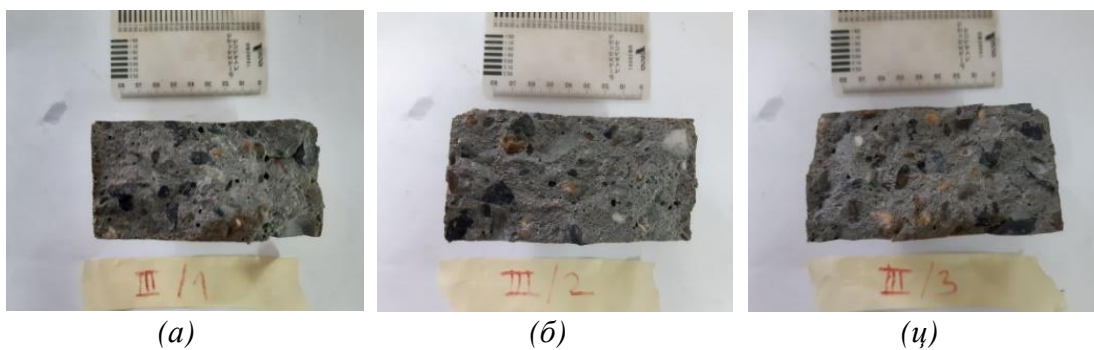
4.11. Отпорност на дејство хлорида

Отпорност на продирање хлоридних јона испитивана је на узорцима бетона припремљеним према стандарду NT Build 492 [131]. На основу добијених вредности за дубину продирања хлорида израчунат је ефективни коефицијент миграције хлорида D_{RCM} [132]. Испитане вредности отпорности на дејство хлорида су приказане на слици 90. У табели 34 су приказане вредности мерења на узорцима контролног бетона, мешавина 20% III + 50% IV и 50% III + 50% IV.

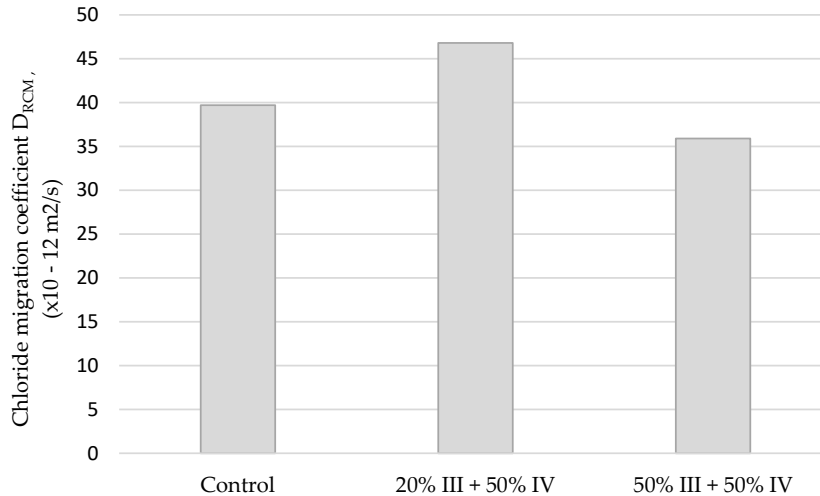
Табела 34. Мерене вредности коефицијента миграције $D_{RCM} \cdot 10^{-12}$

| Мешавине | $D_{RCM} \cdot 10^{-12}$ |
|------------------|--------------------------|
| Еталон | 39.70 |
| 20% III + 50% IV | 46.79 |
| 50% III + 50% IV | 35.90 |

Напомена: $D_{RCM} \cdot 10^{-12}$ - коефицијент миграције.



Слика 90. Испитивање отпорности на дејство хлорида за мешавину 50% III + 50% IV



Слика 91. Отпорност на дејство хлорида

Забележени ефективни коефицијент миграције хлорида D_{RCM} за контролни бетон показао је вредност $39.7 \times 10^{-12} \text{ cm}^2 / \text{m}$, док је за бетонске мешавине са ознаком 20% III + 50% IV и 50% III + 50% IV, D_{RCM} била је $46.8 \times 10^{-12} \text{ cm}^2 / \text{m}$, односно $36.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^2 / \text{m}$.

Није било значајних промена у отпорности на продирање хлоридних јона, квантификованој коефицијентом миграције хлорида (D_{RCM}) за све три испитане бетонске мешавине. Анализа добијених резултата за контролну мешавину и бетон са заменом CSA показала је да је вредност D_{RCM} већа од 16×10^{-12} ; стога би овај бетон могао бити погодан за употребу у чистим срединама без агресивних утицаја [133,134]. Међутим, главни узрок веће миграције хлорида кроз бетон, као и повећане пенетрације воде, била је већа порозност цементне матрице.

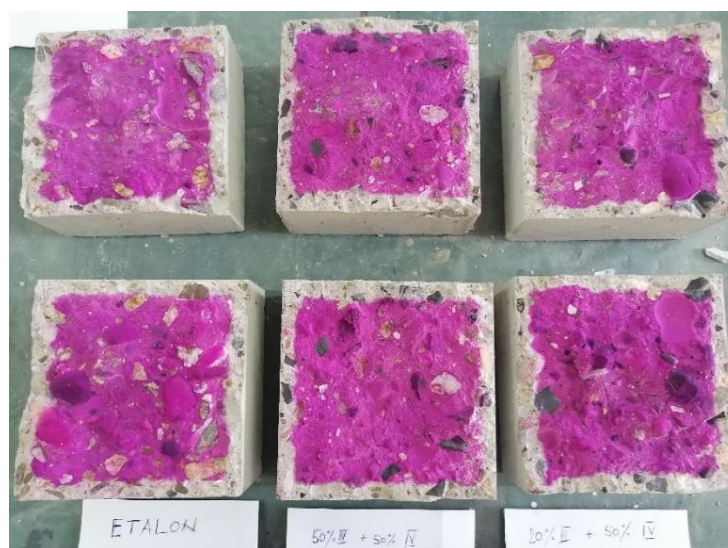
4.12. Карбонатизација

Испитивање карбонатизације вршено је при убрзаним условима, у циљу одређивања дубине карбонатизације. Испитивање је вршено на узорцима облика коцке димензија $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$, након неге од 28 дана у условима повишене влаге. Тестови убрзане карбонатизације спроведени су током наредних 28 дана, при релативној влажности од $65 \pm 5\%$ и температури од $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Узорци су излагани концентрацији $5\% \text{ CO}_2$ у комори Memmert ICH 260C.

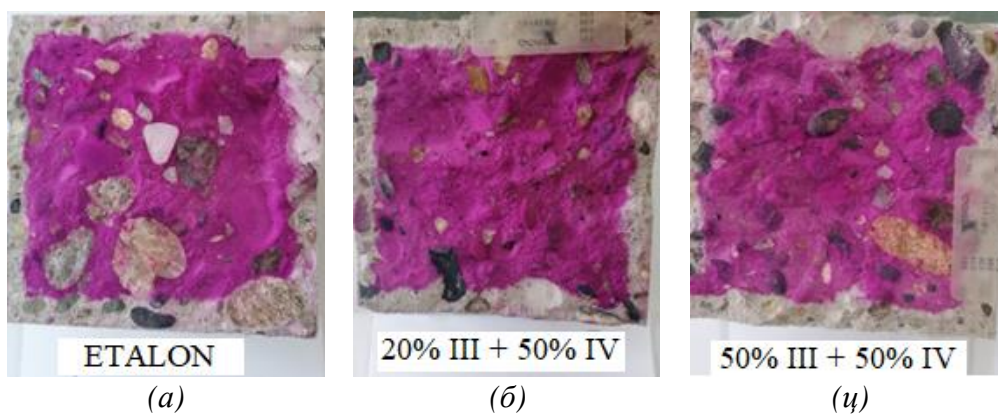
Испитивање карбонатизације вршено је према важећем стандарду SRPS EN 12390-10 [135] који описује тест за одређивање дубине карбонатизованог фронта фенолфталеинским раствором. Карбонатизовани слој у коме се алкалност мери помоћу рН вредности остаће необојен уколико је његова рН вредност испод 9, док бетон са вишим рН вредностима постаје љубичаст као последица реакције између раствора фенолфталеина и слободног $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Раствор је представљао 1% раствор фенолфталеина у 70% раствору алкохола. Након што је раствор попрскан на површину бетона дошло је до реакције, јер је фенолфталеински раствор у суштини хемијски индикатор - лакмус.

Места која су била карбонатизована (рН вредност мања од 9) остала су необојена, док су некарбонатизована места са рН вредношћу већом од 11 попримила љубичасту боју, слика 92.

Дубина карбонатизације, изражена у mm, представља вредност мерену од површине бетона до почетка љубичасте боје (некарбонатизоване зоне) – слика 94. Вршено је 5 мерења по свакој страни узорка, односно укупно 20 мерења по узорку. Мерење је вршено помоћу лењира са тачношћу 0.5 mm.



Слика 92. Изглед узорка изложених карбонатизацији



Слика 93. Карбонатизациони фронт узорка након 28 дана изложености концентрацији од 5% CO₂; (а) контролни бетон; (б) мешавина 20% III + 50% IV; (ц) мешавина 50% III + 50% IV

Линеарна веза између дубине карбонатизације (x_c) и квадратног корена времена изложености за одређене услове средине (CO₂ концентрација, релативна влажност, итд.) је дефинисана помоћу коефицијента брзине карбонатизације (k_c) [136,137]:

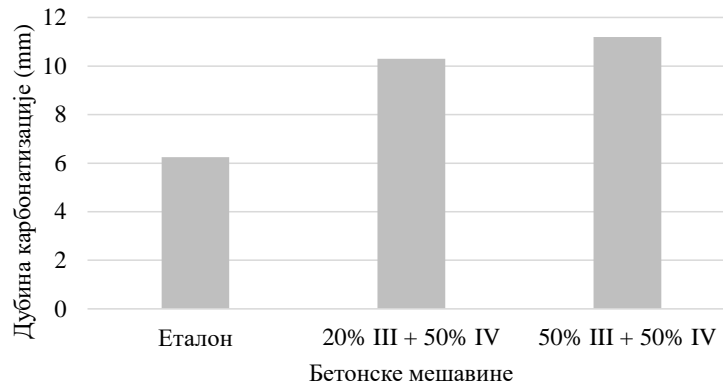
$$x_c = k_c \cdot \sqrt{t} \quad (22)$$

где је, x_c дубина карбонатизације (mm); t је време у којем је извршена карбонатизација; а k_c је коефицијент брзине карбонатизације (mm · време^{-0,5})

Измерене дубине карбонатизације узорка изложених 5%-тној концентрацији CO₂ и срачунате вредности коефицијената карбонатизације приказани су у табели 35.

Табела 35. Измерене дубине карбонатизације (x_c) и срачунате вредности коефицијената карбонатизације (k_c)

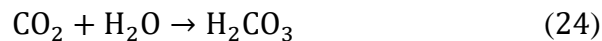
| Бетон | x_c (mm) | k_c (mm/год ^{0,5}) |
|------------------|------------|--------------------------------|
| Еталон | 6.25 | 22.32 |
| 20% III + 50% IV | 10.30 | 36.78 |
| 50% III + 50% IV | 11.20 | 40.00 |



Слика 94. Дубина карбонатизације

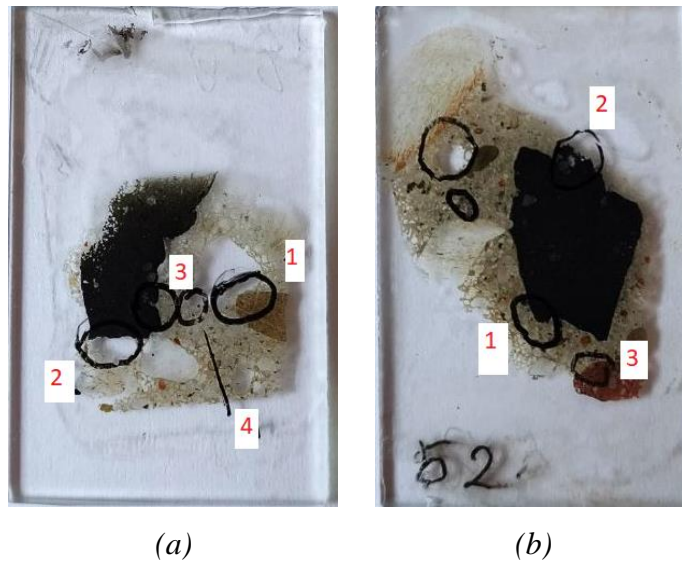
$$R_{Acc}^{-1} = \left(\frac{x_c}{420}\right)^2 = (m^2/s)/(kg/m^3) \quad (23)$$

Реакција се углавном јавља између калцијум силиката у цементу и CO_2 . Примарни продукти реакције су трикалцијум–силикат–хидрата (C-S-H) и калцијум хидроксида ($Ca(OH)_2$) [69, 138] трансформишући се у кристале калцијум-карбоната ($CaCO_3$) и мењајући хемијску равнотежу између раствора пора и хидрата [139,140]. Када се CO_2 раствори у порном раствору, блага угљенична киселина (H_2CO_3) реагује са алкалијама у бетонској матрици снижавајући рН вредност бетона. Формирање нерастворљивих соли као што је $CaCO_3$ повећава запремину у односу на полазна једињења реакције за приближно 11% [141] чиме делимично испуњава капиларне поре и доводи до смањења порозности цементних бетона. Ово спречава даљи проток CO_2 и O_2 у бетону [140]. Сходно томе, трајност бетона се може значајно побољшати карбонатизацијом, укључујући отпорност на мраз [142] и дејство хлорида [143]. Како се у процесу ослобађа вода, карбонатизација је непрекидан процес, с обзиром да је она неопходна за почетак реакције.



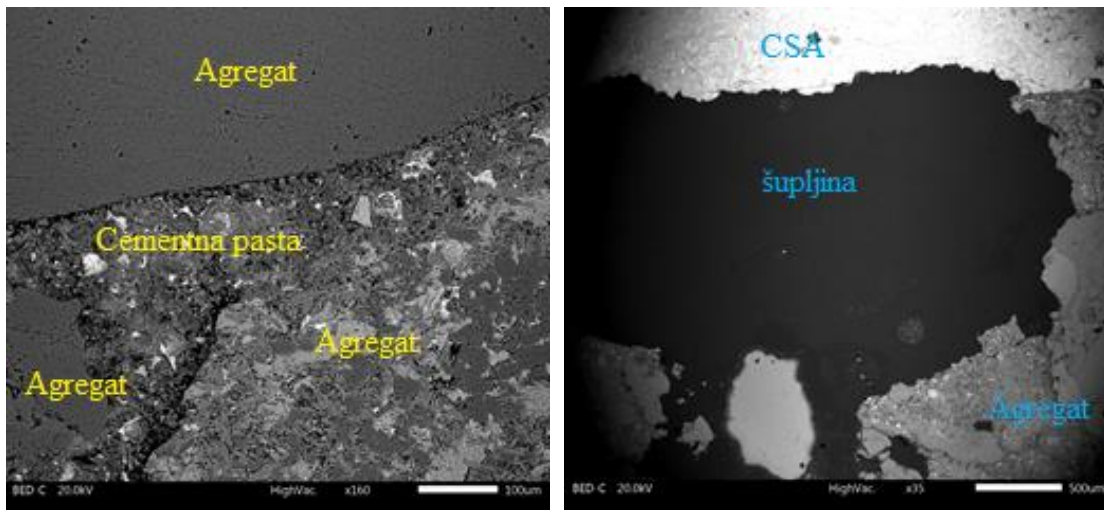
4.13. SEM анализа бетона са агрегатом од бакарне шљаке

Микроструктура бетонских узорка испитана је помоћу скенирајуће електронске микроскопије. За квалитативну и квантитативну анализу микроструктуре бетона са садржајем агрегата од бакарне шљаке као замена за крупне фракције природног агрегата припремљена су два репрезентативна узорка. Узорци су направљени из бетонских узорка након nanoшења силе притиска при испитивања чврстоће при притиску. У питању су узорци припремљени на стакленој плочици, слика 95. За аутоматско читавање димензија на испитиваним узорцима коришћен је програм ImageJ.



Слика 95. Узорци бетона са додатком CSA припремљени за SEM анализу

Како је приказано на слици 96, на узорцима (а) и (б) обележене су карактеристичне тачке на којима је урађена SEM микрографија.



(a)

(b)

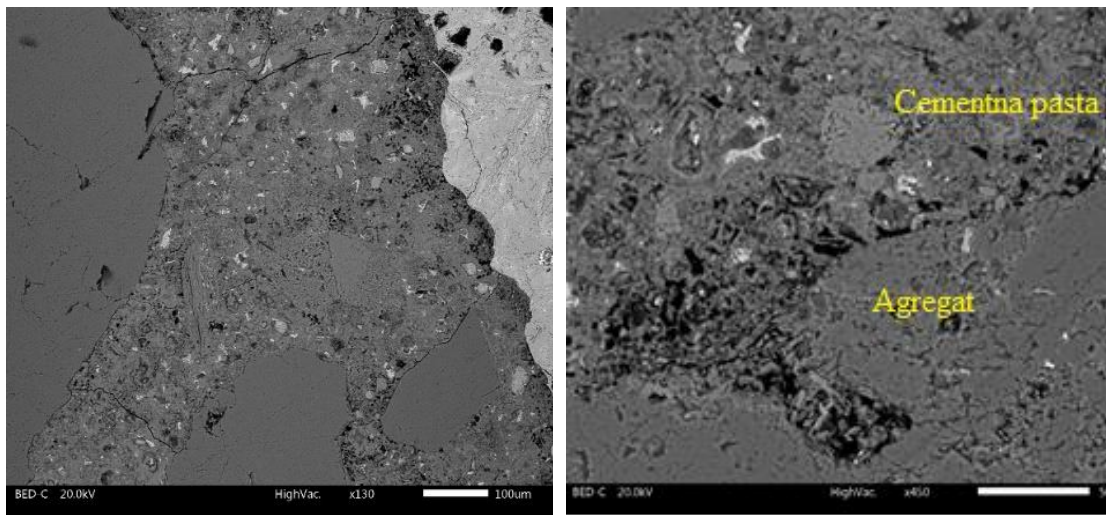
Слика 96. SEM микрофотографије

Слика 96 приказује SEM микрофотографију узорака бетона са садржајем агрегата CSA као замене за RA. Наношење силе притиска довело је до пуцања унутар узорака. Ове пукотине првенствено почињу унутар прелазне зоне, која је најслабији регион између агрегата и цементне пасте. Очигледно је из SEM снимака, да је пукотина настала дуж површине агрегата RA. SEM микрографија бетонских узорака показује да нема пукотина на споју између агрегата CSA и цементне пасте. Ово сугерише на то да је веза агрегата CSA и цементне пасте јача што је разлог зашто се пукотине нису појавиле ближе површини агрегата.

Слика 96а представља контакт агрегата RA (кварцит и пешчар) и цементне пасте. Димензија контактне везе је приближно 1 микрон. Ова веза је компактна и без пукотина.

Направљен је снимак на коме се види изглед површине зрна агрегата CSA који потврђује јачу контактну везу са цементном пастом, слика 96б, где се види да је површина зрна CSA са оштрим ивицама. На снимку се види компактна веза између зрна CSA и цементне пасте. Димензија везе је приближно 1 микрон.

Слике 97а и 97б представљају контакт агрегата CSA и цементне пасте. На слици 97а се виде пукотине по агрегатима RA и CSA. Слика 97б такође представља везу агрегата RA и цементне пасте.

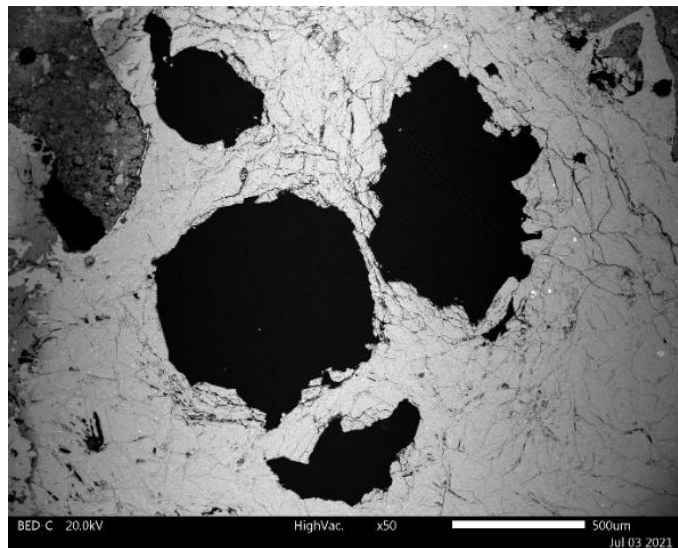


(a)

(b)

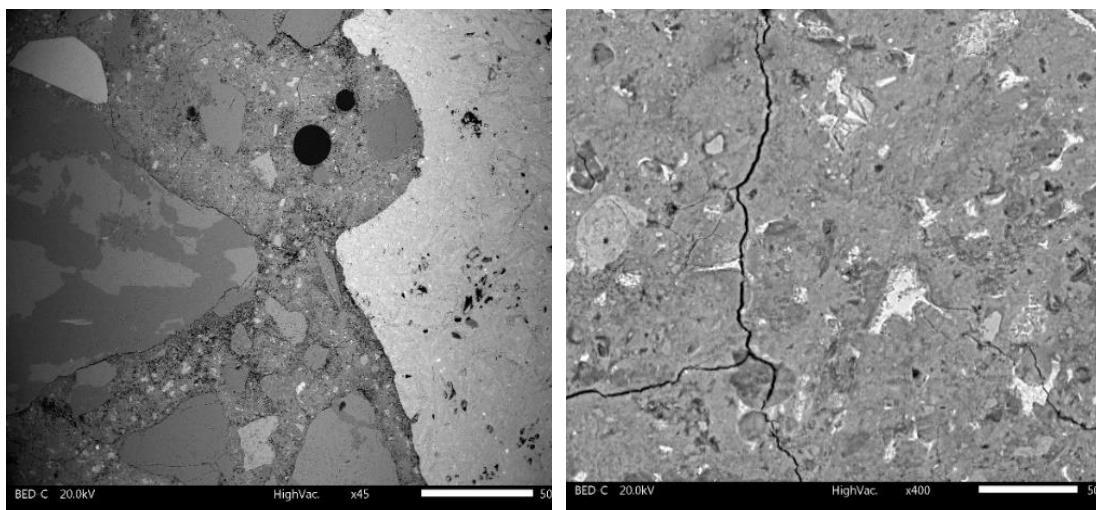
Слика 97. SEM бетона

Слика 98 представља приказ шупљине у агрегату CSA у које цементна паста не може да продре. Дат је приказ зрна CSA неправилног облика на коме се јасно виде увале на зрну агрегата од бакарне шљаке.



Слика 98. SEM бетона узорак 2

На слици 99а је приказана компактна веза између агрегата CSA и цементне пасте. На слици 99б приказан је лом по цементној пасту услед дејства силе притиска.



(a) (б)

Слика 99. SEM бетона узорак 2

4.14. Закључак

Код већине бетонских мешавина са садржајем CSA као замена за RA, чврстоћа при притиску расте са повећањем садржаја CSA. Пораст чврстоћа при притиску након 28 дана креће се у границама од 10.2% (мешавина 20% III + 20% IV) до 20.2% (мешавина 100% III + 50% IV) у односу на контролну мешавину.

Замена крупних фракција RA одговарајућим фракцијама CSA утиче на пораст чврстоће при затезању цепањем код оваквих бетона. Пораст чврстоћа након неге од 28 дана је у границама од 17.1% код мешавине 20% III + 20% IV до 54.9% код мешавине 50% III + 50% IV у односу на контролну мешавину. Међутим, испитане бетонске мешавине имају приближно једнаке и мање чврстоће при затезању савијањем. Пад чврстоћа при затезању савијањем се креће у границама од 1.44% (50% III + 50% IV) до 9.62% (50% III + 100% IV) у односу на контролну мешавину.

При старости бетона од 7 дана, мешавине са садржајем агрегата CSA као замене за крупне фракције (8/16 mm и 16/31.5 mm) RA показале су веће чврстоће при чупању. Пораст Pull-off чврстоћа креће се у границама 10.2% (20% III + 20% IV) до 49.0% (50% III + 100% IV) у односу на контролни бетон.

Срачунате вредности модула еластичности свих бетонских мешавина са додатком CSA према Еврокоду 2, Model Code 2010 и АСI 318-11 више су у поређењу са контролном бетонском мешавином.

Водонепропустљивост узорка бетонских мешавина мања је за 12% (20% III + 20% IV), односно 55% (20% III + 50% IV) у односу на еталон. На први поглед, овакав тренд не делује логично, с обзиром да зрна агрегата од бакарне шљаке имају мање вредности упијања воде у поређењу са природним агрегатом. Ипак, треба имати на уму да водонепропустљивост у највећој мери зависи од остварене компактности бетона, тј. од присуства капиларних пора у цементној матрици. Са повећањем запремине пора, генерално се смањује водонепропусност бетона. С обзиром да је, приликом справљања бетонских мешавина, садржај цемента и воде остао непромењен, због нижег упијања воде зрна бакарне шљаке, у бетонским мешавинама са садржајем CSA повећан је садржај слободне воде. Повећање количине слободне воде у бетонским мешавинама директно је утицало на повећање запремине капиларних пора у бетону – а самим тим и на већу пропустљивост бетона за воду под притиском.

Максималне вредности измерених деформација скупљања показују да испитане бетонске мешавине имају скупљање у границама од 0.14 до 0.32 mm/m.

Дубина пенетрације хлорида у бетону 50% III + 50% IV је мања у односу на контролни бетон код кога је забележена вредност од $36.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^2 / \text{m}$. Резултати добијених коефицијената миграције хлорида (D_{RCM}) за контролни бетон показују вредност $39.7 \times 10^{-12} \text{ cm}^2 / \text{m}$, док за бетон 20% III + 50% IV D_{RCM} износи $46.8 \times 10^{-12} \text{ cm}^2 / \text{m}$ што је већа вредност у односу на контролни бетон.

На основу мерења дубине карбонатизације након 28 дана изложености Еталон је имао најмању дубину карбонатизације при 5%-тној концентрацији CO_2 . Иако је бетон са заменом 20% III + 50% IV имао готово исту чврстоћу у односу на бетон са заменом 50% III + 50% IV његова дубина карбонатизације је била скоро 15% мања. Дубина карбонатизације узорака бетона са садржајем замене CSA је била 64.8% и 79.2% већа у поређењу на узорке Еталона.

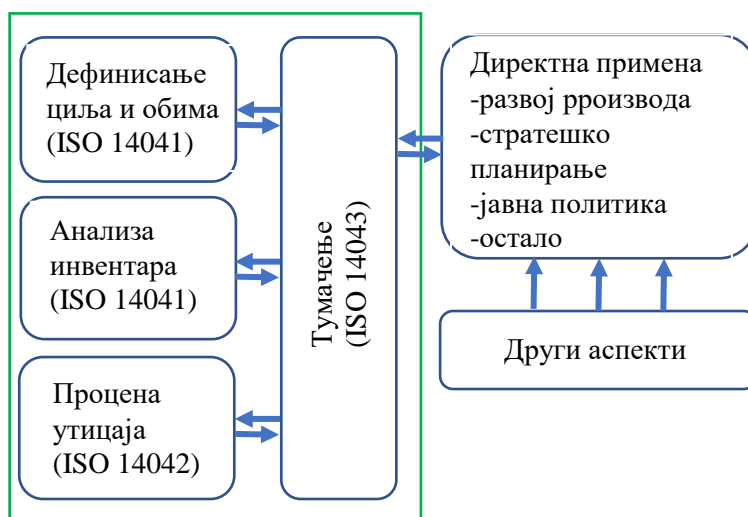
SEM анализом узорака бетона претходно изложеним сили притиска до лома, запажено је да су на узорку Еталона пукотине настале у контактної зони агрегата RA и цементне пасте, док се на узорку бетона са садржајем крупних фракција CSA пукотине појављују кроз цементну пасту. Бетони са садржајем замене крупних фракција CSA имају од 10.2% до 20.2% већу чврстоћу при притиску у односу на Еталон. Зрна агрегата CSA су са оштрим ивицама што поврћава контактну везу агрегата и цементне пасте.

5. АНАЛИЗА ЖИВОТНОГ ЦИКЛУСА (Life cycle analysis–LCA)

5.1. Методологија LCA

Анализа животног циклуса (Life Cycle Assessment: life cycle-životni ciklus, assessment-процена) је метод процене посредног и непосредног утицаја одређеног материјала на животну средину самим његовим постојањем. Анализа животног циклуса укључује комплетну анализу свих утицаја на физичко окружење у животном циклусу производа: сировине, производња, дистрибуција, употреба и одлагање. На овај начин се повећава ефикасност и смањују трошкови његове употребе. LCA налази значајну примену у индустрији и садржи четири кључна корака дефинисана од стране Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) [144], као и од стране International Standards Organization (ISO) [145]:

- (1) квантификација сирових материјала и енергетских инпута (на пример, потрошена енергија и сировине, емисије и отпад);
- (2) процена потенцијалних утицаја ових оптерећења на животну средину (LCI);
- (3) процена расположивих могућности за смањење ових утицаја на животну средину (LCA) и
- (4) тумачење резултата, слика 100.



Слика 100. Дијаграм тока процене животног циклуса

Фаза дефинисања циља и обима је први корак у LCA студији. У овој фази је описана сврха студије. Овај опис укључује предвиђену намену и кориснике, као и разлоге за спровођење студије. Обим студије укључује дефинисање граница студије, намене система који се истражују, функционалну јединицу, опис система који се истражују, границе система, алокацију приступа, захтеве за подацима, захтеве за квалитет података, кључне претпоставке, метод процене утицаја, метод тумачења и врсту извештавања.

У анализи животног циклуса инвентара (LCI), подаци се прикупљају и тумаче, врше се прорачуни, а резултати инвентара се израчунавају и приказују. Анализа резултира моделом тока техничког система. За сваки процес се израчунавају емисије, енергетски захтеви и токови материјала. Ови подаци ће се затим прилагодити и/или пондерисати функционалној јединици која је дефинисана у циљу и обиму, тако да се цео животно циклус производа може узети у обзир.

У процени утицаја животног циклуса (LCIA), производ или производни систем се испитује из перспективе животне средине коришћењем индикатора категорије утицаја. LCIA такође пружа информације потребне за фазу тумачења.

Процена побољшања је фаза у којој се анализирају резултати у односу на циљ и дефиницију обима, где се доносе закључци, приказују границе резултата и где се дају препоруке на основу налаза из претходних фаза LCA (ISO 14043).

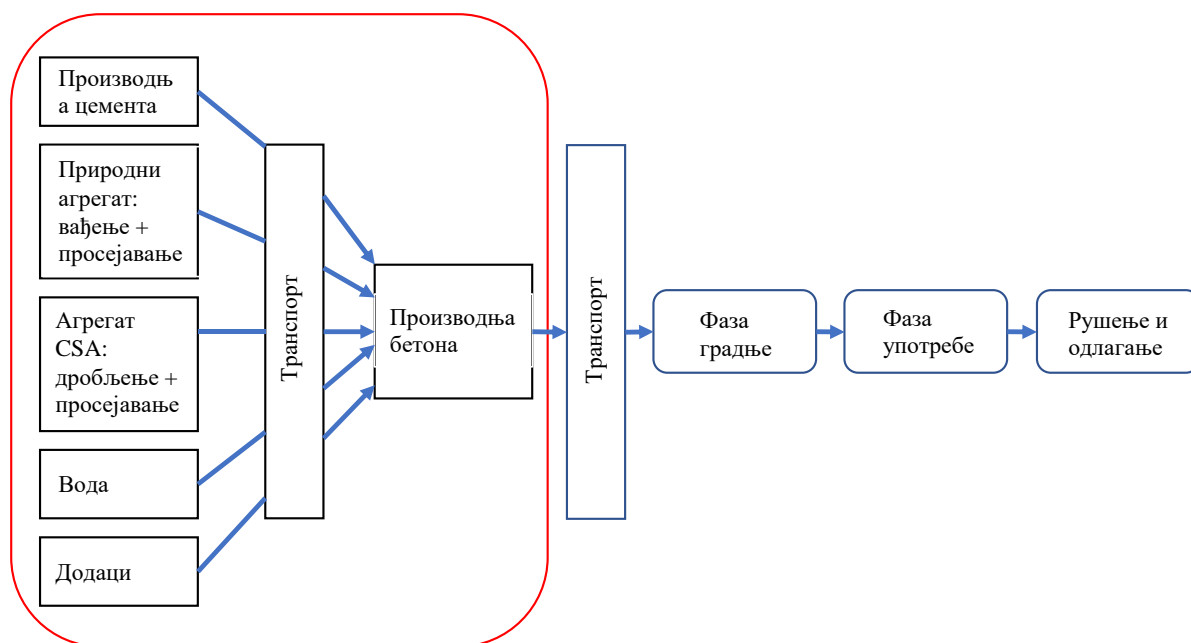
5.2. Сопствена истраживања

У оквиру сопствених истраживања извршена је процена еколошког потенцијала замене природних агрегата RA агрегатима бакарне шљаке у производњи готових бетона. LCA анализом су обухваћене контролна и две бетонске мешавине са делимичном заменом крупног природног агрегата агрегатом CSA у три различите претпоставке утицаја. Прва претпоставка је транспорт до 5 km удаљености (основна претпоставка), у другој претпоставци се за справљање бетона уместо природног речног агрегата користи дробљени агрегат и трећа претпоставка је транспорт до 50 km удаљености, за разлику од 5 km колико је према основној претпоставци. За категорије утицаја изабране су: укупна потрошња енергије (EU),

глобално отопљавање (GWP), еутрофикација (EP), закисељавање (AP) и фотохемијско формирање озона (POCP). Они су израчунати коришћењем базне методологије CML (Институт за науке о животној средини Факултета наука Универзитета у Лајдену) [146]. Осим тога, израчуната је кумулативна потрошња енергије у оквиру проучаваног дела животног циклуса и изражена као потрошња енергије (EU). Прорачуни LCI и LCIA за сваку одабрану бетонску мешавину су изведени коришћењем оригиналног софтвера у Exel фајлу.

Срачунате категорије утицаја приказане су на сликама 103, 104 и 105 за обе врсте бетона са садржајем CSA као замене за крупне фракције природног речног агрегата. Пропорције мешавина бетона заједно са испитаном чврстоћом при притиску након 28 дана неге приказани су на слици 70, а резултати испитивања свежег бетона приказани су на сликама 59, 60 и 62.

Циљ испитивања је процена еколошког потенцијала замене природних агрегата агрегатима од бакарне шљакe у производњи бетона. Имајући у виду овај циљ, извршена је анализа “cradle-to-gate” дела животног циклуса, слика 102, а коришћена је функционална јединица од 1 m³ готове бетонске мешавине за све три испитане врсте бетона. Производња воде је искључена из анализе.

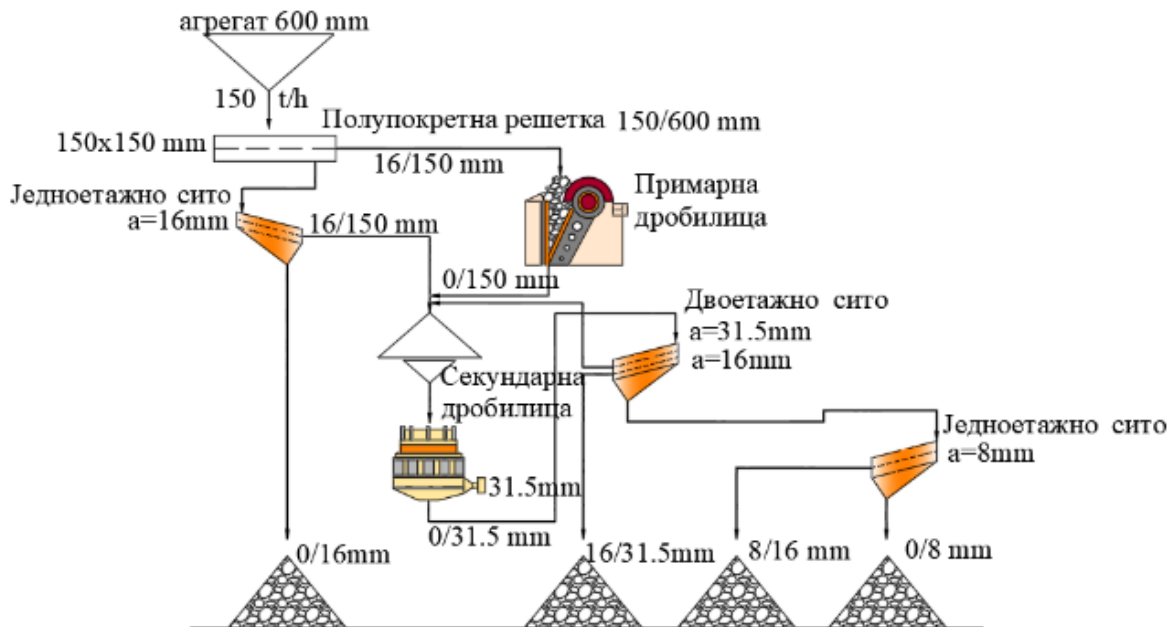


Слика 101. Животни циклус бетона са садржајем замене агрегата CSA

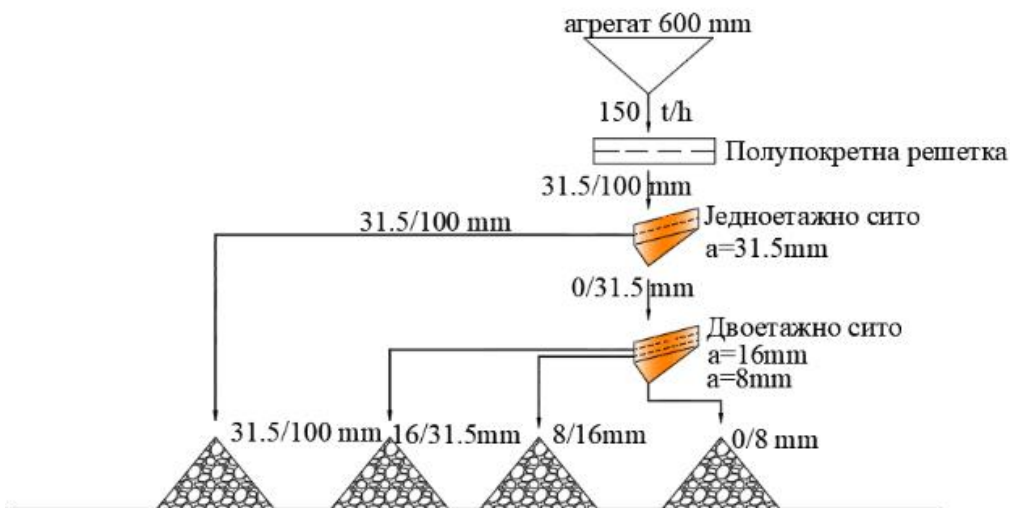
Анализа животног циклуса, као један од релативно новијих приступа проучавању употребе рециклираних агрегата, нуди могућности употребе бакарне шљаке као агрегата у бетонима. С обзиром да се производња контролне бетонске мешавине и бетонске мешавине са садржајем процента замене CSA, која је предмет овог рада, налази у Бору, сви потребни LCI подаци из процеса производње природног речног агрегата, цемента и бетона прикупљени су од локалних добављача и произвођача. Што се тиче агрегата CSA, подаци су прикупљени са депоније у кругу Рударско-топионичарског басена Бор. Процес добијања бакарне шљаке углавном се састоји од двостепеног дробљења и одвајања према слици 102а.

Због своје велике тврдоће, дробљење бакарне шљаке резултира великом потрошњом електричне енергије и високим оштећењима дробилица које се користе у овом процесу. Из тог разлога је за ово испитивање коришћена природно гранулисана бакарна шљака. С обзиром на то да у природном депонованом стању бакарне шљаке у РТБ „Бор”, око 70% депонованог материјала припада фракцијама 8/16 и 16/31.5 mm вршено је испитивање на бетонским мешавинама где је део ових фракција RA замењен са CSA. Процес добијања агрегата од бакарне шљаке у фракцијама 8/16 mm и 16/31.5 mm се састоји од двостепене сепарације према слици 102b.

Потрошња електричне енергије је 2,16 kWh (7,78 MJ), док се за утовар користи 0,704 l дизела (24,8 MJ) по тони агрегата. Подаци о емисији при производњи и дистрибуцији дизела, као и за транспорт који нису могли бити прикупљени за локалне услове, преузети су из базе података Ecoinvent V2.0 [147,148].



(a)



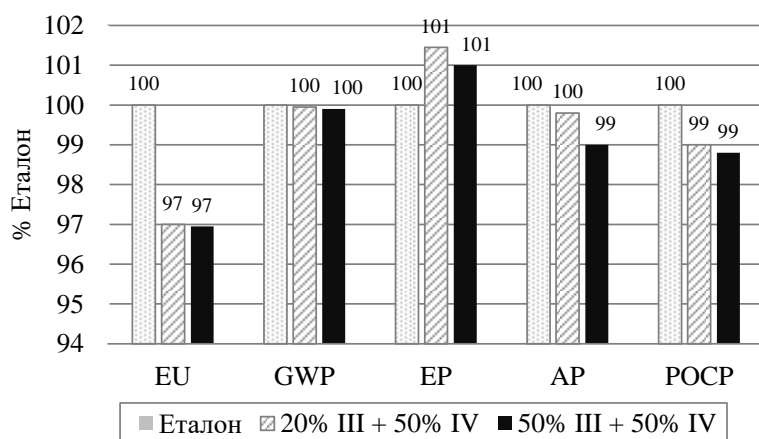
(б)

Слика 102. Технолошка шема добијања CSA – РТБ „Бор“ (а) двостепеним дробљењем и сепарацијом; (б) двостепеном сепарацијом.

5.3. Резултати истраживања

На слици 103 приказани су индикатори категорије утицаја за случај основне претпоставке – транспорт до 5 km удаљености. Резултат утицаја потрошње енергије справљања контролног бетона је 100%, бетонске мешавине 20% III + 50% IV и мешавине 50% III + 50% IV је 97%. Резултат утицаја потенцијала глобалног

отопљавања за справљање контролног бетон и мешавина 20% III + 50% IV и 50% III + 50% IV је 100%. Резултат анализе еутрофикације за контролни бетон је 100%, бетонских мешавина 20% III + 50% IV и 20% III + 50% IV је 101%. Утицај закисељавања контролног бетона и бетонске мешавине 20% III + 50% IV је 100%, резултат код бетонске мешавине 50% III + 50% IV је 99%. Такође, са слике се може видети да су резултати фотохемијског формирања озона контролног бетона 100%, бетонске мешавине 20% III + 50% IV и 50% III + 50% IV 99%.

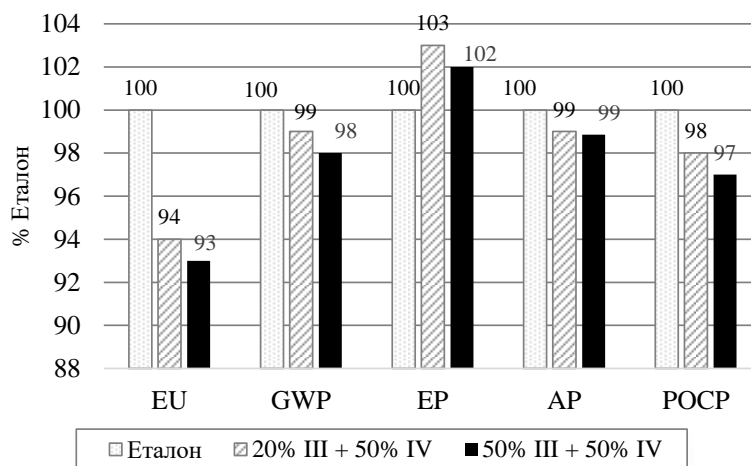


Слика 103. Индикатори категорије утицаја – основне претпоставке

Разлике између утицаја контролног бетона и бетона са садржајем замене CSA код оба односа замене износе свега неколико процената, тј. практично су једнаке (видети слику 103). Ово није изненађујуће, будући да је садржај цемента у свим испитаним бетонским мешавинама исти, а цемент је далеко најважнији фактор који доприноси свим утицајима. Међутим, количина природног агрегата у бетонским мешавинама ознака: 20% III + 50% IV и 50% III + 50% IV, износи 394 kg/m³ и 529 kg/m³, респективно. За исте количине се у тим бетонима смањује настали отпад.

Уколико се уместо речног агрегата користи дробљени природни агрегат, потрошња енергије код контролног бетона је већа у односу на бетонске мешавине са садржајем замене CSA, док су остале категорије утицаја сличне, слика 104. Резултат утицаја потрошње енергије справљања контролног бетона је 100%, бетонских мешавина 20% III + 50% IV 94% и 50% III + 50% IV је 93%. Резултат потенцијала глобалног отопљавања за контролни бетон је 100%, бетонских

мешавина 20% III + 50% IV је 99% и 50% III + 50% IV је 93%. Резултати анализе еутрофикације за контролни бетон је 100%, мешавине 20% III + 50% IV је 103% и мешавину 20% III + 50% IV је 102%. Закисељавање контролног бетона је 100%, бетонских мешавина 20% III + 50% IV и 50% III + 50% IV је 99%. Такође, са слике се може видети да су резултати утицаја фотохемијског формирања озона контролног бетона 100%, бетонске мешавине 20% III + 50% IV је 98%, док за бетонску мешавину 50% III + 50% IV је 97%.

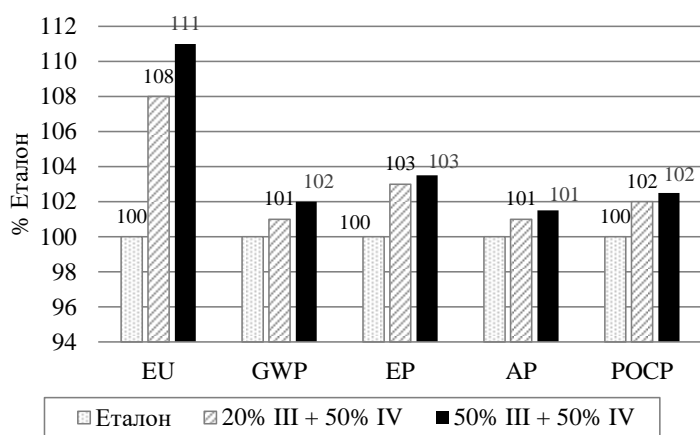


Слика 104. Индикатори категорије утицаја – дробљени природни агрегат

Уколико се уместо речног агрегата користи дробљени природни агрегат, потрошња енергије при справљању контролног бетона је већа у односу на бетонске мешавине са садржајем замене CSA, док су остале категорије утицаја сличне (видети слику 104). Ово је углавном последица различитог начина транспорта – дробљени агрегат се транспортује камионима, уместо баржама као што је то случај са речним агрегатом – који утиче на утицај контролног бетона више него на утицај бетона са садржајем замене CSA.

Коначно, ако се раздаљина транспорта агрегата бакарне шљаке у основној претпоставци промени са 5 km на 50 km, израчунате категорије утицаја су приказане на слици 105. Резултат утицаја потрошње енергије контролног бетона је 100%, бетонских мешавина 20% III + 50% IV 108% и 50% III + 50% IV је 111%. Потенцијал глобалног отопљавања за контролни бетон је 100%, бетонске мешавине 20% III + 50% IV је 101% и мешавине 50% III + 50% IV 102%. Резултати

анализе еутрофикације за контролни бетон је 100%, мешавине 20% III + 50% IV и 20% III + 50% IV је 103%. Закисељавање контролног бетона је 100%, бетонских мешавина 20% III + 50% IV и 50% III + 50% IV је 101%. Такође, са слике се може видети да су резултати фотохемијског формирања озона контролног бетона 100%, бетонских мешавина 20% III + 50% IV и 50% III + 50% IV %, 102%.



Слика 105. Индикатори категорије утицаја – транспортне удаљености до 50 km

Потрошња енергије је већа у случају бетона са садржајем замене CSA, док су сви остали утицаји нешто већи (видети слику 105). Да би сви утицаји остали практично једнаки утицајима контролног бетона, раздаљина транспорта агрегата од бакарне шљакe не би требало да буде већа од 20 km. Дакле, еколошке користи справљања бетона са CSA, изражене кроз очување природног агрегата и смањење отпада, могу се постићи ако се бетон производи близу депоније агрегата бакарне шљакe – тј. на удаљености не већој од 20 km.

5.4. Закључак

У овом истраживању анализиран је еколошки потенцијал замене природних агрегата агрегатима произведеним од отпадне бакарне шљаке. Предметне анализе су извршене пре свега са циљем да се испита могућност примене бетона са оптималним садржајем агрегата од бакарне шљаке у грађевинарству. Спроведена студија испитивања заснована је на српским LCI подацима и локалним условима у околини града Бора. У оквиру ових граница, и за одабране категорије утицаја, закључено је да примена агрегата од бакарне шљаке у бетону може донети еколошке предности у односу на примену природног агрегата, у виду очувања природног агрегата (као необновљивог ресурса), као и у виду смањења количине отпада који се одлаже на депоније. Ово, међутим, важи само ако су транспортне удаљености агрегата од бакарне шљаке мање од 20 km, па се тестиране бетонске мешавине препоручују за локалну примену. Количина отпадног материјала који се користи за производњу бетона 50% III + 50% IV чини око 20% масе по јединици запремине бетона. Ипак, овај бетон се може користити у конструкцијама где је бетон ниске до средње чврстоће економски оправдан (на пример у стамбеним зградама). Имајући ово у виду, може се закључити да локална примена бетона са садржајем замене CSA доприноси очувању природних ресурса у расутом стању и капацитета депоније, који данас у многим земљама постају важан и оскудан ресурс. Имајући ово у виду, ови и слични индустријски нуспроизводи данас у многим земљама постају важан ресурс – настао трансформацијом отпада у вредну сировину.

6. ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕПОРУКЕ ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА

6.1. Закључци

У овом истраживању приказане су карактеристике агрегата од бакарне шљаке (CSA) и природног речног агрегата (RA) који су коришћени за справљање бетона, при чему је речни агрегат делимично замењен (20%, 50% и 100%) фракцијама 8/16 mm и 16/31.5 mm агрегата од бакарне шљаке. Такође, испитивање је обухватило и испитивање карактеристика цементног бетона справљеног са ове две врсте агрегата.

6.1.1. Закључци у вези резултата испитивања агрегата

Како би се на што бољи начин објасниле разлике између контролне бетонске мешавине и бетонских мешавина са различитим садржајима замене CSA, у првом кораку су спроведена детаљна испитивања обе врсте агрегата.

На основу резултата хемијских и физичко-механичких испитивања агрегата RA и CSA може се закључити следеће:

- CSA добијен из процеса пирометалуршког топљења бакра састоји се од зрна повољног облика (SI 15). Зрна агрегата бакарне шљаке су претежно коцкастог и дугуљастог облика, оштрих ивица, док је изглед површине зрна гладак до стакласт. Просечни садржај зрна лошег (пљоснатог) облика је мали и износи свега 5%. Облик зрна RA је углавном дугуљаст и сферичан а зрна су, због различитог учешћа стена, глатка, финохрапава и песковито храпава са нешто већим просечним процентуалним садржајем зрна неповољног облика од 16%. Облик зрна RA је, због присуства шкриљаца и гнајсева (23%), нешто лошији (SI 20). Ово својство агрегата повољно утиче на компактност агрегата у бетонским мешавинама и на чврстоће при притиску очврслих бетона.
- Повећан садржај калцијума и силицијума, према обављеној хемијској анализи (CaO 20% , SiO₂ 42%), утиче на повећан садржај минерала из групе клинопироксена (хеденбергит 82.35 %), који је потврђен SEM анализом. Преостали садржај калцијума и силицијума везан је у силикатну фазу-

дивитрификовану стакласту матрицу (13.94 %), док је гвожђе претежно везано у оксидном минералу из групе спинела – магнетит и сулфидне капљице са садржајем 2.34 и 1.37% респективно (Табела 2). Са овако ниским садржајем гвожђа, ова шљака припада групи киселих шљака.

- Петрографска испитивања речног агрегата који је ушао у састав бетонских мешавина показала су да се 95% RA састоји од стена силикатног састава, односно фрагмената кварцита, гнајса, шкриљаца, пешчара, рожнаца, сплит-дијабаз, дацит-андезита и перодотита. Садржај кречњака је мали (5%).
- Отпорност на деградацију (фрагментацију) агрегата бакарне шљаке је доста повољнији у односу на природни агрегат. Добијене вредности испитивања отпорности на дробљење CSA и RA су L_A 10%, односно 26%, респективно. Зрна агрегата од бакарне шљаке су скоро три пута отпорнија на дробљење у односу на RA. Резултати испитивања хабања mikro-Deval тестом одговарајућих узорак CSA и RA износе MDE 4%, односно 10%. Добијене вредности указују на бољу отпорност на хабање узорака CSA у односу на RA. Овим је потврђено да гранулисана бакарна шљака поседује повољна техничка својства као што су механичка чврстоћа и отпорност на хабање.
- Полирност агрегата бакарне шљаке износи PSV 43. Добијена вредност је у складу са визуелном перцепцијом јаког, компактног агрегата, финохрапавих, глатких до стакластих површина зрна.
- Резултати испитивања запреминских маса показују да је стварна запреминска маса зрна агрегата од бакарне шљаке 3330 kg/m^3 што је за 29.1% више у односу на природни агрегат (2580 kg/m^3). Упијање воде агрегата од бакарне шљаке је, пак, дупло мање у односу на природни агрегат (0.6%, односно 1.2%, респективно). Као последица добијених резултата код испитаних бетонских мешавина са садржајем замене агрегата од бакарне шљаке забележено је повећање запреминске масе

бетона од око 7% (мешавина 50% III + 50% IV) у односу на контролну мешавину.

- Поређењем добијених резултата просечне запреминске масе зрна агрегата од бакарне шљаке 3350 kg/m^3 са специфичном масом цемента (3150 kg/m^3) може се закључити да је запреминска маса зрна CSA за око 6% већа од одговарајуће вредности овог својства код цемента, што се приписује високом садржају гвожђа у CSA.
- CSA са депоније РТБ „Бор“ је хлађена на ваздуху, без додавања воде и стога има већу запреминску масу и мало упијање воде. Шупљине у овој шљаци јесу спорадично присутне, али су микрометарских димензија у којима се вода не задржава, с обзиром на мање упијање воде агрегата од бакарне шљаке у односу на природни агрегат.
- Оба испитана агрегата су отпорна на дејство мрза и припадају категорији M_s 18. Ипак, бакарна шљака је отпорнија на дејство мрза ($M_s=7$) у односу на RA ($M_s=12$) код кога присуство шкриљаца и перидотита смањује отпорност на ниским температурама.

6.1.2. Закључци у вези резултата испитивања бетонских мешавина

На основу спроведених експерименталних испитивања бетонских мешавина са различитим садржајем агрегата CSA као замене за одговарајуће фракције RA, закључује се следеће:

- Повећање садржаја CSA у бетонским мешавинама утицало је на добијање крућих конзистенција у односу на контролну мешавину. Разлог овакве појаве је употреба CSA агрегата са зрнима веће специфичне површине и мање покретљивости. Зрна CSA су храпавија и оштријих ивица у односу на зрна RA, што доводи до појаве већег трења између зрна. Количина употребљене CSA није имала битан утицај на садржај увученог ваздуха;
- Запреминске масе свежих бетонских мешавина са садржајем замене крупних фракција CSA веће су за око 5%, у односу на контролну

мешавину. Запреминске масе очврслих бетонских мешавина справљених са додатком CSA веће су за око 7%, у односу на контролну мешавину. У оба случаја ово је последица веће запреминске масе агрегата од бакарне шљаке у поређењу са природним агрегатом;

- Бетонске мешавине 20% III + 50% IV и 50% III + 50% IV показале су веће чврстоће при притиску за 12.6%, односно 10.6%, респективно, при старости бетона од 28 дана у односу на Еталон. Узрок овог повећања је већа чврстоћа CSA зрна и боља интеракција између зрна, с обзиром на њихову храпавост и оштроивичност;
- Водонепропустљивост бетонских мешавина 20% III + 50% IV и 50% III + 50% IV мања је за 55.4%, односно 27.7%, у односу на контролну мешавину. На први поглед овакав тренд не делује логично, с обзиром да зрна агрегата од бакарне шљаке имају мање упијање воде у поређењу са природним агрегатом. Ипак, треба имати на уму да водонепропусност бетона у највећој мери зависи од компактности бетонске мешавине, тј. од присуства капиларних пора у цементној матрици. Са повећањем запремине пора, повећава се водопрпусност бетона. С обзиром да је приликом справљања све три бетонске мешавине садржај цемента и воде остао непромењен, због нижег упијања воде зрна бакарне шљаке, у бетонским мешавинама 20% III+50% IV и 50% III+50% IV повећан је садржај слободне воде. Повећање количине слободне воде у бетонским мешавинама директно је утицало на повећање запремине капиларних пора у бетону и следствено томе на нижи степен водонепропустљивости;
- На испитиваним узорцима такође је примећен и пораст пенетрације хлорида класификован коефицијентом миграције хлорида D_{RCM} . Анализом добијених резултата еталона и мешавина бетона са заменом агрегата од бакарне шљаке, може се закључити да је вредност $D_{RCM} > 16 \times 10^{-12}$, па су стога овакви бетони погоднији за коришћење у срединама без агресивних утицаја [133,134]. Ипак, треба имати на уму да је главни узорак веће

миграције хлорида кроз бетон у суштини повећана порозност цементног камена, као и у случају водонепропустљивости;

- Већа порозност цементне матрице код мешавина са бакарном шљаком, утицала је и на већу деградацију цементног камена услед деловања мрза у присуству соли за одмрзавање. То је јасно уочљиво и на сликама узорка након завршених 28 циклуса смрзавања и одмрзавања (видети слику 88). Ипак, високе вредности љуштења материјала при овим испитивањима у неку руку су и очекиване, с обзиром да предметна мешавина иницијално није ни пројектована тако да буде отпорна на ово дејство. Предметна испитивања су извршена више са циљом да се упореди понашање стандардних бетона и бетона са агрегатом од бакарне шљаке, као иновативним решењем за употребу овог индустријског нуспроизвода;
- Већа порозност цементне матрице код бетонских мешавина са садржајем замене CSA довела је до веће дубине карбонатизације код узорка бетона са садржајем замене CSA и смањене трајности оваквих бетона. Дубина карбонатизације је код узорка Еталона мања у односу на бетоне са садржајем замене CSA што се може приписати већем упијању зрна агрегата RA у односу на CSA;
- SEM анализом узорка Еталона и бетона са садржајем замене CSA запажена је боља интеракција између зрна агрегата CSA са цементном матрицом, с обзиром на њихову текстуру и облик;
- Примена агрегата од бакарне шљаке може донети еколошке предности у односу на примену природног агрегата, у виду очувања природног агрегата (као необновљивог ресурса), као и виду смањења количине отпада који се одлаже на депоније. Ово, међутим, важи само ако су транспортне удаљености агрегата од бакарне шљаке мање од 20 km, па се испитане бетонске мешавине препоручују за локалну примену.

Сврха пројектовања бетонских мешавина је одређивање оптималног садржаја агрегата од бакарне шљаке у циљу побољшања карактеристика бетонске

мешавине. Међутим, оптималан садржај замене CSA у бетонској мешавини не мора неминовно довести до побољшања карактеристика справљеног бетона. Додатак CSA у бетонску мешавину не погоршава у значајној мери квалитет бетона, а са друге стране као бенефит има смањење експлоатације природног агрегата, као и смањење загађења животне средине кроз депоније бакарне шљаке.

Генерално посматрано, са аспекта трајности бетона (отпорност на продор хлорида, карбонатизација и отпорност на дејство мрза и соли) мешавине справљене са делимичном заменом природног агрегата агрегатом од бакарне шљаке, имале су мању трајност у поређењу са контролном мешавином. У сва три случаја, узрок томе је повећана порозност цемента камена, проузрокована већом количином слободне воде. Решење овог проблема је једноставно, у мешавинама које се справљају са бакарном шљаком треба редуковати количину воде која се дозира. Дубина карбонатизације бетона са садржајем CSA ће се на овај начин редуковати, услед мањег упијања зрна агрегата CSA у односу на RA, и на тај начин ће се повећати трајност оваквих бетона. Такође, иста уградљивост бетона, као у случају контролне мешавине, може се обезбедити додавањем потребне количине хемијског додатка типа суперпластификатора.

Бетони настали додавањем агрегата од бакарне шљаке као замене за природни агрегат су водопропусни, што им даје предност у примени код тротоара за сакупљање атмосферске воде у градовима. Због добрих физичких и механичких карактеристика ових бетона, погодни су за израду масивних плоча и крутих коловозних конструкција. Имајући ово у виду, може се закључити да локална примена бетона справљеног са CSA доприноси очувању природних ресурса и смањењу капацитета депонија, па ови и слични индустријски нуспроизводи данас у многим земљама постају важан ресурс – настао трансформацијом отпада у вредну сировину.

6.2. Препоруке за даља истраживања

Истраживања вршена на бетонским мешавинама са различитим садржајем агрегата CSA дала су детаљан увид у физичко–механичке карактеристике оваквих бетона. Ипак, до сада је спроведен релативно мали број истраживања на

бетонским мешавинама са додатком CSA. Због тога постоји широк спектар могућности у којима би успешно могла да се наставе будућа испитивања. Неки од актуелних предлога за даља истраживања су:

- испитивање бетонских мешавина са садржајем замене ситних фракција CSA добијених додатним дробљењем и мљењем полазног узорка CSA са депоније;
- испитивање бетонских мешавина са садржајем замене крупних фракција CSA справљених са нижим водоцементним фактором и одговарајућим хемијским додацима (суперпластификатори и/или аеранти) у циљу постизања веће трајности;
- испитивање бетонских мешавина са додатком CSA у спрашеном облику - као делимичне замене за цемент у бетонским мешавинама.

7. ЛИТЕРАТУРА

1. C., M. The Greening of the Concrete Industry. *Cement and Concrete Composites. Cem Concr Compos* **2009**, *31*, 601–605, doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010.
2. Tam, C.; Taylor, M.; Gielen, D.; Twigg, C.; Klee, H.; Rocha, P.; Meer, R. van der Cement Technology Roadmap 2009 - Carbon Emissions Reductions up to 2050. **2009**.
3. Zhao, Q.; Liu, X.; Jiang, J. Effect of Curing Temperature on Creep Behavior of Fly Ash Concrete. *Constr Build Mater* **2015**, *96*, 326–333, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.030.
4. Radonjin, V.; Malešev, M.; Marinković, s. Mogućnost Primene Starog Betona Kao Nove Vrste Agregata u Savremenom Građevinarstvu. *Zaštita materijala* **2010**, *51*, 178–188.
5. Al-Jabri, K.S.; Hisada, M.; Al-Saidy, A.H.; Al-Oraimi, S.K. Performance of High Strength Concrete Made with Copper Slag as a Fine Aggregate. *Constr Build Mater* **2009**, *23*, 2132–2140, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.12.013.
6. Meyer, C. Concrete and Sustainable Development. *ACI Mater J* **2002**, *94*, 409–416.
7. Sankh, A.C; Biradar, P.M; Naghathan, S.J; Ishwargol, M.B. Recent Trends in Replacement of Natural Sand With Different Alternatives. *ISOR Journal of Mechanical and Civil Engineering (ISOR-JMCE)* **2014**, 59–66.
8. de Leeuw, J.; Shankman, D.; Wu, G.; de Boer, W.F.; Burnham, J.; He, Q.; Yesou, H.; Xiao, J. Strategic Assessment of the Magnitude and Impacts of Sand Mining in Poyang Lake, China. *Reg Environ Change* **2010**, *10*, 95–102, doi:10.1007/s10113-009-0096-6.
9. Kuntikana, G.; Singh, D.N. Contemporary Issues Related to Utilization of Industrial Byproducts. *Adv Civ Eng Mater* **2017**, *6*, 20160050, doi:10.1520/ACEM20160050.
10. Maharishi, A.; Singh, S.P.; Gupta, L.K.; Shehnazdeep Strength and Durability Studies on Slag Cement Concrete Made with Copper Slag as Fine Aggregates. *Mater Today Proc* **2020**, doi:10.1016/j.matpr.2020.08.232.
11. Prasad, P.S.; Ramana, G.V. Feasibility Study of Copper Slag as a Structural Fill in Reinforced Soil Structures. *Geotextiles and Geomembranes* **2016**, *44*, 623–640, doi:10.1016/j.geotextmem.2016.03.007.
12. Gorai, B.; Jana, R.K.; Premchand. Characteristics and Utilisation of Copper Slag—a Review. *Resour Conserv Recycl* **2003**, *39*, 299–313, doi:10.1016/S0921-3449(02)00171-4.
13. Dimitrijević, M.; Urošević, D.; Milić, S.; Sokić, M.; Marković, R. Dissolution of Copper from Smelting Slag by Leaching in Chloride Media. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy* **2017**, *53*, 407–412, doi:10.2298/JMMB170425016D.
14. Gupta, N.; Siddique, R. Strength and Micro-Structural Properties of Self-Compacting Concrete Incorporating Copper Slag. *Constr Build Mater* **2019**, *224*, 894–908, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.105.
15. Mahesh, B.K.; Ravitheja, A. Effect of Copper Slag as Fine Aggregate Replacement in High Strength Concrete. *Mater Today Proc* **2019**, *19*, 409–414, doi:10.1016/j.matpr.2019.07.626.

16. Vijayaraghavan, J.; Jude, A.B.; Thivya, J. Effect of Copper Slag, Iron Slag and Recycled Concrete Aggregate on the Mechanical Properties of Concrete. *Resources Policy* **2017**, *53*, 219–225, doi:10.1016/j.resourpol.2017.06.012.
17. Khanzadi, M.; Behnood, A. Mechanical Properties of High-Strength Concrete Incorporating Copper Slag as Coarse Aggregate. *Constr Build Mater* **2009**, *23*, 2183–2188, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.12.005.
18. Madhu, B. and P.V.G. Use of Copper Slag as Fine Aggregate in (Concrete) Rigid Pavements. *International Journal for Technological Research in Engineering* **2015**, *2*.
19. Alter, H. The Composition and Environmental Hazard of Copper Slags in the Context of the Basel Convention. *Resour Conserv Recycl* **2005**, *43*, 353–360, doi:10.1016/j.resconrec.2004.05.005.
20. Sharma, R.; Khan, R.A. Sustainable Use of Copper Slag in Self Compacting Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials. *J Clean Prod* **2017**, *151*, 179–192, doi:10.1016/j.jclepro.2017.03.031.
21. Brindha, D.; Nagan, S. Durability Studies on Copper Slagadmixed Concrete. *Asian Journal Of Civil Engine* **2010**, *12*, 563–578.
22. Dhir, R.K.; Brito, J. de; Mangabhai, R.; Lye, C.Q. Use of Copper Slag in Geotechnical Applications. In *Sustainable Construction Materials: Copper Slag*; Elsevier, 2017; pp. 211–245.
23. Shi, C.; Meyer, C.; Behnood, A. Utilization of Copper Slag in Cement and Concrete. *Resour Conserv Recycl* **2008**, *52*, 1115–1120, doi:10.1016/j.resconrec.2008.06.008.
24. Neves, R.; Branco, F.; de Brito, J. Field Assessment of the Relationship between Natural and Accelerated Concrete Carbonation Resistance. *Cem Concr Compos* **2013**, *41*, 9–15, doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.04.006.
25. Sharma, R.; Khan, R.A. Durability Assessment of Self Compacting Concrete Incorporating Copper Slag as Fine Aggregates. *Constr Build Mater* **2017**, *155*, 617–629, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.074.
26. Shi, C.; Qian, J. High Performance Cementing Materials from Industrial Slags — a Review. *Resour Conserv Recycl* **2000**, *29*, 195–207, doi:10.1016/S0921-3449(99)00060-9.
27. Beylot, A.; Bodéan, F.; Guezennec, A.-G.; Muller, S. LCA as a Support to More Sustainable Tailings Management: Critical Review, Lessons Learnt and Potential Way Forward. *Resour Conserv Recycl* **2022**, *183*, 106347, doi:10.1016/J.RESCONREC.2022.106347.
28. Bogdanović, G.; Trumić, M.; Antić, D. V. Upravljanje Otpadom Iz Rudarstva - Nastanak i Mogućnost Prerade. *Reciklaža i održiv razvoj* **2011**, *4*, 37–43.
29. Dhir, R.K.; Brito, J. de; Mangabhai, R.; Lye, C.Q. Production and Properties of Copper Slag. *Sustainable Construction Materials: Copper Slag* **2017**, 27–86, doi:10.1016/B978-0-08-100986-4.00003-1.

30. Boesch, M.E.; Koehler, A.; Hellweg, S. Model for Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Clinker Production. *ACS Publications*.
31. Dr Marković Z.; Mr Štirbanović Z.; Đorđević, M. RTB Kao Zagađivač Životne Sredine - Metalurgija Available online: <https://pdfslide.tips/documents/seminarski-rad-rtb-kao-zagadivac-zivotne-sredine-metalurgija.html> (accessed on 20 February 2022).
32. Požega, E.; Gomidelović, L.; Trujić, V.; Živković, D. Analiza Savremenih Tehnologija u Metalurgiji Bakra. *Bakar* **2010**, 15–25.
33. Marinković, Lj. Contribution to Investigations on the Possibility of Copper Blast Furnace Slag from Bor Usage in Pavements Construction, 1989.
34. Gržetić, I.; Brčeski, I. Degradation of Bor Slags as the Contamination Process.; 1995; pp. 95–100.
35. Urošević, D. Copper Extraction from Smelting Slag by Combined Methods, 2016.
36. Stanojlović, R.; Štirbanović, Z.; Sokolović, J. New Technological Procedure for Sustainable Processing of Mining Technological Waste. *Rudarski radovi, Bor* **2012**, 61–88, doi:10.5937/rudrad1201061S.
37. Čađenović, B.; Marjanović, V.; Ljubojev, V.; Milanović, D. Possibilities of Use the Copper Matte from Smelter Slag in Its Direct Bakrenca of Smelting Slag in Its Direct Discharge from Furnace. *Rudarski radovi, Bor* **2012**, 137–148, doi:10.5937/rudrad1202137C.
38. Stanojlović, R.; Štirbanović, Z.; Sokolović, J. Novi Tehnološki Postupak Za Održivu Preradu Rudarskog Tehnogenog Otpada **. **2012**, 1, 61–88.
39. Filipović, S.; Đokić, O.; Radević, A.; Zakić, D. Copper Slag of Pyroxene Composition as a Partial Replacement of Natural Aggregate for Concrete Production. *Minerals* **2021**, 11, 439, doi:10.3390/min11050439.
40. Muravljov, M.; Zakić, D.; Radević, A. *Tehnologija Betona-Teorija i Praksa*; 2022;
41. Jevtić, D. Mogućnost Modeliranja Svojstva Betona u Funkciji Povećanja Trajnosti. *Materijali i konstrukcije* **2008**, 51, 18–31.
42. Muravljov, M. *Gradjevinski Materijali*; 1995;
43. Sambhaji, Z.K.; Autade, Prof.P.B. Effect of Copper Slag as a Fine Aggregate on Properties of Concrete. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)* **2016**, 7.
44. Brindha, D.; Baskaran. T; Nagan. S Assessment of Corrosion and Durability Characteristics of Copper Slag Admixed Concrete. *CiteSeerX* 7M.
45. Achudhan; Deepavarsa; Vandhana; Khalida Effect of Copper Slag in Structural Behaviour of Reinforced Concrete Beams. *Mater Today Proc* **2018**, 5, 6878–6887, doi:10.1016/j.matpr.2017.11.349.
46. Patil, M. V.; Patil, Y.D.; Veshmawala, G.R. Performance of Copper Slag as Sand Replacement in Concrete. *International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562* **2016**, 11, 4349–4353.

47. Lori, A.R.; Hassani, A.; Sedghi, R. Investigating the Mechanical and Hydraulic Characteristics of Pervious Concrete Containing Copper Slag as Coarse Aggregate. *Constr Build Mater* **2019**, *197*, 130–142, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.230.
48. Al-Jabri, K.S.; Al-Saidy, A.H.; Taha, R. Effect of Copper Slag as a Fine Aggregate on the Properties of Cement Mortars and Concrete. *Constr Build Mater* **2011**, *25*, 933–938.
49. Al-Jabri, K.S.; Hisada, M.; Al-Oraimi, S.K.; Al-Saidy, A.H. Copper Slag as Sand Replacement for High Performance Concrete. *Cem Concr Compos* **2009**, *31*, 483–488.
50. Al-Jabri, K.S.; Hisada, M.; Al-Oraimi, S.K.; Al-Saidy, A.H. Copper Slag as Sand Replacement for High Performance Concrete. *Cem Concr Compos* **2009**, *31*, 483–488, doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.04.007.
51. Ibrahim, H.A.; Abdul Razak, H. Effect of Palm Oil Clinker Incorporation on Properties of Pervious Concrete. *Constr Build Mater* **2016**, *115*, 70–77, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.181.
52. CEB Bull 1989;192:83–5. *Diagnosis and Assessment of Concrete Structures – State of Art Report*;
53. Swathi, J.; Ms.Gnanadevi V. An Experimental Investigation on Concrete by Partial Replacement of Copper Slag for Fine Aggregate and Ceramic Waste with Coarse.; 2015; Vol. 13, pp. 137–142.
54. Karthickraja R; Vignesh J An Experimental Investigation on Concrete by Partial Replacement of Copper Slag with Fine Aggregate and Ceramic Waste with Coarse Aggregate. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)* **2018**, *6*.
55. Zarauskas, L.; Skripiūnas, G.; Girskas, G. Influence of Aggregate Granulometry on Air Content in Concrete Mixture and Freezing - Thawing Resistance of Concrete. *Modern Building Materials, Structures and Techniques* **2016**.
56. Aligizaki, K.K. *Pore Structure of Cement-Based Materials*; CRC Press, 2005; ISBN 9780429079313.
57. Zarauskas, L.; Skripiūnas, G.; Girskas, G. Influence of Aggregate Granulometry on Air Content in Concrete Mixture and Freezing - Thawing Resistance of Concrete. *Procedia Eng* **2017**, *172*, 1278–1285, doi:10.1016/j.proeng.2017.02.153.
58. Pourbaix, M. Applications of Electrochemistry in Corrosion Science and in Practice. *Corros Sci* **1974**, *14*, 25–82, doi:10.1016/S0010-938X(74)80006-5.
59. Šavija, B.; Luković, M. Carbonation of Cement Paste: Understanding, Challenges, and Opportunities. *Constr Build Mater* **2016**, *117*, 285–301, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.04.138.
60. Šavija, B.; Luković, M. Carbonation of Cement Paste: Understanding, Challenges, and Opportunities. *Constr Build Mater* **2016**, *117*, 285–301, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.138.
61. Tans, P.; Keeling, R. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, Earth Syst. Res. Lab. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html> **2015**.

62. Roy, S.K.; Poh, K.B.; Northwood, D.O. Durability of Concrete—Accelerated Carbonation and Weathering Studies. *Build Environ* **1999**, *34*, 597–606, doi:10.1016/S0360-1323(98)00042-0.
63. Hyvert, N.; Sellier, A.; Duprat, F.; Rougeau, P.; Francisco, P. Dependency of C–S–H Carbonation Rate on CO₂ Pressure to Explain Transition from Accelerated Tests to Natural Carbonation. *Cem Concr Res* **2010**, *40*, 1582–1589, doi:10.1016/J.CEMCONRES.2010.06.010.
64. Khunthongkeaw, J.; Tangtermsirikul, S.; Leelawat, T. A Study on Carbonation Depth Prediction for Fly Ash Concrete. *Constr Build Mater* **2006**, *20*, 744–753, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2005.01.052.
65. Sisomphon, K.; Franke, L. Carbonation Rates of Concretes Containing High Volume of Pozzolanic Materials. *Cem Concr Res* **2007**, *37*, 1647–1653, doi:10.1016/J.CEMCONRES.2007.08.014.
66. Siriwardena, D.P.; Peethamparan, S. Quantification of CO₂ Sequestration Capacity and Carbonation Rate of Alkaline Industrial Byproducts. *Constr Build Mater* **2015**, *91*, 216–224, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.05.035.
67. Guiglia, M.; Taliano, M. Comparison of Carbonation Depths Measured on In-Field Exposed Existing r.c. Structures with Predictions Made Using Fib-Model Code 2010. *Cem Concr Compos* **2013**, *38*, 92–108, doi:10.1016/J.CEMCONCOMP.2013.03.014.
68. Chatterji, S.; Snyder, K.A.; Marchand, J. Depth Profiles of Carbonates Formed during Natural Carbonation. *Cem Concr Res* **2002**, *32*, 1923–1930, doi:10.1016/S0008-8846(02)00908-0.
69. Young, J.F.; Berger, R.L.; Breese, J. Accelerated Curing of Compacted Calcium Silicate Mortars on Exposure to CO₂. *Journal of the American Ceramic Society* **1974**, *57*, 394–397, doi:10.1111/j.1151-2916.1974.tb11420.x.
70. Goodbrake, C.J.; Young, J.F.; Berger, R.L. Reaction of Hydraulic Calcium Silicates with Carbon Dioxide and Water. *Journal of the American Ceramic Society* **1979**, *62*, 488–491, doi:10.1111/j.1151-2916.1979.tb19112.x.
71. Berger, R.L.; Klemm, W.A. Accelerated Curing of Cementitious Systems by Carbon Dioxide: Part II. Hydraulic Calcium Silicates and Aluminates. *Cem Concr Res* **1972**, *2*, 647–652, doi:10.1016/0008-8846(72)90002-6.
72. Bukowski, J.M.; Berger, R.L. Reactivity and Strength Development of CO₂ Activated Non-Hydraulic Calcium Silicates. *Cem Concr Res* **1979**, *9*, 57–68, doi:10.1016/0008-8846(79)90095-4.
73. Yixin Shao, H.E.-H. CO₂ Utilization in Concrete. *Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*.
74. Mahoutian, M.; Ghoulah, Z.; Shao, Y. Carbon Dioxide Activated Ladle Slag Binder. *Constr Build Mater* **2014**, *66*, 214–221, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.05.063.
75. Warda, A. Carbonation of Cement-Based Materials: Challenges and Opportunities. *Constr Build Mater* **2016**, *120*, 558–570.

76. Balayssac, J.P.; Détriché, C.H.; Grandet, J. Effects of Curing upon Carbonation of Concrete. *Constr Build Mater* **1995**, *9*, 91–95, doi:10.1016/0950-0618(95)00001-V.
77. Elsener, B. Corrosion of Steel in Concrete. In *Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment*; Wiley-VCH Verlag GmbH: Weinheim, Germany; pp. 389–436.
78. Verbeck, G. Carbonation of Hydrated Portland Cement. *books.google.com* **1958**.
79. Svenningsen N. The Sustainable Buildings and Construction Initiative. In Proceedings of the UNEP FI Property Investment Group Paris; United Nations Environment Programme, 2007.
80. Marinkovic, S.B. Life Cycle Assessment (LCA) Aspects of Concrete. *Eco-Efficient Concrete* **2013**, 45–80, doi:10.1533/9780857098993.1.45.
81. de Brito, J.; Hafez, H.; Kurda, R.; Silvestre, J. Calculation of the Environmental Impact of the Integration of Industrial Waste in Concrete Using LCA. *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management* **2022**, 553–577, doi:10.1016/B978-0-12-821730-6.00020-6.
82. Lukić, I. Primena LCA u Građevinarstvu. *nauka + praksa* **2009**.
83. Braganca, L., M.R., (2008) Global Methodology for Sustainability Assessment: Integration of Environmental LCA in Rating Systems.
84. Meteorological Administration; Korea Meteorological Administration *Department of Climate Policy. Climate Change Handbook*; 2009;
85. Jullien, A.; Proust, C.; Martaud, T.; Rayssac, E.; Ropert, C. Variability in the Environmental Impacts of Aggregate Production. *Resour Conserv Recycl* **2012**, *62*, 1–13, doi:10.1016/J.RESCONREC.2012.02.002.
86. Fischer C., W.M. *European Topic Centre on Resource Waste Management, Working Paper 2/2009. European Topic Centre on Sustainable Consumption and Production, Copenhagen, Denmark*; 2009;
87. Ministry of the Interior *Carbon on Green Growth*; 2013;
88. Ministry of Environment *Waste Recycling: Extended Producer Responsibility*; 2012;
89. Butera, S.; Christensen, T.H.; Astrup, T.F. Life Cycle Assessment of Construction and Demolition Waste Management. *Waste Management* **2015**, *44*, 196–205, doi:10.1016/J.WASMAN.2015.07.011.
90. Tam, V.W.Y.; Soomro, M.; Evangelista, A.C.J. A Review of Recycled Aggregate in Concrete Applications (2000–2017). *Constr Build Mater* **2018**, *172*, 272–292, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.240.
91. Rodríguez-Robles, D.; V.D.H.P.; D.B.N. *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*; Woodhead Publishing: Cambridge. 2019, pp. 207–256.
92. Park, W.-J.; Kim, T.; Roh, S.; Kim, R. Analysis of Life Cycle Environmental Impact of Recycled Aggregate. *Applied Sciences* **2019**, *9*, 1021, doi:10.3390/app9051021.

93. Marinković, S. Ocena Životnog Ciklusa Betonskih Konstrukcija.
94. Đorđević, J.; Orešković, M.; Mladenović, G. The Possibility of the Application of Copper Slag in Asphalt Mixtures. *Put i saobraćaj* **2018**, *64*, doi:10.31075/PIS.64.04.04.
95. Maluckov, B. Waste from Mining-Metallurgical Production of Copper and Treatment of It. *Tehnika* **2017**, *72*, 819–824, doi:10.5937/tehnika1706819m.
96. Dey, A.; Dev, D.; Saha, P. Use of Copper Slag as Sustainable Aggregate. *Icsci 2014* **2015**, *1*, 229–240.
97. Al-Jabri, K.S.; Al-Saidy, A.H.; Taha, R. Effect of Copper Slag as a Fine Aggregate on the Properties of Cement Mortars and Concrete. *Constr Build Mater* **2011**, *25*, 933–938, doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.090.
98. Urosevic, D. Copper Extraction from Smelting Slag by Combined Methods, The University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, 2016.
99. Baghalha, M.; Papangelakis, V.G.; Curlook, W. Factors Affecting the Leachability of Ni/Co/Cu Slags at High Temperature. *Hydrometallurgy* **2007**, *85*, 42–52, doi:10.1016/j.hydromet.2006.07.007.
100. Zivkovic, Z.; Mitevska, N.; Mihajlovic, I.; Nikolic, D. The Influence of the Silicate Slag Composition on Copper Losses during Smelting of the Sulfide Concentrates. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy* **2009**, *45*, 23–34, doi:10.2298/JMMB0901023Z.
101. Wang, D.; Wang, Q.; Huang, Z. Reuse of Copper Slag as a Supplementary Cementitious Material: Reactivity and Safety. *Resour Conserv Recycl* **2020**, *162*, 105037, doi:10.1016/j.resconrec.2020.105037.
102. Wang, D.; Wang, Q.; Huang, Z. Reuse of Copper Slag as a Supplementary Cementitious Material: Reactivity and Safety. *Resour Conserv Recycl* **2020**, *162*, 105037, doi:10.1016/j.resconrec.2020.105037.
103. SRPS EN 933-1:2012 European Standard Emitted by CEN, European Committee for Standardization: Determination of Particle Size Distribution — Sieving Method. In; Technical Committee CEN/TC154 “Aggregates,” 2012; p. 18.
104. SRPS EN 933-4:2008 European Standard Emitted by CEN, European Committee for Standardization: Determination of Particle Shape — Shape Index. In; Technical Committee CEN/TC154 “Aggregates,” 2008; p. 11.
105. SRPS EN 12620+A1:2008 European Standard Emitted by CEN, European Committee for Standardization: Aggregates for Concrete. In; Technical Committee CEN/TC154 “Aggregates,” 2008; p. 56.
106. SRPS B.B8.030:1986 Kameni Agregat - Određivanje Zapreminske Mase u Rastresitom i Zbijenom Stanju Mineral Agregat - Determination of Unit Weight. **1986**.
107. SRPS EN 1097-6:2013 European Standard Emitted by CEN, European Committee for Standardization: Determination of Particle Density and Water Absorption. In; Technical Committee CEN/TC154 “Aggregates,” 2013; p. 49.

108. SRPS B.B8.033:1994 Kameni Agregat - Određivanje Drobljivosti u Cilindru Mineral Aggregate - Determination of Crushability by Compression in Cylinder. **1994**.
109. SRPS B.B8.036:1982 *Kameni Agregat - Određivanje Količine Sitnih Čestica Metodom Mokrog Sejanja Crushed Aggregate - Determination of Fine Particles with the Wet Sieve Analysis*; 1982;
110. SRPS EN 1097-1:2011 European Standard Emitted by CEN, European Committee for Standardization: Determination of the Resistance to Wear (Micro-Deval). In; Technical Committee CEN/TC154 "Aggregates," 2011; p. 13.
111. SRPS EN 1097-8:2009 European Standard Emitted by CEN, European Committee for Standardization: Determination of the Polished Stone Value. In; Technical Committee CEN/TC154 "Aggregates," 2009; p. 31.
112. Moosberg, H.; Lagerblad, B.; Forssberg, E. The Use of By-Products from Metallurgical and Mineral Industries as Filler in Cement-Based Materials. *Waste Management & Research* **2003**, *21*, 29–37, doi:10.1177/0734242X0302100104.
113. Urošević, D. Ekstrakcija Bakra Iz Topioničke Šljake Kombinovanim Postupcima, 2016.
114. Killick, D.; Miller, D.; Thondhlana, T.P.; Martín-Torres, M. Copper Mining and Smelting Technology in the Northern Lowveld, South Africa, ca. 1000 CE to ca. 1880 CE. *J Archaeol Sci* **2016**, *75*, 10–26, doi:10.1016/j.jas.2016.08.011.
115. Ray, H.S.; Sridhar, R.; Abraham, K.P. *Extraction of Nonferrous Metals*; New Delhi, India: EWP, 2014; ISBN 8185095639.
116. Brzaković, P. Prilog Problemu Sistematizacije Veziva Na Bazi Cementnog Klinkera i Dodataka Nemetaličnog Porekla. *Građevinski materijali i konstrukcije* **2002**, *45*, 23–33.
117. SRPS EN 197-1:2011 *Cement - Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements*; 2011;
118. SRPS U.M1.206:2013 *Concrete - Specification, Performance, Production and Conformity*; Technical Committee KS U104 "Concrete and related products": Belgrade, Serbia, 2013; p. 53;.
119. Jevtić, D.; Zakić, D.; Savić, A.; Radević, A. Statistical Analysis of Concrete Quality Testing Results. *Gradjevinski materijali i konstrukcije* **2014**, *57*, 45–52, doi:10.5937/grmk1401045J.
120. SRPS EN 12350-2:2019 *Ispitivanje Svežeg Betona – Deo 2: Ispitivanje Sleganja. Testing Fresh Concrete - Part 2: Slump Test.*; 2019;
121. SRPS EN 12350-5:2019 *Ispitivanje Svežeg Betona – Deo 5: Ispitivanje Rasprostiranja Pomoću Potresne Table. Testing Fresh Concrete - Part 5: Flow Table Test*; 2019;
122. SRPS EN 12350-7:2019 *Испитивање Свежег Бетона – Део 7: Садржај Ваздуха – Методе Притиска Fresh Concrete - Part 7: Air Content - Pressure Methods*; 2019;
123. SRPS EN 12390-3:2019 *Testing Hardened Concrete-Part 3: Compressive Strength of Test Specimens*. In; Technical Committee CEN/TS, 2019; p. 20.

124. SRPS EN 12390-3:2019 Testing Hardened Concrete - Part 3: Compressive Strength of Test Specimens. In; 2019; p. 9.
125. SRPS EN 12390-5 *Testing Hardened Concrete - Part 5: Flexural Strength of Test Specimens*; 2009;
126. SRPS EN 12390-6 Ispitivanje Očvrstlog Betona - Deo 6: Čvrstoća Pri Cepanju Zatezanjem Uzorka Za Ispitivanje. In; 2012; p. 15.
127. SRPS EN 1542:2010 Proizvodi i Sistemi Za Zaštitu i Sanaciju Betonskih Konstrukcija - Metode Ispitivanja - Merenje Prionljivosti "Pull-off" Metodom. **2010**.
128. SRPS EN 12390-8:2019 Testing Hardened Concrete. Depth of Penetration of Water under Pressure. In; Technical Committee CEN/TS, 2019; p. 8.
129. SRPS EN 12390-9:2006 Testing Hardened Concrete - Part 9: Freeze-Thaw Resistance with de-Icing Salts - Scaling. In; Technical Committee CEN/TS, 2006; p. 11.
130. SRPS EN 12390-2:2009 *Testing Hardened Concrete - Part 2: Making and Curing Specimens for Strength Tests*; 2009;
131. NT Build 492 Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments. In *Measurement*; 1999; pp. 1–8.
132. Castellote, M.; Andrade, C.; Alonso, C. Measurement of the Steady and Non-Steady-State Chloride Diffusion Coefficients in a Migration Test by Means of Monitoring the Conductivity in the Anolyte Chamber. Comparison with Natural Diffusion Tests. *Cem Concr Res* **2001**, *31*, 1411–1420, doi:10.1016/S0008-8846(01)00562-2.
133. Yuan, Q.; Santhanam, M. Erratum to: Test Methods for Chloride Transport in Concrete. In; 2013; pp. E1–E1.
134. Ugur, I.; Demirdag, S.; Yavuz, H. Effect of Rock Properties on the Los Angeles Abrasion and Impact Test Characteristics of the Aggregates. *Mater Charact* **2010**, *61*, 90–96, doi:10.1016/j.matchar.2009.10.014.
135. SRPS CEN/TS 12390-10:2008 *Ispitivanje Očvrstlog Betona — Deo 10: Određivanje Relativne Otpornosti Betona Prema Karbonatizaciji*; 2008;
136. Pade, C.; Guimaraes, M. The CO₂ Uptake of Concrete in a 100 Year Perspective. *Cem Concr Res* **2007**, *37*, 1348–1356, doi:10.1016/J.CEMCONRES.2007.06.009.
137. Ding, Z.; Quy, N.X.; Noguchi, T.; Kim, J.; Hama, Y. A Study on the Change in Frost Resistance and Pore Structure of Concrete Containing Blast Furnace Slag under the Carbonation Conditions. *Constr Build Mater* **2022**, *331*, 127295, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127295.
138. Berger, R.L.; Young, J.F.; Leung, K. Acceleration of Hydration of Calcium Silicates by Carbon Dioxide Treatment. *Nature Physical Science* **1972**, *240*, 16–18, doi:10.1038/physci240016a0.
139. Zhang, D.; Shao, Y. Early Age Carbonation Curing for Precast Reinforced Concretes. *Constr Build Mater* **2016**, *113*, 134–143, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.048.

140. Dong, B.; Qiu, Q.; Xiang, J.; Huang, C.; Xing, F.; Han, N.; Lu, Y. Electrochemical Impedance Measurement and Modeling Analysis of the Carbonation Behavior for Cementitious Materials. *Constr Build Mater* **2014**, *54*, 558–565, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.100.
141. de Ceukelaire, L.; van Nieuwenburg, D. Accelerated Carbonation of a Blast-Furnace Cement Concrete. *Cem Concr Res* **1993**, *23*, 442–452, doi:10.1016/0008-8846(93)90109-M.
142. Zhang, D.; Shao, Y. Surface Scaling of CO₂-Cured Concrete Exposed to Freeze-Thaw Cycles. *Journal of CO₂ Utilization* **2018**, *27*, 137–144, doi:10.1016/J.JCOU.2018.07.012.
143. Zhang, D.; Shao, Y. Effect of Early Carbonation Curing on Chloride Penetration and Weathering Carbonation in Concrete. *Constr Build Mater* **2016**, *123*, 516–526, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.07.041.
144. <https://www.setac.org/> <https://www.setac.org/>.
145. <https://www.iso.org/> <https://www.iso.org/>.
146. Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; de Koning, A.; van Oers, L.; Wegener Sleswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; et al. Operational Guide to the ISO Standards. I: LCA in Perspective. IIa: Guide. IIb: Operational Annex. III: Scientific Background. In *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*; 2002.
147. Dones, R.; Bauer, C.; Bolliger, R.; Burger, B.; Heck, T.; Röder, A.; Paul Scherrer Institut; Emmenegger, M.F.; Frischknecht, R.; Jungbluth, N.; et al. Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and Other UCTE Countries. *Ecoinvent report. Dübendorf* **2007**.
148. Spielmann, M.; Bauer, C.; Dones, R.; Tuchschnid, M. Transport Services. Ecoinvent Report . *Swiss Cent. Life Cycle Invent.* **2007**, no. 14.

Прилог А

РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА ЧВРСТОЋЕ ПРИ ПРИТИСКУ И
ЗАПРЕМИНСКЕ МАСЕ БЕТОНСКИХ МЕШАВИНА У ОЧВРСЛОМ СТАЊУ

Табела А.1. Резултати испитивања чврстоће при притиску и запреминске масе очврслих бетонских мешавина

| Мешавина | Чврстоћа при притиску (МПа) | | | γ (kg/m ³) | | |
|-------------------|-----------------------------|--------|---------|-------------------------------|--------|---------|
| | 1 дан | 7 дана | 28 дана | 1 дан | 7 дана | 28 дана |
| Еталон | 16.1 | 26.2 | 38.3 | 2316 | 2336 | 2356 |
| | 16.8 | 30.5 | 34.8 | 2260 | 2295 | 2326 |
| | 17.1 | 27.4 | 35.7 | 2332 | 2283 | 2307 |
| 20% III + 20% IV | 17.0 | 26.4 | 39.6 | 2279 | 2344 | 2308 |
| | 18.9 | 27.7 | 41.6 | 2399 | 2359 | 2427 |
| | 16.9 | 27.5 | 41.1 | 2359 | 2345 | 2329 |
| 50% III+50%IV | 17.1 | 29.8 | 42.4 | 2436 | 2461 | 2404 |
| | 20.1 | 31.1 | 39.4 | 2456 | 2514 | 2341 |
| | 18.8 | 30.8 | 38.6 | 2399 | 2412 | 2421 |
| 50% III + 100% IV | 23.2 | 36.2 | 40.4 | 2422 | 2462 | 2455 |
| | 20.6 | 34.9 | 43.6 | 2529 | 2424 | 2516 |
| | 21.5 | 35.2 | 43.0 | 2513 | 2436 | 2425 |
| 20% III + 50% IV | 18.7 | 34.5 | 38.8 | 2406 | 2401 | 2344 |
| | 21.8 | 35.2 | 40.4 | 2428 | 2406 | 2360 |
| | 19.8 | 32.7 | 43.3 | 2430 | 2396 | 2375 |
| 100% III + 50% IV | 17.7 | 32.1 | 41.4 | 2458 | 2459 | 2431 |
| | 18.5 | 37.1 | 47.5 | 2444 | 2425 | 2433 |
| | 19.1 | 39.2 | 42.0 | 2496 | 2461 | 2353 |

Прилог Б

РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА СВЕЖИХ БЕТОНСКИХ МЕШАВИНА

Табела Б 1. Резултати испитивања бетона у свежем стању

| Мешавина | Слегање [cm] | Распростирање [cm] | Запреминска маса [kg/m ³] | Увучени ваздух [%] |
|-----------------|--------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Контролна | 15 | 33 | 2331 | 1.9 |
| 20% III+20% IV | 21 | 36 | 2424 | 1.7 |
| 50% III+50% IV | 20 | 28 | 2244 | 1.6 |
| 50% III+100% IV | 13 | 35 | 2456 | 1.4 |
| 20% III+50% IV | 15 | 32 | 2443 | 1.8 |
| 100% III+50% IV | 13 | 27 | 2520 | 1.7 |

Прилог Ц

РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА ЧВРСТОЋЕ ПРИ ПРИТИСКУ, ЧВРСТОЋЕ ПРИ
ЗАТЕЗАЊУ ЦЕПАЊЕМ, ЧВРСТОЋЕ ПРИ ЗАТЕЗАЊУ САВИЈАЊЕМ, Pull-off
И ПЕНЕТРАЦИЈЕ ВОДЕ ПОД ПРИТИСКОМ.

Табела Ц 1. Резултати испитивања чврстоће при затезању цепањем по мешавинама

| Мешавина | Чврстоћа при притиску | |
|-------------------|-----------------------|---------------|
| | савијањем у МРа | |
| | након 7 дана | након 28 дана |
| Еталон | 6.19 | 7.13 |
| | 6.69 | 5.91 |
| | 6.53 | 6.47 |
| 20% III+20% IV | 5.75 | 6.38 |
| | 6.63 | 6.44 |
| | 6.13 | 6.88 |
| 50% III + 50% IV | 6.25 | 6.31 |
| | 6.91 | 6.88 |
| | 6.13 | 6.03 |
| 50% III + 100% IV | 6.94 | 5.75 |
| | 6.38 | 5.81 |
| | 6.25 | 6.06 |
| 20% III + 50% IV | 6.38 | 6.19 |
| | 6.50 | 6.56 |
| | 6.19 | 6.06 |
| 100% III + 50% IV | 6.25 | 6.00 |
| | 6.31 | 6.31 |
| | 6.30 | 7.13 |

Табела Ц 2. Чврстоће при притиску и запреминске масе за сваки испитани узорак

| Мешавина | γ (kN/m ³) | | | Чврстоћа при притиску (MPa) a=15 cm | | |
|--------------------|-------------------------------|--------|---------|--|--------|---------|
| | Након | Након | Након | Након | Након | Након |
| | 1 дана | 7 дана | 28 дана | 1 дана | 7 дана | 28 дана |
| Еталон | 2329 | 2325 | 2292 | 17.9 | 30.9 | 40.2 |
| 20% III+20%IV | 2339 | 2357 | 2350 | 18.5 | 30.4 | 42.2 |
| 50% III + 50% IV | 2480 | 2443 | 2450 | 22.3 | 39.6 | 48.8 |
| 20% III + 100% IV | 2490 | 2495 | 2489 | 20.6 | 36.1 | 44.6 |
| 50% III + 100% IV | 2499 | 2511 | 2503 | 16.6 | 33.6 | 40.8 |
| 100% III + 100% IV | 2539 | 2552 | 2550 | 19.2 | 36.0 | 46.5 |

Табела Ц 3. Резултати испитивања чврстоће при затезању савијањем по мешавинама

| Мешавина | Чврстоћа при затезању савијањем у MPa | |
|-------------------|--|---------------|
| | након 7 дана | након 28 дана |
| | Еталон | 6.47 |
| 20% III + 20% IV | 6.17 | 6.57 |
| 50% III + 50% IV | 6.43 | 6.40 |
| 50% III + 100% IV | 6.52 | 5.87 |
| 20% III + 50% IV | 6.35 | 6.27 |
| 100% III + 50% IV | 6.29 | 6.48 |

Табела Ц 4. Измерене вредности дубине продора воде под притиском

| Мешавина | Након 28 дана |
|-------------------|------------------|
| | mm |
| | 87 |
| Еталон | 78 |
| | 85 |
| | 102 |
| 20% III + 20% IV | 85 |
| | 93 |
| | 105 |
| 50% III + 50% IV | 111 |
| | 104 |
| | 90 |
| 50% III + 100% IV | 112 |
| | 104 |
| | 122 |
| 20% III + 50% IV | 136 |
| | 131 |
| | 140 |
| 100% III + 50% IV | 108 |
| | 115 |

Табела Ц 5. Резултати мерења силе чупања на бетонима старости 7 и 28 дана

| Мешавина | Након 7 дана | Након 28 дана |
|-------------------|--------------|---------------|
| | МПа | МПа |
| Еталон | 1.47 | 2.69 |
| | 1.21 | 3.29 |
| | 1.6 | 3.04 |
| 20% III + 20% IV | 1.62 | 2.22 |
| | 2.2 | 3.06 |
| | 2.29 | 2.32 |
| 50% III + 50% IV | 1.73 | 2.67 |
| | 1.94 | 2.22 |
| | 1.91 | 2.20 |
| 50% III + 100% IV | 2.23 | 2.85 |
| | 2.1 | 2.69 |
| | 2.39 | 2.60 |
| 20% III + 50% IV | 1.49 | 2.09 |
| | 1.36 | 2.43 |
| | 1.75 | 2.99 |
| 100% III + 50% IV | 2.19 | 2.84 |
| | 1.92 | 2.29 |
| | 1.78 | 2.22 |

Прилог Д

САСТАВ БЕТОНСКИХ МЕШАВИНА

Табела Д.1. Састав бетонских мешавина са садржајем агрегата CSA као замене за агрегат RA

| Мешавине | $\gamma_{\text{бетона}}$ | Вода | Речни агрегат (RA) | | | | Агрегат од бакарне шљакe (CSA) | | Цемент | v/c^* |
|-------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|----------|---------|
| | m_v | [0/4] | [4/8] | [8/16] | [16/31.5] | [8/16] | [16/31.5] | m_c | ω | |
| | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [-] | |
| Еталон | | | | | 343 | 428 | - | - | | |
| 20% III + 20% IV | | | | | 274 | 343 | 94 | 118 | | |
| 50% III + 50% IV | | | | | 172 | 214 | 236 | 294 | | |
| 50% III + 100% IV | 2500 | 212 | 732 | 274 | 183 | - | 251 | 628 | 398 | 0.533 |
| 20% III + 50% IV | | | | | 265 | 214 | 101 | 294 | | |
| 100% III + 50% IV | | | | | - | 214 | 502 | 294 | | |

Прилог Е

РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА СКУПЉАЊА

Табела Е.1. Очитавање мерења скупљања узорака бетонске мешавине 100% III + 50% IV

| ОЗНАКА | УЗОРАК | СТРАНА | ДАН ОЧИТАВАЊА | | | | | | |
|-------------------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 1. ДАН | 3. ДАН | 7. ДАН | 10. ДАН | 14. ДАН | 21. ДАН | 28. ДАН |
| 100% III + 50% IV | 1 | 1 | -0.136 | -0.140 | -0.144 | -0.145 | -0.148 | -0.154 | -0.167 |
| | | 2 | -0.243 | -0.250 | -0.252 | -0.254 | -0.256 | -0.260 | -0.265 |
| | 2 | 1 | -0.160 | -0.165 | -0.168 | -0.170 | -0.175 | -0.185 | -0.191 |
| | | 2 | -0.344 | -0.350 | -0.353 | -0.355 | -0.357 | -0.362 | -0.376 |
| | 3 | 1 | -0.150 | -0.154 | -0.159 | -0.162 | -0.165 | -0.172 | -0.186 |
| | | 2 | -0.187 | -0.189 | -0.194 | -0.195 | -0.197 | -0.204 | -0.212 |

Табела Е 1. Очитавање мерења скупљања узорака бетонске мешавине 20% III + 50% IV

| ОЗНАКА | УЗОРАК | СТРАНА | ДАН ОЧИТАВАЊА | | | | | | |
|------------------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 1. ДАН | 3. ДАН | 7. ДАН | 10. ДАН | 14. ДАН | 21. ДАН | 28. ДАН |
| 20% III + 50% IV | 1 | 1 | -0.127 | -0.128 | -0.135 | -0.137 | -0.141 | -0.148 | -0.158 |
| | | 2 | -0.232 | -0.233 | -0.238 | -0.248 | -0.254 | -0.260 | -0.267 |
| | 2 | 1 | -0.137 | -0.139 | -0.144 | -0.148 | -0.151 | -0.158 | -0.167 |
| | | 2 | -0.156 | -0.159 | -0.162 | -0.163 | -0.165 | -0.172 | -0.188 |
| | 3 | 1 | -0.192 | -0.193 | -0.195 | -0.197 | -0.199 | -0.218 | -0.227 |
| | | 2 | -0.059 | -0.060 | -0.067 | -0.074 | -0.080 | -0.086 | -0.094 |

Tabela E 2. Очитавање мерења узорака за бетонску мешавину 50% III + 100% IV

| ОЗНАКА | УЗОРАК | СТРАНА | ДАН ОЧИТАВАЊА | | | | | | |
|-------------------|--------|--------|---------------|--------|--------|----------|---------|---------|----------|
| | | | 1. ДАН | 3. ДАН | 7. ДАН | 10. ДАН. | 14. ДАН | 21. ДАН | 28. ДАН. |
| 50% III + 100% IV | 1 | 1 | -0.157 | -0.158 | -0.166 | -0.178 | -0.180 | -0.182 | -0.190 |
| | | 2 | -0.147 | -0.148 | -0.153 | -0.157 | -0.160 | -0.168 | -0.178 |
| | 2 | 1 | -0.185 | -0.188 | -0.190 | -0.191 | -0.194 | -0.201 | -0.209 |
| | | 2 | -0.281 | -0.283 | -0.285 | -0.287 | -0.290 | -0.298 | -0.309 |
| | 3 | 1 | -0.163 | -0.167 | -0.174 | -0.177 | -0.181 | -0.188 | -0.194 |
| | | 2 | -0.132 | -0.135 | -0.138 | -0.144 | -0.149 | -0.157 | -0.164 |

Tabela E 3. Очитавање мерења узорака за бетонску мешавину 50% III + 50% IV

| ОЗНАКА | УЗОРАК | СТРАНА | ДАН ОЧИТАВАЊА | | | | | | |
|------------------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 1. ДАН | 3. ДАН | 7. ДАН | 10. ДАН | 14. ДАН | 21. ДАН | 28. ДАН |
| 50% III + 50% IV | 1 | 1 | -0.313 | -0.314 | -0.318 | -0.321 | -0.325 | -0.336 | -0.348 |
| | | 2 | -0.183 | -0.184 | -0.188 | -0.191 | -0.195 | -0.209 | -0.217 |
| | 2 | 1 | -0.165 | -0.166 | -0.173 | -0.179 | -0.184 | -0.192 | -0.199 |
| | | 2 | -0.149 | -0.150 | -0.160 | -0.171 | -0.174 | -0.179 | -0.184 |
| | 3 | 1 | -0.165 | -0.166 | -0.171 | -0.174 | -0.178 | -0.191 | -0.200 |
| | | 2 | -0.122 | -0.123 | -0.127 | -0.133 | -0.138 | -0.149 | -0.156 |

Tabela E 4. Очитавање мерења узорака за бетонску мешавину 20% III + 20% IV

| ОЗНАКА | УЗОРАК | СТРАНА | ДАН ОЧИТАВАЊА | | | | | | |
|------------------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 1. ДАН | 3. ДАН | 7. ДАН | 10. ДАН | 14. ДАН | 21. ДАН | 28. ДАН |
| 20% III + 20% IV | 1 | 1 | -0.195 | -0.196 | -0.200 | -0.203 | -0.207 | -0.219 | -0.227 |
| | | 2 | -0.168 | -0.169 | -0.171 | -0.173 | -0.175 | -0.189 | -0.198 |
| | 2 | 1 | -0.156 | -0.157 | -0.159 | -0.162 | -0.165 | -0.179 | -0.187 |
| | | 2 | -0.149 | -0.150 | -0.155 | -0.159 | -0.162 | -0.178 | -0.184 |
| | 3 | 1 | -0.164 | -0.165 | -0.170 | -0.176 | -0.188 | -0.197 | -0.201 |
| | | 2 | -0.154 | -0.155 | -0.161 | -0.168 | -0.174 | -0.187 | -0.193 |

Tabela E 5. Очитавање мерења узорака за контролну бетонску мешавину ЕТАЛОН

| ОЗНАКА | УЗОРАК | СТРАНА | ДАН ОЧИТАВАЊА | | | | | | |
|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 1. ДАН | 3. ДАН | 7. ДАН | 10. ДАН | 14. ДАН | 21. ДАН | 28. ДАН |
| ЕТАЛОН | 1 | 1 | -0.294 | -0.296 | -0.307 | -0.315 | -0.320 | -0.327 | -0.331 |
| | | 2 | -0.183 | -0.185 | -0.191 | -0.196 | -0.201 | -0.214 | -0.221 |
| | 2 | 1 | -0.250 | -0.253 | -0.261 | -0.268 | -0.275 | -0.283 | -0.289 |
| | | 2 | -0.211 | -0.213 | -0.222 | -0.228 | -0.231 | -0.246 | -0.253 |
| | 3 | 1 | -0.231 | -0.234 | -0.239 | -0.244 | -0.247 | -0.267 | -0.271 |
| | | 2 | -0.134 | -0.136 | -0.143 | -0.147 | -0.152 | -0.167 | -0.173 |

Прилог Ф

РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА ДЕЈСТВА ХЛОРИДА

Tabela Φ 1. Очитавање мерења узорака за бетонску мешавину 50% III+50% IV

| | | L (cm) | I ₃₀ | t _{poč.} | t _{kraj.} | x _{D, sr.} | DRCM · 10E-12 |
|----------------|-------|--------|-----------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------|
| 50% III+50% IV | III/1 | 51,0 | 113,0 | 22,8 | 22,9 | 46,0 | 34.5 |
| | III/2 | 51,5 | 151,3 | 22,8 | 22,9 | 50,0 | 39.2 |
| | III/3 | 51,0 | 105,5 | 22,8 | 22,9 | 45,4 | 34 |

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Сандра Гушевац је рођена 17.02.1984. године у Бору. Основну школу „IX српска ударна бригада“ и гимназију “Борисав Станковић“ завршила је у Бору.

Студије на Грађевинско-архитектонском факултету Универзитета у Нишу, Одсек за конструкције, завршила је 2011 године. Дипломски рад је одбранила на тему „Идејни пројекат организације грађења, разрада детаља дрвене кровне конструкције и трајност и заштита дрвета друштвеног објекта на локацији „Нови градски центар“ у Бору“. Докторске студије на Грађевинском факултету у Београду, на Одсеку за конструкције, уписала је 2011. године и положила све испите са просечном оценом 9.50.

Дана 10. маја 2011. године, засновала је радни однос на Институту за рударство и металургију у Бору, на месту истраживач приправник. Дана 19. марта 2015. године изабрана је у звање истраживач сарадник.

Као аутор и коаутор до сада је публиковала 20 радова на домаћим и међународним скуповима. Највећим делом, ови радови представљају резултат реализације научно-истраживачких задатака обављених у оквиру активности Института за рударство и металургију у Бору, односно током учешћа у научно истраживачком и технолошком пројекту Министарства за науку и технолошки развој, број 37001, са темом: Утицај рударског отпада из РТБ-а Бор на загађење водотокова са предлогом мера и поступака за смањење штетног дејства на животну средину.

На Институту за рударство и металургију Бор, пре свега у оквиру бироа за пројектовање Мега, активно је учествовала у изради пројектне документације за домаће и стране Инвеститоре. У досадашњој пракси има више од 50 пројеката, техничких контрола пројеката и техничких пријема објеката.

Кандидат се служи енглеским језиком. Користи компјутерске програме од општег и стручног значаја. Сандра Гушевац живи у Бору.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Сандра Гушевац
Број индекса 902/2011

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Својства зелених бетона са агрегатом од бакарне шљаке из Рударско
- топионичарског басена „Бор“

*резултат сопственог истраживачког рада.

*да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа.

*да су резултати коректно наведени.

*да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, 30.06.2023.

Потпис аутора

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора _____ Сандра Гушевац _____

Број
индекса _____ 902/2011 _____

Студијски
програм _____ Грађевинарство _____

—

Наслов рада _____ Својства зелених бетона са агрегатом од бакарне шљаке из
Рударско-топионичарског _____ басена
„Бор“ _____

Ментор _____ Проф. др Димитрије Закић _____

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

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

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

У Београду, 30.06.2023.

Потпис аутора

Изјава о коришћењу

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

Својства зелених бетона са агрегатом од бакарне шљаке из Рударско-топионичарског басена „Бор“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање. Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, 30.06.2023.

Потпис аутора

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